



中国真空学会
CHINESE VACUUM SOCIETY



中国真空学会2023学术年会

论文集

主办单位：中国真空学会
承办单位：中山大学
广东省真空学会

中国超高真空获得技术领先者

一体化磁悬浮分子泵

中国首台套·核心技术自主可控

高性能涡轮动静叶片设计

高强度铝合金涡轮材质制造

整体转子精密加工

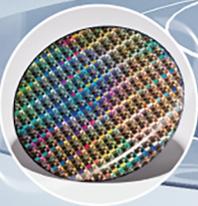
高精度位移传感器设计

无位置传感器高速电机制造及控制

稀薄流态的真空性能仿真

磁悬浮轴承制造及控制

复杂转子系统动力学分析



晶圆制造前道工艺



真空镀膜



太阳能光伏



航空航天



性能优势

- 01 一体化设计，结构紧凑**
控制器与分子泵集成一体，任意角度安装，方便系统集成
- 02 大抽速、防沉积**
采用独特的抽气结构设计和电机控制，排气性能强劲，防沉积
- 03 高洁净、免维护、节能环保**
无摩擦，避免润滑和热损耗，洁净无油，免维护，节能环保
- 04 自动保护、防冲击、远程故障诊断**
集成智能管理系统，断电自动保护，冲击预警保护，远程故障诊断
- 05 满足定制化需求**
自主可控，可定制防腐、加热等功能，提供多种通讯方式供选择



公司总部：北京市海淀区中关村北二条13号(100190)
咨询热线：010-62561592(北京销售公司) 0755-26471661(深圳销售公司)
029-82682011(西安销售公司) 0512-68091015(苏州中科科仪)

传 真：010-62617951
网 址：www.kyky.com.cn
邮 箱：market@kyky.com.cn sales@kyky.com.cn

公司简介

北京金盛微纳科技有限公司为国家高新技术企业、中关村高新技术企业,中国真空学会理事单位,中国电子专用设备工业协会,中国微米纳米技术学会会员单位。主要从事半导体设备、微细加工设备的产品研制、设计开发、生产销售,并开展相关工艺的研究及应用。主要产品有:匀胶机(SC)、烘胶台(BP)、曝光机、刻蚀机(RIE、ICP、IBE)、等离子体淀积台(PECVD)、磁控溅射台(Sputter)、蒸发台、去胶机、溅射/刻蚀/淀积一体机、键合炉等。产品应用范围涉及微电子、光电子、LED、MEMS、传感器、平板显示、通讯等领域,主要用于科研机构、大专院校、生产企业和公司进行各种器件的研究、开发和批量生产。



IBE离子束刻蚀机



磁控溅射镀膜机



蒸发台



RIE反应离子刻蚀机



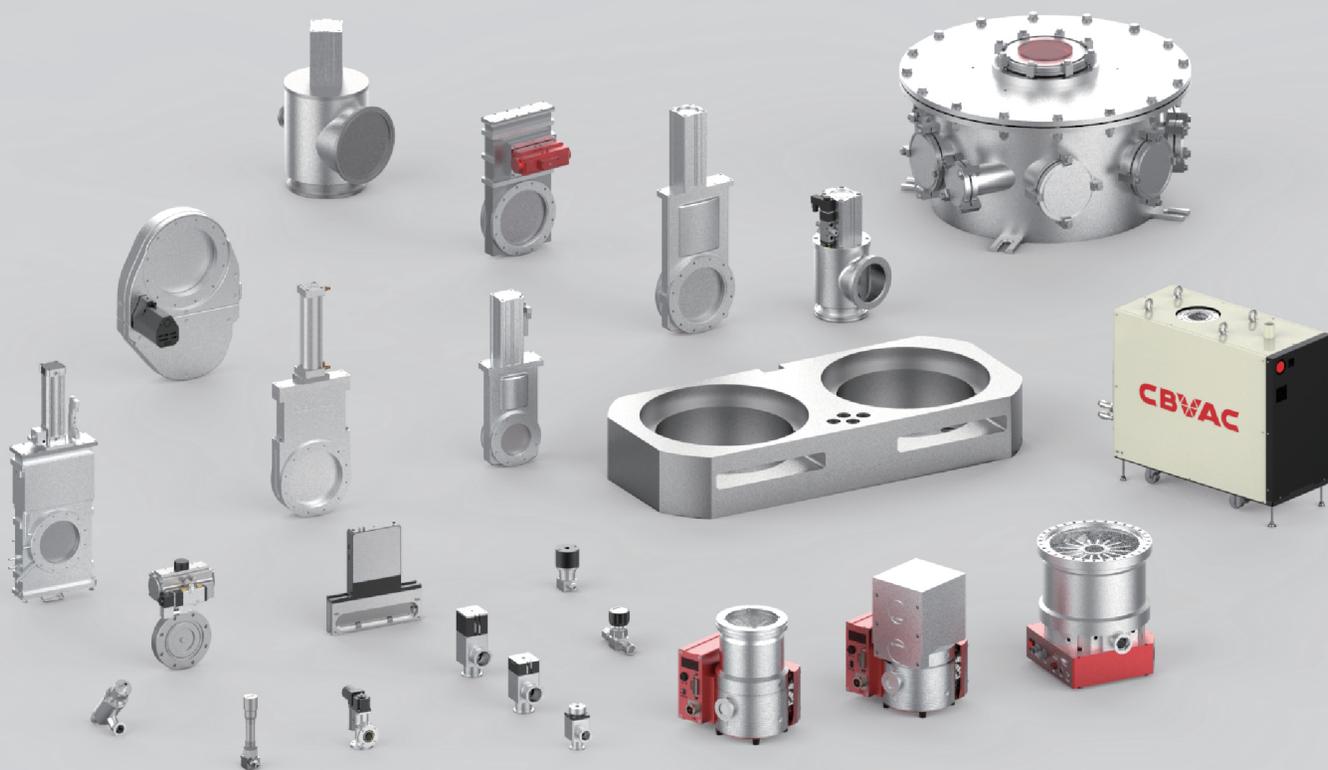
PECVD等离子体化学气相淀积台



ICP感应耦合等离子体刻蚀机

CBWAC

中科九微



以真空技术赋能高端制造，助力行业创新



真空阀
VACUUM VALVE



薄膜真空规
DIAPHRAGM VACUUM GAUGE



真空部件
VACUUM COMPONENT



真空腔体
VACUUM CHAMBER



真空泵
VACUUM PUMP

中科九微科技有限公司

川北真空科技（北京）有限公司

☎ 400-633-0299

📍 北京市大兴区兴海一街与博兴七路交叉口东100米

🌐 www.mm-tech.com.cn



微信公众号



真空超市



创建于1952年

专注真空七十年
持续创新谋未来



浙江真空设备集团有限公司

地址：浙江省台州市椒江区轮渡路389号

电话：0576-88223511 88224051

E-mail: zvev@sina.cn zvev@zvev.com

邮编：318000

传真：0576-88224056

Http://www.zvev.com



OSAKA VACUUM
株式会社大阪真空机器制作所

TGkine® · B

1700/2200M-B 3300/3400M-B 3800/4200M-B TGkineMI · B系列



TGkine® · B 系列特征

- 控制器，电源一体型
- 节省空间 · 省电设计 · 大排气速度设计/高流量设计
- 多种通信规格（可对应EtherCAT）
- 自主开发，磁悬浮轴承稳定
- 可设定低速运转模式
- 适配国际规格：CE/NRTL/SEMI-S2

安全·信赖

高性能/loT/稳定

磁悬浮轴承型涡轮分子泵

TG-M NEW SERIES

TG397M / TG427M / TG907M / TG1307M

大阪真空以保障设备的安全性能、提升设备的使用便捷度、实现设备的绿色环保为目标，通过真空泵以及相关技术和技能，为客户提供符合其先端生产工程、分析、R&D 等各个工作环节所要求的真空系统。方便客户在开发新技术的同时，对原先的技术加以灵活运用，确保设备利用的高度性和安定性，力求让客户在安心满意的前提下，长期使用我们的产品和服务。



株式会社大阪真空机器制作所
日本总公司

地址：日本大阪府大阪市中央区今桥三丁目3番13号
电话：81-6-6203-3981
传真：81-6-6222-3645
邮政编码：541-0042

株式会社大阪真空机器制作所
上海代表处

地址：上海市浦东新区花园石桥路33号
花旗银行大厦 23F 2311室
电话：021-6101-0360
传真：021-6101-0110
邮政编码：200120

上海欧卡真空机器有限公司

地址：上海市浦东新区
金桥出口加工区川桥路1510号T52-4-1F南A
电话：021-5031-1522
传真：021-5031-1523
邮政编码：201206

大会组织机构

大会组织委员会

主 席:

高鸿钧

共同主席:

邓少芝

副 主 席:

彭练矛、刘 明、赵红卫、邓少芝、董振超、李得天、张永明、蒋友荣

秘 书 长:

顾长志

副秘书长:

时东霞、顾 宁、侯士敏、张远波、田修波、张余洋

委 员: (按拼音排列)

陈 静、邓少芝、狄增峰、董振超、段 炼、范 平、干蜀毅、
高鸿钧、顾 宁、顾长志、郭建东、郭太良、韩高荣、韩建华、
侯士敏、胡 征、蒋友荣、李得天、李争显、林 红、刘 明、
刘冰冰、刘国青、刘彭义、刘秋兰、刘益春、卢耀文、潘 峰、
彭练矛、任 妮、邵正平、孙立臣、孙立涛、田修波、王宏兴、
王琼华、王小军、王晓冬、肖旭东、徐法俭、许宁生、严 辉、
殷立新、张 勇、张 平、张永明、张振厚、赵红卫、周 鹏

大会学术委员会

学术委员会主席: 高鸿钧

分会主席:

- 1、真空科技与工程分会主席: 王晓冬、张振厚、孙立臣
- 2、表面科学与应用分会主席: 董振超、郭建东
- 3、薄膜科学与技术分会主席: 潘 峰
- 4、纳米科学与技术分会主席: 顾长志、彭练矛
- 5、电子材料与器件、真空微纳电子学分会主席: 邓少芝
- 6、显示技术分会主席: 郭太良
- 7、真空外延材料与器件分会主席: 王新强
- 8、大科学装置分会主席: 赵红卫

大会特邀报告

PL01	大规模原子制造研究的纳米前沿	许宁生	[1]
PL02	真空技术与航天工程应用	李得天	[1]
PL03	研发生物医用微纳材料，推进血管 信息与健康工程	顾宁	[2]
PL04	宽禁带氧化物半导体载流子调控与 应用	刘益春	[2]

分会场报告

A 真空科技与工程/第十六届国际真空科学与工程应用学术会议 (VSEA-16)

分会邀请报告

OA01	气体通过漏孔流动状态的研究	闫荣鑫	[4]
OA02	氢燃料电池动力系统氢气循环 泵	孙杰	[4]
OA03	纳米氮化钛薄膜对高频陶瓷窗片二 次电子发射率的影响研究	赵毅红、李芳芳、王博锋、叶成聪、 缪雨龙、陈海波、陈荣发	[5]
OA04	机器学习在真空镀膜技术中的应用	杜广煜	[7]
OA05	高能脉冲等离子体电源及精密真空 镀膜装备	田修波、靳朋礼、肖德志、王新宇、 巩春志	[7]
OA06	真空干泵内稀薄气体跨流态输运过 程的耦合计算方法研究	王桂鹏、王晓明、刘鑫宇、谢元华、 刘坤、巴德纯	[8]
OA07	真空计量检测技术的产业化发展	王欢	[9]
OA08	EAST 托卡马克装置真空及壁处理 技术研究	左桂忠、胡建生	[9]
OA09	航天器用橡胶密封设计及寿命预测 技术研究	史纪军、冯振华、孙立臣、索双富、 王莉娜、张子罡、刘恩均、任国华	[10]
OA10	氢氦同位素工艺研究中的真空技术 应用	杨洪广	[10]
OA11	真空镀膜工艺的过程控制与应用	蔺增、刘万锁、孙嘉琦、王健	[11]
OA12	量子真空计量技术研究	成永军、董猛、孙雯君、吴翔民、 李得天	[11]
OA13	超灵敏度检漏技术进展及应用	魏萌萌、董云宁、卢耀文、王汐月、 齐京	[12]
OA14	空间站与空间环境模拟技术 Space Station and Space Environment Simulation Technology	张春元、许忠旭、张广慧	[13]

- | | | | |
|------|------------------------|---------------------------------|------|
| OA15 | 深圳高重频自由电子激光装置中的真空技术 | 尉伟、赵峰、常仁超、张浩、林涵文、魏建平、余永、杨家岳、张未卿 | [14] |
| OA16 | 面向国家重大需求的前沿真空技术 | 王旭迪、毕海林、曹青、吴俊、张俊 | [15] |
| OA17 | 压水堆核电站化容系统氦检漏方法的选择及其应用 | 吴文昊、张红星、睦霄翔、刘步良、孙加进 | [15] |
| OA18 | 基于复旦大学基于加速器的离子束技术与应用研究 | 施立群、沈浩、张斌、王旭飞、米召红、张伟 | [16] |

分会口头报告

- | | | | |
|------|---|------------------------------|------|
| OA19 | 一种腰部为高斯曲线的罗茨真空泵型线设计及分析 | 李正清、王小军、杨建斌、李小金、刘筱文、韩仙虎、蔡宇宏 | [17] |
| OA20 | 国产低温泵的发展现状 | 邓家良、武义锋、曾环、杨杨、冯欣宇 | [18] |
| OA21 | TiZrV 薄膜吸附 CO ₂ 过程的分子动力学模拟 | 臧浩天、王晓冬、杜广煜、宋欣铭、于广琛 | [18] |
| OA22 | 超高真空环境下的低温辐射计热链与热屏蔽设计 | 宋春尧、杨传森、储隽伟、范纪红、陈俊儒、郭宇扬、卢耀文 | [19] |
| OA23 | 基于卷积神经网络的多弧离子镀膜设备故障诊断研究
Convolutional Neural Network-Based Fault Diagnosis for Multi-Arc Ion Plating Equipment | 赵执鹏、陈志立、梁笑喻、关钟毓、王成斌、杜广煜 | [20] |
| OA24 | Ag-Cu-Sb 体系中二元合金的活度计算和真空分离理论研究 | 李青松、田阳 | [22] |
| OA25 | 减重孔对罗茨泵性能影响的研究 | 马凯、李丹童、谌小倩、王潇、何志龙 | [22] |
| OA26 | 氧化镁真空碳热还原过程中 KF 行为分析 | 马廷壮、余镨、田阳、梁栋、王立鹏、吴数吉 | [23] |
| OA27 | 基于真空低温封装的科学级 CCD 相机研制 | 冯琪、张鸿飞、张军、曾峰、朱杰、蒋维捷、石鑫、朱瑞、王坚 | [36] |
| OA28 | 140GHz 回旋管电子枪阴极温度均匀性分析 | 杨明哲、王小霞、孟鸣凤、杨晨、高察、罗积润 | [37] |
| OA29 | 基于 DSMC 方法的轰击靶材试验羽流场数值模拟 | 崔寓溟、郭崇武、张子罡、齐嘉东 | [38] |
| OA30 | 基于 CFD 的改良右心室流出道手术血流动力学优化研究 | 徐博、王晓冬 | [39] |

- | | | | |
|------|--|-------------------------------|------|
| OA31 | 基于COMSOL多物理场仿真软件对聚变装置偏滤器泵送系统抽气能力的模拟研究 | 张一聪、左桂忠、毕海林、陈肇玺 | [40] |
| OA32 | 铅阳极泥真空气化高效分离砷-清洁制备As ₂ O ₃ 的研究 | 李绍雄、高哲、孔祥峰、杨斌、范凯、伊家飞 | [41] |
| OA33 | 真空气化-冷凝协同处理高砷铅阳极泥高效富集砷的研究 | 高哲、范凯、孔祥峰、杨斌、伊家飞、李绍雄 | [41] |
| OA34 | 晶体结构对金属材料溅射产额影响的分子动力学模拟分析 | 黄海龙、王晓冬、赵坤 | [42] |
| OA35 | 贵铅真空蒸馏脱砷及富集贵金属M-MIVM模型研究 | 杨志成、孔令鑫、杨斌 | [43] |
| OA36 | 喷嘴膨胀状态对水蒸汽喷射器内部流动行为的影响 | 张国玉、王晓冬、匡永麟 | [43] |
| OA37 | 磷化铟半导体废料清洁高效回收再生铟和磷研究 | 张嘉鹏、孔令鑫、杨斌、 | [44] |
| OA38 | 基于稀疏分解理论的EAST分子泵状态监测研究 | 贾凯、袁啸林、左桂忠、陈跃、胡建生 | [45] |
| OA39 | 从复杂铅矿中制取硫化铅的新工艺研究 | 杨欢、孟朝松、卫晓晖、熊恒 | [46] |
| OA40 | EAST装置强磁场下的直流辉光放电清洗实验研究 | 余耀伟、孙浩、王超、曹斌、左桂忠、胡建生 | [46] |
| OA41 | 区熔锗渣真空蒸馏法回收制备高纯锗 | 卫晓晖、孟朝松、杨欢 | [47] |
| OA42 | In-Pb合金真空蒸馏分离及气液平衡研究 | 陈亮亮、王亚楠、孔令鑫 | [48] |
| OA43 | EAST装置等离子体放电真空室抽气系统抽速标定及应用 | 黄明、元京升、左桂忠、庄会东、曹斌、余耀伟、徐宏亮、胡建生 | [48] |
| OA44 | 现代飞行器燃油系统气密检测技术 | 宁东、李红才、宋延双 | [49] |
| OA45 | EAST装置散裂弹丸注入技术研发及破裂缓解实验研究 | 元京升、左桂忠、胡建生 | [54] |
| OA46 | 钢基二元及三元合金真空蒸馏理论及实验研究 | 庞俭、孔令鑫、杨斌 | [55] |
| OA47 | 新型吸附剂泵在EAST偏滤器粒子排出的应用研究 | 王超、余耀伟、曹斌、左桂忠、胡建生 | [56] |
| OA48 | Bi-Sb二元合金真空蒸馏相平衡模型预测及实验研究 | 王亚楠、孔令鑫 | [57] |

B 表面科学与应用**分会邀请报告**

OB01	金属表面功能分子反应选择性机制研究	杜世萱	[58]
OB02	表面体系中的低维拓扑态	冯宝杰、陈岚、吴克辉	[59]
OB03	TiO ₂ 光催化表面化学	黄伟新	[60]
OB04	基于低维半导体异质结光电探测器的研究	黄鑫、郭阳、杜硕、顾长志	[60]
OB05	Real-space BCS-BEC crossover in FeSe monolayer	Shuaihua Ji	[61]
OB06	新型二维原子晶体材料 Si ₉ C ₁₅ 的构筑	李更、高鸿钧	[62]
OB07	利用外延方法构筑 1T-TiTe ₂ /1T-TSe ₂ 范德华转角异质结	赵伟民、朱立、聂正蔚、李启远、汪琪玮、窦立国、胡聚罡、洗乐德、孟胜、李绍春	[63]
OB08	复杂氧化物界面——电荷、晶格耦合作用的研究	孟梦、张坚地、郭建东	[63]
OB09	对几种超导薄膜的角分辨光电子能谱研究	彭瑞	[64]
OB10	分子界面的超快相干电荷转移	谭世惊	[65]
OB11	锡在硅表面形成的二维三角晶格的非传统超导性质	明方飞	[65]
OB12	笼母超导体中关联电子态的研究	杨海涛、高鸿钧	[66]
OB13	Emergent Unusual Ferromagnetism and Insulator-Metal Transition in Doped Ultrathin Ruthenates	Jiandi Zhang、(张坚地)	[67]
OB14	基于亚纳米分辨光谱成像的分子间量子相干传能研究	张杨	[68]
OB15	二维磁性材料的MBE生长及二维磁性/超导异质结构筑	钟定永	[69]

分会口头报告

OB16	5d 过渡金属氧化物中的应力梯度及非互易电荷输运行为	谷明辉、孟梦、郭建东	[70]
OB17	非易失电调控二维双极性磁性半导体 VSeF 的自旋极化	李玉辉、邓俊、张艳芳、金鑫、董文翰、孙家涛、潘金波、杜世萱	[71]
OB18	二维过渡金属硫族化合物本征缺陷的识别与调控	卢建臣、高蕾、蔡金明	[71]

OB19	真空环境下氯化钛的激光致热解吸及烧蚀特性研究	马明旺、王磊、王杏	[72]
OB20	Rational Design 2D Functional Heterojunctions and Database Construction for Ionic Layered Materials	潘金波、李玉辉、邓俊、张艳芳、杜世萱	[73]
OB21	分子吸附构型对脱磺酰基反应的影响	王俊波、牛凯丰、朱华明、朱俊发、Jonas Björk、李青、迟力峰、	[73]
OB22	复合 zigzag 结构 CrN 涂层的设计制备及冲蚀性能	王丽、王振玉、陈仁德、柯培玲、汪爱英	[74]
OB23	金表面烃类的选择加氢反应	邬宗芳、王芳、滕波涛、黄伟新	[75]
OB24	几种有机功能分子在 Au(111)表面的物化行为	熊玮、卢建臣、蔡金明	[75]
OB25	基于针尖增强单分子拉曼光谱的接触依赖化学增强与淬灭效应	杨犇、陈功、Atif Ghafoor、张宇帆、张先彪、李航、董小茹、汪瑞谱、张杨、张尧、董振超、	[76]
OB26	One-Dimensional van der Waals Polymers with Nonlinear Optical Performance Approaching Theoretical Upper Limit	Jingyu Yang、Jun Deng、Jinbo Pan、Yongqian Zhu、Yan-Fang Zhang、Yuhui Li、Jia-Tao Sun、Shixuan Du	[77]
OB27	Influence of rare earth doping on the hydrogen absorption properties of Zr7V5Fe alloy	Shuang Yang、Zifeng Luo、Guo Yang、Lijun Lv、Linhua Xu、Haiyan Leng、Xingbo Han、Jianhui Zhu、Pengfei Zhu	[78]
OB28	台阶辅助表面合成具有周期性双空位孔洞石墨烯纳米条带	尹若庭、王佳宁、邱振林、孟杰、徐慧敏、王政亚、梁逸凡、赵新静、马传许、谭元植、李群祥、王兵	[80]
OB29	Atomistic Simulations of Graphene Origami: Dynamics and Kinetics	张艳芳、张盼盼、贾海洪、杜世萱	[81]

C 薄膜科学与技术

分会邀请报告

OC01	磁化动力学的声表面波调控	宋成	[82]
OC02	等离子辅助原子层沉积 Pd-Cu 及其在二氧化碳加氢中的应用研究	刘忠伟、田旭、陈强、桑利军	[83]
OC03	Superlubricity of carbon based films	Bin Zhang	[83]
OC04	碱金属处理提升 CIGS 薄膜特性及其光伏器件性能的研究	刘玮	[84]
OC05	类富勒烯碳薄膜制备及空间摩擦学性能研究	高凯雄、张斌、张俊彦	[85]
OC06	跨环境低摩擦橡胶动密封新技术	强力	[85]

分会口头报告

- OC07 微纳功能薄膜原子层沉积 (ALD) 精准合成及性能研究 李建国、张王乐、秦利军、龚婷、惠龙飞、冯昊 [87]
- OC08 高 Z 材料基底上硅化镀膜行为研究 管艳红、左桂忠、孟献才、徐伟、胡建生 [88]
- OC09 高功率脉冲磁控溅射技术低温制备 Ti₃AlC₂ MAX 相涂层 李忠昌、周广学、袁江淮、柯培玲、王振玉、汪爱英 [89]
- OC10 电子束设备蒸镀铝膜工艺的研究
Study on aluminum film evaporation using electron beam equipment 付学成、瞿敏妮、权雪玲、乌李瑛、王英 [89]
- OC11 氮基硬质涂层强韧化和变形机制研究 周晟昊、汪爱英 [90]
- OC12 基于离子能量和离子通量调控的类金刚石超硬薄膜生长机理研究 王明磊、林国强 [91]
- OC13 类金刚石碳涂层与 WC 基硬质合金复配的磨蚀行为研究 张应鹏、王群、陈仁德、郭鹏、柯培玲、汪爱英 [91]
- OC14 Cr-Al-C 涂层的原位相变行为及其导电耐蚀性能的研究 马冠水、王振玉、汪爱英 [92]
- OC15 双源蒸发制备锌镁合金镀层 于瀚洲、沈杰 [93]
- OC16 反常置换反应制备稳定的室温范德华磁性薄膜 朱文轩、宋成、王乾、潘峰 [93]
- OC17 交错磁体 RuO₂ 薄膜的制备与电磁输运测试 白桦、潘峰、宋成 [94]
- OC18 面向光电子器件应用的真空气相钙钛矿薄膜制备 谢伟广、林东旭、詹镇业、刘彭义 [95]
- OC19 Mo/N 共掺 TiO₂ 纳米管阵列的制备及其光电性能 丁尧昕、薛丹妮、沈杰 [96]
- OC20 基于瑞利波驱动增强的新型适配体声表器件 张健磊、陶然、廖嘉辉、付琛、罗景庭 [97]
- OC21 基于 LiNbO₃/SiC 压电异质结构的高性能漏纵波声学射频器件 刘培森、傅肃磊、苏荣宣、徐惠平、肖博远、宋成、曾飞、潘峰 [98]
- OC22 基于 LNOI 的瑞利消除窗口调制及无杂散大带宽滤波器研究 徐惠平、傅肃磊、潘峰 [98]
- OC23 PbS 量子点复合 MXene 红外光电性能研究 李冲、陶然、张宝晖、付琛、罗景庭 [99]
- OC24 高界面自旋通透性的自旋同质结实现高效自旋-电荷转化 韩磊、王钰言、朱文轩、宋成、潘峰 [100]

OC25	等离子体渗-镀复合处理技术在齿科种植体上的应用研究	孙飞、巴德纯、蔺增	[100]
OC26	TiZrNbTaMoN 高熵氮化物涂层的设计制备及腐蚀行为研究	杨葳、汪爱英	[101]
OC27	衬底温度对电阻蒸镀 Ti 膜形貌及力学性能的影响	王杏、马明旺、万瑞芸、谈效华	[102]

D 纳米科学与技术

分会邀请报告

OD01	氮化物半导体自旋调控及其器件应用	吴雅苹、吴雪峰、吴启鹏、李煦、吴志明、康俊勇	[103]
OD02	金属 WSe ₂ 界面耦合及能带结构调控研究	秦志辉	[104]
OD03	Programming spatial light modulations using mobile electrons	Ming Yang 、 Weitao Dai 、 Hyungwoo Lee、 Jung-Woo Lee、 Chang-Beom Eom、 Cheng Cen	[104]
OD04	Weyl Node Annihilation in Co ₃ Sn ₂ S ₂ Evidenced by Spin-Polarized Ultrafast Dynamics	赵继民	[105]
OD05	精准构筑低维量子材料	王世勇	[106]
OD06	纳米和埃米尺度上的声子测量	高鹏	[107]
OD07	单原子分辨电子能量损失谱分析	李傲雯、许名权、周武	[108]
OD08	碲原子沉积对单晶表面重构的影响	刘衍朋、张尔文	[109]
OD09	功能氧化物薄膜的离子调控及新物性探索	鲁年鹏	[110]
OD10	First-principles calculations for Dzyaloshinskii-Moriya interaction and its application for DMI-torque MRAM	杨洪新	[111]
OD11	无机、有机笼目体系的反铁磁拓扑物态及调控	孙家涛	[112]
OD12	二维器件的扫描探针研究	薛加民、孙新祚、吕铭、王斌斌、汪康、蔡幸福	[112]
OD13	功能化原子力显微技术及其低温磁场条件下的拓展与应用	程志海	[113]
OD14	非中心对称二维单晶材料通用制备研究	徐小志	[114]
OD15	基于 SPM 技术的纳米石墨烯的精准构筑及性能调控	蔡金明	[114]

- OD16 基于二维原子晶体的纳电子器件的构建及其电子学特性 鲍丽宏、高鸿钧 [115]
- OD17 表面手性自组装与偶联反应的 STM 研究 陈婷、王栋、万立骏 [116]
- 分会口头报告**
- OD18 Discovery and construction of surface kagome electronic states induced by p-d electronic hybridization in $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ Qi Zheng(郑琦)、Li Huang、Xianghua Kong、Yuqing Xing、Hui Chen、Yan Li、Zhixin Hu、Shiyu Zhu、Jingsi Qiao、Yu-Yang Zhang、Hai-Xia Cheng、Zhihai Cheng、Xianggang Qiu、Enke Liu、Hechang Lei、Xiao Lin、Ziqiang Wang、Haitao Yang、Wei Ji、Hong-Jun Gao [118]
- OD19 Selective C-H bond activation on surface and enabled formation of N-doped graphene nanoribbons Yixuan Gao、Li Huang、Yun Cao、Marcus Richter、Xinliang Feng、Shixuan Du、Hong-Jun Gao、 [119]
- OD20 Intrinsically Honeycomb-Patterned Hydrogenated Graphene Lei Tao、Yang Song、Kai Qian、Xiao Lin、Shixuan Du、Hong-Jun Gao [120]
- OD21 Continuously tunable ferroelectric domain width down to the single-atomic limit in bismuth tellurite Cong Wang、Wei Ji [120]
- OD22 Deep learning enabled topological design of exceptional points Peng Fu、Wenze Lan、Leyong Hu、Shuo du、Changzhi Gu [121]
- OD23 Observation of topological edge states and field distribution in graphene-like photonic crystals Wenze Lan、Baoli Liu [122]
- OD24 Imaging correlated insulating states and topological states in 2D heterostructure 姜宇航 [123]
- OD25 “笼目”晶格超导体配对密度波的研究 陈辉、杨海涛、高鸿钧 [123]
- OD26 Visualizing spatial evolution of electron-correlated interface in two-dimensional heterostructures 武旭、乔婧思、季威、王业亮 [124]
- OD27 含色心的高质量一维金刚石单晶锥的制备研究 杨兵、卢嘉琪、黄楠、姜辛 [125]
- OD28 Local gate enhanced correlated phases in twisted monolayer-bilayer graphene 毛金海 [126]
- OD29 利用极低温超高真空 STM 研究铁基超导体表面两类褶皱 曹路、刘文尧、李更、丁洪、高鸿钧 [127]

OD30	转角单-双层石墨烯中电子晶体和拓扑物相的空间成像	王政文、李思宇、姜宇航、毛金海	[127]
OD31	LiFeAs 中实现涡旋马约拉纳零能模	朱诗雨、孔令元、曹路、丁洪、高鸿钧	[128]
OD32	Prediction of Two-Dimensional Quantum Topological Materials Based on Metal Organic Frameworks	张礼智	[129]
OD33	范德华超导/铁磁/超导异质结中远程趋肤的约瑟夫森电流	胡国静、王昌龙、王莎莎、张颖、冯艳、王志、牛谦、张振宇、向斌	[130]
OD34	关联电子体系的实空间电子局域组装与操控研究	董皓宇、戴佳琦、耿燕燕、雷乐、季威、程志海	[131]
OD35	笼目超导体中单向条纹电荷序的发现及其鲁棒性	耶郁晗、胡彬、陈辉、高鸿钧	[132]
OD36	化学掺杂笼目超导体扫描隧道显微镜研究	韩相和、黄子豪、赵振、陈辉、杨海涛、高鸿钧	[132]

E 电子材料与器件、真空微纳电子学

分会邀请报告

OE01	片上红外光谱分析器件	王肖沐	[134]
OE02	基于难熔金属钨钼的光电协同电子发射纳米材料	沈岩、许宁生、邓少芝	[134]
OE03	二维超快闪存器件与应用	刘春森	[135]

分会口头报告

OE04	范德华异质结电子器件研制及高密度集成研究	刘利伟、许宁生、邓少芝、周鹏	[137]
OE05	基于电化学聚合的高性能多孔有机聚合物薄膜忆阻器	刘辉、陶友、李勇军、孙连峰	[136]
OE06	基于软击穿氧化硅的水平隧穿结电子源	魏贤龙、李志伟、詹芳媛、杨威、吴功涛	[137]
OE07	六硼化镧纳米锥冷阴极点电子源的研究及其在 TEM 中的应用	唐帅、唐捷、秦禄昌	[138]
OE08	一种铼钨基浸渍敷膜钼钨阴极的逸出功	王小霞、杨明哲、孟鸣凤、王兴起、李云、张琪、赵青兰	[139]
OE09	硫系相变材料与可调谐色彩滤光片	何强	[140]
OE10	多功能范德华铁电异质结双栅耦合器件	靳吉友、李勇军、孙连峰	[140]
OE11	碳纳米管冷阴极太赫兹回旋管及成像系统研究	袁学松、张宇、毛瑾莹、江昊昌、鄢扬、邓少芝	[141]

OE12	Ka 频段 1kW 脉冲空间行波管的研制	周朝阳、孙萌、成红霞、胥辉、刘逸群	[141]
------	----------------------	-------------------	-------

F 显示技术

分会邀请报告

OF01	连续光学变焦的 2D/3D 显微技术	王琼华、刘超、储繁	[143]
OF02	高时空分辨太赫兹成像技术及研究进展	王天武	[143]
OF03	低功耗电子纸的器件机理与未来应用	楊柏儒	[144]
OF04	Holographic Waveguide Display Technology	Yuning Zhang	[145]
OF05	反射式电子纸显示	周国富、唐彪、袁冬、孙海玲、蒋洪伟	[145]

分会口头报告

OF06	颜色-亮度独立可调的氮化镓-钙钛矿叠层电致发光器件	李宗涛	[146]
OF07	Beam deflector based on dielectric metasurfaces	Kangkang Chen、Enguo Chen、Yun Ye、Sheng Xu、Kaixin zhang、Jie Sun、Qun Yan、Tailiang Guo	[147]
OF08	Controlled synthesis method of sulfide nanorod	Longwen Yang、Yun Ye、Enguo Chen、Sheng Xu、Qun Yan、Tailiang Guo	[148]
OF09	钙钛矿量子点的原位直接光刻	杨高岭、张萍萍、钟海政	[149]
OF10	由超快扫描二极管激光器制造的高性能全溶液氧化物薄膜晶体管阵列	徐萌、李喜峰、张建华	[151]
OF11	基于共形衍射原理的彩色球面全息显示系统	侯页好、黄倩、王迪、王琼华	[151]
OF12	Augmented reality display combining optical waveguide and retinal scanning	Zijian Lin、Enguo Chen、Yun Ye、Sheng Xu、Qun Yan、Tailiang Guo	[152]
OF13	富氢缓冲层对 IGZO 薄膜晶体管性能的影响研究	彭聪、温盼、黄慧雪、李喜峰、张建华	[153]

G 真空外延材料与器件

分会邀请报告

OG01	氮化镓同质外延生长研究	王国斌、徐科	[155]
OG02	金刚石的合成及其光电效应	秦金旭、林超男、杨西贵、杨珣、单崇新	[155]
OG03	AlN 基氮化物宽禁带半导体材料外延研究	黎大兵、孙晓娟、陈洋、贲建伟、蒋科、石芝铭	[156]

OG04	极性面上微弱极化电场 LED 制备研究	张源涛、邓高强、张立东、左长财	[157]
OG05	GaN 基红光 LED 材料外延及器件制备	王新强、陈兆营、盛博文、袁泽兴、刘放、王涛、梁文骥、赵春雷、闫龙、Jason Hu、郭世平、葛惟昆、沈波	[158]
OG06	氧化镓半导体器件	龙世兵、徐光伟、赵晓龙、侯小虎	[159]
OG07	高质量氧化镓外延材料生长及高功率器件制备研究	张雅超、张涛、冯倩、周弘、张进成、郝跃	[160]
OG08	高效率 RGB 三色氮化镓基 Micro-LED 生长与器件研究进展	刘斌、许非凡、陶涛、庄喆、黄凯、张荣	[161]
OG09	蓝宝石图形衬底诱导的三维微纳结构 GaN 外延生长	汪莱、王珣、郝智彪、罗毅	[162]

H 大科学装置

分会邀请报告

OH01	HEPS 真空系统研制进展	董海义、宋洪、邓秉林、刘佳明、刘顺明、杨奇、田丕龙、王鹏程、孙晓阳、朱邦乐、郭迪舟、李琦、王徐建、张磊、马永胜、黄涛、孙飞、杨雨晨、刘佰奇、彭晓华、何平	[163]
OH02	SHINE 加速器真空系统	刘以勇、殷立新、赵焯梁、汤启升、文雍梅	[163]
OH03	深圳产业光源加速器真空系统	刘鹏飞	[164]
OH04	深圳中能高重复频率 X 射线自由电子激光装置-低温超导技术	何超峰	[164]
OH05	武汉光源 1.5GeV 储存环真空系统设计	魏耕、李健、江仲开	[164]

分会口头报告

OH06	磁约束核聚变装置大型外真空杜瓦系统设计研究	杨庆喜、徐皓、李宁、陈肇玺、余清洲	[166]
OH07	结合大科学装置的氦原子精密谱测量	孙羽、胡水明	[166]
OH08	CEPC vacuum system	马永胜、董海义、王鹏程、刘佳明、刘佳明、谭彪、孙飞、黄涛	[167]
OH09	自由电子激光装置束流线上的屏蔽铜圈结构设计	赵峰、常仁超、张浩、林涵文、魏建平、尉伟、余永、杨家岳、张未卿	[168]

OH10	HIAF 强辐射区真空系统设计及密封研究	柴振、蒙峻、罗成、杨伟顺、魏宁斐	[168]
OH11	一种单侧压封废束桶束窗的设计及热结构分析	林涵文、张浩、杨家岳、尉伟、黄礼明、张未卿、鄂得俊、陶凯、赵峰、魏建平、常仁超	[169]

张贴报告

A 真空科技与工程/第十六届国际真空科学与工程应用学术会议 (VSEA-16)

ZTA01	Analysis and Research of Arsenic Thermal Cracker Based on DSMC	Yu Guangchen、Wang Junli、Wang Xiaodong	[170]
ZTA02	Analysis and Research of Hydrogen Dissociation Based on DSMC	Wang Junli、Wang Xiaodong、Yu Guangchen	[171]
ZTA03	Analysis of shield sleeve eddy current Loss and internal cooling system based on shield motor for vacuum pump	Jiao Feng、Zhang Zhijun	[171]
ZTA04	基于分子动力学与人工神经网络的掺硅类金刚石薄膜纳米压痕模拟 Nanoindentation Simulation of Silicon - doped Diamond -like Carbon Films Based on Molecular Dynamics and Artificial Neural Network	陈志立、刘宇泰、司文、李全伟、杜广煜	[172]
ZTA05	Effect of fretting wear characteristics and damage morphology on insulation performance of insulated bearing	Quanwei Li、Zhili Chen、Yutai Liu、Wen Si、Guangyu Du	[174]
ZTA06	涡轮分子泵结构优化研究	匡永麟、王晓冬	[174]
ZTA07	基于 TPMC 的新型变叶片组合叶列的精准建模与计算	孙坤、李坤、王成、汪森辉、邓海顺、张世伟	[175]
ZTA08	扁线油冷电机损耗仿真分析	刘奕新、张志军	[176]
ZTA09	铅阳极泥真空气化高效分离砷-清洁制备 As ₂ O ₃ 的研究	范凯、高哲、孔祥峰、杨斌、伊家飞、李绍雄	[177]
ZTA10	航天材料真空释气特性测试技术与装备研究	王军伟、李国华、刘洋洋、汪志伟	[177]
ZTA11	蒸汽喷射器喷嘴膨胀状态对引射系数的影响	刘静雯、王晓冬	[178]
ZTA12	罗茨真空干泵热分布测试及温控方法研究	王宇、王桂鹏、高满堂、林大兴、谢元华、刘坤、巴德纯	[179]
ZTA13	高真空干泵牵引级转子运转态形变及轴系振动特性研究	刘鑫宇、王桂鹏、王晓明、谢元华、巴要帅、刘坤、巴德纯	[180]

ZTA14	基于螺旋等距面理论的螺杆真空泵转子间隙控制方法研究	余华明、王桂鹏、孙浩、谢元华、巴要帅、刘坤、巴德纯	[180]
ZTA15	电真空器件真空排气系统的组成与发展 Composition and Development of Vacuum Exhaust System	李润霞、张少雷、韩永超、宋艳鹏、张吉峰	[181]
ZTA16	NEG 薄膜制备及抽气性能的实验研究	宋欣铭、王晓冬	[191]
ZTA17	低温真空环境实验模拟腔真空系统设计	郎嘉琪、张秀平、吴俊峰、胡继孙、赵盼盼	[192]
ZTA18	基于 DSMC 方法的复合分子泵在过渡流态下抽气性能研究	杜志华、王晓冬、匡永麟	[193]
ZTA19	样品存储水氧净化材料真空条件下吸附性能测试技术研究	王军伟、李国华、邵静怡	[193]
ZTA20	含时间与容积变量的氦质谱正压检漏方法与误差分析	马国辉、代国宝、沈伟、高铭、陈墨、史彦豪、李竹青、董荣昌、常景旺、陈芳浩、付松松	[194]
ZTA21	真空收集室质谱检漏技术	沈伟、马国辉、高铭、李佳杰、史彦豪、姜楠	[195]
ZTA22	热胀涂层孔隙特征对熔融钙镁铝硅酸盐腐蚀渗透行为的影响机制研究 Study on the mechanism of the influence of pore characteristics of thermally expanded coatings on the corrosion penetration behavior of fused calcium-magnesium-aluminum silicates	梁笑瑜、刘宇泰、赵执鹏、关仲毓、王传斌、杜广煜	[196]
ZTA23	工业用高温真空绝热管道的制备及性能分析	曲富饶、王晓冬	[198]
ZTA24	Harmonic Response Analysis of YSZ Coating Damping Performance Based on Half Power Bandwidth Method	Li Pinan、Liu Yutai、Du Guangyu	[198]
ZTA25	基于 CFD 的幼年人体上呼吸道局部狭窄流场分析及纳米级颗粒沉积情况研究	李鹏飞、王晓冬	[199]
ZTA26	EAST 装置差分抽气测量系统的设计	潘浩、余耀伟、黄明、赵胜波、左桂忠	[200]
ZTA27	罗茨真空干泵温度场测控系统设计与测试	来丽文、王桂鹏、王宇、倪伟明、谢元华、刘坤、巴德纯	[201]
ZTA28	干式螺杆真空泵转子动力学特性对啮合间隙的影响分析	林大兴、王桂鹏、倪伟明、巴要帅、谢元华、刘坤、巴德纯	[202]

ZTA29	螺杆真空泵间隙跨流态流动计算方法研究	王晓明、王桂鹏、程寅、来丽文、巴要帅、谢元华、刘坤、巴德纯	[203]
ZTA30	双螺杆真空泵转子啮合间隙设计及控制方法研究	孙浩、王桂鹏、佟英博、程寅、巴要帅、谢元华、刘坤、巴德纯	[203]
ZTA31	基于真空钎焊的火星采样返回容器密封性研究	卿刚、谢元华、迟小宇、王璘、章儒光、刘坤	[204]
ZTA32	EAST 托卡马克残余气体分析仪的真空修复	凡斌、潘浩、余耀伟、王超、曹斌、左桂忠、胡建生	[205]
ZTA33	MoS ₂ 类神经突触忆阻器的环境耐受性研究	秦江鹏、郭元浩、李建昌	[206]
ZTA34	Nd _{0.55} Li _{0.36} TiO ₃ 陶瓷的微纳结构研究	巴要帅、巴德纯	[206]
ZTA35	氦分子在 HDPE 薄膜间的渗透性研究	高铭、马国辉、沈伟、陈墨、李佳杰、郑兴	[207]
ZTA36	基于扩展有限元法的热障涂层裂纹扩展的热力耦合分析	刘宇泰、陈志立、司文、李全伟、杜广煜	[207]
ZTA37	金属增材制造技术在换热设备上的发展和应用	宁久鑫、黄海龙、王晓冬	[208]
ZTA38	一种粗锑定向除杂和制备前端高纯锑的新工艺	孟朝松、杨、欢、卫晓晖、许长一、曾元淋、熊、恒、杨、斌、徐宝强	[209]
ZTA39	载钨硅藻土低温吸放氢动力学研究	于广琛、王晓冬	[210]

B 表面科学与应用

ZTB01	电荷密度波聚合物中的电子态与振动态性质关联性的直接成像	吴莹莹、王政亚、祝翔、马传许、李斌、谭元植、谭世惊、王兵	[211]
ZTB02	Te 在 Cu(111)表面上的生长和电子结构表征	郭子洋、马晓川、谭世惊、王兵	[212]
ZTB03	高迁移率半导体 Bi ₂ O ₂ Se 中温度异常的表面晶格动力学	李佳德、朱学涛、郭建东	[213]
ZTB04	Wavelike electronic energy transfer in donor-acceptor molecular systems through quantum coherence	Fan-Fang Kong、Xiao-Jun Tian、Yang Zhang、Yao Zhang、Gong Chen、Yun-Jie Yu、Shi-Hao Jing、Hong-Ying Gao、Yi Luo、Jin-Long Yang、Zhen-Chao Dong、J.G.Hou	[213]
ZTB05	Visualizing dark exciton states in cyclic molecular structures by tip-enhanced photoluminescence	Shi-Hao Jing、Fan-Fang Kong、Yao Zhang、Yang Zhang、Zhen-Chao Dong	[214]
ZTB06	基于原子极化模型实现大尺寸金属针尖的拉曼散射模拟	崔杰、张尧、董振超	[215]

- ZTB07 利用单分子 TERS 光谱实现对局域场梯度的实空间成像 唐子翕、张尧、董振超 [216]
- ZTB08 通过匹配算法实现长链 DNA 分子 TERS 光谱的快速生成 朱路遥、张尧、董振超 [217]
- ZTB09 On-Surface Synthesis of Electron-Deficient Bisanthene Tetraimide 刘叶、迟力峰 [218]
- ZTB10 层状金属超原子晶体中的交织极化电荷序 邢淑雅、伍琳璐、王子禄、陈旭、程志海、郭建刚、王善才、季威 [218]
- ZTB11 Tip-induced bond weakening, tilting and hopping of a single CO molecule on Cu(100) Xiao-Ru Dong、Ben Yang、Rui Zhu¹、Rui-Pu Wang¹、Yang Zhang¹、Yao Zhang、Zhen-Chao Dong [219]
- ZTB12 针尖增强拉曼光谱活性针尖的自动化修饰方法 冒文杰、杨犇、董小茹、韩瑞麟、张杨、董振超 [220]

C 薄膜科学与技术

- ZTC01 高性能氧化镁次级发射层制备 李诚迪、邓涛、张杰 [222]
- ZTC02 卷绕真空热蒸发镀膜中金属蒸汽运输特性研究 马刚强、谢元华、郝明、鲁现航、高晨、刘坤 [226]
- ZTC03 真空热蒸发卷绕镀膜的成膜质量优化研究 杨胜权、谢元华、陈树雷、付云鹤、滕帅、李永晟、刘坤 [227]
- ZTC04 基于反应离子刻蚀的复合微纳制备工艺 谭世龙、杨帆、李锐豪、江绍基 [228]

D 纳米科学与技术

- ZTD01 Structure of Amorphous Two-Dimensional Materials: Elemental Monolayer Amorphous Carbon versus Binary Monolayer Amorphous Boron Nitride Xi Zhang、Yu-Tian Zhang、Yun-Peng Wang、Yu-Yang Zhang、Shixuan Du [229]
- ZTD02 Thermal transport of monolayer amorphous carbon and boron nitride Yi-Yang Yin、Yu-Tian Zhang、Yun-Peng Wang、Yu-Yang Zhang、Shixuan Du [230]
- ZTD03 First-principle study of the electronic structure of layered Cu₂Se Ju-Xia Yi、Rui-Zi Zhang、Yu-Yang Zhang、Shi-Xuan Du [230]
- ZTD04 基于 OAM 的多波段主动变焦超透镜 郑睿瑄、潘如豪、李俊杰、顾长志 [231]
- ZTD05 基于等离子激元增强的二维材料偏振光电探测器 白庆虎、黄鑫、顾长志 [232]

- ZTD06 Controlled synthesis method of sulfide nanorod Longwen Yang、Yun Ye、Enguo Chen、Sheng Xu、Qun Yan、Tailiang Guo [232]
- ZTD07 Direct synthesis of moiré superlattice through chemical vapor deposition growth of monolayer WS₂ on plasma-treated HOPG Zongnan Zhang、Xiaowen Zhou、Xinlong Zeng、Yaping Wu、Feiya Xu、Chunmiao Zhang、Xu Li、Zhiming Wu、Junyong Kang [233]
- ZTD08 拓扑半金属 Co₃In₂S₂ 的反常霍尔效应研究 吕森浩、潘禄禄、郭辉、何峻、杨海涛 [235]
- ZTD09 高质量 PtP₂ 晶体中的三维弱局域化和负磁阻效应 程秋振、余维琪、杨海涛 [235]
- ZTD10 厚度调制的铁磁半金属 EuB₆ 的运输性质研究 潘禄禄、解育岚、杨海涛 [236]
- ZTD11 Development of a cryogen-free sub-3K low-temperature scanning probe microscope by remote liquefaction scheme Ruisong Ma、Le Lei、Yuanzhi Huang、Yani Liu、Huan Shan、Li Liu、Qing Huan、Hong-Jun Gao [236]
- ZTD12 On-surface synthesis and edge states of NBN-doped zigzag graphene nanoribbons Yao Xiao、Xiao Chang、Li Huang、Yixuan Gao、Yubin Fu、Ji Ma、Huan Yang、Junzhi Liu、Xiaoshuai Fu、Xiao Lin、Xinliang Feng、Shixuan Du、Hong-Jun Gao [237]

E 电子材料与器件、真空微纳电子学

- ZTE01 基于喷墨印刷有机薄膜晶体管的压力传感器应用 王晓冬、刘正峰 [241]
- ZTE02 一种长寿命 La₂Hf₂O₇ 直热式阴极的研究 王兴起^{1、2*}、王小霞¹、罗积润¹、李云¹ [242]
- ZTE03 氧化铝钝化超薄 ITO 场效应晶体管电学性能研究 曹天凡、黎家兵、高庆国 [243]
- ZTE04 Ka 波段大功率宽带行波管耦合腔慢波结构研究 陈天培、季大习、令狐昌刚、陈扬 [244]
- ZTE05 超薄氧化铟锡场效应晶体管真空退火性能研究 黎家兵、曹天凡、高庆国 [244]
- ZTE06 Ka 波段千瓦级宽带大功率脉冲行波管的研制 周朝阳、孙萌、邹雯婧、胥辉、季大习、刘逸群 [245]
- ZTE07 6~18GHz 大功率脉冲行波管研制 许准、王源、贺小平、杨洪焱、胥辉、邹雯婧、季大习、梁田、张春晖、吴刚雄 [246]
- ZTE08 Ka 频段 170W 空间行波管输出输能系统设计 张颖、孙萌、何金梅、胥辉、陈平、刘颖博 [247]

ZTE09	Ka 频段行波管高频仿真与冷测对比研究	季大习、黄万超、王玉蓉、令狐昌刚、王大明、胥辉	[247]
ZTE10	Ka 频段 200W 行波管高效率样管研制	何金梅、王源、孙萌、刘颖博、张颖、胥辉、季大习、刘逸群	[248]
ZTE11	钨钨阴极用高性能铝酸盐发射活性物质的研究	范亚松、马静、赵请、酆琼、王源、梁田、邹雯婧	[248]
ZTE12	单晶金刚石在 3mm 宽频带行波管微波窗中的应用	任重、梁田、宋泽纯、胥辉、黄鹏潮、王鹏鹏、夏同川	[250]
ZTE13	间热式阴极热子组件温度一致性研究	赵请、武元元、马静、范亚松、胡文景、张毅	[250]
ZTE14	空间行波管用小尺寸隔板式阴极组件结构设计和工艺研究	马静、赵请、胡文景、范亚松、梁田、李强	[251]
ZTE15	钼铜合金在 Ka 波段行波管磁屏组件焊接中的应用	任重、盛思佳、杨梦瑶、梁田、刘洋	[251]
ZTE16	千瓦级大功率毫米波耦合行波管的研究	李新义、季大习、陈天培、黄万超、胥辉、王玉蓉	[251]
ZTE17	卫星通信地面站大功率高效率 C 波段螺旋线行波管的研究	刘逸群、张晓冉、姚会香、沈勇、李新义、胥辉、黄鹏潮、田航、綦伟玲、吴亚琴、邹雯婧	[252]
ZTE18	一种 Ku 波段慢波电路的设计	令狐昌刚、陈天培、罗敏、黄鹏潮、田航、季大习、王大明	[253]
ZTE19	一种 X 波段 120kW 高流通率、低线包功耗宽带耦合腔行波管的研制	黄万超、刘斌、季大习、王大明、胥辉	[253]
ZTE20	星载 X 频段宽带脉冲空间行波管高匹配性输能系统的设计与验证	张晓冉、刘逸群、王源、成红霞、刘强、黄鹏潮、罗敏	[254]
ZTE21	超小尺寸器件的密封性能评价	肖汉武、李阳	[254]
ZTE22	MEMS-TOF 质量分析器结构设计与仿真优化	蒋睿、郝明、闫泽、张虎忠、王璿、王永军、谢元华、刘坤	[255]
ZTE23	MEMS 质谱芯片内带电粒子与稀薄气体碰撞过程仿真分析	滕帅、郝明、张虎忠、王璿、王永军、谢元华、刘坤	[256]
ZTE24	基于矩阵型集成 LED 发光源的飞机空中加油灯	王浩东*、丁晓尘、邓涛	[257]
ZTE25	Low power flexible monolayer MoS ₂ integrated circuits	汤建、王琴琴、田金朋、李晓梅、李娜、彭雅琳、李修臻、时东霞、张广宇	[258]

F 显示技术

ZTF01	Full-Color Micro-LED Based on Confocal Cavity	Liwen Deng、Enguo Chen、Tailiang Guo	[259]
-------	---	------------------------------------	-------

H 大科学装置

ZTH01	基于机器学习的分子泵故障诊断系统在 EAST 装置上的研究	袁啸林、左桂忠、周阳、陈跃、胡建生	[261]
ZTH02	自由电子激光注入段废束桶束窗的设计及热结构分析	张浩、林涵文、赵峰、黄礼明、常仁超、魏建平、鄂得俊、尉伟、陶凯、杨家岳、张未卿	[261]
ZTH03	球马克超高真空金属密封的设计与研究	余清洲、杨庆喜	[266]
ZTH04	杂质对液态锂中氘脱附行为的影响	李琳、孟献才、元京升、左桂忠、胡建生	[267]
ZTH05	大靶面拼接相机探测器真空低温封装的设计	曾锋、张军、张鸿飞、朱杰、石鑫、朱瑞、陈金挺、王坚	[268]
ZTH06	EAST 托卡马克弹丸注入加料系统及最新物理实验进展	侯吉磊、南凯博、陈跃、胡建生、左桂忠、袁啸林	[269]
ZTH07	薄壁钛合金内衬二极铁真空室及其真空性能改善技术研究	魏宁斐、蒙峻、罗成、杨伟顺、柴振	[270]
ZTH08	深圳产业光源直线加速器电子束窗的结构设计与优化	朱潇潇、雷艳辉、李磊、刘鹏飞	[270]
ZTH09	HEPS 光束线真空系统设计	田野、韩庆夫、石泓	[271]
ZTH10	深圳产业光源储存环真空系统设计	雷艳辉、刘鹏飞、李磊、朱潇潇	[272]
ZTH11	深圳产业光源增强器真空系统设计	李磊、刘鹏飞、雷艳辉、朱潇潇	[279]
ZTH12	EAST 装置 MGI 与 SPI 注入对等离子体破裂缓解的比较	赵胜波、左桂忠、庄会东、元京升	[284]
ZTH13	国产 ODS-RAFM 在高温静态液态锂中的腐蚀特性研究	张德皓、孟献才、庞永强、李旭、左桂忠、胡建生	[285]
ZTH14	EUV 光刻机中的真空技术 Vacuum technology of the EUV lithography	李小金、蔡宇宏、李正清、韩仙虎、秦丽丽、刘筱文、王毅	[286]
ZTH15	1.3GHz 9cell 8 腔超导加速模组的真空系统	刘佰奇、翟纪元、贺斐思、张占军、韩瑞雄、潘卫民	[287]
ZTH16	一种单侧压封废束桶束窗的设计及热结构分析	林涵文、张浩、杨家岳、尉伟、黄礼明、张未卿、鄂得俊、陶凯、赵峰、魏建平、常仁超	[288]

大会特邀报告

大规模原子制造研究的纳米前沿

许宁生¹

复旦大学, 上海, 邮编 201114

真空技术与航天工程应用

李得天^{1, 2*}

1 兰州空间技术物理研究所, 甘肃兰州, 邮编 730000;

2 真空技术与物理重点实验室, 甘肃兰州, 邮编 730000;

Email: lidetian@sina.com

摘要: 真空是地外空间的首要特殊环境, 人类航天从地面到近地轨道, 再到宇宙深空, 经历了复杂的真空环境变化, 真空科学内涵延伸到了宇宙真空学范畴, 宇宙真空理论与技术成为人造卫星和空间探测活动不可或缺的关键技术之一。随着我国空间科学技术的快速发展, 宇宙真空技术逐步构建了空间环境下中性气体、等离子体、真空效应等为一体的研究对象体系。未来在载人、深空、科学试验等系列航天任务的实施过程中, 真空科学与技术将奠定更加系统、广泛和深入的技术基础, 全面支持我们“认识太空、利用太空和开发太空”。航天 510 所始终以真空技术为核心、航天工程需求为牵引, 发展真空技术, 服务航天工程。本报告具体以真空技术内涵拓展为主线, 从真空测试计量、电推进真空等离子体、空间环境效应、表面工程和量子频标电真空等方面简要介绍了这一技术发展历程。

关键词: 真空, 空间电推进, 空间环境效应, 表面技术, 量子频标, 宇宙真空

参考文献:

- [1] Detian Li, Yongjun Wang, Huzhong Zhang, Zhenhua Xi, Gang Li* “Review Article Applications of Vacuum Measurement Technology in China's Space Programs”, *Space: Science & Technology* 1, 285-298 (2021).
- [2] 李得天, 张虎忠 “构建空间探测计量保障体系——“数据质量”推动航天强国建设”, *真空与低温* 28, 373-374 (2022)

研发生物医用微纳材料，推进血管信息与健康工程

顾宁^{1, 2*}

¹ 南京大学医学院，南京，邮编 210093；

² 江苏省生物材料与器件重点实验室，南京，邮编 210009

*Email: guning@nju.edu.cn

摘要: 心脑血管疾病是危害人类健康的“头号杀手”，缺乏早期诊断手段往往导致治疗窗口狭窄，难以提供有效的治疗。因此，亟需发展有效的心脑血管疾病诊疗新方法。基于微纳生物材料的优越特性，微纳米技术在心脑血管疾病诊治中显示出巨大潜力。利用微纳材料、微纳器件或系统等实现对疾病的早期预警、诊断，从而进行健康管理，有望最终达到心脑血管疾病精准诊疗的目的。本课题组长期从事纳米医学材料研究，以铁基纳米材料和磷脂分子为两大基础材料，构建以磁性微泡为代表的诊疗一体化材料体系及相关医学影像技术；研发的多聚糖超顺磁氧化铁静脉注射液已进入临床试验，有望成为新一代心脑血管磁共振成像增强对比剂。这里将结合国内外的研究进展介绍微纳技术在血管信息与健康工程中的应用概况，重点阐述心脑血管疾病诊疗用微纳材料的设计思路，并探讨心脑血管诊疗新技术与新方法，以期为实现心脑血管疾病的精准诊疗提供新策略，助力纳米医学在心脑血管疾病领域的发展。

关键词: 微纳米技术，心脑血管疾病，诊疗一体化，血管信息与健康

参考文献:

- [1] N. Gu,* Z. H. Zhang, Y. Li, “Adaptive iron-based magnetic nanomaterials of high performance for biomedical applications”, *Nano Research* 15, 1-17 (2022).
- [2] H. He, Q. Han, S. Wang, M. Long, M. Zhang, Y. Li, Y. Zhang* and N. Gu,* " Design of a Multifunctional Nanozyme for Resolving the Proinflammatory Plaque Microenvironment and Attenuating Atherosclerosis", *Acs Nano* (2023). DOI: 10.1021/acsnano.3c01420

宽禁带氧化物半导体载流子调控与应用

刘益春

东北师范大学紫外光发射材料与技术教育部重点实验室，长春，邮编 130024

Email: ycliu@nenu.edu.cn

摘要: 设计构建了非晶氧化物缺氧/富氧同质“动态界面”，通过界面内建电场调控氧离子定向扩散，实现了具有“记忆”和“遗忘”功能的忆阻器^[1]。进一步，构建了非晶氧化物-金属“肖特基界面”，通过多亚稳态氧离子和界面内-外电场的协同作用，在独立单元器件上实现了对人类高级认知规律“BCM 理论”的完整模拟，研制出忆阻型类脑仿生视觉系统^[2]。利用金属等离激元不受温度影响的特性，设计构建了氧化物-金属纳尺度“肖特基界面”。通过相干光诱导金属等离激元离子化，其光

生电子在界面电场驱动下向氧化物转移，完成了对等离子激光光谱的调制和信息写入，实现了室温全息光谱烧孔，研制出高密度全息光盘^[3]。

关键词：载流子调控，忆阻器，等离子激光，光谱烧孔，高密度全息存储

参考文献：

[1] Z.Q. Wang, H.Y. Xu, X.H. Li, H. Yu, Y.C. Liu, X.J. Zhu, “Synaptic learning and memory functions achieved using oxygen ion migration/diffusion in an amorphous InGaZnO memristor”, *Advanced Functional Materials* 22, 2759 (2012)

[2] Z.Q. Wang, T. Zeng, Y.Y. Ren, Y. Lin, H.Y. Xu, HY, X.N. Zhao, Y.C. Liu, D. Ielmini, “Toward a generalized Bienenstock-Cooper-Munro rule for spatiotemporal learning via triplet-STDP in memristive devices”, *Nature Communications* 11, 1510 (2020)

[3] Q. Qiao, X.T. Zhang, Z.F. Lu, L.L. Wang, Y.C. Liu, X.F. Zhu, J.X. Li, “Formation of holographic fringes on photochromic Ag/TiO₂ nanocomposite films”, *Appl. Phys. Lett.*, 94,074104 (2019)

分会场报告

A 真空科技与工程/第十六届国际真空科学与工程应用学术会议 (VSEA-16)

分会邀请报告

气体通过漏孔流动状态的研究

闫荣鑫¹

¹北京卫星环境工程研究所, 北京, 邮编 100094

*Email: pigsheepdog@126.com

摘要: 气体在宏观压力差的作用下通过漏孔流动, 其状态是真空技术的理论基础, 传统采用的克努曾数 Kn 作为气体流态划分的标准, 在气固边界效应、气固分子作用下都将发生变化。本文将对稳定状态下最新流态划分标准的变化进行介绍, 研究过渡流态下气体流量和压力的关系, 建立气态工质在全克努曾数下的泄漏模型, 得到了长狭缝无限宽的漏孔气体流量与宏观压力差的关系式。对长圆漏孔内气体流动状态沿管道长度划分进行了探讨, 介绍了不同流态下真空管道流导的数值模拟研究状况, 研究了非稳定流态下长圆管道在分子流态下的流量和压力关系。本文还对漏孔的几何尺寸达到微纳尺度, 气体分子和漏孔材料的原子的作用是主要因素时, 气体通过纳米尺度漏孔的流动状态进行了分析, 介绍了气体通过纳米尺度缺陷石墨烯孔洞的气流状态, 仿真和实验验证了氦气通过纳米尺度漏孔的流动机理, 研制成功了 0.1MPa 氦压差下的 10-15Pa·m³/s 漏孔。

关键词: 气体流态, 漏孔, 气固边界, 流导, 克努曾, 石墨烯

氢燃料电池动力系统 中的 氢气循环泵

孙杰¹

¹普旭真空技术(上海)有限公司, 上海, 邮编 200241

*Email: jie.sun@busch-china.com

摘要: 众所周知, 氢燃料电池动力汽车, 特别是商用车, 已经在全球范围内快速发展起来, 乘用车和轮船等氢能动力驱动也在研发和试制阶段。氢燃料电池技术在过去的十年之中, 特别是过去的 5 年发展迅速。

氢气循环泵是 FCV 的三大核心部件之一, 早期普旭为此开发的 HM 0018 A 氢气循环泵, 在全球得到广泛的应用。在北京冬奥会运行的清洁能源车, 都是配备的这款普旭产品。

氢燃料电池动力系统还都处于快速发展、更新、迭代阶段, 作为关键部件, 我们普旭的氢气循环泵也在随之改进、完善、发展这款产品, 并增加新的技术和产品。以适应和匹配新技术和市场需求。

本文主要介绍普旭的 HM0018 A 氢循环泵的研发路线、实验室测试数据、实际使用时发生的可预见与不可预见显示情况、使用运行数据与设计数据的比对, 对现实反馈中的问题如何应对和改进、

为适合中国市场特殊情况特殊设计和改进等等。

按照有些氢能源车企的说法，现在 FCV 还在“试错阶段”，我本人是部分赞同这个观点的，整个技术路线和部件供应商也都处在成长阶段，由于知识能力和眼界所限，本文中可能存在偏颇和谬误，希望读者和听众指正。

关键词：MH0018 A, 氢气循环泵, 氢燃料电池, 氢燃料电池氢系统循环泵, 氢燃料电池电堆, 氢燃料电池系统三大核心部件。

参考文献：

- [1] Dr. Yohann. Perrot, “Busch MH0018 Hydrogen blower for FCV application”, Busch IBIS (2016)
- [2] Dr. Boris Kossek, “Single stage claw technology for Hydrogen application”, Busch IBIS (2019)
- [3] Mr. Didier Müller, “SGS TUV POEU0003-00 certification of Busch HM 0018 A”, Busch IB (2021)
- [4] 德勤中国“未来移动出行的动力源泉 氢能源及燃料电池交通解决方案”白皮书 2022
- [5] Mr. Marin Gutman, “Cooperation with P.M Power System”, Busch IBIS (2022)

纳米氮化钛薄膜对高频陶瓷窗片二次电子发射率的影响研究

赵毅红^{1*} 李芳芳¹ 王博锋² 叶成聪¹ 缪雨龙¹ 陈海波¹ 陈荣发¹

¹扬州大学机械工程学院, 江苏扬州, 邮编 225127;

²中国科学院空天信息创新研究院 高功率微波源与技术国防重点实验室, 北京, 邮编 101407

*Email: yihongzhao99@sina.com

摘要：纳米 TiN 薄膜可用来抑制高频陶瓷窗片的二次电子倍增，缩短器件高功率老炼时间，提高微波发射性能。本文通过专用真空镀膜设备，采用同轴圆柱靶和平面靶的直流磁控反应溅射方法，通过优化制备工艺参数，在陶瓷窗片的表面成功制备了纳米氮化钛 (TiN) 薄膜。采用扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD)、X 射线光电子能谱仪 (XPS) 等现代分析手段进行了测试分析，结果表明：纳米 TiN 薄膜表面晶粒细小，致密度较好；晶面 (111) 和 (220) 特征衍射峰峰型规整，峰宽细窄；Ti/N 原子计量比接近于 1:1。随着薄膜沉积时间增加，二次电子发射系数 (SEY) 逐渐增大，溅射时间 8.4s 时，SEY 为 1.72；随着基体偏压的增加，电离效率增加，SEY 不断降低，当偏压为 350V 时，SEY 为 1.89；随着氮气流量增加，SEY 发生变化，当氮气为 38sccm 时，SEY 最低为 1.83。

关键词：磁控反应溅射 纳米 TiN 薄膜 高频陶瓷窗片 二次电子发射率

参考文献：

- [1] K. A. Cummings, S. H. Risbud, "Dielectric materials for window applications", J Phys Chem Solids 61, 551-560 (2000).
- [2] S. Michizono, Y. Saito, "Surface discharge and surface potential on alumina rf windows", Vacuum 60,

235-239 (2001).

- [3] Suharyanto, S. Michizono, Y. Saito, Y. Yamano, S. Kobayashi, "Secondary electron emission of TiN-coated alumina ceramics", *Vacuum* 81, 799-802 (2007).
- [4] S. Michizono, Y. Saito, Suharyanto, Y. Yamano, S. Kobayashi, "Estimation of surface charges on dielectric materials for high power rf windows", *Appl. Surf. Sci.* 256, 950-953 (2009).
- [5] T. An, H. W. Tian, M. Wen, W. T. Zheng, "Structures and mechanical properties of TiN/SiNx multilayer films deposited by magnetron sputtering at different N₂/Ar gas flow ratios", *Vacuum* 82, 1187-1190 (2008).
- [6] D. Wang, Y. He, W. Cui, "Secondary electron emission characteristics of TiN coatings produced by RF magnetron sputtering", *J. Appl. Phys.* 124, 053301 (2018).
- [7] E. Penilla, J. Wang, "Pressure and temperature effects on stoichiometry and microstructure of nitrogen-rich TiN thin films synthesized via reactive magnetron DC-sputtering", *J. Nanomater* 2008, (2008).
- [8] W. Kaabi, A. Variola, G. Keppel, V. Palmieri, A. Brinkmann, I. Montero, Titanium nitride coating as a multipactor suppressor[C], 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC 2010), Joint Accelerator Conferences Website, 2010, pp. 2887-2889.
- [9] A. Variola, W. Kaabi, H. Jenhani, P. Lepercq, G. Keppel, V. Palmieri, F. Strada, Titanium nitride coating of RF ceramic windows by reactive DC magnetron sputtering[C], 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC'08), Joint Accelerator Conferences Website, 2008, pp. 931-933.
- [10] H. Uchida, M. Yamashita, "Effect of preparation conditions on pinhole defect of TiN films by ion mixing and vapor deposition", *Vacuum* 65, 555-561 (2002).
- [11] 李永健, 孔营, 胡健, 等, "高功率脉冲电流对磁控溅射 TiN 薄膜结构及力学性能影响", *真空科学与技术学报* 35, 1483-1488 (2015).
- [12] Z. Peng, G. Chen, Y.-P. Zhao, X. Zhang, Y.-T. Song, G. Shirkov, G. Karamysheva, O. Karamyshev, L. Calabretta, A. Caruso, "Investigation of TiN film on an RF ceramic window by atomic layer deposition", *J. Vac. Sci. Technol* 38, 052401 (2020).
- [13] M. Maarouf, M. B. Haider, M. F. Al-Kuhaili, A. Aljaafari, J. Y. Khan, "Negative magnetoresistance in iron doped TiN thin films prepared by reactive magnetron sputtering", *J. Magn. Magn. Mater* 514, 167235 (2020).
- [14] B. G. Kim, C. Jo, J. Shin, Y. Mun, J. Lee, J. W. Choi, "Ordered mesoporous titanium nitride as a promising carbon-free cathode for aprotic lithium-oxygen batteries", *ACS Nano* 11, 1736-1746 (2017).
- [15] M.-H. Chan, F.-H. Lu, "X-ray photoelectron spectroscopy analyses of titanium oxynitride films prepared by magnetron sputtering using air/Ar mixtures", *Thin Solid Films* 517, 5006-5009 (2009).
- [16] P. Y. Jouan, M. C. Peignon, C. Cardinaud, G. Lempère, "Characterisation of TiN coatings and of the TiN/Si interface by X-ray photoelectron spectroscopy and Auger electron spectroscopy", *Appl. Surf. Sci.* 68, 595-603 (1993).
- [17] N. White, A. L. Campbell, J. T. Grant, R. Pachter, K. Eyink, R. Jakubiak, G. Martinez, C. V. Ramana, "Surface/interface analysis and optical properties of RF sputter-deposited nanocrystalline titanium nitride thin films", *Appl. Surf. Sci.* 292, 74-85 (2014).
- [18] N. Arshi, J. Lu, B. H. Koo, C. G. Lee, F. Ahmed, "Effect of nitrogen flow rate on the properties of TiN film deposited by e beam evaporation technique", *Appl. Surf. Sci.* 258, 8498-8505 (2012).
- [19] N. Arshi, J. Lu, Y. K. Joo, C. G. Lee, J. H. Yoon, F. Ahmed, "Influence of nitrogen gas flow rate on the

structural, morphological and electrical properties of sputtered TiN films", J MATER SCI-MATER EL 24, 1194-1202 (2013).

[20] L. Lu, F. Luo, Z. Huang, W. Zhou, D. Zhu, "Influence of the nitrogen flow rate on the infrared emissivity of TiNx films", Infrared Phys Technol 88, 144-148 (2018).

机器学习在真空镀膜技术中的应用

杜广煜^{1*}

¹ 东北大学, 沈阳, 邮编 110819

*Email: gydu@mail.neu.edu.cn

摘要: 真空镀膜技术是表面工程中重要的技术手段之一, 目前已广泛应用于各个领域。无论是采用化学气相沉积 (CVD) 或物理气相沉积 (PVD) 方法, 薄膜的制备工艺均较为复杂, 人们往往仅对某个工艺参数对某种薄膜性能有何影响有大致地了解, 例如基片负偏压与薄膜硬度的关系等, 但并未完全了解其具体的影响规律。同时对由于工艺参数之间存在一定的交互作用所导致的多种参数综合作用下薄膜性能有快速的提升或者迅速的劣化的现象无法有效地判断。因此本报告根据近期课题组研究进展, 主要探讨神经网络映射模型等机器学习手段在真空镀膜领域的应用, 建立可以在一定误差内预测所制薄膜的性能参数的神经网络, 从而开辟在薄膜制备领域利用机器学习方法的新思路。

关键词: 真空镀膜, 机器学习, 神经网络

高能脉冲等离子体电源及精密真空镀膜装备

田修波^{1, 2*} 靳朋礼^{1, 2} 肖德志¹ 王新宇¹ 巩春志²

¹ 松山湖材料实验室, 广东 东莞;

² 哈先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨, 邮编 150001

*Email: xiubotian@163.com

摘要: 真空等离子体表面工程已经深入到行业的各个领域。最近调研发现, 精密零部件的表面工程已经成为传统制造业升级的催化剂。传统的材料性能提升或加工技术水平提升已经到了一定的瓶颈, 精密表面工程将会和已经带来新的突破。为了获得更好的表面性能, 需要高密度等离子体或瞬间更高密度等离子体。本文介绍一些高密度等离子体激励、维持、输运过程中的电、磁耦合效应及其应用, 如高能脉冲电弧、高能脉冲磁控、高能辉光放电等。同时也介绍配备高能等离子体源与偏压电源协同控制的装备设计, 并给出一些应用场景的效果。

关键词: 高能脉冲, 电源, 等离子体, 真空镀膜装备

真空干泵内稀薄气体跨流态输运过程的耦合计算方法研究

王桂鹏¹ 王晓明¹ 刘鑫宇¹ 谢元华^{1,2,3} 刘坤^{1,2,3*} 巴德纯^{1,2,3}

¹ 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳, 110819;

² 东北大学真空科技与航天工程研究中心, 沈阳, 110819;

³ 东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 沈阳, 110819;

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: 随着计算流体力学的发展, 数值计算方法已经广泛应用于真空泵的设计开发。真空干泵抽气过程中, 泵腔内通道气体输运常跨越多种流态, 甚至有的泵内气体跨越分子流、过渡流、连续流等三种流态, 不同流态的计算方法差异大。在泵的吸排气口、腔体等连续流区域使用计算流体力学 (CFD) 方法进行分析; 在间隙通道等非连续流区域, CFD 无法准确捕捉间隙泄漏、流动滑移、温度跳跃等现象, 考虑引入过渡流领域的直接模拟蒙特卡洛方法 (DSMC) 方法进行粒子统计分析。但是由于真空干泵内转子的高速运转, 连续流与非连续流的边界持续、快速发生变化。现有的 DSMC 和 CFD 计算方法, 均不能对真空干泵内的稀薄气体流动过程进行准确分析, 导致理论计算结果与试验结果存在较大差异, 尤其是在不同流域的边界地带, 数据流传递机制不清晰, 无法进行连续分析计算。本研究提出了一种应用于真空泵内实现 CFD 方法与 DSMC 方法进行耦合计算的方法, 对计算区域进行模糊分区, 实现对不同流态的模糊重叠区和边界区进行迭代计算。兼顾数值计算效率与精度, 根据数值残差选择不同的松弛迭代算法, 完成宏观物理量与微观粒子统计量的转换, 实现不同流态信息在过渡区域进行状态耦合, 完成真空干泵内流动的连续计算, 建立真空干泵内稀薄气体跨流态输运理论。本研究提出的应用于真空干泵的耦合计算方法为探索稀薄气体的跨流态输运过程和建立真空干泵的输运理论提供了一种解决方法, 同时为真空干泵的设计提供理论支撑。

关键词: 真空干泵, 稀薄气体输运, 过渡流, 耦合计算, 设计理论

作者简介: 王桂鹏 (1992.03-), 男, 博士研究生, 主要从事干式真空泵设计及多相流体动力学研究, E-mail: 1910125@stu.neu.edu.cn。

通讯作者: 刘坤 (1979.07-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 真空技术与高端装备, 微纳芯片流动理论与应用, E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目 (U22A20179) 和“十三五”国家科技重大专项课题 (2017ZX02201005-001)。

真空计量检测技术的产业化发展

王欢¹

¹北京东方计量测试研究所, 北京, 邮编 100094

*Email: bridge2001@163.com

摘要: 真空技术在全世界近四分之一的科研生产中得到广泛应用, 是现代科技发展的工艺生产重要的基础技术。真空计量检测是保证测量数据准确和真空产品质量的关键技术。本文针对目前传统真空计量检测设备非标准化、研制难度大等情况提出了未来真空计量检测产业化发展思路, 提出了现场计量检测、将校准技术集成到生产应用仪器中和自动化智能化数字化检测三个新放向。

关键词: 真空计量, 真空检测, 产业化

EAST 托卡马克装置真空及壁处理技术研究

左桂忠^{1, 2*} 胡建生¹

¹中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031;

*Email: zuoguizh@ipp.ac.cn

摘要: 磁约束聚变装置长脉冲高参数等离子体的获得需要对杂质、粒子再循环进行有效地调控。目前的托卡马克需要通过超高真空的获得, 等离子体面壁材料的选择以及器壁锻炼限制等离子体中的杂质及燃料再循环, 改善等离子体的约束, 获得高品质的等离子体。

针对 EAST 超导托卡马克装置, 发展了一套超高真空的获得设备, 主要包括 2 套大抽速的内置式低温泵、13 台外置式低温泵、4 台主抽分子泵等, 抽气速率大于 200m³/s。升级了 ITER-like 的钨偏滤器结构, 替代了石墨偏滤器, 降低了材料表面的出气率, 同时增加了抽气口的大小, 获得了更大的抽气流导, 进一步提升了 EAST 装置的粒子排出能力。发展了与强磁场兼容的 ICRF 射频放电技术, 实现了对轻杂质和氢同位素快速、有效地清除。发展了硼化、硅化及锂化镀膜壁处理技术[1], 提出了 ICRF 放电辅助的锂涂敷方法, 开发了先进的定向锂涂敷系统, 成功实现了对第一壁的全方位均匀涂覆 (~95%), 获得了低杂质及再循环的运行条件。为进一步解决锂化壁饱和的问题 (~300s) [2], 采用在高温等离子体中直接注入锂粉及硼粉的方式, 实现了实时的锂化及硼化壁处理[3]。为实现芯部加料, 降低边界再循环, 提高等离子体密度, EAST 装置发展了 2 种先进的加料方法: 弹丸注入 (PI)、超声分子束 (SMBI), 其加料效率在 15~30% 之间, 较普通充气提高了 ~2 倍。弹丸注入的加料效率大约为 30%~40%。通过这些先进的真空、壁处理等技术, 获得了 1×10^{-5} Pa 的极限真空度, 有效地控制了再循环和氢氦比 (<5%), 有效降低杂质尤其是高 Z 钨杂质溅射产额, 验证了低 Z 镀膜作为牺牲性保护层的可行性[4], 直接促成了 EAST 百秒高约束模、百秒 1 亿度以上、1056 秒长脉冲运行等多项创世界纪录成果的获得, 保障了我国在高约束稳态等离子体运行方面国际领先地位, 也为未来 ITER 装置长脉冲高参数等离子体运行提供了技术支持。

关键词: 超高真空, 壁处理, 杂质, 再循环, EAST 装置

参考文献:

- [1] G. Z. Zuo, J. S. Hu, Y. W. Yu, et al., Fusion Eng. Des. 131, 41 (2018).
- [2] C. L. Li, G. Z. Zuo, R. Maingi, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 63, 015001 (2021).
- [3] W. Xu, J. S. Hu, G. Z. Zuo, et al., Fusion Eng. Des. 133, 142 (2018).
- [4] Z. L. Tang, G. Z. Zuo, C. L. Li, et al., J. Nucl. Mater. 555 (2021).

航天器用橡胶密封设计及寿命预测技术研究

史纪军¹ 冯振华² 孙立臣¹ 索双富³ 王莉娜¹ 张子罡¹ 刘恩均¹ 任国华¹

¹北京卫星环境工程研究所, 北京, 100094;

²北京航天动力研究所, 北京, 100076;

³清华大学机械工程系, 北京, 100084

摘要:航天器用橡胶静密封系统设计测试及寿命预测技术针对橡胶材料密封系统, 从环境严酷度筛选、结构密封参数设计优化、研制试验、紧固件扭拉关系、寿命评估、密封性能质量保证规范、测试方法和装置等方面, 建立了全要素密封系统设计、质量保证实施规范、预测、测试技术体系, 获得大量基础研究和测试数据, 密封寿命预测结果、设计验证数据、应用测试数据表明密封性能得到了大幅提升, 应用效果良好。此外, 开展了小样本量、制件级橡胶材料和结构密封参数性能评价方法研究, 进行了评价试验, 从橡胶密封圈加速老化过程中形貌、压缩永久变形、漏率数据等方面给出评价结果。在橡胶材料性能退化的基础上, 进一步研究了泄漏通道的变化规律, 建立了橡胶材料密封界面泄漏模型, 更加直接地预示橡胶密封性能退化规律, 预测结果和实验测试数据吻合度较高。

关键词:航天器 密封 密封设计 泄漏检测 密封寿命预测

氢氦同位素工艺研究中的真空技术应用

杨洪广

原子能科学研究院

真空镀膜工艺的过程控制与应用

蔺增* 刘万锁 孙嘉琦 王健

东北大学, 辽宁 沈阳, 邮编 110819;

*Email: zlin@mail.neu.edu.cn

摘要: 真空镀膜是一种在真空环境下制备高性能涂层材料 and 高质量表面的绿色制造技术。目前广泛应用的各种真空镀膜技术和制备的定制涂层产品, 能够助力制造业实现低碳制造和可持续发展。高端真空镀膜设备的开发和应用需要解决核心零部件、先进镀膜工艺及过程控制等技术难题。本文分析了我国真空镀膜设备及应用的挑战, 展示了等离子体增强化学气相沉积技术中的流场模拟及工艺优化进展, 介绍了国外先进的物理气相沉积应用中的镀膜工艺实时监测的最新进展, 本文课题组研究了磁场、热场和等离子体对核心零部件工作过程的控制机制。最后, 本文提出了我国真空镀膜行业向前发展的展望与思考。

关键词: 真空镀膜, 过程控制, 流场, 电磁场, 热场, 等离子体

参考文献:

- [1] 孙彬, 刘兴龙, 徐乘远, 王庆, 蔺增,* “真空镀膜助力低碳制造与可持续发展”, 真空 60(3), 12 (2023).
- [2] A P Ehiasarian*, A A Sugumaran, P Eh Hovsepiyan, C Davies, and P Hatto, “Real-time monitoring of plasma synthesis of functional materials by high power impulse magnetron sputtering and other PVD processes: towards a physics-constrained digital twin”, J. Phys. D: Appl. Phys. 56, 035302 (2023).

量子真空计量技术研究

成永军 董猛 孙雯君 吴翔民 李得天

兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理重点实验室, 甘肃兰州, 邮编 730000

*E-mail: chyj750418@163.com

摘要: 国际单位制的重新定义促进真空计量体系向量子化转变。传统真空计量是基于中性气体分子的宏观力学效应和微观物理作用表征真空参数。量子真空计量是有别于传统的跨代真空计量新理论、新方法和新技术, 其本质是基于微观粒子的量子效应, 利用光学手段和量子力学理论测量中性气体分子数密度。量子真空计量技术在量限拓展和精度提升方面具有独特优势, 空间探测、超精密测量与高端装备制造等高新技术领域对全新跨代真空计量技术有广泛需求。本文从光学干涉法低真空计量、冷原子超高/极高真空计量和光谱吸收法真空分压力计量三个方面, 介绍了量子真空计量基本原理, 系统综述了国内外基于量子理论和量子效应反演真空参数的最新研究进展, 全面总结了目前存在的主要问题, 并展望了量子真空计量技术的未来发展前景。

关键词: 量子真空计量, 真空全压力, 真空分压力

参考文献:

- [1] 李得天, 成永军, 习振华. 量子真空标准研究进展[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(3): 1-15.
- [2] Wu Xiangmin, Cheng Yongjun, Dong Meng, et al. Advances in cold atom UHV/XHV metrology[J]. Vacuum, 2022: 111561.
- [3] Jousten K, Hendricks J, Barker D, et al. Perspectives for a new realization of the pascal by optical methods[J]. Metrologia, 2017, 54(6): S146.
- [4] Scherschligt J, Fedchak J A, Ahmed Z, et al. Quantum-based vacuum metrology at the National Institute of Standards and Technology[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2018, 36(4).

超灵敏度检漏技术进展及应用

魏萌萌^{2,1*} 董云宁¹ 卢耀文¹ 王汐月¹ 齐京^{3,1}

¹北京市真空计量检测工程技术研究中心, 北京, 邮编 100029;

²北京中科科仪股份有限公司, 北京, 邮编 100190;

³清华大学, 北京, 邮编 100084;

*Email: weimengmeng@kyky.com.cn

摘要: 为了解决长寿命、高可靠真空器件的封装检漏需求, 研制出下限可达 $5 \times 10^{-16} \text{Pam}^3/\text{s}$ 的高精度超灵敏度检漏仪。当前基于动态分流原理的通用检漏仪由于引进质谱计分析室的示漏气体量小致使实际检漏下限为 $10^{-11} \text{Pam}^3/\text{s}$, 通过软件修正实现的检漏下限可达 $10^{-12} \text{Pam}^3/\text{s}$; 基于累积法的超灵敏度检漏下限可达 $5 \times 10^{-15} \text{Pam}^3/\text{s}$, 该方法采用商用漏孔作为参考标准, 通过线性递推得到的检漏结果偏差可达一个数量级以上, 严重影响特殊应用领域器件的高可靠性和寿命。本文在原有的研究基础上, 提出累积比较检漏方法。在特殊加工的累积室中对示漏 He 气进行累积, 使其形成的分压力在质谱计测量范围内; 通过对累积室内壁的特殊工艺处理获得了更小的示漏气体本底压力; 用新研制的下限为 $5 \times 10^{-16} \text{Pam}^3/\text{s}$ 高精度流量计作为参考标准比较获得被检测器件漏率, 避免传统采用自身偏差较大的漏孔作为参考标准和使用线性递推得到漏率引入的较大偏差。实验结果证明, 所研制装置的检漏范围为 $10^{-12} \text{Pam}^3/\text{s} \sim 5 \times 10^{-16} \text{Pam}^3/\text{s}$, 检漏结果的不确定度为 5.3% ~ 13%。

关键词: 超灵敏度检漏, 累积比较法, 标准气体流量, 非线性, 检漏下限 $5 \times 10^{-16} \text{Pam}^3/\text{s}$

参考文献:

- [1]李得天, 郭美如, 葛敏等.固定流导法真空漏孔校准装置[J].真空科学与技术学报,2006,26(5): 358-362
- [2]卢耀文, 陈旭, 李得天等.一种下限为 $10^{-14} \text{Pam}^3/\text{s}$ 的真空漏空校准装置.真空科学与技术学报[J],2014, 5(1): 21-25
- [3]卢耀文, 董云宁, 杨传森等.一种 $(10^{-5} \sim 10^{-16}) \text{Pam}^3/\text{s}$ 标准气体流量计的设计.真空科学与技术

学报[J],2021, 41(5): 422-426

[4]卢耀文, 李得天, 齐京等. 一种下限为 $5 \times 10^{-16} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的高精度超灵敏度检漏装置. 真空科学与技术学报[J],2019, 39(1): 1-5

[5]Y. Y. Jau, H. Partner, P. D. Schwindt, et al. Low-power, miniature 171 Yb ion clock using an ultra-small vacuum package [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(25): 253-258

空间站与空间环境模拟技术

张春元^{1,2} 许忠旭¹ 张广慧²

(1 北京卫星环境工程研究所, 北京, 100094)

(2 天津市空间环境模拟企业重点实验室)

摘要: 今年是 921 工程 31 周年, 中国先后完成了空间站核心舱、问天实验舱和梦天实验舱的发射及太空交会对接, 中国空间站宣告组建完成, 中国载人航天取得了举世瞩目的成就。从飞船到空间站, 研制过程的每一步都经历了空间环境模拟技术的验证。本报告将从空间环境模拟技术发展、空间站开展真空热试验等方面阐述空间环境模拟技术对空间站发展的支撑作用。从 1961 年开始研制空间环境模拟器, 历经五个阶段的发展, 中国的空间环境模拟技术取得跨越式发展, 跻身世界强国行列。随着信息化、数字化、人工智能等新技术的发展, 空间环境模拟器各系统设备在智能化控制、集群控制等方面也获得了长足的进步。我国新研制的 KM7、KM8 等环模设备均实现了一键运行、设备健康诊断等智能化控制能力。各类航天器的各种特殊试验需求, 如星内真空度测量、舱内气体成分分析、微波负载水冷、低 PIM 测试等需求也在不断促进空间环境模拟技术的发展。

关键词: 空间站空间环境模拟技术, 真空热试验, 压控, 泄复压

Space Station and Space Environment Simulation Technology

Zhang Chunyuan^{1,2}, Xu Zhongxu¹, Zhang Guanghui²

(1, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing, 100094, China)

(2, Tianjin Key Laboratory of Space Environment Simulation Enterprise, 300462, China)

Abstract: After 31 years of development, China's manned space program has made remarkable achievements. From spacecraft to space station, every step of the development process is inseparable from the guarantee of space environment simulation technology. This report will expound the supporting role of space environment simulation technology to the development of space station from the aspects of space environment simulation technology development and vacuum thermal test of space station module.

Keywords: Space station, Space environment simulation technology, vacuum thermal test, pressure control, pressure relief and recovery

深圳高重频自由电子激光装置中的真空技术

尉伟¹ 赵峰¹ 常仁超¹ 张浩¹ 林涵文¹ 魏建平¹ 余永¹ 杨家岳^{1,2} 张未卿^{1,2*}

¹深圳综合粒子设施研究院, 广东深圳, 邮编 518107

²大连化学物理研究所, 辽宁沈阳, 邮编 116023;

*Email: zhangweiqing@mail.iasf.ac.cn

摘要: 深圳中能 X 射线自由电子激光装置是一台基于超导加速器的高亮度、高重复频率和超快的软 X 射线激光光源。参考目前国际上运行及在建的同类自由电子激光装置, 包括美国的 LCLSII、欧洲的 European XFEL、中国上海的 SHINE 装置中对真空系统提出的要求, 对于深圳 X 射线自由电子激光装置, 由于束流工作模式提高和保证超高加速模组工作状态求, 对于超高真空技术提出了更高的要求。其中在注入器和超导腔内要求极好的超高真空, 同时必须满足系统内极少微尘颗粒的超净真空、系统整体的极小漏率, 以及严格的残余气体组分要求; 要提供能保证低温模组内的超导腔工作状态的室温真空差分段, 并具有相应的真空度测量以及真空保护功能; 在波荡器段的波荡器真空室, 要能提供与外界大气环境的分隔并具有良好的机械强度, 还要满足物理设计和波荡器系统设计的要求。

关键词: 超高真空, X 射线自由电子激光, 超净真空

参考文献:

- [1] Oleg. B. Malyshev, "Vacuum in Particle Accelerators Modelling, Design and Operation of Beam Vacuum Systems", 2020.
- [2] T. Peterson*, T. Arkan, C.M. Ginsburg, Y. He, J. Kaluzny, M. McGee, Y. Orlov, " LCLS-II 1.3 GHz cryomodule design-modified tesla-style cryomodule for CW operation", Proceedings of SRF2015, Whistler, BC, Canada (2015).
- [3] H. F. Dylla*, G. Biallas, L. A. Dillon-Townes, E. Feldl, G. R. Myneni, J. Parkinson, J. Preble, T. Siggins, S. Williams, and M. Wiseman, "Design and installation of a low particulate, ultrahigh vacuum system for a high power free-electron laser", Journal of Vacuum Science & Technology A 17, 2113 (1999).
- [4] M.J.Ferreira, "LCLS-2 Vacuum Systems", OLAV IV, Hsinchu, Taiwan (2014).
- [5] K. Zapfe, J. Wojtkiewicz, "PARTICLE FREE PUMP DOWN AND VENTING OF UHV VACUUM SYSTEMS", Proceedings of SRF2007, Peking Univ., Beijing, China(2007).
- [6] Lutz Lilje, "Controlling Particulates and Dust in Vacuum Systems", Proceedings of SRF2007, Peking Univ., Proceedings of the 2017 CERN–Accelerator–School course on Vacuum for Particle Accelerators (2017).
- [7] Christophe Jarrige*, Fabio Ravelli, Marcelo Juni Ferreira, "Developing the Particle Free Vacuum System at ESS", Rev. Bras. Apl. Vac., Campinas, Vol. 37, 156-162(2018).

面向国家重大需求的前沿真空技术

王旭迪, 毕海林, 曹青, 吴俊, 张俊

合肥工业大学 机械工程学院, 合肥 230009

摘要: 近年来, 随着航天、量子器件和半导体技术的发展, 极小流量气体测试与控制、跨流态稀薄气体动力学、超洁净真空检测、以及微小密闭空间真空检测与维持是目前真空领域的前沿问题, 在冷原子器件、引力波载星器、军用 MEMS 器件、高空红外探测、航空武器、同步辐射光源等方面有着广泛而迫切的需求。本文围绕国家在航天探测、大科学工程和半导体等领域重大需求, 阐述近年来在微纳传输通道的制作与表征、跨流态稀薄气体动力学仿真的高效耦合、真空环境下颗粒度检测和微小空间内残余气体检测等方面取得进展。

王旭迪, 博士, 合肥工业大学真空与过程装备系教授, 博士生导师。2005~06、2016~17 分别在英国卢瑟福国家实验室和美国密歇根大学安娜堡分校进行访问研究。长期从事真空检测与计量、微纳制造方面的教学与科研工作。主持或参与国家自然科学基金面上项目、863 探索导向类、国防科工局基础科研重大、深空探测专项、航天 CAST 基金、电子集团标志性等项目十余项。在 *J. Mater. Chem.*、*Microelect Eng*、*J. Vac. Sci. Tech. A*、*Vacuum* 等国内外著名学术期刊发表论文 40 余篇, 授权发明专利 10 余项。在新型流导元件可控制作、稀薄气体动力学仿真、无源抽气等方面取得的研究成果目前已在火星探测、国防真空计量和同步辐射光源真空布局等国家重大科学工程中取得应用。



联系方式: Email: wxudi@hfut.edu.cn 手机: 13955162004

压水堆核电站化容系统氦检漏方法的选择及其应用

吴文昊^{1*} 张红星¹ 睦霄翔¹ 刘步良¹ 孙加进¹

¹ 中广核检测技术有限公司, 江苏苏州, 邮编 215000;

*Email: 596035278@qq.com

摘要: 化容系统是核电站中一回路辅助系统和排出物的处理与排放系统的重要组成部分, 在机组运行或维修期间, 一旦泄漏, 将导致一回路中产生的放射性气体及可能产生爆炸危险的氢气释放, 这对整个机组安全运行及周边环境产生极大的威胁, 所以在核电站的建造过程中, 尤其是在系统安装调试完成之后, 需要对其气密性能进行检测。现在对微量泄露多采用氦检漏方法进行查漏, 然而氦检漏存在多种不同的检测方法, 本文介绍了化容系统的氦检漏方法的选择及应用。

关键词: 化容系统, 容控箱, 氦检漏, 正压累积法

参考文献:

- [1] GB/T 15823—2009, 无损检测 氦检漏检测方法.
[2] ASME V(2001), 无损检测.

基于复旦大学基于加速器的离子束技术与应用研究

施立群 沈浩 张斌 王旭飞 米召红 张伟

复旦大学核科学与技术系/现代物理研究所, 上海, 邮编 200433;

教育部核物理与离子束物理重点实验室, 上海, 邮编 200433

*Email: lqshi@fudan.edu.cn

摘要: 本报告介绍了复旦大学在基于 NEC 2×3 MeV 静电串列加速器的离子束应用束线终端系统, 包括常规离子束分析 (IBA) 和离子束辐照终端、核微探针分析终端、外束质子激发 X 荧光分析 (PIXE), 以及单粒子微束细胞辐照终端; 在此基础上, 介绍了近些年来复旦大学上述离子束应用终端系统在核能材料、生命科学、环境科学、科学考古等领域中的典型应用。

关键词: 离子束技术, 离子束应用物理, 核能材料, 医学物理, 核技术考古

分会口头报告

一种腰部为高斯曲线的罗茨真空泵型线设计及分析

李正清, 王小军, 杨建斌, 李小金, 刘筱文, 韩仙虎, 蔡宇宏
(兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州, 730000)

摘要: 转子型线的设计是罗茨泵研究的重要内容之一。以高斯曲线为基础, 设计罗茨泵转子型线, 其位于节圆内部的腰部曲线采用高斯曲线, 位于节圆外部的曲线为高斯曲线的共轭曲线。设计中首先确定转子的高斯曲线部分, 然后以啮合理论为基础, 进行共轭曲线的设计。最后根据罗茨泵的抽速、节圆半径完成 70L/s 罗茨泵转子型线的设计。设计中发现该型转子型线有 3 个独立变量, 且在给定节圆半径的条件下, 转子的容积利用率随高斯曲线的两个可变参数增加而增加, 相对于常见的转子型线, 具有明显的优势。

关键词: 罗茨真空泵, 高斯曲线, 共轭, 转子, 型线

Design and analysis of the profile with Gaussian waist curve for Roots vacuum pump

Li Zhengqing, Wang Xiaojun, Yang Jianbin, Li Xiaojin, Liu Xiaowen, Han Xianhu, Cai Yuhong
(Lanzhou Institute of Physics Gansu Lanzhou 730000)

Abstract: The design of rotor profile is the important contents of Roots pump. Based on the Gaussian curve, the rotor profile of Roots pump is designed. The waist curve located inside the pitch circle adopts the Gaussian curve, and the curve located outside the pitch circle is the conjugate curve of the Gaussian curve. Firstly, the Gaussian curve of the rotor is determined, and then the conjugate curve is designed based on the meshing theory. Finally, according to the pumping speed and pitch radius, the rotor profile of 70 L/s roots pump is designed. It is found that this type of rotor profile has three independent variables, and under the condition of a given pitch radius, the volume utilization ratio of the rotor increases with the increase of two variable parameters of the Gaussian curve, which can be more than 60%. Therefore, the profile has obvious advantages in volume utilization compared with the common rotor profile, it.

Keywords: Roots vacuum pump; Gaussian curve; conjugate; rotor; profile;

国产低温泵的发展现状

邓家良^{1,2*} 武义锋^{1,2} 曾环^{1,2} 杨杨¹ 冯欣宇^{1,2}

¹安徽万瑞冷电科技有限公司, 安徽合肥, 邮编 230088;

²中国电子科技集团公司第十六研究所, 安徽合肥, 邮编 230088

*Email: jialianged@126.com

摘要: 近年来国内半导体、大科学工程、工业镀膜和科研等领域快速发展, 对超高真空低温泵需求旺盛。长期以来, 国内低温泵市场供应严重依赖进口, 受中美科技竞争加剧和逆全球化思潮影响, 进口低温泵产品断供风险持续增加。在强大的市场需求牵引和国家政府项目积极支持下, 国产低温泵进入了快速发展期, 产品抽速、容量等关键技术指标达到或接近国外同类竞品, 部分指标有所领先。逐步在国内半导体、大科学工程、工业镀膜和科研等领域实现了部分国产化替代。但高性能吸附材料、氦气压缩机泵等核心材料和部件仍严重依赖进口, 是当下国产低温泵产业高质量可持续发展急需解决的迫切难题。

关键词: 国产低温泵, 发展现状, 半导体, 关键技术指标, 核心材料和部件

参考文献:

- [1] 曾环, 杨杨, 武义锋等. G-M 制冷机低温泵减振设计和抽氢性能研究 [J]. 真空, 2023, 51(05): 78-84.
- [2] 冯欣宇, 杨杨. 集成电路制造用制冷机低温泵发展现状 [J]. 真空, 2022, 59(2): 42-47.

TiZrV 薄膜吸附 CO₂ 过程的分子动力学模拟

臧浩天 王晓冬* 杜广煜 宋欣铭 于广琛

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要: 随着同步辐射光源的高速发展, 科学家们对同步辐射光源的亮度和相干性提出了更高的要求^[1]。与前一代同步辐射光源相比, 第四代光源中小孔径的磁铁限制了储存环束流管道的尺寸, 导致管道内部流导低。由于环内流导的限制产生的纵向压力梯度不均衡, 传统的分散布置真空泵的抽气方式将不适用于第四代光源的小孔径储存环。此外, 第四代光源储存环的内壁材料放气率和二次电子发射率高, 影响环内束流的稳定。

具有吸气功能的非蒸散型吸气剂薄膜(NEG)可以解决以上问题。TiZrV 薄膜作为 NEG 的一种, 拥有较低放气率和较低的光/电子刺激解吸产额(PSD 和 ESD), 可镀覆于管道内壁以实现分布式吸气, 使系统以较少的泵数量, 达到要求的超高真空(UHV)条件。本研究使用 lammmps 软件包进行从头算分子动力学模拟, 从微观角度分析 CO₂ 吸附于 TiZrV 薄膜时的反应机理。通过径向及角度分布函数(RDFs)计算得出在物理吸附阶段 CO₂ 的键长及键角的变化, 并通过 CO₂ 的元素空间分布分析以及

voronoi 图判断在反应阶段以 CO₂ 分子为中心, 各金属元素的元素分布, 确定参与反应的主要金属元素。结果显示在初始的物理吸附过程中, CO₂ 的结构并未发生改变; 在之后的化学吸附过程中, Ti 和 Zr 主要起反应作用, V 并未参与反应, 这与[2]中的所述一致。此外, 根据反应前后 CO₂ 与反应金属的电子交换情况以及态密度分析, 得出薄膜的氧化强度。由结果可知, 与 N₂ 和 H₂ 等其它种类气体相比, CO₂ 更易于与 TiZrV 反应, 薄膜的氧化程度更高, 这与前研究者的实验结论^[3]相一致。

关键词: 四代光源, 超高真空, 从头算分子动力学, TiZrV 薄膜, 吸附过程机理

参考文献:

- [1] E. Al-Dmour, J. Ahlback, D. Einfeld, et al., Diffraction-limited storage-ring vacuum technology, *Journal of Synchrotron Radiation* 21, 878-883 (2014).
- [2] 冯天佑, 陈联, 朱建炳, 范超, 李勇, 罗新奎, 吉康. 锆钒铁吸气剂的研究现状及进展[J]. 真空与低温, 2017, 23(01): 7-12.
- [3] Kamiya J, Baglin V, Bregliozzi G, et al. Outgassing measurement of an LHC collimator and estimation for the NEG performances[J]. *Vacuum*, 2011, 85(12): 1178-1181.

超高真空环境下的低温辐射计热链与热屏蔽设计

宋春尧¹, 杨传森^{1*}, 储隽伟², 范纪红², 陈俊儒¹, 郭宇扬¹, 卢耀文¹

¹北京东方计量测试研究所, 北京, 邮编 100086;

²西安应用光学研究所, 陕西西安 邮编 710065

*Email: ychs101@163.com

摘要: 低温辐射计是根据光电替代原理, 利用超低温下电加热等效替代光加热对吸收腔引起的温升效应, 从而实现对光功率的精确测量的计量设备^[1], 目前已经成为光功率计量领域的最高基准^[2]。低温辐射计设计中最核心的部分即让吸收腔工作于温度近 4K 的低温以及真空度达到 10⁻⁶Pa 的超高真空环境中, 以减小比热容、提高热导率使得吸收腔提高对辐射的灵敏度以及更容易达到热平衡^[3]。通过为低温辐射计热路中设计测试不同几何尺寸、不同材料、不同打孔配置的热阻, 以及三层无氧铜的热屏蔽开孔的几何配置, 分析了限制吸收腔温度降低以及影响温度稳定性的环境因素。在吸收腔组件固定的情况下, 通过增加热屏蔽轴向距离, 可有效降低环境辐射对吸收腔降温的影响。

关键词: 超高真空, 低温, 热链, 热屏蔽, 低温辐射计

参考文献:

- [1] Hoyt, C. C. & Foukal, P. V. Cryogenic Radiometers and their Application to Metrology. *Metrologia* 28, 163 (1991).
- [2] Gan H.Y. et al. Absolute cryogenic radiometer for high accuracy optical radiant power measurement in a wide spectral range. *Chinese Optics Letters*, 17(9): 091201(2019).

[3] Yu Bing, Fan Jihong, Yuan Linguang, Li Yan, Guo Lei, Wang Xiao, Chu Junwei, Qin Yan, Sun Yunan, Zhang Deng, You Yue, Jin Weiqi. "Measurement technique research for the absorptivity of cryogenic radiometer absorbing cavity at the 4 K temperature", *Infrared and Laser Engineering*, 51(9): 20210984(2022).

基于卷积神经网络的多弧离子镀膜设备故障诊断研究

赵执鹏¹ 陈志立¹ 梁笑喻¹ 关钟毓¹ 王成斌¹ 杜广煜^{1*}

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819;

*Email: gydu@mail.neu.edu.cn

摘要: 多弧离子镀膜技术成膜具有耐磨、超硬和耐腐蚀等特点, 被广泛应用于刀具、模具、汽车零部件、医疗器械和航空航天等领域。离子镀膜设备复杂多样, 经常会遭遇真空度不达标、弧放电异常等各种故障, 故障诊断和维护是保证生产效率和质量的重要环节。传统的故障诊断方法依赖于专家经验, 需要手动分析数据, 效率低下且易受主观因素影响。而卷积神经网络则可以通过对大量数据的自动学习和分析, 快速准确地诊断设备故障。采集多弧离子镀膜设备实时运行参数, 如电流、电压、真空度和沉积温度等作为输入特征, 并将设备的运行状态标签作为输出量, 建立故障诊断数据集。结合卷积、池化、全连接等多种神经网络层, 使用基于反向传播算法的随机梯度下降优化器, 并应用交叉熵损失函数对模型进行训练; 引入批量标准化、激活函数、Dropout 函数等, 提高模型的学习能力和准确性; 采用准确率、召回率、精确度和 F1 值, 全面评估模型的性能, 通过测试集评估模型的鲁棒性和泛化能力, 验证其实用性。结果表明, 卷积神经网络在诊断精度和鲁棒性方面表现良好, 能够有效应对多种故障场景, 减少人工干预, 降低生产成本。

关键词: 多弧离子镀膜技术, 镀膜设备, 卷积神经网络, 故障诊断

参考文献:

- [1] Wei X, Dong Y, Qu D, et al. Effect of deposition parameters on microstructure of the Ti-Mg immiscible alloy thin film deposited by multi-arc ion plating[J]. *Metals*, 2019, 9(11): 1229.
- [2] Mo Z, Zhang Z, Tsui K L. The variational kernel-based 1-D convolutional neural network for machinery fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-10.

Convolutional Neural Network-Based Fault Diagnosis for Multi-Arc Ion Plating Equipment

Zhipeng Zhao¹, Zhili Chen¹, Xiaoyu Liang¹, Zhongyu Guan¹, Chengbin Wang¹, Guangyu Du^{1*}

¹College of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, 110819

*Email: gydu@mail.neu.edu.cn

Abstract: Multi-arc ion plating technology is widely used in fields such as tooling, automotive parts, medical devices, and aerospace due to its characteristics of wear resistance, super hardness, and corrosion resistance. However, the complex and diverse nature of ion plating equipment often leads to various failures such as inadequate vacuum degree and abnormal arc discharge, making fault diagnosis and maintenance a critical step in ensuring production efficiency and quality. Traditional fault diagnosis methods rely on expert experience and manual data analysis, which are inefficient and prone to subjective factors. By contrast, convolutional neural networks can quickly and accurately diagnose equipment faults through automatic learning and analysis of large amounts of data. Real-time operating parameters of the multi-arc ion plating equipment, such as current, bias voltage, vacuum degree, and deposition temperature, are collected as input features, and the equipment's operating state labels are used as output values to establish a fault diagnosis dataset. Combining various neural network layers such as convolution, pooling, and fully connected layers, using stochastic gradient descent optimizer based on backpropagation algorithm, and applying cross-entropy loss function to train the model. Batch normalization, activation function, and Dropout function are introduced to improve the model's learning ability and accuracy. The model's performance is comprehensively evaluated using accuracy, recall rate, precision, and F1 value, and its robustness and generalization ability are assessed through the test set to validate its practicality. The results show that the convolutional neural network performs well in diagnosis accuracy and robustness, effectively addressing various fault scenarios, reducing manual intervention, and lowering production costs.

Keywords: Multi-arc ion coating technology, Coating equipment, Convolutional neural network
Fault diagnosis

References:

- [1] Wei X, Dong Y, Qu D, et al. Effect of deposition parameters on microstructure of the Ti-Mg immiscible alloy thin film deposited by multi-arc ion plating[J]. *Metals*, 2019, 9(11): 1229.
- [2] Mo Z, Zhang Z, Tsui K L. The variational kernel-based 1-D convolutional neural network for machinery fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-10.

Ag-Cu-Sb 体系中二元合金的活度计算和真空分离理论研究

李青松 田阳

昆明理工大学 云南省昆明市 650093

邮箱: 2518369336@qq.com

摘要: 在本研究中, 首先利用分子相互作用体积模型 (MIVM)、修正分子相互作用体积模型 (M-MIVM)、Miedema 模型、正规模型 (RSE)、亚正规模型 (SRSE) 和 Wilson 方程这六种模型计算 Ag-Cu-Sb 体系中二元合金的活度和活度系数的预测值, 然后计算了各个模型的平均相对偏差和平均标准差。计算结果表明, 该体系的二元合金 M-MIVM 总平均相对偏差和平均标准偏差分别为 0.01501 和 3.97278%, 比其他模型小三至六倍, 表明了 M-MIVM 预测能力的稳定和可靠性, 同时, 铜银合金、铈银合金和铈铜合金分别在 1423 K、1250 K 和 1375 K 的温度条件下, 活度或活度系数的预测值更为可靠。然后根据以上活度和活度预测研究结论, 基于 M-MIVM 计算分离系数、气液相平衡、蒸发速率的相关数据并画出分离系数与成分(β - x)、温度与成分组成 (T - x)、压力与成分 (P - x) 和蒸发速率与成分(v - x) 的关系图, 发现铜银合金相对难分离, 相同温度下蒸发速率 $v_{Sb} > v_{Ag} > v_{Cu}$, 可根据 VLE (T - x , P - x) 图定性预测蒸馏液和残余物量。以上结论将指导 Ag-Cu-Sb 三元合金的活度研究和该体系子合金动力学、真空分离实验和工业化生产的研究。

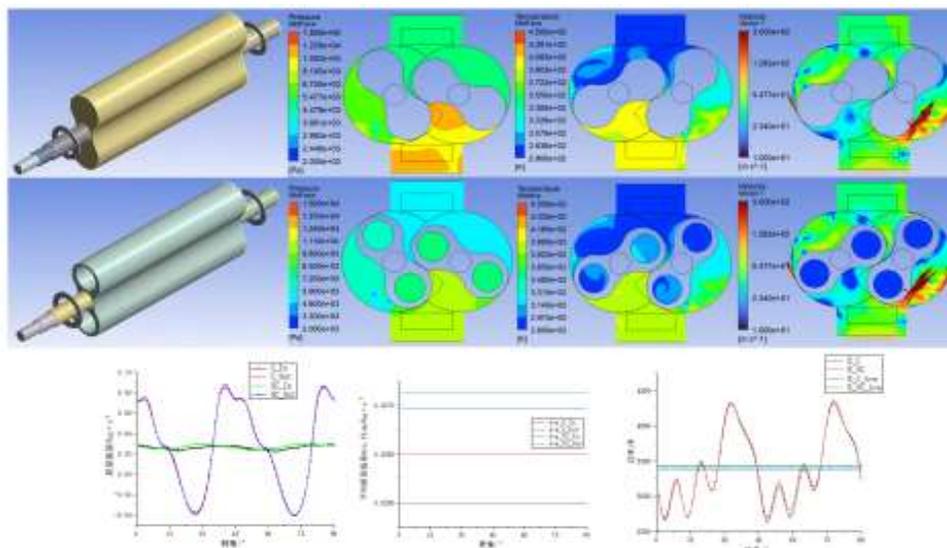
减重孔对罗茨泵性能影响的研究

马凯¹ 李丹童¹ 谌小倩¹ 王潇¹ 何志龙^{1,*}

¹ 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西西安, 邮编 710049

*Email: zlhe@mail.xjtu.edu.cn

摘要: 为探究减重孔对罗茨泵性能的影响, 建立了罗茨泵流场的数学模型, 利用 CFX 软件分别对无减重孔结构和含减重孔结构的罗茨泵进行流场分析, 得到流场的压力分布、速度分布、速度分布, 同时求得两种结构的流量、功率随转角的变化关系。结果表明: 在相同入口工况下, 二种结构的进口流量随转角的波动规律不一致, 而出口流量的波动规律一致, 但含减重孔结构的罗茨泵出口流量幅值较小, 且该结构的平均质量流量相较于无减重孔结构减小 3.6%; 二者的功率随转角的变化规律一致, 但含减重孔结构的罗茨泵平均功率减小 1.2%; 此外, 在相同转角下, 含减重孔结构的罗茨泵的排气温度和排气压力均小于无减重孔罗茨泵。该研究为罗茨真空泵减重孔的设计和应用提供理论依据。



关键词：罗茨泵，减重孔，流场分析，数值模拟

参考文献：

- [1] S.K. Sun, B. Zhao, X. H. Jia,* X. Y. Peng, "Three-dimensional numerical simulation and experimental validation of flows in working chambers and inlet/outlet pockets of Roots pump." *Vacuum* 137, 195-204(2017).
- [2] C. F. Hsieh,* Y. C. Deng, "A design method for improving the flow characteristics of a multistage Roots pumps." *Vacuum* 121, 217-222(2015).

氧化镁真空碳热还原过程中 KF 行为分析

马廷壮^{1,2,3}, 余镭^{1,2,3}, 田阳^{1,2,3,*}, 梁栋^{1,2,3}, 王立鹏^{1,2,3}, 吴数吉^{1,3}

¹昆明理工大学复杂有色金属资源化利用国家重点实验室, 云南省昆明市 650093;

²昆明理工大学真空冶金国家工程研究中心, 云南省昆明市 650093;

³昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南省昆明市 650093

*Email: emontian@hotmail.com

摘要：镁基材料有望替代钢材、铝材成为新一代结构材料。真空碳热还原炼镁是一种新型绿色工艺，近年来备受关注。对 CaF_2 之外的催化剂和逆反应进行研究具有重要意义。本工作对氧化镁真空碳热还原过程中 KF 的行为进行了热力学分析，利用 X 射线衍射(XRD)、X 射线光子能谱(XPS)、扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线能谱(EDS)对实验结果进行表征。热力学计算表明，真空碳热还原氧化镁的反应温度在 1463 K(80 Pa)以上，在还原过程中 KF 不参反应，主要是 F 的作用。实验分析表明，KF 和 CaF_2 的加入明显提高还原程度，KF 提升的程度更高。质量损失率随着添加量的增加和保温时间的增长而提高，当添加量大于 7%，质量损失率趋于平缓，这是 F 作用有限的结果。KF 不参与氧化镁的真空碳热还原，存留在残留物中，起催化作用。

关键词：真空碳热还原；MgO；KF 催化；形貌

镁作为轻质的结构金属材料^[1]，是地球上最丰富的元素之一^[2]，具有密度低、比强度高、比刚度大、生物相容性好、阻尼性能好、电池和储氢容量大等优点^[3-5]，被誉为“21 世纪绿色工程材料”^[6]，“革命性的医用金属材料”^[7]。在当前全球变暖和二氧化碳含量增加的情况下，镁基材料有望替代钢材、铝材成为新一代结构材料^[8-9]，并在航空航天、军事工业、核能工业、汽车工业、3C 产业、生物医学、储氢及电池工业发挥重要作用，具有重要战略意义和广阔市场前景^[10-11]。随着工业的飞速发展，世界对镁的需求每年增长 10%^[12]，2022 年世界原镁产量达到 100 万吨^[13]。中国镁工业发展十分迅速，凭借资源、能源、成本和产业创新等优势奠定了在原镁生产方面的绝对优势，原镁产量常年占比世界 80% 以上^[14-15]。因此，镁行业具有良好的发展前景，镁的生产作为镁行业的基础，势必得到重视。

目前，世界上生产镁的商业方法主要是电解法和热还原法，其中硅热法也被称为皮江法^[16]。皮江法是将煅白和硅铁磨成细粉按一定配比混合压制成团，放入由耐热合金制成的还原罐内，在 1423 ~ 1473 K，5 ~ 30 Pa 条下进行热还原得到镁蒸气，镁蒸气进入冷凝器结晶成固态镁，熔成镁锭。中国每年以皮江法生产的原镁年占 60% 以上^[17-18]。然而，皮江法因为能耗高、生产效率低、劳动强度大、产生大量硫氧化物和碳氧化物气体等缺点。特别是所用的还原剂硅铁，不仅昂贵，而且制备过程对环境污染严重，严重违背“绿色低碳”的发展战略^[19-20]。因此，改善皮江法工艺和引入新炼镁方法受到研究者的广泛关注^[21-23]。真空碳热还原法以廉价的碳作为还原剂，是一种绿色节能的新冶炼技术^[24]，具有潜力替代皮江法^{[25][26]}。真空碳热还原法生产 1 吨镁消耗 2.461 tonnes 煤，产生 1.201 tonnes CO 和 14.827 tonnes CO₂ 气体，但成本和环境影响远小于皮江法，因为皮江法生产 1 吨镁会消耗 2.705 tonnes 煤和 1.177 tonnes 硅铁，产生 3.878 tonnes CO 和 26.337 tonnes CO₂ 气体^[17]。为了提高碳热还原的效率，近年来围绕真空碳热还原炼镁过程添加催化剂 CaF₂ 也受到大量学者的研究^[27-29]。Tian 对还原过程加入 CaF₂ 进行研究，结果表明，在 30~100 Pa 压强下，还原过程中 CaF₂ 并未参与反应，只起催化作用^[27]。Jiang 对还原过程 CaF₂ 的催化进行机理分析，分析表明，CaF₂ 的加入可以降低碳热还原的表现活化能，还原过程主要是 F 的作用，F 使 MgO 晶格发生扭曲，从而促进还原反应^[29]。CaF₂ 催化研究已经日趋成熟且在工业中得到运用，但在真空碳热还原炼镁过程中加入其他催化剂少有人研究，制约了该工艺的发展。为了在生产过程中有更多的选择性和探明逆反应机理，进一步对其他催化剂进行研究具有巨大的学术意义和工业价值。

本工作首先对真空碳热还原氧化镁过程中加入 KF 进行热力学分析。其次分析了 KF 在还原过程中的作用机制。然后进行了 KF 真空碳热还原实验，对比了添加 KF 与 CaF₂ 的还原效果。通过 X 射线衍射仪(XRD)研究了残留物和冷凝物的物相组成，利用 X 射线光子能谱仪(XPS)测定残留物和冷凝物中元素的化学状态，利用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线能谱仪(EDS)对残留物和冷凝产物的表面形貌和组成进行了分析。本研究的目的是探明 KF 在氧化镁真空碳热还原过程中的行为及作用机制，为 KF 催化真空碳热还原氧化镁的生产提供理论依据。

1 原料和方法

1.1 原料和设备

实验以氟化钾、焦煤、氧化镁为原料。氟化钾为国药化学试剂有限公司生产的分析试剂，标称纯度为 99.5%，焦煤为云南师宗大舍振兴生产的含复杂组分冶炼焦煤，碳含量为 63.58%，氧化镁为河北邢台凯镁新材料科技有限公司提供的轻质氧化镁，纯度为 95%。氧化镁、焦煤和氟化钾的化学成分分别列于表 1、表 2 和表 3。

表 1 KF 化学成分

成分	KF	氯化物	硫酸盐	重金属
含量 (wt.%)	≥ 99.5	≤ 0.002	≤ 0.01	≤ 0.001

表 2 焦煤化学成分

成分	C	挥发物	水分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂
含量(wt.%)	63.58	16.43	0.78	11.67	5.05	5.49

表 3 MgO 化学成分

成分	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
含量 (wt.%)	≥ 95	0.15	< 0.10	< 0.50

本研究在内热式真空还原炉上进行了 KF 碳热还原的小型实验。真空炉配有抽真空系统、循环水冷系统和控制系统。真空还原炉内部结构示意图及反应过程如图 1 所示。炉体由还原区和冷凝区两个主要部分组成，抽气时炉内压强在 80~110 Pa 之间。实验过程中，物料在还原区的反应装置里反应，挥发出来的镁蒸气通过导管进入冷凝区，最终在冷凝区得到冷凝的金属镁。

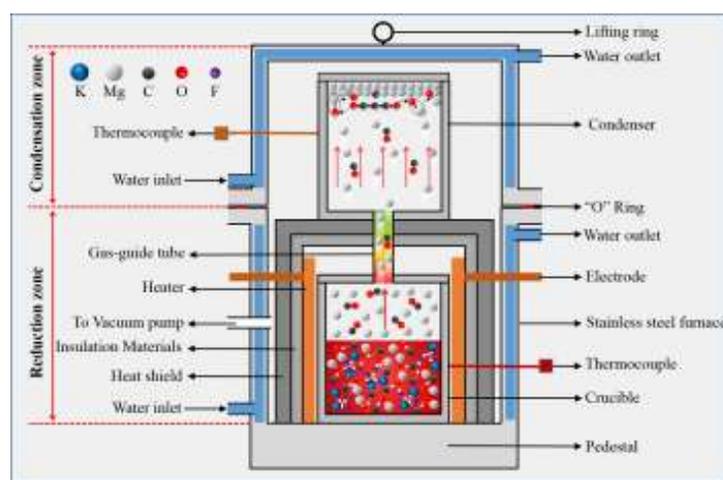


图 1 真空炉结构与反应过程示意图

1.2 实验方法

实验前先把焦煤和氧化镁分别磨细至-250 目，配成 C/MgO（摩尔比）为 2 的混合料，称取 50 g 的混合料，分别添加混合料质量 0%、1%、3%、5%、7%、9%、11%、13% 的 KF，混合均匀后，在 8 MPa 的压力下制成直径为 30mm、高 20 mm 的圆柱形料块。用酒精清洗反应装置和冷凝塔，同时用惰性气体冲洗真空炉。实验过程中，将制备好的物料准确称量后放入反应装置的坩埚中，将坩埚放入真空还原炉内，确保反应器的位置处于真空炉的加热区，冷凝区上必须盖上冷凝盖防止镁蒸气进入炉内，工艺过程示意如图 2 所示。

真空炉密封后，打开真空系统和循环水冷系统，设定实验程序。当炉内压强降至 80~110 Pa 时，启动程序开始加热。实验温度设定为 1550 K、升温速率为 10 K/min、保温时间为 1 h 或 2 h。保温结束后，关闭程序，保持真空系统和水冷系统运行，待真空还原炉温度降至室温后，关闭真空系统、控制系统及循环水冷系统，取出残余物和冷凝物，取样后送检分析。

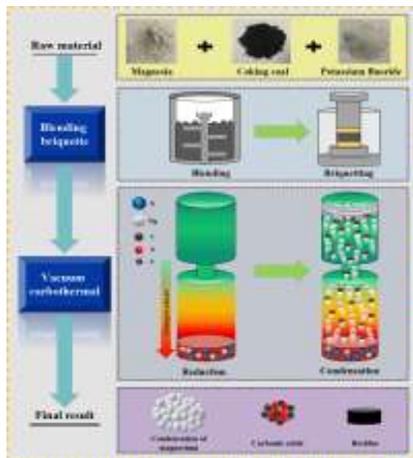


图 2 KF 真空碳热还原工艺过程示意图

1.3 热力学计算

对 80 ~ 110 Pa 范围内的还原过程进行热力学分析。用软件 HSC Chemistry 6 计算了反应的标准吉布斯自由能，根据范霍夫等温方程 (1) [30]，得到了不同压强下反应的起始温度。

$$\Delta G = \Delta G_r^\theta + RT \ln Q_P \tag{1}$$

$$Q_P = \left(\frac{P_g}{P^\theta} \right)_{\text{Product}}^{v_i} / \left(\frac{P_g}{P^\theta} \right)_{\text{Reactant}}^{v_i} \tag{2}$$

式中，QP 为压商，Pg 为气态物质分压，Pθ 为 100 kPa。我们通过公式 (1) 和公式 (2) 得到了在不同压力下反应的起始温度。

金属化合物在不同温度下的饱和蒸气压是确定其能否被真空蒸馏分离的重要标准。在相同的温度下，物质的饱和蒸气压越高，越容易挥发。它们之间的关系可以用克劳修斯-克拉配龙方程^[31]表示，如式 (3) 所示：

$$\frac{d_p}{d_T} = \frac{L}{T\Delta V} \tag{3}$$

饱和蒸气压与温度的关系可表示为式(4)：

$$LgP^* = AT^{-1} + BLgT + CT + D \tag{4}$$

式中 P* 为纯组分的饱和蒸气压，单位为 Pa，温度单位为 K；A、B、C、D 为组元的蒸发常数，由文献[31]查到。

1.4 实验表征

在 KF 碳热还原实验中，我们统计了样品的质量损失率随 KF 添加量的变化，质量损失率 α 定义如下，α 值越大，还原过程中氧化镁的消耗量越高，说明还原程度越高。

$$\alpha = \left(\frac{M_0 - M_1}{M_0} \right) \times 100\% \tag{3}$$

式中，M0 和 M1 分别为初始和残留物氧化镁质量。

利用 x 射线衍射仪(XRD) 对残留物和冷凝物的物相进行分析、X 射线光子光谱仪(XPS)用于测定残留元素的化学状态、采用扫描电子显微镜(SEM)和能谱(EDS)对冷凝物和残留物的形貌及化学成分进行了表征。

2 结果与讨论

2.1 热力学结果

2.1.1 真空碳热还原热力学分析

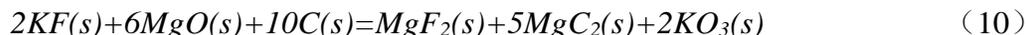
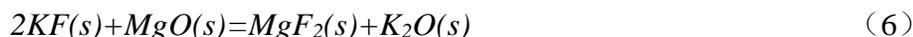
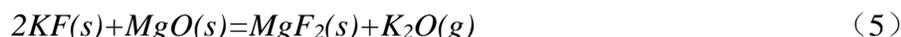
氧化镁与碳发生的碳热还原主要是根据反应 (4) 进行。



反应 (4) 是一个固体-固体反应, 由于反应温度高, 所以反应发生得很快, 这需要将氧化镁与碳按一定比例混合, 并将粉末制备为颗粒[28]。进一步考虑了反应热力学的可行性, 由于反应生成气体, 因此反应吉布斯自由能受系统压强的影响, 不同温度下反应吉布斯自由能与 80、95、110 Pa 系统压强的关系如图 3(a)所示。随着温度的升高, 反应的吉布斯自由能逐渐降低, 当压强为 80 Pa 时、温度为 1463 K 时, 反应的吉布斯自由能等于零, 即反应 (4) 开始温度为 1463 K。反应开始温度随着系统压强从 110 Pa 降至 80 Pa 逐渐降低, 当压强为 110 Pa 时, 反应开始温度为 1481 K, 而当压强降低至 95 Pa 时, 反应开始温度降至 1472 K。

2.1.2 KF 存在的真空碳热还原热力学分析

当碳热还原过程中加入 KF 后, KF 会进入体系。通过对镁与碳反应的热力学分析, 列出了 MgO-C-KF 体系中的潜在反应:



计算了 80 Pa、95 Pa、110 Pa 压强下反应 (5) 的吉布斯自由能与温度的关系, 结果如图 3(b)所示。随着温度的升高, 反应吉布斯自由能逐渐下降, 但在 800~ 2000 K 温度范围内吉布斯自由能均大于 0, 说明在实验条件(1550 K、80~110 Pa)下, 反应 (5) 不能发生。

反应 (6)、(7)、(8)、(9)、(10) 为固-固反应, 没有气体生成。因此, 反应的吉布斯自由能不受压强影响保持一致, 吉布斯自由能与温度的关系结果如图 3(c)所示。从图可以看出, 在 800 K ~ 2000 K 温度范围内, 5 个反应的吉布斯自由能均为正, 因此可以断定这 5 个反应在此温度区间不能发生。

KF 的熔点为 1131 K, 因此在实验温度下, KF 以液态的形式存在, 计算了 80 Pa 压强下反应(11)吉布斯自由能与温度的关系、以及 KF 饱和蒸气压与温度的关系, 结果见图 3(d)。随着温度的升高, 反应吉布斯自由能呈递减趋势, 当温度达到 1570 K 时, 吉布斯自由能才小于 0。KF 饱和蒸气压随着温度的升高呈递增趋势, 1550 K 温度下对应的饱和蒸气压为 14.25 Pa<80 Pa, 因此在实验条件下, 反应(11)不会发生, 且 KF 不易挥发。

通过热力学分析, 在 800~ 2000 K 温度范围、80~ 110 Pa 系统压强之间, 反应(5)至(11)均不能发生。在实验温度 1550 K 下, 体系中的 KF 不参与反应且不挥发, 整个体系只存在氧化镁的碳热还原反应。

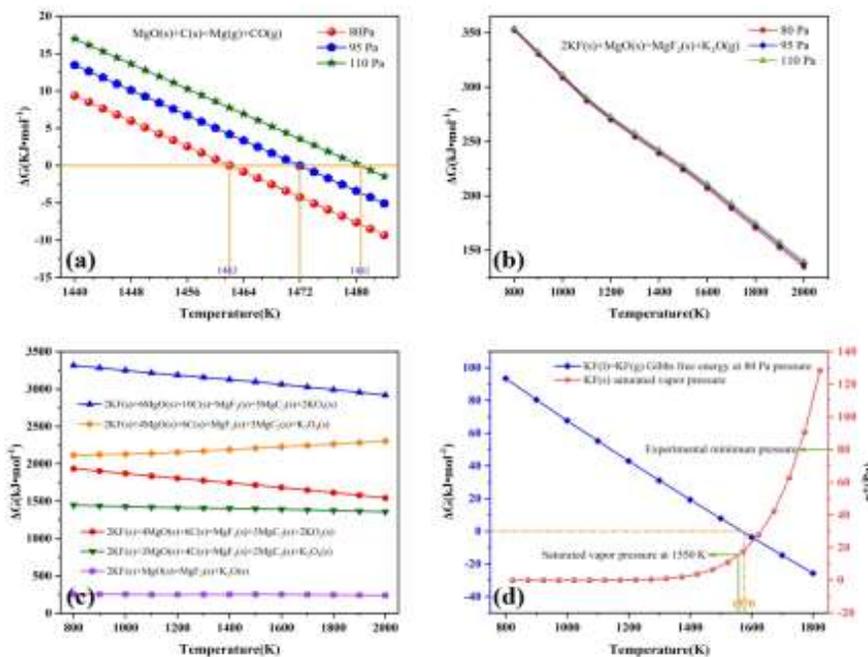


图 3 热力学分析结果：(a)反应(4)不同压力下吉布斯自由能与温度关系；(b)反应(5)不同压力下吉布斯自由能与温度关系；(c)反应(6)至(10)吉布斯自由能与温度关系；(d)80 Pa 压强下反应(11)吉布斯自由能与温度关系，以及 KF 饱和蒸气压与温度关系。

2.2 KF 的作用机理

MgO 是离子型氧化物，由负电性较大的 O²⁻和正电性较大的 Mg²⁺通过离子键形式组成，属于岩盐型晶体结构[34]，Mg²⁺和 O²⁻的配位数均为 6[35]。氧化镁的晶体结构为正八面体，Mg²⁺位于正八面体的中心，而 O²⁻占据八面体的 6 个顶点。Mg²⁺填充在邻接 O²⁻空隙之中，Mg-O 键键长为 2.104 Å[36]。氧化镁晶体呈立方密堆积的结构，八面体的所有 12 条边和另一个八面体共边，而每个 O²⁻则为六个八面体共有。因此，高温对于 MgO 的结构影响并不明显，想要提高 MgO 的活性可借助其他离子对 MgO 的晶格结构进行破坏，增加其晶体缺陷。

表 4 列出了 Mg²⁺、O²⁻、F⁻三种离子半径大小。F⁻与 O²⁻的离子半径相近，在加入 KF 之后，F⁻可以取代 O²⁻的位置，破坏 MgO 表面晶格结构。在此过程中 MgO 晶体发生畸变，从而在 MgO 晶体表面产生不饱和键，增大 MgO 晶体的活性，这有利于 C 对 Mg-O 键的破坏，促进 C-O 键的形成[37]。此外，F⁻离子具有较高的活性，能增加氧化镁晶格的缺陷。

表 5 列出了 MgO、CO 两种物质的键能。CO 中 C-O 键的键能远远大于 MgO 中 Mg-O 键的键能，说明 CO 中的 C-O 键比 MgO 中的 Mg-O 键更加稳定。随着体系内 KF 不断增加，F⁻不断对氧化镁晶格进行破坏，使反应往键能更大的 CO 方向进行，即还原反应正向进行。

表 4 三种离子半径[36-37]

离子	Mg ²⁺	O ²⁻	F ⁻
半径/Å	0.72	1.40	1.36

表 5 MgO 与 CO 键能[36,38]

化合物	MgO	CO
键能/kJ mol ⁻¹	347	1070.3

2.3 实验结果

2.3.1 质量损失率

图 4 显示了保温 1 h 和 2 h 实验条件下，碳热还原实验添加量与质量损失率的关系。结果表明，KF 和 CaF₂ 的加入明显提升质量损失率，相同条件下，KF 提升的程度更高。保温时间为 1 h 时，不添加 KF 的碳热还原氧化镁质量损失率仅为 33.10%，添加 1% 的 KF 后，质量损失率提升至 42.08%，保温时间为 2 h 时，不添加 KF 质量损失率为 45.19% 添加 1% KF 后提升至 52.12%。随着 KF 添加量的增大，质量损失率随之提高，但添加量大于 7% 时，质量损失率趋于平缓。此外，在相同温度下，随着保温时间的增长，质量损失率随之提升，KF 添加量为 7% 时，质量损失率由保温 1 h 的 84.23% 提升到保温 2 h 的 91.48%。在还原过程中加入 KF，反应物分子受到 F- 的化学吸附作用得到活化，降低了反应的活化能。随着保温时间的增长，F- 作用时间增长，还原效果得到提升。加入 KF 可以提高还原程度，但 F- 作用是有限的，因此，随着还原反应的进行，物料逐渐减少，最后趋于平缓。添加量越高、系统压强越低条件下氧化镁的质量损失率越高。

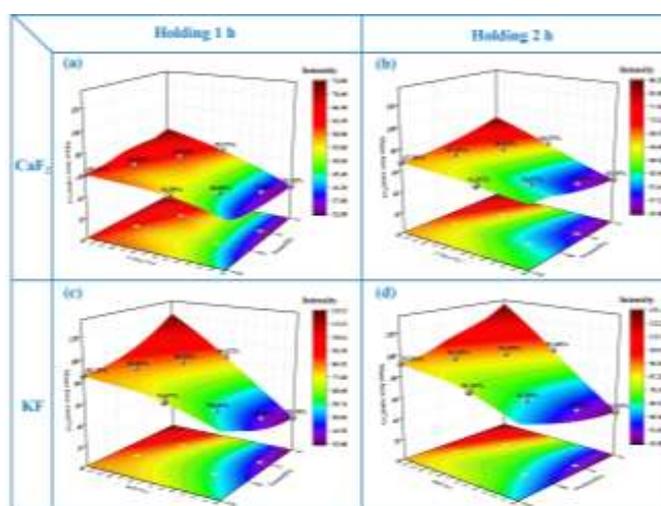


图 4 质量损失率结果

2.3.2 残留物分析

在反应坩埚中收集碳热还原实验结束后的残留物，用 XRD、SEM、XPS 分别对其进行检测，不同实验条件下残留物的实物、XRD 以及 SEM 结果见图 5。XRD 结果显示，碳热还原后，KF 赋存在坩埚中，MgO 峰强度随着添加量的增加和保温时间的延长逐渐减弱，当添加量大于 7% 时，峰强度减弱不明显。实物及 SEM 结果显示，随着 KF 添加量的增加，残留物以及其中的 C 和 MgO 三者的尺寸逐渐变小，相同添加量的条件下延长保温时间，尺寸同样变小，其中 MgO 最为明显。随着 KF 添加量的增大，MgO 结构被破坏越严重，由原来的凝聚态成为离散的颗粒状，但当添加量大于 7%，该趋势减弱。说明在还原过程中，随着 KF 的增多，体系中 F- 的数量不断增多，MgO 结构破坏增强，C 被消耗的越多，随着保温时间的增长，体系中 F- 有更充足的作用时间，因此碳热还原反应更加充分，但 F- 的作用时有限的，当其作用到一定程度，还原效果将不再提升，而趋于平缓。

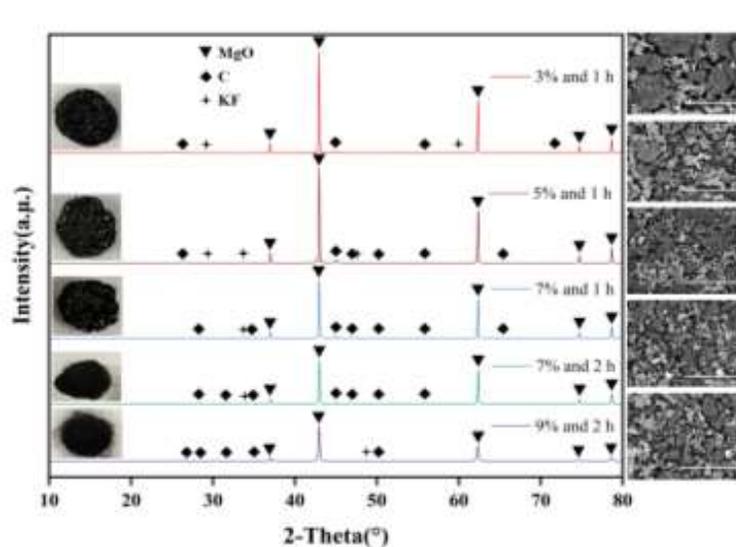


图 5. 残留物的实物、XRD 以及 SEM 结果

用 XPS 测定了残渣中元素的化学状态，三种不同条件下的结果如图 6 所示。图 6 (a) 为测试样品的 XPS 全谱，由图可知，样品中主要包含 C、O、Mg、K、F 元素。6 (b) 为 O 1s 的高分辨光谱图，在 529-536 eV 结合能之间的宽峰存在三个峰值，分别是 529.8 eV 的 MgO、531.8 eV 的 C-O 键和 532.9 eV 的 C=O 键，说明样品中还存在 MgO^[39-41]，体系中的 O 主要与 C 结合，未与 F 相结合，这与 KF 的作用机理相一致。在图 6(c) K 2s 的高分辨光谱中，结合能位于 293.3 eV^[42]处主要为 KF；同时，通过 F 1s 的高分辨光谱图 6(d)可知，结合能位于 685.2 eV^[43]处主要为 KF，说明碳热还原过程中 K 与 F 仍然与 KF 的形式存在。在图 6(e) Mg 1s 高分辨率窄谱图可知，结合能位于 1304.1 eV 对应为 MgO^[44]，同样说明样品中还存在 MgO，与前面 O 1s 的分峰相对应。从图 6 可以看出，随着 KF 添加量的增大 MgO、KF、CO 对应的峰强度逐渐减弱，说明随着 KF 添加量增加 MgO 消耗增大，产生的镁蒸气增加，由于反应装置与冷凝区相连接，因此，随着反应进行体系产生的 CO 在温度梯度的作用被镁蒸气带入冷凝区，致使反应装置中的 CO 呈递减趋势。增长保温时间 MgO、KF、CO 减弱趋势不明显，这是因为体系中 F-的作用到达一定的极限。结合 XRD 分析，基本确定残留物 O、Mg、F、K 的元素是以 MgO、KF、C、CO 的形式存在，残留物分析与质量损失结果相一致。

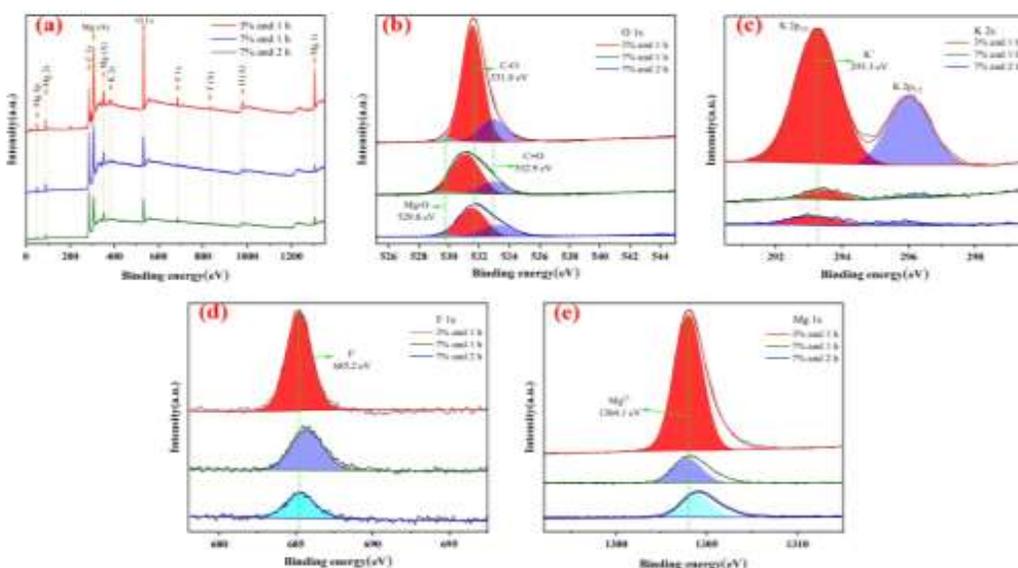


图 6 残留物 XPS 分析：(a) 全谱；(b) O 1s；(c) K 2s；(d) F 1s；(e) Mg 1s

2.3.3 冷凝物分析

在真空炉顶部冷凝区(保温过程温度为 653 K)中收集得到碳热还原实验冷凝物,用 XRD、XPS、SEM、EDS 分别对其进行检测。图 7 为不同保温时间、7%KF 添加量冷凝物的 XRD 检测结果,冷凝物镁的 XRD 各峰清晰,与标准卡片 Mg#PDF35-0821 相一致,表明冷凝镁结晶良好。最终的产品是 Mg、MgO 和 C,且未出现 KF, MgO 和 C 是由逆反应(13)生成,延长保温时间, Mg 峰强度更加明显,这是镁晶体有充分生长的结果。对于 CO 与 Mg 的反应能^[45-46]进行了相关研究,结果表明:在真空条件下 CO 与镁蒸气发生化学反应并伴随碳、氧元素的生成,且该反应不可逆,因此冷凝物中少量的氧化镁是不可避免的。

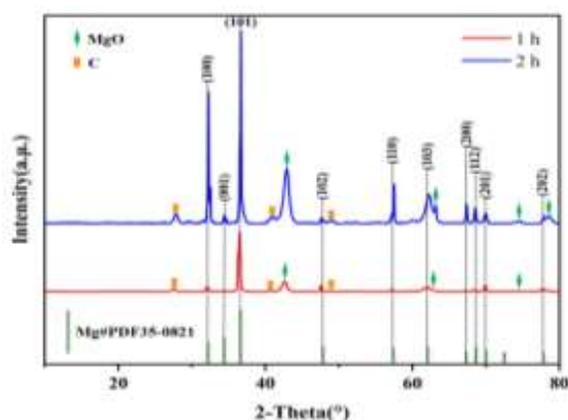


图 7 冷凝物 XRD

冷凝物 XPS 结果如图 8 所示。图 8 (a) 为测试样品的 XPS 全谱,冷凝物中主要包含 C、O、Mg 元素,没有出现 K 和 F 元素。8(b)是 C 1s 的高分辨率谱,在 283-298 eV 结合能之间有五个峰值,分别是 284.8 eV 的 C-C 键、285.7 eV 的 C-O 键、289.9 eV 的 C=O 键以及 π - π^* 键对应 293.4 eV 和 296.2 eV^[47],结合 O 1s 的高分辨光谱图 8(c)可知,在 529-536 eV 结合能之间的宽峰存在两个峰值,分别是 529.8 eV 的 MgO、531.8 eV 的 C-O 键^[42-43],说明增长保温时间,逆反应时间增长,CO 减少。图 8(d) Mg 1s 高分辨率窄谱图可知,结合能位于 1303.2 eV 对应为 Mg,结合能位于 1304.1 eV 为 MgO^[44],证实了反应中有 MgO 的存在,与前面 O 1s 的分峰相对应,增长反应时间 Mg 强度有所增加。结合 XRD 分析,确定冷凝物中没有 KF,相反残留在坩埚中。

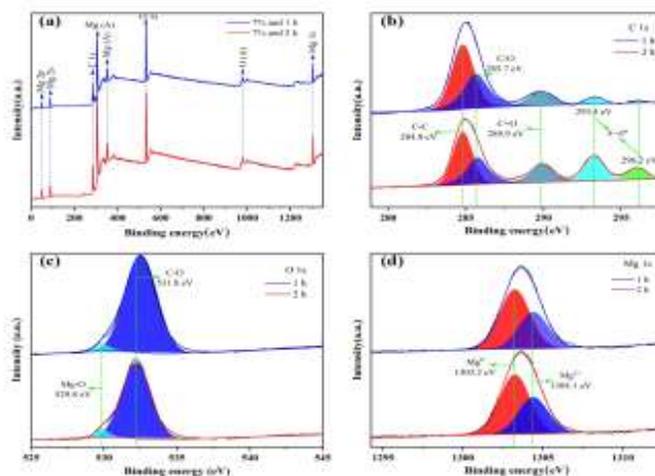


图 8 冷凝物 XPS 分析: (a)全谱; (b) C 1s; (c)O 1s; (d) F 1s; (e) Mg 1s

为了进一步确定冷凝物中 Mg、O、C 三种元素的分布及含量,采用 SEM 及 EDS 对其进行分析。图 9 为不同保温时间、添加 7% KF 还原实验冷凝物及冷凝物局部放大的 SEM 图。由 SEM 图可以看出,冷凝镁结晶形貌良好,为典型的条状结构,表面光滑,但有断裂、褶皱以及球状现象。对比局部放大的 SEM,结果显示随着保温时间延长,结晶镁的尺寸变大,说明结晶镁有充足的生长时间,结晶效果更加明显。为了确定结晶镁的主要成分,我们对局部放大进行了面扫,结果见图 10 和图 11。从图 10 (a) 和 11 (a) 观察到球状晶体表面疏松且有细丝状的晶丝,氧、碳元素分布球体的整个表面,对应的 EDS 为图 10 (e) 和 11 (e),结果显示镁的纯度较低,仅为 56.49% 和 59.51%,这是由于晶体表明疏松,CO 气体进入晶体内部发生逆反应,导致纯度降低。从图 10 (b) 和 11 (b) 观察到晶体内部成条纹状,表面覆盖着一层薄膜,但未全部覆盖,氧、碳元素主要分布断裂处,对应的 EDS 为图 10 (f) 和 11 (f),相较于球形的晶镁纯度有所提升,分别为 66.28% 和 69.25%,这是因为表面薄膜的存在,降低了逆反应的发生。从图 10 (c) 和 11 (c) 可以看出晶体成棒状排列,表面光滑,但棒与棒之间存在缝隙,镁元素主要分布于棒状位置,EDS 结果为图 10 (g) 和 11 (g),镁的纯度进一步提升,为 70.19% 和 71.48%,这是逆反应进一步降低的结果。从图 10 (d) 和 11 (d) 可以看出晶体表面光滑致密,无缝隙,镁、氧、碳元素分布均匀,图 10 (h) 和 11 (h) EDS 检测结果表明,镁的纯度分别达到 78.31% 和 80.87%,这是因为 CO 很难进入晶体内部,逆反应程度达到最低。对比不同保温时间的 EDS 结果,较长的保温时间镁的纯度较高,与 XRD、XPS 分析相一致。

通过质量损失率、残留物和冷凝物分析可知,KF 的加入明显提高还原程度,冷凝物中未检测到 KF,相反,赋存在反应坩埚中,说明在真空碳热还原过程中 KF 被排除在外,并未参与反应,只起催化作用。

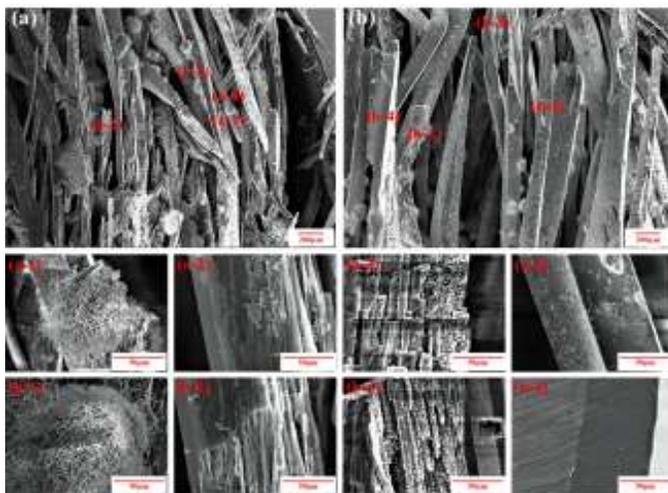


图 9 添加 7% 冷凝物 SEM 图: (a)保温 1 h; (b)保温 2 h; (a-)保温 1 h 局部放大; (b-)保温 2 h 局部放大

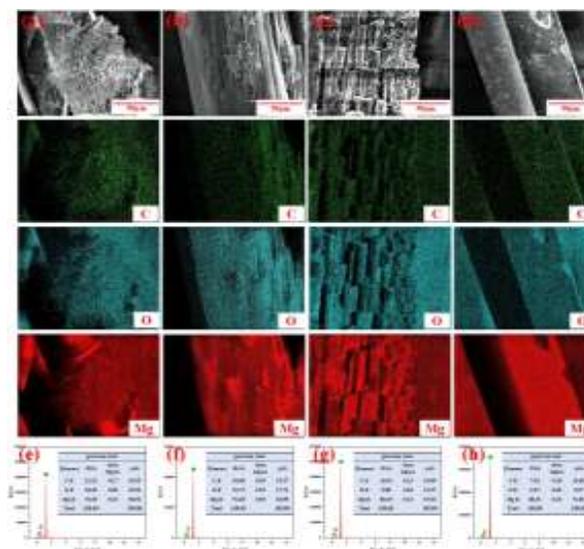


图 10 添加 7% KF、保温 1 h 局部 SEM 与 EDS 图：(a-d)SEM 图；(e-h)EDS 结果

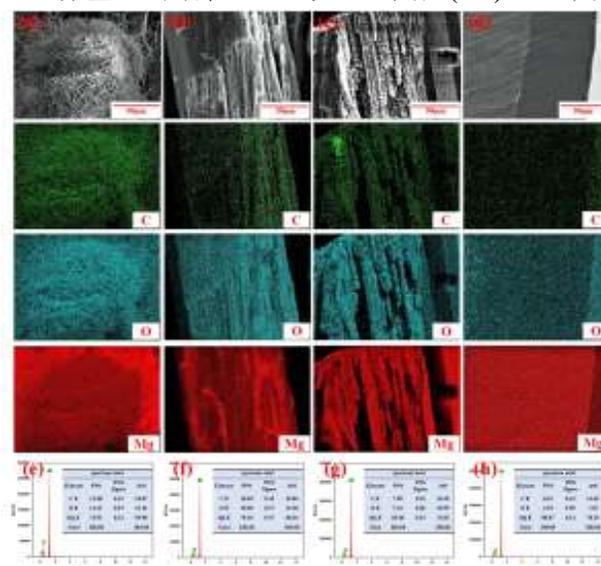


图 11 添加 7% KF、保温 2 h 局部 SEM 与 EDS 图：(a-d)SEM 图；(e-h)EDS 结果

3 结论

本研究对 KF 在氧化镁真空碳热还原过程中的行为进行研究，可以得到以下结论：

(1) 热力学与 KF 作用分析表明，在 80 Pa 压强下，碳热还原反应的开始温度在 1463 K 以上。在 1550 K 温度、80 ~ 110 Pa 压强下，KF 不参与碳热还原反应，还原过程中主要是 F 的作用。

(2) 实验结果表明，KF 和 CaF₂ 的加入提高了质量损失率，相同条件下，KF 提升的程度高于 CaF₂ 提升的程度。质量损失率随着添加量的增加和保温时间的增长而增加，当添加量大于 7% 时，质量损失率趋于平缓，这是 F 作用有限的结果。KF 还原实验冷凝物中镁的含量达到 80.87%，具有良好的晶化和颗粒结构。KF 存留在坩埚中，不参与碳热还原反应，只起催化作用。

参考文献

- [1] D.X. Yang, L.Q. Wang, D. Li, R. Wang. Magnesium Catalysis in Asymmetric Synthesis[J]. Chem, 2019, 5: 1108-1166.
- [2] H.L. Shi, C. Xu, X.S. Hu, W.M. Gan, K. Wu, X.J. Wang. Improving the Young's modulus of Mg via

- alloying and compositing - A short review[J]. *J. Magnes. Alloys*, 2022, 10: 2009-2024.
- [3] Y.I. Liang, R.J. Feng, S.Q. Yang, H. Ma, J. Liang, J. Chen. Rechargeable Mg Batteries with Graphene-like MoS₂ Cathode and Ultrasmall Mg Nanoparticle Anode[J]. *Adv. Mater*, 2011, 23: 640-643.
- [4] A. Asgari, M. Sedighi, R. Krajnik. Magnesium alloy-silicon carbide composite fabrication using chips waste[J]. *J. Clean. Prod*, 2019, 232: 1187-1194.
- [5] Q. Li, W. Xiong, M.H. Yu, J. Li, L. Liu, G. Zhu, L.Y. Wang, J. Wang, S.R. Yu, E.Y. Liu. Effect of Ce content on performance of AZ31 magnesium alloy anode in air battery[J]. *J. Alloy. Compd*, 2021, 891: 161914.
- [6] E. Ringe, Shapes. Plasmonic Properties and Reactivity of Magnesium Nanoparticles[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2020, 124: 15665-45679.
- [7] H. Meysam. Mechanical characteristics of biodegradable magnesium matrix composites: A review[J]. *J. Magnes. Alloys*, 2027, 5: 189-201.
- [8] A. Asgari, M. Sedighi, R. Krajnik. Magnesium alloy-silicon carbide composite fabrication using chips waste[J]. *J. Clean. Prod*, 2019, 232: 1187-1194.
- [9] S. Sankaranarayanan, M. Gupta. Emergence of god's favorite metallic element: Magnesium based materials for engineering and biomedical applications[J]. *Mater. Today: Proceedings*, 2021, 39: 311-316.
- [10] A.Y. Bagastyo, A.D. Anggrainy, K. Khoiruddin, R. Ursada, I. Warmadewanthi, I.G. Wenten. Electrochemically-driven struvite recovery: Prospect and challenges for the application of magnesium sacrificial anode[J]. *Sep. Purif. Technol*, 2022, 288: 120653.
- [11] Y. Liu, Y. Zhang, Y.L. Wang, Y.Q. Tian, L.S. Chen. Research progress on surface protective coatings of biomedical degradable magnesium alloys[J]. *J. Alloy. Compd*, 2021, 885: 161001.
- [12] M. Bugdayci, A. Turan, O. Yücel. Production of Magnesium-Strontium Alloys Through Vacuum Metallurgical Process[J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 2020, 51: 1254-1262.
- [13] USGS, https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium_2 (最后一次访问 2023 年 5 月 15 日).
- [14] H.L. Wu, C.L. Zhao, J.H. Ni, S.X. Zhang, J.Y. Liu, J. Yan, Y.G. Chen, X.N. Zhang. Research of a novel biodegradable surgical staple made of high purity magnesium[J]. *Bioact. Mater*, 2016, 1: 122-126.
- [15] X.J. Wang, D.K. Xu, R.Z. Wu, X.B. Chen, Q.M. Peng, L. Jin, Y.C. Xin, Z.Q. Zhang, Y. Liu, X.H. Chen, G. Chen, K.K. Deng, H.Y. Wang. What is going on in magnesium alloys?[J]. *J. Mater. Sci. Technol*, 2018, 34: 245-247.
- [16] P. Sekar, S. Narendranath, V. Desai. Recent progress in in vivo studies and clinical applications of magnesium based biodegradable implants - A review[J]. *J. Magnes. Alloys*, 2021, 9: 1147-1163.
- [17] Y. Tian, L.P. Wang, B. Yang, Y.N. Dai, B.Q. Xu, F. Wang, N. Xiong. Comparative evaluation of energy and resource consumption for vacuum carbothermal reduction and Pidgeon process used in magnesium production[J]. *J. Magnes. Alloys*, 2022, 10: 697-706.
- [18] Z. Zulhan, N. Agustina. A Novel Utilization of Ferronickel Slag as a Source of Magnesium Metal and Ferroalloy Production[J]. *J. Clean. Prod*, 2020, 292: 125307.
- [19] A. Coray, Z. R. Jovanovic. On the prevailing reaction pathways during magnesium production: Via carbothermic reduction of magnesium oxide under low pressures(Article)[J]. *React. Chem. Eng*, 2019, 4: 939-953.

- [20] H.Q. Li, W.J. Zhang, Q. Li, B. Chen. Updated CO₂ emission from Mg production by Pidgeon process: Implications for automotive application life cycle[J]. *Resour Conserv Recycl*, 2015, 100: 41-48.
- [21] C. Wang, S. Zhang, L. Guo. Investigation on the effective thermal conductivity of typical Pidgeon process briquette with a combined model[J]. *Int. J. Heat Mass Transf*, 2017, 115: 1348-1358.
- [22] B.A. Chubukov, S.C. Rowe, A.W. Palumbo, M.A. Wallace, A.W. Weimer. Investigation of continuous carbothermal reduction of magnesia by magnesium vapor condensation onto a moving bed of solid particles[J]. *Powder Technol*, 2021, 365: 2-11.
- [23] C. Srirat, A. St éphane. Clean magnesium production using concentrated solar heat in a high-temperature cavity-type thermochemical reactor[J]. *J. Clean. Prod*, 2019, 232: 784-795.
- [24] T.Z. Ma, Y. Tian, B. Yang, B.Q. Xu, F. Wang, G.Z. Zha, D. Liang, L.P. Wang. Analysis of the behavior of NaF in the vacuum carbothermal reduction of magnesium oxide[J]. *Vacuum*, 2022, 205: 111452.
- [25] B.A. Chubukov, A.W. Palumbo, S.C. Rowe, I. Hischer, A.J. Groehn, A.W. Weimer. Pressure dependent kinetics of magnesium oxide carbothermal reduction[J]. *Thermochim. Acta*, 2016, 636: 23-32.
- [26] B.A. Chubukov, A.W. Palumbo, S.C. Rowe, M.A. Wallace, A.W. Weimer. Enhancing the Rate of Magnesium Oxide Carbothermal Reduction by Catalysis, Milling, and Vacuum Operation[J]. *Ind. Eng. Chem. Res*, 2017, 56: 13602-13609.
- [27] Y. Tian, T. Qu, B. Yang, Y.N. Dai, B.Q. Xu, S. Geng. Behavior Analysis of CaF₂ in Magnesia Carbothermic Reduction Process in Vacuum[J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 2012, 43: 657-661.
- [28] C. Wang, C. Zhang, S.J. Zhang, L.J. Guo. The effect of CaF₂ on the magnesium production with silicothermal process[J]. *Int. J. Miner. Process*, 2015, 142: 147-153.
- [29] Y. Jiang, Y.Q. Liu, H.W. Ma, Z.G. Zhou. Mechanism of Calcium Fluoride Acceleration for Vacuum Carbothermic Reduction of Magnesia[J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 2016, 47: 837-845.
- [30] A. Roine. HSC6.0 Chemistry. Chemical Reactions and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database and Flowsheet Simulation[M]. Outokumpu Research Oy Information Center, Pori, 2006.
- [31] 杨 斌, 徐宝强. 真空冶金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2021.
- [32] M.D. Segall, P.J.D. Lindan, M.J. Probert, C.J. Pickard, P.J. Hasnip, S.J. Clark, M.C. Payne. First-principles simulation: ideas, illustrations and the CASTEP code[J]. *J. Phys: Condens. Matter*, 2002, 14: 2717-2744.
- [33] J.P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof. Generalized gradient approximation made simple[J]. *Phys. Rev. Lett*, 1996, 77: 3865-3868..
- [34] D. Liu, X. Chen, D. Li, W. Fei, X. Luo, B. Yang. Simulation of MoS₂ crystal structure and the experimental study of thermal decomposition[J]. *J. Mol. Struct*, 2010, 980: 66-71.
- [35] 徐日瑶. 有色金属提取冶金手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 263-299.
- [36] J.E. Duran, F. Taghipour, M. Mohseni. CFD modeling of mass transfer in annular reactors[J]. *Int. J. Heat Mass Transf*, 2009, 52: 5390-5401.
- [37] 叶大伦, 胡建华. 实用无机热力学数据手册(第 2 版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002, 9: 176-563.
- [38] 郝润蓉, 方锡义, 钮少冲. 《无机化学丛书》第三卷—碳、硅、锆分族[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 10: 7-67.

- [39] S. Chenakin , N. Kruse. XPS characterization of transition metal oxalates[J]. Appl. Surf. Sci, 2020, 515: 146041.
- [40] M. Kongtunmona, L. Supadeec, W. Kundhikanjanab, P. Janphuand, R. Supruangnetd, W. Jongpinita, D. Munthala, S. Pojprapai. Effect of annealing atmosphere on hydration behavior of MgO thin film in tunneling magnetoresistance sensor[J]. Ceram. Int, 2022, 48: 6966-6970.
- [41] G. Greczynski, L. Hultman. X-ray photoelectron spectroscopy: Towards reliable binding energy Referencing[J]. Prog. Mater. Sci, 2019, 107: 100591.
- [42] W.J. Lee, D.H. Cho, J. H. Wi, J.H. Yu, W.J. Kim, C. Kang, S.J. Kang, Y.D. Chung. Evolution of Morphological and Chemical Properties at p-n Junction of Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells with Zn(O,S) Buffer Layer as a Function of KF Postdeposition Treatment Time[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, 13: 48611-48621.
- [43] T. Nagai, J. Nishinaga, H. Tampo, S. Kim, K. Hirayama, T. Matsunobe, G. Chen, Y. Ide, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, N. Terada. Impacts of KF Post-Deposition Treatment on the Band Alignment of Epitaxial Cu(In,Ga)Se₂ Heterojunctions[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2022, 14: 16780-16790.
- [44] M. Kalaiyarasan, S. Pugalmani, N. Rajendran. Fabrication of chitosan/silica hybrid coating on AZ31 Mg alloy for orthopaedic applications[J]. J. Magnes. Alloys (Available online 8 June 2022).
- [45] N. Xiong, Y. Tian , B. Yang, D.C. Liu, B.Q. Xu, T. Qu, T. Dai, Y.N. Dai, H. Liu. Influence of CO₂ and CO on magnesium vapor condensation in vacuum[J]. Chin. J. Nonferrous. Met, 2019, 29: 851-857.
- [46] N. Xiong, Y. Tian, B. Yang, B.Q. Xu, D.C. Liu, Y.N. Dai. Volatilization and condensation behaviors of mg under vacuum[J]. Vacuum,2018, 156: 463-468.
- [47] S. Chenakin , N. Kruse. XPS characterization of transition metal oxalates[J]. Appl. Surf. Sci, 2020, 515: 146041.

基于真空低温封装的科学级 CCD 相机研制

冯琪^{1,3}, 张鸿飞^{1,3}, 张军^{1,3}, 曾峰^{1,3}, 朱杰², 蒋维捷^{1,3}, 石鑫¹, 朱瑞¹, 王坚^{1,2,3*}

¹核探测与核电子学国家重点实验室, 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

²先进技术研究院, 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³深空探测实验室, 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

*Email: wangjian@ustc.edu.cn

摘要: 人类对于宇宙认识的提升, 很大程度上源于天文望远镜的发展。上世纪 70 年代, 伴随着半导体技术的蓬勃发展, 电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 被发明出来, 使得天文学家能够更加高效地获取, 处理观测数据。CCD 相机逐渐成为天文观测领域的主要工具。

为了获得优良的观测性能, 通常情况下, 相机都需要把 CCD 制冷到极低的温度, 同时对 CCD 靶面的温度稳定性有者较高的要求。因此, CCD 真空封装技术, 对科学级相机的研制有着重要的意义。此外, 在科学级相机的使用过程中, 真空泵的震动会对成像质量造成严重的影响。为了执行长时间的观测任务, 我们需要设计一种无震动的真空维持方案。

在本文的科学 CCD 相机的设计中, 我们设计了一种用于 CCD 真空封装的高真空杜瓦。杜瓦是由玻璃封窗, 杜瓦腔壁, 底法兰, 电子学馈通件组成的密闭腔体。在高真空杜瓦的设计中, 给出了封窗密封以及电子学馈通的方案, 控制杜瓦的真空漏率低至 $10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$, 利用离子泵实现 10^{-6}Pa 的无震动真空维持。

除了获取高真空杜瓦以外, 对 CCD 靶面温度稳定性的控制也是一项重要的工作。杜瓦以及杜瓦内部元件的热辐射, 会对 CCD 的温度稳定性产生较大的影响。在本科学相机的研制中, 设计了一种 CCD 热辐射隔离方案。同时, 对真空杜瓦内部的主要热辐射元件, 即 PCB 的散热提出了一种解决方案。

关键词: 高真空, 真空维持, 真空低温封装, CCD, 科学级相机

参考文献:

- [1] Jie Chen, Hong-fei Zhang, Jian Wang, Jin-ting Chen, Jun Zhang, "The verification platform for the mosaic CCD camera in WFST," Proc. SPIE 11101, Material Technologies and Applications to Optics, Structures, Components, and Sub-Systems IV, 111010D (30 August 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2528417>
- [2] Martin Nordby, Gordon Bowden, Mike Foss, Gary Guiffre, John Ku, Rafe Schindler, "Mechanical design of the LSST camera," Proc. SPIE 7018, Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation, 70182H (23 July 2008); <https://doi.org/10.1117/12.790040>
- [3] Cheng Chen, Jun Zhang, Hongfei Zhang, Jian Wang, Qi-Jie Tang, Hui Wang, Zhiyue Wang, Yi-Hao Zhang, Wei-Jie Jiang, Jin-Ting Chen, Qi Feng, Feng Zeng, Qian Zhang, Jie Zhu, Han-Fei Zhu, "Design of CCD test platform of scientific imaging for wide field survey telescope," J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 8(1) 016005 (16 March 2022) <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.1.016005>
- [4] "CCD290-99 back illuminated scientific CCD sensor," (2016) <https://www.e2v.com/resources/account/download-datasheet/1897> Google Scholar
- [5] M. J. Clapp, "Development of a test system for the characterisation of DCDS CCD readout techniques," Proc. SPIE 8453, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V, 84531D (25 September 2012); <https://doi.org/10.1117/12.925393>

140GHz 回旋管电子枪阴极温度均匀性分析

杨明哲^{1,2}, 王小霞^{1*}, 孟鸣凤¹, 杨晨¹, 高察¹, 罗积润^{1,2}

¹中国科学院空天信息创新研究院 高功率微波源与技术重点实验室, 北京, 邮编 100190;

²中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京, 邮编 100180

*Email: xxwang@mail.ie.ac.cn

摘要: 回旋管作为一种工作在高频段且具有高功率、高效率特点的真空电子器件, 在雷达通信、电子对抗、高能加速器和等离子体加热等方面具有广泛的应用前景。在回旋管中, 磁控注入电子枪

为其核心部件，采用热阴极的工作方式，内置的发热灯丝将热量传递到阴极发射带上，使电子获得足够的能量，受激并逸出阴极表面，产生电子注。由于磁控注入电子枪工作在温度限制区，阴极的热分布会影响电子枪的发射性能和寿命，成为制约回旋管可靠性的主要因素^[1-5]。本文利用 ANSYS 软件对磁控注入电子枪阴极温度均匀性及热形变进行分析，得到了电子枪阴极发射带的稳态温度分布及热形变分布。选取能达到工作温度的合适的加热功率，并通过优化电子枪内热子绕制的螺距、半径及位置，使工作温度下的阴极发射带的温差减小到 1.1℃，提高了阴极发射带温度的均匀性，奠定了电子注发生质量保证的基础。在热分析的基础上进行热形变分析，得到电子枪轴向上最大形变为 0.57mm，径向上最大形变为 0.5mm，阴极发射带轴向上最大形变为 0.36mm，径向上最大形变为 0.26mm。通过对比相同加热功率下阴极发射带的实测温度及仿真温度，评价了仿真模型及结果的合理性，能够为阴极组件的实际设计提供了参考数据。

关键词：回旋管，电子枪阴极，热分析，ANSYS，热形变

参考文献：

- [1] R. Lawrence Ives, Philipp Borchard, et al, Improved Magnetron Injection Guns for Gyrotrons[J], IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 36, no. 3, pp. 620-630.
- [2] Liu Y, Liu J, Tang C, et al. Thermal analysis of magnetron injection gun for 170 GHz gyrotron[J]. Microw Opt Technol Lett. 2020; 62: 2774– 2781.
- [3] Niu Jingyang, Wang Li, Luo Yong, et al. Thermal analysis of electron gun cathode for gyrotron travelling wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25: 446-450
- [4] P. V. Siva Rao, P. Srikrishna, N. K. Sharma, et al. Thermal analysis of Magnetron Injection Gun[J], 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference, 2009, pp. 491-492.
- [5] Yao Lieming, Xiao Li, Yang Zhonghai. Thermal stress analysis of the electron gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16.

基于 DSMC 方法的轰击靶材试验羽流场数值模拟

崔寓溟 郭崇武 张子罡 齐嘉东

北京卫星环境工程研究所 北京 100094

*Email: C_dzdd@aliyun.com

摘要： 激光或微波等驱动源真空环境下轰击靶材瞬态的释气量数据可以采用质谱仪、真空规、石英晶体微量天平以及高速摄影等方式获得。本文基于轰击靶材工作原理以及测量得到的释气原始数据，构建了轰击试验释气理论模型，利用蒙特卡洛方法，对其真空环境下的羽流场进行了数值模拟计算，得到了轰击靶材瞬态的流场云图变化情况。本研究意在通过计算轰击靶材瞬态的压力场、温度场以及速度场模拟，对轰击频次计算、流场试验预测以及过程变化分析等需求提供理论基础。

关键词：蒙特卡洛 分子流 介质表面 数值模拟

参考文献：

- [1] 陈庚, 洪延姬, 叶继飞. 透射式激光烧蚀含能聚合物的羽流实验[J]. 物理实验, 2016(3):6.
- [2] Yu Z, Wu J, Zhang D, et al. Investigation on plume expansion and ionization in a laser ablation plasma thruster[J]. Acta Astronautica, 2018, 151(OCT.):432-444.
- [3] 黄惠军, 常超, 侯青, 等. 真空条件下介质窗表面微波击穿实验[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4):4.
- [4] 肖立. 真空沿面放电过程中固体电介质表面气体脱附特性研究[D]. 中国科学院研究生院.

基于 CFD 的改良右心室流出道手术血流动力学优化研究

徐博¹, 王晓冬^{1*}

¹ 东北大学真空与流体工程研究所, 辽宁沈阳, 邮编 110819;

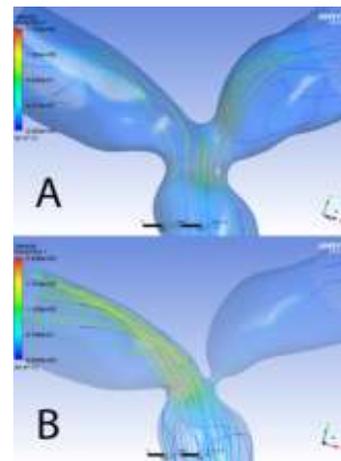
*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

关键词：计算流体力学 (CFD), 先天性心脏病, 血液流体力学, 流固耦合先天性心脏病在近五十年中的患病率在逐渐增加, 现在平均以百分之十每五年的数量递增^[1]。随着科学技术的提高, 各种针对不同种类先天性心脏病的手术方案被设计出来并且逐步在临床上予以实验。

本文基于 CFD 研究比较了, 先天性缺乏肺动脉至右心室处的血管, 由导管代替后的血液流体力学情况。在研究过程中, 本文使用临床真实案例, 通过 3D-Slicer、Mimics 完成了对目标区域的可视化。其次通过 UG、3-matic、Geomagic、Magics 进行建模与修复工作。再次通过 ICEM 分别绘制出流体域和固体域的网格, 并保证网格质量保持在 0.38 以上。最终通过 Ansys 完成目标区域的血液流体力学仿真^[2]。

在重建右心室流出道 (RVOT) 手术中, 本文首先对患者的术前血液流体情况进行分析, 解释了患者寻求手术治疗的原因。其次对患者术后初期的情况进行分析, 对其术后的恢复情况做出预测。最终通过患者术后末期情况的分析, 印证了本文的结论。证明了可以通过 CFD 对 RVOT 手术的术后情况进行较高精度的预判且对于心血管流体溃缩患者, 逆向寻找解决方案同样有很高效率^[3]。

对于本文的临床病例, 通过血液流体分析对 RVOT 手术中如何提升血液流体力学、术后流场出现问题的原因以及术后末期血管溃缩发生的位置等问题进行了解释。并且从三个方向提出了有针对性的解决方案。针对肺动脉左右两支分布不均匀的情况, 本文提出修改管道缝合角度的方案; 针对肺动脉冲击区分支口溃缩的情况, 本文提出调整管道与肺动脉的缝合面; 针对整体手术区域血流动力学提升, 本文提出更新现有替换管道结构。



参考文献：

[1] 胡盛寿, 高润霖, 刘力生, et al.《中国心血管病报告 2018》概要 中国循环杂志[J],2019, 34 (03): 209-220.

[2] Choi K H, Sung S C, Kim H, et al.Simplified Tricuspid Polytetrafluoroethylene Valved Conduit: Midterm Results of Multicenter Study[J].The Annals of Thoracic Surgery,2019, 108 (4): 1228-1233.

[3] Urso S, Rega F, Meuris B, et al.The Contegra conduit in the right ventricular outflow tract is an independent risk factor for graft replacement[J].European Journal of Cardio-Thoracic Surgery,2011, 40 (3): 603-609.

基于 COMSOL 多物理场仿真软件对聚变装置偏滤器泵送系统抽气能力的模拟研究

张一聪^{1, 2*} 左桂忠¹ 毕海林² 陈肇玺¹

¹中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥, 邮编 230031;

²合肥工业大学机械工程学院, 安徽合肥, 邮编 230009

*Email: hfut1zyc@163.com

摘要: 实现及时有效地粒子排出对托卡马克装置长脉冲稳定运行来说至关重要^[1], 其中偏滤器泵送系统在维持基本真空条件和提供良好的粒子控制方面扮演着重要角色。由于聚变装置偏滤器区域和抽气管道布局的结构复杂性, 在设计阶段评估泵送能力是否满足要求是极其困难的, 因此需要利用模拟的方法计算流导, 进而求得低温泵对真空室的抽气速率, 评估抽气方案的可行性。本文根据下一代聚变装置偏滤器泵送系统在物理要求条件下所处入口压力和流态范围, 提出可使用 COMSOL 多物理场仿真软件对其进行流导计算^[2], 其中 COMSOL 滑移流模块和自由分子流模块分别采用滑移边界条件修正纳维斯托克方程 (N-S+slip) 法和角系数 (AC) 法, 这两种方法相较于直接模拟蒙特卡罗 (DSMC) 法和 ITERVAC 代码有着更高的计算效率并可直接模拟三维模型。利用聚变装置基础方案的 1/16 模型对上述两种方法进行有效性验证, 最大误差不超过 5%, 验证了 COMSOL 模拟的可行性; 然后利用 COMSOL 多物理场仿真软件对偏滤器底部添加中子屏蔽块后的方案进行模拟、评估和优化, 模型采用更为精准的 1/8 模型, 结果表明: 当屏蔽块局部环向切除部分的通道深度为 160 mm, 偏滤器内部通道宽度为 200 mm 时, 8 个外置低温泵对真空室的总抽气量在偏滤器入口压力为 10 Pa、1 Pa 和 1E-5 Pa 时分别为 2433.60 Pa m³/s、125.84 Pa m³/s、5.68E-4 Pa m³/s, 均满足预定抽气要求, 该研究为中国下一代聚变装置工程设计提供了重要的数据支持。

关键词: 聚变装置, 偏滤器泵送系统, 流导计算, COMSOL 多物理场仿真, N-S+slip, AC

参考文献:

[1] Zuo, G.Z., et al., Reduction of hydrogen content in deuterium plasma with mixed graphite and tungsten divertors in EAST. Fusion Engineering and Design, 2018. 131: p. 41-48.

[2] 张一聪, 毕海林, 樊翔, 左桂忠, 陈肇玺, 王旭迪. 不同流态下真空管道流导值的数值模拟研究[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(04): 276-281. DOI: 10.13922/j.cnki.cjvst.202201003.

铅阳极泥真空气化高效分离砷-清洁制备 As_2O_3 的研究

李绍雄^{1,2} 高哲^{1,2} 孔祥峰^{1,2,3*} 杨斌^{1,2,3} 范凯^{1,2} 伊家飞^{1,2}

¹昆明理工大学真空冶金国家工程研究中心, 云南昆明, 邮编 650093;

²昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南昆明, 邮编 650093;

³云南省复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南昆明, 邮编 650093;

*Email: xngfngkong@163.com

摘要: 铅阳极泥是粗铅电解精炼的副产物, 是提取金、银、碲等稀贵金属的主要原料。传统方法每处理 1 吨铅阳极泥约产生 0.3 吨高砷烟尘, 2021 年全国铅冶炼企业高砷烟尘产出量超过 4 万吨且难以有效利用, 累积堆存量超过 60 万吨。高砷烟尘的产生增加了稀贵金属的回收难度, 加重了生产环境的污染程度。以“砷害”问题的源头解决为出发点, As_2O_3 的清洁制备为指导, 提出“定向氧化砷-真空气化分离 As_2O_3 -清洁制备 As_2O_3 ”的冶金新技术, 重点研究了铅阳极泥中砷的定向氧化调控机制和氧化调控产物真空挥发过程中相际间物质分布规律。有机结合了铅阳极泥中元素的氧化特性及挥发特性。在真空度为 5 Pa, 气化温度 340 °C 时, 铅阳极泥中的砷大量以 As_2O_3 的形态挥发, 收集到的 As_2O_3 纯度大于 99%。构建了铅阳极泥中砷高效分离及 As_2O_3 清洁制备的基础理论和技术原型, 有效解决了铅冶炼行业砷害共性难题, 显著提高了砷的资源化利用率, 为阳极泥中砷的高效分离与清洁利用提供了新方向。

关键词: 铅阳极泥, 砷, 真空气化, 清洁制备, As_2O_3

真空气化-冷凝协同处理高碲铅阳极泥高效富集碲的研究

高哲^{1,2} 范凯^{1,2} 孔祥峰^{1,2,3*} 杨斌^{1,2,3} 伊家飞^{1,2} 李绍雄^{1,2}

¹昆明理工大学真空冶金国家工程研究中心, 云南昆明, 邮编 650093;

²昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南昆明, 邮编 650093;

³云南省复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南昆明, 邮编 650093;

*Email: xfkong@kust.edu.cn

摘要: 碲是一种具有特殊性能的战略稀散金属, 在航天航空、原子能、太阳能、电子半导体等新兴领域发挥着关键作用。2021 年中国产碲 290 吨, 其中 90% 产于铅铜阳极泥, 从铅铜精炼副产的阳极泥中综合提取是碲冶炼的主流趋势。铅铜阳极泥传统提碲技术存在工序繁琐、碲高效分离困难、环境污染突出等共性难题, 亟待开发清洁高效的新技术。本文借助真空冶金的独特技术, 有机融合元素的挥发特性、冷凝特性, 提出真空气化-冷凝协同处理高碲铅阳极泥的新方法, 在低压密闭环境中实现了稀散金属碲的高效富集。在蒸馏温度为 1173 K, 恒温时间为 50 min, 系统压力为 5~15 Pa 的实验条件下, 高碲铅阳极泥中 92% 的碲挥发进入气相, 88% 的碲在冷凝挥发物中得以回收, 碲的

百分含量从 0.21% 提升至 3.0%。该过程在封闭的系统中作业，稀散金属碲基本无损失，且不会产生危险固废、剧毒废液，烟尘量少，环境风险低，达到了高碲铅阳极泥绿色高效富集碲的目的。

关键词：真空气化，冷凝，高碲铅阳极泥，碲，绿色高效

晶体结构对金属材料溅射产额影响的分子动力学模拟分析

黄海龙 王晓冬* 赵坤

东北大学真空与流体工程研究所，辽宁沈阳，邮编 110819

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要：金属材料溅射理论广泛应用于硬质薄膜、耐磨损抗氧化薄膜、光学薄膜技术，核聚变材料辐照损伤，核聚变材料优化，溅射离子泵阴极板优化等研究中。传统溅射理论多采用半理论半经验公式结合的计算方法，如 Sigmund 溅射理论^[1]、Matsunami 优化理论^[2]等。较为成熟的溅射行为模拟软件，如 SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter)，同样采用了半理论半经验的计算方法，结合蒙特卡洛法考虑了溅射的随机性，同时由于其理论限制，计算仅考虑原子质量与原子比例。

为探究晶体结构对金属材料溅射行为的影响，针对不同材料、不同晶体结构对溅射产额的影响及其作用机理，本文使用分子动力学方法对溅射行为进行模拟计算。计算采用 $24 \times 24 \times 18$ (lattice³) 尺寸不同合金模型，镍原子入射，入射能量为 9keV。合金材料原子间作用势采用 EAM 金属嵌入势，入射原子与材料原子间作用势采用 ZBL 势，原子入射碰撞阶段时间步长 0.01fs，三个损伤自愈阶段时间步长分别为 0.02fs、0.03fs 和 0.1fs。

经模拟计算与结果分析，得到以下结论：1. 出射原子角度分布均大致遵循余弦定律；2. 不同晶体结构、相近元素材料溅射产额相差较大，可相差至几倍；3. 相同晶体结构、不同元素材料溅射产额不同，主要取决于材料原子间作用力，当原子间作用力较大时，晶体结构牢固，原子间级联碰撞过程明显，能量传递过程中倾向于直接传递至少数相邻原子中，溅射产额较大；当原子间作用力较小时，晶体结构松散，晶体结构易于被破坏，能量传递过程中倾向于分散至多数原子中，溅射产额较小。

关键词：原子溅射，晶体结构，分子动力学模拟，溅射产额，溅射角度分布

参考文献：

- [1] Sigmund P . Stopping of slow ions [J]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics, 2008, 72(5): 569-578.
- [2] Yamamura Y , Tawara H . ENERGY DEPENDENCE OF ION-INDUCED SPUTTERING YIELDS FROM MONATOMIC SOLIDS AT NORMAL INCIDENCE [J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1996, 62(2): 149-253.

贵铅真空蒸馏脱砷及富集贵金属 M-MIVM 模型研究

杨志成^{1,2,3,4}, 孔令鑫^{1,2,3,4*}, 杨斌^{1,2,3,4}

¹昆明理工大学真空冶金国家工程研究中心, 云南昆明, 邮编 650093;

²昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南昆明, 邮编 650093

³昆明理工大学云南省有色金属真空冶金重点实验室, 云南昆明, 邮编 650093;

⁴昆明理工大学省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南昆明, 邮编 650093;

*Email: 781893609@qq.com

摘要: 粗铅电解精炼副产物(如阳极泥, 贵铅)是提取银的主要原料^[1], 也是典型含砷物料。目前从铅电解副产物中提取银传统技术面临砷害问题突出、富集效率低、资源综合利用率低等共性难题^[2]。针对上述问题, 本研究巧妙利用元素气化特性差异, 创新性提出高砷贵铅真空蒸馏一步脱砷及富集银的新思路, 创建 M-MIVM 模型^[3], 有效预测了真空蒸馏过程中主要合金组分(As-Sb、As-Cu 等)的分离限度, 通过开展系列单因素实验研究验证了 M-MIVM 模型的准确性与可靠性, 指导并获得最优工艺参数。在系统压强 5Pa, 蒸馏温度 600°C 条件下, 同步实现砷以无毒金属态开路、锑综合回收及铅铋银铜高效富集。

关键词: 贵铅, 真空蒸馏, M-MIVM 模型, 无害化回收, 单质砷

参考文献:

- [1] Yi J, Zha G, Huang D, Kong X, Yang B, Liu D, Xu B. Effective separation and recovery of valuable metals from high value-added lead anode slime by sustainable vacuum distillation. *Journal of Cleaner Production*, 319: 128731, (2021).
- [2] Yang K, Liu W, Zhang T, Yao L, Qin W. Water leaching of arsenic trioxide from metallurgical dust with emphasis on its kinetics. *Journal of Central South University*, 26(9): 2328–2339, (2019).
- [3] Dai H, Tao D P. A statistical thermodynamic model with strong adaptability for liquid mixtures. *Fluid Phase Equilibria*, 473: 154–165, (2018).

喷嘴膨胀状态对水蒸汽喷射器内部流动行为的影响

张国玉, 王晓冬*, 匡永麟

(东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳 110819)

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要: 水蒸气喷射器作为一种结构简单、运行稳定的真空获得设备, 广泛应用于发电、制冷、海水淡化等领域, 然而其内部流动过程极为复杂(如存在激波、壅塞、边界层分离以及相变等现象)。本文以数值模拟技术为主要研究手段, 以改善和提高水蒸气喷射器的运行能效为目标, 研究了水蒸

汽喷射器喷嘴在不同状态下的流场结构及其对水蒸气喷射器内部流动特性的影响。研究表明：喷嘴的运行工况大致可分为四个区域，分别为：欠膨胀区域、完全膨胀区域、过膨胀区域以及非拉瓦尔喷嘴区域，并且在兼顾抽气能力、运行效率、排气能力以及获得真空度能力的同时，水蒸气喷射器处于完全膨胀区域与过膨胀区域时具有较好的运行工况，并且在过膨胀区域内具有最佳运行工况条件。

关键词：水蒸气喷射器，喷嘴，膨胀状态，数值模拟

参考文献：

- [1] 索科洛夫, 津格尔 著. 黄秋云 译. 喷射器[M]. 北京:科学出版社, 1977: 8-10.
- [2] (Sokolov, Zinger. Translated by Huang Qiuyun. Ejector [M]. Beijing: Science Press, 1977: 8-10.)
- [3] Haghparast P, Sorin M V, Nesreddine H. The impact of internal ejector working characteristics and geometry on the performance of a refrigeration cycle[J]. Energy, 2018, 162: 728-743.
- [4] Li H, Wang X, Huang H, et al. Numerical study on the effect of superheat on the steam ejector internal flow and entropy generation for MED-TVC desalination system[J]. Desalination, 2022, 537: 115874.
- [5] Karthick S K, Rao S M V, Jagadeesh G, et al. Experimental parametric studies on the performance and mixing characteristics of a low area ratio rectangular supersonic gaseous ejector by varying the secondary flow rate[J]. Energy, 2018, 161: 832-845.
- [6] Guoyu Zhang, Haotian Zang, Xiao Ma, et al. Performance Optimization Experiment of Supersonic Steam Jet Pump Based on Nano-tracerbased Planar Laser Scattering[C]. VASSCAA-10 & CVS, 2021.
- [7] MA Xiao, ZHANG Guo-yu, WANG Xiao-dong. Analysis of the influence of operating parameters on the optimal structure of steam ejector based on multi-parameter analysis[C]. VASSCAA-10 & CVS, 2021.

磷化铟半导体废料清洁高效回收再生铟和磷研究

张嘉鹏^{1,2,3}, 孔令鑫^{1,2,3,4*}, 杨斌^{1,2,3,4}

1 昆明理工大学真空冶金国家工程研究中心, 云南昆明, 邮编 650093;

2 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南昆明, 邮编 650093

3 昆明理工大学云南省有色金属真空冶金重点实验室, 云南昆明, 邮编 650093;

4 昆明理工大学省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南昆明, 邮编 650093;

*Email: 2493914639@qq.com

摘要：近年来磷化铟半导体消费量不断增加，废料量也与日俱增^[1,2]，然而现有处理技术在回收过程中易产生黄磷、PH₃等剧毒物质^[3]，严重阻碍了磷化铟回收的产业化实施，本研究创新地提出磷化铟废料“真空分解-定向冷凝”回收再生铟和磷技术，深入开展了热力学理论研究验证了该技术的可行性与限度，基于理论研究开展了系列单因素实验研究，考察了①磷化铟分解率，②铟纯度与直收率，③黄磷转化率与纯度的影响因素与规律。综合考虑上述因素，获得了最优工艺参数，并设计

了一套磷化铟废料安全环保回收装置,实现了磷化铟废料更环保、更安全处理,铟纯度>99.43 wt.%,直收率>98.70%,磷以无毒、稳定的红磷形态回收,纯度>98wt.%,有效避免了剧毒白磷与 PH_3 气体的产生,为清洁高效循环利用磷化铟废料开辟了新路径,具有广阔的工业应用前景。

关键词: 磷化铟废料, 回收, 真空分解-定向冷凝, 环境友好, 红磷

参考文献:

- [1] Ismaeel M M*, Mijwil M M, “Optical and Electrical Performance Analysis of InGaAs/InP Laser for Various Crystal Orientations”, Asian Journal of Engineering and Technology, 10(1), (2022).
- [2] InP Wafer, “Epiwafer and Device Market 2021: Photonics and RF Applicati-ons”, Yole Développement, (2021).
- [3] S. Takeshi, N. Naotoshi, N. Tetsuo, “Treatment of Scrap Indium-Phosphorus Compound Semiconductor”, J.P. Patent: 2518330B2, (1996).

基于稀疏分解理论的 EAST 分子泵状态监测研究

贾凯^{1,2} 袁啸林^{1*} 左桂忠¹ 陈跃^{1,2} 胡建生¹

¹中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥, 邮编 230000;

²安徽工程大学, 安徽芜湖, 邮编 241000

*Email: xlyuan@ipp.ac.cn

摘要: EAST 全超导托卡马克的真空系统是确保装置在长脉冲条件下进行高参数等离子体稳态运行的关键。分子泵作为 EAST 装置真空系统的核心真空设备,在长时间运行过程中不可避免的出现损伤与故障,因此对分子泵实施状态监测是必要的。分子泵振动信号经采集后,包含的重要运行状态信息部分会被噪声淹没,这将导致从干扰信号中提取特征变得非常困难,此外监测过程中的大量干扰信号也严重影响了信号的传输,难以实现精确的分子泵状态监测与故障诊断。为了避免直接提取被噪声污染的原始数据特征,提出了一种基于稀疏分解理论的新方法。首先,将原始信号进行离散余弦变换,再将变换域内的系数值小于 2%峰峰值的信号作为噪声去除,降噪后的 DCT 系数已初具稀疏分解理论所需求的稀疏性,为更进一步的提升数据稀疏性以及压缩原始数据,再将降噪后的稀疏系数经过 DCT 反变换后,通过 K-SVD 字典学习算法训练降噪数据得到特定运行状态的过完备字典,最后,对不同状态下的分子泵振动信号在此特定的过完备字典上进行稀疏分解,利用 OMP 算法进行信号重构,根据不同信号在特定数据字典上的稀疏表示误差不同,设置相应阈值,无需提取任何时频域特征即可以实现准确的分子泵的状态监测,数据也仅需传输与存储已训练的特定字典与相应的稀疏系数。经实验验证,对比传统方法直接将干扰信号作特征提取,本方法在设置合适的阈值情况下,测试集的诊断率达 99.75%,经过稀疏分解的数据压缩率达 96.8%,且完整保留了信号的本质特征,本方法为分子泵状态监测的信号恢复与存储提供了新的解决思路。

关键词: 超高真空, 分子泵, 稀疏分解, 字典学习

参考文献:

- [1] Z. C. Dong, * X. L. Zhang, H. Y. Gao, Y. Luo, C. Zhang, L. G. Chen, R. Zhang, X. Tao, Y. Zhang, J. L. Yang, J. G. Hou, * "Generation of molecular hot electroluminescence by resonant nanocavity plasmons", *Nature Photonics* 4, 50-54 (2010).
- [2] R. Zhang, Y. Zhang, Z. C. Dong, * S. Jiang, C. Zhang, L. G. Chen, L. Zhang, Y. Liao, J. Aizpurua, Y. Luo, J. L. Yang, and J. G. Hou, * "Chemical mapping of a single molecule by plasmon enhanced Raman scattering", *Nature* 498, 82 (2013).

从复杂铅矿中制取硫化铅的新工艺研究

杨 欢^{1,3,4}, 孟朝松^{1,3,4}, 卫晓晖^{1,3,4}, 熊 恒^{1,2,3,4,*},

- (1. 昆明理工大学 云南省有色金属真空冶金重点实验室, 昆明, 650093;
2. 昆明理工大学 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明, 650093;
3. 昆明理工大学 真空冶金国家工程研究中心, 昆明, 650093;
4. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明, 650093)

摘要: 硫化铅 (PbS) 在光学器件、太阳能电池等众多领域应用潜力巨大。传统制备硫化铅的方法存在效率低、污染重, 原料要求高的问题。本文提出“先聚积再纯化”的技术新思路从复杂铅硫化矿中制取硫化铅, 从理论上分析了真空条件下分离和富集 PbS 的可行性。在 5Pa 条件下, 实验研究了第一步真空聚积时蒸馏温度和蒸馏时间对复杂矿物的影响, 探究了矿物中 PbS 的升华及直收率, 确定了 1103K 下保温 60min 是聚积 PbS 的最优参数, 直收率达 99.1%; 第二步进行蒸馏提纯, 在 923K 下保温 120min 提纯硫化铅, 能获得纯度大于 99.5% 的硫化铅产品, 直收率为 96.19%。“先聚积再纯化”的方法为高效获取硫化铅提出了新思路, 同时为复杂铅矿的综合利用提供了新途径, 可缓解单一高品位铅精矿供铅的严峻形势。

关键词: 硫化铅、真空蒸馏、复杂铅矿、提纯

EAST 装置强磁场下的直流辉光放电清洗实验研究

余耀伟^{1,2*} 孙浩¹ 王超¹ 曹斌¹ 左桂忠¹ 胡建生¹

¹ 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥, 邮编 230031;

*Email: yuyaowei@ipp.ac.cn

摘要: 低杂质水平、低燃料粒子滞留和再循环是托卡马克运行的基本条件之一, 放电清洗是托卡马克运行中清除杂质和壁滞留粒子的基本方法。如何能够在强磁场条件下高效率地清除杂质和燃

料滞留粒子，是超导托卡马克和未来核聚变反应堆研究的一个关键问题。

前期的研究认为强磁场会阻碍直流辉光电流的形成，因此强磁场下直流辉光无法稳定运行。EAST 超导托卡马克上辉光电极安装在低场侧，在强磁场形成的磁力线方向上，辉光电极与附近的内部件之间，能够形成稳定的辉光电流，实验进一步证实了该设想，在 EAST 装置上成功实现了 2.5T 强磁场下的直流辉光放电清洗的稳定运行，辉光等离子体环向相对均匀，通过选择性地运行辉光电极，可以证明辉光等离子体是辉光电极与附近的内部件之间沿磁力线方向形成的。相比于无磁场下的辉光，强磁场下直流辉光击穿所系的气压更低，但是维持相同电流所需的电压更高。实验结果还表明在 1–2.5T 范围内，磁场强度对直流辉光放电清洗的清除效率的影响微弱。该研究结果为未来聚变堆强磁场条件下清除氙滞留提供了一种新的方案。

关键词：直流辉光，放电清洗，强磁场，EAST

参考文献：

- [1] Yaowei Yu, et al., “Fuel recycling control in long pulse operation with full tungsten divertors in EAST tokamak”, Nuclear Materials and Energy 34 101333 (2023)
- [2] 曹红梅, 余耀伟* 等, “EAST 装置磁场条件下的辉光放电清洗实验研究”, 真空科学与技术学报 42 835 – 839 (2022)

区熔锆渣真空蒸馏法回收制备高纯锆

卫晓晖, 孟朝松, 杨欢

指导教师: 熊 恒

(昆明理工大学, 冶金与能源工程学院, 冶金工程专业)

摘要：区域熔炼产出达不到 6N 锆产品要求的区熔锆渣，采用真空蒸馏法回收，其原理是在高温和真空条件下利用金属蒸气压的差异性来实现主金属与杂质有效分离。根据经典热力学计算得知，随蒸馏温度升高，区熔锆渣种 12 种主要杂质的挥发先后顺序为：In、Zn、Mg、As、Ca、Pb、Al、Cu、Fe、Ni、Co、Ge、Si。其中，Mg、Ca、Zn、Pb、As 优先于锆挥发进入气相；Al、Cu 与锆分离相对困难；Fe、Co、Ni、Si 难于锆挥发。研究以区熔锆渣为实验原料，开展百克级真空蒸馏实验，考察不同蒸馏温度、蒸馏时间条件下，区熔锆渣中 Mg、Al、Ca、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、In、Pb/Bi、As、Si 十二种杂质元素的去除效果与规律。

In-Pb 合金真空蒸馏分离及气液平衡研究

陈亮亮^{1,2}, 王亚楠^{1,2}, 孔令鑫^{1,2,*}

¹昆明理工大学 真空冶金国家工程研究中心, 云南昆明, 邮编 650093;

²昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南昆明, 邮编 650093

*Email: kkmust@126.com

摘要: 稀有金属铟 (In) 具有延展性好、可塑性强等优良特性, 被广泛应用于平板显示、半导体工业技术等领域。随着科技的不断发展, 市场对铟的需求量及纯度要求将不断加大, 如何高效提纯铟成为冶金行业亟待解决的关键问题。铟的提取主要来源于精矿冶炼后的产品, 在精矿冶炼后的产品中, Pb 为主要的杂质之一, 采用电解、酸浸等传统方法将这些杂质去除提纯铟面临流程长、金属回收率低、环保压力大等问题。真空蒸馏具有流程短、能耗低、无污染等优点, 被广泛应用于废旧合金及粗金属的分离提纯。因此可以采用真空蒸馏的方法将精矿冶炼后残留物中的铅去除, 提纯铟。在系统压力 5~10 Pa、蒸馏温度 1180~1280K 开展了铟-铅 (In-Pb) 二元合金真空蒸馏实验研究。结果表明真空蒸馏可有效脱除铅, 提纯铟。采用相互作用体积模型 (MIVM) 计算 In-Pb 合金组元的活度, 平均相对偏差分别为 $\pm 9.157\%$ 、 $\pm 9.1596\%$, 表明采用 MIVM 计算 In-Pb 合金组元的活度是可靠的。采用 MIVM 预测 In-Pb 合金体系的气-液平衡 (VLE) 数据, 并与实验值进行对比, 二者吻合, 表明采用 MIVM 预测铟基合金体系的 VLE 是可靠的, 可用于指导真空蒸馏分离铟基合金。本研究将模型预测与真空蒸馏实验相结合, 不仅验证了 MIVM 的可靠性, 还优化了真空蒸馏分离铟基合金的工艺参数, 为真空蒸馏分离提纯铟基合金或处理含铟复杂物料提供理论指导。

关键词: 真空分离, In-Pb 合金, VLE, 模型预测

参考文献:

- [1] T.T. Werner, Gavin M. Mudd, Simon M. Jowitt. The world's by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 86.
- [2] Ling-xin Kong, Bin Yang, Yi-fu Li, Bao-qiang Xu, Long Han, Da-chun Liu, Yong-nian Dai. Application of molecular interaction volume model in separation of Sn-Zn alloy by vacuum distillation[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(12).

EAST 装置等离子体放电真空室抽气系统抽速标定及应用

黄明^{1,2} 元京升^{1,2} 左桂忠¹ 庄会东¹ 曹斌¹ 余耀伟¹ 徐宏亮^{2*} 胡建生¹

¹中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽合肥, 邮编 230031;

²中国科学技术大学, 安徽合肥, 邮编 230026

*Email: hlxu@ustc.edu.cn

摘要: 真空系统是聚变装置的重要组成部分, EAST[1]真空系统包括等离子体放电真空室和低温

超导真空室, 等离子体放电真空室又称内真空室。内真空室抽气系统直接影响装置的粒子排出, 关系到高参数等离子体放电获得。EAST 装置升级改造后的内真空室抽气系统主要包括主管道抽气, 偏滤器抽气和低杂波抽气, 整个抽气系统使用了 6 台分子泵、14 台外置低温泵和 2 套内置低温泵。采用粒子平衡的方法, 对内真空室抽气系统各子系统进行了抽速标定[2], 实验结果表明最佳抽气性能区间在 10^{-3} Pa 附近, 并且随着真空室压强增大或者减小, 各子系统的抽气速率均呈现下将的趋势。对比改进前后的内真空室抽气系统的总抽速, 改进后的最大抽速可达到 ~ 170 m^3/s , 总体抽气速率提升 $\sim 20\%$ 。在百秒量级等离子放电参数下, 利用标定的抽气速率数据初步评估了燃料粒子的滞留情况。本研究为等离子体放电的壁滞留与再循环控制以及其他相关物理实验开展提供了数据支持。

关键词: 真空抽气系统, 抽气速率标定, 燃料粒子滞留, EAST

参考文献:

- [1] 万宝年, 徐国盛, EAST 超导托卡马克, 科学通报, 60 (2015) 2157-2168.
- [2] 胡建生, 辜学茂, 王小明, 罗南昌, HT_7 超导托卡马克装置真空系统参数的标定及分析, 真空科学与技术学报, 24 (2004) 149-153.

现代飞行器燃油系统气密检测技术

宁东 李红才 宋延双

国营长虹机械厂, 广西桂林, 邮编 541003;

*Email: 841035111@qq.com

摘要: 本文介绍了飞行器燃油系统的组成及功能, 将其特点总结归类。分析飞行器燃油系统气密性的重要性及现状, 对检测燃油系统气密性的氦质谱检漏法等常用气密检测方法进行分析并总结出适用范围。

关键词: 飞行器、燃油系统、气密检测技术、氦质谱检漏法

一、引言

飞行器(飞行器械)是指在大气层内或大气层外空间(太空)飞行的器械。包括航空器、航天器、火箭等。

气密检测技术涉及物理学、化学、热学、力学、材料学等多个学科。在飞行器设计制造时, 飞行器的正常运转与系统的密封性密不可分。飞行器的密封结构分为气体密封结构和液体密封结构。不同的飞行器甚至同一飞行器内不同系统的密封结构都存在差别。例如飞行器的加压舱是气体密封结构, 燃油系统是液体密封结构。密封结构泄漏是威胁飞行器运行安全和造成空难的重要原因。在飞行器制造和日常维护检修时, 不同飞行器内部密封结构的检漏标准存在差异, 需要选用合适的气密检测方法, 保证密封性能完好, 进而保证飞行器运行安全。而优化检测手段、提升精度、降低或避免检测对密封结构的损伤对于飞行器的可靠性有着重要的意义。

二、飞行器燃油系统的特点

在飞行器的系统构成中，燃油系统是飞行器的关键系统之一。飞行器燃油系统主要由燃油箱子系统、启动燃油子系统、主燃油子系统、应急放油子系统、通气子系统、地面压力加油子系统构成。^[1]它不仅承担着给飞行器输送“血液”的任务，而且还具有保持飞行器重心和给飞行器上其他设备冷却的作用，一旦燃油系统出现故障，将会影响飞行器实现特定功能，危及飞行安全。飞行器燃油系统的特点有如下几个方面：

- 1.燃油系统燃油箱、管道与活门的布局复杂；
- 2.随着飞行过程中燃油消耗，飞行器的重心可能会发生偏移，若重心偏移严重将对飞行器的平衡造成重大影响，甚至会导致飞行器坠机；
- 3.对燃油的清洁性要求较高，清洁度不高的燃油会导致燃烧时热不稳定，影响飞行器的稳定飞行。

三、飞行器燃油系统气密性

飞行器燃油系统气密性是指飞行器在部件装配和总体装配前后的飞行器气密性，主要分为导管连接的气密性、焊缝的气密性和产品组合后的整体气密性。

在燃油系统中，产品结构复杂，导管数量和规格繁多，气密性大都靠拧紧力矩和工人操作经验来保证。受空间角度的限制，焊接管道时操作困难导致焊缝数量多且气密性不易保证。油箱采用钣金铆接结构，涉及到铆钉的密封和各个工序组合后的密封，很难做到整体密封。

四、常用的燃油系统气密检测方法

根据燃油系统的结构、材料等，得出气密泄漏漏率。在燃油系统的安装、试行阶段，工作人员应按照安装的顺序逐步检测泄漏情况。每次安装零件时检查需要密封的连接部是否有泄漏。航空飞行领域的检测方法根据原理、压力状态和检测目的进行划分。^[2]如图 1 所示。常用的有：气泡检漏法、氦质谱检测法、超声波检测法、流量法、淋雨试验法、卤素检测法等。



图 1

(一) 气泡检测法

气泡检测法适用于允许承受正压的容器、管道、零部件和密封元件等的气密性检验。其原理是：

当漏孔的两侧存在压差时，气体通过漏孔从高压端流向低压端，当低压端浸泡于某种液体中，漏孔处将会出现吹起的气泡，出现气泡的起始部位即漏孔的位置。主要分为充气检测法（又称为打气检测法）、抽真空检测法、热槽法。气泡检测法示意图如图 2 所示。使用该方法时，应适应专用检漏液，专用检漏液在进入燃油系统时不产生其他气泡，气泡只在泄漏点处出现。专用检漏液只对泄漏点气泡发生反应。此外，应选用合适的检测气体。在当地大气压下的露点不高于 -40°C 。应选用粘滞系数较低的检测气体，如：无油无机械杂质的干燥空气、氮气、氦气等。

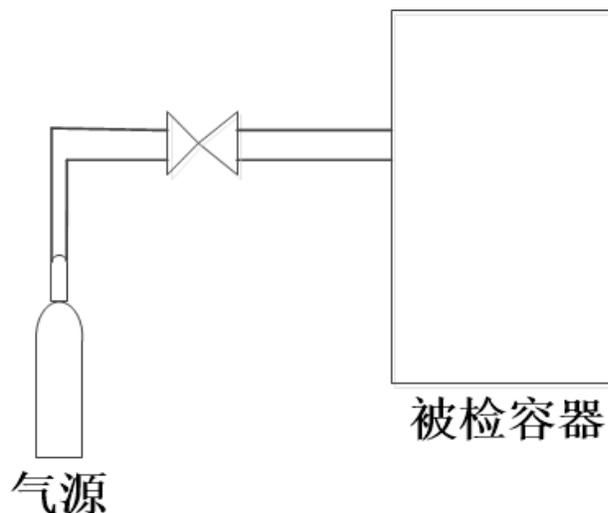


图 2

该方法适用于装置安装初期时对允许正压的零件进行事前检查，进行泄漏检测。^[3]然而，如果采用检测装置检测聚集在焊缝中的漏点时，由于气体极易扩散，所以可以开展水浴检测。在泄漏点上涂上中性肥皂水用来检测气泡的位置。气泡检测法的泄漏检测精度取决于气泡的直径和气泡的形成频率。气泡检测法工作原理如图 3 所示。

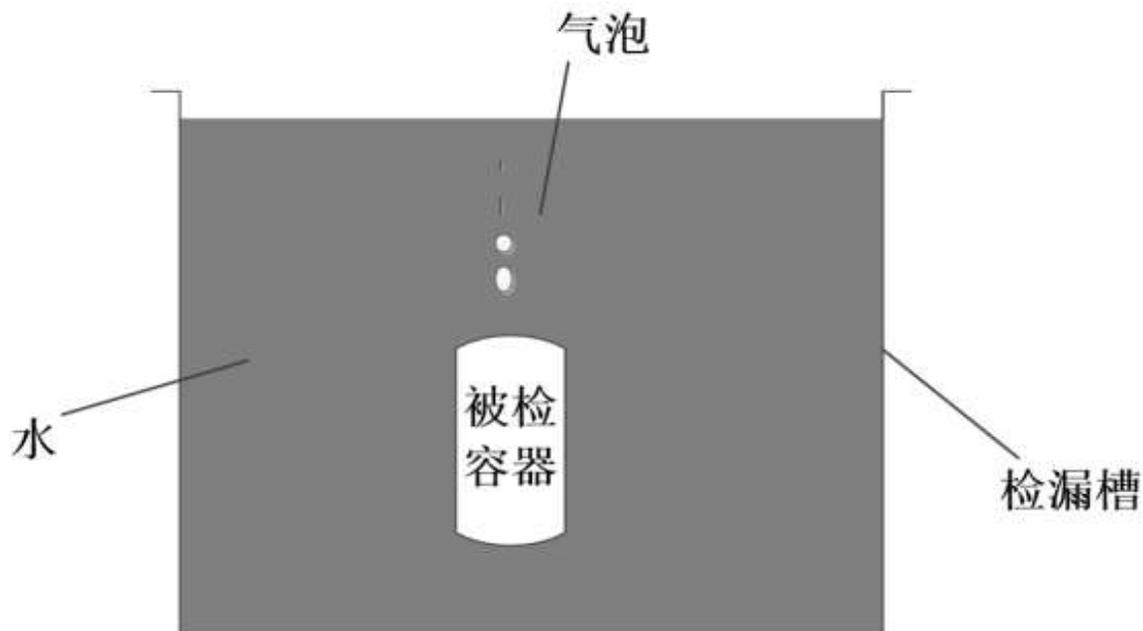


图 3

（二）氦质谱检测法

氦质谱检漏仪检测技术是目前应用最广泛的检漏技术。尤其在航天领域的检测工作中得到广泛运用。根据使用方法不同分为氦质谱喷吹法和氦质谱吸枪法。具有较好的灵敏度，在实际操作应根

据结构、材料和尺寸，选择适用的方法。

氦质谱喷吹检测方法的原理是应用辅助泵使系统泵变成低真空状态，将系统与检漏仪的质谱室连接，检漏仪的质谱室事先被泵入终极真空，用质谱检漏仪对检测到的容器进行排气。当质谱仪室达到工作压力时，在被检测容器的疑似泄漏部位，用仪表喷枪喷射氦气。如果有泄漏，氦气将通过泄漏孔进入被检测容器，迅速进入检漏仪，这将由输出仪表显示。输出读数变化的大小可以决定检测孔泄漏率的大小。喷枪的位置可以确定泄漏的位置。这是目前应用最广、适用较为方便的方法。

氦质谱吸枪检测法的原理是在系统内填充恒压氦气。当被检查部件有泄漏时，氦气从泄漏处逸出。当吸枪正对泄漏孔位置时，氦气连同周围的空气被吸进质谱仪室，产生泄漏指示，从而实现检测泄漏点的目的。但使用氦质谱吸枪检测法时应注意采用校准条件下使用的正压标准泄漏孔进行检测。此外吸枪连接的软管应使用内部洁净的金属管或塑料软管且长度不宜过长。应控制吸枪检测时表面移动速度，保持吸枪与表面距离在 3mm 以内。在吸枪嘴端增加弹性盖可以使吸枪与待测表面有较好的密封连接接触。

氦质谱检测技术检测程序为抽真空、充氦气、保气压、算漏率。它基于一个简单的原理：在真空中，氦气可以从其他气体中分离出来。主要是漏气探测器提供了一个电磁场，使进入的氦气在一个加速电场中带电后变成氦离子束。当离子束进入相互垂直的磁场时，会因洛伦兹力而做圆周运动。轨道半径由下式决定：

$$R = \frac{144}{H} \times 10^{-4} \sqrt{\frac{M}{Z} U}$$

式中：

R——离子偏转半径 (cm)

H——磁场强度 (特斯拉)

M/Z——离子的质量与电荷数之比

U——加速电压 (V)

由上式可知，当 R、H 为定值时，改变加速电压可使不同质量的离子通过狭缝到达接受极而被检测。分离并收集氦离子后，根据其带电量对氦离子进行计算处理，在显示器上显示结果。目前的泄漏探测器根据实际氦气数量与泄漏率的关系进行了改进，可以将显示结果直接表示泄漏率。^[4]由此可以直接读出漏率。

(三) 超声波检测法

基于超声波检测技术即是通过超声探头来检测这些超声波信号的强度和声源进而检测气密性。所有泄漏都会释放一定数量的超声波能量。这种能量与漏点有关。不同的漏点产生不同的能量谱和幅值。超声检测可以应用于噪声环境中。采用超声波检测阀门气密性可用于一般工业领域。如果一个容器充满了气体。当内部压力大于外部压力时。因为内外压差很大。^[5]一旦容器出现泄漏，气体就会从漏点流出。当漏点的尺寸较小且雷诺数较高时（雷诺数越小意味着粘性力影响越显著，越大意味着惯性影响越显著），气体流出会形成湍流，湍流会在漏点附近产生一定频率的声波。其工作示意图如图 4 所示。

超声波检测根据泄漏的内外环境压力差可将泄漏分为正压泄漏和负压泄漏。正压泄漏是指系统外部压力小于内部压力时出现的泄漏情况。当出现正压泄漏时，气体从系统内部涌向系统外部，泄漏孔附近的气体将从系统内的层流状态改变系统外的紊流状态，从而产生超声波，而负压泄漏则相反。

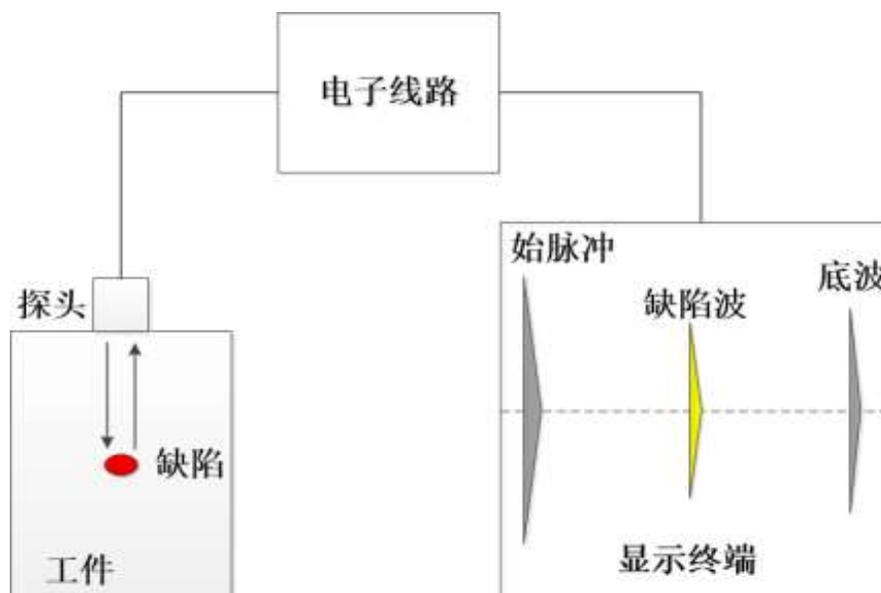


图 4

声波的振动频率与泄漏孔的大小有关。人的耳朵能听到 20 ~ 20000 赫兹频率的声波。因此，当泄漏孔较大时，漏气是人的耳朵可以听到的。但是泄漏孔很小、声波的频率在 20000 赫兹以上，人的耳朵无法听到。但是其在空气中传播，是一种具有方向性的被称为空载超声波的高频短波信号。其强度与远离声源的距离(漏气)成反比。因此，超声波是指向性很强的信号。这个信号可以容易地确定泄漏的位置。

五、结束语

管路系统气密性检测以压力变化来具体衡量，采取直压法和涂抹检测液法进行检查。传统的直压法检测，直观性好，测试系统构成简单，根据压力变化而判断泄漏。

总的来说，氦质谱检测技术更适用于结构密封检测。红外热成像方法适用于压力变化大引起的局部温差大的检测。超声波更适合后期维修阶段泄漏点的定位排查。鉴于飞行器燃油系统管路复杂的特点，目前应用最广泛、最成熟的气泡检测方法仍在飞行器总装阶段使用。

参考文献

- [1] 王俊祥. FMECA 方法在无人机燃油系统中的应用[D]. 四川:电子科技大学,2011.
- [2] 许国康.面向先进检漏技术的航空产品密封实现及保证[J].航空制造技术,2013(20):103-108.
- [3] 丁永生. 真空设备泄漏检测技术[J]. 电子工艺技术,2009,30(4):226-229.
- [4] 张河,杨亚平,戎占伟. 氦质谱检漏技术在压力容器密封性试验中的应用分析[J]. 焊接技术,2010,39(4):61-64.
- [5] 郭寿松. 一种基于超声波检测的瓦斯抽采管道检漏技术[J]. 矿业安全与环保,2014(3):88-91.

EAST 装置散裂弹丸注入技术研发及破裂缓解实验研究

元京升¹, 左桂忠^{2*}, 胡建生¹

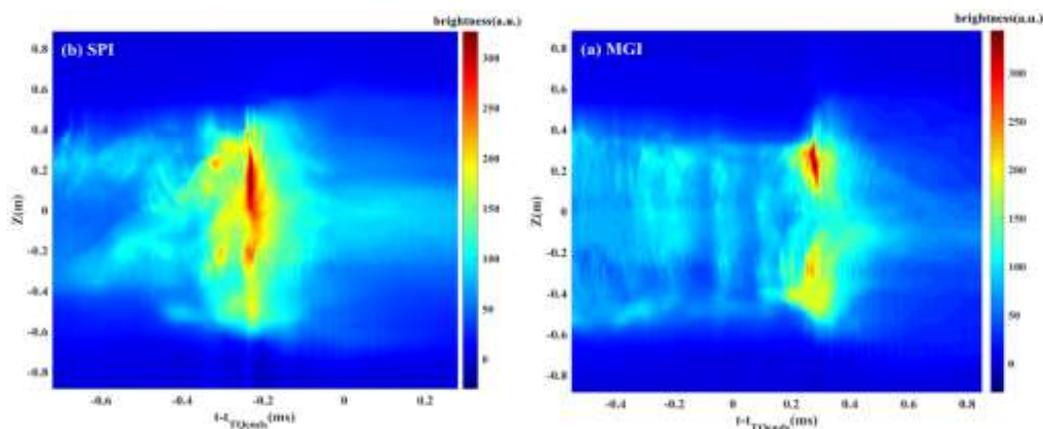
¹中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

²中国科学技术大学, 合肥 230031

Email: jingsheng.yuan@ipp.ac.cn

等离子破裂是在托卡马克放电过程中, 多种宏观或微观不稳定性引发等离子体约束突然变差并导致放电中断的一种现象。等离子一旦发生破裂, 将导致等离子体所储存的巨大能量在毫秒量级内快速损失到真空室和面向等离子体组件 (PFCs) 上, 对装置造成严重的损伤, 因此必须采取相应的技术手段对破裂带来的损伤进行缓解。经过聚变界不断的研究、发展, 最近几年发展起来的散裂弹丸注入技术相比于大弹丸注入技术、大流量气体注入技术对破裂缓解具有明显优势, 已经被 ITER 等未来聚变堆确定为缓解的优先选择。

EAST 上的破裂缓解以大流量气体注入为主, 尚缺少适用于 ITER 及聚变堆的 SPI 相关研究, 因此针对目前 EAST 破裂缓解现状, 研发了一套散裂弹丸注入系统, 该系统通过原位冷凝技术将 Ne 气在冷凝枪管内冷凝成固体大弹丸, 通过高压 He 加速弹丸发射, 在注入管道末端破裂成小碎片进入等离子体, 成功实现了 $D*L=5*5-15$ mm 弹丸成型与发射, 以及 150-400 m/s 的弹丸加速。此外, 该散裂弹丸注入系统于 2022 年上半年成功集成到 EAST 上并首次开展了 Ne 散裂弹丸注入 (SPI) 主动触发等离子体破裂并缓解的实验研究, 实验结果表明弹丸注入参数可以调控破裂过程中的冷却时间, 热猝灭 (TQ) 和电流猝灭 (CQ) 的时间尺度, 同时与大量气体注入 (MGI) 相比, SPI 触发的等离子体破裂具有更短的冷却时间, 更强的芯部辐射, 更均匀的极向辐射分布, 以及更好的偏滤器热流的缓解。EAST 上 SPI 破裂缓解的实验结果, 进一步验证了 SPI 作为破裂缓解手段的优越性, 并为 ITER 破裂缓解系统的设计提供参考。



关键词: 弹丸注入、破裂缓解、等离子体

钢基二元及三元合金真空蒸馏理论及实验研究

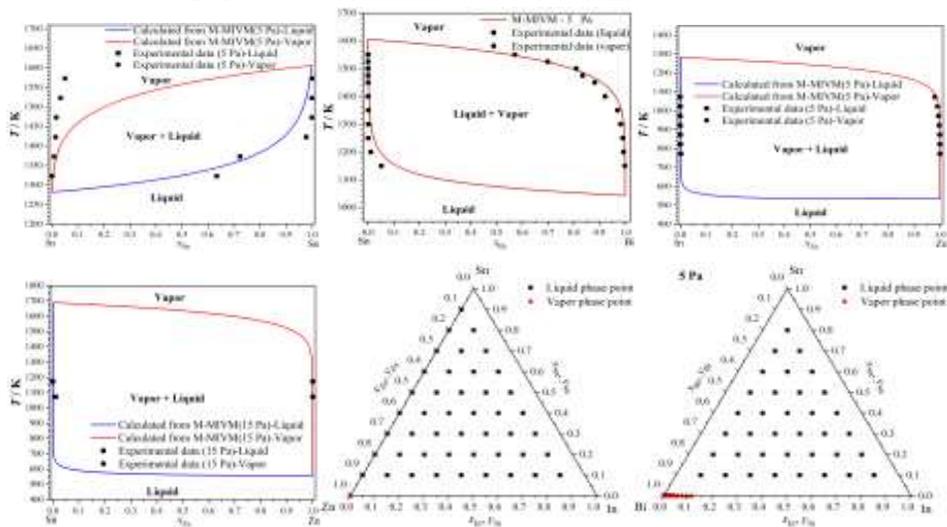
庞俭^{1,2} 孔令鑫^{1,2*} 杨斌^{1,2}

¹昆明理工大学真空冶金国家工程研究中心, 云南昆明 650093;

²昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南昆明 650093;

*Email: 1559604195@qq.com

摘要: 针对新型高附加值 In-Sn、In-Zn 二元合金和 In-Sn-Bi、In-Sn-Zn 三元合金钎料综合回收难等问题, 本研究提出一种清洁高效的回收方法。在 1323K-1523K, 5Pa 条件下, In-Sn 合金实验结果表明 In 与 Sn 可有效分离, 获得了 99.99% 的 Sn 和 99.86% 的 In; 在 773K-1073K, 5Pa 条件下, In-Zn 合金实验结果表明 In 与 Zn 可有效分离, 获得了 99.999% 的 In 和 99.89% 的 Zn; 在 1073K-1373K, 5Pa 条件下, In-Sn-Bi 合金实验结果表明, Bi 可与 In 和 Sn 分离, 残留物中 Bi 含量降低至 3.88%, 挥发物中 Bi 含量高达 95.67%; 在 773K-1073K, 5Pa 条件下, In-Sn-Zn 合金实验结果, Bi 可与 In 和 Sn 分离, 残留物中 Zn 降低至 0.009%, 挥发物中 Zn 高达 99.79%。基于 M-MIVM 模型和 VLE 理论, 计算了真空蒸馏中 In-Sn、In-Zn、Sn-Bi、Sn-Zn、In-Sn-Bi、In-Sn-Zn 的 VLE 相图, 并于实验值相比较 (如下图所示), 结果表明实验值和计算值一致。本研究获得了从 In-Sn、In-Zn、In-Sn-Bi 和 In-Sn-Zn 高附加值合金中真空分离回收 In、Sn、Bi 和 Zn 有价金属可靠实验数据, 为 In 基二元及多元合金清洁高效回收有价金属开辟新途径; 验证了气液相平衡相图用于指导真空蒸馏分离合金的可行性, 为钢基合金气液相平衡研究提供可靠的实验数据和热力学模型。



关键词: 真空蒸馏, In-Sn 合金, In-Zn 合金, In-Sn-Bi 合金, In-Sn-Zn 合金, M-MIVM, VLE

参考文献:

[1] J. Pang, H. Wu, L.X. Kong,* B.Q. Xu, J.J. Xu, B. Yang,** “Clean and efficient recovery of In-Sn and In-Sn-Bi lead-free brazing materials by vacuum volatilization and thermodynamic modeling”, Vacuum, 214: 112172 (2023).

新型吸附剂泵在 EAST 偏滤器粒子排出的应用研究

王超^{1, 2*} 余耀伟¹ 曹斌¹ 左桂忠¹ 胡建生¹

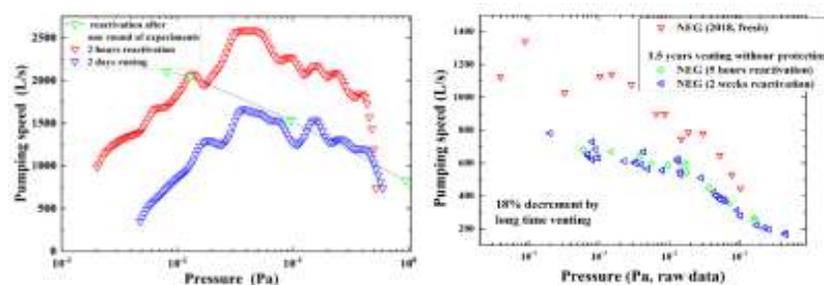
¹中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽合肥, 邮编 230031;

²安徽大学, 安徽合肥, 邮编 230601

*Email: chao.wang1@ipp.ac.cn

摘要: 等离子体芯部排出的高能粒子会在偏滤器和第一壁中性化, 一部分参与燃料粒子再循环的过程, 粒子排出是控制粒子再循环、提升等离子体性能的重要方法。新型吸附剂泵 (NEG) 基于非蒸散型合金材料制成, 其安装、运行、维护简单, 对氢及其同位素抽速大、容量高, 可能是未来偏滤器粒子排出的一种可行方案。

为了测试新型吸附剂泵的抽气性能及其对等离子体环境的兼容性, 在 EAST 托卡马克安装 4 套 HV800 模组 (SAES 公司标称对氢总抽速 3200L/s, 饱和容量 42000 Torr*L), 并开展了定期的抽速标定、再生研究。结果显示, 在 200°C 条件下, 对氘气最高抽速可达 2600L/s, 经过两天的 EAST 放电实验, 抽气量约 2700 Torr*L, 低温泵回温期间气压短时间上升至 6Pa, 导致高气压下抽速衰减 30%, 但激活再生后即可速恢复, 而且经过 EAST 一轮实验运行并进行激活再生后, 抽速无明显衰减。进一步测试了吸附剂泵长时间在大气环境下的污染对其抽速的影响, 结果显示大气环境无保护放置 1.5 年后并进行高温激活再生, 抽速比全新泵组下降 18%, 而且长时间充分激活再生无法进一步提高抽速。为了防止吸附剂泵长时间暴露在气压较高的氢氘环境而导致的氢脆问题, 利用常温大气压纯氮气进行了 24 小时的钝化处理, 处理后抽速降低至 0.5%, 极大地限制了其对氘的抽气能力, 从而保护吸附剂泵不受氢脆的影响。研究结果表明吸附剂泵, 实验结果表明新型吸附剂泵能适用于 EAST 托卡马克环境, 能够提供较大的抽速, 同时可用氮气钝化避免氢脆现象, 研究结果为 EAST 及未来聚变堆的粒子排出提供了新的技术方案。



关键词: 吸附剂泵, 粒子排出, EAST 托卡马克, 抽速, 偏滤器

参考文献:

- [1] Yu YW, et al., Nucl. Fusion 59 (2019).
- [2] G. Motojima, et al., Fusion. Eng. Des 143 (2019).

Bi-Sb 二元合金真空蒸馏相平衡模型预测及实验研究

王亚楠^{1,2} 孔令鑫^{1,2,*}

¹昆明理工大学真空冶金国家研究中心, 云南昆明, 邮编 650093;

²昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南昆明, 邮编 650093

Email: kkmust@126.com

摘要: 本研究的主要目的是对真空条件下铋基合金的气液平衡值 (VLE) 建立模型, 并进行预测和实验研究。本研究在 1-5Pa 真空度下开展了 Bi-Sb 二元合金在不同温度下的真空蒸馏 VLE 值的模型预测及实验研究, 计算了 Bi-Sb 二元合金体系中各组分的活度及 VLE 值, 并将活度计算值与已有的实验值进行对比, 验证模型的正确性。利用预测的活度系数, 进一步开展不同温度下合金的气液相平衡值的计算, 并在真空条件下开展实验。实验结果表明, Bi-Sb 二元合金中的 Bi、Sb 得到了有效的分离; 采用分子相互作用体积模型 (MIVM) 预测了 Bi-Sb 二元合金组元的活度及 VLE 值, 与实验值对比, 活度的平均相对偏差 $< \pm 3.67\%$, VLE 值与实验测定值的趋势完全一致, 即可得到可靠的铋基二元合金的 VLE 值。通过实验与模型预测相结合, 不仅验证了 MIVM 预测铋基合金各组元活度及 VLE 值的可靠性, 而且优化了铋基合金真空蒸馏的热力学参数, 为粗铋的分离提纯提供了可靠的热力学数据和理论依据, 为真空蒸馏提纯粗铋提供了理论指导, 工业化实验提供了捷径。

关键词: 真空蒸馏、铋、Bi-Sb 二元合金、MIVM、VLE 值

参考文献:

- [1] Yang H W, Yang B, Xu B Q, et al. Application of molecular interaction volume model in vacuum distillation of Pb-based alloys[J]. Vacuum, 2012, 86(9): 1296-1299.
- [2] Kong L, Yang B, Xu B, et al. Application of molecular interaction volume model for phase equilibrium of Sn-based binary system in vacuum distillation[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(10): 4405-4410.
- [3] Tao D P. Prediction of the coordination numbers of liquid metals[J]. Metallurgical and materials transactions A, 2005, 36(12): 3495-3497.

B 表面科学与应用
分会邀请报告

金属表面功能分子反应选择性机制研究

杜世萱^{1*}

¹ 中国科学院物理研究所 北京中关村南三街 8 号 100190

*Email: sxdu@iphy.ac.cn

摘要: 近年来,将第一性原理计算与扫描隧道显微镜和原子力显微镜实验相结合已成为在原子、分子层次研究表面物理和化学过程的强有力手段。有机分子中相似基团的选择性活化是传统化学合成中的一个历史性难题。我们通过理论计算发现具有 C₂ 对称性的含氮多环烃 TPPIP 分子氮杂环中的四个相同的邻位 C(sp³)原子的活性在吸附在 Ag(100)上后由于吸附位置的不同活性分为两组,可以实现 C 原子的分级脱氢。实验合作者通过非接触原子力显微镜发现了四个 C 原子的分级脱氢过程 [1]。进一步研究发现,利用 Ag(110)表面可以实现具有高对称性的无金属酞菁分子的线性聚合,得到分子间通过类碳四元环链接的一维分子链结构 [2]。而自组装氟代四苯基卟啉铁 (Fe-TPPF) 在 Au(111)表面环化反应能产生选择性高达 90% 的手性产物,理论计算表明,分子间空间位阻是手性产物选择性大幅提升的主要原因 [3]。这一系列工作为利用表面对称性来提高有机分子在金属表面反应的选择性提供了新的思路,为表面上的不对称合成提供了广泛使用的途径。

关键词: 表面反应, 手性分子, 一维分子链, 第一性原理计算

参考文献:

- [1] Wu RT, Bao DL, Yan LH, *et al.* "Construction of poly-naphthalocyanine linked by [4]-radialene-like structures on silver surfaces", *Nano Research* 14: 4563-4568 (2021).
- [2] Chen H, Tao L, Wang DF, *et al.* "Stereoselective On-Surface Cyclodehydrofluorization of a Tetraphenylporphyrin and Homochiral Self-Assembly", *Angewandte Chemie-International Edition* 59: 17413-17416 (2020).
- [3] Gao Y, Huang L, Cao Y, *et al.* "Selective hierarchical C-H bond activation on surface and enabled formation of N-doped graphene nanoribbons", *Nature Communications* 13: 6146 (2022).

表面体系中的低维拓扑态

冯宝杰^{1, 2*} 陈岚^{1, 2, 3} 吴克辉^{1, 2, 3}

¹ 中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190;

² 中国科学院大学物理科学学院, 北京, 邮编 100049

³ 松山湖材料实验室, 广东东莞, 邮编 523808

*Email: bjfeng@iphy.ac.cn

摘要: 最近十几年, 凝聚态物理领域出现了两类热点材料: 以拓扑绝缘体、拓扑半金属为代表的拓扑材料和以石墨烯、过渡金属硫族化合物为代表的二维材料。将这两类材料的各自优势结合起来、实现低维拓扑材料不仅可以拓展人们对低维拓扑物态的理解, 而且对于新型量子器件的研发重要的指导价值。然而, 相对于三维体材料而言, 低维材料不仅种类少, 而且对其本征物性的研究难度更大, 导致低维拓扑材料的研究十分缺乏。在表面物理学发展的半个多世纪以来, 人们制备出了大量的表面和界面体系, 其中必然存在丰富的拓扑态。最近, 我们利用分子束外延、角分辨光电子能谱、扫描隧道显微镜等技术, 在表界面体系中发现了多种新型低维拓扑态, 包括一维拓扑平带材料、二维棋盘晶格、二维狄拉克材料等, 为低维拓扑材料在新型量子器件中的应用提供研究基础。

关键词: 超高真空, 低维材料, 角分辨光电子能谱, 表面物理, 拓扑材料

参考文献:

- [1] D. Geng, H. Zhou, S. Yue, Z. Sun, P. Cheng, L. Chen, S. Meng, K. Wu, B. Feng, "Observation of Gapped Dirac Cones in a Two-Dimensional Su-Schrieffer-Heeger Lattice", *Nat. Commun.* 13, 7000 (2022).
- [2] S. Yue, H. Zhou, Y. Feng, Y. Wang, Z. Sun, D. Geng, M. Arita, S. Kumar, K. Shimada, P. Cheng, L. Chen, Y. Yao, S. Meng, K. Wu, B. Feng, "Observation of One-Dimensional Dirac Fermions in Silicon Nanoribbons", *Nano Lett.* 22, 695 (2022).
- [3] X. Hu, R.-W. Zhang, D.-S. Ma, Z. Cai, D. Geng, Z. Sun, Q. Zhao, J. Gao, P. Cheng, L. Chen, K. Wu, Y. Yao, B. Feng, "Realization of a Two-Dimensional Checkerboard Lattice in Monolayer Cu₂N", *Nano Lett.* 23, 5610 (2023).

TiO₂ 光催化表面化学

黄伟新*

¹ 中国科学技术大学化学与材料科学学院和合肥微尺度物质科学国家研究重心, 安徽合肥, 邮编 230026

*Email: huangwx@ustc.edu.cn

摘要: 光催化利用太阳能驱动化学反应, 是实现“双碳”目标的关键科学技术之一。理解光催化剂构-效关系和催化作用机理对创制高效光催化剂具有重要意义。本次报告中, 我将报告基于TiO₂单晶开展光催化表面化学研究的进展^[1-4]。主要包括两方面:(1) 光催化作用与热催化作用的异同;(2) TiO₂光催化剂的活性晶面。

关键词: 超高真空, 光电子能谱、程序升温脱附谱、光致脱附谱、构-效关系

参考文献:

- [1] Q. Yuan, Z.Wu, Y.Jin, L.Xu, F.Xiong, Y.Ma, W.Huang,* "Photocatalytic Cross-coupling of Methanol and Formaldehyde on a Rutile TiO₂(110) Surface", *J. Am. Chem. Soc.* 135, 5212-5219 (2013).
- [2] Q. Yuan, Z.Wu, Y.Jin, F.Xiong, W.Huang,* "Surface Chemistry of Formaldehyde on Rutile TiO₂(110) Surface: Photocatalysis vs Thermal-Catalysis", *J. Phys. Chem. C* 118, 20420-20428 (2014).
- [3] F. Xiong, L.-L. Yin, Z. Wang, Y.Jin, G. Sun, X.-Q. Gong, W. Huang,* "Surface Reconstruction-Induced Site-Specific Charge Separation and Photocatalytic Reaction on Anatase TiO₂(001) Surface", *J. Phys. Chem. C* 121, 9991-9999 (2017).
- [4] F. Xiong, L.-L. Yin, F.Li, Z.Wu, Z.Wang, Y.Jin, G.Sun, H. Xu, P. Chai, X.-Q. Gong,* W. Huang,* "Anatase TiO₂(001)-(1 根 4) Surface Is Intrinsically More Photocatalytically Active Than Rutile TiO₂(110)-(1 根 1) Surface", *J. Phys. Chem. C* 123, 24558-24565 (2019).

基于低维半导体异质结光电探测器的研究

黄鑫^{1, 2*} 郭阳^{1, 2} 杜硕^{1, 2} 顾长志^{1, 2*}

¹ 中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心, 北京, 邮编 100190;

² 中国科学院大学物理学院, 中国科学院真空物理重点实验室, 北京, 邮编 100049

*Email: xinhuang@iphy.ac.cn

*Email: czgu@iphy.ac.cn

摘要: 光电子器件是当今社会生活和应用中必不可少的部分, 大多数是基于低维半导体异质结构, 其中包括各种外延生长的无机半导体, 如 Si、III-V 族氮化物和二维材料等。在宽禁带半导体中, III-V 族氮化物半导体 (GaN、InN 和 AlN) 及合金材料因其独特性质成为了宽光谱光电探测器件中

最有前途的候选者之一。由于非对称晶体结构，氮化物半导体平面结构在晶格不匹配的衬底上生长时，由于应变会在异质结界面处引起压电极化效应，严重影响器件性能。为了解决这一问题，我们提出了一种自洽的压电极化理论模型来优化 GaN/InGaN 能带结构。在此基础上，我们进一步利用压电极化效应实现了对 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池短路电流密度、开路电压和转换效率的优化。近年来以石墨烯、过渡金属硫化物、黑磷等为代表的二维材料已成为光电子器件领域研究的热点，但由于其原子级的厚度不能获得理想的光吸收，限制了其在光电子器件领域的潜在应用。针对上述问题，我们分别采用非对称法布里-珀罗光学谐振腔结构和“硅基光波导+二维材料”混合集成结构，实现了在可见光波段处光电探测系数 5 倍的增强和外量子效率 4 倍的提升，以及室温 1V 偏置电压下光电探测系数在 3.68 μm 与 4.0 μm 激发波长下分别高达 23 A/W 与 2 A/W，其性能指标达到国际期刊报道的较高水平。

关键词：低维半导体，异质结，III-V 族氮化物，二维材料，光电探测器

参考文献：

- [1] Huang, X., Feng, X., Chen, L., Wang, L., Tan, W. C., Huang, L., Ang, K. W. * Fabry-Perot cavity enhanced light-matter interactions in two-dimensional van der Waals heterostructure. *Nano Energy*, 62, 667-673 (2019).
- [2] Huang, X., Jiang, C., Du, C., Jing, L., Liu, M., Hu, W.* , Wang, Z. L.* Enhanced luminescence performance of quantum wells by coupling piezo-phototronic with plasmonic effects. *ACS Nano*, 10 (12), 11420-11427 (2016).

Real-space BCS-BEC crossover in FeSe monolayer

Shuaihua Ji^{1*}

¹State Key Laboratory of Low-Dimensional Quantum Physics, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

*Email: shji@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: BCS-BEC crossover has been long interested due to the fundamental physics. Although it has been realized in cold atom systems, the real space BCS-BEC crossover is difficult to be achieved due to the challenging of the microscopic scale tuning by optical methods. Here, by using spatially resolved scanning tunneling spectra, the real space BCS-BEC crossover has been revealed in FeSe monolayer where the top of one hole band is shifted cross Fermi level by trilayer graphene substrate [1]. Our theoretical model based on two-band model explains all main features of experimental spectra for the whole crossover range. Moreover, the density of state spectrum exhibits Zeeman splitting under the strong perpendicular magnetic field which is consistent with the condensate behavior. Our work demonstrates that the FeSe monolayer on graphene surface is an idea system to study the two-dimensional BCS-BEC crossover. It also offers a unique

possibility to microscopically study the exotic many body states of BCS-BEC crossover in two-dimensional crystalline material.

Keyword: FeSe, Scanning tunneling microscopy, BCS-BEC crossover

Reference:

[1] Haicheng Lin, Wantong Huang, Gautam Rai, Yuguo Yin, Lianyi He, Qi-Kun Xue, Stephan Haas, Stefan Kettmann, Xi Chen,* Shuai-Hua Ji,* "Real-space BCS-BEC crossover in FeSe monolayer" , arXiv:2209.00758(2022).

新型二维原子晶体材料 Si_9C_{15} 的构筑

李更^{1, 2*} 高鸿钧^{1, 2}

¹ 中国科学院物理研究所, 纳米物理与器件实验室, 北京 100190;

² 中国科学院大学, 物理科学学院, 北京 100049

*Email: gengli.iop@iphy.ac.cn

摘要: 单原子层碳化硅(SiC)是二维原子晶体材料的一个重要分支。SiC 作为一种双组分材料, 不具有石墨一样的层状原子结构, 因此实验上大面积的二维 SiC 材料一直未能实现。我们利用组内自主设计研发的低温 MBE-STM 联合系统, 在实验上利用多年积累的石墨烯插硅工艺, 通过增加 Si 沉积量获取大量缺陷, 然后进行退火, 首次获取了毫米级的单原子层 SiC 二维原子晶体材料^[1]。结合 STM、STEM、XPS 等表征手段和 DFT 计算, 获得了该二维原子晶体材料 Si_9C_{15} 蜂窝状的原子构型。这种新型的二维原子晶体材料具有~1.9 eV 能隙的半导体, 并且具有较强的空气稳定性, 使得其在纳米光电器件应用等方面具有广阔前景。

关键词: 扫描隧道显微镜/谱, 分子束外延, 二维 Si_9C_{15} , 空气稳定性

参考文献:

[1] Zhao-Yan Gao#, Wenpeng Xu#, Yixuan Gao#, Roger Guzman#, Hui Guo, Xueyan Wang, Qi Zheng, Zhili Zhu, Yu-Yang Zhang, Xiao Lin, Qing Huan, Geng Li*, Lizhi Zhang*, Wu Zhou*, and Hong-Jun Gao* "Experimental Realization of Atomic Monolayer Si_9C_{15} " Adv. Mater. 34, 2204779 (2022)

利用外延方法构筑 1T-TiTe₂/1T-TSe₂ 范德华转角异质结

赵伟民^{1,2} 朱立^{1,2} 聂正蔚^{3,4} 李启远^{1,2} 汪琪玮^{1,2} 窦立国^{1,2} 胡聚罡^{1,2} 沈乐德⁵ 孟胜^{3,4*} 李绍春^{1,2*}

¹ 南京大学物理学院、固体微结构物理国家重点实验室, 江苏南京, 邮编 210093;

² 南京大学人工微结构科学与技术协同创新中心, 江苏南京, 邮编 210093

³ 中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190

⁴ 中国科学院大学物理科学学院, 北京, 邮编 100049

⁵ 松山湖材料实验室, 广东东莞, 邮编 523808

*Email: scli@nju.edu.cn

摘要: 转角或者晶格失配可以在二维材料的界面处形成莫尔周期, 为调控电子结构提供了一个新的自由度。在本工作中, 我们利用分子束外延技术构建了具有不同转角的 1T-TiTe₂/1T-TiSe₂ 异质结构, 并且利用扫描隧道显微镜在 TiTe₂ 中观测到由于莫尔周期导致的增强电荷密度波态。在 0 度转角附近, 显著的 2×2 电荷密度波态和 1×1 的正常态交替镶嵌在莫尔周期内, 并且电荷密度波的转变温度高达室温以上。结合第一性原理计算, 我们发现这种电荷密度波态的形成归结于原子重构造成的局部应力涨落。然而, 在大转角的情况下, 并没有电荷密度波态形成。

关键词: 分子束外延 (MBE), 扫描隧道显微镜 (STM), 过渡金属硫族化合物 (TMD), 转角, 电荷密度波 (CDW)

参考文献:

[1] Wei-Min Zhao, Li Zhu, Zhengwei Nie, Qi-Yuan Li, Qi-Wei Wang, Li-Guo Dou, Ju-Gang Hu, Lede Xian, Sheng Meng* and Shao-Chun Li* "Moire enhanced charge density wave state in twisted 1T-TiTe₂/1T-TiSe₂ heterostructures" *Nat. Mater.* 21, 284 (2022).

复杂氧化物界面——电荷、晶格耦合作用的研究

孟梦^{1*} 张坚地¹ 郭建东¹

¹ 中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190;

*Email: mengm@iphy.ac.cn

摘要: 复杂氧化物由于多自由度耦合与相互作用, 在异质界面处涌现出许多新奇的物理性质。寻找、探测、调控并解释这些现象对探索新型功能材料十分重要。本报告将聚焦在电荷-晶格的耦合作用与其诱导出的新奇物态的研究。我们通过构筑 BaTiO₃/SrRuO₃/BaTiO₃ 异质结, 首次实现了磁性极化金属相(magnetic polar metal phase)。由于界面近邻效应, 铁电材料 BaTiO₃ 在 SrRuO₃ 中诱导出了结构极化。并且, 超薄的 SrRuO₃ 表现出铁磁性金属性。理论计算表明, SrRuO₃ 中的结构极化是促进铁磁性金属性的原因, 揭示出 SrRuO₃ 中电荷-晶格-自旋之间独特的耦合作用^[1]。通过构筑

LaCoO₃/LaTiO₃ 异质结，首次实现由二维电荷转移诱导的三维的大尺度纯 d 轨道填充调控。结合理论计算分析表明，界面处费米能级差驱动的电荷载转移，会触发钙钛矿 LaCoO₃ 结构失稳，因此向八面体-四面体交替排列的超结构转变。四面体层的多少与有序排列可以完全由 LaTiO₃ 厚度进行调控，进而调控磁基态与获得人工超结构^[2]。

关键词：复杂氧化物，异质结，极化金属，电荷转移，人工超结构。

参考文献：

- [1] M. Meng, Z. Wang, A. Fathima, et al., Interface-induced magnetic polar metal phase in complex oxides. Nat. Commun. 10, 1-7 (2019).
- [2] M. Meng, Y. Sun, Y. Li, Q. An, Z. Wang, Z. Lin, F. Yang, X. Zhu, P. Gao*, & J. Guo*, Three-dimensional band-filling control of complex oxides triggered by interfacial electron transfer. Nat. Commun. 12, 2447, (2021).

对几种超导薄膜的角分辨光电子能谱研究

彭瑞

复旦大学先进材料实验室，上海，邮编 200438；

*Email: pengrui@fudan.edu.cn

摘要：通过分子束外延、脉冲激光沉积与角分辨光电子能谱的结合，可以对超导进行构筑、调控和直接的电子结构研究，是理解超导机理的重要实验手段。在这个报告中，我将首先介绍我们设计并实现了 FeSe/LaFeO₃ 界面高温超导，实验将超导配对温度提升到 80K,超过了 FeSe 与钛氧化物界面超导的配对温度纪录，并通过对比 FeSe/SrTiO₃ 界面超导，发现了界面对超导的增强效应可以在 FeSe 与非氧化钛界面成立，也对进一步增强超导给出了可行的路径。接着我将介绍我们对于界面超导 LaAlO₃/KTaO₃ 的软 X 光 ARPES 研究，从电子结构的角度揭示在 (111)、(110) 和 (001) 三种不同界面取向界面超导差异的根源。最后我将介绍我们对尖晶石超导体 LiTi₂O₄ 薄膜的原位 ARPES 研究。实验首次给出了 LiTi₂O₄ 的三维电子结构，并发现其中存在很强的电声子耦合特征，对于理解这个已经发现近 50 年的超导体的超导机理谜题提供重要信息。

关键词：超高真空，角分辨光电子能谱 (ARPES)，分子束外延，脉冲激光沉积，电-声子耦合

参考文献：

- [1] Y. H. Song, Z. Chen, Q. Zhang, H. C. Xu, X. Lou, X. Y. Chen, X. F. Xu, X. T. Zhu, R. Tao, T. L. Yu, H. Ru, Y. H. Wang, T. Zhang, J. D. Guo*, L. Gu*, Y. W. Xie*, R. Peng* & D. L. Feng*, "High temperature superconductivity at FeSe/LaFeO₃ interface", Nature Communications 12, 5926 (2021).

分子界面的超快相干电荷转移

谭世惊^{1*}

¹ 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, 安徽合肥, 邮编 230026;

*Email: tansj@ustc.edu.cn

摘要: 如何实现给体 (donor) 与受体 (acceptor) 之间的高效电荷转移, 是光电转化、光伏器件, 以及光合作用中的核心问题。在自然界中, 量子相干性被认为在化学与生物分子体系可以有效地提高光能俘获的效率^[1]。然而, 分子体系的复杂环境不可避免地造成退相干过程。在本报告中, 我将介绍在金属-有机分子界面的新型相干电子传输通道。与传统上认为电荷转移需要通过分子实体结构 (through-bond) 不同, 我们发现在分子间静电势所构建的空隙结构中 (through-space), 电子可以通过波导的形式高效传输。这一波导传输的原理是基于分子边缘的 H 原子所形成的 “wet electron” 量子阱态^[2], 实现了 donor-to-acceptor 能级之间的桥接, 进而提供了电子波函数传输的直接通道。我们通过时间分辨-角分辨光电子能谱 (time-resolved ARPES) 测量^[3,4], 在能量、动量、时间维度上揭示了电荷转移的路径; 通过双光子与三光子的光学调制, 获得了 donor-to-acceptor 能级匹配, 在共振激发下实现了高度相干的电荷转移^[5]。

关键词: 电荷转移, 相干调控, 时间分辨, ARPES

参考文献:

- [1] Scholes, G. D. et al. Using coherence to enhance function in chemical and biophysical systems. *Nature* 543, 647-656 (2017)
- [2] Onda, K. *et al.*, Wet electrons at the H₂O/TiO₂(110) Surface. *Science* 308, 1154-1158 (2005).
- [3] Reutzler, M., Li, A. & Petek, H. Coherent two-dimensional multiphoton photoelectron spectroscopy of metal surfaces. *Physical Review X* 9, 011044 (2019).
- [4] Tan, S. *et al.*, Plasmonic coupling at a metal/semiconductor interface. *Nature Photonics* 11, 806-812 (2017).
- [5] Li, X., *et al.*, Coherent charge transfer by intermolecular electron waveguides, doi: 10.21203/rs.3.rs-1405372/v1

锡在硅表面形成的二维三角晶格的非传统超导性质

明方飞^{1*}

¹ 中山大学, 广州, 邮编 510275

*Email: mingff@mail.sysu.edu.cn

摘要: 二维超导体, 例如近年来获得极大关注的单层 FeSe/SrTiO₃、魔角双层石墨烯等, 是探索

非传统超导机制的重要平台，也是实现超导量子器件的候选载体。我们最近在硅表面发现了一种全新的具有强关联特性的三角晶格系统，它在空穴掺杂下由 Mott 绝缘体转变为超导体，具有显著的非传统超导的特征；这一体系具有简单的化学结构和单能带的电子结构，是研究三角晶格中非传统超导机制及手性超导的理想模型系统。近期我们利用扫描隧道显微谱及准粒子散射的方法研究了超导随掺杂浓度的变化，研究了缺陷对准粒子的散射特性以及边界态等特征，这些特征证实了系统的超导具有非传统超导性质，并指向了手性 d 波超导性这一新奇的量子态。

关键词：手性超导，扫描隧道显微镜，硅表面重构，Mott 绝缘体，准粒子散射

参考文献：

- [1] Xuefeng Wu#, Fangfei Ming#*, Tyler S. Smith , Guowei Liu, Fei Ye, Kedong Wang*, Steven Johnston, and Hanno H. Weiering* " Superconductivity in a Hole-Doped Mott-Insulating Triangular Adatom Layer on a Silicon Surface " Phys. Rev. Lett. 125, 117001 (2020)
- [2] F. Ming#, X. Wu#, C. Chen, K. D. Wang*, P. Mai, T. A. Maier, J. Stroockoz, J. W. F. Venderbos, C. González, J. Ortega, S. Johnston* & H. H. Weiering*" Evidence for chiral superconductivity on a silicon surface " Nature Physics 19, 500–506 (2023)

笼母超导体中关联电子态的研究

杨海涛^{1*} 高鸿钧¹

¹ 中国科学院物理研究所纳米物理与器件实验室，北京，邮编 100190

*Email: htyang@iphy.ac.cn

摘要：具有层状结构的新 Kagome 体系 AV_3Sb_5 ($A = K, Rb, Cs$) 因具有非常规超导配对机制、电荷密度波 (CDW)、反常霍尔效应 (AHE) 等多种丰富的关联电子态而备受关注。本文制备出超导转变温度高达 3.5 K 的高质量笼目超导体 CsV_3Sb_5 单晶，利用极低温扫描隧道显微镜观察到了 CsV_3Sb_5 表面非常规超导电性和配对密度波 (PDW)，发现 CsV_3Sb_5 为强耦合超导体并具有长程的 $4a_0$ 单向和 2×2 电荷序，同时发现 3Q PDW 伴随有对超导能隙大小、相干峰和隧穿电导的能隙深度的双向空间调制。进一步在国际上首次合成了新层状笼目超导体 $CsV_{3-x}Ti_xSb_5$ 单晶，实现了化学掺杂对 kagome 层及其关联电子态的调制，发现在 Ti 原子的掺杂比率小于 0.05 时， T_c 单调降低，其 V 形非常规超导能隙与减弱的长程 CDW、PDW、AHE 和电子向列相共存，其中长程的双向 $2a_0 \times 2a_0$ 和单向 $4a_0$ CDW 以及 $4/3a_0$ PDW 同时被抑制，表明三者具有强关联性。Ti 原子掺杂比率大于 0.05 时， T_c 再次升高，出现 U 型常规超导能隙，仅和旋转对称性破缺的短程 CDW 共存，长程双向 $2a_0 \times 2a_0$ 和单向 $4a_0$ CDW 以及 $4/3a_0$ PDW、面内磁阻的两重对称性和 AHE 均消失，表明新超导相的出现。这些研究结果有助于深入理解钒基笼目超导体中共存的关联电子态和多带超导电性的微观起源。

关键词: 笼目, 非常规超导, 配对密度波, 关联电子态

参考文献:

- [1] H. Chen, H. T. Yang, B. Hu, Z. Zhao, J. Yuan, Y. Q. Xing, G. J. Qian, Z. H. Huang, G. Li, Y. H. Ye, S. Ma, S. L. Ni, H. Zhang, Q. W. Yin, C. S. Gong, Z. J. Tu, H. C. Lei, H. X. Tan, S. Zhou, C. M. Shen, X. L. Dong, B. H. Yan, Z. Q. Wang, H.-J. Gao, “Roton pair density wave in a strong-coupling kagome superconductor”, *Nature* 599, 222 (2021).
- [2] C. Broyles, D. Graf, H. T. Yang, X. L. Dong, H.-J. Gao, S. Ran, “Effect of the interlayer ordering on the fermi surface of kagome superconductor CsV3Sb5 revealed by quantum oscillations”, *Phys. Rev. Lett.* 129, 157001 (2022)
- [3] H. T. Yang, Z. H. Huang, Y. H. Zhang, Z. Zhao, J. A. Shi, H. L. Luo, L. Zhao, G. J. Qian, H. X. Tan, B. Hu, K. Zhu, Z. Y. W. Lu, H. Zhang, J. P. Sun, J. G. Cheng, C. M. Shen, X. Lin, B. H. Yan, X. J. Zhou, Z. Q. Wang, S. J. Pennycook, H. Chen, X. L. Dong, W. Zhou, H.-J. Gao, et al., “Titanium doped kagome superconductor CsV_{3-x}Ti_xSb₅ and two distinct phases”, *Sci. Bull.* 67, 2176 (2022)

Emergent Unusual Ferromagnetism and Insulator-Metal Transition in δ -Doped Ultrathin Ruthenates

Jiandi Zhang (张坚地)

Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 100190 Beijing, China.

Abstract: Heterostructures of complex transition metal oxides are known to induce extraordinary emergent quantum states that arise from broken symmetry and other discontinuities at interfaces^[1,2]. Here we report the emergence of unusual, thickness-dependent properties in ultrathin CaRuO₃ films by unique insertion of a single isovalent SrO layer (referred to as “ δ -doping”)^[3]. While bulk CaRuO₃ is metallic and nonmagnetic, films thinner than or equal to ~15-unit cells (u.c.) are insulating though still nonmagnetic. However, δ -doping to middle of such CaRuO₃ films induces an insulator-to-metal transition and unusual ferromagnetism with strong magnetoresistive behavior. The ferromagnetic ground state does not show fully long-range order. Atomically resolved imaging and density-functional-theory calculations reveal that the whole δ -doped film preserves the bulk-CaRuO₃ orthorhombic structure, while appreciable structural and electronic changes are highly localized near the SrO layer. The results highlight delicate nature of magnetic ordering in CaRuO₃ and subtle effects that can alter it, especially the role of A-site cation in electronic and magnetic structure additional to lattice distortion in ruthenates. It also provides a practical approach to engineer material systems via highly localized modifications in their structure and composition that may offer new routes to the design of oxide electronics.

Hwang, H. Y. et al. “Emergent phenomena at oxide interfaces,” *Nat. Mater.* **11**, 103 (2012).

R. Ramesh & D. G. Schlom, “Creating emergent phenomena in oxide superlattices”, *Nat. Rev. Mater.* **4**, 257

(2019).

Zeeshan Ali, et al., “Emergent quantum Griffiths-phase-like ferromagnetic ordering and insulator-metal transition in ultrathin δ -doped ruthenates,” in review.

基于亚纳米分辨光谱成像的分子间量子相干传能研究

张杨^{1*}

¹ 中国科学技术大学, 安徽合肥, 邮编 230026;

*Email: zhyangnano@ustc.edu.cn

摘要: 供体-受体分子间的能量转移是生命活动和光电转化中的基本过程。当供体-受体分子间距非常小的时候, 理论预测激发态能量可以离域在供体-受体分子上, 以类似“波状”般地传能, 即整个传能过程存在量子相干特性, 发生量子相干传能。这种量子相干传能方式的效率非常高, 并被认为是光合作用中具有高效传能的原因。但是, 由于常规的远场光谱技术的空间分辨能力受限于光学衍射极限, 所测量的信息大都是大量分子系统系综平均后的结果, 因此, 对这种传能方式的直接实验证明一直是缺乏的。针对上述问题, 我们通过发展基于纳腔等离子激元增强的亚纳米分辨光谱成像技术^[1,2], 结合可控构筑的供体-受体模型分子体系, 避免了系综平均的影响, 在单分子尺度上“可视化”地研究了分子间的量子相干能量转移机制^[3]。我们的工作不仅为理解分子间能量转移机制提供了新视角, 而且为研发高效有机光电器件提供了科学依据。

关键词: 分子间能量转移、量子相干、纳腔等离子激元、针尖增强光谱成像技术

参考文献:

- [1] Zhang, Y. *et al.*, Visualizing coherent intermolecular dipole–dipole coupling in real space. *Nature* 531, 623–627 (2016)
- [2] Yang, B. *et al.*, Sub-nanometre resolution in single-molecule photoluminescence imaging. *Nature Photonics* 14, 693–699 (2020)
- [3] Kong, F.-F. *et al.*, Wavelike electronic energy transfer in donor–acceptor molecular systems through quantum coherence. *Nature Nanotechnology* 17, 729–736 (2022)

二维磁性材料的 MBE 生长及二维磁性/超导异质结构筑

钟定永

中山大学物理学院/光电材料与技术国家重点实验室, 广州, 邮编 510275

Email: dyzhong@ail.sysu.edu.cn

摘要: 二维磁性材料由于其在低维磁性机理研究以及在新一代自旋电子学器件应用等方面的重要价值, 近些年来受到了广泛关注。报告将介绍我们利用 MBE 开展二维磁性材料制备及基于 STM 开展原子尺度电子学性质研究的最新进展。我们特别关注低维磁性/超导杂化体系中可能展现出的新奇量子现象。

关键词: 分子束外延, 扫描隧道显微镜, 二维磁性, 磁/超导杂化体系

分会口头报告

5d 过渡金属氧化物中的应力梯度及非互易电荷输运行为

谷明辉¹, 孟梦^{1*}, 郭建东^{1*}¹ 中国科学院物理研究所, 北京 100083

* Email: mengm@iphy.ac.cn

jdguo@iphy.ac.cn

摘要: 5d 过渡金属氧化物中自旋-轨道耦合能 (SOC, $\lambda=0.3-1\text{eV}$) 及电子关联能 ($U=0.5-2\text{eV}$) 相当, 通过维度、对称性及掺杂等手段对其进行调控, 能使之出现一系列新颖的光电磁物性, 如磁性绝缘体、Slater 绝缘体等。除此之外, 应力调控也是常见的改变薄膜物理性质的手段之一, 可调控氧化物薄膜的铁电性以及引入非平庸的拓扑自旋织构等。故而利用应力调控 5d 强自旋-轨道耦合材料能够极大地挖掘其物性与潜在应用。

我们利用脉冲激光沉积技术, 在 $\text{NdGaO}_3(110)$ 衬底上生长了不同厚度的 SrIrO_3 薄膜, 并利用倒空间扫描(RSM)及拉曼测试等技术揭示出其中所蕴含的应力梯度特征, 即当薄膜厚度超过某一临界值时, 应力随厚度呈现出梯度弛豫行为。统计发现 SrIrO_3 薄膜面外与面内应力弛豫趋势一致, 但弛豫程度不同。输运测试表明当超过临界厚度时, 应力梯度与 SrIrO_3 薄膜的金属-非金属转变温度及非互易电荷输运特性直接相关。

关键词: 过渡金属氧化物, 脉冲激光沉积, 应力梯度, 非互易电荷输运

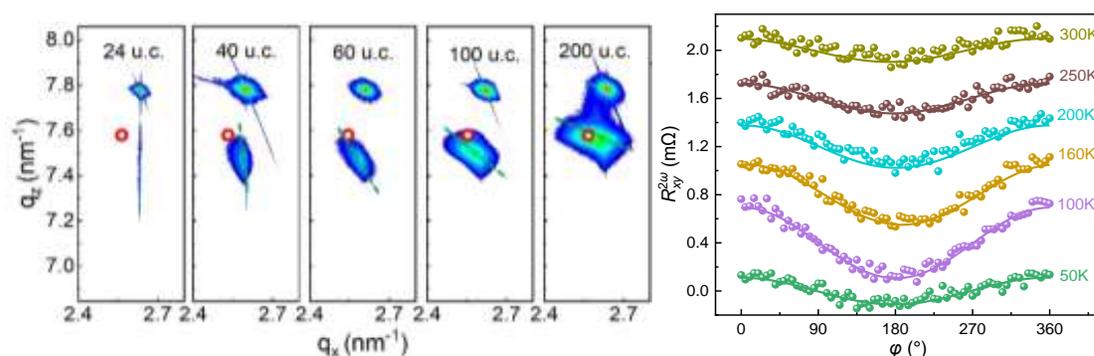


图 1 SrIrO_3 中的应力梯度行为及非互易电荷输运

参考文献:

- [1] Jinxing Zhang et al., Strain-Driven Dzyaloshinskii-Moriya Interaction for Room-Temperature Magnetic Skyrmions. *Physical Review Letters* 127, 117204 (2021).
- [2] M. Tyunina et al., Ferroelectric phase transitions induced by a strain gradient. *Physical Review Research*, 3, 033213 (2021).
- [3] S. Kasai et al., Observation of Nonlinear Spin-Charge Conversion in the Thin Film of Nominally Centrosymmetric Dirac Semimetal SrIrO_3 at Room Temperature. *Physical Review Letters* 126, 236801 (2021).

非易失电调控二维双极性磁性半导体 VSeF 的自旋极化

李玉辉¹ 邓俊¹ 张艳芳² 金鑫² 董文翰¹ 孙家涛³ 潘金波^{1*} 杜世萱^{1*}

¹ 中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190;

² 中国科学院大学, 北京, 邮编 100049;

³ 北京理工大学, 北京, 邮编 100081;

*Email: jbpan@iphy.ac.cn; sxdu@iphy.ac.cn

摘要: 非易失电调控二维磁性半导体自旋极化对发展未来低功耗纳米自旋电子学器件具有重要意义。本文预测了一个本征的二维双极性磁性半导体材料 VSeF, 它具有相反自旋极化的价带边和导带边。基于这个材料, 我们提出了一种通过引入具有合适能带带边位置的铁电栅压门, 调控其电极化方向, 从而实现非易失操控双极性磁性半导体自旋极化的策略。将 VSeF 与双层 Al₂Se₃ 铁电体构筑成多铁异质结, 理论计算该异质结在不同铁电极化下的电子结构, 证实了该设计方案的可行性。此外, 铁电栅压的电荷掺杂效应还将影响双极性磁性半导体 VSeF 的居里温度。基于 VSeF/Al₂Se₃ 和 VSeF/Al₂Se₃/Al₂Se₃ 多铁异质结, 我们分别设计了两类自旋场效应晶体管, 即多铁存储器和自旋阀器件。本工作将为二维双极性磁性半导体材料在来自旋电子学纳米器件中的应用提供了可能。

关键词: 二维双极性磁性半导体, 范德华多铁异质结, 自旋场效应晶体管

参考文献:

[1] Y. Li, J. Deng, YF. Zhang, X. Jin, WH. Dong, ST. Sun, J. Pan, * S. Du. * Nonvolatile electrical control of spin polarization in the 2D bipolar magnetic semiconductor VSeF. *npj Comput Mater* 9, 50 (2023).

二维过渡金属硫族化合物本征缺陷的识别与调控

卢建臣^{1*} 高蕾² 蔡金明¹

¹ 昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南昆明, 邮编 650093;

² 昆明理工大学理学院, 云南昆明, 邮编 650500

*Email: jclu@kust.edu.cn

摘要: 二维材料的缺陷对材料本身的物性有着十分显著的影响, 因此, 二维材料的缺陷识别与调控尤为重要。二维过渡金属硫族化合物家族庞大、物性丰富, 是一个热门的材料研究体系。本报告中, 我们精准构筑和调控了单层硒化铜和单层硒化银的本征三角形缺陷和长条形缺陷, 并利用本征缺陷的限域效应实现了原子和分子对两种材料的选择性功能化^[1,2,3,4]。另外, 我们精准识别了单层二硫化钨的本征带正电荷的缺陷和带负电荷的缺陷, 证明了在单层二硫化钨中正负电荷缺陷的起^[5]。

关键词: 扫描隧道显微镜, 分子束外延, 二维过渡金属硫族化合物, 本征缺陷, 带电缺陷

参考文献:

- [1] X. Lin[#], Jianchen Lu[#], Y. Shao[#], Y. Y. Zhang[#], Y. L. Wang^{*}, S. X. Du^{*}, S. T. Pantelides, H.-J. Gao^{*}, “Intrinsically patterned two-dimensional materials for selective adsorption of molecules and nanoclusters”, *Nature Materials* 16, 717–721 (2017).
- [2] Lei Gao[#], Jia-Tao Sun[#], Jianchen Lu[#], Hang Li, Xiao Lin^{*}, Shixuan Du^{*}, and Hong-Jun Gao, “Epitaxial Growth of Honeycomb Monolayer CuSe with Dirac Nodal Line Fermions”, *Advanced Materials* 30, 1707055 (2018).
- [3] Gefei Niu[#], Jianchen Lu^{#*}, Xingyue Wang, Zilin Ruan, Hui Zhang, Lei Gao, Jinming Cai and Xiao Lin^{*}, “Se-concentration dependent superstructure transformations of CuSe monolayer on Cu(111) substrate”, *2D Materials* 9, 015017 (2022).
- [4] Jianchen Lu, Shiru Song, Shuai Zhang, Yang Song, Yun Cao, Zhenyu Wang, Li Huang, Hongliang Lu, Yu-Yang Zhang, Sokrates T. Pantelides, Shixuan Du^{*}, Xiao Lin^{*}, Hong-Jun Gao, “Intrinsically patterned corrals in monolayer Ag₅Se₂ and selective molecular co-adsorption”, *Nano Research* 15, 6730-6735 (2022).
- [5] Zilin Ruan[#], Jianchen Lu^{#*}, Baijin Li, Zhenliang Hao, Qizan Chen, Lei Gao^{*}, Jinming Cai^{*}, “Probing the Charged Defects in Single-Layer WS₂ at Atomic Level”, *Materials Today Physics*, 27 100773 (2022).

真空环境下氢化钛的激光致热解吸及烧蚀特性研究

马明旺^{1,*} 王磊¹ 王杏¹

¹ 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川绵阳, 邮编 621999

*Email: mamingwang@163.com

摘要: 激光致热解吸 (LITD) 方法被广泛应用于研究固体表面的气体脱附或原子蒸发效应。与常规热解吸 (TDS) 方法相比, LITD 方法具有加热速率快、加热面积可调、作用时间短等特点, 非常适于研究脉冲粒子束流作用下固体表面的瞬态脱气行为。

本文基于高分辨四极质谱测量技术, 建立了 LITD 实验平台及诊断方法。采用脉冲激光聚焦在样品表面, 并测量激光加热导致的氢气瞬时释放信号, 所有实验在高真空下完成, 本底真空 10^{-6} Pa, 时间分辨率可达 50 ns。通过对氢气飞行时间谱 (TOF) 进行麦克斯韦分布拟合, 获得了不同能量密度激光作用下的表面峰值温度与释氢量; 采用扫描电子显微镜 (SEM) 结合原子力显微镜 (AFM) 方法研究了脉冲激光作用下氢化钛的烧蚀特性, 获得了烧蚀深度参数。将实验结果与传热与传质模型的数值模拟结果进行对比, 发现实验测量与数值模拟结果符合较好, 证明了物理模型与数值模拟方法的正确性。该结果有助于评估金属储氢材料在氢能源、聚变堆材料等领域中的应用。

关键词: 氢化钛, 激光, 热解吸, 烧蚀, 脱附

Rational Design 2D Functional Heterojunctions and Database Construction for Ionic Layered Materials

潘金波^{1,2} 李玉辉^{1,2} 邓俊^{1,2} 张艳芳^{1,2} 杜世萱^{1,2}

1 中国科学院物理研究所室, 北京, 邮编 100190;

2 中国科学院大学, 北京, 邮编 100190

*Email: jbpan@iphy.ac.cn

摘要: In this presentation, I will discuss our recent work on the design of 2D layered heterojunctions and ionic layered materials. These materials hold great potential for miniaturized electronic and optoelectronic devices at the nanoscale. By assembling different 2D layers into heterostructures, we can achieve enhanced performance and flexibility.

One aspect of our research focuses on achieving nonvolatile electrical control of spin polarization in 2D magnets, which is crucial for low-dissipation spintronic nanodevices. We have designed strategies to control the spin polarization of a bipolar magnetic semiconductor VSeF using electric dipoles from ferroelectric monolayers and bilayer Al₂Se₃. This has enabled the creation of spin field effect transistors such as multiferroic memory and spin filters in VSeF/Al₂Se₃ and VSeF/Al₂Se₃/Al₂Se₃ multiferroic heterostructures^[1]

关键词: nonvolatile electric control, spin polarization, ionic layered materials, database, 2D functional materials

参考文献:

- [1] Li, Y.; Deng, J.; Zhang, Y.; Jin, X.; Dong, W.; Sun, J.; Pan, J.; Du, S. "Nonvolatile electrical control of spin polarization in the 2D bipolar magnetic semiconductor VSeF" *NPJ Comput. Mater.* 9, 50 (2023).
[2] Deng, J.; Pan, J.; Zhang, Y.; Du, S. "Database Construction of Two-Dimensional Charged Building Blocks for Functional-Oriented Material Design" *Nano Lett.* 23, 4634 (2023).

分子吸附构型对脱磺酰基反应的影响

王俊波^{1,2} 牛凯丰^{1,3} 朱华明²,

朱俊发^{4*}, Jonas Björk^{3*}, 李青^{2*}, 迟力峰^{1,5*}

¹ 苏州大学功能纳米与软物质研究院, 江苏苏州, 215000

² 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西西安, 710119

³ 瑞典林雪平大学, 瑞典林雪平, SE-58183

⁴ 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽合肥, 230029

⁵ 澳门科技大学材料科学与工程系, 中国澳门, 999078

*Email: chlf@suda.edu.cn, liqing@snnu.edu.cn, jonas.bjork@liu.se, jfzhu@ustc.edu.cn

摘要: 在表面化学反应中, 金属衬底可以充当催化剂, 从而有效降低相关反应的势垒。反应势垒一般由相应金属表面的化学活性决定。虽然在早期的研究工作中, 人们就已意识到分子在表面的吸附构型对反应路径和势垒起着关键性作用, 然而由于很难在单分子尺度对分子吸附构型进行调控, 因此几乎没有具体实验研究分子在表面的具体吸附构型对相关反应的影响机制。大量的前期报道表明, 含氧分子会通过 O-Ag 键化学吸附在银单晶表面; 含硫的有机化合物会在单晶金表面和衬底形成较强的 Au-S 键。在此基础上, 我们选用同时含有氧和硫的分子(4,4'-联苯二磺酰氯, BPDSC)作为前驱体, 在 Au(111)和 Ag(111)表面上研究比较了脱磺酰基偶合反应, 并揭示了分子在表面具体吸附构型对相关反应的影响及其机制。通过超高真空扫描隧道显微镜 (STM) 观察和同步辐射 X 光电子能谱 (XPS) 测量, 我们发现 Au(111)表面催化脱磺酰基反应所需的温度比 Ag(111)表面上的低 50 K, 该现象与传统观点认为银通常比金具有更高的化学活性相矛盾。结合密度泛函理论 (DFT) 计算, 我们阐明了这种现象是由不同的分子-衬底相互作用引起的。脱氯后的 BPDSC 分子与 Au(111)表面形成稳定的 Au-S 键, C-S 键因而被有效地削弱, 有利于催化脱磺酰基反应的进行。然而, 脱氯后的 BPDSC 分子与 Ag(111)表面形成的 Ag-O 相互作用增大了 S 原子与表面的距离, 不利于催化脱磺酰基反应的进行。最终, 在 Au(111)表面上脱磺酰基反应要比 Ag(111)表面上低。该项研究不仅发现了一种新型的表面化学反应, 还阐明了分子具体吸附构型对化学反应机制的影响。

关键词: 扫描隧道显微镜 (STM); 表面合成; 吸附构型; 脱磺酰基; 同步辐射光电子发射谱 (SRPES)

参考文献:

- [1] Li, Q.; Yang, B.; Lin, H.; Aghdassi, N.; Miao, K.; Zhang, J.; Zhang, H.; Li, Y.; Duhm, S.; Fan, J.; Chi, L. *J. Am. Chem. Soc.* 2016, 138: 2809.
- [2] Yang, B.; Cao, N.; Ju, H.; Lin, H.; Li, Y.; Ding, H.; Ding, J.; Zhang, J.; Peng, C.; Zhang, H.; Zhu, J.; Li, Q.; Chi, L. *J. Am. Chem. Soc.* 2019, 141: 168.

复合 zigzag 结构 CrN 涂层的设计制备及冲蚀性能

王丽¹ 王振玉¹ 陈仁德¹ 柯培玲¹, 汪爱英¹

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 a.中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室 b.浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201)

摘要: 为提高钛合金基体抗冲蚀性能, 采用掠角磁控溅射技术制备复合 zigzag 结构 CrN 涂层, 并利用掠角 X 射线衍射仪 (GIXRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、划痕测试系统 (CSM Revetest)、白光干涉仪、纳米压痕仪、冲蚀设备等表征涂层的成分、组织结构、力学性能和冲蚀性能。研究结果表明, 复合 zigzag 结构 CrN 涂层, 组织致密呈现柱状结构, 厚度约为 3.7 μm , 纳米硬度达到 (19.2 ± 2) GPa, 具有优良的膜基结合强度 (>48 N)。相比于常规 CrN 涂层, 复合 zigzag 结构 CrN 涂层在 90° 冲蚀角度下的抗冲蚀性能提高了 57.67%。CrN 涂层表现为明显的脆性失效特征, 复合 zigzag 结构 CrN 涂层表现为明显的脆性和韧性失效双特征, 符合变形磨损理论和二次冲蚀理论。复合 zigzag 结构 CrN 涂层在砂砾冲蚀试验中表现出良好的抗冲蚀性能主要归因于其特有的 zigzag 晶界取向设计,

提高了材料的损伤容限。

关键词：磁控溅射；Zigzag 结构；CrN 涂层；冲蚀性能

金表面烃类的选择加氢反应

邬宗芳^{1*} 王芳³ 滕波涛² 黄伟新¹

¹ 中国科学技术大学，安徽合肥，邮编 230026；

² 天津科技大学，天津，安徽合肥，邮编 300222

³ 南京大学，江苏南京，邮编 210093

*Email: wzfang@ustc.edu.cn

摘要：烯烃的纯化具有重要的工业价值，通常需要催化剂能够在高单烯烃浓度比例的情况下实现对炔烃及二烯烃的高效的半催化加氢，诸多研究者报道过负载型金催化剂可以实现炔烃或二烯烃在高转化率条件下的高选择性加氢，且其最突出的特点是温和条件下的高选择性和尺寸敏感性。[1]但是有关纳米金的优异选择性的来源及活性金物种的本质理解并不清楚。基于单晶的模型催化研究提供相关基础理解的重要手段，本课题利用超高真空条件下的表面科学手段结合理论模拟，考察了同时具有(111)平台和(111)台阶的 Au(997)单晶表面乙炔和 1,3-丁二烯的催化加氢反应，以探讨表面活性位的本质、催化选择性来源、Au 配位数的影响等基础问题。结果表明台阶位上的金能催化乙炔 100%选择性加氢到乙烯，而平台和台阶位上吸附的乙炔和乙烯均不发生加氢反应；台阶位上的金能催化丁二烯选择性到丁烯，但平台上的金可以催化丁二烯直接到丁烷，不具选择性。[2]这些与表面吸附物种相关的不同配位数金的本征催化加氢性能，与表面吸附物种的自由能以及对应加氢步骤的活化能密切相关。这些结果有助于理解金本征催化作用的独特选择性根源。

关键词：超高真空，表面吸附，理论模拟，选择加氢，金单晶

参考文献：

[1] A. Hugon, L. Delannoy, C. Louis, *Gold Bull.* 2008, 41, 127–138.

[2] Z. Wu, F. Wang, G. Sun, F. Xiong, B. Teng, *J. Phys. Chem. Lett.*, 2022, 13, 7667–7672.

几种有机功能分子在 Au(111)表面的物化行为

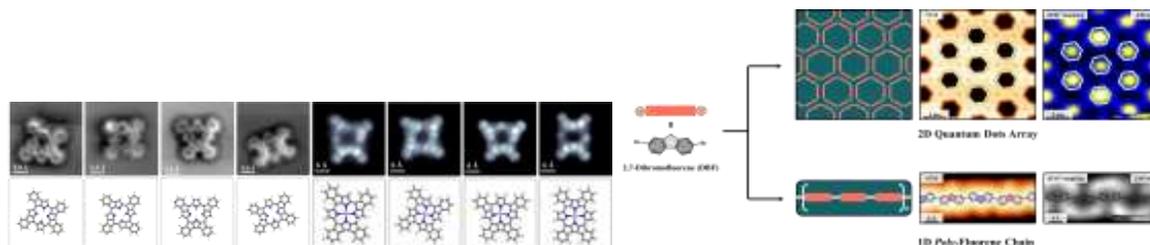
熊玮¹ 卢建臣^{1*} 蔡金明^{1*}

¹ 昆明理工大学材料科学与工程学院，云南昆明，邮编 650093；

*Email: j.cai@kust.edu.cn; jlcl@kust.edu.cn

摘要: 表面合成 (OSS) 通过自上而下的方式构筑原子级精确的纳米结构在近十几年来得到了迅速的发展, 逐渐成为一个热门的研究方向。有机功能分子作为基础的构筑模块通过表面化学反应可以在表面实现在未来具有光电及量子特性潜力的器件。卟啉、卟啉锌、二溴苝三种有机功能分子在工业生产应用中存在着广泛的应用, 但在表面的一些机理仍缺乏系统的认识。这里我们利用扫描隧道显微镜和第一性原理计算系统地介绍在它们 Au(111) 表面的自组装、反应选择性及电学性质, 对这类有机功能分子在未来电学器件的应用方面提供了较为全面的理论基础。

关键词: 扫描隧道显微镜 (STM), 表面合成, 第一性原理计算, 卟啉, 二溴苝, 聚苝, 量子点阵



参考文献:

- [1] J. Lu, B. Da, W. Xiong, R. Du, Z. Hao, Z. Ruan, Y. Zhang, S. Sun, L. Gao, J. Cai, Identification and electronic characterization of four cyclodehydrogenation products of H₂TPP molecules on Au(111), *Phys Chem Chem Phys*, 23 (2021) 11784-11788.
- [2] W. Xiong, X. Ren, B. Da, Y. Zhang, H. Zhang, J. Lu, J. Cai, Revealing the high-resolution structures and electronic properties of ZnTPP and its derivatives formed by thermally induced cyclodehydrogenation on Au(111), *Phys Chem Chem Phys*, 23 (2021) 18930-18935.
- [3] W. Xiong, J. Lu, J. Geng, Z. Ruan, H. Zhang, Y. Zhang, G. Niu, B. Fu, Y. Zhang, S. Sun, L. Gao, J. Cai, Atomic-scale construction and characterization of quantum dots array and poly-fluorene chains via 2,7-dibromofluorene on Au(1 1 1), *Appl. Surf. Sci.*, 609 (2023) 155315.

基于针尖增强单分子拉曼光谱的接触依赖化学增强与淬灭效应

杨犇¹ 陈功¹ Atif Ghafoor¹ 张宇帆¹ 张先彪¹ 李航¹ 董小茹¹ 汪瑞谱¹ 张杨¹
张尧¹ 董振超^{1*}

¹ 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心, 安徽合肥, 邮编 230026;

*Email: zcdong@ustc.edu.cn

摘要: 尽管在表面增强拉曼光谱研究中已经对拉曼信号的化学增强效应开展了大量的研究, 但由于其相对复杂的内在机制以及实验上难以精细表征单个分子与金属表面的局域相互作用, 使得对拉曼散射过程中化学效应的认识还很不全面。因此, 精确调控和表征单个分子与局域化学环境相互作用将有助于理解化学效应对于拉曼影响的微观机制。在本研究中, 利用埃级分辨的针尖增强拉曼光谱技术 (Tip-enhanced Raman spectroscopy, TERS)^{1,2}, 通过可控改变单个锌酞菁分子与金属表面的不同接触环境, 细致探究了化学效应对于拉曼信号的增强与淬灭机制。结果表明, 当针尖与电子态脱

耦合的单个分子进行可控点接触时，分子的拉曼信号会被极大增强。这是由于基态电荷转移机制下垂直场增益所引起的物理与化学协同效应。另一方面，由于动态界面电荷转移所导致的分子极化率减小以及金属衬底引起的电磁场屏蔽效应，与银衬底面接触的单个分子的拉曼信号会被严重淬灭。此外，我们进一步通过偏压依赖和波长依赖的TERS光谱演化证实了所提出的基态电荷转移增强机制。本研究结果将为拉曼信号增强与淬灭的机制提供更深入的理解。

关键词： 针尖增强拉曼光谱， 单分子， 基态电荷转移， 化学增强， 拉曼淬灭

参考文献：

- [1] Zhang, R.etal.Chemical mapping of a single molecule by plasmon-enhanced Raman scattering. Nature 498, 82-86 (2013).
- [2] Zhang, Y. et al. Visually constructing the chemical structure of a single molecule by scanning Raman microscopy. Natl. Sci. Rev. 6, 1169- 1175 (2019).

One-Dimensional van der Waals Polymers with Nonlinear Optical Performance Approaching Theoretical Upper Limit

Jingyu Yang^{1,2}, Jun Deng¹, Jinbo Pan^{1,2,4}, Yongqian Zhu^{1,2}, Yan-Fang Zhang², Yuhui Li^{1,2}, Jia-Tao Sun³, Shixuan Du^{1,2,4*}

¹Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics and Institute of Physics Chinese Academy of Sciences Beijing 100190, China.

²University of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, 100190 Beijing, China.

³School of Integrated Circuits and Electronics, MIIT Key Laboratory for Low-Dimensional Quantum Structure and Devices, Beijing Institute of Technology, 100081 Beijing, China.

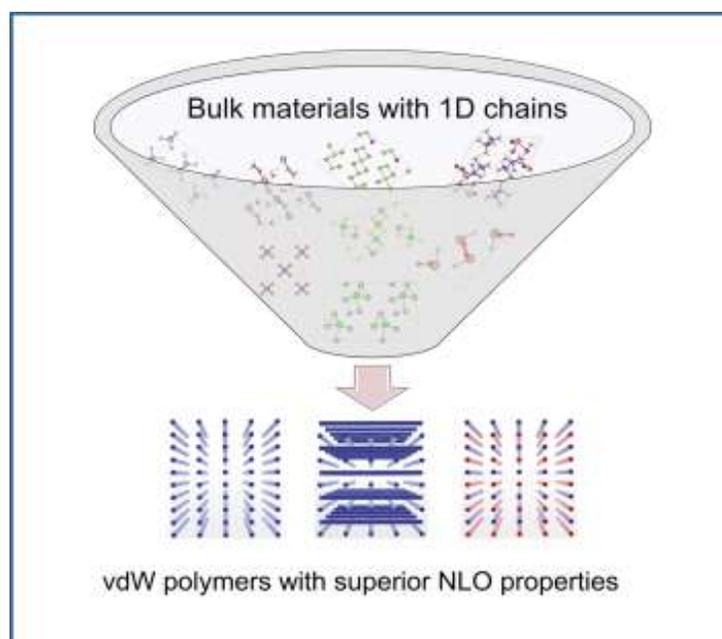
⁴Songshan Lake Materials Laboratory, 523808 Dongguan, China.

ABSTRACT : Nonlinear optical materials (NLO) attract great attention because of their applications in generating coherent laser sources, etc. However, crystals with NLO susceptibilities close to the theoretical upper limit are rare, playing a pivotal role in generating high-power output.

In recent years, attention has been moved to van der Waals materials, where crystals consisting of low-dimensional building blocks could be a possible solution to realize large NLO susceptibility. And numerous two-dimensional crystals were predicted to own giant optical nonlinearities near the theoretical upper limit. Inspired by a recent report of one-dimensional (1D) material PNF2 with excellent NLO performance, we extend this region to crystals made up of 1D building blocks, where the dipoles along the chain result in strong second harmonic oscillations.

In this work, by high throughput calculations, we searched new NLO crystals from 244 materials constructed by vdW stacking of one-dimensional (1D) polymers. We found 14 experimentally synthesized bulk vdW materials, 11 2D and 11 1D forms as NLO candidates. Nearly half of their NLO susceptibilities approach the theoretical upper limit, and their working frequencies cover ultraviolet, visible, and infrared regions. Moreover, we found that their NLO susceptibilities are positively related to the charge difference on the chains. Finally, we proposed a design strategy that superior NLO polymers can be obtained with proper bandgap and large charge difference on the chain.

Keywords: nonlinear optical crystals, 1D motifs, first-principles calculations, second harmonic generation, materials design



Influence of rare earth doping on the hydrogen absorption properties of Zr_7V_5Fe alloy

Shuang Yang^{1,2}, Zifeng Luo^{2,3}, Guo Yang², Lijun Lv², Linhua Xu², Haiyan Leng^{3,*}, Xingbo Han^{2,*}, Jianhui Zhu^{2,3}, Pengfei Zhu¹

¹School of Mathematics, Physics and Statistics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

²Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

³Institute of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai, 200444,

*E-mail addresses: lenghaiyan@shu.edu.cn (H. Leng), hanxingbo@sinap.ac.cn (X. Han).

Abstract: As a representative of non-evaporative getter, Zr-V-Fe has attracted widespread attention

because of its advantages of low activation temperature and fast hydrogen absorption rate. In this work, the effects of rare earth elements La and Ce doping on the microstructure as well as the hydrogen absorption properties of Zr_7V_5Fe alloy are systematically investigated. X-ray diffraction analysis show that rare earth doping causes a decrease in the cell volume of both ZrV_2 and α -Zr phases, resulting in an increase in the hydrogen absorption plateau pressure of the ZrV_2 phase. The kinetic curves illustrate that rare earth doping leads to a larger particle size after activation, resulting in a decrease in the hydrogen absorption kinetic properties. As for the activation process, in-situ XPS investigations show that Zr and V are initially in a highly oxidized state, and change from oxidation state to metal state with the increase of heating temperature. Rare earth doping reduces the activation temperature and shortens the incubation period of the alloy, and the content of metal Zr in rare earth doped alloys be higher than that in undoped alloys at $250^\circ C$. Meanwhile, the oxygen diffusion behaviors on the Zr surfaces are studied by first-principles calculations. The results show that the oxygen diffusion barriers of doped and undoped La are 0.801eV and 1.322eV, respectively. In contrast, the La doping of the surface layer slightly weakens the oxygen adsorption ability and lowers the energy barrier to the diffusion of oxygen into Zr surface. This study reveals that the doping of rare earth elements has potential application value for improving the activation performance of alloys.

Keywords : Rare earth elements, Hydrogen absorption thermodynamics, Activation, X-ray photoelectron spectroscopy, First-principles

Reference

T.B. Zhang,* X.F. Wang, R. Hu, J.S. Li, X.W. Yang, X.Y. Xue, H.Z. Fu, “Hydrogen absorption properties of $Zr(V_{1-x}Fe_x)_2$ intermetallic compounds”, *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 2328-2335(2012).

X. B. Han, P. Yan, D.X. Zhang, L. J. Lv, G. Yang, L. L. Qin, H. L. Leng*, W. Liu*, “Hydrogen absorption behavior of non-stoichiometric $Zr_{7-x}Ti_xV_5Fe$ ($x = 0, 0.3, 0.9, 1.5$ and 2.1) alloys”, *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 21625-21634 (2020).

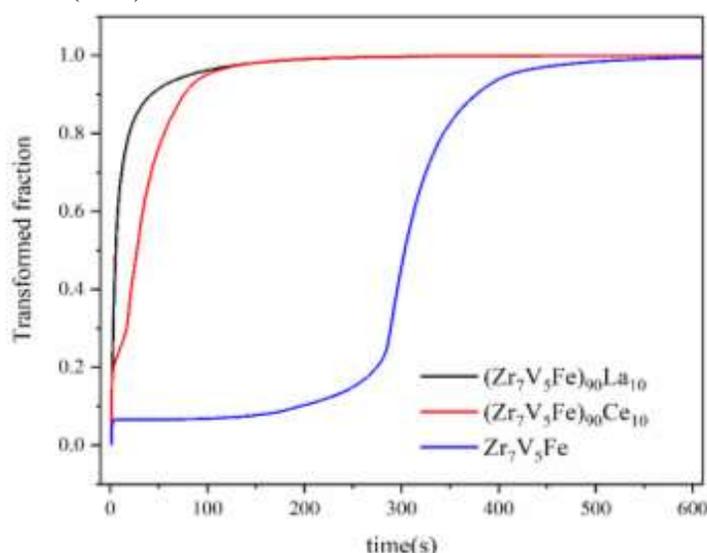


Fig.1 Hydrogen absorption curves of Zr_7V_5Fe , $(Zr_7V_5Fe)_{90}La_{10}$, $(Zr_7V_5Fe)_{90}Ce_{10}$ at room temperature after 523K activation.

台阶辅助表面合成具有周期性双空位孔洞石墨烯纳米条带

尹若庭¹ 王佳宁¹ 邱振林² 孟杰¹ 徐慧敏¹ 王政亚¹ 梁逸凡¹ 赵新静²

马传许^{1*} 谭元植^{2*} 李群祥¹ 王兵^{1*}

¹中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心, 安徽合肥, 邮编 230026;

²厦门大学能原材料化学协同创新中心, 福建厦门, 邮编 361005

*Email: cxma85@ustc.edu.cn; yuanzhi_tan@xmu.edu.cn; bwang@ustc.edu.cn

摘要: 除了通过控制石墨烯纳米条带 (GNRs) 宽度和边缘结构来实现其能带调控以外, 通过自下而上的表面合成法在 GNRs 中植入周期性孔洞纳米结构, 为调控 GNRs 的电子学特性提供了一种新的可控方法。然而, 对于诸如双空位型孔洞, 由于孔洞中空间位阻的存在, 使得内嵌这种非平面的周期性孔洞结构的 GNRs 的制备仍十分困难。我们从单一的分子前驱体出发, 在 Au(111)表面经过反式和顺式耦合, 分别在 720 K 温度下的台阶边缘得到具有周期性的双空位孔洞结构的石墨烯纳米条带 (DV8-aGNRs) 和 570 K 温度下的台面上得到具有空腔结构的纳米石墨烯。结合扫描隧道显微术 (STM)、原子力显微术 (AFM) 以及密度泛函理论计算, 证实了双空位孔洞结构的存在引起了 DV8-aGNRs 的面外扭曲、能隙增加 (~3.36 eV) 以及电子态密度的超周期调制。NEB 计算结果显示附加的空间位阻效应使得其脱氢环化反应能垒比形成平面型孔洞纳米石墨烯的高 1.3 eV, 也揭示了 Au(111)表面单原子台阶和表面增原子在脱氢环化过程中对降低反应能垒和增强热力学稳定性方面所起到的重要作用。我们的结果为利用衬底的化学异质性促进新型碳纳米材料的合成提供了新思路。

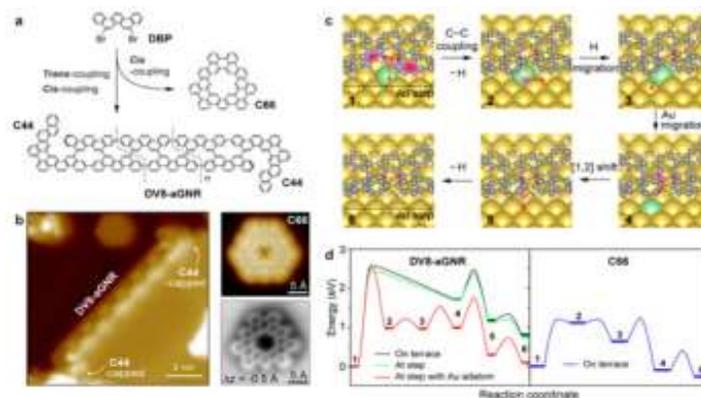


图 1 a: 反应路径。b: 产物结构的高分辨扫描探针图像。c,d: NEB 反应路径与能垒计算。

关键词: 扫描隧道显微镜 (STM), 原子力显微镜 (AFM), 石墨烯纳米条带, 双空位

参考文献:

[1] Yin, R., J. Wang, Z.-L. Qiu, J. Meng, H. Xu, Z. Wang, Y. Liang, X.-J. Zhao, C. Ma, * Y.-Z. Tan, * Q. Li, and B. Wang * "Step-Assisted On-Surface Synthesis of Graphene Nanoribbons Embedded with Periodic Divacancies" *J. Am. Chem.Soc.*, 2022. 144(32): p. 14798.

Atomistic Simulations of Graphene Origami: Dynamics and Kinetics

张艳芳¹ 张盼盼^{2,1} 贾海洪^{2,1} 杜世萱^{2,1*}

¹ 中国科学院大学物理科学学院, 北京, 邮编 100190;

² 中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190

Email: zhangyanfang@ucas.ac.cn

Abstract: Origami offers two-dimensional (2D) materials with great potential for applications in flexible electronics, sensors, and smart devices. However, the dynamic process, which is crucial to construct origami, is too fast to be characterized by using state-of-the-art experimental techniques. Here, to understand the dynamics and kinetics at the atomic level, we explore the edge effects, structural and energy evolution during the origami process of an elliptical graphene nano-island (GNI) on a highly ordered pyrolytic graphite (HOPG) substrate by employing steered molecular dynamics simulations. The results reveal that a sharper armchair edge is much easier to be lifted up and realize origami than a blunt zigzag edge. The potential energy of the GNI increases at the lifting-up stage, reaches the maximum at the beginning of the bending stage, decreases as the formation of van der Waals overlap, and finally reaches an energy minimum at a half-folded configuration. The unfolding barriers of elliptical GNIs with different lengths of major axis show that the major axis should be larger than 242 Å to achieve a stable single-folded structure at room temperature. These findings pave the way for pursuing other 2D material origami and preparing for origami-based nanodevices.

Keywords: origami process, dynamics and kinetics, structure and energy evolution, stability of single-folded structure

C 薄膜科学与技术
分会邀请报告

磁化动力学的声表面波调控

宋成*

清华大学, 北京, 邮编 100084

*Email: songcheng@mail.tsinghua.edu.cn

摘要: 自旋-声子耦合不仅在基础物理中至关重要, 而且在低功耗信息存储技术中也日益引起广泛的关注。声表面波 (surface acoustic wave, SAW) 沿着弹性体表面传播, 携带着长程传输的相干声子, 为研究自旋-声子耦合提供了一个全新的平台。SAW 驱动的铁磁共振 (ferromagnetic resonance, FMR) 对于实现磁声耦合至关重要, 是实现磁性自旋流高效声学调控的核心^[3]。鉴于目前磁声耦合的研究受限于复杂的分析和高昂的设备, 我们基于电学整流实现了 SAW 驱动 FMR 的直流电检测。通过分析 FMR 整流电压, 我们可以直接表征和提取磁声耦合的有效磁场, 对声控磁化动力学有了更深入的理解。这种检测手段表现出更好的器件集成兼容性和更低的成本, 为可设计的磁声耦合器件及其简便的信号读出提供了机会^[1]。基于上述声控磁化动力学的研究, 我们利用磁光克尔显微镜这种磁畴成像手段原位表征了 SAW 驱动下磁性薄膜的磁化过程和磁畴演化规律。在具有一定面外磁各向异性的[Co/Pd]多层膜中, 观察到磁畴沿着垂直于 SAW 的传播方向形核, 在面外磁场和热的共同作用下分裂为单个的磁性斯格明子。这些 SAW 驱动下产生的磁性斯格明子沿着垂直于 SAW 的传播方向有序排列, 这来源于 SAW 作用下体系能量的重新分布。在电流驱动斯格明子的运动过程中, SAW 的加入有效地抑制了斯格明子霍尔效应所引起的横向偏移, 这为操控磁性斯格明子提供了一种全新的手段^[2]。

关键词: 声表面波, 磁化动力学, 磁声耦合, 电检测, 磁性斯格明子, 斯格明子霍尔效应

参考文献:

- [1] Chong Chen, Lei Han, Peisen Liu, Yichi Zhang, Shixuan Liang, Yongjian Zhou, Wenxuan Zhu, Sulei Fu, Feng Pan, Cheng Song. Direct-Current Electrical Detection of Surface-Acoustic-Wave-Driven Ferromagnetic Resonance. *Adv. Mater.* DOI: 10.1002/adma.202302454.
- [2] Ruyi Chen, Chong Chen, Lei Han, Peisen Liu, Rongxuan Su, Wenxuan Zhu, Yongjian Zhou, Feng Pan, Cheng Song. Ordered creation and motion of skyrmions with surface acoustic wave. *Nat. Commun.* DOI: 10.1038/s41467-023-40131-1

等离子辅助原子层沉积 Pd-Cu 及其在二氧化碳加氢中的应用研究

刘忠伟* 田旭 陈强 桑利军

北京印刷学院等离子体物理与材料研究室, 北京, 邮编 102600

*Email: liuzhongwei@bigc.edu.cn

摘要: 相对于固定床原子层沉积技术, 流化床等离子体辅助原子层沉积技术具有沉积温度低、粒子尺寸可控、粒子分布均匀等优点, 非常适合在多孔基底上制备高性能的催化剂材料。我们利用流化床式等离子体辅助原子层沉积的方法, 以脒基铜(Cu-amd)或六氟乙酰丙酮钯为前驱体, 氢等离子体为共反应物, 制备了 Cu/ γ -Al₂O₃、Pd/ γ -Al₂O₃ 和 Pd-Cu/ γ -Al₂O₃ 催化剂。利用 XRD、HR-TEM、XPS、BET、H₂-TPR 等测试方法对以上制备的催化剂进行分析表征, 结合 CO₂ 加氢性能评价, 研究催化剂的结构和催化效果之间的关系。研究表明, Pd-Cu/ γ -Al₂O₃ 催化剂二氧化碳加氢效果最好。在常压室温条件下, 空速为 7640 h⁻¹, 氢气和二氧化碳比例为 4:1, 电源功率为 24.6 W 时, 二氧化碳的转化率为 38%, 其中 CO、CH₄ 和 CH₃OH 的选择性分别为 80.5%、6.7% 和 12.8%。

关键词: 原子层沉积, 低温等离子体, 流化床, 二氧化碳加氢

参考文献:

- [1] X. Tian, D. Y. Wang, B. Ouyang, * Q. Chen, Z. W. Liu, * X. W. Wang, * “Plasma-assisted Fluidized-bed Atomic Layer Deposition of Pd-Cu Nanoparticles on porous Powder for CO₂ Hydrogenation”, *Plasma Sources Science and Technology*, 32(4), 045010 (2023)
- [2] D. Y. Wang, T. Zhou, S. X. Tang, D. Tian, H. B. Zhang, Q. Chen, Z. W. Liu, * “Fluidized-bed atomic layer deposition of Pd catalyst for low-temperature CO oxidation”, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 40, 062404 (2022)

Superlubricity of carbon based films

Bin Zhang^{a,b*}

^aState Key Laboratory of Solid Lubrication, R&D Center of Lubricating and Protecting Materials, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

^bCenter of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Now days, carbon based materials are extensive explored to reduce friction, which consumes most one third of energy that human used every day. Some of carbon things are more attractive because of their superlubricity properties. Since 1991, M. Hirano and K. Shinjo (Physical Review B, 41 (1990) 11837) proposed the concept of superlubricity (the friction coefficient in the order of 0.001), the contribution to

superlubricity has made great progress. In present work, hydrogen amorphous carbon film with about 25% hydrogen content were grown using PECVD method. We chose Au and MoS₂ coated GCr15 balls as couple pairs. The tribology test results show superlubricity behaviors that coefficient below 0.01, even low to 0.002. TEM results shown that flat or curvel graphene were formation in contact interface which might afford for superlubricity.

Biography

Bin Zhang has completed his PhD from Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences. He is the director assistant of R&D Center of Lubricating and Protecting Materials,. He has published more than 50 papers in reputed journals and has been won National Prize of China 2 time..

(Up to 100 words)

碱金属处理提升 CIGS 薄膜特性及其光伏器件性能的研究

刘玮*

南开大学电子信息与光学工程学院，薄膜光电子技术教育部工程研究中心，天津市光电子薄膜器件与技术重点实验室，天津 300350

*Email: wwl@nankai.edu.cn

摘要：近年来，以 Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) 多晶薄膜为吸收层的太阳能电池光伏技术取得了显著进步，其能量转换效率 (PCE) 已达 23% 以上。其中碱金属的引入对于提升 CIGS 太阳能电池效率起到了十分重要的作用。本文重点分析了轻重碱金属对吸收层薄膜材料特性及器件性能的影响，从碱金属掺杂方式及其对吸收层元素分布与异质结界面能带调控、以及选择性控制碱金属含量等方面进行了深度分析。结果表明：通过湿法化学可以有效控制 Mo 层结构，从而调节钠钙玻璃中 Na 与 K 在 CIGS 薄膜吸收层制备中的掺杂浓度；适量 CsF-PDT 不仅对薄膜表面电荷结构产生影响，并且会对吸收层内部缺陷钝化起到积极作用，同时器件结果测试显示 CsF-PDT 对于高 Ga 含量器件的性能提升作用更为显著；CsF-PDT 和 NaF-PDT 共处理则可以改善晶界处的传输与复合问题，优化低 Ga 含量器件各项性能参数。

关键词：铜铟镓硒，薄膜吸收层，太阳能电池，碱金属掺杂

参考文献：

- [1] M. Nakamura, K. Yamaguchi, Y. Kimoto, Y. Yasaki, T. Kato, H. Sugimoto, "Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ Thin-Film Solar Cell With Record Efficiency of 23.35%", *IEEE J Photovoltaics*. 9(6) (2019) 1863-1867.
- [2] O. Nwakanma, S. Velumani, A. Morales-Acevedo, "Review on the effects due to alkali metals on copper-indium-gallium-selenide solar cells", *Materials Today Energy* 20 (2021) 100617.

本工作感谢国家自然科学基金 (项目号: 61774089, 61974076); 国家重点研发计划 (项目号: 2018YFB1500200) 的支持。

类富勒烯碳薄膜制备及空间摩擦学性能研究

高凯雄* 张斌 张俊彦

中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家实验室, 甘肃兰州, 邮编 730000;

*Email: kxgao@licp.cas.cn

摘要: 空间运动部件润滑失效已经成为制约空间技术装备寿命和可靠性的瓶颈, 发展适用于空间环境的高可靠性、低摩擦、长寿命的润滑材料与技术, 对发展长寿命在轨飞行器具有十分重要的意义。本文采用等离子增强化学气相沉积系统制备了含氢类富勒烯碳膜, 研究了氢含量、真空度、真空原子氧对类富勒烯碳薄膜的作用机制及摩擦学性能影响: (1) 氢含量和真空度是影响类富勒烯碳薄膜真空摩擦学性能的主要因素; (2) 原子氧辐照前后, 类富勒烯碳薄膜厚度、氢含量几乎没有变化。但薄膜中奇元环比例降低, 薄膜中的 sp² 杂化碳变少, sp³ 杂化碳含量增多; (3) 经过原子氧暴露后, 薄膜中 C-O 键 (羟基) 降低, C=O 键 (羧基) 明显增加, 然而, 以氧化物形式存在的碳原子的总比例并没有因为原子氧暴露而明显增加 (从 11.3% 只增加到 13.0%); (4) 类富勒烯碳薄膜与二硫化钼薄膜配副在真空中表现出超低摩擦, 并将该体系应用在空间实际运动部件中。以上结果为碳基固体润滑薄膜空间应用提供理论和实验基础。

关键词: 类富勒烯, 二硫化钼, 真空原子氧, 摩擦

参考文献:

- [1] K. X. Gao, Y. F. Wang, B. Zhang*, J. Y. Zhang, * "Effect of vacuum atomic oxygen irradiation on the tribological properties of fullerene-like carbon and MoS₂ films", *Tribology International* 170, 107499 (2022).
- [2] K. X. Gao, Z. G. Lai, Q. Jia, B. Zhang, * X. L. Wei, J. Y. Zhang, * "Bilayer a-C:H/MoS₂ film to realize superlubricity in open atmosphere", *Diamond & Related Materials* 108, 107973 (2020).

跨环境低摩擦橡胶动密封新技术

强力*

中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 甘肃兰州, 邮编 730000

*Email: qiangli1413@licp.cas.cn

摘要: 丁腈橡胶 (NBR) 由于其良好的耐油性和较低的成本, 是目前油封及 O 型密封圈最常用橡胶密封材料之一, 广泛应用于汽车工业、航空航天、油田化工等领域。然而, 丁腈橡胶密封件在实际使用中极易磨损, 从而影响整个设备的安全性、可靠性和耐久性。因此, 改善其耐磨性对于提高其服役寿命具有极其重要的意义。通过在橡胶软表面构筑硬质碳薄膜, 突破了橡胶软表面硬质碳基薄膜低温快速沉积技术, 解决了橡胶软表面硬质碳薄膜高结合的技术难题, 攻克了薄膜弹性形变自适应及高承载防脆裂的技术难题, 实现了橡胶表面碳薄膜跨环境连续稳定的低摩擦特性。碳薄膜

改性橡胶密封实件经 4000 次磨合和 50 小时整机寿命试验以及可靠性验证，油端和气端 X 型密封圈磨损情况良好，伺服机构油气一致性较好，未发生渗漏现象，破解了航天飞行器关键密封件因磨损失效导致的泄压难题。

关键词：碳基薄膜，橡胶密封件，低摩擦技术，综合性能

分会口头报告

微纳功能薄膜原子层沉积 (ALD) 精准合成及性能研究

李建国 张王乐 秦利军 龚婷 惠龙飞 冯昊*

西安近代化学研究所, 陕西西安, 邮编 710065

*Email: fenghao98@hotmail.com

摘要: 原子层沉积 (ALD) 是一种先进的表面工程与纳米制造技术, 可在各种复杂结构表面实现原子级精度的可控薄膜生长。基于自主开发的系列化 ALD 设备产品 (图 1), 团队开展了包括光电器件表面功能层、光学器件 (棱镜、镜头等) 表面介质层、以及显示器件柔性封装层在内的众多微纳功能薄膜的 ALD 可控制备与性能研究^[1-2]。自主可控 ALD 设备的成功开发可有效降低 ALD 技术应用门槛, 有助于我国打破国外垄断, 自主建立 ALD 纳米加工制造技术体系, 为国产化高端微纳制造进行技术储备; 微纳功能薄膜的 ALD 可控制备与性能研究, 可极大推动各类光电器件的技术开发与产业化应用。



图 1 自主开发的系列化 ALD 设备产品

关键词: 原子层沉积 (ALD), 自主可控装备, 微纳功能薄膜, 光电器件

参考文献:

- [1] J. G. Li, Z. W. An, W. L. Zhang, L. F. Hui, H. Feng*. "Thermochromatic vanadium dioxide (VO_2) thin films synthesized by atomic layer deposition and post-treatments", Applied Surface Science, 529(2020)147108.
- [2] T. Gong, L. J. Qin, Y. Y. Hu, J. G. Li, W. L. Zhang, L. F. Hui, H. Feng*. "Growth characteristics and properties of RuAlO hybrid films fabricated by atomic layer deposition", Applied Surface Science, 608(2023)155200.

高 Z 材料基底上硅化镀膜行为研究

管艳红^{1*,2} 左桂忠¹ 孟献才^{1,3} 徐伟^{1,3} 胡建生¹

¹ 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽合肥, 邮编 230031

² 中国科学技术大学, 安徽合肥, 邮编 230026

³ 合肥综合性国家科学中心能源研究院 安徽合肥 邮编 230031

*Email: yanhong.guan@ipp.ac.cn

摘要: 在托卡马克聚变装置中, 缓解等离子体与壁相互作用、控制杂质粒子、降低燃料壁滞留和再循环等是实现长脉冲高参数等离子体放电的关键。在一些装置上使用的常规的壁处理方法包括烘烤, 放电清洗以及镀膜壁处理, 其中镀膜壁处理是获得低杂质及再循环运行的非常有效的手段^[1]。磁约束聚变装置中的第一壁材料需要长时间承受芯部等离子体的强热流和强粒子流的轰击, 目前广泛研究的第一壁金属材料主要包括钨、钨和铍, 该研究聚焦高 Z 材料基底上硅化镀膜壁处理特性研究。

EAST 装置在直流辉光放电 (GD) 和离子回旋辅助放电 (ICRF) 期间充入特定比例的氟化硅烷 (SiD₄), 利用放电将 SiD₄ 电离后, 通过第一壁、限制器及偏滤器的阴极鞘层加速, 沉积在第一壁表面上, 进而成膜, 实现硅化镀膜壁处理。本研究主要利用 EAST 成熟的 MAPES 样品实验系统, 进行了多种样品(W、TZM)在不同放电条件(GD、ICRF)下的硅化镀膜壁处理实验。研究表明: 样品基底温度对硅膜的沉积影响明显, 160°C 的样品相对于 66°C 的样品其表面的硅膜更加紧致均匀, 66°C 下的硅膜出现了明显的起皱裂纹等缺陷, 说明烘烤对以低能键结合的杂质以及有机杂质有较好的去除效果, 能够提高成膜质量; ICRF 放电功率越高, 膜层中硅含量越高, 40 kW 的 ICRF 镀膜中形成的膜层相对于 20 kW 中形成的膜层中硅含量高了 25%, 说明功率越高清洗效果越强, 表面杂质被清除, 膜层中硅含量越高; 相同基底温度下对比 ICRF 和 GD 硅化镀膜, GD 硅化镀膜效果更好, 膜层厚度提高了 2 倍, 由于 GD 工作时间连续, 有助于膜层厚度均匀; 不同高 Z 基底材料上, 硅化镀膜沉积特性相似^[2]。通过以上实验的研究, 为 EAST 未来开展长脉冲高参数等离子体放电前的第一壁壁处理提供了有力的数据支持及实验积累。

关键词: 杂质, 再循环, 硅化镀膜, 壁处理, EAST

参考文献:

- [1] ZUO G, HU J, ZHEN S, et al. Comparison of various wall conditionings on the reduction of H content and particle recycling in EAST [J]. Plasma Physics Controlled Fusion, 2011, 54(1): 015014.
- [2] Guan Y, Zuo G, Meng X, et al. Investigation of the silicon coated film characteristics on tungsten surface in EAST fusion device[J]. Nuclear Materials and Energy, 2023: 101368.

高功率脉冲磁控溅射技术低温制备 Ti_3AlC_2 MAX 相涂层

李忠昌^{1,2} 周广学¹ 袁江淮¹ 柯培玲^{1,2} 王振玉^{1*} 汪爱英^{1,2*}

¹中国科学院宁波材料技术与工程研究所海洋新材料与应用技术重点实验室, 浙江宁波, 邮编 315201;

²中国科学院大学材料与广电研究中心, 北京, 邮编 100049

*Email: aywang@nimte.ac.cn

摘要: MAX 相是一类三元纳米层状碳化物或氮化物, 兼具金属和陶瓷的抗氧化、耐腐蚀、抗辐照、良好的导电和导热等优异性能。尤其是, Al 基 MAX 相中高活度 Al 能够在表面形成致密的保护性 Al_2O_3 层、填充微裂纹等缺陷, 以实现强耐蚀和缺陷自愈。并且, TiAl 基 MAX 相的热膨胀系数与 Al_2O_3 最为接近, 作为防护涂层在航空航天、涉海装备等领域应用前景广阔。但是, MAX 相长 c 轴的复杂结构, 以及传统 PVD 技术 (磁控溅射、电弧离子镀) 对沉积原子的动力学限制, 特别是 Ti_3AlC_2 , 高纯相涂层的制备温度往往 ≥ 800 °C, 极大地限制了其在温度敏感基底上的应用。高功率磁控溅射 (HiPIMS) 是近年来发展的一种新型 PVD 技术, 具有低占空比高离化的特点, 可提高溅射粒子的密度和能量, 有利于实现涂层的有序低温高致密沉积。本文通过 HiPIMS 技术在 Ti-6Al-4V 基底沉积了 Ti-Al-C 涂层, 在 700 °C 下退火后成功转变为了高纯致密的 Ti_3AlC_2 MAX 相。研究表明, 与传统磁控溅射所沉积的涂层呈非晶结构不同, 由于 HiPIMS 高等离子体密度和能量, 促进了沉积粒子在基体表面的扩散和迁移, 沉积态涂层为结晶 $TiAl_x$ 化合物, 这对后续热处理中涂层原子扩散和固相反应十分有利。进一步的原位 XRD 表明, Ti_3AlC_2 最早在 450 °C 开始结晶, 且并未有中间相的产生, 这也是迄今为止达到的最低合成温度。此外, 相较于传统磁控溅射技术, 高功率脉冲磁控溅射所制备的 MAX 相涂层具有更致密、更光滑的结构形貌。本研究为低温可控制备 Ti_3AlC_2 MAX 相涂层提供了一种可行的预结晶的反应途径, 可广泛应用于其他各种 MAX 相材料中。

关键词: HiPIMS, MAX 相, Ti_3AlC_2 涂层, 低温制备

参考文献:

- [1] R. Bandorf, V. Sittinger, G. Bräuer, High power impulse magnetron sputtering-HiPIMS, *Comprehensive Materials Processing* 4.3(2014):75-99.
- [2] M. Ougier, A. Michau, F. Schuster, H. Maskrot, M.L. Schlegel, Effects of HiPIMS discharges and annealing on Cr-Al-C thin films, *Surface and Coatings Technology* 399 (2020) 126141.

电子束设备蒸镀铝膜工艺的研究

付学成, 瞿敏妮, 权雪玲, 乌李瑛, 王英*

(上海交通大学先进电子材料与器件平台)

摘要: 利用电子束蒸镀设备制备高质量铝膜是薄膜工艺的一个难题。主要原因在于铝几乎和所

有的金属以及碳元素形成合金，从而降低铝膜的纯度。在实际的工艺中，通常将铝料直接放进水冷坩埚，用大功率的电子枪将铝料熔化，实现铝膜沉积。但这种方法制备的铝膜会因腔体内温度的升高释放出吸附的水分子而被氧化，电阻率偏高，且含有水冷坩埚的金属元素。我们提出一种采用三氧化二铝坩埚作为蒸镀铝膜的衬锅，通过三次添加物料预熔，再蒸镀铝膜的方法，所制备的铝膜纯度可以达到 99.99%、电阻率比水冷坩埚制备的铝膜低 50%。

关键词：电子束蒸发；铝膜；水冷坩埚；三氧化二铝坩埚

Study on aluminum film evaporation using electron beam equipment

Fu Xuecheng, Qu Minni, Quan Xueling, Wu Liying, Wang Ying✉

(Advanced Electronics Materials and Devices, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Using electron beam evaporation equipment to evaporate high-quality aluminum film is a difficult problem in the film process. The main reason is that aluminum forms alloy with almost all metals and carbon elements, thus reducing the purity of aluminum film. In the actual process, the aluminum material is often directly put into the water-cooled crucible and melted with a high-power electron gun to deposit aluminum film. However, the aluminum film prepared by this method will be oxidized due to the release of adsorbed water molecules due to the rise of temperature in the cavity, with high resistivity and metal elements of water-cooled crucible. We proposed a method of using a Al_2O_3 crucible as the lining pot and adding materials by pre melting three times for aluminum film evaporation. The purity of the prepared aluminum film could reach 99.99%, and the resistivity was 50% lower than that of aluminum film prepared by water-cooled crucible.

Key words: Electron beam evaporation; Aluminum film; Water-cooled crucible; Alumina crucible

氮基硬质涂层强韧化和变形机制研究

周晟昊，汪爱英

摘要：氮基硬质涂层具有极高的硬度、优异的热稳定性和抗氧化性，是切削刀具和多数航空航天运动部件的首选耐磨延寿表面防护材料。但其高本质脆性使其容易发生突然剥落或崩裂，是限制涂层零部件服役寿命和可靠性的一大痛点，提高硬质涂层韧性和抗裂纹能力、实现硬度-韧性平衡是该领域的一项长期主题。针对此问题，作者从涂层生长结构-内应力关系，以及成分设计两方面出发开展了系统研究。首先通过对涂层生长结构特征以及变形微结构演化过程的精细表征，分析了涂层沉积过程压应力的形成原理，并揭示了内应力与生长结构的关联，及其对涂层变形开裂行为的影响

机制。然后,根据成分设计原理,通过高价电子密度 Mo 元素的固溶,实现对 TiN 涂层的强韧化,并且阐明了由于 Mo 的固溶,涂层的变形从剪切主导脆性机制向剪切+位错共同主导机制的转变。相关结果深化了纳米晶硬质涂层结构-性能关系的理解,为陶瓷基材料的强韧化设计提供重要参考。

基于离子能量和离子通量调控的类金刚石超硬薄膜生长机理研究

王明磊¹ 林国强^{1*}

¹ 大连理工大学三束材料改性教育部重点实验室, 辽宁大连, 邮编 116024

*Email: wmlgq18@163.com

摘要: 通过采用 Langmuir 等离子体诊断技术对电弧放电中碳等离子体进行诊断,获得了等离子体密度 n_e 、电子温度 T_e 以及等离子体鞘层厚度 d_s 等参数,以期在离子能量和离子通量的两个维度出发,补充和完善超硬类金刚石薄膜生长机理。当离子平均自由程 λ_i 远远大于鞘层 d_s 时,可近似地认为该鞘层为无碰撞鞘层,即鞘层内不发生任何碰撞。通过拉曼光谱仪、X 射线光电子能谱仪和纳米压痕仪,对类金刚石薄膜结构和力学性能进行了系统研究。研究结果表明:随着离子能量增加,类金刚石薄膜 sp^3 键含量和硬度呈现先增加后减小的变化规律,离子能量在 50~300 eV 的范围内,薄膜结构为四面体非晶碳 (ta-C);随着离子通量(等离子体密度)的增加,类金刚石薄膜 sp^3 键含量和硬度呈现减小的变化规律,当离子通量控制在 $3.58 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 以下时,薄膜易形成 ta-C 结构;基于离子能量和离子通量调控得到的 ta-C 薄膜硬度值高达 65 GPa。因此,类金刚石超硬薄膜是由离子能量和离子通量共同决定的。

这一结果对沉积和制备类金刚石超硬薄膜及其应用具有一定得参考价值和指导意义。

关键词: Langmuir 等离子体诊断, 无碰撞鞘层, 离子能量, 离子通量, 类金刚石超硬薄膜, 生长机理

类金刚石碳涂层与 WC 基硬质合金复配的磨蚀行为研究

张应鹏^{1,2}, 王群³, 陈仁德¹, 郭鹏^{1*}, 柯培玲^{1,2}, 汪爱英^{1,2*}

中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201

中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049

湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082

摘要: WC 基硬质合金由于具有优异的机械性能和耐磨性,已被广泛用于油气开采、化学冶金

和海洋工程等领域。然而，由于耐腐蚀性不足，WC 基硬质合金在海洋环境中面临着摩擦和腐蚀的交互损伤，导致其使用寿命大大降低。本文采用线性离子源和直流磁控溅射技术，分别在 WC 基硬质合金表面沉积了氢化和无氢 DLC，研究了两种涂层在人工海水中的磨蚀行为。结果表明，在低接触应力下 (<721 MPa)，氢化 DLC 的腐蚀电流密度为 5.04×10^{-8} A/cm²，比无氢 DLC 低约一个数量级。而且，氢化 DLC 的磨蚀体积损失仅为无氢 DLC 的 76%，表现出更出色的抗磨蚀性能。然而，在高接触应力下 (908 MPa)，氢化 DLC 易发生灾难性分层，而无氢 DLC 则以逐层剪切的形式失效，表现出更长的服役寿命。此外，为解决氢化 DLC 与硬质合金的界面弱化问题，我们在含氢碳膜中引入了微量梯度钨。结果表明，在人工海水中滑动 2100m 后，含梯度钨的氢化 DLC 涂层依然处于服役寿命之内，摩擦系数稳定在 ~ 0.07 。本研究可为涉海环境中 WC 基硬质合金上 DLC 涂层的设计提供重要参考。

关键词：氢化/无氢 DLC；梯度钨；WC 基硬质合金；磨蚀；失效机制

Cr-Al-C 涂层的原位相变行为及其导电耐蚀性能的研究

马冠水 王振玉 汪爱英*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室，浙江 宁波，邮编 315201

*Email: aywang@nimte.ac.cn

摘要：金属双极板作为质子交换膜燃料电池 (PEMFCs) 的核心构件，直接决定电池的制造成本和性能，然而在燃料电池高温及酸性工作环境下，金属双极板表面易氧化，这使其电导率和耐蚀特性急剧下降。我们采用电弧/溅射沉积相结合的方法，在金属极板不锈钢基体上制备了 Cr-Al-C 涂层，通过原位 TEM 研究了 Cr-Al-C 涂层的相变行为，结合退火技术分别得到了不同晶化程度和不同择优取向的 Cr₂AlC MAX 相涂层，并研究了其在 PEMFC 工作环境下的导电与耐蚀性能。研究表明，所有的 Cr₂AlC 涂层均能显著改善不锈钢 316L 的性能，其界面接触电阻最低值为 $3.16 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ，最低腐蚀电流密度为 $2 \times 10^{-2} \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。模拟计算表明优异的导电性能归因于 Cr₂AlC MAX 相在费米能级处有较高的电子态密度；良好的耐腐蚀性能是由于在极化测试后，涂层表面形成了钝化膜，钝化膜的形成对基体起到保护作用，从而提高了耐蚀性能。相关结果不仅有助于设计和发展新型导电耐蚀一体的 MAX 相涂层材料新体系，也将为发展高性能 PEMFCs 双极板材料提供重要支撑。

关键词：质子交换膜燃料电池，金属双极板，原位 TEM，MAX 相，导电耐蚀

双源蒸发制备锌镁合金镀层

于瀚洲, 沈杰

复旦大学材料科学系

21210300087@m.fudan.edu.cn

关键词: 真空热蒸发; 锌镁合金; 耐腐蚀性能

钢铁防腐蚀是钢铁工业中的一个重要研究领域, 在钢铁表面形成保护成是钢铁防腐蚀的一种重要手段。作为一种新型合金镀层, 锌镁合金镀层因为其防腐蚀能力出色、易镀、对环境危害小而受到人们的重视。通过真空热蒸镀的方法得到的镀层易控制, 具有优良的附着力、可加工性和耐腐蚀性能是一种很有竞争力和发展前途的制备工艺。

在工业生产中对钢板表面真空蒸镀锌镁合金涂层的过程中, 在室温下蒸镀再经高温退火合金化的工序耗时长, 明显降低了生产效率。本文研究了适当升高真空热蒸镀时的基板温度, 在钢板表面双源蒸镀锌层和镁层, 镀层能够更好地与基板结合并合金化, 在蒸镀结束后取消原有的退火, 并对样品的耐腐蚀性能进行检测。同时研究了调整不同锌镁层结构及锌镁配比对镀层的形貌、结构及耐腐蚀性能造成的影响, 主要结果如下:

(1) 升高基板温度至某一特定温度 T_s 的条件下, 依次在基板表面蒸镀锌层和镁层, 并在蒸镀结束后不进行退火步骤, 得到的样品中的合金相与在较低温度下蒸镀后退火得到的样品的合金相比较为简单, 二者的耐腐蚀性能接近, 并都相较纯锌镀层的耐腐蚀性能有了显著的提升, 验证了这一工艺的可行性。在控制锌镁质量总和一定的条件下, 调整锌镁配比, 研究锌镁配比对其耐腐蚀性能的影响。研究发现在一定范围内, 随着镁含量的增加, 镀层的耐腐蚀性能提高, 合金相成分无明显变化。

(2) 升高基板温度至 T_s 的条件下, 依次在基板表面蒸镀锌层、镁层和锌层, 并在蒸镀结束后不进行退火步骤, 在锌镁质量总和一定的条件下调节锌镁配比, 研究其对于镀层的形貌、结构和耐腐蚀性能的影响。研究发现得到的样品中合金相成分与经过退火得到的样品相同, 样品表面更为致密, 且随着锌镁合金中镁含量的提升, 样品的耐腐蚀性能呈现先提升后降低的现象, 在镁含量为 20% 时取得最佳耐腐蚀性能。

反常置换反应制备稳定的室温范德华磁性薄膜

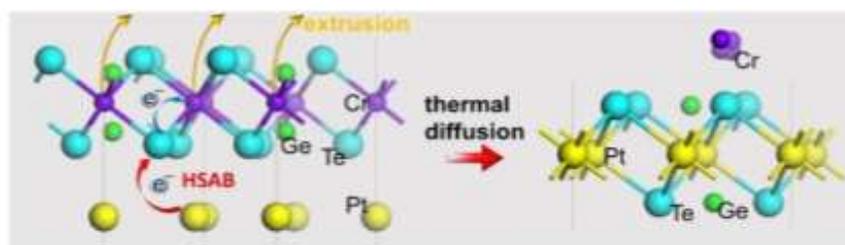
朱文轩¹ 宋成^{1*} 王乾¹ 潘峰^{1*}

¹清华大学材料学院先进材料国家重点实验室, 北京, 邮编 100084;

*Email: songcheng@mail.tsinghua.edu.cn; panf@mail.tsinghua.edu.cn

摘要: 二维范德华磁性材料具有优越的界面性能以及丰富的能带相关的物理特性, 在拓扑磁电学、低功率自旋电子学、量子计算、光通信等诸多领域都有重要的应用潜力, 已逐渐成为研究热点^[1,2]。但是, 其层状结构也为二维范德华磁性薄膜带来了两大问题: 较差的空气稳定性、远低于室温

的居里温度。这大大增加了其研究和应用难度。本工作中针对这一重要问题，设计了由软硬酸碱理论主导的置换反应，制备了具有室温铁磁性与高空气稳定性的范德华薄膜 $\text{PtTe}_2\text{Ge}_{1/3}$ 。本工作基于软硬酸碱理论分析了由第三族过渡金属与硫族元素组成的传统范德华磁性材料空气稳定性差的原因，从 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 范德华薄片出发，通过热扩散反应使 Pt 置换 Cr，得到 $\text{PtTe}_2\text{Ge}_{1/3}$ 范德华薄膜。结果表明前驱体 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 中的 Ge 原子在反应产物 PtTe_2 中形成均匀的嵌入，诱导了 PtTe_2 中居里温度达到室温的长程有序的铁磁性。相匹配的软酸元素 Pt 与软碱元素 Te 保证了范德华薄膜在空气中具有较高的稳定性。



关键词： 软硬酸碱理论，范德华磁性薄膜，室温铁磁性，空气稳定性

参考文献：

- [1] C. Gong & X. Zhang*, "Two-dimensional magnetic crystals and emergent heterostructure devices", *Science* 363, eaav4450 (2019).
- [2] B. Huang*, M. A. McGuire, A. F. May, D. Xiao, P. Jarillo-Herrero, and X. Xu*, Emergent Phenomena and Proximity Effects in Two-Dimensional Magnets and Heterostructures, *Nat. Mater.* 19, 1276 (2020).

交错磁体 RuO_2 薄膜的制备与电磁输运测试

白桦¹ 潘峰¹ 宋成^{1*}

¹清华大学材料学院，北京，邮编 100084；

*Email: songcheng@mail.tsinghua.edu.cn

摘要： 自旋流和自旋力矩是自旋电子学器件的基础，反铁磁具有强自旋轨道耦合和磁有序的特点，是实现高效可控电荷-自旋转化的重要媒介^[1]。近年来，一类新型自旋劈裂反铁磁由于其兼具反铁磁净磁矩为零、高本征频率和铁磁自旋能带劈裂的优势，得到了研究者的广泛关注。这里我们研究典型自旋劈裂反铁磁 RuO_2 中的电荷-自旋转化过程。首先，我们利用磁控溅射技术在单晶衬底上外延生长了高质量的 RuO_2 薄膜，X 射线衍射和透射电子显微镜表明 RuO_2 薄膜具有好的结晶性。其次，我们利用自旋力矩-铁磁共振技术探究 RuO_2 中的自旋流产生行为，实验结果表明存在平行于奈尔矢量方向的自旋极化流，随之产生的自旋劈裂力矩诱导了垂直磁化的零磁场翻转^[2]。此外，我们利用自旋塞贝克效应观察到了非常规的自旋流-电荷流的转化过程，其规律性符合交错磁自旋劈裂效应^[3]。基于该非常规的转化，我们构造了振幅可调的自旋太赫兹源^[4]。我们的研究不仅对于增进了对自旋劈裂反铁磁基础特性的认知，还为多功能的自旋电子学器件拓展了新思路。

关键词: 磁控溅射, 反铁磁薄膜, 自旋电子学, 太赫兹辐射

参考文献:

- [1] H. Bai, Y. C. Zhang, L. Han, Y. J. Zhou, F. Pan, C. Song, *Applied Physics Reviews*, 9(4): 041316(2022).
- [2] H. Bai, L. Han, X. Y. Feng, Y. J. Zhou, R. X. Su, Q. Wang, L. Y. Liao, W. X. Zhu, X. Z. Chen, F. Pan, X. L. Fan, C. Song, *Physical Review Letters*, 128(19): 197202(2022).
- [3] H. Bai, Y. C. Zhang, Y. J. Zhou, P. Chen, C. H. Wan, L. Han, W. X. Zhu, S. X. Liang, Y. C. Su, X. F. Han, F. Pan, C. Song, *Physical Review Letters*, 130(21): 216701(2023).
- [4] Yu Liu, Hua Bai, Yuna Song, Zhihao Ji, Shitao Lou, Zongzhi Zhang, Cheng Song, Qingyuan Jin, *Advanced Optical Materials*, 2300177 (2023).

面向光电子器件应用的真空气相钙钛矿薄膜制备

谢伟广^{1*} 林东旭¹ 詹镇业¹ 刘彭义¹

¹暨南大学理工学院物理学系, 广东广州, 邮编 510632;

*Email: wxie@email.jnu.edu.cn

摘要: 钙钛矿薄膜的真空气相沉积是一种绿色、大面积制备工艺, 但是目前气相法制备的薄膜质量仍然有待提高, 是制约其在光电子器件领域应用的一个瓶颈。本报告首先介绍近五年钙钛矿真空气相制备的研究进展。然后介绍本团队在钙钛矿薄膜的真空气相成膜机理、缺陷钝化、结构调控及应用的工作。包括①从分子给电子基团的调控出发, 介绍三维到二维钙钛矿薄膜的制备方法以及薄膜结构缺陷钝化。②介绍通过气相分子交换制备 2D/3D 异质结的方法。③介绍纯 FAPbI₃ 薄膜中高湿度后处理中的相变机理以及处理对薄膜结晶优化的作用。④在光伏应用方面, 制备了效率>20%的气相钙钛矿薄膜光伏器件; ⑤在光电传感方面, 制备了基于 PIN 结构的光电探测器, 器件响应速度 60 ns。通过像素级阻挡二极管的集成抑制了正向光电流, 将 4×4 和 8×8 的阵列像素串扰从 50%降低到 8%, 实现了动态线性范围 112dB 的成像。

关键词: 真空气相沉积, 钙钛矿薄膜, 光伏电池, 光电成像

参考文献:

- [1] D. X. Lin, Y. J. Gao, T. K. Zhang, Z. Y. Zhan, N. N. Pang, Z. W. Wu, K. Chen, T. T. Shi, Z. Q. Pan, P. Y. Liu, W. G. Xie, "Vapor Deposited Pure α -FAPbI₃ Perovskite Solar Cell via Moisture-Induced Phase Transition Strategy" *Advanced Functional Materials*, 32, 2208392(2022)
- [2] D. X. Lin, Z. Y. Zhan, X. L. Huang, P. Y. Liu, W. G. Xie, "Advances in components engineering in vapor deposited perovskite thin film for photovoltaic application", *Materials Today Advances* 16, 100277(2022)
- [3] Z. Z. Zhan, D. X. Lin, J. T. Cai, Y. H. Lu, A. D. Chen, T. K. Zhang, K. Chen, P. Y. Liu, X. M. Wang, W. G. Xie, "A Perovskite Photodetector Crossbar Array by Vapor Deposition for Dynamic Imaging", *Advanced Materials* 22, 2207106(2022).

Mo/N 共掺 TiO₂ 纳米管阵列的制备及其光电性能

丁尧昕, 薛丹妮, 沈杰*

复旦大学材料科学系, 上海, 200433

*Email: shenjie@fudan.edu.cn

摘要: TiO₂ 是一种应用广泛的光电材料, 然而较宽的带隙 (锐钛矿 $E_g=3.2\text{ eV}$) 将其光响应范围限制在了紫外光区域, 可见光下光吸收效率较低。通过构筑纳米结构, 进行元素掺杂等方法可以对 TiO₂ 进行改性, 其中具有 4d 和 5d 轨道的阳离子能够保证光生电子的高迁移率, 而具有 2p 或 3p 轨道的阴离子起到使 TiO₂ 价带顶部上移的作用^[1]。因此, 将 Mo/N 共同掺入 TiO₂ 晶格, 能够利用协同效应降低禁带宽度, 提高光生载流子的传输效率, 从而改善 TiO₂ 纳米管阵列的光电性能。

本文提出了一种 Mo/N 共掺 TiO₂ 纳米管阵列的制备方法。在 Ti 靶上放置一定数量的 Mo 块, 与 TiN 靶共同溅射, 再经由阳极氧化获得 Mo/N 共掺 TiO₂ 纳米管阵列, Mo 和 N 的掺杂含量分别通过 Ti 靶上 Mo 块数量和 TiN 靶的溅射功率进行调控。当 TiN 靶功率为 35 W, Ti 靶上放置两个 Mo 块且功率为 150 W 时, TiO₂ 纳米管阵列的带隙降低至 2.93 eV, 在可见光下的光电流达到 0.50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 是 Mo 单掺 TiO₂ 纳米管阵列的 5.5 倍。

关键词: TiO₂, 纳米管阵列, 磁控溅射, Mo/N 共掺, 光电流

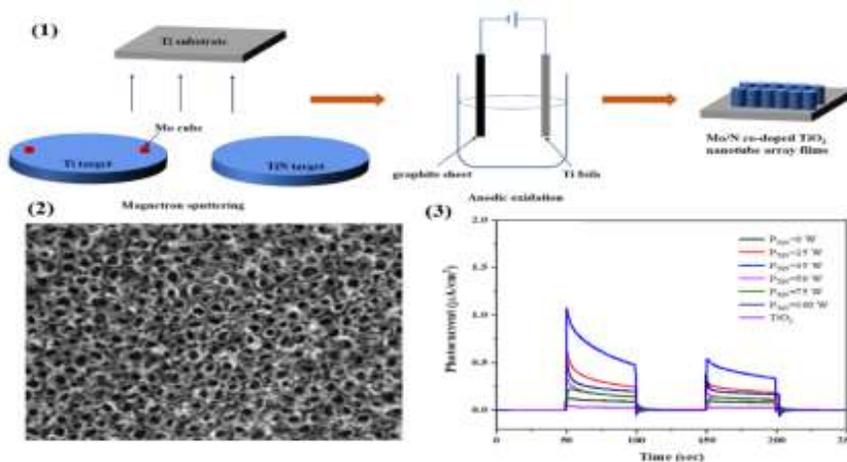


图 1. Mo/N 共掺 TiO₂ 纳米管阵列的制备过程

图 2. Mo/N 共掺 TiO₂ 纳米管阵列 SEM 图像

图 3. Mo/N 共掺 TiO₂ 纳米管阵列可见光下光电流

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61671155) 资助

参考文献:

[1] Yin W J, Tang H, Wei S H, et al. "Band structure engineering of semiconductors for enhanced photoelectrochemical water splitting: The case of TiO₂". *Physical Review B Condensed Matter* 82, 175-227, (2010).

基于瑞利波驱动增强的新型适配体声表器件

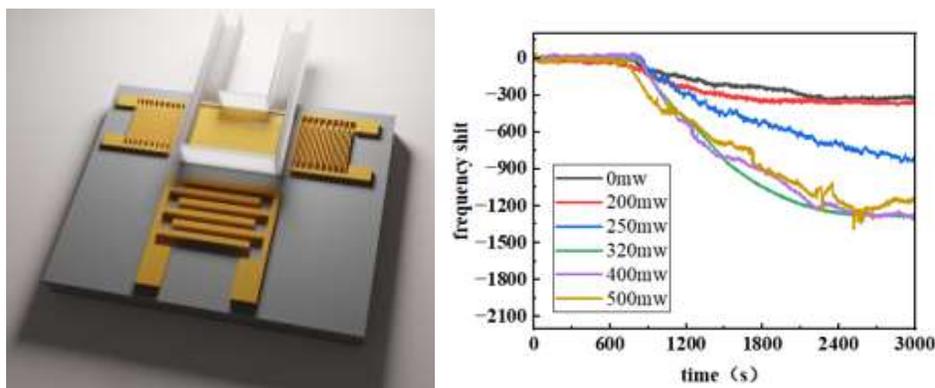
张健磊¹ 陶然^{1*} 廖嘉辉¹ 付琛¹ 罗景庭^{1*}

¹深圳大学 物理与光电工程学院, 广东 深圳, 518060;

*Email: luojt@szu.edu.cn、 ran.tao@szu.edu.cn;

摘要: 近些年来, 基于适配体的传感器技术作为一种新型传感方式不断发展。适配体检测具有高特异性、低成本、易处理等优点, 在生物检测领域被视为抗体检测的替代品。为了提升适配体检测的响应强度, 我们设计了一种新型的声表器件。该器件工作时, 产生水平剪切波穿过适配体捕获区域, 同时额外产生瑞利波驱动该区域的目标液体以促进探针适配体与目标适配体结合。实时检测水平剪切波的频率漂移情况, 结果表面瑞利波驱动可以显著提升适配体的结合响应。此外, 我们还将这种传感方案用于检测了肿瘤标记物 AFP, 结果表明这种新型的方案有良好的应用价值和前景。

关键词: 瑞利波驱动, 水平剪切波, 生物传感器, 效果增强, 纳米材料



器件原理图以及相关测试图

参考文献:

- [1] PAWSEY S, YACH K, HALLA et al. "Chapter 14 - Control, design, and understanding of molecular self-assembly", *Fabrication and Self-Assembly of Nano biomaterials 1*,430-458(2016)
- [2] L. Dong, Q. Tan, W. Ye, D. Liu, et al. Screening and identifying a novel ssDNA aptamer against Alpha-fetoprotein using CE-SELEX. *Sci. Rep* 5,15552-15561 (2015)

基于 LiNbO₃/SiC 压电异质结构的高性能漏纵波声学射频器件

刘培森¹ 傅肃磊¹ 苏荣宣¹ 徐惠平¹ 肖博远¹ 宋成¹ 曾飞¹ 潘峰^{1*}

¹清华大学材料学院, 北京, 邮编 100084

*Email: panf@mail.tsinghua.edu.cn

摘要: 5G 移动通讯技术的快速发展和广泛普及对声表面波滤波器性能提出更加苛刻的要求, 传统器件的使用频率和带宽已无法满足射频前端高通量和集成化的发展趋势, 因此为进一步拓展声表面波技术在移动通讯领域中的应用潜能, 亟需开发制备高频率, 大带宽, 低损耗的射频滤波器件。本文报道了一种基于 LiNbO₃/SiC 双层结构的新型压电异质衬底, 并通过有限元模拟进行材料结构设计, 系统地研究了支撑衬底、传播角和 LiNbO₃ 压电薄膜厚度等因素对激发高速漏纵波的影响规律。仿真结果表明, 在 LiNbO₃/SiC 压电异质结构中, 漏纵波的面内传播角为 35° 和 125° 时, 谐振器件表现出较大的机电耦合系数, 且主模频谱响应较为干净。基于仿真结果制备了声学单端谐振器, 测试结果表明谐振器工作频率最高为 6.8 GHz, 机电耦合系数最高为 22.7%, 并且漏纵波主模附近没有杂散模态的干扰, 实验与理论模拟结果相吻合。本文从衬底材料和器件结构设计角度出发, 在 LiNbO₃/SiC 新型压电异质衬底上激发出高声速大机电耦合系数的漏纵波, 并成功制备相应的射频声学器件, 为 5G 乃至 6G 时代高频宽带谱的滤波技术方案提供了一种新的思路。

关键词: 5G 通讯, 铌酸锂薄膜, 压电异质结构, 漏纵波, 声学器件

参考文献:

- [1] T. Kimura, * Y. Kishimoto, M. Omura, K. Hashimoto, * "3.5 GHz longitudinal leaky surface acoustic wave resonator using a multilayered waveguide structure for high acoustic energy confinement", *Japanese Journal of Applied Physics* 57, 07LD15 (2018).
- [2] H. Y. Zhou, S. B. Zhan, * P. C. Zheng, L. P. Zhang, J. B. Wu, H. L. Yao, T. G. You, and X. Ou, * " A 6.1 GHz wideband solidly-mounted acoustic filter on heterogeneous substrate for 5G front-ends", in *Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference*, pp. 1006–1009.
- [3] P. S. Liu, S. L. Fu, * R. X. Su, H. P. Xu, B. Y. Xiao, C. Song, F. Zeng, F. Pan, * "A near spurious-free 6 GHz LLSAW resonator with large electromechanical coupling on X-cut LiNbO₃/SiC bilayer substrate", *Applied Physics Letters*, 122, 103502 (2023).

基于 LNOI 的瑞利消除窗口调制及无杂散大带宽滤波器研究

徐惠平¹ 傅肃磊¹ 潘峰^{1*}

¹清华大学先进材料教育部重点实验室, 北京, 邮编 100084;

*Email: panf@mail.tsinghua.edu.cn

摘要: 随着全球迎来 5G 时代, 人们与智能手机的联结越发紧密, 为了满足高质量通讯的需求,

“低插损,大带宽”成为声表面波(SAW)滤波器的发展趋势之一。近年来,绝缘体上铌酸锂(LNOI)体系引起广泛关注,“旋转 Y 切铌酸锂(LN)薄膜+高声速衬底”的组合提供了高 Q 值,高机电耦合的水平剪切波,成功制备了低损耗大带宽的高性能 SAW 滤波器。然而,在该体系中还存在一种杂散瑞利波模式,这一杂散模式将导致滤波器的通带内和带边产生寄生响应,插入损耗增大,只有合适的电极厚度能够抑制该模式。因此,通过调制 LNOI 的衬底类型和 LN 切角等条件,系统研究瑞利波的抑制规律,搜寻一个大的瑞利波消除的电极相对膜厚范围,即瑞利消除窗口(REW),可以提高目标大带宽滤波器制备的工艺容差,从材料角度为滤波器设计提供优化参数。本文采用有限元法研究了旋转 Y 切 LN/SiO₂/衬底结构中的 REW,其中衬底包括:金刚石、碳化硅、蓝宝石、硅和石英,铌酸锂切角范围为 0 到 40 度。模拟结果表明 LN/SiO₂/SiC 体系具有最大的 REW。进一步在 15°、20° 和 25° YX-LN/SiO₂/SiC 上制备了不同相对电极膜厚的谐振器和滤波器。谐振器的实际测试结果与模拟结果对应较好,证实了模拟结果和加工过程的可靠性。在 20° 和 25° YX-LN/SiO₂/SiC 上制备的滤波器无寄生模式,具有约为 20%的相对带宽和 1.2dB 的插入损耗。该工作有望为制备无杂散大带宽滤波器提供指导,促进 5G 射频前端的发展。

关键词: 声表面波滤波器,杂散模式抑制,绝缘材料上铌酸锂(LNOI),瑞利消除窗口(REW),碳化硅

参考文献:

- [1] H. P. Xu, S. L. Fu,* J. Y. Shen, Z. T. Lu, R. Wang, C. Song, F. Zeng, W. B. Wang, and F. Pan,* “Large-Range Spurious Mode Elimination for Wideband SAW Filters on LiNbO₃/SiO₂/Si Platform by LiNbO₃ Cut Angle Modulation,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control Early Access*, 1–1(2022).
- [2] N. Naumenko and B. Abbott, “Optimal cut of lithium niobate with suppressed rayleigh-type for application in resonator SAW filters,” in *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, Beijing, China, 1013–1017(2008).

PbS 量子点复合 MXene 红外光电性能研究

李冲¹陶然^{1*}张宝晖¹付琛¹罗景庭^{1*}

(¹深圳大学 物理与光电工程学院, 广东 深圳, 518060)

摘要: PbS 胶体量子点尺寸调谐灵活、光学性能优异,然而,量子点薄膜由于晶界复杂,载流子传输效率低,使其光电性能受到限制。Ti₃C₂T_x MXene 是一种新型的二维材料,具有高导电性、良好的光学性能以及与水和有机溶剂的良好相容性等优点。本文通过量子点一步液相配体置换的同时加入 MXene 构筑纳米复合材料,使量子点更加分散和稳定,且异质结的形成能够有效抽取载流子,抑制光生电荷的复合,从而可以提高光电器件的响应度和稳定性。该光电探测器在波长为 980nm 红外光 19.745 μW/cm² 的光照下,开关比达到 2.61。PbS 量子点复合 MXene 红外光电探测器具有优异的开关比和稳定性,并且制作方法简单有望应用于高性能的红外光电器件。

关键词: PbS 量子点; MXene; 光电探测; 异质结

高界面自旋通透性的自旋同质结实现高效自旋-电荷转化

韩磊¹ 王钰言² 朱文轩 宋成^{1*} 潘峰^{1*}

¹清华大学材料学院先进材料重点实验室, 北京, 邮编 100084;

²清华大学北京信息科学与技术国家研究中心, 北京, 邮编 100084

*Email: songcheng@mail.tsinghua.edu.cn;panf@mail.tsinghua.edu.cn

摘要: 高界面自旋通透性对于实现高效自旋电荷-转化, 从而构筑理想的低功耗自旋电子学器件是至关重要的。然而, 在传统的铁磁/非磁异质结中, 界面自旋轨道耦合会导致自旋记忆损失和双磁振子散射, 从而淬灭穿过异质界面的自旋流。为了解决异质界面的内在缺陷, 我们设计了一种铁磁 FeRh/反铁磁 FeRh 自旋同质结, 用于高效的自旋-电荷转换。自旋泵浦实验发现, 自旋同质结具有 0.75 的高界面自旋通透性和 0.34 的高自旋力矩效率。第一性原理计算表明, 同质结的界面电场比传统的异质结小两个数量级, 其产生的界面自旋轨道耦合可忽略不计, 从而大大降低了自旋记忆损失和双磁振子散射。自旋同质结在未来的低功耗自旋电子器件中展现出潜力。

关键词: 磁性薄膜, 自旋同质结, 自旋-电荷转化, 界面自旋通透性

参考文献:

[1] Han *et al.* Spin homojunction with high interfacial transparency for efficient spin-charge conversion, *Sci. Adv.* 8, eabq2742 (2022).

等离子体渗-镀复合处理技术在齿科种植体上的应用研究

孙飞, 巴德纯, 蔺增*

东北大学, 机械工程与自动化学院, 真空与流体工程研究所, 沈阳, 110819

*Email: zlin@mail.neu.edu.cn

摘要: 随着表面工程技术的发展, 表面改性方法被广泛应用于医用器械表面, 以提高其表面性能。其中, 通过物理气相沉积 (PVD) 的方法制备的氮化钛 (TiN) 涂层因具有较高的硬度、耐磨损性能和生物相容性而被应用于齿科种植体部件。但由于 TiN 涂层与基体表面硬度差异较大, TiN 涂层在长期使用过程中, 结合强度差, 容易脱落。因此, 改善 TiN 涂层的结合力和服役特性至关重要。等离子体渗氮是一种原位表面处理方法; 它可以在部件表面产生梯度硬度分布的强化层, 消除了涂层与基体之间存在的界面。渗氮处理可以改变原有的形貌, 提高耐磨性和抗疲劳性。虽然等离子体渗氮可以解决涂层结合力问题, 具有良好的力学性能, 但是由于渗氮的边缘效应, 工件表面仍存在颜色不均匀的问题。这些问题可以通过复合表面处理技术来解决。复合表面处理是两种表面处理技术的连续应用, 其综合性能是单一表面处理技术无法实现的。等离子体渗氮 + TiN 涂层的渗-镀复合处理技术可以提高 TiN 涂层的结合力和表面硬度, 改善摩擦磨损性能。此外, 该工艺还能产生颜色

均匀金色表面。本研究开发了弧光等离子体渗氮 + PVD TiN 涂层的渗-镀复合处理方法,并将其应用于种植体基台和中央螺丝。值得注意的是,弧光等离子体渗氮和 PVD TiN 涂层工艺是在同一真空室中进行的,有效地解决了工件在传统工艺中不能连续处理的问题。该方法缩短了工作时间、降低了能源消耗、提高了表面处理效率、以及防止了中间过程中的样品污染。

关键词: 齿科种植体; 表面改性; 渗-镀复合处理; 松动; 磨损; 疲劳;

参考文献:

- [1] F. Sun, L. Wang, X.C. Li, W. Cheng, Z. Lin,* D.C. Ba, G.Q. Song, C.S. Sun, Effect of surface modification on the long-term stability of dental implant abutment screws by plasma nitriding treatment, *Surface & Coatings Technology*, 399, 126089 (2020).
- [2] F. Sun, X.L. Liu, S.Q. Luo, D.D. Xiang, D.C. Ba, Z. Lin,* G.Q. Song, Duplex treatment of arc plasma nitriding and PVD TiN coating applied to dental implant screws, *Surface & Coatings Technology*, 439, 128449 (2022).

TiZrNbTaMoN 高熵氮化物涂层的设计制备及腐蚀行为研究

杨葳 汪爱英*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室
浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江宁波, 邮编 315201

*Email: aywang@nimte.ac.cn

摘要: 海洋工程装备及其零部件在海洋苛刻的环境中(载荷、化学/电化学腐蚀和微生物腐蚀等),面临着使用寿命和服役稳定性的挑战。表面涂层防护材料技术是解决该问题的有效途径。本工作采用磁控溅射技术在 Ti-6Al-4V 合金基体表面制备了强韧耐蚀一体的 $(\text{TiZrNbTaMo})_{1-x}\text{N}_x$ ($x = 0 \sim 47\%$) 高熵涂层。研究了不同氮含量对该系高熵涂层的微观结构、力学性能和腐蚀行为的影响,揭示了该系涂层性能与成分、结构的关联。研究表明,随着氮含量的增加,涂层的微观组织结构由单一的 BCC 相结构转变为 FCC 相结构,同时氮含量的增加使其微观结构由疏松的柱状晶转变为致密的纳米晶。由于固溶强化和晶粒细化作用,氮元素添加后, $(\text{TiZrNbTaMo})_{1-x}\text{N}_x$ 涂层表现出更高的硬度,其中 $(\text{TiZrNbTaMo})_{83}\text{N}_{17}$ 涂层的硬度高达 32GPa。利用动电位阳极极化测试对 $(\text{TiZrNbTaMo})_{1-x}\text{N}_x$ 涂层的腐蚀行为进行研究发现,该系高熵涂层在 3.5 wt.% NaCl 溶液中自发钝化,不发生点蚀现象, TiZrNbTaMoN 涂层具有较低的腐蚀电流密度 ($3.2 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) 和较高的开路电位 (-0.02 V vs. SCE.),表明其优异的耐腐蚀性能。在此基础上,采用交流阻抗谱 (EIS) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 研究了氮元素对该涂层的腐蚀行为的影响机理。相关结果不仅有助于设计和发展强韧耐蚀一体的高熵氮化物涂层新体系,也将为发展海洋高安全防护涂层提供技术支撑。

关键词: 高熵氮化物涂层, 磁控溅射, 腐蚀行为, 强韧化

衬底温度对电阻蒸镀 Ti 膜形貌及力学性能的影响

王杏^{1,*} 马明旺¹ 万瑞芸¹ 谈效华¹

¹中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川绵阳, 邮编 621999

*Email: wangxing20@gscaep.ac.cn

摘要: Ti 膜因其较高的硬度、良好的致密性等特点, 在材料表面防护、增韧等方面得到广泛应用。在 Ti 膜的制备过程中, 衬底表面状态、衬底温度、入射粒子的状态、沉积参数等因素都会影响 Ti 膜的晶粒组织结构, 进而对其力学性能产生影响。对于真空蒸发镀膜而言, 衬底温度是影响薄膜生长过程的关键因素, 有必要研究衬底温度与 Ti 膜力学性能之间的关系。

本文采用电阻蒸发镀膜方法沉积 Ti 膜, 并用 SEM、AFM 及纳米压痕等方法对不同衬底温度下 Ti 膜的表面形貌、力学性能进行了分析, 获得了薄膜微观结构与力学性能随衬底温度的变化规律。结果表明, 衬底温度的升高使得衬底上原子获得的动能增加, 有利于 Ti 膜晶粒生长, 导致晶粒尺寸及表面粗糙度增加, 且较高衬底温度下制备的 Ti 膜具有更高的杨氏模量。

关键词: 衬底, 电阻蒸发, Ti 膜, 晶粒尺寸, 力学性能

D 纳米科学与技术
分会邀请报告

氮化物半导体自旋调控及其器件应用

吴雅苹*, 吴雪峰, 吴启鹏, 李煦, 吴志明, 康俊勇*

厦门大学物理系, 福建省半导体材料及应用重点实验室, 福建 厦门 361005

*邮箱: ypwu@xmu.edu.cn, jykang@xmu.edu.cn

氮化物半导体具有较宽的能隙和较强的自旋轨道耦合效应 (SOC)^[1,2], 为其在室温自旋电子器件中的应用提供了优势。如何实现高效的自旋注入和自旋输运是一个重要的核心问题。传统半导体中的自旋注入通常以铁磁金属作为注入源, 通过隧穿效应将自旋载流子注入半导体中^[3], 例如在基于 FeCo/MgO 隧道结的 GaN 薄膜自旋阀中成功实现了室温自旋注入, 并获得了相关的自旋动力学参数^[4]。然而, 由于界面散射与自旋弛豫效应, 其自旋注入效率仍然较低, 且基于氮化物的自旋器件也仅有较低的自旋极化率。

本工作基于 GaN 表面的自旋隧道结结构来研究氮化物半导体的自旋调控及其器件应用。首先系统研究了隧道结界面质量、势垒、铁磁材料及磁场生长条件对自旋注入与输运的影响及其物理机制, 并在优化的自旋隧道结中获得显著提高的自旋注入效率。在此基础上, 研究了自旋注入的栅压调控效应, 预测了 GaN 作为半导体自旋场效应器件的可能性。基于有效的铁磁/绝缘层磁隧道结自旋注入, 设计制备了正面出光 GaN 基倒装自旋 LED 器件以及具有量子限制效应的超薄 InGaN 量子阱结构, 成功调控了轻重空穴能级的自旋分裂, 有效提高了器件电致发光的室温圆偏极化率。进一步利用强磁场分子束外延技术在 GaN 基倒装自旋 LED 上构建了毫米尺度长程有序的拓扑半子晶格, 攻克了晶格尺度、低温以及外部磁场限制等难题。利用拓扑结构对电荷与自旋的有效筛选和调控, 实现了从拓扑磁性准粒子到电子再到光子的高效手性转移, 从而在室温无外场条件下获得了高达 22.5% 的电致发光圆偏极化率, 同时也首次实现了在扑半子晶格在半导体器件中的应用。

参考文献:

- [1] J. H. Bub, J. Rudolph, F. Natali, F. S. D. Hagele. "Anisotropic electron spin relaxation in bulk GaN", *Appl. Phys. Lett.* 95, 192107 (2009).
- [2] A. Banerjee, F. Dog˘an, J. Heo, A. Manchon, W. Guo, and P. Bhattacharya. "Spin Relaxation in InGaN Quantum Disks in GaN Nanowires", *Nano Lett.* 11, 5396 (2011).
- [3] Jonker B T, Kioseoglou G, Hanbicki A T, et al. "Electrical spin-injection into silicon from a ferromagnetic metal/tunnel barrier contact", *Nature Phys.* 3, 542-546 (2007).
- [4] A. Bha, M. Z. Bat, P. Bha, "Electrical spin injection and detection of spin precession in room temperature bulk GaN lateral spin valves", *Appl. Phys. Lett.* 108, 042406 (2016).

金属 WSe₂ 界面耦合及能带结构调控研究

秦志辉^{1*}

¹ 湖南大学物理与微电子科学学院, 湖南长沙, 邮编 410082;

*Email: zhqin@hnu.edu.cn

摘要: 二维过渡金属硒化物 TMDCs 半导体具有优良的光电性能、可见光波段的直接带隙和大的自旋轨道耦合等特性, 可潜在应用于下一代光电器件和谷电子器件。在原子尺度上非破坏性、可控的调控界面结构, 有效改变 TMDCs 的电子特性, 不仅可带来对器件集成的新认识, 而且可以控制二维半导体的电子特性。本报告以制备的 WSe₂/Au(100)为研究对象, 利用 STM/STS 结合第一性原理研究了其微观局域结构与物性, 研究发现界面转角诱导不同的电荷转移浓度和转移方向进而调控范德华界面耦合, 实现了 WSe₂ 的掺杂类型调控和 NPN 型纳米同质结的构筑; 将 WSe₂/Au(100)界面均匀插层单原子层锆, 结合第一性原理计算研究发现锆插层可有效作为 WSe₂ 与 Au(100)界面的缓冲层, 减弱了界面的耦合, 屏蔽了来自金衬底的电子散射, 导致 WSe₂ 能带结构重新被调控为本征 P 型。

关键词: WSe₂, 界面耦合, 能带调控, 扫描隧道显微镜/谱 (STM/S), 超高真空

参考文献:

- [1] Q.L. Wu, M. Bagheri Tagani, L.J. Zhang,* J. Wang, Y. Xia, L. Zhang, S.-Y. Xie, Y. Tian, L.-J. Yin, W. Zhang, A.N. Rudenko, A.T.S. Wee, P.K.J. Wong,* and Z.H. Qin,* “Electronic Tuning in WSe₂/Au via van der Waals Interface Twisting and Intercalation”, ACS Nano 16, 6541-6551 (2022).
- [2] Q.L. Wu, M. Bagheri Tagani, Q.W. Tian, S.I. Vishkayi, L. Zhang, L.-J. Yin, Y. Tian, L.J. Zhang,* and Z.H. Qin,* “Symmetry breaking induced bandgap opening in epitaxial germanene on WSe₂”, Appl. Phys. Lett. 121, 051901 (2022).
- [3] Q.L. Wu, X.S. Fu, K. Yang, H.Y. Wu, L. Liu, L. Zhang, Y. Tian, L.-J. Yin, W.-Q. Huang, W. Zhang, P.K.J. Wong,* L.J. Zhang,* A.T.S. Wee, and Z.H. Qin,* “Promoting a Weak Coupling of Monolayer MoSe₂ Grown on (100)-Faceted Au Foil”, ACS Nano 15, 4481-4489 (2021).

Programming spatial light modulations using mobile electrons

Ming Yang^{1,2}, Weitao Dai¹, Hyungwoo Lee³, Jung-Woo Lee³, Chang-Beom Eom³, Cheng Cen^{1,4*}

¹Department of Physics and Astronomy, West Virginia University, Morgantown, West Virginia 26506, USA

²National Key Laboratory of Science and Discovery and construction of surface kagome electronic states induced by p-d electronic hybridization in Co₃Sn₂S₂ Technology on Power Sources, Tianjin Institute of Power Sources, Tianjin, 300384, PR China

³Department of Material Science and Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin 53706, USA

⁴ Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics and Institute of Physics, Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100190, China

*Email: cheng.cen@iphy.ac.cn.

摘要: Two-dimensional distributions of mobile electrons are usually optically invisible and thus have very limited optoelectronic applications. In this study, we demonstrate a reprogrammable spatial light modulation achieved by two-dimensional electron gas (2DEG) structures formed at complex oxide interfaces. This result is enabled by a field-induced polar phase transition and the related linear electro-optic effect, which are systematically studied using tailored 2DEG configurations. The fast optical microscopy measurements not only produce quick visualizations of the interface carrier distributions but also allow a unique shock-wave-type polar domain growth to be captured in real time. These results demonstrate a new method for optically probing low-density carrier systems, and also the great potential for realizing active nanophotonic applications using material systems where mobile carriers strongly couples with lattice degrees of freedom.

关键词: 二维电子气, 光物质相互作用, 电子-晶格相互作用, 原子力显微镜, 偏振光显微镜

Weyl Node Annihilation in $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ Evidenced by Spin-Polarized Ultrafast Dynamics

赵继民

中国科学院物理研究所

中国科学院大学物理学院

松山湖实验室

Email: jmzhao@iphy.ac.cn

We report a very rare evidence of Weyl node annihilation^[1] in a topological material unveiled by spin-polarized ultrafast dynamics. We observe a unique type of gap in a magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ where the electrons are spin-polarized and preserve the spin-momentum locking feature of Weyl fermions. We report evidence of Weyl node annihilation, which is associated with such spin-polarized gaps. A pair of Weyl nodes with opposite chirality touch each other at ~ 210 meV above the Fermi energy. These are revealed by both time- and spin-resolved ultrafast spectroscopy experiments, combined with first-principles calculations. As thus, a topological phase transition is observed, and the gap exhibits an unconventional temperature dependence due to the Weyl physics. Furthermore, we propose possible circularly-polarized terahertz-midinfrared radiation from such a spin-polarized gap. Our results shed light on excited-state topological properties and endow application potentials for topological materials.

If time permits, I will also talk about our recent work in ultrahigh thermal conducting BAs^[2] and innovation of an on-site in situ high-pressure ultrafast pump-probe spectroscopy instrument^[3].

References

- [1] Fei Sun, Tan Zhang, C. J. Yi, Y. L. Wu, H. Zhao, Q. Wu, Y. G. Shi, H. M. Weng, Jimin Zhao*, Spin-polarized gap in the magnetic Weyl semimetal Co₃Sn₂S₂, *Phys. Rev. B* 104, L100301 (2021).
- [2] Z. Y. Tian, Q. Y. Zhang, Y. W. Xiao, G. A. Gamage, F. Tian, S. Yue, V. G. Hadjiev, Jiming Bao, Zhifeng Ren, Erjun Liang, and Jimin Zhao*, Ultraweak electron-phonon coupling strength in cubic boron arsenide unveiled by ultrafast dynamics, *Phys. Rev. B* 105, 174306 (2022).
- [3] Y. L. Wu, X. Yin, J. Z. L. Hasaien, Z. Y. Tian, Yang Ding, and Jimin Zhao*, On-site in situ high-pressure ultrafast pump-probe spectroscopy instrument, *Rev. Sci. Instrum.* 92, 113002 (2021).

精准构筑低维量子材料

王世勇¹

¹上海交通大学物理与天文学院, 上海, 邮编 200240;

*Email: shiyong.wang@sjtu.edu.cn

摘要: 材料科学的发展和物理学的发展相辅相成。现阶段, 低维量子材料的尺寸、边缘结构和堆叠方式可以被精准调控, 使得自下而上的设计具有特定功能的量子材料变为可能。在探测手段上, 超高真空扫描探针表征技术的发展, 能在单原子精度下对材料的形貌、电磁性质进行精准表征。本次报告主要介绍近两年我们在低维量子材料方向的一些进展。通过设计不同的分子前驱物, 利用表面化学合成的方法, 制备各种具有量子磁性的低维石墨烯结构^[1-6]。利用微纳加工和二维材料转移的方法, 构筑了不同的摩尔超晶格体系。利用表面探针手段, 在原子尺度下对其量子物态进行了深入研究, 发现量子磁性的集体激发效应和电子的强关联效应。

关键词: 表面化学合成, 二维摩尔超晶格, 扫描隧道显微镜, 原子力显微镜

参考文献:

- [1] Su, X. et al. Atomically Precise Synthesis and Characterization of Heptathrene with Triplet Ground State. *Nano Lett.* 20, 6859–6864 (2020).
- [2] Zhao, Y. et al. Precise Control of π -Electron Magnetism in Metal-Free Porphyrins. *J. Am. Chem. Soc.* 142, 18532–18540 (2020).
- [3] Zheng, Y. et al. Engineering of Magnetic Coupling in Nanographene. *Phys. Rev. Lett.* 124, 147206 (2020).
- [4] Zheng, Y. et al. Designer spin order in diradical nanographenes. *Nature Communications* 11, 6076 (2020).
- [5] Cheng, S. et al. On-surface synthesis of triangulene trimers via dehydration reaction. *Nature Communications* 13, 1705 (2022).
- [6] Zhao, Y. et al. Quantum nanomagnets in on-surface metal-free porphyrins, *Nature Chemistry*, in press, 2022

[7] Li, C., et al. Real-space observation of correlated states in Bernal-stacked graphene bilayer on hexagonal boron nitrides, to be submitted, 2022

纳米和埃米尺度上的声子测量

高鹏^{1, 2*}

¹ 北京大学物理学院量子材料科学中心, 北京, 邮编 100871

² 北京大学物理学院电子显微镜实验室, 北京, 邮编 100871

*Email: p-gao@pku.edu.cn

摘要: 声子是材料的热、电、力、光等物性的一个重要内禀因素, 完整的声子结构是由三维动量空间的声子色散来描述的。由于对称性破缺, 表界面上的声子行为预期会与块体有所不同。并且, 随着器件小型化趋势, 纳米和埃米尺度上的声子测量也具有重要的产业研究意义。为了探测纳米尺度上的声子, 实验测量手段须达到纳米甚至原子级别的空间分辨率以及足够分辨第一布里渊区的动量分辨能力, 同时对探测灵敏度和能量分辨率也提出了挑战。然而, 现有谱学手段均无法兼顾这些要求。我们基于扫描透射电子显微镜的电子能量损失谱, 发明了“四维电子能量损失谱”技术(4D-EELS) [1], 可以同时实现高动量分辨($\sim 0.3 \text{ \AA}^{-1}$)、高能量分辨($\sim 15 \text{ meV}$)以及高空间分辨($\sim 4 \text{ nm}$)。这一技术非常接近最优的理论衍射极限, 并且能够根据实际问题的需要在空间分辨率和动量分辨率之间取得最佳平衡。据此, 我们绘制了单个纳米结构、单个异质结界面的声子色散分布图, 首次从实验上观测到了局域在界面附近的增强和减弱的声子色散^[2]。根据理论计算, 测得的界面增强声子模式不仅对界面热导有显著贡献^[3], 也通过电声相互作用直接影响界面二维电子气的迁移率。我们的成果提供了纳米、埃米尺度晶格动力学的新见解。该谱学方法也有望在热传导、界面超导和拓扑声子等研究中发挥重要作用。

关键词: 超高分辨电子显微镜 (STEM), 四维电子能量损失谱 (4D-EELS), 界面声子, 界面热导

参考文献:

- [1] R. Qi, N. Li, J. Du, R. Shi, Y. Huang, X. Yang, L. Liu, Z. Xu, Q. Dai, D. Yu, and P. Gao, * "Four-dimensional vibrational spectroscopy for nanoscale mapping of phonon dispersion in BN nanotubes", *Nature Communications* 12, 1179 (2021).
- [2] R. Qi, R. Shi, Y. Li, Y. Sun, M. Wu, N. Li, J. Du, K. Liu, C. Chen, J. Chen, F. Wang, D. Yu, E.-G. Wang and P. Gao, * "Measuring phonon dispersion at an interface", *Nature* 599(7885) 399-403 (2021).
- [3] Y. Li, R. Qi, R. Shi, J. Hu, Z. Liu, Y. Sun, M. Li, N. Li, C. Song, L. Wang, Z. Hao, Y. Luo, Q. Xue, X. Ma, and P. Gao, * " Atomic-scale probing of heterointerface phonon bridges in nitride semiconductor", *PNAS* 119, e2117027119 (2022).

单原子分辨电子能量损失谱分析

李傲雯¹ 许名权¹ 周武^{1*}

¹ 中国科学院大学物理科学学院, 北京, 邮编 100049

*Email: wuzhou@ucas.ac.cn

摘要: 功能材料的研究离不开原子尺度的精细结构分析。球差校正技术的发展已经将电子显微学分析的空间分辨率提升至原子尺度, 也使得具有单原子灵敏度的结构分析成为可能。将具有单原子分析灵敏度的球差校正扫描透射电镜 (STEM) 成像与电子能量损失谱 (EELS) 结合, 可对纳米功能材料中的单原子尺度结构特征进行化学成分、价态、配位环境、局域电子结构以及局域晶格振动特征的实验分析。在这个报告中, 我们将介绍利用单原子分辨 STEM-EELS 芯损谱分析探索单原子分散负载催化剂材料的构效关系的几个近期工作, 包括实现对 Ni-N-C 电催化剂中活性 Ni-N_x 结构的单原子分辨化学成像(图 1a-b)^[1], 以及对 α -MoC 负载的单原子 Ni 活性位点的直接化学成像和化学价态分析(图 1c-d)^[2]。此外, 我们还将探讨利用 EELS 芯损谱扩展边精细结构分析在单原子尺度对纳米功能材料进行局域配位环境分析的可行性及挑战。结合具有亚 10meV 能量分辨率的低电压单色仪球差校正电镜, 我们探索了在单原子尺度对材料缺陷处局域晶格振动谱的实验测量, 实现了对石墨烯中单个取代 Si 原子缺陷和单个 N 原子缺陷的逐原子 (atom-by-atom) 振动谱分析^[3]。

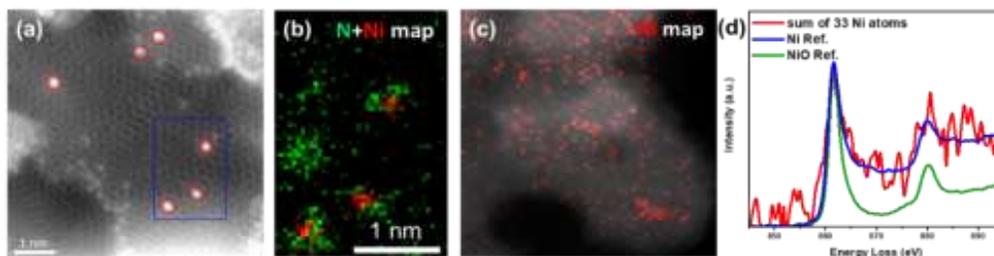


图 1. 单原子分辨 EELS 芯损谱分析。Ni-N-C 催化剂 (a) 单原子分辨 STEM-HAADF 图和 (b) Ni-N_x 结构的 Ni 和 N 元素在 (a) 蓝框的分布^[1]; Ni/ α -MoC 催化剂 (c) Ni 元素分布和 (d) Ni 单原子 ELNES 价态分析^[3]。

关键词: 单原子, 球差校正扫描透射电镜, 电子能量损失谱, 芯损谱, 振动谱

参考文献:

- [1] Wang, Z.; Choi, J.; Xu, M.; et al. ChemSusChem, 2020, 13, 929.
- [2] Lin, L.; Yu, Q.; Peng, M.; et al. J. Am. Chem. Soc., 2021, 143, 309.
- [3] Xu, M.; Bao, D.; Li, A.; et al. under review (2022).

碲原子沉积对单晶表面重构的影响

刘衍朋^{1, 2*} 张尔文¹

¹南京航空航天大学 航空学院, 江苏南京, 邮编 210016;

²南京航空航天大学 国际前沿科学研究院, 江苏南京, 邮编 210016;

*Email: chmliuyp@nuaa.edu.cn

摘要: The Au (100) surface has been a subject of intense studies due to excellent catalytic activities and its model character for surface science. However, the spontaneous surface reconstruction buries active Au(100) plane and limits practical applications, and how to controllably eliminate the surface reconstruction over large scale remains challenging. Here, we experimentally and theoretically demonstrate that simple decoration of the Au(100) surface by tellurium (Te) atoms can uniquely lift its reconstruction over large scale. Scanning tunneling microscope imaging reveals that the degeneration of surface reconstruction preferentially starts from the boundaries of distinct domains and then extends progressively into the domains with the reconstruction rows perpendicular to the boundaries, leaving a Au(100)-(1×1) surface behind. The Au(100)-(1×1) is saturated at $\sim 84 \pm 2\%$ with respect to the whole surface at a Te coverage of 0.16 monolayer. With further increasing the Te coverage to 0.25 monolayer, the Au(100)-(1×1) surface becomes reduced and overlapped by a well-ordered (2×2)-Te superstructure. No similar behavior is found for Te-decorated Au(111), Cu(111) and Cu(100) surfaces, nor for the decorated Au(100) with other elements. This result may pave the way to design Au-based catalysts and, as an intermediate step, even potentially open a new route to constructing complex transition metal dichalcogenides.

关键词: 表面重构, 扫描隧道显微镜 (STM), 碲原子, 吸附能, 各向异性

参考文献:

- [1] E.W. Zhang, H. Lu, W. Zhang, S.Y. Cao, Y. Wang, R. Rong, Y. Liu, Z.H. Zhang, M. Yang*, Y.P. Liu* and W.L. Guo* "Lifting Surface Reconstruction of Au(100) by Tellurium Adsorption", *Submitted* (2022).
- [2] E.W Zhang, F.R. Lin*, Z.H. Lei, S. Qi, S.Y. Ban, A. Vinu, J.B. Yi* and Y.P.* "Twist the Doorknob to Open the Electronic Properties of Graphene-related van der Waals Structure", *Matter*, 4 (11), 3444-3482, (2021).
- X.F Wang, F.R. Lin, X. Wang, S. Fang, J. Tan, W. Chu, R. Rong, J. Yin, Z.H. Zhang*, Y.P. Liu* and W.L. Guo*. "Hydrovoltaic Technology: from Mechanism to Applications". *Chemical Society Review*, 51, 4902-4927 (2022)

功能氧化物薄膜的离子调控及新物性探索

鲁年鹏

中国科学院物理研究所表面物理实验室, 北京, 邮编 100190

Email: lunianpeng@iphy.ac.cn

摘要: 功能性过渡金属氧化物, 由于电荷、晶格、轨道和自旋自由度之间的强关联效应, 而展现出丰富的物理特性, 如超导、磁阻、铁磁、铁电、多铁性等。如何调控其物性产生新物理效应、新功能特性成为当前凝聚态物理和材料科学的共同研究目标。经过近几年的发展, 离子调控已经逐渐开始成为一种调控材料物相和物性的有效手段。相比于传统采用的掺杂、应力/压强或静电调控, 离子调控可以对材料结构、组分和物性连续调控, 从而展现出强大的调控能力。在材料制备基础上, 采用离子调控, 通过离子与其它自由度的协同效应, 一方面可以控制离子嵌入和析出, 改变材料的晶格结构, 得到很多新颖物相; 另一方面, 又可以间接影响到材料中各种自由度之间的相互作用, 从而衍生出很多新奇物性。离子作为功能单元时, 其又在能源存储/转换和信息存储等功能特性方面有很多重要的应用。所以, 离子调控研究具有多学科交叉的特点, 并有望衍生出很多新物理、新材料及新型实用器件。本报告将介绍近几年我们围绕功能氧化物薄膜材料和离子调控开展的在几个代表性研究工作。

关键词: 氧化物薄膜, 离子调控, 钙钛矿结构, 钙铁石结构, 新物性探索

参考文献:

- [1] N.P. Lu, *et al.*, Enhanced low-temperature proton conductivity in hydrogen-intercalated brownmillerite oxide. *Nature Energy* 7, 1208 (2022).
- [2] N.P. Lu, *et al.*, Electric-field control of tri-state phase transformation with selective dual-ion switch. *Nature* 546, 124 (2017).
- [3] L. Gao, N.P. Lu*, *et al.*, Tracing the ionic evolution during ILG induced phase transformation in strontium cobaltite thin films. *Journal of Physics: Condensed Matter* 33, 104004 (2021).
- [4] L. Zhu, N.P. Lu*, *et al.*, Atomic-scale observation of structure transition from brownmillerite to infinite layer in SrFeO_{2.5} thin films. *Chemistry of Materials* 33, 3113 (2021).
- [5] L. Gao, N.P. Lu*, *et al.*, Unveiling strong ion-electron-lattice coupling and electronic antidoping in hydrogenated perovskite nickelate. *Advanced Materials*, 2300617 (2023).

First-principles calculations for Dzyaloshinskii-Moriya interaction and its application for DMI-torque MRAM

杨洪新*

南京大学物理学院

*Email: hongxin.yang@nju.edu.cn

摘要: Understanding the magnetic interactions is of fundamental importance in condensed matter physics as well as in the application of spintronic devices. In the past 14 years, the Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) has attracted increasing attention. Here, I will present a systemic survey of the first-principles calculations methods for DMI^[1-2], along with an overview of the first-principles calculations of the DMI properties of typical material systems^[3-5] and the DMI induced magnetic phenomena, e.g. skyrmions-based logic gates^[6], DMI-torque switching of perpendicular magnetization^[7].

关键词: 磁随机存储器, 逻辑门, 反对称交换耦合 (DMI), DMI-力矩翻转垂直磁

参考文献:

- [1] Hongxin Yang, * Jinghua Liang, Qirui Cui “First-principles calculations for Dzyaloshinskii–Moriya interaction”, *Nature Reviews Physics* 5, 43-61 (2023).
- [2] Hongxin Yang, André Thiaville, Stanislas Rohart, Albert Fert, Mairbek Chshiev "Anatomy of Dzyaloshinskii-Moriya Interaction at Co/Pt Interfaces", *Physical Review Letters* 115, 267210 (2015).
- [3] Hongxin Yang*, et al. “Significant Dzyaloshinskii–Moriya interaction at graphene–ferromagnet interfaces due to the Rashba effect”, *Nature Materials* 17, 605–609 (2018)
- [4] Qihan Zhang, Jinghua Liang, Kaiqi Bi, Le Zhao, He Bai, Qirui Cui, Heng-An Zhou, Hao Bai, Hongmei Feng, Wenjie Song, Guozhi Chai, O Gladii, H Schultheiss, Tao Zhu, Junwei Zhang, Yong Peng*, Hongxin Yang*, Wanjun Jiang* “Quantifying the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction Induced by the Bulk Magnetic Asymmetry” *Physical Review Letters* 128, 167202 (2022)
- [5] Jinghua Liang, Mairbek Chshiev, Albert Fert, Hongxin Yang* “Gradient-Induced Dzyaloshinskii–Moriya Interaction” *Nano Letters* 22, 10128-10133 (2022)
- [6] Dong Yu, Hongxin Yang*, Mairbek Chshiev, Albert Fert “Skyrmions-based logic gates in one single nanotrack completely reconstructed via chirality barrier” *National Science Review* 9, nwac021 (2022)
- [7] Dongxing Yu, Yonglong Ga, Jinghua Liang, Chenglong Jia*, Hongxin Yang* “Voltage-Controlled Dzyaloshinskii-Moriya Interaction Torque Switching of Perpendicular Magnetization” *Physical Review Letters* 130, 056701 (2023)

无机、有机笼目体系的反铁磁拓扑物态及调控

孙家涛¹

¹北京理工大学, 北京 100080

Email: jtsun@bit.edu.cn

摘要: 拓扑物态及其调控是凝聚态物理的重要基础前沿。破缺时间繁衍对称性的笼目结构的拓扑物态逐渐受到了人们的广泛关注。具有反铁磁磁结构的笼目材料在超导、电荷密度波等前沿基础物理和自旋电子器件方面具有重要的基础研究价值和潜在应用。这里我们将利用第一性原理计算方法结合实验研究无机和有机笼目体系中多种反铁磁磁结构与拓扑物态的耦合, 提出利用周期性光场调控其自旋轨道耦合及拓扑物态。1)我们预言了二维无机体系具有丰富的非共线的磁结构, 不同磁结构将影响其拓扑物态, 可获得大陈数的量子反常霍尔效应和时间反演对称性破缺的量子自旋霍尔效应。2)我们发现了无手性的共轭有机分子可以形成有手性的笼目晶格, 该晶格完全起源于分子间的电子态而无需原子占位, 可以称之为手性电子笼目晶格, 密度泛函理论计算和扫描隧道显微镜实验均证实了该结论。3)含有强自旋轨道耦合作用的笼目晶格对光场具有选择性, 其自旋通道与光场手性将产生强烈耦合, 可将实空间非局域的色散能带变成高度局域的拓扑平带。利用周期性光场调控无机、有机体系的自旋拓扑物态及其强关联效应对于实现高温分数量子霍尔效应具有重要意义。

关键词: 笼目晶格, 拓扑物态, 电荷密度波, 共轭有机分子, 自旋轨道耦合, 光场

参考文献:

[1] Jian Liu, Sheng Meng, Jiatao Sun, Nano Lett. 19, 3321 (2019).

[2] Hang Liu, Gurjyot Sethi, D. N. Sheng, Yinong Zhou, Jia-Tao Sun, Sheng Meng, Feng Liu, Phys. Rev. B 105, L161108 (2022)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11974045)

二维器件的扫描探针研究

薛加民*, 孙新祚, 吕铭, 王斌斌, 汪康, 蔡幸福

上海科技大学, 上海, 邮编 201210

*Email: zcdong-example@ustc.edu.cn

摘要: 基于二维材料的器件近来得到了广泛的关注。各种二维电子学和光电子器件、异质结器件等, 展示出了丰富的功能。另一方面, 通过精确控制两个单层二维材料之间的转角, 人们也实现了诸如超导态、铁电态等奇异的物性。这些功能和物性都是由器件的微观电子结构所决定的, 对其进行测量是理解它们宏观性质的重要依据。本次报告将介绍我们近期在该领域所做的一些工作。主要包括利用新型接触式扫描隧道能谱方法对工作状态下二维半导体器件能带结构的原位测量, 以及利用传统扫描探针方法对二维转角铁电和 Moiré能带的测量。

关键词: 接触式扫描隧道能谱, STS, STM, 铁电, Moiré能带

参考文献:

- [1] Xinzuo Sun, Yan Chen, Dongyang Zhao, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Jianlu Wang*, and Jiamin Xue,* “Measuring Band Modulation of MoS₂ with Ferroelectric Gates”, *Nano Letters* 23, 2114–2120 (2023).
- [2] Ming Lv, Xinzuo Sun, Yan Chen, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Menghao Wu, Jianlu Wang*, Jiamin Xue,* “Spatially Resolved Polarization Manipulation of Ferroelectricity in Twisted hBN”, *Advanced Materials* 34, 2203990 (2022).
- [3] Ding Pei*, Binbin Wang*, Zishu Zhou*, Zhihai He*, Liheng An, Shanmei He, Cheng Chen, Yiwei Li, Liyang Wei, Aiji Liang, Jose Avila, Pavel Dudin, Viktor Kandyba, Alessio Giampietri, Mattia Cattelan, Alexei Barinov, Zhongkai Liu, Jianpeng Liu, Hongming Weng, Ning Wang†, Jiamin Xue†, Yulin Chen†, “Observation of Γ -Valley Moiré Bands and Emergent Hexagonal Lattice in Twisted Transition Metal Dichalcogenides”, *Physical Review X* 12, 021065 (2022)

功能化原子力显微技术及其低温磁场条件下的拓展与应用

程志海^{1*}

¹ 中国人民大学物理学系, 量子态构筑与测控教育部重点实验室, 北京, 邮编 100872

*Email: zhahaicheng@ruc.edu.cn

摘要: 在微纳米尺度研究中, 以电子显微术、扫描探针显微术及超分辨光学显微术为核心的纳米表征与测量技术起到了关键性作用。目前, 以扫描隧道显微术、原子力显微术为核心的扫描探针显微术已经发展成为基础科学与技术应用中探测微纳米尺度物质结构、性质及功能的核心工具之一。其中, 原子力显微术 (AFM) 是使用最为广泛的扫描探针显微技术, 也可以作为微纳米尺度下的“眼”和“手”与其他表征和测量技术相结合, 具有非常广阔的发展和空间。本报告将在简要介绍原子力探针显微术基础上, 介绍我们在室温大气下发展和利用多频原子力、多频静电力、剪切原子力、扫描热学以及扫描微波等功能化原子力显微技术, 在微纳米尺度物性表征与测量方面的工作。在此基础上, 我们将介绍我们在将上述功能化 AFM 模式拓展应用到低温磁场环境下的工作, 包括技术挑战与问题、初步研究结果以及应用前景等

关键词: 原子力显微术 (AFM), 低维量子材料, 拓扑超导体, 纳米表征与测量

参考文献:

- [1] SY Xing, LL Wu, ZL Wang, X Chen, HN Liu, S Han, LW Zhou, Q Zheng, L Huang, X Lin, SS Chen, LM Xie, XL Chen, HJ Gao, ZH Cheng, JG Guo, SC Wang, W Ji, "Interweaving Polar Charge Orders in a Layered Metallic Super-atomic Crystal", *Physics Review X* 12, 041034 (2022)
- [2] J Yang, F Wang, JF Guo, YR Wang, CX Jiang, YC Cai, XY Zhan, XF Liu, ZH Cheng, J He, ZX Wang, "Ultrasensitive Ferroelectric Semiconductor Phototransistors for Low-Light-Level Detection", *Advanced Functional Materials* 32, 2205468 (2022)

非中心对称二维单晶材料通用制备研究

徐小志 教授 (华南师范大学 物理学院)

摘要: 过去十几年里, 以石墨烯、氮化硼和过渡金属硫族化合物为代表的二维材料在基础研究和器件应用等方面都来了许多惊喜。二维材料有导体、半导体和绝缘体, 种类完备。同时具有极限的物理厚度和超快的光电响应, 所以在电子、光电子等领域有非常广泛的应用前景。对于基础研究, 我们可以基于手撕样品, 但是对于器件应用, 必须要大尺寸单晶才能保证器件的高品质和高重复性。本报告将从衬底表面调控出发, 介绍非中心对称二维单晶材料通用制备研究。

报告人简介:

徐小志, 华南师范大学教授, 博士生导师。本科毕业于东南大学物理系 (2012), 博士毕业于北京大学前沿交叉学科研究院 (2017)。之后在北京大学物理学院从事博士后研究并于 2019 年入职华南师范大学。主要从事大尺寸二维单晶材料与物理研究, 特别注重利用表面物理技术调控二维材料生长与物态。近年发表通讯/ (共同) 第一作者论文 17 篇, 包括 Nature 正刊 2 篇、Nature 子刊 4 篇。主持国家重点研发计划课题、广东省杰出青年基金等项目。

报告人照片



基于 SPM 技术的纳米石墨烯的精准构筑及性能调控

蔡金明*

昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南昆明, 650093

*Email: j.cai@kust.edu.cn

摘要: 低维碳基纳米材料在电子、信息、能源、航空航天、国防等涉及国计民生的诸多领域有着广阔的应用前景, 是最有希望获得大规模应用、有望主导未来高科技产业的超级材料。利用超高真空扫描探针显微镜可精准构筑低维碳基纳米材料 (如碳基多孔材料、石墨烯纳米带、纳米石墨烯等), 并且可以在实空间中追踪其物理化学反应过程, 有助于人们理解其反应机理。这里, 我们精确构筑了一系列低维碳基纳米材料 (有机多孔共价网络、咬痕缺陷和氮原子掺杂的石墨烯纳米带、碳基纳

米石墨烯等等), 并对其机理进行研究(大面积有机多孔共价网络的动力学研究、周期性咬痕缺陷增大石墨烯纳米带的带隙及石墨氮原子掺杂的石墨烯纳米带呈现金属性的相关机理、碳基纳米石墨烯的苯基迁移反应机理、亚氨基诱导的卟啉分子高选择性环化脱氢机理等等)。我们的研究结果为开拓表面新型物理化学反应及碳基半导体器件的设计应用提供了见解。

关键词: UHV-STM; 表面合成; 纳米石墨烯; 物性调控

参考文献

- [1] Zhang, Y.; Lu, J.; Li, Y.; Li, B.; Ruan, Z.; Zhang, H.; Hao, Z.; Sun, S.; Xiong, W.; Gao, L. Cai, J. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, 61, e202204736.
- [2] Zhang, Y.; Lu, J.; Li, B.; Chen, W.; Xiong, W.; Ruan, Z.; Zhang, H.; Sun, S.; Chen, L.; Gao, L., Cai, J. *J. Chem. Phys.* 2022, 157, 031103.
- [3] Sun, S.; Guan, Y.; Hao, Z.; Ruan, Z.; Zhang, H.; Lu, J.; Gao, L.; Zuo, X.; Cai, J. *Nano Res.* 2022, 15, 653.
- [4] Ruan, Z.; Li, B.; Lu, J.; Gao, L.; Zhang, Y.; Cai, J. *Nat Commun* 2023, 14, 970.
- [5] Hao, Z.; Song, L.; Yan, C.; Zhang, H.; Ruan, Z.; Sun, S.; Lu, J.; Cai, J. *Chem. Commun.*, 2019, 55, 10800.

基于二维原子晶体的纳电子器件的构建及其电子学特性

鲍丽宏^{1, 2, *} 高鸿钧^{1, 2}

¹ 中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190;

² 中国科学院大学, 物理科学学院, 北京, 邮编 100049

*Email: lhbao@iphy.ac.cn

摘要: 二维原子晶体具有许多新奇的物理性质, 不仅是研究维度限制下各种新奇物理现象的理想平台, 同时具有可调控的原子结构和界面, 是实现更小、更快、更低功耗的信息器件最行之有效的途径。我们利用二维范德瓦尔斯异质结的原子级锐利界面及增强的界面耦合特性, 无需修改商用的器件结构, 在国际上首次成功构筑了超快、非易失浮栅存储器件, 成功实现了极快的纳秒级 (~21 纳秒) 编程/擦除时间 (商用闪存器件为百微秒), 极高的擦除/写入比 (~ 10^{10}), 极长的存储时间 (10 年以上) 和优异的耐久性 (重复擦写次数大于 2000 次)。在磁性二维原子晶体在低维限制下自旋相关的新量子效应研究中, 我们首次在高质量、层数可控、空气稳定的二维铁磁性 1T-CrTe₂ 晶体的电学输运特性中观测到了长程铁磁序导致的反常霍尔效应, 从而证实了其铁磁性, 发现了其居里温度随厚度减少反常单调递增的特性, 这来源于二维极限下库伦屏蔽作用弱化进而引起材料磁学性质的改变。在石墨烯的本征电子学输运特性的研究中, 我们在金属表面外延生长的高质量单晶石墨烯中成功观测到 SdH 振荡、整数量子霍尔效应、以及弱反局域化等石墨烯本征二维电子气电学输运性质, 从而为石墨烯材料及其器件的应用研究奠定了坚实的基础。

关键词: 二维原子晶体; 范德瓦尔斯异质结; 超快浮栅存储器; 反常霍尔效应; 二维电子气

参考文献:

- [1] L. M. Wu[#], A. W. Wang[#], J. A. Shi[#], J. H. Yan[#], Z. Zhou, C. Bian, J. J. Ma, R. S. Ma, H. T. Liu, J. C. Chen, Y. Huan, W. Zhou, L. H. Bao^{*}, M. Ouyang^{*}, S. J. Pennycook, S. T. Pantelides, H. -J. Gao^{*}, "Atomically sharp interface enabled ultrahigh-speed non-volatile memory devices", *Nat. Nanotechnol.* 16, 882 (2021).
- [2] L. J. Meng[#], Z. Zhou[#], M. Q. Xu[#], S. Q. Yang[#], K. P. Si, L. X. Liu, X. G. Wang, H. N. Jiang, B. X. Li, P. X. Qin, P. Zhang, J. L. Wang, Z. Q. Liu, P. Z. Tang, Y. Ye^{*}, W. Zhou^{*}, L. H. Bao^{*}, H. -J. Gao, Y. J. Gong^{*}, "Anomalous thickness dependence of Cuire temperature in air-stable two-dimensional ferromagnetic 1T-CrTe₂ grown by chemical vapor deposition", *Nat. Commun.* 12, 809 (2021).
- [3] H. Guo[#], X. Y. Wang[#], L. Huang[#], X. Jin, Z. Z. Yang, Z. Zhou, H. Hu, Y. -Y. Zhang, H. L. Lu, Q. H. Zhang, C. M. Shen, X. Lin, L. Gu, Q. Dai, L. H. Bao^{*}, S. X. Du^{*}, W. Hofer, S. T. Pantelides, H. -J. Gao^{*}, "Insulating SiO₂ under centimeter-scale, single-crystal graphene enables electronic-device fabrication", *Nano Lett.* 20, 8584-8591 (2020).

表面手性自组装与偶联反应的 STM 研究

陈婷* 王栋 万立骏

中国科学院化学研究所, 北京, 邮编 100190

*Email: chenting@iccas.ac.cn

摘要: 手性是自然界的基本属性。研究表面手性分子组装与反应有助于对手性产生、传递、放大等基本科学问题的理解, 而且, 表面分子组装与反应也是自下而上精准构筑低维手性纳米结构的重要途径, 可以为发展新型手性功能材料及其应用提供基础。在表面分子组装中, 由于分子间作用力弱, 多种作用协同竞争, 因此手性选择性难以预测, 二维手性聚集体, 消旋产物, 以及二维固溶体这三种产物往往随机形成甚至是同时存在。相反, 共价键作用力强, 反应可逆性较弱, 因此表面偶联反应的手性选择性往往较差, 在产物中单体的两种镜像构象随机分布。因此, 不论对组装还是反应, 理解表面手性选择性规律, 发展手性调控方法具有重要意义。我们利用扫描隧道显微镜为主要研究手段, 从分子层次研究了表面自组装与偶联反应的手性诱导与调控, 主要研究进展包括: (1) 提出基于手性共吸附分子的手性调控策略, 实现了表面单一手性组装结构的构筑; (2) 揭示了 Br[•]·Br 作用在表面分子手性识别与组装过程中的作用规律, 实现了表面手性选择性组装; (3) 还发展了位阻策略及手性模板策略, 实现了表面偶联反应的手性选择性调控。

关键词: 扫描隧道显微镜 (STM), 手性, 分子组装, 表面反应

参考文献:

- [1] Z. Y. Yi, X. Q. Yang, J. J. Duan, X. Zhou, T. Chen, * D. Wang, * L. J. Wan, * "Evolution of Br[•]·Br contacts in enantioselective molecular recognition during chiral 2D crystallization", *Nature Communications* 13, 5850 (2022).
- [2] Y. Xu, J. J. Duan, Z. Y. Yi, K. X. Zhang, T. Chen, * D. Wang, * "Chirality of molecular nanostructures on

surfaces via molecular assembly and reaction: manifestation and control”, *Surface Science Reports* 76, 100531 (2021).

[3] C. Lu, Y. P. Mo, Y. Hong, T. Chen,* Z. Y. Yang, L. J. Wan, D. Wang,* “On-Surface Growth of Single-Layered Homochiral 2D Covalent Organic Frameworks by Steric Hindrance Strategy”, *Journal of the American Chemical Society* 142, 14350-14356(2020).

分会口头报告

Discovery and construction of surface kagome electronic states induced by *p-d* electronic hybridization in $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$

Qi Zheng (郑琦)^{1,2}, Li Huang^{1,2*}, Xianghua Kong^{1,2}, Yuqing Xing^{1,2†}, Hui Chen^{1,2}, Yan Li^{1,2}, Zhixin Hu⁶, Shiyu Zhu^{1,2}, Jingsi Qiao^{7,4}, Yu-Yang Zhang², Hai-Xia Cheng⁴, Zhihai Cheng⁴, Xianggang Qiu^{1,2}, Enke Liu^{1,2}, Hechang Lei⁴, Xiao Lin², Ziqiang Wang⁸, Haitao Yang^{1,2*}, Wei Ji^{4*}, Hong-Jun Gao^{1,2,9*}

¹ Beijing National Center for Condensed Matter Physics and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

² School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

³ College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

⁴ Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Functional Materials & Micro-Nano Devices, Department of Physics, Renmin University of China, Beijing 100872, China

⁵ Centre for the Physics of Materials and Department of Physics, McGill University, Montreal QC H3A 2T8, Canada

⁶ Center for Joint Quantum Studies and Department of Physics, Institute of Science, Tianjin University, Tianjin 300350, China

⁷ MIIT Key Laboratory for Low-Dimensional Quantum Structure and Devices, School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

⁸ Department of Physics, Boston College, Chestnut Hill, MA, USA

⁹ Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan, Guangdong 523808, China

*Email: hjgao@iphy.ac.cn, * wji@ruc.edu.cn, * htyang@iphy.ac.cn

Keywords: *p-d* electronic surface kagome electronic states, scanning tunneling microscopy, non-contact atomic force microscopy

Kagome-lattice materials possess attractive properties for quantum computing applications, but their synthesis remains challenging. Herein, based on the compelling identification of the two cleavable surfaces of $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, we show surface kagome electronic states (SKESs) on a Sn-terminated triangular $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ surface. Such SKESs are imprinted by vertical *p-d* electronic hybridization between the surface Sn (subsurface S) atoms and the buried Co kagome-lattice network in the Co_3Sn layer under the surface. Owing to the subsequent lateral hybridization of the Sn and S atoms in a corner-sharing manner, the kagome symmetry and topological electronic properties of the Co_3Sn layer is proximate to the Sn surface. The SKESs and both hybridizations were verified via qPlus non-contact atomic force microscopy (nc-AFM) and density functional theory calculations. The construction of SKESs with tunable properties can be achieved by the atomic substitution of surface Sn (subsurface S) with other group III-V elements (Se or Te), which was demonstrated theoretically. This work exhibits the powerful capacity of nc-AFM in characterizing localized topological states and reveals the strategy for synthesis of large-area transition-metal-based kagome-lattice materials using conventional surface deposition techniques.

L. Huang†, X. Kong†, Q. Zheng†, Y. Xing†, H. Chen, Y. Li, Z. Hu, S. Zhu, J. Qiao, Y. Zhang, H. Cheng, Z. Cheng, X. Qiu, E. Liu, H. Lei, X. Lin, Z. Wang, H. Yang*, W. Ji*, H. Gao* " Discovery and construction of surface kagome electronic states induced by *p-d* electronic hybridization in $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ " *arXiv*:2305.00826 [cond-mat.mtrl-sci], *submitted to Nat. Comm.*

Selective C-H bond activation on surface and enabled formation of N-doped graphene nanoribbons

Yixuan Gao^{1▲}, Li Huang^{1▲}, Yun Cao^{1▲}, Marcus Richter^{2▲}, Xinliang Feng^{*, 2}, Shixuan Du^{*, 1} and Hong-Jun Gao^{*, 1}

¹Institute of Physics & University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, PR China;

²Center for Advancing Electronics Dresden (cfaed) & Faculty of Chemistry and Food Chemistry, Technische Universität Dresden, D-01069 Dresden, Germany

*Email: xinliang.feng@tu-dresden.de; sxdu@iphy.ac.cn; hjgao@iphy.ac.cn

Abstract: Selective C-H bond activation is one of the most challenging topics for organic reactions. The difficulties arise not only from the high C-H bond dissociation enthalpies but also the existence of multiple equivalent reaction sites in organic molecules. By introducing heteroatoms, such as nitrogen and sulfur atoms into the organic skeleton, the *ortho* C atoms can be more reactive than the other C atoms. This strategy, however, lacks selectivity among equivalent *ortho* C atoms, as previous studies show all the *ortho* C atoms have almost equal probability to be activated. Therefore, in route towards ultimate control over C-H selectivity, the selective activation of equivalent/quasi-equivalent *ortho* C(sp^3)-H with new methodologies would be a major achievement in the field. Here, we successfully achieve the selective activation of four quasi-equivalent C-H bonds in a specially designed nitrogen-containing polycyclic hydrocarbon (N-PH). Density functional theory calculations reveal that the adsorption of N-PH on Ag(100) differentiates the activity of the four *ortho* C(sp^3) atoms in the N-heterocycles into two groups, suggesting a selective dehydrogenation, which is demonstrated by sequential-annealing experiments of N-PH/Ag(100). Further annealing leads to the formation of N-doped graphene nanoribbons with partial corannulene motifs, realized by the C-H bond activation process. Our work provides a new route of designing precursor molecules with *ortho* C(sp^3) atom in an N-heterocycle to realize surface-induced selective dehydrogenation in quasi-equivalent sites.

Keywords: selective C-H activation, on-surface synthesis, density functional theory, scanning tunneling microscopy

Reference:

[1] Yixuan Gao *et al.* "Selective C-H bond-activation induced C-C/C-N bond-transformation on surface and enabled formation of N-doped graphene nanoribbons", submitted to *Nature Communications* (2022).

Intrinsically Honeycomb-Patterned Hydrogenated Graphene

Lei Tao, Yang Song, Kai Qian, Xiao Lin, Shixuan Du, Hong-Jun Gao

Institute of Physics and University of Chinese Academy of Sciences Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China

E-mail: xlin@ucas.ac.cn; sxdu@iphy.ac.cn; hjgao@iphy.ac.cn;

Since the advent of graphene ushered the era of 2D materials, many forms of hydrogenated graphene have been reported, exhibiting diverse properties ranging from a tunable bandgap to ferromagnetic ordering. Patterned hydrogenated graphene with micron-scale patterns has been fabricated by lithographic means. Here, successful millimeter-scale synthesis of an intrinsically honeycomb-patterned form of hydrogenated graphene on Ru(0001) by epitaxial growth followed by hydrogenation is reported. Combining scanning tunneling microscopy observations with density-functional-theory (DFT) calculations, it is revealed that an atomic-hydrogen layer intercalates between graphene and Ru(0001). The result is a hydrogen honeycomb structure that serves as a template for the final hydrogenation, which converts the graphene into graphane only over the template, yielding honeycomb-patterned hydrogenated graphene (HPHG). In effect, HPHG is a form of patterned graphane. DFT calculations find that the unhydrogenated graphene regions embedded in the patterned graphane exhibit spin-polarized edge states. This type of growth mechanism provides a new pathway for the fabrication of intrinsically patterned graphene-based materials.

Keywords: hydrogenated graphene, intrinsically patterned graphene, scanning tunneling microscopy, density functional theory

Reference:

[1] Song, Y., Qian, K., Tao, L., Wang, Z., Guo, H., Chen, H., Zhang, S., Zhang, Y.-Y., Lin, X., Pantelides, S. T., Du, S., Gao, H.-J., Intrinsically Honeycomb-Patterned Hydrogenated Graphene. *Small* 2022, 18, 2102687.

Continuously tunable ferroelectric domain width down to the single-atomic limit in bismuth tellurite

Cong Wang¹, Wei Ji^{1,*}

¹ Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Functional Materials & Micro-Nano Devices, Department of Physics, Renmin University of China, Beijing 100872, China
wcphys@ruc.edu.cn

Abstract : Emerging functionalities in two-dimensional materials, such as ferromagnetism, superconductivity and ferroelectricity, open new avenues for promising nanoelectronic applications. Here, we report the discovery of intrinsic in-plane room-temperature ferroelectricity in two-dimensional Bi_2TeO_5

grown by chemical vapor deposition, where spontaneous polarization originates from Bi column displacements. We found an intercalated buffer layer consist of mixed Bi/Te column as 180° domain wall which enables facile polarized domain engineering, including continuously tunable domain width by pinning different concentration of buffer layers, and even ferroelectric-antiferroelectric phase transition when the polarization unit is pinned down to single atomic column. More interestingly, the intercalated Bi/Te buffer layer can interconvert to polarized Bi columns which end up with series terraced domain walls and unusual fan-shaped ferroelectric domain. The buffer layer induced size and shape tunable ferroelectric domain in two-dimensional Bi_2TeO_5 offer insights into the manipulation of functionalities in van der Waals materials for future nanoelectronics.

Deep learning enabled topological design of exceptional points

Peng Fu^{1,2} Wenze Lan^{1,2} Leyong Hu^{1,2} Shuo du^{1,2*} Changzhi Gu^{1,2*}

¹ Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

² School of Physical Sciences, CAS Key Laboratory of Vacuum Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

*Email: czgu@iphy.ac.cn

Abstract: In photonic systems, the topology associated with branch point singularities around outliers (EPs) can provide tools for controlling light propagation. However, traditional EPs search and related topology optimization methods rely on trial-and-error methods to obtain the target EM response, which requires considerable effort to study many possible structures. To make matters worse, most methods sacrifice computational accuracy for efficiency, which can easily lead to the omission of critical information, especially when studying parameter-sensitive EP problems. Here, we demonstrate that a bidirectional neural network trained with a few finite element methods (FEM) simulated data is not only capable of retrieving subwavelength dimensions from the desired topological singularity but also directly solves the inverse problem. With the help of deep learning, topological charge conservation under perturbation is observed, where EPs with opposite charges are generated and annihilated in the parameter space. We also demonstrate optical parameter distributions that take advantage of topological protection around scattering EPs and show the independent amplitude and phase addressing mechanisms. Our work allows rapid discovery and high-resolution topology of EPs provides a powerful tool for mining relevant physics and provides a new paradigm for multi-optical parameter manipulation with high performance and low crosstalk, which is helpful for imaging, encryption, and information storage applications vital.

Keywords: exceptional point, deep learning, topological charge, inverse problem.

Observation of topological edge states and field distribution in graphene-like photonic crystals

Wenze Lan^{1, 2} Baoli Liu^{1,3,4*}

¹ Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

² School of Physical Sciences, CAS Key Laboratory of Vacuum Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

³ CAS Center for Excellence in Topological Quantum Computation, CAS Key Laboratory of Vacuum Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

⁴ Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan, Guangdong, 523808, China

*Email: blliu@iphy.ac.cn

Abstract: Topological photonics provides a novel route for designing and realizing optical devices with unprecedented functionality. Most remarkably, edge states with topological protection exist in the interface between two topologically distinct regions, allowing for the robust and directional propagation of light along the interface. The information on photonic dispersion and field distribution is essential to understand the topological properties of edge states. In this work, we experimentally investigate the helical edge states and field distribution in SiN_x photonic crystals by angle-resolved photoluminescence spectroscopy. In our structure, the graphene-like lattices with trivial and non-trivial band topology are stitched by a zigzag or armchair interface. Helical edge states are observed when the interfaces parallel to the detected momentum direction in two types of interfaces. When the interface is perpendicular to the direction of the detected momentum, the intensity of the spectra becomes asymmetric. We show that the stronger photoluminescence of lower energy bands mainly comes from the trivial side, while the upper energy bands have the stronger photoluminescence on the non-trivial side. These phenomena indicate that most of the energy radiated into free space comes from the region dominated by the p-orbital, which gives an intuitive picture of the field distribution characteristics of the topological edge states. Our results deepen the understanding of topological edge states and provide important guidance for the exploration and design of on-chip topological devices.

Keywords: Topological photonics, Topological edge states, Field distribution, Angle-resolved photoluminescence

Imaging correlated insulating states and topological states in 2D heterostructure

姜宇航

中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京, 邮编: 100049

Email: yuhangjiang@ucas.ac.cn

摘要: 转角石墨烯的平带被部分填充时, 可涌现出诸多新奇物性, 如关联绝缘态、非常规超导、陈绝缘体等。本报告主要介绍在转角单层-单层、单层-双层石墨烯异质结中, 利用扫描探针显微镜结合外场调控手段探索平带诱导的关联态及其演化规律。报告主要聚焦: 1) 转角单层-单层石墨烯中关联绝缘态伴生的对称性破缺现象, 并揭示该对称性破缺所伴生的载流子密度空间调制; 2) 转角单层-双层石墨烯异质结中, 发现在平带被部分填充的情况下, 关联作用会激发电子晶体相的形成。进一步结合该体系中能带的拓扑非平庸性, 利用谱学成像技术直接观测到周期性拓扑环的形成。此工作从转角异质结体系出发, 尝试探索了关联物态、演化规律及其精准调控, 为揭示新奇物态的构效关系提供重要参照。

关键词: 二维转角异质结, 扫描隧道显微镜 (STM), 关联绝缘态, 对称性破缺, 拓扑态

参考文献:

- [1] Si-yu Li, Zhengwen Wang, Yucheng Xue, Yingbo Wang, Shihao Zhang, Jianpeng Liu, Zheng Zhu, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Hong-jun Gao, Yuhang Jiang* and Jinhai Mao, “Imaging topological and correlated insulating states in twisted monolayer-bilayer graphene”, *Nature Comm.* 13:4225 (2022).
- [2] Yuhang Jiang, Xinyuan Lai, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kristjan Haule, Jinhai Mao, and Eva Y. Andrei, “Charge-ordering and Broken Rotational Symmetry in Magic-Angle Twisted Bilayer Graphene”, *Nature* 573, 91-95 (2019).

“笼目”晶格超导体配对密度波的研究

陈辉* 杨海涛 高鸿钧

中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190;

*Email: hchenn04@iphy.ac.cn

摘要: 近期, 一种具有 80-100 K 电荷密度波转变温度的新型层状笼目 (kagome) 结构砷基超导体, AV_3Sb_5 (A= Cs, Rb, K) 被成功合成出来。这种砷基超导体因其独特的笼目结构而展现出强关联、拓扑以及多体效, 其丰富的物理吸引了大量的研究。目前研究表明该材料体系具有非常规超导性以及反常的手性电荷密度波, 这两者的同时出现预示着这类 kagome 超导体可能是配对密度波出现的理想载体。在此次报告中, 我将介绍我们近期利用极低温强磁场扫描隧道显微镜/谱 (STM/S) 联合系统在 CsV_3Sb_5 及其中掺杂体系中对超导电性、电荷密度波和配对密度波进行的系列研究工作。此

外, 我们通过 Ti 元素化学替代笼目结构中的 V 原子, 实现了对 CsV_3Sb_5 的超导态、电荷密度波、配对密度波等竞争序的调制, 揭示了配对密度波、电荷密度波与超导态之间的相互关联。

关键词: 扫描隧道显微镜 (STM), 笼目晶格, 超导体, 配对密度波, 电荷密度波

参考文献:

- [1] H. Chen, H. Yang, B. Hu, Z. Wang and H.-J. Gao et al., Roton pair density wave in a strong-coupling kagome superconductor. *Nature* 599, 222 (2021)
- [2] B. Hu, H. Chen and H.-J. Gao et al., Robustness of the unidirectional stripe order in the Kagome superconductor CsV_3Sb_5 . *Chin. Phys. B* 31, 058102 (2022)
- [3] H. Chen, H. Yang and H.-J. Gao et al., Superconductivity and Unconventional Density Waves in Vanadium-based Kagome Materials AV_3Sb_5 . *Chin. Phys. B* 31, 097405 (2022)
- [4] H. Yang, H. Chen and H.-J. Gao et al. Titanium doped kagome superconductor $\text{CsV}_{3-x}\text{Ti}_x\text{Sb}_5$ and two distinct phases. *Sci. Bull.* Online (2022)

Visualizing spatial evolution of electron-correlated interface in two-dimensional heterostructures

武旭^{1*} 乔婧思¹ 季威² 王业亮¹

¹北京理工大学集成电路与电子学院, 北京, 邮编 100081;

²中国人民大学物理系, 北京, 邮编 100872

*Email: xuwu@bit.edu.cn

摘要: Microscopically visualizing the evolution of electronic structures at the interface between two electron-correlated domains shows fundamental importance in both material science and physics. However, despite the developed theoretical prediction, the experimental visualization of interfacial electronic structures is still rarely due to the difficulties in three-dimensional systems that the interface always exists in the inner. With phase engineering, two-dimensional (2D) transition metal dichalcogenides (TMDs), a typical class of 2D materials with widely different phases, show diverse electron-correlated properties, such as Mott insulator, superconductivity, and charge density wave (CDW). With the exposed interface, the 2D TMDs can be an outstanding platform for studying interfacial electronic structures of electron-correlated materials.^[1,2] Here, we report scanning tunneling microscopy and spectroscopy studies of the interfacial electronic structures evolution in a phase-engineered monolayer NbSe_2 heterostructure.^[3] The H- NbSe_2 metallic state penetrates the Mott-like insulating T- NbSe_2 at the H/T phase interface, with a prominent 2D charge density wave (CDW) proximity effect. Moreover, an insulating Mott gap collapse with the disappearance of the upper Hubbard band is detected at the electronic phase transition region. Our findings promote microscopical understanding of the interactions between different electron-correlated

systems and pave the way for controlling the Mott insulating states with phase engineering.

关键词: UHV, SPM, MBE, low-dimensional materials, electron correlated materials, heterostructure

参考文献:

- [1] X. Wu, J. S. Qiao, L. L. Liu, Y. Shao, Z. L. Liu, L. F. Li, Z. L. Zhu, C. Wang, Z. X. Hu, W. Ji*, Y. L. Wang*, and H. J. Gao, "Shallowing interfacial carrier trap in transition metal dichalcogenide heterostructures with interlayer hybridization", *Nano Research* 14, 1390–1396 (2021)
- [2] Q. Z. Zhang, Y. H. Hou, Z. Q. Xu, Z. P. Huang, P. W. Yuan, L. G. Jia, T. Zhang, H. X. Yang, W. Ji, J. S. Qiao,* Xu Wu,* and Yeliang Wang*, "Visualizing spatial evolution of electron-correlated interface in two-dimensional heterostructures", *ACS Nano* 15, 16589–16596 (2021)

含色心的高质量一维金刚石单晶锥的制备研究

杨兵^{1, 2, *} 卢嘉琪^{1, 2} 黄楠^{1, 2} 姜辛^{1, 2, 3, *}

¹ 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心, 辽宁沈阳, 邮编 110016;

² 中国科学技术大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳, 邮编 110016;

³ 德国锡根大学材料工程研究所, 德国锡根, 邮编 57076

*Email: byang@imr.ac.cn; xjiang@imr.ac.cn

摘要: 一维结构的单晶金刚石材料由于兼具金刚石固有的优异力学、光学、电学及化学稳定性, 同时具有大的长径比和尖端曲率半径, 在纳米压痕, 原子力显微镜或扫描探针显微镜的压头等领域具有非常成熟的应用。而金刚石色心具有非常优异的室温发光性能, 在单光子源、生物荧光标记、光学传感等领域具有非常高的潜在应用价值。将色心分布在单晶金刚石探针的针尖, 并结合扫描探针技术可用于纳米尺度的磁性, 温度或应力应变等测量。传统制备含有金刚石色心的纳米锥的工艺通常包含两步: 第一步是对单晶微纳加工制备一维纳米锥材料, 第二步是利用离子注入结合高温退火的方法将氮原子或硅原子注入金刚石中形成 NV 或 SiV 色心。该工艺步骤繁琐, 成本较高。本研究采用一种更简单的两步法来制备金刚石纳米锥: 第一步是利用四甲基硅烷制备[001]取向的微米/纳米金刚石复合薄膜, 而第二步采用高温空气退火的方法将上述薄膜中纳米金刚石选择性刻蚀, 保留微米金刚石颗粒, 从而形成大量的金刚石纳米锥, 对单根纳米锥进行微观结构表征发现其为[001]取向的单晶, 且在纳米锥的侧壁上发现富含 Si 元素的颗粒, 其为纳米金刚石中碳被烧蚀而硅原子残留团聚形成。PL mapping 显示 SiV 色心均匀分布在整個纳米锥中。该方法制备的纳米锥将不受针尖磨损的影响, 始终保留高 SiV 色心浓度, 在微区温度探测的领域具有潜在的应用价值。

关键词: 金刚石, 色心, 一维纳米结构, 原子力显微镜;

参考文献:

- [1] Lu, J. Q.; Yang, B.*; Yu, B.; Li, H. N; Huang, N.; Liu, L.; Jiang, X.* Fabrication of ordered diamond nanoneedle arrays containing high-brightness silicon-vacancy centers, *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 21001427:1-11.
- [2] Lu, J. Q.; Yang, B.*; Li, H. N; Guo, X. K.; Huang, N.; Liu, L.; Jiang, X.* Revealing impurity evolution in silicon-doped diamond film via thermal oxidation. *Carbon* 2023,203, 337-346.

Local gate enhanced correlated phases in twisted monolayer-bilayer graphene

毛金海

¹ 中国科学院大学, 北京, 邮编 100049

*Email: jhmao@ucas.ac.c

摘要: To understand the complex physics of a strongly correlated system, it is ideal to have control over and monitor its electronic properties while adjusting the external field. The twisted van der Waals heterostructure provides such an unprecedented opportunity with the great tunability of its correlated phases by an external electric field. Additionally, scanning tunneling microscope (STM) serves as a powerful tool for revealing these strong correlation effects. Our previous success includes utilizing the STM tip to create a perfect PN junction surface and detect the transition from an atomic collapse state to a whisper gallery mode on the surface of graphene. we present further investigations into the tunable correlated phases in twisted monolayer-bilayer graphene (tMBG) using an STM tip integrated with a high displacement field. We found that the functionalized tip enhances the displacement field and directly leads the system into the correlated insulating regimes. Through our technique, we have been able to achieve the correlated insulating states in the hole-doping regime of tMBG, due to the remarkably enhanced Coulomb interaction strength in our device configuration. Our work shed light on exploring and manipulating the novel quantum phases in larger parameter space, wherein the different ground states are expected due to the diverse band topology and width.

关键词: functionalized tip, scanning tunneling microscope (STM), strongly correlated system

参考文献:

- [1] “Tuning a Circular p-n Junction from Quantum Confinement to Optical Guiding” *Nature Nanotech.* 12, 1045-1049 (2017)
- [2] “Local gate enhanced correlated phases in twisted monolayer-bilayer graphene” under reviewed

利用极低温超高真空 STM 研究铁基超导体表面两类褶皱

曹路^{1,2} 刘文尧^{1,2} 李更^{1,2*} 丁洪^{1,2*} 高鸿钧^{1,2*}

¹ 中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190;

² 中国科学院大学物理科学学院, 北京, 邮编 100049

*Email: gengli.iop@iphy.ac.cn dingh@iphy.ac.cn hjgao@iphy.ac.cn

摘要: 在铁基超导体中, 由于具有多电子轨道、多费米面的特点, 使得其表现出丰富的物性和演生现象, 并且在不同体系中有所差异。特别地, 当处于压力或应力条件下, 可能涌现出更多新奇的物性。超高真空极低温扫描隧道显微镜 (STM) 是在微观尺度下研究超导体物性的重要研究手段。在本项研究中, 我们利用 STM 研究铁基超导体 LiFeAs 表面的两类褶皱及其对超导电性的影响[1]。高质量的 LiFeAs 样品首先在超高真空腔体中解理, 然后快速转移到 STM 中。利用 STM, 我们可以在 LiFeAs 表面寻找到两类褶皱结构, 并对其原子分辨级别的形貌学成像和局域微分电导谱进行测量。实验结果表明第一类褶皱增强超导能隙和超导转变温度, 然而第二类褶皱明显地压制超导电性。在褶皱上的磁通涡旋破坏了体系原本具有的

C_4 对称性, 只表现出 C_2 对称性。通过统计, 我们发现两类褶皱可以根据其空间取向进行分类。我们的结果证明, 在 LiFeAs 中不同方向的局域应力对超导序参量有不同的调控作用。同时暗示着在铁基超导体中单方向的应力或压力引起的能带移动在改变物性方面扮演重要角色。

关键词: 超高真空, 极低温扫描隧道显微镜 (STM), LiFeAs, 表面褶皱, 超导电性

参考文献:

[1] L. Cao, W. Liu, G. Li*, G. Dai, Q. Zheng, K. Jiang, S. Zhu, L. Huang, L. Kong, F. Yang, X. Wang, W. Zhou, X. Lin, J. Hu, C. Jin, H. Ding*, H.-J. Gao*, “Two distinct superconducting states controlled by orientations of local wrinkles in LiFeAs”, *Nature Communications* 12, 6312 (2021).

转角单-双层石墨烯中电子晶体和拓扑物相的空间成像

王政文^{1,2} 李思宇^{1,2,3} 姜宇航^{2*} 毛金海^{1*}

¹ 中国科学院大学物理科学学院, 中国科学院拓扑量子计算卓越中心, 北京, 邮编 100049;

² 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 中国科学院大学材料科学与光电工程研究中心, 北京, 邮编 100049

³ 中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190

*Email: yuhangjiang@ucas.ac.cn; jhmao@ucas.ac.cn

摘要: 转角单-双层石墨烯中兼具强关联物性和拓扑非平庸平带结构, 是研究新奇量子物理效应的理想平台。为揭示该体系中强关联效应和拓扑物性, 我们利用载流子浓度可调的扫描隧道显微镜

对转角单双层石墨烯异质结进行显微谱学研究。我们观测到，在平带整数填充下，莫尔超晶格各高对称点的平带填充行为具有很大的差异。进一步通过提取空间中有效电子填充数显示整数填充下莫尔超晶格原胞中平带电子重新分配形成规则排布的电子晶体。此外，空间显微谱学成像显示环状阵列图案，结合体系拓扑非平庸能带结构，我们推测这些环状结构是拓扑物相的空间呈现。这些结果表明在转角单-双层石墨烯体系中同时存在强关联诱导的电子晶体和拓扑物相，二者的结合或将激发出更为奇异的量子效应，为揭示强关联和拓扑物性相互作用体系的探索提供了新思路。

关键词：扫描隧道显微镜（STM），转角单-双层石墨烯，莫尔平带，强关联，电子晶体，拓扑物性

参考文献：

[1] S. Y. Li, Z. W. Wang, Y. C. Xue, Y. B. Wang, S. H. Zhang, J. P. Liu, Z. Zhu, K. Watanabe, T. Taniguchi, H. J. Gao, Y. H. Jiang, * J. H. Mao, * “Imaging Topological and Correlated Insulating States in Twisted Monolayer-Bilayer Graphene”. *Nat Commun* 13, 4225 (2022).

LiFeAs 中实现涡旋马约拉纳零能模

朱诗雨¹ 孔令元¹ 曹路¹ 丁洪¹ 高鸿钧^{1*}

¹中国科学院物理研究所，邮编 100190

*Email: hjgao@iphy.ac.cn

摘要： The iron-based superconductor is emerging as a promising platform for Majorana zero mode, which can be used to implement topological quantum computation. One of the most significant advances of this platform is the appearance of large vortex level spacing that strongly protects Majorana zero mode from other low-lying quasiparticles. Despite the advantages in the context of physics research, the inhomogeneity of various aspects hampers the practical construction of topological qubits in the compounds studied so far. Here we show that the stoichiometric superconductor LiFeAs is a good candidate to overcome this obstacle. By using scanning tunneling microscopy, we discover that the Majorana zero modes, which are absent on the natural clean surface, can appear in vortices influenced by native impurities. Our detailed analysis reveals a new mechanism for the emergence of those Majorana zero modes, i.e. native tuning of bulk Dirac fermions. The discovery of Majorana zero modes in this homogeneous material, with a promise of tunability, offers an ideal material platform for manipulating and braiding Majorana zero modes, pushing one step forward towards topological quantum computation.

关键词： LiFeAs, Majorana zero modes, vortex, scanning tunneling microscopy

参考文献：

[1] Lingyuan Kong#, Lu Cao#, Shiyu Zhu#, Michał Papaj#, Guangyang Dai, Geng Li, Peng Fan, Wenyao

Liu, Fazhi Yang, Xiancheng Wang, Shixuan Du, Changqing Jin, Liang Fu, Hong-Jun Gao*, Hong Ding*, Majorana zero modes in impurity-assisted vortex of LiFeAs superconductor. *Nature Communications* 12, 4146 (2021).

Prediction of Two-Dimensional Quantum Topological Materials Based on Metal Organic Frameworks

张礼智

国家纳米科学中心理论室, 北京, 邮编 100190

Email: zhanglz@nanoctr.cn

摘要: Two-dimensional topological materials, such as quantum spin/anomalous Hall insulators (QSHI/QAHI), are a highly promising class of materials for spintronic devices and quantum computations. To date, the investigations of topological materials are mainly focused on inorganic systems. Compared to the inorganic materials, organic materials have potentially the advantages of low cost, easy fabrications, and mechanical flexibility. Here, we propose several 2D organic topological materials in three families of 2D metal (M) organic frameworks (MOF): $M_2(\text{DCA})_3$ ($M = \text{Cu, Au}$), $M_2(\text{DCB})_3$ ($M = \text{Cu, Au}$) and $M_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ ($M = \text{Re, Pt}$). First-principles calculations show that $M_2(\text{DCA})_3$ ($M = \text{Cu, Au}$) are intrinsic QSHI which have been synthesized in experiment, $M_2(\text{DCB})_3$ ($M = \text{Cu, Au}$) are intrinsic QAHI, and $M_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ ($M = \text{Re, Pt}$) are room-temperature QAHI with the spin-orbit coupling gaps $>120\text{meV}$ and Curie temperature $>300\text{ K}$. Based on the orbital and tight-binding model analysis, we also confirm their topological properties and explain the original of these properties. Our findings not only enrich the families of the topological materials, but also provide a new avenue to track these materials in the 2D MOF systems.

关键词: 二维金属有机复合材料, 拓扑绝缘体, 反铁磁半导体

参考文献:

- [1] L. Z. Zhang, Z. F. Wang, B. Huang, B. Cui, Z. M. Wang, S. X. Du, H. J. Gao, F. Liu, "Intrinsic two-dimensional organic topological insulators in metal-dicyanoanthracene lattices", *Nano Letters*, 16(3): 2072-2075 (2016).
- [2] Y. X. Gao, Y. Y. Zhang, J. T. Sun, L. Z. Zhang, S. B. Zhang, S. X. Du, Quantum anomalous Hall effect in two-dimensional Cu-dicyanobenzene coloring-triangle lattice, *Nano Research*, 13(6): 1571-1575 (2020).

范德华超导/铁磁/超导异质结中长程趋肤的约瑟夫森电流

胡国静¹, 王昌龙¹, 王莎莎¹, 张颖¹, 冯艳¹, 王志^{2*}, 牛谦³, 张振宇⁴, 向斌^{1*}

¹ 中国科学技术大学材料科学与工程系, 安徽合肥 230026

² 中山大学物理学院, 广东广州 510275

³ 中国科学技术大学物理科学学院, 安徽合肥 230026

⁴ 中国科学技术大学国际功能量子设计中心材料 (ICQD), 安徽合肥 230026

Email: wangzh356@mail.sysu.edu.cn; binxiang@ustc.edu.cn

摘要: 铁磁性和超导性是两个相互抑制的宏观有序物性, 但是近年来, 人们在理论和实验上发现在超导体/铁磁体界面近邻诱导出的自旋三重态超导电流能够在铁磁体中无耗散输运很长距离, 因此对自旋三重态超导电流的研究对发展新型的量子信息器件具有重要的意义。高质量杂化的超导/铁磁体系是自选三重态出现的关键, 而传统的超导/铁磁薄膜体系会由于薄膜质量以及晶格失配、原子扩散等界面结构缺陷影响器件的性能, 而二维范德华材料以其易解离和厚度依赖的结构特性为研究高质量界面效应以及制备低散射、低缺陷的器件提供了极佳的实验平台。本研究工作首次利用范德华铁磁金属 Fe_3GeTe_2 桥接两个单重态超导体 NbSe_2 , 构筑了一个平面范德华约瑟夫森 S/F/S 器件。通过对不同通道长度的 S/F/S 器件低温电学测试, 观察到器件显现零电阻态以及长程超导电流 (~300 nm)。更有趣的实验结果是, 该长程超导临界电流对垂直于超导电流通道的外加磁场的响应, 呈现出类似双缝干涉的周期性震荡图案。这个结果证实 S/F/S 中存在不同于传统体相通道的约瑟夫森超导电流, 而是具有长程趋肤效应的约瑟夫森超导电流。针对该长程超导电流的趋肤效应, 本研究团队提出了两种可能的竞争物理机制。该平面异质结构的 S/F/S 设计, 为探索铁磁性与超导性的相互作用, 提供了一个新的研究视角。该异质结构呈现的新奇物性, 为二维超导自旋电子学的新型量子功能器件的潜在应用以及实现拓扑超导提供了一个新的平台。

关键词: Fe_3GeTe_2 , NbSe_2 , 约瑟夫森异质结, 长程超导电流, 趋肤效应

参考文献:

[1] G. Hu, C. Wang, S. Wang, Y. Zhang, Y. Feng, Z. Wang*, Q. Niu, Z. Zhang, and B. Xiang*. Long-range skin Josephson supercurrent across a van der Waals ferromagnet. *Nat. Commun.* 14, 1779 (2023).

关联电子体系的实空间电子局域组装与操控研究

董皓宇 1,2 戴佳琦 1,2 耿燕燕 1,2 雷乐 1, 2 季威 1,2 程志海 1,2*

1 中国人民大学理学院物理系, 北京市光电功能材料与器件重点实验室, 北京, 邮编 100872

2 中国人民大学物理学系, 量子态构筑与测控教育部重点实验室, 北京, 邮编 100872

*Email: zhihaicheng@ruc.edu.cn

摘要: 当电子之间的库仑排斥能超过它们的动能时, 材料中的电子就会以规则且类似晶体的方式排列, 形成维格纳晶体。这种表现为粒子性质的电子有可能实现实空间的直接操纵, 并发现新的物理效应。我们选择了过渡金属硫族化合物材料 TaS_2 来研究粒子性电子, 在 TaS_2 中 Ta 的电子结构决定了每个 Ta 原子具有一个未配对的电子。对于 1T 相的 TaS_2 , 其在低温下具有电荷密度波性质, 每 13 个 Ta 原子聚集形成 David Star(DS), 使得只有中心的 Ta 原子具有未配对的电子, 这使其符合莫特模型, 这种关联电子体系很适合用于研究粒子性电子。

课题组团队提出了一种用少量 Ti 掺杂的方法来调控关联电子填充数, 并利用扫描隧道显微镜作为实空间的表征手段来研究关联电子之间的相互作用。Ti 原子比 Ta 原子少一个最外层电子, 用 Ti 替换 Ta 之后可以在不改变原子晶格的情况下使得对应的 DS 不再具有未配对电子, 在负偏压下表现为三瓣状的 Triangular Star(TS)。通过改变 Ti 的掺杂浓度, 可以进一步研究关联电子之间的相互作用。为此我们提出了扩展的莫特模型, 并在实验上观测到了局域的 TS 重构。随后, 我们通过施加脉冲的方式实现对莫特电子及电荷密度波的操纵, 在关联电子体系的研究中做出了有益的尝试。

关键词: 扫描隧道显微镜, 关联电子体系, 电荷密度波, 过渡金属硫族化合物

参考文献:

- [1] H.Y. Li, S.W. Li, E.C. Regan, D.Q. Wang, W.Y. Zhao, S. Kahn, K. Yumigeta, M. Blei, T. Taniguchi, K. Watanabe, S. Tongay, A. Zettl, M. F. Crommie, F. Wang, “Imaging two-dimensional generalized Wigner crystals”, *Nature*. 597, 650-654 (2021).
- [2] X. Huang, T. Wang, S.N. Miao, C. Wang, Z.P. Li, Z. Lian, T. Taniguchi, K. Watanabe, S. Okamoto, D. Xiao, S.F. Shi, Y.T. Cui, “Correlated insulating states at fractional fillings of the WS_2/WSe_2 moiré lattice”, *Nat. Phys.* 17, 715-719 (2021)

笼目超导体中单向条纹电荷序的发现及其鲁棒性

耶郁晗^{1,2} 胡彬^{1,2} 陈辉^{1,2*} 高鸿钧^{1,2}

¹ 中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190;

² 中国科学院大学物理科学学院, 北京, 邮编 100049

*Email: hchenn04@iphy.ac.cn

摘要: 钒基 kagome 材料 AV_3Sb_5 ($A = K, Rb, Cs$) 由于具有非常规超导、反常霍尔效应、电荷密度波和配对密度波等新奇物性而备受关注。除了三种 AV_3Sb_5 中普遍存在面内 2×2 超晶格调制的电荷密度波 (Charge Density Wave, CDW) 外, 在 RbV_3Sb_5 和 CsV_3Sb_5 的 Sb 表面还观察到了 $1 \times 4(4a_0)$ 单向条纹序, 而该 $4a_0$ 条纹序的稳定性和电子性质仍存争议。本工作通过使用极低温扫描隧道显微镜/谱 (Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy, STM/S) 的方法, 系统地研究了 CsV_3Sb_5 中 Sb 面上的 $4a_0$ 条纹电荷序。研究发现该 $4a_0$ 条纹序在较大的能量范围内稳定存在, 并且正偏压和负偏压的 STM 图像有对比度反转的特性, 这是 Peierls 型电荷密度波的标志。此外, 在约 60K 的临界温度以下, $4a_0$ 条纹序不受最顶层 Cs 原子密度、点缺陷、表面台阶和面外磁场的影响, 具有鲁棒性。本工作为 CsV_3Sb_5 中存在单向电荷密度波序提供了实验证据。

关键词: 超高真空, 扫描隧道显微镜/谱 (STM/S), kagome 超导体, 电荷密度波 (CDW)

参考文献:

- [1] H. Chen, H. T. Yang, B. Hu, Z. Zhao, J. Yuan, Y. Q. Xing, G. J. Qian, Z. H. Huang, G. Li, Y. H. Ye, S. Ma, S. L. Ni, H. Zhang, Q. W. Yin, C. S. Gong, Z. J. Tu, H. C. Lei, H. X. Tan, S. Zhou, C. M. Shen, X. L. Dong, B. H. Yan, Z. Q. Wang*, and H. J. Gao*. "Roton pair density wave in a strong-coupling kagome superconductor". *Nature* 599, 222-228 (2021)
- [2] B. Hu, Y. H. Ye, Z. H. Huang, X. H. Han, Z. Zhao, H. T. Yang, H. Chen* and H. J. Gao. "Robustness of the unidirectional stripe order in the kagome superconductor CsV_3Sb_5 ". *Chin. Phys. B* 31, 058102 (2022)

化学掺杂笼目超导体扫描隧道显微镜研究

韩相和^{1,2} 黄子豪^{1,2} 赵振^{1,2} 陈辉^{1,2*} 杨海涛^{1,2} 高鸿钧^{1,2*}

¹ 中国科学院物理研究所北京国家凝聚态物理研究中心, 北京, 邮编 100190;

² 中国科学院大学物理科学学院, 北京, 邮编 100049

*Email: hchenn04@iphy.ac.cn

hjpgao@iphy.ac.cn

摘要: 笼目超导体 CsV_3Sb_5 因其中的电荷密度波 (CDW)、电荷向列性以及与非非常规超导共存的配对密度波^[1,2] (PDW) 等新奇物理现象受到广泛关注。研究 CDW 和非非常规超导的起源, 及其与其

它电子态的关联对揭开奇异电子序的微观起源具有重要意义。化学掺杂可以对体系引入电子或者空穴,是一种研究量子材料不同电子序演化关联的有效手段。在这里,基于扫描隧道显微镜(STM),我们首次报道了 Ti 元素掺杂的 CsV_3Sb_5 中奇异电子序和超导关联演化的结果,揭示出两个不同的超导相^[3]。我们发现, Ti 原子取代笼目晶格层的 V 原子位置。Ti 掺杂量较低时,超导在扫描隧道谱(STS)中表现为非常规 V 型超导能隙,周期为 $4a_0$ 和 $2a_0 \times 2a_0$ 的 CDW 与 PDW 被减弱抑制。在 Ti 掺杂浓度较高时,体系的超导转变为 U 型超导能隙, CDW、PDW 被完全抑制,与此同时出现条形状短程电子序,意味着与低掺杂完全不同的第二个超导相出现。此外,我们还研究了 V 原子被其它元素(如 Cr 和 Nb)的替位掺杂,结果显示其对 CDW 和超导都存在调制作用。通过对不同掺杂 CsV_3Sb_5 的研究,我们揭示了一个与母体超导相不同的一个全新的超导相,证明了笼目超导体中不同电子态与超导的关联,为笼目超导体中奇异电子态的起源提供了重要启示。

关键词: 扫描隧道显微镜 (STM), 笼目超导体, 化学掺杂, 电荷密度波 (CDW)

参考文献:

- [1] H. Chen, H. T. Yang, B. Hu, Z. Zhao, J. Yuan, Y. Q. Xing, G. J. Qian, Z. H. Huang, G. Li, Y. H. Ye, S. Ma, S. L. Ni, H. Zhang, Q. W. Yin, C. S. Gong, Z. J. Tu, H. C. Lei, H. X. Tan, S. Zhou, C. M. Shen, X. L. Dong, B. H. Yan, Z. Q. Wang*, H. J. Gao *, “Roton pair density wave in a strong-coupling kagome superconductor”, *Nature* 599, 222 (2021).
- [2] H. Chen, B. Hu, Y. H. Ye, H. T. Yang, H. J. Gao*, “Superconductivity and unconventional density waves in vanadium-based kagome materials AV_3Sb_5 ”, *Chinese Phys. B* 31, 097405 (2022).
- [3] H. T. Yang, Z. H. Huang, Y. H. Zhang, Z. Zhao, J. N. Shi, H. L. Luo, L. Zhao, G. J. Qian, H. X. Tan, B. Hu, K. Zhu, L. Y. W. Zou, H. Zhang, J. P. Sun, J. G. Cheng, C. M. Shen, X. Lin, B. H. Yan, X. J. Zhou, Z. Q. Wang, S. J. Pennycook, H. Chen*, X. L. Dong*, W. Zhou*, H. J. Gao*, “Titanium doped kagome superconductor $\text{CsV}_{3-x}\text{Ti}_x\text{Sb}_5$ and two distinct phases”, *Sci. Bull. (Beijing)* 67, 2176 (2022)

E 电子材料与器件、真空微纳电子学
分会邀请报告

片上红外光谱分析器件

王肖沐

南京大学 电子科学与工程学院 南京

*Email: xiaomu.wang@nju.edu.cn

摘要: 红外光谱仪是军事侦查, 化学传感, 环境检测等众多重要应用的核心部件。传统的光谱仪面临成本高昂、设备复杂的应用瓶颈。片上光谱分析芯片, 具有高集成度、价格低廉、机械环境要求宽松的优势, 有望给现有中光谱分析技术带来革命性的突破。本报告讨论系列新型高灵敏片上光谱分析方法和集成器件, 聚焦相关新材料、新原理和新工艺的发展。报告首先讨论基于能带渐变纳米线的集成光谱仪, 介绍计算光谱技术的基本概念和光与物质相互作用核心物理过程。接下来, 报告重点介绍基于黑磷关联电子态的中红外单动态光谱仪, 并展示这些器件在集成化、智能化和多功能化方面的应用。

基于难熔金属钨钼的光电协同电子发射纳米材料

沈岩^{1*} 许宁生¹ 邓少芝¹

¹光电材料与技术国家重点实验室,
广东省显示材料与技术重点实验室,

中山大学电子与信息工程学院, 广州, 邮编 510275

*Email: shenyan7@mail.sysu.edu.cn

摘要: 新一代光电阴极寻求高效率、高亮度、超快超短、可调谐的性能突破, 开发具有大发射电流、高损伤阈值、激元增强特性的新型光电协同纳米冷阴极材料, 是实现该目标的有效途径。相比于半导体阴极, 金属光电阴极在高稳定性、长寿命和低极限真空要求等方面具有应用优势。然而, 传统金属光电阴极的功函数高, 金属表面对光反射系数高、光吸收效率低, 导致其量子效率普遍低下 ($\sim 10^{-4}$ - 10^{-8} 量级)。为解决金属光电阴极的主要问题, 可以从激励源的角度, 在光激励的基础上引入外电场辅助, 发展光电协同激励的新驱动模式。另一方面, 可以从阴极材料的角度, 发展一类高温稳定性好、激光损坏阈值高、电场击穿阈值高、大电流高亮度的难熔金属阴极。进一步地, 可以在上述金属阴极上采用人工设计和制造的微纳结构, 提升阴极对入射光子的吸收效率, 并针对入射光的各种固有属性进行精确选择, 实现对电子发射光响应的灵活调控。

基于此, 我们提出并发展了适用于光电协同电子发射的难熔金属钨钼阴极纳米材料, 系统开展了材料结构设计、可控制备、特性研究与阴极研制, 获得了系列研究成果。具体地, 发展了针对钼微纳结构单晶体的热蒸发气相沉积可控制备技术, 揭示了实现形貌可控、高结晶质量、大尺寸的微纳结构单晶体的制备调控技术及生长机制; 提出了光电协同等离激元介导电子发射新方法, 充分利

用金属纳米结构的等离激元共振特性，获得了在低强度光激励下的高效率电子发射性能；发展了光电协同激励超快电子发射全特性表征技术，原位揭示了构效关系和电子发射物理机制，进一步获得了低能散、高亮度、超快超短的脉冲电子束。

关键词：光电发射，难熔金属，纳米材料，等离激元，大电流，量子效率，超快超短

二维超快闪存器件与应用

刘春森^{1*}

¹复旦大学芯片与系统前沿技术研究院，上海，邮编 200433；

*Email: chunsen_liu@fudan.edu.cn

摘要：随着人工智能和大数据时代的到来，存算一体架构成为发展趋势，存储器性能逐渐成为系统能效的关键。闪存器件由于其可靠性、数据非易失和高密度成为了主流的非易失存储技术，然而，闪存器件仅有百微秒级的编程速度，无法应用于高速存储场景。闪存较慢的编程速度源于隧穿势垒的高度和厚度，二维材料具有原子级的平整界面，并且可在没有外延的情况下进行堆叠组装成合适的异质结构，有望实现闪存速度突破。本报告重点介绍二维闪存在编程速度上的突破以及超快闪存在新型存算一体计算中的应用。

关键词：超快闪存，浮栅晶体管，二维材料，存算一体

个人简介：刘春森，青年研究员，博士生导师。吉林大学微电子学学士，复旦大学微电子学与固体电子学博士，随后在复旦大学计算机学院从事博士后研究，现任职于复旦大学芯片与系统前沿技术研究院。研究方向为新结构、新机理存储逻辑器件设计，以及对应的系统集成研究。主持自然科学基金委青年项目、上海市科委基础特区计划（首批）等项目，曾获中国科协第七届青年人才托举工程、上海市科技创新启明星和复旦大学学术之星。以第一作者和通讯作者发表论文 21 篇，包括 Nature Nanotechnology (6 篇)、Nature Communications、Advanced Materials 和 IEDM 等期刊/会议论文，相关工作被 SCI 高被引 (4 篇)、热点论文 (2 篇) 合集收录，超快存储相关的 3 篇系列工作被 Nature Nanotechnology 撰文评价为范德华异质闪存速度突破的代表性工作。



分会口头报告

范德华异质结电子器件研制及高密度集成研究

刘利伟¹、许宁生^{1,2}、邓少芝²、周鹏³

复旦大学芯片与系统前沿技术研究院, 上海市淞沪路 2005 号交叉一号楼

中山大学电子与信息工程学院, 广州市海珠区新港西路 135 号显材实验室

复旦大学微电子学院, 上海市杨浦区邯郸路 220 号微电子楼

Email: Liweiliu@fudan.edu.cn

摘要: 二维原子晶体材料因具有独特的结构和物理性能, 在微电子器件领域得到广泛研究。利用不同物性的二维材料构建范德华堆垛的异质结构, 有助于产生新机制和新功能。基于此, 我们以半导体特性的 MoS₂、WSe₂, 绝缘特性的 h-BN 等为对象构建了范德华异质结原型器件, 在异质结沟道场效应晶体管、超快闪存器件等方面展开研究, 报道了在正向偏压条件下的恒电流二极管特性, 以及具有自整流效应的基于 MoS₂ 沟道的超快闪存 (20 ns) 特性。此外, 在二维器件与硅工艺融合方面, 我们聚焦讨论了二维材料合成、器件设计和二维器件集成的相关要求, 总结了 2D 材料在以硅为主导的半导体行业中发挥的作用, 并提出了未来发展方向及可能成为主流的技术。最后, 我们在高质量二维材料及范德华异质结界面, 晶圆级二维材料转移和器件高密度集成等方面展开了系列研究, 助力推动新型二维半导体器件的发展。

参考文献:

- [1] L. Liu, C. Liu, X. Huang, S. Zeng, Z. Tang, D. W. Zhang*, P. Zhou*, Tunable Current Regulative Diode Based on Van der Waals Stacked MoS₂/WSe₂ Heterojunction-Channel Field-Effect Transistor, *Adv. Electron. Mater.*, 2022, 8(4):2100869
- [2] L. Liu, Y. Sun, X. Huang, C. Liu, Z. Tang, S. Zeng, D. W. Zhang*, S. Deng*, P. Zhou*, Ultrafast Flash Memory with Large Self-Rectifying Ratio Based on Atomic-thin MoS₂-Channel Transistor, *Mater. Futur.*, 2022, 025301.
- [3] S. Wang#, X. Liu#, M. Xu#, L. Liu#, D. Yang, and P. Zhou*, Two-dimensional devices and integration towards the silicon lines, *Nat. Mater.*, 2022, 21,1225.
- [4] J. Chen#, L. Liu#, J. Huang, H. Chen, N. S. Xu*, S. Deng*, Interface Engineering for High Quality Bubble-free Vertical Van der Waals Heterostructures. (unpublished work)
- [5] L. Liu, Z. Cai, S. Xue, J. Chen, N. S. Xu*, S. Deng*, and P. Zhou2*, Mass Transfer Printing of Wafer-Scale 2D material Arrays for High-Density Devices Integration. (unpublished work)

基于软击穿氧化硅的水平隧穿结电子源

魏贤龙^{1,*} 李志伟¹ 詹芳媛¹ 杨威¹ 吴功涛¹

¹ 北京大学电子学院, 北京市海淀区颐和园路 5 号, 邮编 100871;

*Email: weixl@pku.edu.cn

摘要: 隧穿电子源作为一种片上冷阴极电子源, 具有工作电压低、工作真空要求低等特点, 但由于传统隧穿电子源均采用垂直叠层隧穿结构, 其顶层电极对电子发射具有阻碍作用, 因此存在发射效率低、发射密度小等问题。为了避免传统隧穿电子源中顶层电极对电子发射阻碍, 我们提出了一种基于水平隧穿结构的新型隧穿电子源^[1], 并发展了基于软击穿氧化硅实现水平隧穿结电子源的新方法^[2]。研究表明, 基于软击穿氧化硅的水平隧穿结电子源可以实现高达 83.7% 的发射效率和 4.4×10^5 A/cm² 的发射密度^[3], 远超已报道传统隧穿电子源的最高发射效率 (48.5%) 和最高发射密度 (2.25×10^2 A/cm²)。基于水平隧穿结电子源, 我们还研制了级联隧穿电子源和并行隧穿电子源^[4,5], 在 $600\mu\text{m} \times 600\mu\text{m}$ 面积内实现了 36×36 个并行电子源阵列, 总发射电流达到 1 mA, 整体电流密度达到 0.28 A/cm²^[5]。进一步研究发现, 基于软击穿氧化硅的隧穿电子源工作真空要求低, 能在高达 8 Pa 的低真空下稳定工作^[6]; 还具有很好的阵列均一性, 在 15×15 的并行电子源阵列中实现了 99% 电子源同时工作^[7]。发射效率高、发射密度大、工作电压低、阵列均一性好、工作真空低等特点使得基于软击穿氧化硅的隧穿电子源在片上微真空电子器件等领域具有较好的应用前景。

关键词: 冷阴极, 隧穿电子发射, 氧化硅, 片上电子源, 并行电子源

参考文献:

- [1] Z. W. Li, X. L. Wei*, "A High-Efficiency Electron-Emitting Diode Based on Horizontal Tunneling Junction", *IEEE Electron Device Letters* 40, 1201-1204(2019).
- [2] G. T. Wu, Z. W. Li, D. P. Wei, G. M. Zhang, Q. Chen, L. M. Peng, X. L. Wei*, "Silicon oxide electron emitting nanodiodes", *Advanced Electronic Materials* 4, 1800136 (2018).
- [3] Z. W. Li, Z. F. Zhang, J. M. Tian, G. T. Wu, Y. D. He, B. C. Yu, F. Y. Zhan, Y. W. Wang, M. Sun, W. Yang, Z. H. Li, Q. Chen, P. F. Yan, and X. L. Wei*, "Efficient and Dense Electron Emission from a SiO₂ Tunneling Diode with Low Poisoning Sensitivity", *Nano Letters* 22, 1270-1277 (2022).
- [4] Z. W. Li, X. L. Wei*, "A Cascade Electron Source Based on Series Horizontal Tunneling Junctions", *IEEE Transaction on Electron Devices* 68, 818-821(2021).
- [5] W. Yang, Z. W. Li, Y. W. Wang, J. Shen, D. Wei, X. L. Wei*, "High-Performance On-Chip Electron Sources Based on Electroformed Silicon Oxide", *Advanced Electronics Materials* 6, 2000268 (2020).
- [6] F. Y. Zhan, Z. W. Li, W. Yang, and X. L. Wei*, "Pressure Sensitivity of Electron Emission from SiO_x Tunneling Diodes and their Outstanding Emission Performance under Rough Vacuum", *Advanced Electronics Materials* 8, 2200216 (2022).
- [7] F. Y. Zhan, W. Yang, Z. W. Li, Y. D. He, P. P. Yu, B. J. Wang, and X. L. Wei*, "SiO_x Tunneling Diode Arrays With Uniform Electron Emission", *IEEE Electron Device Letters* 43, 1339-1342(2022).

六硼化镧纳米锥冷阴极点电子源的研究及其在 TEM 中的应用

唐帅^{1,2*} 唐捷² 秦禄昌³

¹显示材料与技术广东省重点实验室、光电材料与技术国家重点实验室、中山大学电子与信息工程学院, 广东广州, 邮编 510275;

²日本国立材料研究所, 日本筑波, 邮编 305-0032;

³美国北卡罗来纳大学教堂山分校, 物理与天文系, 美国教堂山, 邮编 27599-3255;

*Email: tangsh58@mail.sysu.edu.cn

摘要: 冷阴极点电子源由于具有高亮度、低电子能量发散、低功耗、长寿命、高分辨率等优势, 广泛应用于现今最佳性能的电子束设备中。现今唯一商用的钨冷阴极点电子源, 其电子光学特性仍然存在波动性大、衰退迅速、功函数高等不足。自钨冷阴极点电子源使用五十年以来, 尽管已经有大量关于新型冷阴极点电子源的研究, 难以兼具高亮度、低能量发散且稳定发射的难点仍未得到解决。本文通过聚焦等离子法可控制备了尖锐曲率半径 (~20 nm) 的六硼化镧纳米锥冷阴极。在 10^{-7} Pa 的场发射真空腔内, 对其电子光学特性进行表征。其尖锐尖端导致其场发射像为单个发射点, 约化亮度高达 10^{10} A/m²/sr/V, 理论计算能散低至 0.17 eV, 且能以小于 1% 的波动性连续稳定工作 16 h, 总测试寿命大于 1000 小时^[1]。进一步, 将其置于球差校正透射电镜中进行性能测评, 在 60 kV 加速电压下, 得到了与商用钨电子源同等的亚埃级 (96 pm) 的空间分辨率, 并且在同等探针电流下得到了比钨电子源更小的电子能量发散。此外, 其能以小于 1% 的波动性在连续 100 小时内稳定工作, 是现今报道的最稳定的冷阴极点电子源, 比商用钨冷阴极电子源的稳定性提升了十倍以上^[2]。该工作展现了六硼化镧纳米锥冷阴极极大的实际应用前景及革新电子显微镜、芯片电子束检测/加工设备的潜力。

关键词: 冷阴极, 点电子源, 六硼化镧, 纳米锥, 亚埃级分辨率, 稳定发射

参考文献:

- [1] S. Tang, J. Tang, * J. Uzuhashi, T. Ohkubo, W. Hayami, J. S. Yuan, M. Takeguchi, M. Mitome and L.-C. Qin, * "A stable LaB₆ nanoneedle field-emission point electron source", *Nanoscale Adv.* 3, 2787–2792 (2021).
- [2] S. Tang, J. Tang, * E. Okunishi, Y. Ninota, A. Yasuhara, J. Uzuhashi, T. Ohkubo, M. Takeguchi, J. S. Yuan and L.-C. Qin, * "A stable LaB₆ nanoneedle field-emission electron source for atomic resolution imaging with a transmission electron microscope", *Mater. Today* 57, 35–42 (2022).

一种铼钨基浸渍敷膜钡钨阴极的逸出功

王小霞^{1*} 杨明哲^{1,2} 孟鸣凤¹ 王兴起^{1,2} 李云¹ 张琪¹ 赵青兰¹

¹ 中国科学院空天信息创新研究院, 中国科学院高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190

² 中国科学院大学, 北京 100190

*Email : xxwang@mail.ie.ac.cn

摘要: 浸渍钡钨阴极作为电子源主要运用于行波管、速调管及阴极射线管等真空电子器件中。这些器件作为功率放大器或功率源主要应用于各种雷达、卫星、大科学工程装置及医疗 CT 等。为了满足不同时期上述装置对器件的需求, 在过去几十年, 发展了多种类型的浸渍钡钨阴极^[1-3], 其中最为突出且应用最为广泛的是浸渍覆膜钡钨阴极^[4]。而高铼酸铵浸渍钨基敷膜钡钨阴极具有比普通浸渍敷膜阴极更优异的长寿命性能^[5]。

本文主要介绍了这种阴极在寿命过程中阴极有效逸出功的变化。结果表明: 寿命初期, 该阴极有效平均逸出功 1.75eV, 不同发射电流密度逸出功曲线几乎相同, 且分布范围较窄。在阴极温度 1000-1010°Cbr, 支取发射电流 3A/cm², 连续工作 41517 小时后, 阴极发射电流下降至初始发射的 90%, 逸出功上升为 1.84eV。连续工作 65346 小时后, 阴极发射电流下降至初始发射的 80%, 逸出功上升为 1.92eV。在阴极寿命过程中, 浸渍在铼钨基中钡的供给逐渐衰竭, 钡扩散到阴极表面的速率减少, 造成表面钡覆盖度的降低, 功函数逐渐升高。

关键词: 浸渍敷膜钡钨阴极, W-Re 基底, 发射电流, 蒸发率, 寿命

参考文献

- [1] P. Zalm and A. Van Stratum, "Osmium dispenser cathodes", Philips Tech. Rev. Vol. 27, no. 3-4, pp. 69-75, 1966.
- [2] R.L.Lves et al., "Controlled porosity cathodes from sintered tungsten wires" IEEE Trans. Electron Devices, Vol.52, No.12, pp2800-2805, 2005.
- [3] 王小霞, 张永清, 丁耀根等, 一种用于医疗加速器栅控电子枪阴极的研制, 真空科学与技术学报, Vol.35, no.4, pp.468-473, 2015.
- [4] Ji Li, Zhiqiang Yu, Wensheng Shao, Ke Zhang et al. "High current density M-type cathode for vacuum electron devices", Appl. Sur. Sci. Vol. 251, no. 1-4, pp. 151-158, 2005.
- [5] Xiaoxia Wang, Mingwei Hu, Shikai Qi et al, "Preparation and Performance of the Ammonium Perrhenate Impregnated W Matrix Ba-W Cathode", 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference, Beijing, China, 4.28-30, 2015.

硫系相变材料与可调谐色彩滤光片

何强

华中科技大学集成电路学院, 湖北武汉, 430074

qianghe@hust.edu.cn

报告摘要: 基于平面薄膜或超表面等光学微结构的光学滤波器件由于其独特的光学特性、良好的工艺兼容性、突出的可集成性等优势在显示、探测、成像、遥感、印刷等诸多领域有着广阔的应用前景。近年来, 硫系化合物相变材料以其较大的折射率对比度、快速可逆且非易失的开关特性, 在可调谐光学薄膜领域引起了极大的关注。本报告从硫系化合物相变材料的基本特性出发, 围绕其在可调谐色彩滤光膜及器件的研究进展, 包括可应用于彩色电子纸的反射式滤光器件、图像传感器用色彩滤光阵列以及真彩色激光打印。

报告人简介: 何强, 华中科技大学集成电路学院讲师, 2013 年本科毕业于华中科技大学光电学院, 2018 年 3 月获华中科技大学微电子学与固体电子学博士学位, 博士期间在牛津大学材料系 Harish Bhaskaran 教授团队访问研究。博士毕业后在华为终端公司担任高级工程师, 负责终端产品开发, 目前兼任中国材料与试验标准化委员会委员。一直从事基于硫系相变材料的新兴光电子器件研究, 研究方向包括相变存储器、可调谐滤光片等。主持/参与多项国家级、省部级及华为公司合作项目, 主持发布多项公司级标准及相变存储器测试方法团体标准, 在 *iScience*、*IEEE EDL*、*APL*、*Optics Express* 等期刊上发表 SCI 论文 18 篇, 已授权/受理发明专利 10+ 项。

多功能范德华铁电异质结双栅耦合器件

靳吉友^{1,2} 李勇军^{1,2*} 孙连峰^{1,2*}

¹ 中国科学院国家纳米科学中心纳米系统与多级次制造重点实验室, 北京, 邮编 100190;

² 中国科学院大学, 北京, 邮编 100190

*Email: jinjy2019@nanoctr.cn

摘要: 铁电材料⁽¹⁾ 由于其可切换的电极化一直引起人们的广泛关注。然而, 当尺寸降至纳米级时, 传统铁电材料的铁电性将被去极化场消除。近年来有实验证实二维铁电材料⁽²⁾ 在超薄尺度上保持稳定的铁电性, 不过稳定有效地控制铁电极化仍然是一个挑战。在这里, 我们结合 ReS_2 、 h-BN 和二维铁电材料 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 构建范德华异质结构 (vdWHs), 采用双栅耦合配置可以稳定有效极化铁电 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$, 可以充当高性能非易失性存储器、可编程整流器和负电容场效应晶体管。作为非易失性存储器, 具备大存储器窗口、大开/关比 (10^6)、超低编程状态电流 (10^{-13} A) 和长时间耐用性 (10^4 s)。作为可编程整流器, 具有广泛的栅极可调整流行为, 并且具有大整流比 (3×10^5)。同时使用顶栅结构时, 器件可以表现出良好的负电容场效应晶体管性能, 表现出陡峭的亚阈值区域, 有效降低功耗。此研究揭示了铁电范德华异质结器件的广泛应用前景。

关键词: 铁电材料, 范德华异质结(vdWHs), 双栅耦合, 非易失性存储器, 整流器, 负电容晶体管

参考文献:

- [1] A Century of Ferroelectricity. Nat. Mater. 2020, 19 (2), 129–129.
[2] Qi, L.; Ruan, S.; Zeng, Y. Review on Recent Developments in 2D Ferroelectrics: Theories and Applications. Adv. Mater. 2021, 33 (13), 2005098.

碳纳米管冷阴极太赫兹回旋管及成像系统研究

袁学松^{1*} 张宇² 毛瑾莹¹ 江昊昌¹ 鄢扬¹ 邓少芝²

¹电子科技大学电子科学与工程学院, 四川成都, 邮编 611731;

²中山大学电子与信息工程学院, 广东广州, 邮编 510275

*Email: yuanxs@uestc.edu.cn

摘要: 太赫兹辐射源是发展太赫兹科学技术的核心元器件, 真空电子太赫兹回旋管是目前太赫兹频段输出功率最大的辐射源之一。基于碳纳米管冷阴极研制的太赫兹回旋管相对于热阴极具有启动快、输出信号稳定等特点, 更加适合应用于太赫兹成像系统。采用电子科技大学与中山大学联合研制的 0.4THz 十瓦级碳纳米管冷阴极回旋管搭建成像系统, 利用太赫兹检波器和电动位移台对不同材料物体进行了透射和反射成像研究, 获得相关成像实验结果, 验证基于碳纳米管冷阴极太赫兹辐射源研制雷达成像系统的可行性。

关键词: 太赫兹源, 碳纳米管, 太赫兹成像, 场致发射

Ka 频段 1kW 脉冲空间行波管的研制

周朝阳* 孙萌 成红霞 胥辉 刘逸群

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 千瓦级大功率毫米波空间行波管可配套用于国产新一代高分辨率星载SAR卫星系统。本文介绍了国营772厂Ka波段1kW脉冲空间行波管的整体设计和研制进展, 样管已实现3GHz带宽范围内, 脉冲输出功率 ≥ 1 kW, 占空比20%, 增益 ≥ 42 dB, 总效率52%以上, 带内功率波动 < 0.8 dB, 外形尺寸298mm \times 92mm \times 68.6mm, 重量1.9kg的技术状态, 指标达到国际先进水平。

关键词： Ka 波段，1kW，脉冲空间行波管，小型化（轻量化）

参考文献：

- [1] 安文韬.国外星载 SAR 系统未来计划及发展趋势【J】.中国遥感应用协会，2011
- [2] 周朝阳.Ka 波段 1kW 脉冲行波管研制【J】.《华东三省一市论文集》，2019

F 显示技术
分会邀请报告.

连续光学变焦的 2D/3D 显微技术

王琼华* 刘超 储繁

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

*Email: qionghua@buaa.edu.cn

摘要: 提出并研制了一种连续光学变焦的 2D/3D 显微镜。该显微镜的物镜采用液体透镜, 通过电压改变液体透镜的曲率实现连续光学变焦, 并经过光学优化校正了像差。利用液晶透镜阵列与 2D 显示屏的精密耦合实现 2D/3D 兼容显示。研制的显微镜样机实现了连续光学变焦和实时校正像差, 其变焦响应时间仅约 50 毫秒, 且具有 2D/3D 兼容显示功能, 具有广阔的应用前景。

关键词: 液体透镜, 显微镜, 连续光学变焦, 2D/3D 显示

参考文献:

- [1] C. Liu, Z. Jiang, X. Wang, Y. Zheng, Y. W. Zheng, Q. H. Wang*, “Continuous optical zoom microscope with extended depth of field and 3D reconstruction”, *PhotonIX*, 3, 20 (2022).
- [2] F. Chu, Y. Q. Guo, Y. X. Zhang, W. Duan, H. L. Zhang, L. L. Tian, L. Li, Q. H. Wang*, “Four-mode 2D/3D switchable display with a 1D/2D convertible liquid crystal lens array”, *Optics Express*, 29, 37464-37475 (2021).

高时空分辨太赫兹成像技术及研究进展

王天武

中科院空天信息研究院 粤港澳大湾区研究院 广州

*Email: wangtw@aircas.ac.cn

摘要: 太赫兹位于微波与远红外之间, 已经成为物理学、材料学、生物医学等交叉学科发展的全新认知手段。本次报告将介绍课题组研制的一系列高水平太赫兹实验研究平台, 包括泵浦探测系统、超宽带 (1-30THz) 太赫兹时域波谱系统、近场成像系统等, 以及在二维材料研究方面取得的成果等, 同时围绕高时空分辨太赫兹扫描隧道显微镜技术研究进展进行汇报, 包括宽带太赫兹载波包络相位控制器的研制, 以及近期在太赫兹近场波形原位探测上取得的成果。

低功耗电子纸的器件机理与未来应用

楊柏儒

中山大学光电材料与技术国家重点实验室，广东省显示材料与技术重点实验室，电子与信息工程学院，广东广州，邮编 510275；

*Email: paulyang68@me.com

摘要：随着物联网、人工智能与元宇宙科技应用的到来，人们对新型显示设备的需求更加迫切。电泳显示器（EPD）具有良好的阅读体验、超低功耗、独特的反射式显示结构和双稳态特性。黑白单色电子纸的商业化成功使人们看到了电泳显示器在下一个显示时代的应用潜力，低功耗快速响应的电子纸显示出了广阔的应用前景，包括户外广告牌、电子价签、电子纸装饰品以及各种可穿戴显示设备等，为迎接万物互联的物联网时代的未来显示技术做好准备。

Speaker Photo, Biography & Abstract

演讲人照片,简历

Photo 照片



Biography 简历

杨柏儒，中山大学教授/博导，担任 SID 2023 国际显示学会总会议程主席、SID 2022 国际显示学会总会议程副主席、美国 SID 年会 DW2021 Seminar 主席、中国 ICDT 2020 显示大会议程主席、SID China 电子纸和柔性显示技术委员会副主席、2017 国际 SID 柔性显示专业委员会主席、日本显示学会 Oversea Advisory Board 成员、韩国 IMID 显示学会技术委员、JSID 显示学会期刊副主编等数个学术职务。从事光电显示研究，在柔性显示与电子纸的研发成果已经进入产品化。发表 SCI/会议论文 100 余篇，国内外授权专利 40 余项，主持 863 计划/青年基金等国家级课题/项目 3 项，应邀在国际会议做邀请报告 30 余次，并获国际显示学会总会 SID 2022 最佳论文奖，国际显示学会总会 SID 2016 最佳论文奖，日本显示学会 IDW 2019 最佳论文奖，国际显示学会总会 SID 2021 总裁表彰奖，国际显示学会北京分会 SID 2021 特殊贡献奖等。

Holographic Waveguide Display Technology

Yuning Zhang

Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization,
School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, CHINA

Augmented reality (AR) has received huge attentions nowadays. Generally, an AR system should Combine Real and Virtual Images. At the same time, the virtual content can interact with the real word in real-time and appear fixed in space. Different from the virtual reality, the see-through ability is an important feature for an AR system. To obtain the See-through ability. Typically, an off-axis optical system is required to combine the real and virtual image.

However, the traditional optical structure illustrated in the figure suffers limited field-of-view and exit pupil size, which is due to the inverse relation between exit pupil size and field of view. In addition, such structure is usually heavy and bulky, which also limits its application scenario.

As an alternative, the waveguide structure has been proposed for years. The advantage of the waveguide structure is that it is easy to obtain a larger exit pupil by multiple total internal reflections when propagating the light in the waveguide subtract. Specially, all the couplers are thin film gratings, so such waveguide scheme makes the system as slim as possible. For such planar waveguide structure, the elemental display system includes the micro display, collimation part, coupling or turning gratings, a planar guide. This paper will review the progresses in such aspects from the view for AR applications. Special focus will be on the coupling gratings, and especially the polarization volume grating technology.

反射式电子纸显示

周国富^{1, 2*} 唐彪¹ 袁冬¹ 孙海玲¹ 蒋洪伟¹

¹华南师范大学, 华南先进光电子研究院, 广东省光信息材料与技术重点实验室&彩色动态电子纸显示技术研究所, 中国广州, 510006;

²深圳市国华光电科技有限公司, 中国深圳, 518110

*Email: guofu.zhou@m.scnu.edu.cn

摘要: 基于环境光显示的反射式电子纸显示具有能耗低、无光辐射、护眼等优点。本报告聚焦电子纸显示现状及彩色化、视频化发展趋势, 探索其在强交互需求的主流显示场景应用, 点燃蓄势爆发的反射式显示产业“增量市场”。

关键词: 反射式显示, 电润湿电子纸, 彩色视频, 低碳护眼

分会口头报告

颜色-亮度独立可调的氮化镓-钙钛矿叠层电致发光器件

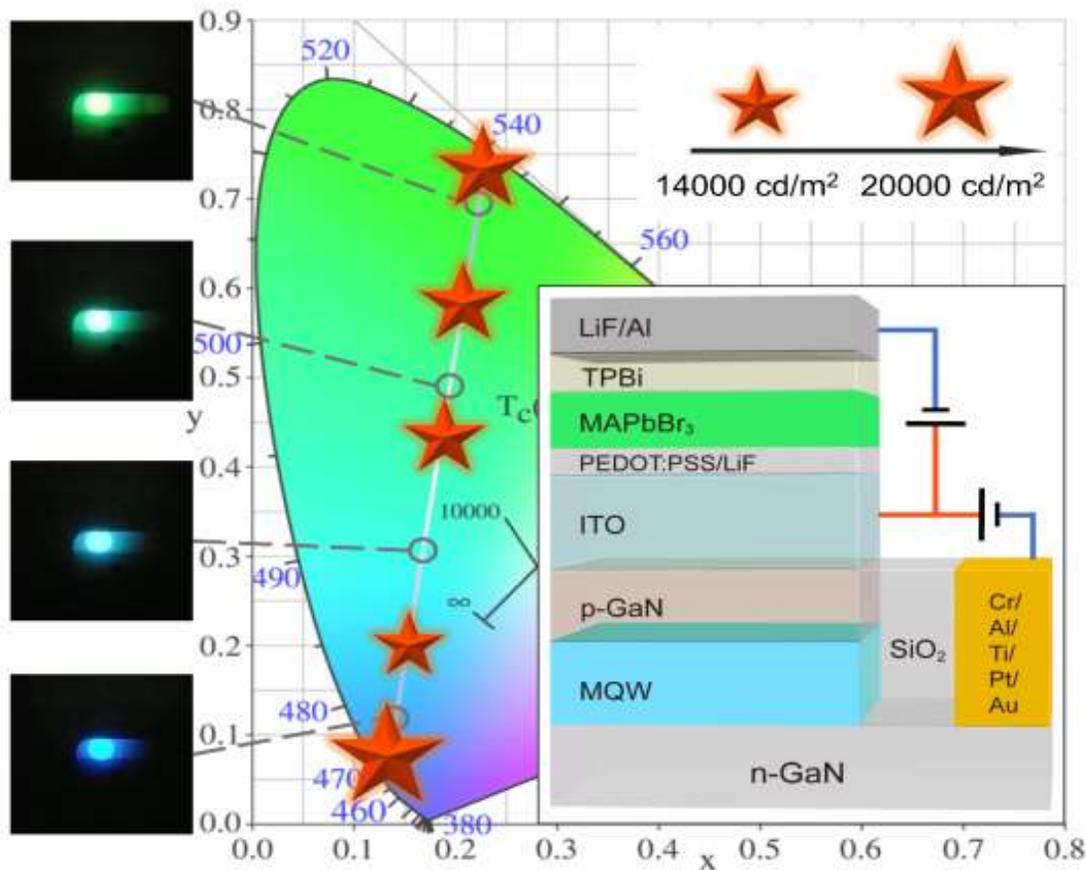
李宗涛¹

¹ 华南理工大学半导体显示与光通信器件研发国家地方联合工程研究中心, 广东省广州市, 510641

* Email: meztli@scut.edu.cn

摘要: 进入发光二极管 (LED) 时代以来, 显示技术的更新换代开始大幅提速, 以期满足消费者差异化需求。然而, 当前显示设备的像素密度仍需要突破。为了提高像素密度, 目前国内外对超高清 LED 显示设备的研发主要集中在像元水平方向上, 通过缩小像元间距以提高像素密度, 而通过像元垂直方向的结构设计提高像素密度, 改变传统 LED 显示器件像元排列结构^[1-3], 可以成倍提高像素密度, 从而推进超高清显示设备在消费级市场上的应用。本工作使用高亮度和高稳定性的蓝色氮化镓发光二极管 (GaNLED) 光源衬底, 以氧化铟锡 (ITO) 作为共阳极, 将绿色钙钛矿发光二极管 (PeLED) 与其进行垂直堆叠, 开发了新型氮化镓-钙钛矿叠层结构, 制备出叠层 Pe-GaN LED^[4], 实现了颜色亮度独立控制, 发光颜色在纯蓝色 (0.135, 0.064) 到纯绿色 (0.232, 0.744) 范围内任意可调, 并引入脉宽调制 (PWM) 驱动方式以提高发光效率。本工作出色的亮度和颜色独立可调性证实 PeLED 在多色叠层器件方面的巨大潜力, 并促进了 PeLED 与成熟的半导体技术结合, 加速其在超高分辨率先进显示设备的商业化进程。

关键词: 叠层结构, 钙钛矿, 氮化镓, 发光二极管, 颜色亮度独立可调



参考文献:

- [1] Jeon Y, Noh I, Seo Y C, et al. Parallel-Stacked Flexible Organic Light-Emitting Diodes for Wearable Photodynamic Therapeutics and Color-Tunable Optoelectronics[J]. ACS Nano, 2020, 14(11): 15688-15699.
- [2] Jiang C, Zou J, Liu Y, et al. Fully Solution-Processed Tandem White Quantum-Dot Light-Emitting Diode with an External Quantum Efficiency Exceeding 25%[J]. ACS Nano, 2018, 12(6): 6040-6049.
- [3] Jianfeng Z, Ren B, Deng S, et al. Voltage - Dependent Multicolor Electroluminescent Device Based on Halide Perovskite and Chalcogenide Quantum - Dots Emitters[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 30: 1907074.
- [4] Li Z-T, Zhang H-W, Li J-S, et al. Perovskite-Gallium Nitride Tandem Light-Emitting Diodes with Improved Luminance and Color Tunability[J]. Advanced Science, 2022, 9(22): 2201844.

Beam deflector based on dielectric metasurfaces

Kangkang Chen¹, Enguo Chen^{1,2,*}, Yun Ye^{1,2}, Sheng Xu^{1,2}, Kaixin zhang^{1,2}, Jie Sun^{1,2}, Qun Yan^{1,2}, Tai liang Guo^{1,2}

¹National & Local United Engineer Laboratory of Flat Panel Display Technology, Fuzhou University, 2 Xueyuan Road, Fuzhou, 350116 Fujian Province, China

²Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China

Corresponding author: ceg@fzu.edu.cn

Keywords: metasurface, nanostructure, beam deflector, wavefront shaping Metasurfaces have emerged as a platform for novel flat optics in recent years. Metasurfaces enable arbitrary wavefront shaping with unprecedented flexibility by producing controllable abrupt changes in the phase, amplitude, and polarization of light waves at a thickness comparable or smaller than the wavelength of light. Metasurfaces have been demonstrated that have unique abilities to manipulate light for a wide range of applications including wave converging, polarization controlling and beam steering. This letter promotes a dielectric metasurface for beam deflection.

A dielectric metasurface consists of a rectangular lattice of periodically repeated supercell. The incident wavelength is 550nm. The period of nanowires is set to 250 nm, about half of the wavelength, to meet both the equivalent medium requirement and weak electromagnetic coupling between nanowires. The elements constituting the supercell are nanowires with a height of 1 μ m and a circular cross section to ensure polarization independent operation. The variation in diameter of the nanowires elements in the range of 30 -120 nm helps to achieve phase shift (PS) variation in the whole 0-2 π range. The diameter is smaller than the half of the working wavelength to inhibit a diffractive effect.

To achieve beam deflection, we design the PS to build the inclined plane wavefront. We assume that the incident light of the vertical is the plane wave. We design a metasurface that is able to deflect the light at angles of 10°, 20°, and 30°, as shown in Fig.1., respectively. The transmissivity is calculated to be 84.5% , 82.1% , and 69.8% for a metasurface deflected at 10°, 20°, and 30°. The planar and compact configuration

together with high spectral resolution of these metasurfaces have significant potential for emerging portable and wearable optics technology.

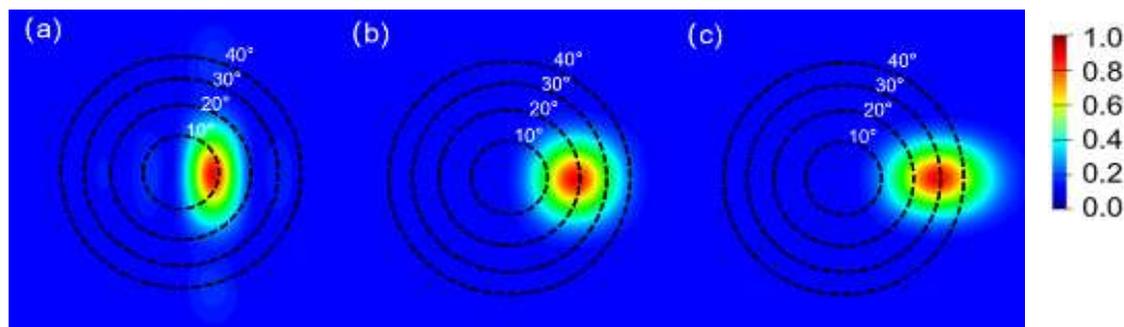


Fig.1. Beam deflection-based metasurface: normalized light intensity for 10° (a) , 20° (b) , and 30° (c) angle deflection configurations.

References

- [1] Wang L , Huang J , Hu Z , et al. Unidirectional-Emitted Resonant Cavity GaN-based Micro-LED with Metasurface for 3D Display.Optics Letters.2021.
- [2] Meinzer N, et al. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces.Nature Photonics.2014.

Controlled synthesis method of sulfide nanorod

Longwen Yang 1,Yun Ye1, 2* , Enguo Chen 1,2,, Sheng Xu1,2, Qun Yan1,2, Tailiang Guo1,2

1National & Local United Engineer Laboratory of Flat Panel Display Technology, Fuzhou University, 2 Xueyuan Road, Fuzhou,350116 Fujian Province, China

2Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China

Keywords: nanorods, Hot-injection, Cation exchange reaction, Heterojunction

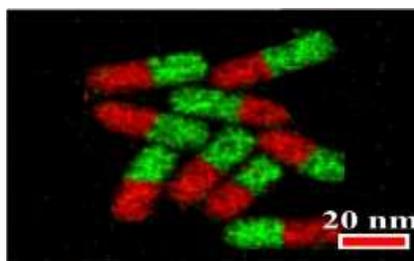


Figure 2 Single-ended ZnS–Cu_{1.93}S heterojunction

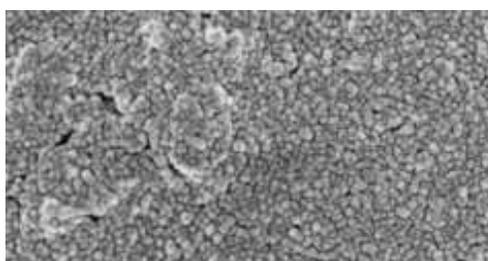


Figure 1 Ultra-high resolution field emission scanning electron microscope images

In this paper, the Cu_{2-x}S nanorods with good morphology and controllable size were prepared by a pot of heat injection method, and the nucleus and growth mechanism were explored. The experimental results show that the prepared products are rod-shaped, the stoichiometry of Cu:S is 1.93:1, close to 2:1, the size is uniform, the diameter is about 22 nm, and the length is about 62 nm. Experiments have found that the type

of sulfur source, the amount of sulfur source, the reaction time, and the nucleation temperature have an effect on the size and morphology of the Cu_{2-x}S nanorod. The experiment found that the type of mercaptan is the key to the synthesis of rod-like Cu_{2-x}S , the change of injection temperature will change the diameter and length of the nanorod, the reaction time has less impact on the synthesis of the nanorod, and the amount of mercaptan injection has a greater impact on the size of the nanorod, the more mercaptan is injected, the larger the size and the more obvious the change. Using cation exchange technology, the Cu^+ ions in the prepared single-oblique djurleite $\text{Cu}_{1.93}\text{S}$ nanorods were replaced with other cations, such as Zn^{2+} , Cd^{2+} , etc., and the single heterojunction $\text{ZnS-Cu}_{1.93}\text{S}$ nanorods and the $\text{ZnS-Cu}_{1.93}\text{S-ZnS}$ nanorods were prepared by two different synthesis schemes, and the morphology was maintained well. According to XRD analysis, the arrangement of atoms within the crystal was almost unchanged when the replacement region crystal was transformed from the djurleite crystal structure of $\text{Cu}_{1.93}\text{S}$ to the ZnS of the wurtzite crystal phase. By adjusting the reaction temperature, reaction time, and volume of the ion exchange solution, the length ratio of the two materials in the heterojunction can be adjusted, and the complete transition from $\text{Cu}_{1.93}\text{S}$ to ZnS can be achieved.

It is expected that the preparation process of light-emitting nanorods will be simplified by cation exchange technology.

钙钛矿量子点的原位直接光刻

杨高岭^{1*} 张萍萍² 钟海政²

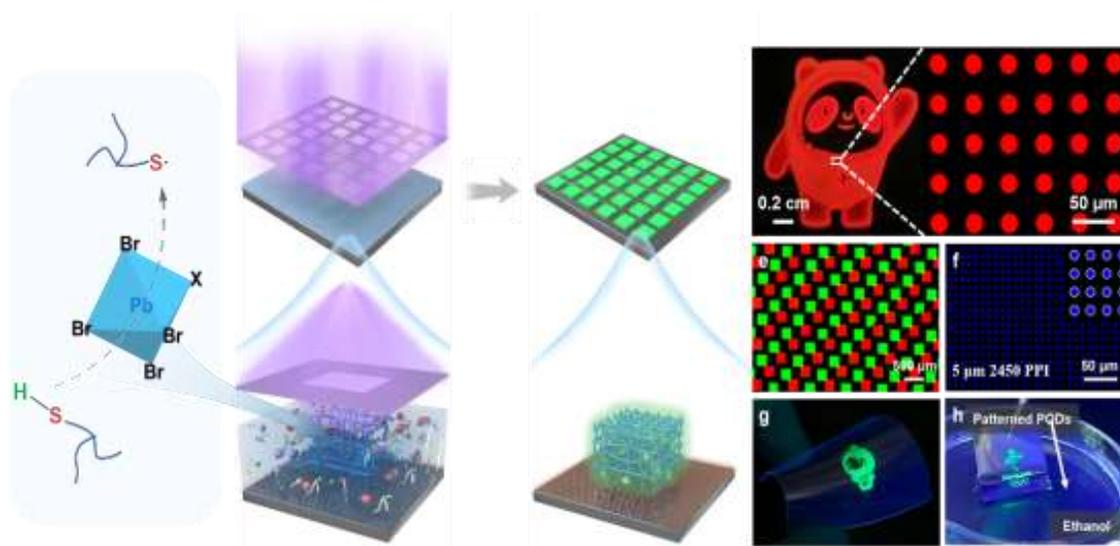
¹ 工信部低维量子结构与器件重点实验室, 北京理工大学 光电学院, 北京市, 邮编 100081;

² 工信部低维量子结构与器件重点实验室, 北京理工大学 材料学院, 北京市, 邮编 100081

*Email: glyang@bit.edu.cn

摘要: Micro-LED 具有高解析度、高对比度、高亮度等优势, 被认为是未来显示行业一个重要的发展方向。^[1] 量子点色转换技术是实现 Micro-LED 全彩化的一条重要路线, 能有效解决红光 Micro-LED 发光效率低、三色芯片巨量转移难度大等问题。^[2] 然而, 由于喷墨打印分辨率的限制, 高分辨率量子点色转换像素图案成为业内普遍面临的难题。^[3,4] 光刻是半导体产业的支撑技术之一, 已被用于制造多种精密的光学和电子元件, 可以实现纳米级的超精细图案分辨率。^[5] 但是在光刻量子点的过程中, 持续的紫外曝光和反复的清洗烘干过程会对量子点发光层造成严重的破坏。^[5] 为了解决这些问题, 将直接光刻和原位制备技术相结合, 我们提出了一种非破坏性的光刻技术手段, 可以直接光刻钙钛矿前驱体溶液, 之后原位生长钙钛矿量子点。^[6] 钙钛矿前驱体中的铅溴配合物在光引发单体聚合中所起到的决定性作用, 因此无需外加引发剂或催化剂即可实现满足光刻要求的快速聚合。此外, 与传统的光刻方法不同的是, 钙钛矿量子点在光刻流程之后生成, 这就无需预先制备量子点所需的复杂过程, 同时也有效的避免了光刻过程中溶剂和紫外光对量子点的破坏。通过控制聚合和原位制备条件, 可以得到高效无损的钙钛矿量子点像素图案, 像素分辨率可达 2450 PPI, 厚度高达 10 微米, 对光、热、溶剂表现出良好的稳定性。我们所提出的原位直接光刻技术, 为制备非破坏性高效发光量子点像素提供了新的思路, 为 Micro-LED, 激光, AR/VR 显示提供了新的技术路线。

图 1. 钙钛矿量子点的原位直接光刻制备技术.



关键词: 钙钛矿量子点, 光刻, 原位制备, 图案化

参考文献:

- [1] 周自平, 黎焱, 严银菓, 江昊男, 陈恩果*, 徐胜, 叶芸, 孙捷, 严群, 郭太良, “Micro-LED 应用于近眼显示的现状与趋势”, *液晶与显示*, 37, 661-679 (2022).
- [2] Z. J. Liu, C. H. Lin, B. R. Hyun, C. W. Sher, Z. J. Lv, B. Q. Luo, F. L. Jiang, T. Wu, C. H. Ho,* H. C. Kuo,* J. H. He,* “Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology”, *Light. Sci. Appl.* 9, 83 (2020).
- [3] L. F. Shi, L. H. Meng, F. Jiang, Y. Ge, F. Li, X. G. Wu and H. Z. Zhong, “In Situ inkjet printing strategy for fabricating perovskite quantum dot patterns”, *Adv. Funct. Mater.* 29, 4990–4999 (2019).
- [4] X. Liu, J. J. Li, P. P. Zhang, W. T. Lu, G. L. Yang,* H. Z. Zhong, and Y. J. Zhao,* “Perovskite quantum dot microarrays: in situ fabrication via direct print photopolymerization”, *Nano Research* 15, 7681-7687 (2022).
- [5] 张萍萍, 杨高岭*, 康果果, 石建兵, 钟海政, “量子点光刻技术及其显示应用”, *应用化学*, 38, 1175-1188 (2021).
- [6] P. P. Zhang, G. L. Yang,* F. Li, J. B. Shi, H. Z. Zhong, “Direct in-situ photolithography of perovskite quantum dots based on photocatalysis of lead bromide complexes”, *Nature Communications*, accepted (2022).

由超快扫描二极管激光器制造的高性能全溶液氧化物薄膜晶体管阵列

徐萌¹ 李喜峰^{1*} 张建华¹

¹ 上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海, 邮编 200072

*Email: lixifeng@shu.edu.cn

摘要: 溶液法制备的金属氧化物薄膜晶体管 (TFT) 以其成本低、透明性好、迁移率高等众所周知的优异性能而备受关注。然而, 要彻底实现透明金属氧化物 TFT 器件的大批量生产, 仍需要实现全部功能层薄膜的溶液法制备及全溶液 TFT 器件结构的成功集成。本文通过使用超快扫描二极管激光退火 (USDLA) 成功实现了全溶液制备的氧化物 TFT 阵列, 功能层薄膜包括低电阻率透明导电氧化铟锡 (ITO) 薄膜、高介电常数氧化铪铝 (HAO) 薄膜以及高质量半导体氧化钨锌锡 (WZTO) 薄膜 [1, 2, 3]。原子力显微镜图谱表明堆叠的多层薄膜具有光滑的表面, 并且均方根粗糙度值为 0.293 nm。全溶液 TFT 阵列表现出均匀的整体器件性能, 其亚阈值摆幅的平均值为 118 mV/dec、阈值电压的平均值为 -0.45 V 以及迁移率的平均值为 12 cm²V⁻¹s⁻¹。此外, 全溶液制备的 TFT 器件具有良好的偏压光照稳定性, 尤其是 PBIS 和 NBIS 测试下的阈值电压偏移分别仅为 0.09 和 0.4 V。这一事实意味着 USDLA 技术可以满足全溶液 TFT 的大规模制造, 并为低成本高性能和大规模电子产品提供可行性解决方案。

关键词: 全溶液制备, 氧化物 TFT 阵列, 超快扫描二极管激光退火, 偏压光照稳定性

参考文献:

- [1] M. Xu, C. Peng, Y. Yuan, X. Li, * J. Zhang, "Enhancing the Performance of Solution-Processed Thin-Film Transistors via Laser Scanning Annealing", *ACS Applied Electronic Materials* 10, 28186 (2020).
- [2] M. Xu, S. Hu, C. Peng, B. Jing, X. Li, * J. Zhang, "High Performance of Patterned Solution-Processed WZnSnO Thin Film Transistor Using Fiber-Coupler Semiconductor Laser Annealing", *IEEE Transactions on Electron Devices* 69, 1858 (2022).
- [3] M. Xu, S. Hu, C. Peng, B. Jing, L. Chen, X. Li, * J. Zhang, "High-Performance Full-Solution-Processed Oxide Thin-Film Transistor Arrays Fabricated by Ultrafast Scanning Diode Laser", *Advanced Materials Interfaces*, 2200976 (2022).

基于共形衍射原理的彩色球面全息显示系统

侯页好 黄倩 王迪 王琼华*

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京, 邮编 100191

*Email: qionghua@buaa.edu.cn

摘要: 本文提出了基于共形衍射原理的彩色球面全息显示系统, 该系统的主要元件包括红、绿、蓝三色光源和加载了球面全息图的空间光调制器, 利用时分复用法实现了彩色球面全息显示。在系

统中利用共形映射方法建立平面物体与球形坐标的对应关系，并利用角谱法生成相应的全息图。在球形表面重建时，全息像具有水平和垂直 180° 的视角，且能够显示全彩色高质量的全息像，光学再现像的峰值信噪比为 21.86 dB。实验验证了所提出系统的可行性。该系统有望应用于医疗、教育、娱乐等领域中。

关键词：全息显示，球面全息，彩色全息，共形映射

参考文献：

- [1] Y. L. Li, N. N. Li, D. Wang, F. Chu, S. D. Lee, Y. W. Zheng, Q. H. Wang, * “Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size”, *Light: Science & Applications* 11, 188 (2022).
- [2] Y. Pan, J. Wang, * Y. Wu, H. H. Peng, H. Yang, C. Chen, “Reconstructed quality improvement with a stochastic gradient descent optimization algorithm for a spherical hologram”, *Applied Optics* 61, 5341-5349 (2022).

Augmented reality display combining optical waveguide and retinal scanning

Zijian Lin¹, Enguo Chen^{1,2,*}, Yun Ye^{1,2}, Sheng Xu^{1,2}, Qun Yan^{1,2}, Tailiang Guo^{1,2}

¹National & Local United Engineer Laboratory of Flat Panel Display Technology, Fuzhou University, 2 Xueyuan Road, Fuzhou, 350116 Fujian Province, China

²Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China

Corresponding author: ceg@fzu.edu.cn

Keywords: optical waveguide, retinal scanning, augmented reality, polarization

Augmented reality (AR) is the superposition of digital content and the real world to enable the human eye to see virtual images and real environments at the same time. In order to obtain comfortable visual experience, the AR display system needs to maintain a large field of view while taking into account a large eye box. For this reason, a scheme called scanning waveguide display (SWD) has been proposed in recent years, which combines the wide field of view of retinal scanning and the large eye box of waveguide display, and its FOV is directly determined by the f value ($f/\#$) of coupler lens. However, large FOV will lead to too large gap between adjacent viewpoints, which may make the observer unable to see the imaging or partial imaging at the viewpoint. An improved scheme of the waveguide display system is proposed in this paper. The schematic diagram is designed as shown in Fig. 1 (a). A pair of polarized holographic gratings are used to couple circularly polarized light with different chirality to the waveguide. For the out-coupler, the off-axis reflective chiral lens array with two layers of $f/\#=1.25$ is used to cross replicate the exit pupil of different circularly polarized light and achieve retinal projection display. The structure of the out-coupler is shown in Fig. 1 (b). The horizontal field angle of view of this scheme can reach 43.6° , and the distance between

observation points is close to the size of human pupil. In conclusion, an augmented reality display combining retinal scanning and waveguide is designed and simulated, and the theoretical feasibility of the scheme is verified through simulation.

References

Jianghao Xiong, Guanjun Tan, Tao Zhan, and Shin-Tson Wu, "Breaking the field-of-view limit in augmented reality with a scanning waveguide display," OSA Continuum 3, 2730-2740 (2020) .

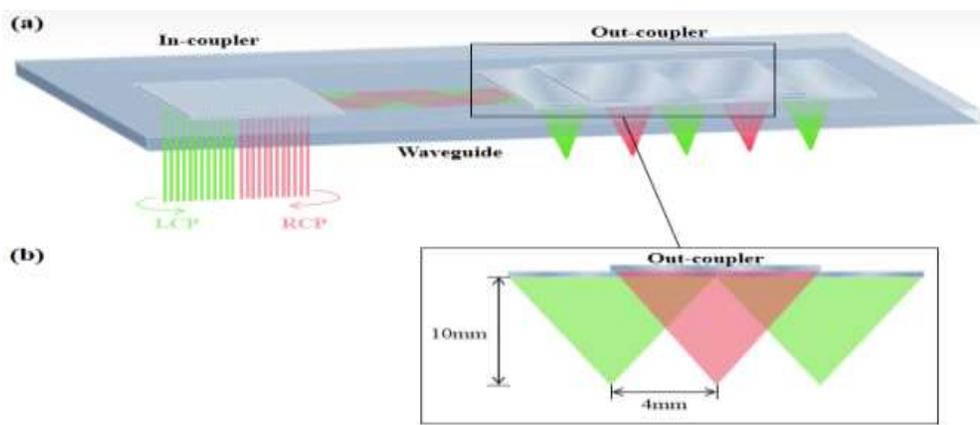


Fig. 1. (a) An improved scheme of scanning waveguide display system; (b) The structure of the out-coupler.

富氢缓冲层对IGZO 薄膜晶体管性能的影响研究

彭聪¹ 温盼¹ 黄慧雪¹ 李喜峰^{*} 张建华¹

¹上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海, 邮编 200072

*Email: lixifeng@shu.edu.cn

摘要: 目前InGaZnO (IGZO) 薄膜已经成为未来柔性显示领域最具潜力的材料, 但顶栅IGZO 薄膜晶体管 (TFT) 与基板之间存在一些匹配问题, 如铝和不锈钢基板与器件层的绝缘性差, 聚酰亚胺为基板附着着力差。通常在基板和器件层之间沉积缓冲层来解决这些问题, 然而典型的缓冲层为采用等离子体增强化学的气相沉积法沉积的 SiO₂ 和 Si₃N₄ 薄膜, 其反应气源为含氢气体 SiH₄ 和 NH₃ 等, 所以通常含有大量的氢杂质。为了研究缓冲层氢杂质含量对器件性能的影响, 通过调节沉积钝化层反应气体含氢气体的比例, 实现了缓冲层氢含量对器件性能的调节。实验结果表明, 未沉积钝化层的顶栅IGZO TFT 转移曲线开启电压为6.48 V, 而随着沉积缓冲层归一化的反应气体含氢气体比从0增加到 100, 顶栅IGZO TFT 的转移曲线向负方向漂移, 开启电压降低至-3.49 V, 并且亚阈值摆幅也从0.16 V/dec 增加到0.86 V/dec。这主要是因为缓冲层中的氢原子 (H⁰) 在后续工艺的作用下, 扩散至 IGZO 薄膜中, 并与其中的氧离子 (O²⁻) 反应形成羟基 (OH⁻): H⁰ + O²⁻ → H⁺ + e⁻ + O²⁻ → OH⁻ + e⁻, 同时氧离子的减少会提高氧空位 (V_O)。随着反应气体含氢比的增加, 扩散至IGZO 薄膜

中的氢原子 也增加, 从而有源层的载流子浓度升高, 在相同的栅极电压下, 器件可以提前开启。而随着 器件退火热处理温度的升高, 氢原子会与氧空位结合, 形成替代位氢杂质 (H_o), 降低载流子浓度: $H^o + e^- + V_o \rightarrow H^- + V_o \rightarrow H_o$, 与此同时形成的金属-氢键, 有利于提升负偏压光照应力稳定性。

关键词: IGZO TFT , 缓冲层, 氢杂质, 热处理、负偏压光照应力稳定性

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62174105)

参考文献:

- [1] C. Peng, M. Xu, L. L. Chen, X. F. Li,* J. H. Zhang, "Improvement of properties of top-gate IGZO TFT by oxygen-rich ultrathin in situ ITO active layer", Japanese Journal of Applied Physics 7, 070914 (2022).
- [2] C. Peng, S. B. Yang, C. C. Pan, X. F. Li,* J. H. Zhang, "Effect of two-step annealing on high stability of a-IGZO thin-film transistor", IEEE Transactions on Electron Devices 10, 4262-4268

G 真空外延材料与器件 分会邀请报告

氮化镓同质外延生长研究

王国斌 徐科

¹中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 苏州, 邮编 215123;

²江苏第三代半导体研究院有限公司, 苏州, 邮编 215123

*Email: kxu2006@sinano.ac.cn

摘要: 基于 GaN 单晶衬底上的同质外延技术, 能够解决异质外延存在的热失配和晶格失配问题。相比异质外延的氮化镓材料, 同质外延材料的缺陷密度降低至少 2-3 个数量级, 可以满足高性能 GaN 基光电子和微电子器件的加速发展。近期, GaN 基 Micro-LED 以其高亮度、高复合速率、高调制带宽和高灵敏度, 在新型显示、可见光通信和生物医疗等众多领域得到广泛关注和研究^[1]。但由于量子效率下降 (Quantum Efficiency Droop) 的效应, 在小电流密度 ($<1\text{A}/\text{cm}^2$) 的新型显示和大电流密度 ($>1\text{kA}/\text{cm}^2$) 可见光通信的工作区间, Micro-LED 都处在高效率区域以下的位置, 阻碍了其发展和产业化应用。

针对以上, 我们采用氮化镓同质外延技术, 从 ABC Model 理论出发, 尝试抑制 Shockley-Read-Hall (SRH) 和 Auger 非辐射复合^[2]。首先, 通过优化托盘 Pocket 的设计, Micro-LED 外延片的波长均匀性小于 1nm, 整片 Wafer 的波长差别 $\pm 2\text{nm}$ 以内; 通过对衬底和外延层的界面处理, 提升生长的表面质量和平整度, 粗糙度 Ra 值降至 0.1nm。

我们利用同质外延层的残余应力远低于异质外延的特点, 在 Micro-LED 设计中采用了低应力释放层和 P 型增强结构, 同质光电器件显示了较好的 IV 特性。通过开发适合不同电流密度的有源区量子阱结构, 最终实现了 $0-1\text{A}/\text{cm}^2$ 电流密度下的发光效率的快速拉升。

参考文献:

[1] Wong, M.S., Nakamura, S., DenBaars, S.P. Review—Progress in high performance III-nitride micro-light-emitting diodes. ECS J. Solid State Sci. Technol. 9, 015012(2020).

[2] Martin F.Schubert, Sameer Chhajed, Jong Kyu Kim, et al. Effect of dislocation density on efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes. Appl. Phys. Lett. 91, 231114 (2007)

金刚石的合成及其光电效应

秦金旭 林超男 杨西贵 杨珣 单崇新*

郑州大学物理学院, 教育部材料物理重点实验室, 河南郑州, 邮编 450052

*Email: cxshan@zzu.edu.cn

摘要: 金刚石由于其出色的硬度性质, 在精密加工、磨具磨料、矿山开采、石油钻探等国民经

济核心领域有重要应用。近年来金刚石的半导体性质吸引了人们大量的关注。作为半导体，金刚石具有禁带宽度大、载流子迁移率高、击穿电场高、抗辐射能力强等特点。由于金刚石上述优异性质，使其成为半导体辐射探测器和光电探测器的理想候选材料。光电效应是半导体材料的基本效应之一，也是探测器的主要物理机制。本报告中，我们将汇报研究组在金刚石半导体的材料合成、性能表征、物理机制等方面的进展，以及基于金刚石材料中的新奇光电效应设计的光电探测和湿度传感等方面的进展。

关键词： 金刚石，光电效应，湿度传感，光电探测

AlN 基氮化物宽禁带半导体材料外延研究

黎大兵^{1, 2*} 孙晓娟^{1, 2} 陈洋¹ 贲建伟¹ 蒋科¹ 石芝铭¹

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室，吉林长春 130033；

² 中国科学院大学，材料科学与光电子工程中心，北京 100049

*Email: lidb@ciomp.ac.cn

摘要： AlN 基材料具有直接宽带隙的特点，禁带宽度从 3.4eV 至 6.2eV 连续可调，具有良好的抗辐照性、热稳定性以及化学稳定性、高电子饱和迁移率、高击穿电场等特性，是制备深紫外光电子器件以及高频高功率电子器件的理想材料^[1]。AlN 基材料通常在蓝宝石等异质衬底上通过金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 或分子束外延 (MBE) 获得，大的晶格失配和热失配使得材料中存在高密度缺陷。尽管多种缺陷调控方法使得缺陷密度得以大幅度降低，但是 AlN 基材料缺陷通常仍然高于 10^8cm^{-2} ，急需寻找新的外延机理与方法。低维层状材料，如：石墨烯、 MoS_2 等，具有出色的化学和热稳定性，且其层间以范德华力相互作用，基于低维材料外延理论上能够缓解氮化物异质外延过程中的晶格失配和热失配，实现高晶体质量氮化物材料^[2]。此外，基于外延层和衬底间的弱相互作用，还可以实现外延器件结构的简单机械剥离，有望获得紫外光电器件在柔性及可穿戴等方面的多功能应用。因此，开展氮化物材料范德华外延相关研究将为第三代半导体产业的发展提供全新动力。本团队围绕氮化物范德华外延过程中的衬底构建、成核调控等开展了系列研究。基于固态碳源高温热解催化和预沉积金属氧化物再硫化的技术路线分别实现了英寸级石墨烯和 MoS_2 的原位生长，一步法构建氮化物范德华外延衬底将为材料的批量化生长奠定良好的衬底基础^[3]。利用 MOCVD 高温 NH_3 处理实现了石墨烯的原位 N 原子掺杂，有效地调控氮化物成核位点及成核密度，进而优化外延层表面形貌和晶体质量^[4]；同时，提出了基于 MoS_2 插入层的氮化物范德华外延极性调控新方法，获得了高质量的 N 极性 GaN，其刃位错密度降低约一个数量级^[5]；此外，开展了多晶金属衬底上氮化物的范德华外延^[6]，实现 c-取向的择优生长，并研究了范德华外延对光电探测器件性能影响。

关键词： AlN，范德华外延，缺陷，宽禁带半导体，成核

参考文献:

- [1] D.B. Li*, K Jiang, X.J. Su., C.L. Guo, "AlGa_N photonics: recent advances in materials and ultraviolet devices," *Adv. Opt. Photon.*, 10, 43-110. (2018).
- [2] Z.M. Shi, X.J. Sun, Y.P. Jia, X.K. Liu, S.L. Zhang, Z.B. Qi, D.B. Li*, "Van der Waals Epitaxy: A new way for growth of III-nitrides," *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 62, 127311 (2019).
- [3] Y Chen, K Jiang, H Zang, J.W. Ben, S.L. Zhang, Z.M. Shi, Y.P. Jia, W Lü, D.B. Li, X.J. Sun* "Growth of high-quality wafer-scale graphene on dielectric substrate for high-response ultraviolet photodetector," *Carbon*, 175, 155-163 (2021).
- [4] Y Chen, H Zang, K Jiang, J.W. Ben, S.L. Zhang, Z.M. Shi, Y.P. Jia, W Lü, X.J. Sun* , and D.B. Li*, "Improved nucleation of AlN on in situ nitrogen doped graphene for GaN quasi-van der Waals epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, 117, 051601 (2020).
- [5] Y Chen, Z.M. Shi, S.L. Zhang, J.W. Ben, K Jiang, H Zang, Y.P. Jia, W Lü, D.B. Li, X.J. Sun*, "The van der Waals Epitaxy of High-Quality N-Polar Gallium Nitride for High-Response Ultraviolet Photodetectors with Polarization Electric Field Modulation," *Adv. Electron. Mater.*, 8, 2100759 (2021).
- [6] Y Chen, H Zang, S.L. Zhang, Z.M. Shi, J.W. Ben, K Jiang, Y.P. Jia, M.R. Liu, D.B. Li, X.J. Sun*, "Van der Waals Epitaxy of c-Oriented Wurtzite AlGa_N on Polycrystalline Mo Substrates for Enhanced Heat Dissipation," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 14, 37947-37957 (2022).

极性面上微弱极化电场 LED 制备研究

张源涛^{1, 2*} 邓高强¹ 张立东¹ 左长财¹

¹集成光电子学国家重点实验室, 吉林大学电子科学与工程学院, 长春, 邮编 130012;

*Email: zhangyt@jlu.edu.cn

III 族氮化物发光二极管 (LED) 已广泛应用于照明、显示和通讯等领域, 然而氮化物材料固有的强极化效应严重限制了其性能的提高。强极化电场会在 LED 的量子阱中产生量子限制斯塔克效应 (QCSE), 使电子和空穴波函数发生空间分离, 导致辐射复合率降低、峰值波长偏移、调制带宽减小等问题, 这对 III-N LED 的应用, 特别是在微型 LED 显示和可见光通信 (VLC) 等新兴领域的应用是非常不利的。

针对 III-N LED 的强极化电场问题, 本工作通过极化工程利用 InGa_N/AlGa_N 超晶格 (SLs) 势垒在极性面上实现了微弱极化电场蓝光 LED 的制备。通过控制超晶格中 AlGa_N 层的组分, InGa_N/SLs 多量子阱 (MQW) 中的极化电场可降低至 0.5 MV/cm。基于微弱极化电场 InGa_N/SLs MQWs 制备的 LED 展现出更低的效率 Droop、良好的波长稳定性和更高的 -3dB 调制带宽, 证明了 InGa_N/AlGa_N SLs 势垒对 QCSE 的显著抑制作用, 为极性面上微弱极化电场 LED 的制备提供了一种新的技术路线。

关键词： III 族氮化物 LEDs, 极化工程, 极化电场, 多量子阱, 超晶格

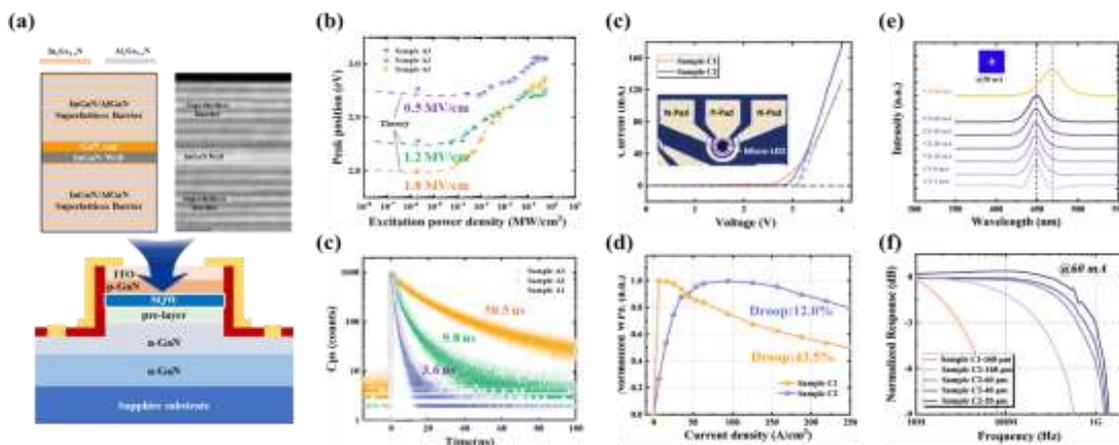


图 1、(a) 微弱极化电场 LED 器件结构示意图；(b~c) 微弱极化电场量子阱表征结果；(c~d) 微弱极化电场 LED 表征结果。

GaN 基红光 LED 材料外延及器件制备

王新强^{1*} 陈兆营¹ 盛博文¹ 袁泽兴¹ 刘放¹ 王涛¹ 梁文骥² 赵春雷² 闫龙³ Jason Hu³ 郭世平³
葛惟昆¹ 沈波¹

¹ 北京大学物理学院, 北京, 邮编 100190;

² 东莞阿尔泰显示技术有限公司, 广东, 邮编 523773;

³ 中微半导体设备(上海)股份有限公司, 上海, 邮编 201201

*Email: wangshi@pku.edu.cn

摘要： Mini/Micro-LED 显示技术具有高亮度、高分辨率、高对比度、高可靠性、低延时和寿命长等优势, 在大尺寸的超高清视频墙、户外显示, 中小尺寸的车载显示以及 VR/AR、智能穿戴等电子消费品领域具有极大的发展潜力。氮化物材料的光谱范围覆盖了整个可见光波段, 是实现高清全彩 Mini/Micro-LED 显示的优选材料体系, 被显示行业寄予厚望。

目前, 氮化物蓝绿光 LED 的制备技术日益成熟, 然而氮化物红光 LED 的制备仍然存在很多技术瓶颈亟待解决。针对这一技术难题, 我们提出了一种利用复合缓冲层中晶粒聚并过程来扩展 GaN 外延层表面晶格的应力调制方法, 该方法成功地促进了 InGaN 红光多量子阱中镉原子的并入。我们实现了峰值波长为 629nm、EQE 为 7.4% 的 InGaN 红光 Mini-LED 芯片, 并进一步制备了高像素密度的 InGaN 基红光 Micro-LED 面阵和氮化物全彩 Mini-LED 显示面板。实验结果证明了氮化物材料在全彩 Mini/Micro-LED 显示应用中的可行性。

关键词： GaN 基红光 LED, MOCVD, Mini/Micro-LED, 全彩显示

参考文献:

[1] Zhaoying Chen, Bowen Sheng, Fang Liu, Shangfeng Liu, Duo Li, Zexing Yuan, Tao Wang, Xin Rong, Jingsheng Huang, Jiangying Qiu, Wenji Liang, Chunlei Zhao, Long Yan, Jason Hu, Shiping Guo, Weikun Ge, Bo Shen, Xinqiang Wang* "High-Efficiency InGaN Red Mini-LEDs on Sapphire Toward Full-Color Nitride Displays: Effect of Strain Modulation", *Advanced Functional Materials* 33(26), 2300042 (2023).

氧化镓半导体器件

龙世兵, 徐光伟, 赵晓龙, 侯小虎

中国科学技术大学微电子学院, 安徽合肥, 邮编 230026

*Email: shibinglong@ustc.edu.cn

摘要: 氧化镓 (Ga_2O_3) 是一种超宽禁带 (~ 4.8 eV) 半导体材料, 其高击穿场强 (~ 8 MV/cm)、高 Baliga 品质因数 (~ 3444)、低成本熔融法单晶生长技术、及直接对应日盲紫外波段的吸收等突出优点使其在功率器件 (SBD、MOSFET) 及日盲紫外探测领域具有重要的应用。本文将报告本课题组在 Ga_2O_3 功率电子器件及日盲紫外探测器件的研究进展。对于 Ga_2O_3 功率电子器件的研制工作, 通过控制 Ga_2O_3 表面洁净度, 实现了高性能无终端 Ga_2O_3 SBD ($\text{PFOM}=1.32$ GW/cm²); 利用 Ga_2O_3 的热氧化高阻特性, 设计并制备出热氧终端 SBD, 击穿电压达到 1800 V; 针对 Ga_2O_3 难以实现 P 型掺杂问题, 引入 p 型 NiO 材料, 研制 NiO/ Ga_2O_3 异质 PN 结二极管, 并通过退火优化界面提高器件性能; 进一步地采用结终端扩展结构 (JTE) 及退火工艺实现结终端高耐压及高耐温 PN 结二极管 (250 °C, 1770 V); 此外, 结合 p 型 NiO 栅与浅沟槽结构, 设计并实现增强型 Ga_2O_3 晶体管。对于 Ga_2O_3 光电探测器的研制工作, 基于低成本的非晶 GaO_x , 通过缺陷与掺杂工程设计实现了极端环境下 (高温、高压、高能辐照) 依然表现超高灵敏度的日盲探测器; 从材料 (包括非晶, 多晶, α 、 β 、 ϵ 相单晶) 及结构 (包括增强及耗尽型 FET、JFET、自供电型) 方面对探测器进行设计, 实现了不同类型的高性能 Ga_2O_3 日盲紫外探测器; 针对探测阵列成像应用, 设计了探测阵列 (10×10 , 16×16 , 32×32) 并实现了清晰地日盲成像验证。

关键词: 氧化镓, 超宽禁带半导体, 功率电子器件, 日盲紫外探测器

参考文献:

- [1] Q. He, S. Long, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110, 093503.
- [2] Q. He, S. Long, et al. *IEEE Electron Device Lett.*, 2018, 39, 556.
- [3] H. Dong, S. Long, et al. *IEEE Electron Device Lett.*, 2019, 40, 1385.
- [4] W. Xiong, S. Long, et al. *IEEE Electron Device Lett.*, 2021, 42, 430.
- [5] W. Hao, S. Long, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 118, 043501.
- [6] X. Zhou, S. Long, et al. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2021, 68, 1501.
- [7] K. Zhou, S. Long, et al. *Sci. China Inform. Sci.*, 2021, 64, 219403.
- [8] Y. Yu, S. Long, et al. *Chin. Phys. B*, 2021, 30, 067302.

- [9] Y. Qin, S. Long, et al. *IEEE Electron Device Lett.*, 2019, 40, 742.
- [10] Y. Qin, S. Long, et al. *IEEE Electron Device Lett.*, 2019, 40, 1475.
- [11] Y. Qin, S. Long, et al. *Adv. Electron. Mater.*, 2019, 1900389.
- [12] Y. Qin, S. Long, et al. *Chin. Phys. B*, 2019, 28, 018501.
- [13] X. Hou, S. Long, et al. *IEEE Electron Device Lett.*, 2019, 40, 1483.
- [14] Y. Qin, S. Long, et al. *ACS Photon.*, 2020, 9, 1483.
- [15] X. Hou, S. Long, et al. *J. Phys. D Appl. Phys.*, 2020, 54, 043001.
- [16] X. Hou, S. Long, *Adv. Mater.*, 2021, 2106923.
- [17] Y. Yuan, S. Long, et al. *Fundam. Res.*, 2021, 1, 699.
- [18] Y. Qin, S. Long, et al. *Adv. Sci.*, 2021, 2101106.
- [19] P. Tan, S. Long, et al. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 2100173.
- [20] S. Yu, S. Long, et al. *IEEE Electron Device Lett.*, 2021, 42, 383.
- [21] C. Chen, S. Long, et al. *IEEE Electron Device Lett.*, 2021, 42, 1492.
- [22] Q. He, S. Long, *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43, 264.
- [23] Q. He, S. Long, *IEEE Electron Device Letters*, 2022.
- [24] Y. Qin, S. Long, et al. *VLSI*, 2022.
- [25] W. Hao, S. Long, et al. *IEDM*, 2022.
- [26] Y. Zou, S. Long, et al. *IEDM*, 2022.
- [27] W. Guo, S. Long, et al. *J. Electron Device Soc.*, 2022.
- [28] X. Xiang, S. Long, et al. *Sci. China Mater.*, 2022.

高质量氧化镓外延材料生长及高功率器件制备研究

张雅超^{1*} 张涛¹ 冯倩¹ 周弘¹ 张进成^{1*} 郝跃¹

1 西安电子科技大学微电子学院宽带隙半导体技术国家重点学科实验室, 陕西西安, 邮编 710071;

*Email: ychzhang@xidian.edu.cn

摘要: 自主设计研发氧化镓 MOCVD 外延设备, 从低缺陷外延生长微观过程出发, 提出了表面处理结合台阶流生长模型。在 c-plane 蓝宝石衬底上制备出了单晶 β -Ga₂O₃ 和 ϵ -Ga₂O₃ 薄膜, 通过发展脉冲式 MOCVD 生长技术进一步改善了 Ga₂O₃ 薄膜的结晶质量和表面形貌。在 β -Ga₂O₃ 薄膜的同质生长研究中, 实现了 Ga₂O₃ 薄膜的二维生长并将表面粗糙度降低至~0.5 nm, 外延薄膜能够维持与同质衬底近乎相同的结晶质量。在(-201) β -Ga₂O₃ 衬底上, 实现了外延薄膜的最高的载流子迁移率超过 140 cm²/Vs, 达到了国际先进水平。在(100)衬底上, 通过调控 Sn 掺杂在晶格中的替代位置, 控制新引入的杂质能级与 Ga₂O₃ 导带产生强烈的耦合作用改变了导带的轨道, 极大地降低了载流子的有效质量, 提升了薄膜的输运特性和迁移率, 使得薄膜的载流子浓度达到 2.9×10^{19} cm⁻³, 相对应的载流子迁移率达到 87.4 cm²/Vs, 达到国际领先水平。提出了促进氧化镓散热的高热导率金刚石衬底上的 GOOI 结构、提升耐压和异质终端峰值电场的高 k/低 k 新型泊松终端结构、缓解 p-Ga₂O₃ 缺失而无法取得高性能 PN 结终端以及双极输运的 PN 异质结和结型晶体管等氧化镓新器件, 研制成功的超

结氧化镓 MOSFETs, 有效降低芯片的自热效应, 同时实现击穿电压和功率品质因子成倍提升。在国际上首次发现异质结的空穴超注入现象, 并基于该机制实现了器件导通电阻的显著降低, 取得了 Ga₂O₃ 二极管和晶体管领域同期研究国际最高巴利伽优值 13.2 GW/cm² 以及 1 GW/cm²。

关键词: 氧化镓, 外延设备, MOCVD, 高功率, 晶体管器件

高效率 RGB 三色氮化镓基 Micro-LED 生长与器件研究进展

刘斌^{1*} 许非凡¹ 陶涛¹ 庄喆¹ 黄凯² 张荣^{1,2}

¹ 南京大学电子科学与工程学院, 南京, 邮编 210093

² 厦门大学, 厦门市未来显示技术研究院, 厦门, 邮编 361005

*Email: bliu@nju.edu.cn

摘要: 基于氮化镓(GaN)基半导体的 Micro-LED 材料与芯片及其在消费电子、汽车车载显示、VR/AR 虚拟增强显示等方面应用受到学术界与产业界极大的关注。当前 Micro-LED 显示技术仍面临巨量转移精度与效率、红光缺失、芯片效率 Droop 效应等科学与技术难题。针对上述问题, 采用金属有机源化学汽相沉积(MOCVD)二次横向外延生长氮化镓(GaN)薄膜与量子阱结构, 研究了微纳尺寸下氮化物横向外延生长和位错抑制机理; 生长获得了高质量、弱极化场 InGaN/GaN 量子阱结构, 实现橙红长波长 630nm 的 LED 器件以及 Micro-LED 阵列, Droop 效应得到明显抑制; 设计并制备出一种新型微纳混合结构 GaN 量子阱/II-VI 族量子点集成 LED, 采用紫外软纳米压印和光刻技术, 实现了量子点集成的 RGB 三色 20μm*30μm 为周期的 Micro-LED 阵列, 获得高色转换效率(CCE); 合作提出了基于二维 MoS₂ 材料 TFT 驱动电路集成的超高分辨氮化镓 Micro-LED 异质集成芯片微显示方案, 实现了超 1200 PPI 的高亮度微显示器。上述新结构、新器件为高效全彩显示、高分辨透明显示、可见光通讯等应用提供了新技术路径。

关键词: 氮化镓 (GaN), Micro-LED (微小尺寸 LED), 异质集成工艺, 显示, 可见光通讯

参考文献:

- [1] F. Xu et al., "C-Plane Blue Micro-LED With 1.53 GHz Bandwidth for High-Speed Visible Light Communication," *IEEE Electron Device Letters*, 43(6), 910-913(2022)
- [2] W. Q. Meng et al., "Three-dimensional monolithic micro-LED display driven by atomically thin transistor matrix", *Nature Nanotechnology*, 16, 1231-1236 (2021)
- [3] B. Liu, et al., "Hybrid Light Emitters and UV Solar-Blind Avalanche Photodiodes based on III-Nitride Semiconductors", *Adv. Mater.*, 32(27), 1904354 (2020)

蓝宝石图形衬底诱导的三维微纳结构 GaN 外延生长

汪莱^{1*} 王珣¹ 郝智彪¹ 罗毅¹

¹清华大学电子工程系, 北京, 邮编 100084;

*Email: wanglai@tsinghua.edu.cn

摘要: 传统的 GaN 基发光二极管(LED)由于存在极化电场, 限制了载流子的辐射复合效率进一步提升。为了解决这个问题, 可采用非/半极性面作为生长面来消除极化电场的不良影响。目前, 通过选区外延法制备表面包括非/半极性面的三维 GaN 结构较为常用, 但复杂的工艺流程限制了该技术向商业生产推广。

本文提出了一种全新的蓝宝石图形衬底直接诱导的三维微纳结构 GaN 外延生长技术。基于金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术, 采用传统的 GaN“两步法”生长方式, 通过调控高温缓冲层厚度均匀性和降低体材料温度促进三维生长, 在周期 3 μm 的蓝宝石图形衬底上直接生长倒金字塔型的 GaN 三维结构体材料, 其表面由少量 c 面和倒金字塔内的两种半极性面组成。通过改变体材料生长温度, 观察到两种半极性面的面积之间存在生长竞争关系。进而改进生长条件, 获得了单一的半极性(10 $\bar{1}1$)面。同时, 通过截面扫描电子显微镜(SEM), 观察到衬底上的每个图形与倒金字塔之间存在一一对应的位置关系。基于此规则改变蓝宝石图形衬底的参数, 获得了不同种尺寸和形貌的 GaN 三维结构体材料。更进一步, 于纳米蓝宝石图形衬底上制备出了小尺寸倒金字塔型 GaN 三维结构, 有益于提高 LED 的光提取效率和改善发光峰展宽的问题, 但形貌均匀性有待优化。

基于蓝宝石图形衬底直接诱导的三维微纳结构 GaN 体材料上, 后续进一步制备了多种半极性 InGaN 量子阱发光器件, 验证了对传统 LED 中极化电场问题的改善作用, 并具有在新型照明、显示领域应用的潜力^[1-2]。

关键词: MOCVD, 半极性, 三维结构, 发光二极管(LED)

参考文献:

- [1] L. Wang,* J. Jin, Z. Hao, Y. Luo, C. Sun, Y. Han, B. Xiong, J. Wang, and H. Li, “V-shaped semipolar InGaN/GaN multi-quantum-well light-emitting diodes directly grown on c-plane patterned sapphire substrates”, *Physica status solidi A* 214, 1600810 (2017).
- [2] L. Wang,* X. Wang, F. Bertram, B. Sheng, Z. Hao, Y. Luo, C. Sun, B. Xiong, Y. Han, J. Wang, H. Li, G. Schmidt, P. Veit, J. Christen and X. Wang, “Color-Tunable 3D InGaN/GaN Multi-Quantum-Well Light-Emitting-Diode Based on Microfacet Emission and Programmable Driving Power Supply”, *Advanced Optical Material* 9, 2001400 (2020).

H 大科学装置 分会邀请报告

HEPS 真空系统研制进展

董海义* 宋洪 邓秉林 刘佳明 刘顺明 杨奇 田丕龙 王鹏程 孙晓阳 朱邦乐 郭迪舟 李琦 王徐建
张磊 马永胜 黄涛 孙飞 杨雨晨 刘佰奇 彭晓华 何平

¹中国科学院高能物理研究所, 北京, 邮编 100049

*Email: donghy@ihep.ac.cn

摘要: 高能光源(High Energy Photon Source)是基于环型的第四代光源, 束流能量是 6GeV, 流强 200mA。建成后, HEPS 将成为我国第一台高能量同步辐射光源, 也是世界最亮第四代同步辐射光源之一。HEPS 包括加速器、光束线站、配套土建工程及辅助设施等。其中加速器由直线加速器、输运线、增强器和储存环组成。由于 HEPS 采用紧凑型磁结构, 空间受限, 给储存环超高真空获得、真空部件的设计和加工提出了许多技术难题。本报告详细介绍了 HEPS 真空系统设计方案、采用的技术和工艺方法, 以及研制进展。目前直线加速器真空系统安装调试完成, 静态真空达到 $10^{-7}\text{Pa}\sim 10^{-8}\text{Pa}$ 范围; 增强器所有真空设备准备就绪, 已完成约一半的真空盒在隧道安装检漏; 储存环首套不锈钢真空盒已经完成, 铬锆铜真空盒由于上海疫情和拉制困难等问题有所拖期; 储存环光子吸收器进行了材料测试和焊接工艺检验, 批量加工正在进行; 完成了储存环 RF 屏蔽波纹管首批生产; 二套真空盒批量镀膜装置已搭建完成, 经过不断完善, 已具备批量镀 NEG 膜条件。

关键词: 储存环, 真空盒, 镀膜, 光子吸收器, RF 屏蔽波纹管

SHINE 加速器真空系统

刘以勇^{1*} 殷立新¹ 赵焯梁¹ 汤启升¹ 文雍梅¹

¹中国科学院上海高等研究院, 上海, 邮编 201210;

*Email: liuyy@sari.ac.cn

摘要: 上海硬 X 射线自由电子激光装置 (SHINE) 正在建设中, 其加速器总长度约 2 km, 由 8 GeV 的直线加速器以及 3 条波荡器线组成。SHINE 加速器是基于超导高频腔的加速结构, 由于高品质因数超导腔内壁极易受微米尺度颗粒物的影响, 在运行中产生场致发射等导致超导腔性能下降, 因此对加速器真空系统的洁净度提出了较高的技术要求。SHINE 加速器真空系统中的超净区域在元件清洁及装配、系统调试及运行等流程中均需要满足超净真空技术要求。在超净装配设施方面, 超导腔串装配超净间及局部超净安装设施完成建设并投入使用。在设备研制方面, 超净真空系统专用的分子泵机组、离子泵、屏蔽波纹管等已得到应用, 束流准直器、消能散器、光子吸收器等完成了样机研制。

关键词: 自由电子激光, 超导加速器, 超高真空, 超净

深圳产业光源加速器真空系统

刘鹏飞

深圳综合离子设施研究院，深圳，邮编：518106

摘要：深圳中能同步辐射光源（深圳产业光源），建设单位为深圳综合粒子设施研究院和深圳市光明区人民政府。项目以“需求牵引、错位发展、特色突出、集智创新”为指导思想，围绕深圳及粤港澳地区的集成电路、生物医药、先进材料和先进制造等高新产业需求，规划建设 1 台 3.0GeV，周长 696m，发射度小于 100pm.rad 的中能同步辐射光源。本报告将介绍深圳产业光源的物理设计和整体规划，重点介绍加速器真空系统的方案设计。

深圳中能高重复频率 X 射线自由电子激光装置 -低温超导技术

报告人：何超峰¹

¹深圳综合粒子设施研究院，深圳，邮编 518106；

*Email: hecf@mail.iasf.ac.cn

个人简介：何超峰，男，正高级工程师，现任深圳综合粒子设施研究院低温模组总装组组长，深圳市“孔雀计划”B类人才。

报告摘要：深圳中能高重复频率 X 射线自由电子激光装置项目于 2023 年 5 月通过国家发改委窗口指导批复，由深圳综合粒子设施研究院和光明科学城发展建设有限公司承建。本报告介绍了深圳中能高重复频率 X 射线自由电子激光装置项目基本情况、背景及必要性、建设内容与方案、实验测试平台、项目实施条件等内容，同时介绍了该项目相关低温超导技术。

关键词：深圳中能高重复频率 X 射线自由电子激光装置、低温、超导

武汉光源 1.5GeV 储存环真空系统设计

魏耕¹ 李健^{1*} 江仲开¹

¹武汉大学先进光源研究中心，湖北武汉，邮编 430072

*Email: lijian901020@whu.edu.cn

摘要：武汉先进光源研究中心 1.5GeV 储存环设计周长为 180 m，包含 8 个标准单元。储存环真空系统主体为铜合金无油真空盒，内壁均设计沉积有 NEG 涂层，其抽气方式为分布式与集中式相

结合的方式，在 $100 \text{ A} \cdot \text{h}$ 束流清洗后，储存环的动态真空度要求优于 $2 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 。储存环中弯段真空盒采用带有前室的设计以满足动态真空的需求，在带有前室的束流管道内布置光子吸收器，其余真空盒则采取外壁水冷的分布式吸收设计。除了 SuperBend 组合磁铁段真空盒高度为 12mm 外，其余真空盒内径均为 32mm。每个 CELL 包含有 12 个 BPM，其中 7 个 BPM 带独立波纹管设计，5 个 BPM 直接焊接在真空盒上。本文将详细介绍真空系统的设计方案，包括烘烤以及同步辐射热的影响以及减小束流阻抗的相关设计，如 RF 屏蔽弹簧指、零阻抗铜垫片和屏蔽格栅等。

关键词：同步辐射光源， 超高真空， NEG 涂层，

参考文献：

- [1] Karimi, H., S.Z. Kalantari, J. Rahighi. "Vacuum System Design for the Storage Ring of Iranian Light Source Facility". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 953 , (2020).
- [2] C. Abraham, "Diamond-II Conceptual Design Report", (2019) .

分会口头报告

磁约束核聚变装置大型外真空杜瓦系统设计研究

杨庆喜^{1*} 徐皓¹ 李宁¹ 陈肇玺¹ 余清洲^{1,2}¹中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽合肥, 邮编 230031;²中国科学技术大学, 安徽合肥, 邮编 230026

E-mail: yangqx@ipp.ac.cn

摘要: 外真空杜瓦系统是磁约束核聚变装置主机核心系统, 它位于装置主机最外层, 主要为装置主机超导磁体、冷屏等冷质部件提供一个稳定真空 ($\sim 10^{-4}$ Pa) 运行环境, 保证超导磁体系统、冷屏系统能够安全、稳定运行。另外, 聚变装置外真空杜瓦系统还为加热、低温、诊断、真空和水冷系统提供连接通道以及安装维护通道。同时还承受超导磁体、真空室、冷屏系统, 加热系统、低温系统等外部辅助系统在各类运行工况下传递的接口载荷。外真空杜瓦系统主要包括杜瓦主体和安全泄放系统。

本文基于核聚变装置杜瓦系统设计要求和参数和运行目标, 重点阐述外真空杜瓦系统结构设计、各类工况下的模拟分析研究。针对模拟分析结果, 运用 ASME 标准进行评判可行性和安全性。根据外真空杜瓦高辐照聚变环境, 提出了超大型尺寸 ($OD \geq \phi 10$ m) 真空容器真空密封设计方案, 并开展了相关分析研究。基于真空杜瓦大型、大壁厚尺寸结构特点和低漏率高真空要求, 设计研究了大型真空杜瓦系统成型和装配工艺。上述设计研究方法以及关键结构设计方案为同类型大型真空杜瓦系统设计和研究提供有益的参考。

关键词: 磁约束核聚变, 真空, 杜瓦系统, 密封, 成型工艺

结合大科学装置的氦原子精密谱测量

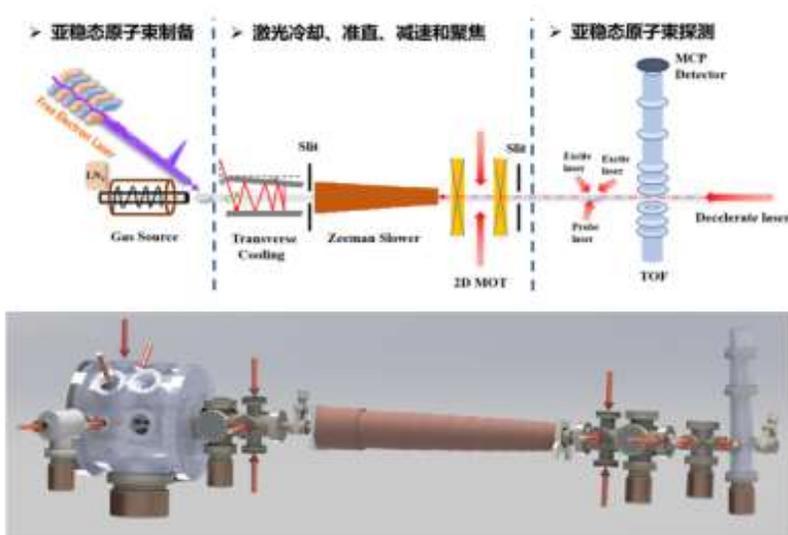
孙羽¹ 胡水明²

深圳综合粒子设施研究院 sunyu@mail.iasf.ac.cn

中国科学技术大学 smhu@ustc.edu.cn

我们拟建设的基于高重频自由电子激光的氦原子精密测量系统, 将搭建结合冷原子技术、单量子态选择、精密激光控制以及自由电子激光激发产生亚稳态的高精度的氦原子精密测量装置。装置拟实现: 自由电子激光器激发产生高强度亚稳态氦原子束流, 通过冷原子技术进一步增强原子束流强度, 实现高精度氦原子精密谱的测量。此方法将充分利用自由电子激光能量大、可调谐、光子激发探测的特性, 实现高强度的压稳态氦原子束流的激发, 进一步提高测量的信噪比, 实现更高精度的测量结果。进一步发展国际领先的氦原子精密光谱测量方法, 完成氦原子高精度的跃迁频率的测定,

检验量子电动力学方法，测定基本物理常数，在极限精度下检验 QED 理论。



结合自由电子激光器氦原子精密测量装置

CEPC vacuum system

马永胜^{1*} 董海义¹ 王鹏程¹ 刘佳明¹ 刘佳明¹ 谭彪¹ 孙飞¹ 黄涛¹

¹中国科学院高能物理研究所, 北京, 邮编 100049;

*Email: mays@ihep.ac.cn

摘要: 未来环形对撞机 (CEPC) 将成为世界最大的粒子加速器之一, 也将成为世界最大的人造真空系统。主要包含各 100 公里的正负电子环, 增强器, 以及 1.8 公里长的直线加速器。正负电子环真空盒内壁采用 NEG 镀膜的形式获得束流所需要的真空, 同时, 抑制正电子环电子云效应。增强器与直线真空系统将采用传统离子泵获得真空的方式。目前, CEPC TDR 预研究工作已基本完成。一些关键核心部件, 如真空盒、屏蔽波纹管等已研制成功并通过测试, NEG 镀膜等关键核心技术已完全掌握, 已规模化应用于 HEPS 项目

关键词: 超高真空, 环形粒子对撞机, 真空盒, 波纹管

自由电子激光装置束流线上的屏蔽铜圈结构设计

赵峰¹ 常仁超² 张浩² 林涵文² 魏建平² 尉伟^{2*} 余永¹

杨家岳¹ 张未卿¹

¹ 大连化学物理研究所, 辽宁沈阳, 邮编 116023

² 深圳综合粒子设施研究院, 广东深圳, 邮编 518107;

*Email: weiwei@mail.iasf.ac.cn

摘要: 加速器中的电子束不稳定性主要来自于带电粒子束与其真空室环境的电磁相互作用, 即当电子束与周围环境相互作用时, 它会产生一种叫做尾流场的电磁场, 而尾流场反过来作用于电子束, 干扰了它的运动从而使电子束变的不稳定。本文基于大连先进光源束流测试平台项目的前期预研项目, 考虑到测试平台对于电子束的稳定性有较高要求, 所以在设计过程中为减小电子束通过环境的阻抗效应, 提出了一种屏蔽垫圈结构。首先考虑到屏蔽铜圈需要具有良好的导电性和密封性, 所以采用软金属无氧铜作为制作材料, 然后通过铜圈压紧变形试验和密封性试验来确定屏蔽铜圈的内径加工尺寸和密封可靠性, 同时考虑到铜圈压紧后要在法兰铜圈的连接过渡段有良好的平滑过渡, 所以进行了铜圈压紧后的径向台阶和轴向间隙测量试验来确定屏蔽铜圈的其它关键结构尺寸, 最后完成结构设计后, 应用 ECHO 软件进行了屏蔽铜圈法兰过渡段和电子束的电磁相互作用仿真, 仿真结果显示, 本文设计的屏蔽铜圈密封压紧后过渡段和电子束电磁相互作用与直通管和电子束的电磁相互作用相差不大, 说明本文提出的屏蔽铜圈结构满足实际工程使用需求。屏蔽垫圈结构的设计在自由电子激光装置束流线上法兰连接处的屏蔽阻抗设计中起关键作用, 为电子束流的通道提供了一个良好的运动空间, 此研究为屏蔽结构设计提供了重要的理论实践依据。

关键词: 自由电子激光; 尾流场; 阻抗; 屏蔽铜圈

HIAF 强辐射区真空系统设计及密封研究

柴振^{1,2} 蒙峻^{1,2} 罗成^{1,2} 杨伟顺^{1,2} 魏宁斐¹

¹ 中国科学院近代物理研究所, 兰州, 邮编 730000

² 中国科学院大学, 北京, 邮编 100190

Email: zhen_c@impcas.ac.cn

摘要: 由中国科学院近代物理研究所承建的强流重离子加速器 (HIAF) 将提供高能强流重离子束流进行核物理及其他实验研究。放射性束流分离器 (HFRS) 作为研究核物理的重要实验终端, 利用能量为 835MeV 的 U^{35+} 束流轰击靶材的手段产生碎裂和裂变反应再进行进一步的分离实验。在靶区和预分离器区域内将产生在线瞬时强辐射和感生放射剂量, 该区域内的设备及设备的维护不同于常规方式。因此, 需要着重考虑真空系统的设计和远程设备维护, 处于对人员和设备安全的考虑。提出了导向球-槽和自重密封的设计以达到靶件重复定位和密封的要求; 对于束流管道之间的密封, 提出了分体式凸台密封结构, 并研制了可远程操作的充气膨胀密封法兰装置。

关键词：HIAF；放射性次级束流分离器（HFRS）；真空系统设计；充气膨胀密封法兰

一种单侧压封废束桶束窗的设计及热结构分析

林涵文¹ 张浩¹ 杨家岳¹ 尉伟^{1*} 黄礼明¹ 张未卿¹

鄂得俊¹ 陶凯¹ 赵峰¹ 魏建平¹ 常仁超¹

¹深圳综合粒子设施研究院，广东深圳，邮编 518107

*E-mail: weiwei@mail.iasf.ac.cn

摘要：深圳中能高重频 X 射线自由电子激光（S³FEL）将建设成为世界上第一座工作在软 X 射线波段的高重频自由电子激光。废束桶^[1]是自由电子激光装置中用于调束的重要设备，废束桶束窗则是废束桶的重要组成部分，用于过滤低能光谱、吸收和释缓辐射功率，同时还被用做低真空区间与高真空区间的隔离装置。本文设计了一种带有水冷结构的单侧压封废束桶束窗，选择铍^[2-3]作为束窗的材料，利用蒙特卡罗粒子输运程序 FLUKA 软件^[4-6]对不同厚度（0.5~2mm）的铍窗表面沉积功率进行了计算，并使用有限元分析软件 ANSYS^[7]计算了 4 种厚度（0.8mm、1.2mm、1.6mm 和 2mm）铍窗的最大温度、应力以及形变量，分析得出厚度为 1.6mm 的铍窗效果为 4 种厚度中最佳，其表面最大温度为 103.98℃，最大应力为 254MPa，最大应力位于与铝镁合金密封圈接触的位置，中心处最大形变为 0.055mm、应力为 152.65MPa。计算结果验证了所设计的束窗结构的整体稳定性，为 S³FEL 废束桶束窗的后续设计提供了理论依据和参考。

关键词：自由电子激光；高重频；废束桶；束窗；有限元分析

参考文献：

- [1] 李迪开,曹磊峰,池云龙,等.95 MeV 射频电子直线加速器辐射防护分析[J].强激光与粒子束, 2022, 34(6): 064008. (Li Dikai, Cao Leifeng, Chi Yunlong, et al. Radiation protection analysis of 95 MeV RF electron linac[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(6): 064008).
- [2] 陈旭,杨新建,齐京,朱秀珍.金属 Be 真空出气性能的测试[J].真空科学与技术,2002(06):65-68.
- [3] 张浩,黄礼明,赵峰,林涵文,常仁超,魏建平,鄂得俊,尉伟,陶凯,杨家岳,张未卿.一种高重频废束桶束窗的设计及热结构分析[J].强激光与粒子束,2023,35(03):88-93.
- [4] Boehlen T T, Cerutti F, Chin M, et al. The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications[J]. Nuclear Data Sheets, 2014, 120: 211-214.
- [5] Ahdida C, Bozzato D, Calzolari D, et al. New capabilities of the FLUKA multi-purpose code[J]. Frontiers in Physics, 2022, 9: 788253.
- [6] Battistoni G, Boehlen T, Cerutti F, et al. Overview of the FLUKA code[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 82: 10-18.
- [7] 张朝晖.ANSYS12.0 热分析工程应用实战手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010. (Zhang Chaohui. ANSYS12.0 practical handbook for the engineering thermal analysis. Beijing: China Railway Press, 2010).

A 真空科技与工程/第十六届国际真空科学与工程应用学术会议 (VSEA-16)
分会张贴报告

Analysis and Research of Arsenic Thermal Cracker Based on DSMC

Yu Guangchen¹ Wang Junli¹ Wang Xiaodong^{1,*}

¹Northeastern University, College of Mechanical Engineering and Automation, Shenyang 110819

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

Abstract: GaAs, AlGaAs film are usually obtained by molecular beam epitaxy. The intensity and uniformity of the beam current directly affect the speed and quality of the thin film epitaxial growth. In this paper, the analysis and investigation of As₄ cracking in the inner wall heated region of Ta in the presence of transition regime (Knudsen number between 0.01 and 10) is conducted. Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method is employed for simulation to assess the efficiency of As₄ gas cracking under working process inflow rates and temperatures. Additionally, the optimization of beam quality is explored by varying the tilt angle, number, and distribution of holes in the diffusion plate. The Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method is a stochastic particle-based technique that is widely used for simulating rarefied gas flows. It was first introduced by Bird^[1] in the 1960s and has since become a widely accepted approach for solving flow problems in the non-equilibrium Knudsen number regime. In this study, the DSMC+^[2] module in OPENFOAM is utilized. It is employed to simulate the collision-induced dissociation of As₄ molecules and the collision recombination of As₂ species within the cracking source, as well as the influence of microchannels on the beam in the diffusion plate. By optimizing the design of the cracking source and diffusion plate based on simulation results, it is possible to reduce As₂ recombination, enhance cracking efficiency, and provide valuable data for the As cracking process. Appreciate for the substantial support provided by the design and structural simulation of the cracking source (ID: 2022YFF0707601) in the national key research and development plan to this study.

Key Words: Arsenic Thermal Cracker, DSMC, transition regime, Structure Optimization

References:

- [1] G.A. Bird, Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows, Oxford Science Publications, Oxford University Press Inc, New York, 1994.
- [2] C. White, dsmcFoam+: An OpenFOAM based direct simulation Monte Carlo solver, Computer Physics Communications 224(2018)22-43.

Analysis and Research of Hydrogen Dissociation Based on DSMC

Wang Junli¹ Wang Xiaodong^{1, *} Yu Guangchen¹

¹Northeastern University, College of Mechanical Engineering and Automation, Shenyang 110819

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

Abstract: Hydrogen atoms are widely used in surface cleaning and thin film experiments. It is particularly important to improve the thermal dissociation efficiency of hydrogen molecules and reduce the probability of collision recombination. The thermal dissociation and recombination processes of hydrogen molecules with Knudsen number greater than 10 in ultra-high vacuum are studied in this paper. DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) method was first proposed by G.A.Bird to solve the relaxation problem of uniform gas ^[1] and shock wave structure^[2] in aviation system, and has been gradually applied to complex geometric problems. According to different inlet pressure, flow rate, temperature, geometric structure and other parameters, simulation was carried out by DSMC to study the influence of different parameter changes on the thermal dissociation of hydrogen molecules, analyze the influence of beam plate structure on the outlet pressure and the collision recombination probability of hydrogen atoms, then optimize the internal size structure and beam plate structure of gas source furnace. The recombination of hydrogen atoms after colliding with the beam plate is analyzed by monitoring the amount of hydrogen atoms entering the coating chamber. At the same time, the relationship between the size of the cracking furnace and the variables such as inlet pressure and temperature is obtained, which provides a good prerequisite for vacuum coating. Appreciate for the significant support rendered to this study through the design and structural simulation of the cracking source (Project ID: 2022YFF0707601) as part of the national key research and development plan.

Key Words: Ultra-high Vacuum, DSMC (Direct Simulation Monte Carlo), Thermal Dissociation, Structure Optimization, Rare Gas

References:

- [1] Bird G A. "Approach to translational equilibrium in a rigid sphere gas", Phys. Fluids, 6:1518-1519 (1963)
- [2] Bird G A. "Shock wave structure in a rigid sphere gas. Rarefied Gas Dynamics", ed. by J H de Lesuw, 1:216-222, Ac Press (1965)

Analysis of shield sleeve eddy current Loss and internal cooling system based on shield motor for vacuum pump

Jiao Feng Zhang Zhijun^{*}

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang Liaoning, 110819;

*Email: Zhjzhang@mail.neu.edu.cn

摘要: Roots vacuum pump has been tested in petroleum, chemical, plastics, pesticides, steam turbine rotor dynamic balance, aerospace space simulation and other devices for a long time. Therefore, it has been vigorously promoted and applied in China, It is also widely used in petroleum, chemical, metallurgy, textile and other industries. The vacuum pump drives the shielded motor as its core component, the loss and temperature rise of the shielded motor directly affect the operation efficiency and safety of the pumping system. The shielding sleeve loss and cooling system design have become the focus of the research. In this paper, based on the theoretical basis of eddy current field and temperature field, after modeling according to the given shielded motor parameters, Maxwell software was used to analyze the internal loss of the motor, and the conclusions were drawn: The eddy current loss of the shield is directly proportional to the thickness and inversely proportional to the material resistivity. The stator shield loss is much greater than the rotor shield loss. The loss of each part of the motor was mapped to the heat source on workbench platform, and the magneto-thermal coupling calculation was carried out by co-simulation with Fluent module. For the motor, a cooling system with water cooling inside the shell is adopted, and a fluid-structure coupling model is established to simulate and analyze the temperature field changes inside the motor. Comparing the cooling effect of spiral type and reentry type, it is concluded that the reentry type cooling effect is better. This paper has some reference significance for the design of shielding sleeve and cooling system of vacuum pump driven shielded motor.

Key words: vacuum pump, shield electric machine, eddy-current loss, temperature field, cooling system, magnetic-thermal coupling

基于分子动力学与人工神经网络的掺硅类金刚石薄膜纳米压痕模拟

陈志立 刘宇泰 司文 李全伟 杜广煜*

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819

Email: gydu@mail.neu.edu.cn

摘要: 分子动力学是对物质进行微观层面研究时常用的一种计算机模拟方法, 经常被用来验证理论及预测现象。一般情况下, 分子动力学模拟中所用模型的尺度越大, 模拟计算的结果越准确, 但更大的模型会导致计算资源的更大损耗。而神经网络可以经过训练后建立输入与输出之间的映射模型, 具备占用计算资源较少的优点。在分子动力学模拟中采用熔融退火的方法制备掺硅类金刚石薄膜模型, 加热到 10000K 后保持熔融状态一段时间, 再快速降温淬火至 300K。除硅原子数量外保持其余各参数不变, 模拟不同掺硅比例类金刚石薄膜的纳米压痕过程, 掺硅比例范围 0~30%, 共 31 组模拟实验。将 31 组数据中 28 组作为训练集, 3 组作为测试集, 以分子动力学模拟中不同的硅原子占比作为输入量, 同一压入深度下的载荷值作为输出量, 训练神经网络模型, 最终用验证集对训练好的神经网络进行验证。

关键词: 类金刚石薄膜, 硅, 分子动力学, 人工神经网络, 纳米压痕

参考文献:

[1]Giulia Fiaschi, et al."A Chemical, Mechanical, and Tribological Analysis of DLC Coatings Deposited by Magnetron Sputtering." *Lubricants* 7, 4(2019).

[2]Wang Yang, et al."Tight-Binding Quantum Chemical Molecular Dynamics Study on the Friction and Wear Processes of Diamond-Like Carbon Coatings: Effect of Tensile Stress.." *ACS applied materials & interfaces* 9, 39(2017).

Nanoindentation Simulation of Silicon - doped Diamond -like Carbon Films Based on Molecular Dynamics and Artificial Neural Network

Zhili Chen, Yutai Liu, Quanwei Li, Wen Si, Guangyu Du*

College of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, 110819

Email: gydu@mail.neu.edu.cn

Abstract : Molecular dynamics is a computer simulation method commonly used in the study of micro-level materials, which is often used to verify the theory and predict the phenomenon. In general, the larger the scale of the model used in molecular dynamics simulation, the more accurate the simulation results, but the larger model will lead to greater loss of computing resources. The artificial neural network can establish a mapping model between input and output after training, which can occupy less computing resources. In the molecular dynamics simulation, the silicon-doped diamond-like carbon film model was prepared by melt annealing. After heating to 10000K, it was kept in the molten state for a period of time, and then cooled and quenched to 300K rapidly. Keeping the rest of the parameters unchanged in addition to the number of Si atoms, In the simulation, nanoindentation of diamond-like carbon films with different silicon doping ratios, silicon-doped ratio ranging from 0 to 30%, a total of 31 groups of simulation experiments. In this paper, 28 groups of 31 groups of data were used as training sets, 3 groups were used as test sets, the proportion of different silicon atoms in molecular dynamics simulation was used as input, and the load value at the same indentation depth was used as output to train the artificial neural network model. Finally, the trained neural network was verified by the verification set.

Keywords: DLC, silicon, molecular dynamics, artificial neural network, nanoindentation

Reference:

[1]Giulia Fiaschi, et al."A Chemical, Mechanical, and Tribological Analysis of DLC Coatings Deposited by Magnetron Sputtering." *Lubricants* 7, 4(2019).

[2]Wang Yang, et al."Tight-Binding Quantum Chemical Molecular Dynamics Study on the Friction and Wear Processes of Diamond-Like Carbon Coatings: Effect of Tensile Stress.." *ACS applied materials & interfaces* 9, 39(2017).

Effect of fretting wear characteristics and damage morphology on insulation performance of insulated bearing

Quanwei Li, Zhili Chen, Yutai Liu, Wen Si, Guangyu Du*

Mechanical Engineering and Automation of Northeastern University, 110819

Abstract: Insulation bearing outer ring and bearing seat at work is interference fit, when the motor in the process of transportation, installation and service bearing seat and the outer coating can produce micro wear, cause bearing vibration or shock, and changes the structure of the coating, which can make the insulation performance of bearing, eventually lead to bearing failure under the galvanic action. In this paper, the influence mechanism of fretting wear characteristics and damage morphology on insulation properties of insulated bearings is explored by combining test verification with finite element simulation. The test verification part includes fretting wear test and axial current damage test. Scanning electron microscope, X-ray diffractometer and insulation property tester are used to test and analyze the samples. In the finite element simulation part, the fretting wear calculation model was established by ABAQUS software, and the cylindrical plane wear device was simulated and analyzed. The results show that microcracks appear on the coating surface of the insulating bearing under fretting wear. With the increase of fretting cycles, the cracks will gradually expand until the electrical insulation failure of the coating occurs. This paper will provide a theoretical basis for the development and application of technology to improve the performance of insulating coating and improve the reliability and stability of insulating bearing.

Keywords: Insulated bearing; Fretting wear; Alumina coating; Electrical damage

Reference:

- [1] M Touzin, Goerriot D, Guerret-Piécourt C, "Alumina based ceramics for high-voltage insulation", Journal of the European Ceramic Society 30(4), 805-817 (2010).
- [2] Tao Zhang, Lei Yangjun, Yin Jie, "Effects of pores on dielectric breakdown of alumina ceramics under AC electric field", Ceramics International 45(11), 13951-13957 (2019).

涡轮分子泵结构优化研究

匡永麟 王晓冬*

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要: 涡轮分子泵广泛应用于半导体与薄膜工业、核物理及表面科学等领域。为保证涡轮分子泵的可加工性, 同时提升其抽气性能指标, 本研究提出了一种曲面叶片对其结构进行改进。使用蒙特卡洛方法对此方案的模型进行性能评估, 结合遗传算法对结构进行多目标优化设计。与原直叶列

结构相比, 曲面叶片结构的涡轮叶列的最大何氏系数和最大压缩比均略有所提升; 同时, 通过遗传算法计算出其多目标优化的帕累托最优解, 其中有相当一部分结构的性能指标优于原直叶列结构。本研究表明曲面叶片能在一定程度上提升涡轮分子泵的性能, 是涡轮分子泵优化设计的一个发展方向。

关键词: 涡轮分子泵, 曲面叶片, 抽气性能, 优化设计, 遗传算法

参考文献:

- [1]. Heo J S, Hwang Y K. DSMC Calculations of Blade Rows of a Turbo Molecular Pump in the Molecular and Transition Flow Regions[J]. Vacuum, 2000, 56(2): 133-142.
- [2]. Bernhardt, K.-H. Calculation of pumping speed of turbomolecular vacuum pumps by means of simple mechanical data[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films, 1983, 1(2):136-139.
- [3]. 王晓冬, 张磊, 巴德纯, 等. 涡轮分子泵抽气性能计算的误差分析[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(04):432-435.
- [4]. 匡永麟, 王晓冬, 黄海龙, 等. 涡轮分子泵叶列抽气性能的计算方法改进[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(01): 26-30.
- [5]. 匡永麟, 王晓冬, 张国玉, 张鹏飞, 杜志华. 涡轮分子泵曲面叶片抽气特性研究[J/OL]. 真空科学与技术学报:1-6[2022-09-14].

基于 TPMC 的新型变叶片组合叶列的精准建模与计算

孙坤^{1*} 李坤¹ 王成¹ 汪森辉¹ 邓海顺¹ 张世伟²

¹安徽理工大学机械工程学院, 安徽淮南, 邮编 232001;

²东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819

*Email: ksun@aust.edu.cn

摘要: 基于试验粒子蒙特卡洛方法 (TPMC) 提出了一种新型变叶片组合叶列模型, 以准确计算不同结构参数的抽气性能, 揭示涡轮分子泵 (TMP) 的抽气机理。新型变叶片组合叶列模型的解析方程是在笛卡尔坐标下根据真实的 3D 几何模型推导出来的。TMP 内部被划分为不同的区域 (入口 (A1/B1)、前叶片 (A2/B2)、后叶片 (A3/B3)、转子体 (A4/B4)、泵壳 (A5/B5) 和出口 (A6/B6), 如图 1 所示), 求解了气体分子从一个区域到另一个区域的飞行时间, 编写了一个自定义程序来描述 TMP 内部气体分子的复杂飞行过程, 仿真结果与实验结果具有较好的一致性。流场分析表明, 转子叶列出口处的气体分子倾向于向半径较大的方向聚集, 这说明气体分子在进入定子叶列之前不再是均匀分布。在转子叶列中, 后叶片的分子密度占比最高。这有利于 TMP 抽气速率的提升, 因为 57% 的后叶片分子可能到达出口。在定子叶列中, 到达出口的气体分子密度并没有随着叶片速度比的增加而显著增加, 说明定子叶列主要用于提高 TMP 的压缩比。新的理论模型有望应用于多级 TMP 中, 以优化涡轮叶片的结构。

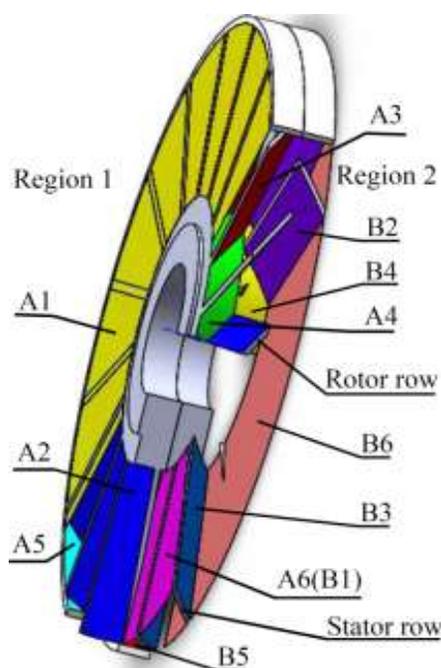


图 1 动静组合叶列分别被划分成 6 个区域的示意图

关键词：涡轮分子泵，TPMC，新型变叶片组合叶列，抽气速率，结构优化

扁线油冷电机损耗仿真分析

刘奕新 张志军*

东北大学机械工程与自动化学院，辽宁沈阳，邮编 110819；

*Zhjzhang@mail.neu.edu.cn

摘要：随着技术的进步和新能源汽车的发展需求，汽车的驱动电机也向高功率密度、轻量化、小型化等方面迈进，这些特点使得电机的热损耗功率变大从而导致电机的温升增加并影响电机的正常稳定运行。降低电机温升可以从减小电机损耗值和增加电机散热性两方面讨论，本文从减小电机损耗值方面考虑，在保持电机的槽满率不变的情况下，通过增加电机齿槽高度及改变扁线绕组的长宽比进行仿真分析，其结果表明电机的齿槽高度增加时电机的绕组铜耗值会随之减小，其铁耗值会相应的增加，但其总损耗值有略微下降。而当电机的扁线绕组长宽比增加时电机的铜耗值有明显的下降趋势，铁耗值有略微波动但其总损耗值有明显下降。从而可以看出适当的增加电机的齿槽高度和电机扁线绕组长宽比可以降低电机的总损耗值从而达到降低电机温升的目的。

关键词：油冷电机，仿真分析，绕组铜耗，齿槽高度，扁线绕组长宽比

铅阳极泥真空气化高效分离砷-清洁制备 As_2O_3 的研究

范凯^{1,2} 高哲^{1,2} 孔祥峰^{1,2,3*} 杨斌^{1,2,3} 伊家飞^{1,2} 李绍雄^{1,2}

¹昆明理工大学真空冶金国家工程研究中心, 云南昆明, 邮编 650093;

²昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南昆明, 邮编 650093;

³云南省复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南昆明, 邮编 650093;

*Email: xngfngkong@163.com

摘要: 铅阳极泥是粗铅电解精炼的副产物, 是提取金、银、碲等稀贵金属的主要原料。传统方法每处理 1 吨铅阳极泥约产生 0.3 吨高砷烟尘, 2021 年全国铅冶炼企业高砷烟尘产出量超过 4 万吨且难以有效利用, 累积堆存量超过 60 万吨。高砷烟尘的产生增加了稀贵金属的回收难度, 加重了生产环境的污染程度。以“砷害”问题的源头解决为出发点, As_2O_3 的清洁制备为指导, 提出“定向氧化砷-真空气化分离 As_2O_3 -清洁制备 As_2O_3 ”的冶金新技术, 重点研究了铅阳极泥中砷的定向氧化调控机制和氧化调控产物真空挥发过程中相际间物质分布规律。有机结合了铅阳极泥中元素的氧化特性及挥发特性。在真空度为 5 Pa, 气化温度 340 °C 时, 铅阳极泥中的砷大量以 As_2O_3 的形态挥发, 收集到的 As_2O_3 纯度大于 99%。构建了铅阳极泥中砷高效分离及 As_2O_3 清洁制备的基础理论和技术原型, 有效解决了铅冶炼行业砷害共性难题, 显著提高了砷的资源化利用率, 为阳极泥中砷的高效分离与清洁利用提供了新方向。

关键词: 铅阳极泥, 砷, 真空气化, 清洁制备, As_2O_3

航天材料真空释气特性测试技术与装备研究

王军伟^{1*} 李国华¹ 刘洋洋¹ 汪志伟¹

¹北京卫星环境工程研究所, 北京, 邮编 100094;

*Email: tobenol@126.com

摘要: 真空释气特性是指材料在空间热真空环境下释放气体能力的表征, 是航天器材料选用的重要考核因素。本文对航天材料热真空释气特性及挥发物动力学特性测试技术及相关标准进行研究, 并对研制的新一代超高真空释气特性测试系统具体设计进行描述。该新型装置首次在超高真空环境下兼容收集板及石英晶体微量天平测试标准方法, 并对两种测试方法一致性进行研究。该装置可有效满足空间材料释气特性测试及放气规律分析、材料筛选与污染效应评估的目的。

关键词: 航天材料, 真空释气, 超高真空, 挥发特性

参考文献:

1. ASTM Committee E21 on Space Simulation and Applications of Space Technology. ASTM E595-07,

- Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials From Outgassing in a Vacuum Environment[S]. 2007.
- 2.European Space Agency for the Members of ECSS. ECSS-Q-ST-70-02C, Thermal Vacuum Outgassing Test for the Screening of Space Materials[S]. Noordwijk: ESA Publications Division ESIC, 2008.
- 3.ASTM Designation: E 1559-09 (2016). Standard test method for contamination outgassing characteristics of spacecraft materials.
- 4.Orlandi M , Rampini R , Schmeitzky O, et al. DOK: The New ESA Dynamic Outgassing High Temperature Facility.

蒸汽喷射器喷嘴膨胀状态对引射系数的影响

刘静雯 王晓冬*

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819;

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要: 本文根据喷管出口压力与喷管出口附近压力之比, 将喷管分为三种膨胀状态: 欠膨胀、完全膨胀以及过膨胀。从喷嘴出口膨胀状态的角度, 观察喷射器引射系数的变化^[1]。基于实验室蒸汽喷射器的数据, 利用 ANSYS Fluent 对喷射器进行数值模拟。因为喷管出口附近压力可认为是引射蒸汽压, 所以可以通过改变引射蒸汽压力, 改变喷嘴出口的膨胀状态。不同引射蒸汽压的模拟结果显示, 在喷嘴膨胀状态由欠膨胀至过膨胀转变的过程中, 工作蒸汽的质量流量不变, 引射系数逐渐增大。

关键词: 蒸汽喷射器, 膨胀状态, 引射系数, 引射蒸汽压

参考文献:

- [1] Li He, et al. "Numerical investigation of the nozzle expansion state and its effect on the performance of the steam ejector based on ideal gas model." Applied Thermal Engineering 199.(2021).

罗茨真空干泵热分布测试及温控方法研究

王宇¹, 王桂鹏¹, 高满堂¹, 林大兴¹, 谢元华¹, 刘坤^{1,2,3*}, 巴德纯^{1,2,3}

1. 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳, 110819;

2. 工业智能与系统优化国家级前沿科学中心, 东北大学, 沈阳 110819;

3. 智能工业数据解析与优化教育部重点实验室, 东北大学, 沈阳 110819;

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: 罗茨真空干泵以其优异的结构和性能广泛应用于核能、半导体、化工、医药、食品、航空航天等领域中。罗茨真空干泵工作过程中, 随着转子的周期性运转, 产生的热量使泵体和转子受热膨胀和受力变形, 进而导致间隙发生较大变化, 直接影响泵的工作效率。基于罗茨真空干泵的运转发热问题, 设计了一种罗茨真空干泵温度测控方法。本文为研究罗茨真空干泵温度场分布与掺气流量对罗茨泵性能的影响, 使用热电阻测量罗茨真空干泵内转子与泵腔温度, 采用 DAQ 数据采集卡采集温度信号传至 PID 控制器, 通过质量流量计实现外部气源的定量控制, 实现转子和泵腔温度的调控。基于真空干泵集成测试试验平台, 分别对罗茨真空干泵 7 种不同进、排气口压力下的转子和泵腔进行温度测试。研究表明, 当排气口压力从百帕上升到万帕量级, 泵腔和转子整体温度分别上升约 90% 和 77%; 排气压力在百帕量级时, 泵腔轴向温度分布由端盖侧向齿轮箱侧逐渐递增, 排气压力位于万帕量级时, 泵腔轴向温度分布由端盖侧向齿轮箱侧逐渐递减。通过控制掺气量实现转子和泵腔的降温, 转子的降温速度是泵腔的两倍左右, 其降温幅值较之泵腔高约 38%, 掺气冷却对转子降温效果明显。本文对于罗茨型真空干泵的热分布及其温控过程的规律研究, 可为多种工况下罗茨真空干泵的精细化热管理提供支撑。

关键词: 罗茨真空干泵, 热管理, PID, 温度测控, 掺气冷却

作者简介: 王宇 (1999.10-), 男, 硕士研究生, 主要从事干式真空泵转子型线及其热分布设计研究, E-mail: 2170249@stu.neu.edu.cn。

通讯作者: 刘坤 (1979.07-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 真空技术与高端装备, 微纳芯片流动理论与应用, E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助: 辽宁省应用基础研究计划 (2022JH2/101300215) 和 111 项目 (B16009)。

高真空干泵牵引级转子运转态形变及轴系振动特性研究

刘鑫宇¹, 王桂鹏¹, 王晓明¹, 谢元华^{1,2}, 巴要帅^{1,2}, 刘坤^{1,2*}, 巴德纯^{1,2}

¹.东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳, 110819;

².东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 沈阳, 110819;

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: 高真空干泵是一种高转速、微型化、一体化的新型干泵,可直排大气并获得较高真空度。高真空干泵主要由牵引级和旋涡级组成。其中,牵引级对高真空段的压缩比提升效果明显,是保证高真空干泵抽气性能指标的重要组成部分。转子与定子的间隙直接影响泵的抽气性能,间隙过大极限真空度降低,间隙过小时受定、转子形变和动力学因素影响,极易导致泵出现卡死故障。为实现对牵引级转子间隙的合理设计,本文对高真空干泵牵引级进行有限元分析,重点对离心变形与热变形进行讨论,通过施加惯性载荷与轴承参数计算转子离心变形,采用热-固耦合模拟计算转子热变形,研究高真空干泵定、转子运转态下的间隙分布变化规律。转子在高速转动时,由于轴承自身的振动特性,转子部件会发生轴向和径向跳动,分析轴承的时变轴承刚度与时变油膜阻尼振动特性。研究结果表明,当 10L 真空腔体被抽取到 10^{-2} Pa 时,最高气体工作温度为 70 ℃,计算得到不同压力下的对流换热系数,分析得到转子最大变形量为 0.277mm,其中轴向变形为 0.270mm,径向变形为 0.091mm。随着轴承性能衰减,振动幅值增加,轴承性能衰减前,转子径向最大振动幅值为 0.0277mm。本文提出了分析高真空干泵牵引级转子的形变及轴系部件跳动的研究方法,为高真空干泵牵引级定、转子间间隙选取提供设计依据。

关键词: 高真空干泵, 牵引级, 多物理场, 转子变形, 振动特性

作者简介: 刘鑫宇 (1998.12-), 男, 硕士研究生, 主要从事高真空干泵转子热-固耦合模拟及轴系零部件动力学分析, E-mail: 2000459@stu.neu.edu.cn。

通讯作者: 刘坤 (1979.07-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 真空技术与高端装备, 微纳芯片流动理论与应用, E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助: 辽宁省应用基础研究计划 (2022JH2/101300215) 和教育部中央高校基本科研业务费 (N2103027)。

基于螺旋等距面理论的螺杆真空泵转子间隙控制方法研究

余华明¹, 王桂鹏¹, 孙浩¹, 谢元华^{1,2}, 巴要帅^{1,2}, 刘坤^{1,2*}, 巴德纯^{1,2}

¹.东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳, 110000;

².东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 沈阳, 110819;

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: 螺杆真空泵性能优越,广泛应用于电子、光伏、医药化工和半导体等行业。随着产业技

术升级,传统等螺距螺杆真空泵已无法适应需求,变螺距螺杆转子的优势逐渐显现。变螺距螺杆转子的内压缩过程使其气体输运过程变得复杂,间隙设计难度大,而螺杆真空泵内间隙分布直接影响其抽气性能。本研究以变螺距螺杆真空泵转子为研究对象,基于绝热压缩过程计算螺杆真空泵工作中的热力学参数,以此为边界条件,通过热-固耦合分析计算转子极限工况下的形变量,确定出转子啮合间隙的极值。基于转子啮合间隙的分布和间隙的变化趋势,采用螺旋等距面方法计算得到辅助变距螺旋曲面。以辅助变距螺旋曲面作为转子精加工过程中的曲面,通过加工获得变螺距转子的工作间隙。本文以某型螺杆真空泵为研究对象,使用上述间隙设计方法对其进行优化,转子从吸气级到排气级间隙的分布为 0.06mm、0.08mm、0.1mm 和 0.12mm,实现了螺杆转子间隙随导程的渐变设计及加工。试验结果表明,对比原始转子和优化转子,螺杆真空泵稳定运行后,极限压力性能提升 5%-10%。本研究加工方法可为变螺距螺杆转子的加工及间隙设计提供一定的技术参考。

关键词: 变螺距螺杆真空泵, 等距曲面, 加工修型, 间隙, 极限真空

作者简介: 余华明(1998.01-),男,硕士研究生,主要从事干式真空泵设计及热-流-固耦合研究, E-mail: 2000467@stu.neu.edu.cn。

通讯作者: 刘坤(1979.07-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:真空技术与高端装备,微纳芯片流动理论与应用, E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助: 辽宁省应用基础研究计划(2022JH2/101300215)和教育部中央高校基本科研业务费(N2103027)。

电真空器件真空排气系统的组成与发展

李润霞, 张少雷, 韩永超*, 宋艳鹏, 张吉峰
(中国电子科技集团公司第十二研究所,
北京真空电子科技有限公司,北京 100015)

摘要: 真空排气系统是用于电真空器件的烘烤、排气、老炼等工艺的专用生产设备。本文简述了超高真空排气设备的工作原理及其组成,从小批量生产、半自动封接、超灵敏检漏、自动充排气、X射线防护和超大型排气台等方面介绍了目前超高真空排气系统的最新动态,在应用需求及专业自身发展推动下,真空排气系统正在向生产自动化、功能复合化、应用专业化等方向不断发展进步。

关键词: 超高真空排气; 小批量半自动排气台; 复合型排气系统; 超灵敏检漏

Composition and Development of Vacuum Exhaust System

Li Run-xia, Han Yong-chao, Zhang Shao-lei, Song Yan-peng, ZHANG Ji-feng,
(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: Vacuum exhaust system is a special production equipment for baking, exhaust, refining and other processes of electric vacuum devices. The main device components and principles are discussed in this paper. The ultra-high vacuum exhaust system of small batch production, semi-automatic sealing, ultra-sensitive leak detection, automatic exhaust, X-ray protection and large ultra-high vacuum exhaust station are introduced in detail. Driven by the application demand and the development of the profession itself, the vacuum exhaust system is developing and progressing in the direction of production automation, function integration and application specialization.

Key words: ultra-high vacuum exhaust station; Small batch semi-automatic exhaust table; Compound exhaust system; ultra-sensitive leak detection

随着科技的进步，行波管、触发管、速调管等电真空器件的应用领域得以逐步扩展。除了传统的军事和航空航天领域，电真空器件在 5G 通讯、智能驾驶等新兴领域的应用方兴未艾^[1,2]。电真空器件制造过程中的排气工艺直接影响器件的质量和使用寿命^[3]。因此，其专用生产设备真空排气系统的重要性不言而喻。

真空排气系统是为电真空器件提供烘烤、排气^[4,5]、充气 and 老炼^[6]等工艺的非标专用设备。经过几十年的发展，我国的真空排气系统发生了翻天覆地的变化：1) 真空度从低真空向高真空、超高真空快速发展。由无油干泵和磁悬浮分子泵作为预抽系统，溅射离子泵和吸气剂泵作为主抽系统真空排气系统的极限真空度可优于 $5 \times 10^{-9} \text{Pa}$ ；2) 针对日益增长的高自动化、高效率需求，目前已开发的多工位超高真空排气充气系统可同时对 32 个高压真空器件进行自动排气；3) 以工控机和可编程控制为核心的控制系统满足了电真空器件的自动化研究和生产的需要，保证了排气工艺的稳定性和一致性，提高了真空器件的综合性能^[7]；4) 在对相关工艺过程的参数控制、真空度测量、数据分析等技术提出了更进一步的自动化、智能化要求的同时，也衍生出了一系列专业性、针对性较强的复合超高真空排气系统。本文对近年来电真空器件专用真空排气系统的组成与发展进行了初步总结。

1. 真空排气系统的基本原理

真空排气系统具备真空获得、真空测量、烘烤除气、配气、充气等能力，设备主要由真空获得系统、烘烤加热系统及控制系统等构成。下图为一个典型的超高真空排气系统：



V1-V5 真空阀门, P1 P4 干泵, P2 溅射离子泵, P4 分子泵, G2 电离真空规, G1, G3 电阻真空规
图 1 真空排气系统原理图与实物图

真空获得系统分为主真空抽气系统和外真空抽气系统^[8]。主真空系统实现工件内部排气功能,其极限真空度一般为超高真空(空载)。主真空泵选用离子泵、分子泵、低温泵等抽气机组,前级泵选用干式涡旋真空泵,高抽速泵组配置可满足主真空系统快速从大气抽真空至超高真空。外真空系统用于防止器件烘烤时外表面的氧化,根据需求可到达粗、高真空范围,同样需要配置大抽速的抽气机组,以便快速获得所需真空环境。

表 1 总结了我公司生产的几种真空排气系统主要配置及可以达到的极限真空度。

表 1. 真空排气系统主要配置与极限指标

工位数量	前级真空泵	主真空泵	极限真空度
1 工位	涡旋干泵, 抽速 4L/s	复合分子泵, 抽速 600L/s	5×10^{-7} Pa
2 工位	涡旋干泵 (抽速 4L/s) + 复合分子泵 (抽速 600L/s)	离子泵 (抽速 600L/s) + 吸气剂泵 (抽速 400L/s)	5×10^{-9} Pa
6 工位	涡旋干泵 (抽速 8L/s) + 复合分子泵 (抽速 600L/s)	离子泵 (抽速 400L/s)	2×10^{-6} Pa
8 工位	涡旋干泵 (抽速 10L/s) + 复合分子泵 (抽速 1200L/s)	低温泵 (抽速 8000L/s)	5×10^{-8} Pa
8 工位	涡旋干泵 (抽速 10L/s) + 磁悬浮分子泵 (抽速 2200L/s)	离子泵+升华泵 (抽速 > 500L/s)	9×10^{-9} Pa
16 工位	涡旋干泵 (抽速 10L/s) + 复合分子泵 (抽速 1600L/s)	低温泵 (抽速 8000L/s)	2×10^{-7} Pa
32 工位	涡旋干泵 (抽速 10L/s)	磁悬浮分子泵 (抽速 2200L/s)	5×10^{-7} Pa

烘烤加热系统,包含烘箱、加热器、隔热屏、测温热偶、升降装置等。配合底部保温层为器件烘烤提供了高温保障,烘箱内加热管均匀排布,烘箱顶部设计热偶测温接口,构成的保温系统保证烘箱在加热烘烤过程中的温度均匀。

烘箱类型常用的有真空水冷烘箱和大气烘箱。烘箱配置升降装置,升降系统在上下位置均安装有限位开关,烘箱到达终止位置时自动切断电源。烘箱上升操作与真空度、温度关联互锁,有效防

止误操作。升降系统做了安全冗余设计，配合安全插销与接近开关或机械限位结构可以避免坠落这一潜在风险。

真空水冷烘箱为双层水冷结构或外布水道，配合多层隔热屏使用，形成良好的保温环境。烘箱配大抽速抽气机组，与主真空系统之间形成双层真空系统，防止器件在烘烤除气过程中外表被氧化。对于烘烤时不怕氧化的器件（如玻璃器件），可采用成本较低的大气烘箱。大气烘箱多为方形结构，中间填充一定厚度的保温材料，无水冷结构，框架台面采用石墨或者水泥石棉保温板，搭配使用减少加热系统的热量损失。铠装加热管或板式加热器在烘箱内壁前后两侧均匀布置，热场均匀稳定，程序温控仪保证系统精确控温，可以设定温度曲线。经长期高温烘烤后，良好的保温绝热措施保证烘箱外壁温度低于 45℃，确保操作人员安全。



图 2 真空烘箱实物图



图 3 大气烘箱实物图

控制系统部分主要由真空系统控制单元、烘箱加热控制单元、升降控制单元、真空测量单元和异常报警保护单元等组成。人机交换界面可显示泵组和电控阀门的工作状态。当控制方式处于自动运行方式时，泵组和阀门可按照程序设定自动运行。操作人员可在工控机上完成温度的设定和实际温度的监控和记录，控温曲线可任意设定并实时显示。根据客户需求，定制专用“工艺配方”，设备运行的工艺参数设定可通过人机交换界面进行调用，编辑和保存。设备具有完备的数据记录和分析功能，自主研发的控制系统配备程序统筹设计，可无人值守自动程控运行，提供完善的报警保护功能。

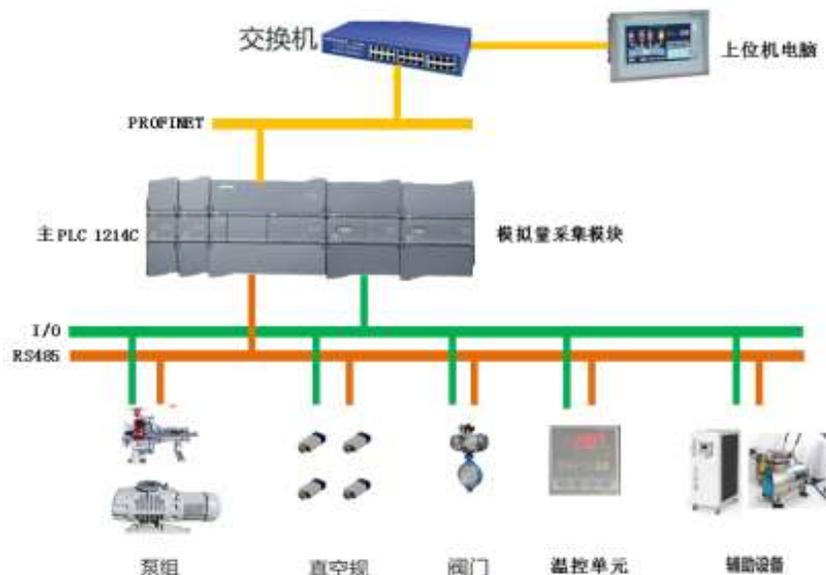


图 4 控制系统原理图

2. 真空排气系统的发展趋势

从 20 世界 30 年代以来，电真空器件高速发展，其性能和指标的巨大进步，对电真空器件生产效率、产品寿命和可靠性的要求进一步提高，这些需求进而对真空器件的支撑技术真空排气系统的发展提出新的挑战和发展机遇^[9]。依托于真空腔体、泵、阀门、真空密封件等基础部件的制造水平提升和工艺优化^[10]，真空排气设备也快速发展，总结了近年来真空排气系统的发展方向和应用。

2.1 生产自动化

当前，来自于航空航天、微电子、核工业等领域的电真空器件订单增速明显，真空排气系统正朝着更多工位、更高自动化、小批量化生产的方向发展。

1) 用于小批量化生产的超高真空自动排气系统

针对客户需求，我司研制的超高真空排气系统可同时对 32 个高压真空器件进行程序或手动排气，具备真空获得、真空测量、烘烤除气能力，具备真空度、温度、气压工艺参数进行实时记录、保存和输出报表等功能。整机采用全进口泵组配置，抽速大，可缩短真空获得所用时间，主真空系统的空载极限真空度约为 $2 \times 10^{-7} \text{Pa}$ 。采用密封水冷烘箱，可进行高温加热，内壁采用三层隔热屏，配置铠装加热管，加热温度均匀，热损失小。生产全过程均可通过程序控制，所有参数均可从工控机及相关仪表上查看，具备真空度、温度、气压工艺参数进行实时记录、保存和输出报表等功能。为真空器件产品的高效率、高可靠生产提供有力技术支撑。



图 5 32 工位超高真空自动排气系统实物图

2) 可实现半自动封接的自动冷封超高真空排气系统

在电真空器件开关管的研究和制造过程中，将高压开关管的零部件组装并经由一系列工艺试验后封接成密封器件才可进行后续实验^[11]，故真空封接是生产过程中的重要一环。目前，除大型开关管在封接时使用液压冷封钳，封接一般采用手动冷封钳，操作时一般需要两人协作完成，影响生产效率的同时产品质量无法保证。

针对上述情况，我们特别研发了半自动冷封真空排气系统，超高真空排气系统搭配电动控制的冷封钳，通过伺服电机组合大减速比减速器驱动钳口封接，根据驱动力选择匹配的伺服电机，确保其输出力矩，经过测试，可以满足需求。钳头采用高强度，高韧性工具钢制成，方便快速封接，搭配自主设计机械臂，可实现轻松操作夹封无氧铜管。支撑结构组成包括龙门支撑架、定位板、直线导轨，使得冷封钳在 XYZ 方向上自由移动，同时具备定位功能，对应工件工位口，实现精准封接。同时设计有平衡器，使得机械臂可轻松移动。设备可自行根据程序设置运行，可实现无氧铜管的自动冷封操作；并且可以实现冷封时的定距离维持操作，可设置每次冷封的距离，当设置距离为零时，实现完全冷封。

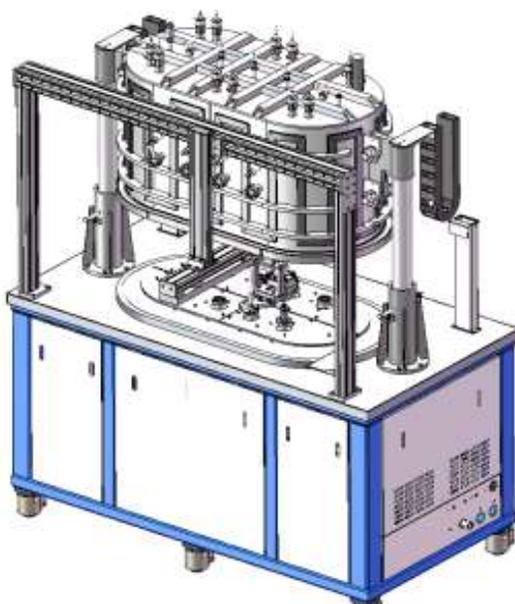


图 6 多工位自动冷封超高真空排气系统设计图

2.2 功能复合化

1) 可实现高灵敏度检漏的超高真空排气系统

空间行波管通过排气工艺,对零部件进行充分除气,并进行阴极激活分解,使阴极具有所需的电子发射能力,最后获得和保持空间行波管在工作和存储过程中所需要的真空度^[12]。由于产品在空间的不可维护性,保证空间行波管具有极低的漏率成为实现其高可靠、长寿命的必要条件。一般商业检漏仪的范围为 $1 \times 10^{-13} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,在空间行波管实际生产过程中,发现其无法满足日常生产检漏需求,故进行超灵敏检漏迫在眉睫。经实践证明,利用四级质谱对超高和极高真空系统进行检漏是一种十分有效的手段^[13]。结合行波管的生产过程,可在排气台上建立质谱仪加标准漏孔的检漏系统,结果表明,该系统的检漏下限为 $1.9 \times 10^{-14} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,采用动态检漏法的检漏下限为 $8.3 \times 10^{-12} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ^[14]。并且经充分烘烤出气,可以避免空间行波管微小漏孔常堵塞问题,为完成高可靠空间行波管的封离提供有效保障。为进一步探索行波管排气、封接过程中微小漏孔实时检测问题,基于累积比较检漏法搭建的超高真空排气台目前也已实现,在真空排气台上配置累积比较检漏系统和标准气体流量系统。高纯氦气和氦氮混合气体等通过配置相应比例的混合气体通过可以调节流量的阀门引入稳压室,并经由流导元件为检漏系统提供 $5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-16} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 范围的高精度、可调节标准气体流量,采用四极质谱计作为比较器,分别测量示漏气体和标准气体流量在累积过程中的离子流变化率,从而经计算获得被检测工件的漏率,设备检漏下限可达 $5 \times 10^{-16} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ^[15]。超灵敏检漏系统与超高真空排气台的集成,可以实现在排气过程中的任一时刻对真空器件进行检漏,检漏系统的真空获得系统与主管路的真空系统共用,一方面节约了设备成本,同时提高排气生产质量和效率。

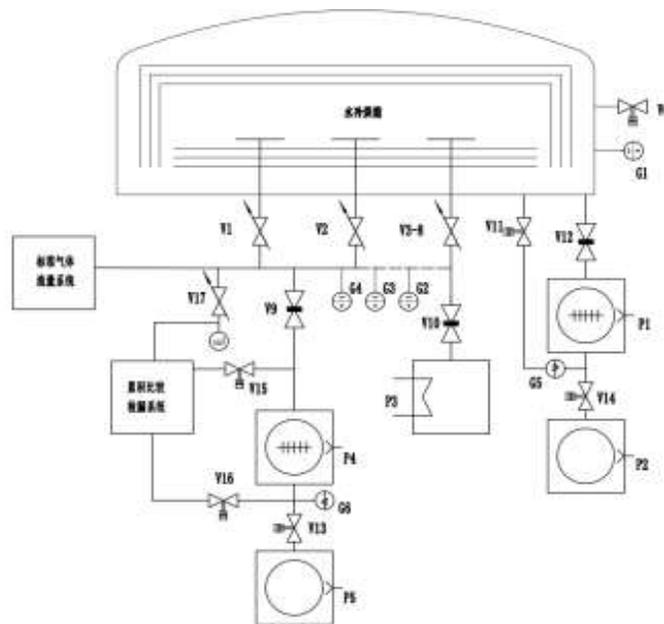


图7 具备高灵敏度检漏功能的超高真空排气系统原理图

2) 可实现在线自动充气功能的超高真空排气系统

触发管在生产过程中管中气体介质的种类、成分和压力是直接影响管子各种参数的重要因素之一^[16]。触发管的排气与充气工艺都在真空排气台上进行,在烘烤除气之后,冲入一定比例的工艺气体,其混合比例对真空器件产品性能的一致性有重要影响。针对上述特性,结合真空排气工艺的自动控制需求,我们设计生产了自动真空排气充气系统。将自动充气系统应用于高真空自动排气系统,

设备配置混气系统和配气系统，充气管路和储气罐均联结真空系统，可以抽至 $1 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 的真空系统，可以有效保证混气纯度。混气系统通过质量流量控制器，压力传感器，与截止阀联合使用，通过质量流量传感器控制充气流量，压力传感器测量充气压力，压力达到设置值后，自动关闭充气阀门，建立稳定的测试环境。系统基于闭环控制原理，以压力传感器测量数据反馈调节调节质量流量控制器的进气流量，最终达到稳态的真空压强环境。压强控制可根据系统的响应和滞后参量自整定 PID 参数，以达到快速、准确压强调节的最佳效果。经过测试，充气压力变化精度在百帕范围内，保压试验变化值在 1% 以内，表明程控自动排气充气系统有效提高真空充排气工艺的稳定性 and 一致性。

触发管排气工艺中目前采用较多的是高纯氮气，但为克服高纯氮气的高压击穿和连击现象，在高纯氮气中加入少量的水蒸汽可以稳定产品质量^[17]。目前常用的水汽充气装置多为水泡瓶配合 U 型计使用，充气过程多为手动，充气精度及误差均较大。结合目前日益发展的数字化需求，我们将真空排气系统与氮载水系统相结合。气源经氮载水单元后进入混气罐，达到指定压力后，通过微调阀后通入真空管路，可实现将混气室的高压气体对超高真空状态的主管道充气。其原理为：氮气经过纯化模块后分为两路，一路经质量流量计后进入预混罐，另一路经质量流量计后，进入鼓泡器，然后进入预混罐。通过调整鼓泡器内水饱和蒸汽压和两路高纯氮气的流量，实现混合气体中水分压的精确调控。系统配置外加热烘烤系统，可以有效去除管路中吸附的水蒸气，从而有效解决充气干扰问题。系统中的阀门和控制元件均可通讯到 PLC，监测系统压力、温度、气体流量，实现设备的自动化控制。自动真空排气充气设备保证了真空排气、充气工艺的稳定性 and 一致性，提高了电真空器件产品的质量。

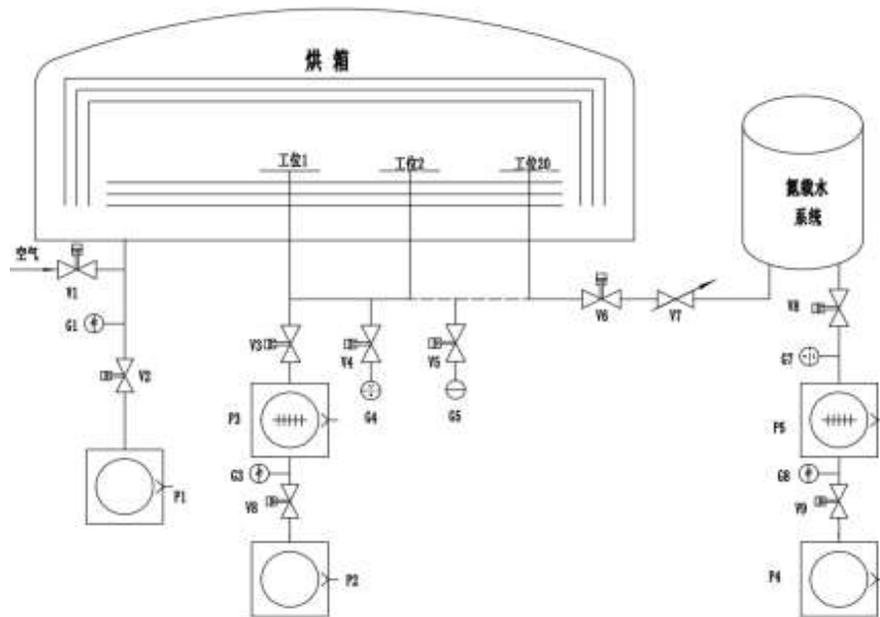


图 8 具备高精度充气（氮气和蒸汽）功能的超高真空排气系统原理图

2.3 应用专业化

1) X 射线防护超高真空排气台

对电真空器件施加一定的电流、电压，做分解、激活等工艺是电真空器件在生产过程中的重要环节，高压老炼在接近于工作电压范围的上限进行，以清除电极表面的毛刺、氧化层和杂质^[18]。为避免高压老炼过程中打高压时放电所产生的射线伤害，针对医用 CT 球管的排气、老炼^[19]等生产和测试工艺，我们设计生产了 X 射线防护超高真空排气台。不同于传统的简易箱体，我们设计有 X 射线防护铅房，铅房针对排气台布局合理设计，整体由碳钢骨架支撑，镀锌铁皮内包指定铅当量的铅皮，

外观美观大方，对拉式铅门，关门限位与高压电源安全互锁，打高压时铅门处于关闭状态，操作方便，安全可靠。内置高清摄像头，连接铅房外监测显示器，可以实时观察打高压时设备的情况。设备控制系统位于铅房外部，方便控制和监测设备抽真空排气和打高压老炼的工艺流程。控制系统和通风系统与铅房的连接均为 Z 型防护，保证射线不泄露。



图 9 X 射线防护超高真空排气系统实物图

2) 超大型速调管真空排气系统

大功率速调管因它具有高功率、高增益、高效率和高稳定性等优点，是微波电真空器件中脉冲功率和平均功率最高的器件^[20]。近年来，电子所和北京真空电子技术研究所等单位开始发展多注速调管，至今已经研制出和正在研制覆盖整个微波段的多种类型多注速调管，依托于此，生产特大型速调管所需的各种专用设备的研制也十分关键。目前研制的大型排气台的关键技术指标为：无油干泵和分子泵作为预抽系统，溅射离子泵作为主抽系统，优于 $1 \times 10^{-6} \text{Pa}$ ，烘烤温度 $25 \sim 600^\circ\text{C}$ 连续可调，温区均匀性 $\pm 5^\circ\text{C}$ ，设备可对尺寸达到 $\Phi 1200\text{mm} \times 23000\text{mm}$ 的速调管进行高温真空烘烤排气。防止器件在烘烤排气时氧化，外真空配置大抽速的脂润滑分子泵，有效缩短了外真空建立时间，也确保烘烤排气过程中材料放气能很快抽走，外真空始终保持在较好的真空状态。并配有充氮气阀门，用于真空烘烤排气完成后充入气体使工件快速降温，提高生产效率。真空烘箱是本设备主要组成，也是设备的设计制造难点之一。因烘箱尺寸较大，设计和加工环节不完善，使用一段时间后，极易出现变形、漏水、漏气等问题。本设计方案已通过实践检验，以该方案加工制造的烘烤排气台，在用户单位已稳定使用 5 年以上，方案的成熟性和可靠性值得信赖。真空烘箱内径 $\Phi 1800 \times 3500\text{mm}$ ，为立式圆柱体旋转开门结构，氟橡胶密封圈密封，箱体为双层中空水冷结构，内部水道，保证良好的水冷效果。大门采用旋转吊装结构，结构紧凑，安全系数高，重心设计合理。大门在旋转开闭过程中，重心均处于设备支架内，杜绝由于重心偏离导致的设备倾覆事故。考虑到大门尺寸较大，抽真空时门法兰极易漏气，因此在大门两侧共设置了 4 组气动锁紧机构，大门关闭后可自动锁紧。综上，大型专用真空排气系统可用于速调管或大型加速器管真空烘烤排气，可完成器件抽真空、烘烤去气、老练处理等工艺。



图 10 超大型超高真空排气系统实物图

3. 总结与展望

真空排气系统虽然是一种发展的较为成熟的真空专用设备，但在新的应用需求和新技术、新工艺的发展推动下，新类型的排气系统不断改善发展。目前真空排气设备机械结构合理、操作方便、具备获取超高真空度的能力、烘箱升降运动安全可靠、自动化程度高等特点。在保障其基础性能稳定发展的前提下，近年来，我们在生产自动化、功能复合化、应用专业化等方向开拓发展，研发了一系列性能稳定的超高真空排气系统。接下来，我们将在真空排气烘烤系统产线建立、工艺配套系统研制、数字化数据采集等方向做出努力，为电真空器件生产工艺的可靠性、稳定性和一致性提供坚实后盾。

参考文献

- [1] 廖复疆, 蔡军, 陈波, 等. 发展新一代真空电子器件[J]. 真空电子技术, 2016(6):5.
- [2] 廖复疆. 微波真空电子器件的发展战略[C]// 中国电子学会真空电子学分会第十九届学术年会论文集(上册). 2013.
- [3] 顾树华. 大型超高真空排气台的研制[J]. 真空电子技术, 1991(6):52-55.
- [4] 郝永言. 真空电子器件制造工艺[M]. 电子工业出版社, 1995.
- [5] 达道安. 真空设计手册[M]. 国防工业出版社, 2004.
- [6] 米伦, 李晓勇, 王远, 等. 高压开关管排气台的研制[J]. 真空, 2005, 42(4):32-34.
- [7] 米伦, 李晓勇, 王远, 等. 程控无油超高真空排气台的研制[J]. 真空与低温, 2005, 11(3):5.
- [8] 吴守东, 陈林, 徐敏, 等. 双真空烘烤排气台的研制及应用[J]. 中国工程物理研究院科技年报, 2003(1):2
- [9] 刘燕文, 孟宪展, 田宏, 等. 空间行波管极高真空的获得与测量[J]. 真空, 2018, 55(5):4.
- [10] 马义刚, 李智慧. 超高真空和高真空技术的应用[J]. 真空, 2021.
- [11] 张以忱. 第十五讲真空工程封接技术[J]. 真空, 2007, 44(4):2.
- [12] 张晓林. 用于空间行波管超高真空排气台研制进展[C]// 2009 北京真空学会真空技术交流会. 中

国真空学会;北京真空学会, 2009.

[13] 冯焱, 李得天. 四极质谱计在真空检漏中的应用[J]. 真空, 2006(03):45-47.

[14] 刘晋允, 赵世柯, 梁晓峰, 等. 质谱仪在空间行波管生产中的超灵敏度检漏应用[J]. 真空与低温, 2021, 27(3):4.

[15] 田明利, 邱立, 董云宁, 等. 超灵敏度检漏技术在高抽速自动排气系统中的应用[J]. 真空, 2022(059-003).

[16] 周志伟, 崔惠兵. 充气触发管的电压恢复特性[C]// 中国电子学会真空电子学分会学术年会暨军用微波管研讨会. 2003.

[17] 周志伟. 充气触发管的设计和工艺[J]. 电子管技术, 1983(04):11-14.

[18] 罗吉友, 杨洪森, 郑尚清, 兰伟, 石玉贤, 吴广军, 赵云华. ZKP-20 型二十工位真空开关管排气台 [J]. 真空与低温, 2000 03 170-174.

[19] 张富治, 盛兴, 王瑞海, 等. X 射线 CT 球管的研制进展[J]. 真空电子技术, 2016(1):4.

[20] 丁耀根, 刘濮鲲, 张兆传, 等. 大功率速调管的技术现状和研究进展[J]. 真空电子技术, 2010(6):9.

NEG 薄膜制备及抽气性能的实验研究

宋欣铭¹, 王晓冬^{1*}

¹ 东北大学真空与流体工程研究所, 辽宁沈阳, 邮编 110819;

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要: 首次出现于欧洲原子能中心的大型粒子对撞机上的真空管道上^[1], 作为吸气泵使用的非蒸散型吸气剂薄膜, 简称 NEG (Non-evaporable getter) 薄膜, 是一种在真空或者惰性气体环境下对其加热激活后, 常温下具备吸气能力而本身形态保持不变的吸气剂^[2], 是真空系统维持超高真空所需的真空度必不可少的。

国内现有储能环真空系统如北京正负电子对撞机 (BEPC)、兰州重离子加速器 (HIRFL)、国家同步辐射实验室 (NSRL)、上海光源 (SSRF) 和中国散裂中子源 (CSNS)。相较于传统加速器, 正在建设的北京先进光源 (HPES) 和合肥先进光源 (HALF) 为四代同步辐射光源, 同步加速器对真空室的磁铁孔径的要求远小于传统加速器。截止目前在国内的同步加速器中暂未出现 NEG 薄膜的应用。

本文以 NEG 薄膜为研究对象, 采用磁控溅射方法制备 NEG 薄膜, 通过调节溅射气压、基底温度和镀膜电源等实验手段, 探究薄膜制备的最佳工艺参数; 设计搭建了 NEG 薄膜抽速测试平台, 开展不同镀膜电源制备的 NEG 薄膜抽气性能、激活温度和激活时间对薄膜抽气性能影响等方面的研究工作。

薄膜抽气性能随着激活温度的提高呈现先增大后减小的趋势, 250℃时达到其最大值。随着激活时间的延长, 薄膜的抽气性能下降, 在 250℃-24h 条件下得到了最大抽速, 脉冲电源沉积薄膜的抽速大于直流电源沉积薄膜的抽速。通过 ANSYS 热仿真发现, 薄膜温度要比加热台温度在 200℃、250℃和 300℃时分别低 6.82℃、8.82℃和 10.84℃。

关键词: 超高真空, 非蒸散型吸气剂薄膜, 抽气性能, 激活温度

参考文献:

- [1] Jimenez J M. LHC: The world's largest vacuum systems being operated at CERN [J]. Vacuum, 2009, 84(1): 2-7.
- [2] Benvenuti C. Molecular surface pumping: the getter pumps [C]; proceedings of the Proceedings of the CERN Accelerator School, Snekersten, Denmark, F, 1999.

低温真空环境实验模拟腔真空系统设计

郎嘉琪^{1,2}, 张秀平^{1,2}, 吴俊峰^{1,2}, 胡继孙^{1,2}, 赵盼盼^{1,2}

(¹合肥通用机械研究院有限公司 安徽合肥, 邮编 230031)

(²合肥通用环境控制技术有限责任公司 安徽合肥 230031)

邮箱: 1220278290@qq.com

国机集团国家级研发平台能力提升项目, 项目号: 2021010942

低温真空环境实验模拟舱为各类大科学装置和先进科技研究提供所需的压力和温度变化等特殊环境的条件。真空系统是低温真空环境试验模拟舱重要的子系统, 起到为试验舱内部空间提供真空环境的作用。真空系统主要包括真空腔室和真空抽气机组两个组成部分, 面对研发设计的低真空环境实验模拟舱中目标真空为 10Pa, 达到目标真空的抽气时间少于 30min 和真空腔室要在 -196-95℃ 下要保持良好的温度均匀性等性能要求, 提出了真空腔室采用优质的 S30408 不锈钢材料制造, 整体呈圆筒卧式结构形式, 腔室内表面设计有 316L 不锈钢材料制造的胀板式结构的夹层式换热通道, 外侧设计支撑板以方便安装和支撑热沉结构, 真空室大门采用双铰链转动摇臂式机构, 大门沿着转轴作转动式平移, 达到便于真空腔体内部件安装拆卸的目的; 通过理论计算和分析的手段, 提出了以 25l/s 旋片泵为前级泵和 54l/s 罗茨泵为主抽气泵的真空抽气机组设计方案。最后, 通过 ANSYS 结构应力分析和降温实验测试等方式验证以上设计的合理性, 具有为低真空环境实验模拟舱的设计制造提供借鉴的意义。

关键词: 真空、温度、模拟腔、真空度、真空抽气机组

参考文献:

- [1] 马勉军, 陈焘, 雷军刚, 王佐磊, 魏晋鹏, 邵航. 大型低地球轨道空间等离子体环境模拟实验系统设计[J]. 真空科学与技术学报, 36(06): 680-685 (2016).
- [2] 赵红利, 陈双涛, 侯予. 热真空低温环境实验台研制[J]. 低温工程, (06): 6-10+15 (2011).
- [3] 庞永江. 地面实验室模拟空间等离子体环境及太阳能电池片效应初步实验研究[D]. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2001.
- [4] 魏金莹, 李山峰, 郭永朝, 闫慧子. 真空系统的设计[J]. 低温与特气, 40(01): 26-30 (2022).
- [5] 朱超, 白焱. 抽真空系统工艺设计问题探讨[J]. 石油化工设计, 39(01): 4-7+77 (2022).
- [6] 徐成海. 真空工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 345-355.

基于 DSMC 方法的复合分子泵在过渡流态下抽气性能研究

杜志华 王晓冬* 匡永麟

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要: 复合分子泵由涡轮级和牵引级组成, 作为高真空、超高真空的主要获得设备, 广泛应用于环境模拟、半导体、大科学装置等领域。尤其是在半导体行业, 分子泵往往会工作于过渡流态下, 因此对复合分子泵在过渡流态下的抽气特性研究是很有必要的。

本文基于改进的直接模拟蒙特卡洛方法 (DSMC), 针对不同转速下改变螺旋升角、螺旋槽深度和转子与定子的间隙, 被抽气体参数, 不同出口入口压力等条件进行仿真模拟。模拟结果表明: 相同条件下, 提高转速能够明显提高分子泵抽速; 随着螺旋升角的增加, 分子泵的抽速与压缩比都呈现先增加后减小的变化趋势; 压缩比随着槽深的增加先增大后减小。

本文的研究表明, DSMC 方法可以较好地模拟分子泵在过渡流态抽气通道内的流动特性, 对分子泵的结构改进和性能优化具有参考价值。

关键词: 复合分子泵, 螺旋槽式, 过渡流态, DSMC 方法, 数值模拟

参考文献:

- [1] 李博, 马兆俊, 王晓冬, 巴德纯. 基于 DSMC 方法的涡轮分子泵跨流态抽气性能研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(11): 1623-1627+1632.
- [2] 王晓冬, 金磊, 钟亮, 巴德纯, 杨乃恒. 螺旋槽式牵引泵过渡流态抽气特性的直接蒙特卡洛模拟[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(05): 517-521.

样品存储水氧净化材料真空条件下吸附性能测试技术研究

王军伟^{1*} 李国华¹ 邵静怡¹

¹ 北京卫星环境工程研究所, 北京, 邮编 100094;

*Email: tobenol@126.com

摘要: 地外样品的科学研究是行星科学发展和太阳系演化研究的重要基础, 样品存储要求对实验室与管理设施的整体设计、无水氧环境控制、设施材料选择、污染管理与清洁等方面均提出了严格要求。针对用于样品存储无水氧环境获得的水氧净化材料筛选试验需求, 基于固态容积法研制了一套材料吸附/脱附特性测试系统, 可适用于不同温度、不同真空压力下开展吸附剂在环境温度下的吸附量及吸附等温线测试以及特定材料及吸附剂在真空条件下的脱附性能测试, 并完成测试流程和计算方法研究。该装置可有效满足材料吸附特性测试及筛选评估研究, 为后续净化流程设计提供依据。

关键词: 水氧净化, 吸附特性, 材料筛选, 样品存储

参考文献:

- [1] 孙鲁尧, 陈光奇. 活性炭低温低压吸附等温线试验研究[J]. 真空, 2020, 57(6):6.
- [2] 白彪坤, 陈叔平, 陈联, 等. 液氮温度下分子筛的真空吸附特性试验研究[J]. 真空, 2021, 58(1): 45-50.
- [3] Chen S J, Wang R S, Li X D. Experimental investigation and theoretical analysis on measurement of hydrogen adsorption in vacuum system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(9): 4347-4353.
- [4] 陈叔平, 白彪坤, 成永军, 等. 真空条件下氧化铂吸氢特性与微观结构研究[J]. 低温工程, 2020, 000(006): 26-32.
- [5] 赵振国. 吸附作用应用原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 71-75.

含时间与容积变量的氦质谱正压检漏方法与误差分析

马国辉* 代国宝 沈伟 高铭 陈墨 史彦豪 李竹青 董荣昌 常景旺

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100080)

陈芳浩 付松松

(北京控制工程研究所, 北京 100080)

Email: ghma1982@163.com

摘要: 传统的氦质谱正压检漏方法的最小可检漏率范围在 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-8} \text{Pa m}^3/\text{s}$, 通过对积累容器和积累时间的改进, 将其灵敏度提高。本文详细论述该方法的测试和误差即最小可检漏率计算方法。

关键词: 氦质谱 检漏 灵敏度 最小可检漏率

参考文献:

- [1] 郭君强等, 氦质谱正压检漏方法, 中国航天工业总公司航天工业标准, QJ3089-99
- [2] 张传义, 包革军等, 工科数学分析下册, 科学出版社, 2001, P107

作者简介: 马国辉, 男, 1982年1月生, 2008年毕业于北京航空航天大学, 材料学硕士, 无损检测工程师, 现就职于航天五院北京卫星制造厂有限公司, 主要研究泄漏检测、真空测量和质谱方向。

真空收集室质谱检漏技术

¹沈伟 ²马国辉 ³高铭 ⁴李佳杰 ⁵史彦豪 ⁶姜楠

北京卫星制造厂有限公司 100092

Email: shenaichen_521@163.com

摘要: 叙述了一种经济实用的被检件在真空收集室中的质谱检漏方法, 通过试验验证了方法的正确性, 并从理论上分析了漏率的标定方法, 检漏灵敏度以及检测误差。

目前, 密封系统的检漏试验多数采用氦 (He) 质谱仪或采样四极质谱仪进行检测。在进行大部件或复杂密封系统的加压检漏时, 要检测其总漏率, 必须将被检的部件或系统内部加注示漏气体氦 (He) 作为检漏介质, 然后置于一个能抽真空的真空容器之中, 采用氦 (He) 质谱仪检测真空容器中示漏气体的变化, 再用已知漏率进行比对测试, 从而得到被检系统的实际漏率。这种方法一般称为真空检漏。它的真空收集室检漏法能达到 $1.0 \times 10^{-11} \text{Pa m}^3/\text{S}$ 的灵敏度, 除满足更高精度的检漏要求, 且检漏周期是非真空收集室法的三分之一。这种方法需要一个容纳被检部件或系统的真空系统, 它是由真空容室 (真空罐) 和能对其抽真空的真空机组组成。试验周期和试验费用也是可观的。为此, 这里所探讨的一个新问题, 就是在满足被检系统漏率指标的前提下, 用真空收集室的方法来检测产品漏率。

关键词: 容器 真空检漏 质谱分析 校准

参考文献:

- [1] 曹慎诚, 实用真空检漏技术. 化学工业出版社, 2011
- [2] 吴孝俭, 闫荣鑫. 泄漏检测. 机械工业出版社, 2005
- [3] 闫治平, 黄淑英. 漏率与压力关系的研究. 中国空间科学技术, 1999, 19(2): 42~46
- [1] Cao Shencheng, Practical Vacuum Leak Detection Technology Chemical Industry Press, 2011
- [2] Wu Xiaojian and Yan Rongxin Leak detection Mechanical Industry Press, 2005
- [3] Yan Zhiping, Huang Sue-ying Research on the relationship between leakage rate and pressure China Space Science and Technology, 1999, 19 (2): 42-46

热胀涂层孔隙特征对熔融钙镁铝硅酸盐腐蚀渗透行为的影响机制研究

梁笑瑜¹ 刘宇泰¹ 赵执鹏¹ 关仲毓¹ 王传斌¹ 杜广煜^{1*}

¹东北大学, 辽宁沈阳, 邮编 110006;

*Email: gydu@mail.neu.edu.cn

摘要: 随着航空发动机服役温度日益提高, 熔融钙镁铝硅酸盐 (CMAS) 的腐蚀行为严重影响了热障涂层 (TBCs) 服役寿命。在热震工况下, 当工作温度高于 CMAS 的熔点时, CMAS 会熔化并沿孔隙和裂纹渗入涂层当中, 从而导致热胀涂层微观结构发生变化和材料的相变; 降温阶段, CMAS 的结晶行为也会产生 TBC 的体积膨胀、涂层的机械性能劣化、TBC 热导率下降等不良影响。为了探究 CMAS 渗透行为与热障涂层的微观结构变化机制之间的关系, 探究高防腐性能的 TBCs 工艺, 本文采用大气等离子喷涂技术 (APS) 在 Ni 基高温合金上制备了具有不同孔隙率和孔隙直径的 TBCs, 并在高温环境中进行 CMAS 热腐蚀实验, 以探究 TBC 微观结构对 CMAS 渗透行为的影响。并使用扫描电子显微镜 (SEM) 观察热腐蚀试验后的微观形貌, 通过 XRD 观察热腐蚀前后涂层的物相变化, EDS 检测腐蚀前后 TBC 中元素种类与含量变化。结果表明, 孔隙率较高的热障涂层会促进 CMAS 在 TBC 结构中横向流动, 减缓入渗的速率, 使得涂层结构可以较好地保存完整, 同时 CMAS 的渗透行为在面对直径较大的孔隙时, 会受到入口角度的限制, 较小入口角度的大直径孔隙限制了 CMAS 的入渗行为。这与大孔隙直径更易吸收 CMAS 的常规认知不同。本文通过改变制备工艺参数, 研究了 CMAS 在不同孔隙率和孔隙直径的 TBC 中的腐蚀行为, 以期热障涂层工艺改进以及涂层结构设计奠定理论基础。

关键词: 热障涂层; 大气等离子喷涂; 钙镁铝硅酸盐; 孔隙特征; 渗透行为

参考文献:

- [1] Nieto, A., et al., Calcia–magnesia–alumina–silicate (CMAS) attack mechanisms and roadmap towards Sandphobic thermal and environmental barrier coatings. *International Materials Reviews*, 2021. 66(7): p. 451-492.
- [2] Shan, X., et al., Influence of pore characteristics of air plasma sprayed thermal barrier coatings on calcium-magnesia-alumina-silicate (CMAS) attack behavior. *Corrosion Science*, 2021. 190: p. 109636.

Study on the mechanism of the influence of pore characteristics of thermally expanded coatings on the corrosion penetration behavior of fused calcium-magnesium-aluminum silicates

Liang Xiao yu¹, Liu Yu tai¹, Zhao Zhi peng¹, Guan Zhong yu¹, Wang Chuan bin¹, Du Guang yu^{1*}

1.Northeastern University, Shenyang 110819, China;

*Email: gydu@mail.neu.edu.cn

Abstract: As the service temperature of aero-engines increases, the corrosion behavior of molten calcium-magnesium-aluminum silicates (CMAS) seriously impacts the service life of thermal barrier coatings (TBCs). Under thermal shock conditions, when the operating temperature is higher than the melting point of CMAS, CMAS will melt and penetrate the coating along the pores and cracks, resulting in changes in the microstructure of the thermally expanded coating and phase changes in the material; during the cooling down phase, the crystallization behavior of CMAS will also produce adverse effects such as volume expansion of TBCs, deterioration of the mechanical properties of the coating and reduction in the thermal conductivity of TBCs. To investigate the relationship between the permeation behavior of CMAS and the microstructure change mechanism of thermal barrier coatings, and to explore the process of TBCs with high anti-corrosion performance, TBCs with different porosity and pore diameters were prepared on Ni-based high-temperature alloys using atmospheric plasma spraying (APS) technology in this paper, and CMAS thermal corrosion experiments were conducted in a high-temperature environment to investigate the effect of TBC microstructure on CMAS permeation behavior. The microstructure of TBCs was observed by scanning electron microscopy (SEM), the physical phase changes of the coating before and after the thermal corrosion were observed by XRD, and the changes of elemental species and content in TBCs before and after the corrosion were detected by EDS. The results showed that the higher porosity of the thermal barrier coating would promote the lateral flow of CMAS in the TBC structure and slow down the rate of infiltration so that the coating structure could be better preserved intact, while the infiltration behavior of CMAS would be limited by the entrance angle when facing the larger diameter pores, and the large diameter pores with smaller entrance angle limited the infiltration behavior of CMAS. This is different from the conventional perception that large pore diameters are more likely to absorb CMAS. In this paper, the corrosion behavior of CMAS in TBC with different porosity and pore diameters is investigated by varying the preparation process parameters, to lay a theoretical foundation for thermal barrier coating process improvement and coating structure design.

Keywords: TBCs; APS; CMAS; Pore characteristics; Penetration behavior

References:

- [1] S Wei, F. C. Wang, Q. B. Fan*, Z. Ma, X. W. Yang, "Finite element simulation of tensile bond strength of atmospheric plasma spraying thermal barrier coatings", *Surface and Coatings Technology* 2964,205 (2011)
- [2] Q.M. Yu*, Q. He, F.L. Ning, "Influence of interface morphology on erosion failure of thermal barrier coatings", *Ceramics International* 188 8 (2018)

工业用高温真空绝热管道的制备及性能分析

曲富饶¹ 王晓冬^{1*}

东北大学真空与流体工程研究所, 辽宁沈阳, 邮编 110819

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要: 随着世界经济的不断发展, 能源问题日趋严重, 其中热损失一直是重大问题。近年来, 各行各业对保温, 保冷, 隔热以及节能的要求日益增高, 而传统的保温材料已经越来越难以满足标准。真空绝热材料是近些年快速发展起来的一种新型绝热材料, 其原理基于真空状态下对气体导热以及对流换热的大幅削弱, 从而减少热量损失。其性能是普通绝热材料的 5-10 倍, 密度小且更加轻薄, 同时又可回收利用, 真正的做到了高效且节能。目前真空绝热材料已经广泛用于航空航天, 白色家电, 建筑用材, 冷链运输等领域。

目前, 真空绝热材料在商业领域一般应用于中低温环境下, 高温下的应用并不多见, 原因是其整体结构不耐高温。本文基于真空绝热原理, 制备一种多层结构用于高温蒸汽管道的绝热保温。采用不锈钢作为外部密封层, 在其内部分别填充多层硅酸铝纤维毡以及超细玻璃纤维毡, 每层之间以铝箔作为反射屏分隔。封装后预留抽真空口, 抽至预期真空度后在真空钎焊炉内真空密封。成品外形为半圆套管式, 以便实地焊接安装。其外部不锈钢材质耐高温且强度大, 内部多层芯材根据不同温度梯度而组合使用进一步降低成本, 成品更加轻薄且性能优异, 综合考虑比高温领域常用的纳米气凝胶毡也有优势。随着不断的研究, 未来真空绝热材料在高温保温的商业推广将有更大前景。

关键词: 真空绝热, 多层结构, 高温, 性能分析

参考文献:

- [1] Suteesh P M , Alex Chollackal, "Thermal performance of multilayer insulation: A review", *Materials Science and Engineering*, 396(2018).
- [2] 李德富, 杨炜平, 刘小旭. 多层隔热材料传热特性研究现状及展望[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(3).

Harmonic Response Analysis of YSZ Coating Damping Performance Based on Half Power Bandwidth Method

Li Pinan¹, Liu Yutai¹, Du Guangyu^{1*}

¹Northeastern University, Shenyang Liaoning, Postal Code 110819

*Email: gydu@mail.neu.edu.cn

Abstract: The blades of aircraft engines are prone to high cycle fatigue failure under vibration and cyclic loading during service. The blade vibration failure caused by the composite action of aerodynamic load,

centrifugal load, alternating load, and high-temperature thermal load has become the main factor for the failure of aviation engines^[1]. The current common practice is to add discrete damping elements to the structure to improve the service life of the engine and ensure the reliability and stability of the components. But with the development of thrust to weight ratio and the compact design of aviation engine structures, there is an urgent need for a new way to delay blade vibration damage. At present, YSZ and other ceramic coatings have been proven to be able to be coated on the surface of components through atmospheric plasma spraying to achieve passive vibration suppression. In order to deeply study its damping mechanism and analyze the contribution of its microstructure to damping performance, this paper establishes a cantilever beam model with different porosity and crack density in Abaqus software, conducts modal analysis and harmonic response analysis, and calculates the damping ratios of each mode based on the half power bandwidth method. The results show that micro defects have almost no effect on the overall modal shape, but the presence of micro pores and cracks can reduce the frequency response peak of the system.^[2] According to the simulation results of orthogonal experiments, the contribution of micro cracks to the damping performance of the YSZ coating is relatively higher.

Keywords: Damping, Ceramic coatings, Microstructural, vibration suppression

References:

- [1] X.Q.Wang, Y.Ma, *"Effects of defects and element diffusion at coating/substrate interface on damping capacity", Surface and interface analysis 47,938-945(2015).
- [2] Rashid K.Abu Al-Rub, *Anthony N. Palazotto, "Micromechanical theoretical and computational modeling of energy dissipation due to nonlinear vibration of hard ceramic coatings with microstructural recursive faults", International Journal of Solids and Structures 47,2131-2142(2010).

基于 CFD 的幼年人体上呼吸道局部狭窄流场分析及纳米级颗粒沉积情况研究

李鹏飞¹, 王晓冬^{1*}

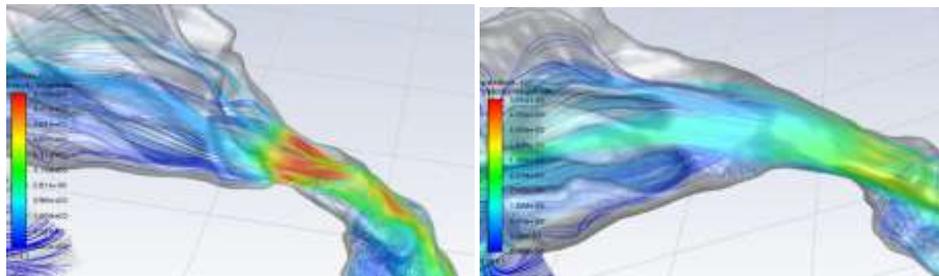
¹ 东北大学真空与流体工程研究所, 辽宁沈阳, 邮编 110819;

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要: 为了更好的了解呼吸道阻塞的产生机理进而分析找到更有效的治疗手段, 人们进行了大量的研究和尝试。然而相关研究大多基于成人上气道模型展开, 关于儿童和幼儿的研究相对较少^[1,2]。本文围绕一个因腺样体异常肥大, 导致上呼吸道鼻咽处重度狭窄(狭窄处面积约为正常情况下 20%) 的三岁幼儿的上气道模型展开研究。对比分析了使用不同湍流模型和边界条件的上呼吸道流场。通过对模型进行不同切除量的虚拟手术, 控制狭窄区域面积在 21mm²-180mm² 范围内变化, 结果显示狭窄处面积为 64.7mm² 时上气道的总压降和狭窄处局部压降随该处截面积增大而减小趋势明显减缓, 150mm² 后气道面积继续增大但总压降不再降低, 反而因为气道变形阻力增大压降略有升高。

通过比较原始患病和术后健康鼻气道模型中的流场和纳米颗粒沉积特性,结果表明,鼻咽阻塞可以在主鼻腔通道中诱导显著偏置的流量分布。此外,区域颗粒沉积分析显示,由于恢复了正常的流场,在接受手术治疗(腺样体切除术)后,受影响的区域可以接受更好的纳米颗粒气溶胶递送。更重要的是,在术后鼻模型中,嗅觉区域实现了通气 and 颗粒沉积改善,这表明使用纳米颗粒的嗅觉药物递送是有前景的。研究结果有望为腺样体切除术前分析和鼻内气雾剂治疗提供科学依据,这可以大大改善目前的临床治疗结果^[3]。

关键词: 计算流体力学 (CFD), 上呼吸道狭窄, 虚拟手术, 纳米颗粒沉积



参考文献:

- [1] 孙秀珍,于驰,刘迎曦,于申,张军,苏英锋.人体上呼吸道三维有限元重建与流场数值模拟[J].航天医学与医学工程,2006(02):129-133.DOI:10.16289/j.cnki.1002-0837.2006.02.012.
- [2] Jeong SJ, Kim WS, Sung SJ. Numerical investigation on the flow characteristics and aerodynamic force of the upper airway of patient with obstructive sleep apnea using computational fluid dynamics[J]. Med Eng Phys, 2007, 29(6): 637—651.
- [3] Dong Jingliang,Shang Yidan,Inthavong Kiao,Chan Hak-Kim,Tu Jiyuan. Numerical Comparison of Nasal Aerosol Administration Systems for Efficient Nose-to-Brain Drug Delivery.[J]. Pharmaceutical research,2017,35(1).

EAST 装置差分抽气测量系统的设计

潘浩¹ 余耀伟^{1*} 黄明^{1,2} 赵胜波^{1,2} 左桂忠^{1*}

¹中国科学院等离子体物理研究所,安徽合肥,邮编 230031

²中国科学技术大学,安徽合肥,邮编 230026

*Email: yuyaowei@ipp.ac.cn, zuoguizh@ipp.ac.cn

摘要: 为解决托卡马克装置壁处理期间气压过高,四级质谱计无法工作的问题,设计了一种差分抽气测量系统。它由分子泵抽气机组、差分腔室、小流导管以及质谱计和真空计构成。其基本原理是通过小流导管将 EAST 装置内真空室与差分腔室相连,使得差分腔室在低气压条件下获得装置内的气体组成。再通过四级质谱计的测量与计算,即可得到壁处理期间 EAST 内真空室各气体组分的分压,实时监测装置真空状态、评估壁处理效果的功能。

针对差分腔室小尺寸的特点,分子泵选型为中科科仪 FF-100/300,其对氦气的抽速为 250L/s。

EAST 装置壁处理期间的典型气压范围为 10^{-2} - 10^{-1} Pa, 在满足四级质谱计工作气压条件下, 差分腔体内的最佳气压为 10^{-4} Pa 量级, 最大不可以超过 5×10^{-2} Pa。根据差分腔室内的气体平衡方程得 $C_m = \frac{P_2}{P_1 - P_2} \cdot S_p$, 结果约 $2.5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, C_m 的设计关键是气压的缩放率。经过设计与校核, 选用一段内径 8mm, 长度为 140mm 的细长管充当小流导管。根据分子流态下圆柱管道的流导计算公式 $C_m = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{D^3}{L}$, 计算的其流导约为 $1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在该流导作用下, 整个工作气压范围涵盖 2.5×10^{-3} -10Pa。如图 1, 在此流导作用下的 EAST 内真空室气压与差分腔室气压的关系。经过初步测试, 该装置可以有效对 EAST 装置内真空室取样分析, 满足壁处理条件下的气体组分检测要求。

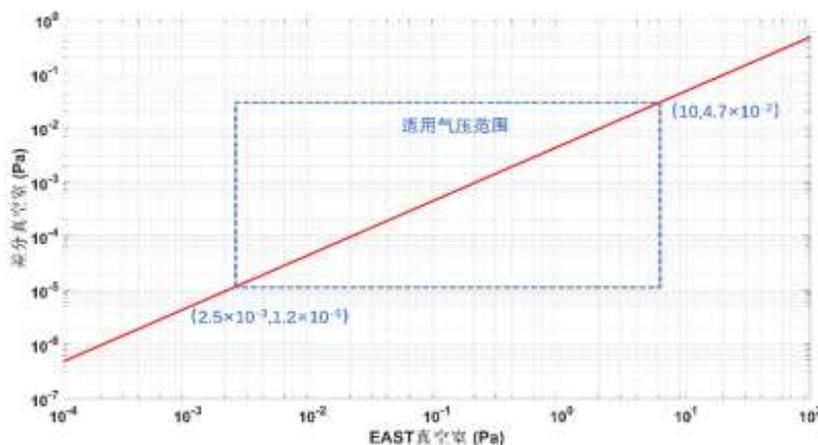


图 1 EAST 真空室气压与差分真空室气压关系

关键词: 真空测量, 残余气体分析, 托卡马克, 壁处理清洗

罗茨真空干泵温度场测控系统设计与测试

来丽文¹, 王桂鹏¹, 王宇¹, 倪伟明¹, 谢元华¹, 刘坤^{1*}, 巴德纯¹

¹东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳, 110819;

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: 罗茨真空干泵在工作过程中, 转子之间以及转子与泵腔之间均处于非接触状态, 转子周期性工作所产生的热量不断积累并传递给泵腔和转子。在泵内低压环境下, 转子吸收的热量不易散出, 使其与泵腔之间产生温差, 导致转子间、转子与泵腔间的间隙由于热变形而消失, 出现刮擦或卡死现象。本文基于塞贝克效应和红外测温原理, 通过布置 K 型热电偶和红外测温探头分别测量泵腔测温点的温度和转子的温度, 得到二叶、三叶、五叶罗茨真空泵的温度场分布规律。并通过温度场模拟证明了测温点布置方案的合理性, 使用 Workbench 中的稳态结构模块对泵腔进行强度校核, 证明改造后的泵腔强度符合工作要求。结果表明, 随着排气压力的升高, 泵腔和转子发热越来越明显, 且二者的温差升高; 在排气压力较低时齿轮箱温升明显, 而在排气压力高时齿轮箱温度低于工作腔温度。泵腔温度场在上、下侧具有明显的温度分界, 排气侧温度高于吸气侧, 并且随着排气压力的增加温度分区越明显。本文研究可为建立罗茨真空泵传热模型提供试验依据, 同时为罗茨真空

干泵的热管理设计提供借鉴。

关键词：罗茨真空干泵，热管理，测试系统，温度场测试

作者简介：来丽文（1998.9-），女，硕士研究生，主要从事干式真空泵气固两相流与传热研究，E-mail: 2270332@stu.neu.edu.cn。

通讯作者：刘坤（1979.07-），男，教授，博士生导师，主要研究方向：真空技术与高端装备，微纳芯片流动理论与应用，E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助：辽宁省应用基础研究计划（2022JH2/101300215）；沈阳市自然科学基金（22-315-6-01）。

干式螺杆真空泵转子动力学特性对啮合间隙的影响分析

林大兴¹，王桂鹏¹，倪伟明¹，巴要帅¹，谢元华¹，刘坤*^{1,2}，巴德纯^{1,2}

¹东北大学机械工程与自动化学院，沈阳，110819；

²东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室，沈阳，110819；

*Email:kliu@mail.neu.edu.cn

摘要：随着干式螺杆真空泵凭借抽速范围宽、结构简单紧凑、能耗低、无油污染等优点被广泛应用于半导体制备、航空航天、化工医药、光伏、大科学装置等领域。然而，在压力突变、流量骤变等极端工艺条件下，高速旋转的螺杆转子轴系受外部激励作用，容易产生转子与泵腔刮蹭以及转子间隙消失的卡死问题。本文基于转子动力学基本定律，进行额定转速下螺杆转子的动力学仿真分析，对影响螺杆转子运行间隙的因素进行权重分析。研究表明：气体激励的减小、不平衡惯量的增大以及轴承刚度的增大，都会导致螺杆转子最大振动响应及最大径向变形量的增加。其中，轴承刚度对螺杆转子动力学变形的影响程度最大，气体激励次之，不平衡惯量最小；减小齿厚、增大内外径比及圆滑过渡均会使转子的最大振动响应及最大径向变形量减小，影响程度从大到小依次为减小齿厚、增大内外径和圆滑过渡；复变螺距螺杆转子中，等螺距部分径向变形量的振幅及转子表面的不均匀性波动相对稳定，变螺距部分反之，螺距突变部位转子径向变形量的振幅骤增且转子表面的不均匀性骤减。本文可为干式螺杆真空泵运行状态下的动力学特性的分析方法提供技术参考，分析结论为指导螺杆转子间隙分布设计提供支撑。

关键词：干式螺杆真空泵，转子动力学，权重分析，模态分析，谐响应分析

作者简介：林大兴（1999.05-），男，硕士研究生，主要从事干式真空泵动力学仿真分析与实验研究，E-mail: 2170316@stu.neu.edu.cn。

通讯作者：刘坤（1979.07-），男，教授，博士生导师，主要研究方向：真空技术与高端装备，微纳芯片流动理论与应用，E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助：国家自然科学基金联合基金项目（U22A20179）；辽宁省应用基础研究计划（2022JH2/101300215）。

螺杆真空泵间隙跨流态流动计算方法研究

王晓明¹, 王桂鹏¹, 程寅¹, 来丽文¹, 巴要帅¹, 谢元华¹, 刘坤^{1*}, 巴德纯¹

¹东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳, 110819;

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: 螺杆真空泵抽速范围宽、压缩比大在众多领域被应用。其中, 间隙通道流动特性对抽气性能有巨大影响, 在间隙通道内气体压力跨度变化大, 包括过渡流和连续流, 尚没有成熟的间隙通道内跨流态的连续计算分析方法。本文基于纳维-斯托克斯(N-S)方程和直接模拟蒙特卡罗(DSMC)理论, 采用 Fluent 和 dsmcFoam+计算方法对跨流态下螺杆泵内间隙流动分析。采用 Fluent 对间隙通道流动进行计算, 通过 UDF 编写梯度克努森数(Kn_{GLL})进行连续流子区、稀薄流子区和重叠子区划分; 在 dsmcFoam+中对宏观量场进行时均求解, 使用自定义函数监测 Kn_{GLL} 。Fluent 计算子区边界与 dsmcFoam+计算子区边界进行标记迭代, 将重叠区域内单元数据计算累计差值作为迭代循环终止判断依据, 实现间隙跨流态模拟计算。本文研究为螺杆真空泵内间隙跨流态模拟提供了一种方法, 为螺杆真空泵内的泄漏计算提供参考。

关键词: 螺杆真空泵; 跨流态; CFD; DSMC

作者简介: 王晓明 (1998.10-), 男, 硕士研究生, 主要从事干式真空泵流场模拟及其热分布设计研究, E-mail: 2100465@stu.neu.edu.cn。

通讯作者: 刘坤 (1979.07-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 真空科学与微纳机械, 真空装备技术, 气体流动理论与应用, E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助: 国家自然科学基金联合基金(U22A20179)和辽宁省科技攻关项目(2021020832-JH1/104-03)。

双螺杆真空泵转子啮合间隙设计及控制方法研究

孙浩¹, 王桂鹏¹, 佟英博¹, 程寅¹, 巴要帅¹, 谢元华¹, 刘坤^{1*}, 巴德纯¹

¹东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳, 110819;

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: 双螺杆真空干泵被广泛应用于半导体制造、化工冶金、医药等多领域的真空获得设备, 其转子啮合间隙的控制对螺杆真空泵的性能有着重要意义。基于对包括螺旋线参数、端面型线尺寸、转子中心距等结构参数与转子啮合间隙关系的研究, 本文提出了一种双螺杆真空泵螺杆转子啮合间隙精准控制方法。为探究转子结构参数对转子啮合间隙的影响, 本文以渐开线-摆线-圆弧线构成的端面型线和多变螺距螺杆转子为模型, 运用几何学、统计学方法对转子三种不同曲面间隙进行分析, 推导归纳出了不同结构参数与啮合间隙的数学关系, 并据此提出了一种以啮合间隙精准控制为导向

的螺杆转子设计方法。通过理论计算及实验验证,该方法可实现螺杆转子啮合间隙的精准控制,为提高螺杆转子设计效率、推动双螺杆真空泵性能优化提供技术参考。

关键词: 螺杆转子, 结构参数, 啮合间隙, 精准控制, 设计效率

作者简介: 孙浩 (1999.01-), 男, 硕士研究生, 主要从事螺杆真空泵转子结构设计研究, E-mail: 2100463@stu.neu.edu.cn。

通讯作者: 刘坤 (1979.07-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 真空技术与高端装备, 微纳芯片流动理论与应用, E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助: 国家自然科学基金联合基金 (U22A20179), 沈阳市自然科学基金 (22-315-6-01)。

基于真空钎焊的火星采样返回容器密封性研究

卿刚¹ 谢元华¹ 迟小宇¹ 王璘² 章儒光¹ 刘坤^{1*}

¹ 东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819;

² 兰州空间技术物理研究所, 甘肃兰州, 邮编 730030

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: 地外天体星壤样品采样研究为揭示地外资源、宇宙演化、物质结构、生命起源等重大基础前沿科学问题提供了重要的研究依据^[1]。火星是太阳系中内环境与地球最为接近的星球,是人类最有可能登陆的下一个地外天体,火星的采样研究对人类未来生存和发展具有重大意义。火星采样任务具有远距离、长时间、低重力、高温差、多粉尘等特点,传统橡胶圈密封和刀口刃入软金属密封由于会发生脆化和蠕变现象^[2],不能满足需求,因此提出一种适用于火星采样任务的密封结构尤为重要。

本研究提出以金属钎为钎料的金属钎焊密封,以钎焊温度、焊接深度、镀层材料、保温时间和冷却速率等工艺参数为变量设计模拟火星环境正交实验,以密封漏率为评价指标,研究金属钎焊密封机理,探究工艺参数与密封漏率之间的关系。结构方面,通过在密封面覆盖防尘薄膜、增加橡胶圈前级密封,降低火星沙尘对密封效果的影响;通过在密封结构内壁增加隔热材料,防止采样罐内部温度过高破坏火星样品中的有机物;采用数值模拟方法对密封结构进行优化分析,得出优化结构。通过上述实验和模拟研究,确定最优工艺参数和密封结构,实现模拟火星环境下漏率低于 $10^{-8} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 且样品温升不超过 20°C 的目标,为我国火星采样返回容器密封提供理论依据和决策参考。

关键词: 火星采样, 密封结构, 金属钎焊, 工艺参数, 优化分析

参考文献:

[1] L. Redmond, K. Kriechbaum, P. Younse, E. Kulczycki, "Design of robust sealing mechanism for Mars 2020 sample tubes", *Journal of Spacecraft and Rockets* 5, 1-11 (2020).

[2] M. Ji, L. Sun, M. Yang, “Seal design and test verification of lunar sample container”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 439(4), 042025 (2018).

作者简介: 卿刚 (1998.03-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 真空与航天技术, E-mail: 2170318@stu.neu.edu.cn。

通讯作者: 刘坤 (1979.07-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 真空科学与微纳机械, 真空装备技术, 气体流动理论与应用, E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助: 辽宁省应用基础研究计划项目 (2022JH2/101300215), 辽宁省科技攻关项目 (2021020832-JH1/104-03), 沈阳市自然科学基金 (22-315-6-01)。

EAST 托卡马克残余气体分析仪的真空修复

凡斌^{1*} 潘浩¹ 余耀伟¹ 王超¹ 曹斌¹ 左桂忠¹ 胡建生¹

¹中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥, 邮编 230031;

*Email: yuyaowei@ipp.ac.cn

摘要: 残余气体分析仪 (RGA) 是常用的监测真空室气体成分的设备, EAST 使用美国斯坦福公司生产的四极质谱仪, 经过长时间使用后, 由于内部部件的污染、灯丝老化等原因导致 RGA 无法正确测量气体成分, 需要进行维护处理, 恢复其测量性能, 本文总结了 RGA 的常规故障判断及修复方法, 为同类型残余气体分析仪的真空修复提供参考。

首先, 判断 RGA 的工作性能。如果质谱工作时显示灯丝异常、始终无法获得设定的发射电流, 则可判断为灯丝老化烧断, 需更换灯丝。灯丝正常情况下, 可在真空度 $<10^{-2}$ Pa 环境下进行全谱扫描, 对于常见气体, 如 H_2 、 H_2O 、 N_2 、 CO 、 CO_2 等, 如其谱峰正常, 而且其他质量数的相对分压极低, 则可判断质谱工作正常, 同时可用其他的 RGA 扫描结果做参考比对。对于大部分质量数均呈现杂草状的噪声谱峰时, 可以判断质谱已污染, 必须进行修复。

其次, 针对有故障的 RGA, 将其从真空系统上拆除, 并移除电子学部分, 对四级杆部件进行维修处理。对于灯丝异常的 RGA, 需要拆下 RGA 的屏蔽网, 更换全新灯丝, 更换时必须小心, 确保新更换的灯丝不变形, 同时不会损坏其他部件。对于已经污染的 RGA, 可将其放入无水酒精中浸泡, 并使用超声波清洗机进行约 30 分钟的清洗, 之后取出并清除掉内部的酒精, 进行烘干处理, 进一步装在真空测试系统上, 进行抽气, 确保系统不漏并且真空气压 $<10^{-3}$ Pa 条件下, 开始 200 度烘烤 2 – 4 小时, 然后停止烘烤并降至室温, 安装上对应的电子学部件, 通常 RGA 即可正常工作。

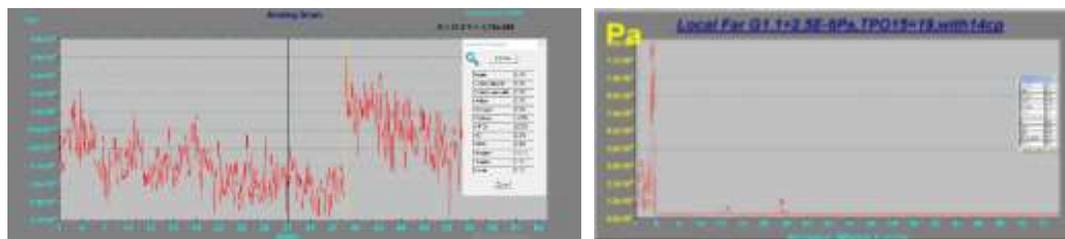


图 1. RGA 污染后的全谱, 及经过清洗修复后的全谱

关键词: 残余气体分析仪, 四极质谱仪, 真空测量, EAST

MoS₂ 类神经突触忆阻器的环境耐受性研究

秦江鹏^{1*} 郭元浩¹ 李建昌¹

¹ 东北大学机械工程与自动化学院真空流体工程研究中心, 辽宁沈阳, 邮编 110819

*Email: jiangpeng.qin@foxmail.com

摘要: 受人脑高度连接和极其节能的神经网络启发, 神经形态计算作为一种新范式, 不仅适用于传统数据处理和存储, 而且适用于高级认知、推理和学习。这种能够进行大规模并行计算的新兴技术有望克服当前冯诺依曼计算架构的基本限制, 克服处理和存储单元的串联导致的数字计算执行效率低下的问题。为了学习人脑以极低的功率执行高度集成功能的能力, 创造一个模仿由神经元和突触组成的生物神经网络的系统是非常必要的。由于单个忆阻器也具有记忆历史电信号的能力, 忆阻器被认为是神经形态计算应用中最有前途的候选者之一。柔性二维材料忆阻器的环境耐受性是亟需研究的关键问题。本课题以柔性 MoS₂ 忆阻器为研究对象, 着眼于类神经突触行为研究和环境耐受性研究, 通过改变忆阻器件的环境温度, 湿度, 研究对器件的性能影响。温湿度的变化会导致离子迁移屏障降低, 器件内部发生微化学反应, 导电细丝的形成和断裂。最后, 通过拉曼和 X 射线衍射分析晶格间隙变化, 结合透射电子显微镜观察导电细丝, 与实验结果验证。这为开发具有环境耐受性的下一代忆阻器打下坚实的基础。

关键词: 人工神经突触, 环境耐受性, 二维材料, 温度湿度变化

Nd_{0.55}Li_{0.36}TiO₃ 陶瓷的微纳结构研究

巴要帅^{1*} 巴德纯¹

¹ 东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819

*Email: yshba@mail.neu.edu.cn

摘要: 本文报道了对 Nd_{0.55}Li_{0.36}TiO₃ 陶瓷微纳结构研究的一些最新成果。Nd_{0.55}Li_{0.36}TiO₃ 陶瓷采用固态反应法合成。我们研究了不同制备条件下 Nd_{0.55}Li_{0.36}TiO₃ 陶瓷的晶体结构和微纳结构。结果显示, 样品烧制时, 淬火条件下的块体陶瓷由 5-15 μ m 立方状颗粒构成, 晶体为立方结构, 而在缓慢降温时样品具有完美的纳米超晶格结构, 晶体为四方结构。Nb 掺杂后样品保持了纳米超晶格结构, 同时在样品截面出现微米尺度凸起。本文工作有助于加深对 Nd_{2/3-x}Li_{3x}TiO₃ (0.047 < x < 0.151) 陶瓷复杂结构的理解, 并对其在热电应用上的研究提供一定的借鉴。

关键词: 陶瓷, 微纳结构, 超晶格, 固态反应法, 烧制, 掺杂

氦分子在 HDPE 薄膜间的渗透性研究

高铭* 马国辉 沈伟 陈墨 李佳杰 郑兴

(北京卫星制造厂有限公司 北京 100094)

Email: ghma1982@163.com

摘要: 本文针对非真空累积检漏法中可能会出现氦气分子在聚乙烯薄膜间的渗透现象进行研究。首先针对聚乙烯分子及晶胞的结构特点进行分析,得出氦分子渗透无法进行或极缓慢进行的结论。后续对氦分子渗透性进行试验研究,通过对薄膜两端氦浓度的长时间间隔检测,证实了理论分析的结论,对非真空累积检漏法实际检测提供了参考。

关键词: 氦气, 薄膜, 渗透, 泄漏

作者简介: 高铭,男,1994年1月出生,2019年毕业于北京科技大学,材料学硕士,无损检测工程师,现就职于航天五院北京卫星制造厂有限公司,主要研究泄漏检测、真空、涡流检测方向。

基于扩展有限元法的热障涂层裂纹扩展的热力耦合分析

刘宇泰^{1,2*} 陈志立¹ 司文¹ 李全伟¹ 杜广煜^{1,*}

¹ 东北大学, 辽宁沈阳, 邮编 110006;

*Email: gydu@mail.neu.edu.cn

摘要: 热障涂层(TBCs)技术与气膜冷却技术,高温合金制造并成为航空发动机叶片的三大关键技术。目前现役的热障涂层结构以YSZ和NiCrAl等作为陶瓷层和粘结层组成的双层结构为主。由于其需要在高温,强冲击,腐蚀等恶劣环境下工作,热障涂层的服役寿命制约航空发动机叶片及其整体可靠性。高温作用下,粘结层与陶瓷层间会生成一层热生长氧化层并由于热膨胀系数等的差异发生细小裂纹汇集从而导致界面开裂,进而导致涂层失效。已有诸多学者已经分析了高温下TGO层对整体裂纹扩展的影响,但涂层不仅受到高温作用,在外力循环载荷同样会影响裂纹扩展^[1]。本文通过在ABAQUS中建立了YSZ-TGO-NiCrAl-Ni的二维模型,并调用Fortran子程序,同时对模型加载温度场与循环正弦载荷,并通过改变初始裂纹位置,载荷大小等因素,通过扩展有限元法(XFEM)研究热障涂层在高温热震和循环载荷共同作用下裂纹扩展的影响因素。结果显示,裂纹越接近于TC/TGO界面波谷处越容易发生扩展,同时在外力较大时,TC表层的裂纹也会发生扩展,并研究了热力耦合作用下涂层失效的作用机理,以期为提高热障涂层的使用寿命提供提论基础。

关键词: 热障涂层, 裂纹扩展, 扩展有限元, 热力耦合, 失效分析

参考文献:

[1] S Wei, F. C. Wang, Q. B. Fan*, Z. Ma, X. W. Yang, "Finite element simulation of tensile bond strength of

atmospheric plasma spraying thermal barrier coatings", *Surface and Coatings Technology* 2964,205 (2011)
[2] Q.M. Yu*, Q. He, F.L. Ning, "Influence of interface morphology on erosion failure of thermal barrier coatings", *Ceramics International* 188 8 (2018)

金属增材制造技术在换热设备上的发展和应用

宁久鑫¹ 黄海龙¹ 王晓冬^{1*}

¹ 东北大学真空与流体工程研究所, 辽宁沈阳, 邮编 110819;

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要: 经过多年的发展, 换热器、散热片、热管等换热设备的研究已经取得了显著的成果^[1]。这些换热设备也广泛的应用在各类热控制系统和能量储存与转换系统之中^[2]。然而, 随着众多领域, 如石油化工, 航空航天, 汽车与船舶工业, 制冷行业等换热需求的不断提升, 以及各类电子设备的功率密度的大幅增长, 对换热设备提出了更高标准的要求和技术挑战, 结构更紧凑、效率更高的各式新型换热设备亟待开发。传统制造技术无法满足新型换热设备的工艺要求。为此, 发展能够精确制造功能齐全, 结构紧凑, 性能优异的换热设备的制造方法十分重要。

金属增材制造技术具有广阔的发展前景, 也是未来先进制造的发展方向之一。相比于传统制造技术, 金属增材制造不受尺寸限制, 具有较高的设计自由度, 可以直接成型高精度的复杂组件。例如各种复杂形状的翅片, 各类微通道和各式薄壁管道, 这些结构具有良好的换热特征, 可以实现优异的传热效果。金属增材制造还能够将多个零件连续以整体方式制造出来, 无需模具, 代替了零件的组装, 各部分焊接等传统工艺。尤其是一些通道类别的部件加工, 一体化加工也可以有效的避免连接处焊接不牢固导致的流体泄露的问题。金属增材制造的换热设备相比传统换热设备也更加紧凑, 重量更轻, 一些采用蜂窝状结构和仿生学结构的金属增材换热器在相同体积下具有更大的换热面积, 换热效率更高。金属增材制造技术的能源供给分为激光和电子束两种, 原料形式分为粉末和丝线, 供料方式分为粉末床和吹粉, 其中选择性激光熔化技术在精细加工工业具有广泛的应用前景^[3], 也是增材制造换热设备的主要加工方式之一。

关键词: 金属增材制造, 换热设备, 能量转换, 热性能

参考文献:

- [1] Naphon P, Wiriyasart S, Wongwiset S. Thermal cooling enhancement techniques for electronic components[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, 61: 140-145.
- [2] Reay D A. Thermal energy storage: the role of the heat pipe in performance enhancement [J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2015, 10(2): 99-109.
- [3] Yap C Y, Chua C K, Dong Z L, et al. Review of selective laser melting: Materials and applications [J]. *Applied physics reviews*, 2015, 2(4): 041101.

一种粗锑定向除杂和制备前端高纯锑的新工艺

孟朝松^{1,3,4}, 杨欢^{1,3,4}, 卫晓晖^{1,3,4}, 许长一^{1,3,4}, 曾元淋^{1,2,3,4}, 熊恒^{1,2,3,4,*},
杨斌^{1,2,3,4}, 徐宝强^{1,2,3,4}

¹ 昆明理工大学 真空冶金国家工程研究中心, 昆明, 650093;

² 昆明理工大学 云南省有色金属真空冶金重点实验室, 昆明, 650093;

³ 昆明理工大学 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明, 650093;

⁴ 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明, 650093)

Email: kmustxh@163.com

Abstract: Aiming to separate the trace impurities in crude antimony and to provide a foundation for the preparation of front-end high-purity antimony, two processes of low temperature-high temperature vacuum distillation (LHVD) and high temperature-low temperature vacuum distillation (HLVD) were performed for the deep purification of crude antimony. The removal rates of Bi, Zn, and Cd from the experimental products using LHVD were 77.20%, 34.78%, and 27.82%, respectively, under the optimal conditions of 1–10 Pa, a holding time of 90 min, a low-temperature stage of 873 K, and a high-temperature stage of 923 K. The total content of impurities in antimony was 39 ppm, and the purity of antimony was 99.9961%. The removal rates of Bi, Zn, and Cd from the experimental products using HLVD were 43.89%, 83.51%, and 56.21%, respectively, under the optimal conditions of 1–10 Pa, a holding time of 90 min, a high-temperature stage of 923 K, and a low-temperature stage of 873 K. The total impurity content in antimony was 52.94 ppm, and the purity of antimony was 99.9947%. The trace impurities in crude antimony can be effectively removed via a two-stage vacuum distillation. This study provides a reference for the deep purification and front-end preparation of high-purity antimony.

Key words: High-purity antimony; Vacuum distillation; Crude antimony; Impurities behavior

参考文献

Wang Wei, Wang Shuai, Yang Jia, Cao Chengsong, Hou Kanwen, Xia Lixin, Zhang Jun, Xu Baoqiang, Yang Bin. Preparation of Antimony Sulfide and Enrichment of Gold by Sulfuration–Volatilization from Electrodeposited Antimony[J]. Minerals, 2022, 12(2).

载钯硅藻土低温吸放氢动力学研究

于广琛¹, 王晓冬^{1*}

¹ 东北大学, 辽宁沈阳, 邮编 110819

*Email: xdwang@mail.neu.edu.cn

摘要:随着氢能源的广泛应用,核能作为清洁能源在人类社会得到了更多的发展。而钯是其同位素效应最大的金属,是作为氢同位素分离的首选材料。将钯附着在多孔介质硅藻土上制备而成的载钯硅藻土具有良好的吸放氢动力学特性^[1]。热循环吸附法^[2]是目前氢同位素分离应用最高效的方法,其是应用填装载钯硅藻土的分选柱,在通入混合气体后进行高低温循环,利用钯的同位素效应使质量不同的同位素在一端富集进行提纯。以往的研究更多的是对钯在定容条件下吸放氢进行动力学研究,本文针对热循环氢同位素分离工艺条件下,恒定流量进行吸放氢动力学研究。本文根据经典吸放氢动力学模型,结合恒流吸氢特性,推导出适用于恒流条件下的吸放氢动力学模型,并根据实验结果分析载钯硅藻土在工艺温度下,其吸放氢动力学控速步骤,根据模型对其他温度进行预测并与实验结果相比较,结果较为吻合。为氢同位素分离工艺提供一定的理论基础和数据支持。

关键词: 载钯硅藻土, 氢同位素分离, 恒流, 动力学特性

参考文献:

- [1] 雷强华, 罗德礼, 熊义富. 涂钯硅藻土 (Pd/K) 吸氢动力学分析 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005 (11): 14-17.
- [2] Ducret D, Laquerbe C, Ballanger A, et al. Separation of Hydrogen Isotopes by The Thermal Cycling Adsorption Process: an Experimental Device [J]. Fusion Sci Technol, 2002, 41: 1092-1096.

B 表面科学与应用

分会张贴报告

电荷密度波聚合物中的电子态与振动态性质关联性的直接成像

吴莹莹¹, 王政亚¹, 祝翔¹, 马传许^{1*}, 李斌¹, 谭元植², 谭世惊¹, 王兵^{1*}

¹中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, 安徽合肥, 邮编 230026;

²厦门大学能源材料化学协同创新中心, 福建厦门, 邮编 361005

*Email: cxma85@ustc.edu.cn ; bwang@ustc.edu.cn

摘要: 由于 π 电子的离域化, 低维碳纳米结构具有丰富的可调性, 显示出许多优异的电子学、自旋学与光学特性^[1,2]。在单化学键尺度上, 探测碳基纳米中依赖于结构的复杂相互作用是深入理解其中物理化学性质的关键。本工作中, 我们采用表面在位合成方法, 以 6,13-bis(dibromomethylene)-6,13-dihydropentacene(4BrPn)分子作为前驱体, 通过乌尔曼反应在 Ag(111)衬底上合成了一维聚合物链^[3]。利用我们发展的扫描隧道显微镜、非接触原子力显微镜、针尖增强拉曼 (STM-AFM-TERS) 联用技术^[4], 在单化学键尺度对该体系的价键结构特征、电子学性质以及局部振动模式等信息进行了高分辨表征。AFM 和 STM 结构像和 dI/dV 谱图表明, 该体系中存在皮尔斯相变引起的三倍周期电荷密度波结构^[5], 具有化学键尺度空间高分辨的 TERS 谱图结果与 dI/dV 谱图反映的局域电子态密度空间分布一致。在 TERS 谱图中, 还观测到振动模式退简并现象, 反映了由于对称破缺所产生的局域电荷密度分布变化。我们结果表明一维聚合物链中存在较强电声耦合^[6]作用, 为原子尺度水平理解一维电荷密度波产生的微观机制提供直接的多参量实验证据, 也表明融合多种实验技术是深入研究低维碳纳米结构体系中复杂相互作用的有效手段。

关键词: STM-AFM-TERS 探针联用技术, 电荷密度波, 电声耦合, 一维聚合物链

参考文献:

- [1] K. S. Novoselov *et al.*, Science 306, 666 (2004).
- [2] A. Hirsch, Nature Materials 9, 868 (2010).
- [3] B. Cirera *et al.*, Nat Nanotechnol 15, 437 (2020).
- [4] J. Y. Xu *et al.*, Science 371, 818 (2021).
- [5] M. Spera *et al.*, Phys Rev Lett 125, 267603 (2020).
- [6] A. C. Gadelha *et al.*, Nature 590 (2021).

Te 在 Cu(111)表面上的生长和电子结构表征

郭子洋 马晓川 谭世惊* 王兵*

中国科学技术大学物理学院物理系, 安徽合肥, 邮编 230026;

Email: bwang@ustc.edu.cn

摘要: 碲由于其非平庸的能带结构和独特的手性晶体结构而成为近年来材料研究的热点, 理论预言其在外界条件的控制下会呈现外尔半金属相^[1]。而具有优异电导、热电等性质的二维碲也在理论和实验上先后被发现^[2]。本工作中, 我们在超高真空环境下控制碲在 Cu(111)表面的沉积量, 并退火形成有序结构。通过扫描隧道显微技术 (STM) 和角分辨光电子能谱 (ARPES) 技术进行材料的原子结构和电子结构表征。当少量沉积碲而得到一种有序结构后, 原子级识别的 STM 形貌图发现其形成的二维稳定结构不同于 Ag(111)表面上得到的二元平整的蜂窝状六方结构 AgTe^[3], 而是呈现一维链状结构。ARPES 能谱系统地呈现其在高对称方向上的色散能带, 其在费米面附近表现为各向异性的空穴型能带。

进一步增加碲的沉积量, 得到另一种碲的有序结构。ARPES 测量发现其具有更复杂的电子结构, 并且发现 Γ 点附近的能带结构在室温和液氮温度下呈现不同的色散特征, 可能和能带劈裂或 Weyl nodes 的存在有关; 利用 He I 和 He II 两种不同能量的探测光测量, 发现其能带结构具有准二维的特征。我们的实验发现 Te 在 Cu(111)表面的生长情况具有不同于其他贵金属衬底的复杂特征, 并呈现随温度变化的有趣的电子结构; 其生长机理的探究对 Te 的复杂生长模式及碲的薄膜制备具有重要指导意义。

关键词: 超高真空, 扫描隧道显微镜 (STM), 角分辨光电子能谱 (ARPES), 碲二维结构,

参考文献:

- [1] L. A. Agapito, N. Kioussis, W. A. Goddard, N. P. Ong, Novel Family of Chiral-Based Topological Insulators: Elemental Tellurium under Strain. *Physical Review Letters* 110, 176401 (2013).
- [2] Z. Zhu et al., Multivalency-Driven Formation of Te-Based Monolayer Materials: A Combined First-Principles and Experimental study. *Physical Review Letters* 119, 106101 (2017).
- [3] M. Ünzelmann et al., Orbital-Driven Rashba Effect in a Binary Honeycomb Monolayer AgTe. *Physical Review Letters* 124, 176401 (2020).

高迁移率半导体 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 中温度异常的表面晶格动力学

李佳德 朱学涛* 郭建东*

中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190

*Email: xtzhu@iphy.ac.cn, jdguo@iphy.ac.cn

摘要: $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 具有超高的电子迁移率和良好的环境稳定性, 对二维电子器件的发展具有重要意义。但随着维度的降低, 表面效应对材料性质的影响会愈加凸显。 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 具有非常复杂的表面重构^[1], 给其表面性质的研究带来了困难。在本工作中, 我们利用非弹性慢电子散射技术, 发现 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的两支表面声子在 175K 附近存在温度异常, 其中最高能的声子频率在 175K 存在很锐利的拐点。拐点的出现在以往的研究中经常伴随着体系的相变^[2,3], 但是对 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的电输运, 磁输运和比热测量都没有在此温度点发现异常, 表明 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 没有发生相变。利用离子晶体壳层模型的表面声子计算指认了异常声子的振动模式, 发现声子模与表面重构具有密切的关系。变温 X 射线衍射实验发现 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的(006)以上的高阶衍射峰都在 175K 消失, 结合计算对声子模式的指认, 我们认定声子的异常与 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 面外的结构变化有关。我们的研究表明看似温度稳定的半导体 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 中存在着难以被察觉的潜在竞争关系, 其中的内在机制及其对材料性质的影响有待于进一步地研究。

关键词: $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$, 高分辨电子能量损失谱 (HREELS), 表面声子异常, 壳层模型 (Shell model)

参考文献:

- [1] C. Chen, M. Wang, J. Wu, H. Fu, H. Yang, Z. Tian, T. Tu, H. Peng, Y. Sun, X. Xu, J. Jiang, N. B. M. Schröter, Y. Li, D. Pei, S. Liu, S. A. Ekahana, H. Yuan, J. Xue, G. Li, J. Jia, Z. Liu, B. Yan, H. Peng, and Y. Chen, 4, eaat8355 (2018).
- [2] J. Teng, C. Chen, Y. Xiong, J. Zhang, R. Jin, and E. W. Plummer, 110, 898 (2013).
- [3] D. Oh, D. Song, Y. Kim, S. Miyasaka, S. Tajima, J. M. Bok, Y. Bang, S. R. Park, and C. Kim, Physical Review Letters 127, 277001 (2021).

Wavelike electronic energy transfer in donor-acceptor molecular systems through quantum coherence

Fan-Fang Kong,^{1#} Xiao-Jun Tian,^{1#} Yang Zhang,^{1*} Yao Zhang¹, Gong Chen¹, Yun-Jie Yu,¹ Shi-Hao Jing,¹
Hong-Ying Gao,² Yi Luo,¹ Jin-Long Yang,¹ Zhen-Chao Dong,^{1*} J. G. Hou^{1*}

¹Hefei National Research Center for Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

² School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin, 300072, China.

zhyangnano@ustc.edu.cn; zcdong@ustc.edu.cn; jghou@ustc.edu.cn

Abstract: Quantum-coherent intermolecular energy transfer is believed to play a key role in light harvesting in photosynthesis and photovoltaics^[1]. So far, a direct, real-space demonstration of quantum coherence in donor–acceptor systems has been lacking because of the fragile quantum coherence in lossy molecular systems^[2]. Here, we precisely control the separations in well-defined donor–acceptor model systems and unveil a transition from incoherent to coherent electronic energy transfer^[3]. We monitor the fluorescence from the heterodimers with subnanometer resolution through scanning tunneling microscopy induced luminescence. With decreasing intermolecular distance, the dipole coupling strength increases and two new emission peaks emerge: a low-intensity peak blueshifted from the donor emission, and an intense peak redshifted from the acceptor emission. Spatially resolved spectroscopic images of the redshifted emission exhibit a σ antibonding-like pattern and thus indicate a delocalized nature of the excitonic state over the whole heterodimer due to the in-phase superposition of molecular excited states. These observations suggest that the exciton can travel coherently through the whole heterodimer as a quantum-mechanical wavepacket. In our model system, the wavelike quantum-coherent transfer channel is three times more efficient than the incoherent channel. Our findings provide spectral and spatial evidence for quantum-coherent EET in donor–acceptor systems at the single-molecule level, which opens up new routes to explore intermolecular energy transfer, as well as to harness the coherence to enhance the functions of artificial light harvesting structures.

Keywords: STM induced luminescence, sub-nanometer resolution, quantum-coherent energy transfer, plasmon enhanced fluorescence, phthalocyanines

References:

- [1] A. Olaya-Castro and G. D. Scholes, *Int. Rev. Phys. Chem.* 30, 49 (2011).
- [2] C. C. Jumper, S. Rafiq, S. Wang, and G. D. Scholes, *Curr. Opin. Chem. Biol.* 47, 39 (2018).
- [3] F. F. Kong *et al.*, *Nat. Nanotechnol.* 17, 729 (2022).

Visualizing dark exciton states in cyclic molecular structures by tip-enhanced photoluminescence

Shi-Hao Jing¹, Fan-Fang Kong¹, Yao Zhang^{1,2}, Yang Zhang^{1,2}, Zhen-Chao Dong^{1,2*}

¹ Hefei National Research Center for Physical Sciences at the Microscale and Synergetic Innovation Center of Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

² Department of Chemical Physics and School of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

*Email: zcdong@ustc.edu.cn

Abstract: Energy-transfer and optical properties of molecular aggregates are determined by the

collective exciton states, depending on the intermolecular dipole-dipole coupling^[1]. However, limited by the complication of ensemble averaging, the diffraction limit, and the selection rule at far field, far-field optical spectroscopies often fail to provide a clear microscopic picture on the exciton states^[2]. In this work, we use sub-nanometer resolved tip-enhanced photoluminescence (TEPL)^[3] to break the dipole selection rule in far-field optics and visualize the molecular exciton states, especially dark states, in artificially constructed cyclic zinc phthalocyanine (ZnPc) molecular structures. The PL spectra of the constructed 2×2 cyclic tetramer structure is more complicated than that of an isolated ZnPc because of the dipole-dipole coupling. Nevertheless, combining with theoretical simulations, the dipole coupling configurations for all the exciton states of the 2×2 tetramer can be designated by the energy level alignment and the consistency between the experimental spectroscopic images and the simulated patterns. Specifically, the imaging pattern for the lowest-lying electronic dark exciton state in the cyclic tetramer reveals the rotation of the transition dipole orientations for each monomer constitutes. Furthermore, we find that the lowest-lying exciton state can be tuned from dark to bright through changing a hollow 3×3-1 octamer to a solid 3×3 nonamer structure. Our results not only characterize the optical properties of both the bright and dark exciton states in molecular aggregates, but also laid the foundation for the rational design of artificial light-harvesting complexes in photosynthesis.

Keywords: STM; tip-enhanced photoluminescence; excitonic coupling; molecular aggregate

References:

- [1] R. Hildner, D. Brinks, J. B. Nieder, R. J. Cogdell, and N. F. van Hulst, *Science* 340, 1448 (2013).
- [2] Y. Zhang *et al.*, *Nature* 531, 623 (2016).
- [3] B. Yang *et al.*, *Nat. Photonics* 14, 693 (2020).

基于原子极化模型实现大尺寸金属针尖的拉曼散射模拟

崔杰¹ 张尧^{1,2*} 董振超^{1,2*}

¹ 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心和量子协同创新中心, 安徽合肥, 邮编 230026;

² 中国科学技术大学合肥国家实验室, 安徽合肥, 邮编 230088

*Emails: zhy2008@ustc.edu.cn; zcdong@ustc.edu.cn

摘要: 近些年来, 针尖增强拉曼光谱 (TERS) 技术的发展已经将单分子成像的空间分辨率推进到了单个化学键尺度^[1], 并且扫描探针的形貌 (特别针尖尖端的原子级突起) 对超高空间分辨率和强局域场增益有重要作用^[2]。但是, 针尖尖端原子结构的直接表征非常困难。在此前的研究中我们发现, 来源于针尖尖端自身的拉曼散射可以提供关于其尖端原子堆积方式的宝贵信息^[3]。然而, 由于扫描探针巨大的形貌结构和组成原子数目, 响应的理论计算花销非常庞大, 目前传统的量子化学软件包只能模拟具有少数原子的金属团簇的拉曼散射, 远远不足以描述针尖基座结构对针尖尖端极化的重要

贡献。在此，我们提出了一种将原子级离散偶极近似模型和密度泛函理论结合的原子极化模型，用于模拟大型金属针尖尖端的拉曼光谱。在该模型中，针尖的极化率由整个针尖贡献，但针尖的振动模式只考虑尖端原子的贡献。我们发现针尖的拉曼光谱特征对尖端的组成元素、原子堆积模式和尖端形貌非常敏感，因此可以作为“指纹”来识别不同原子结构的针尖。此外，我们的方法可以扩展到具有百万原子数的亚波长尺寸金属针尖，使得同时考虑尖端的大尺度和原子级细节成为可能。我们提出的方法可以作为一个基本工具，以经济快速的方式模拟金属尖端和其他纳米结构的拉曼散射过程，这对进一步理解原子结构在针尖和表面增强光谱中的作用具有重要意义。

关键词：针尖增强拉曼光谱，原子极化模型，金属针尖形貌，拉曼散射模拟，亚波长尺寸

参考文献：

- [1] R. Zhang, Y. Zhang, Z. C. Dong,* et al., "Chemical mapping of a single molecule by plasmon enhanced Raman scattering", *Nature* 498, 82 (2013).
- [2] B. Yang, G. Chen, A. Ghafoor, et al., "Sub-nanometre resolution in single-molecule photoluminescence imaging", *Nat. Photonics* 14, 693 (2020).
- [3] X. B. Zhang, Y. F. Zhang, H. Li, et al., "Fast Fabrication and Judgement of Tip-Enhanced Raman Spectroscopy-Active Tips", *Chin. J. Chem. Phys.* 35, 713 (2022).

利用单分子 TERS 光谱实现对局域场梯度的实空间成像

唐子翕¹ 张尧^{1, 2*} 董振超^{1, 2*}

¹ 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心和量子协同创新中心，安徽合肥，邮编 230026；

² 中国科学技术大学合肥国家实验室，安徽合肥，邮编 230088

*Emails: zhy2008@ustc.edu.cn; zcdong@ustc.edu.cn

摘要：随着针尖增强光谱技术的发展，等离激元局域场已经可以被限域在亚纳米尺度的范围内，并且局域场在空间分布上会产生极强的不均匀性，从而导致场梯度效应以及其他高阶过程的出现，并对相应的拉曼光谱特征产生影响。然而，由于高阶极化过程非常复杂，想要确定局域场梯度的空间分布仍然具有一定的挑战。在本工作中，我们使用单个分子作为局部探针，通过来测量对应的针尖增强拉曼光谱（TERS）来获得纳腔中等离激元局域场及其梯度的空间分布。由于模型分子极化率的高对称性和局域等离激元场在垂直方向的极大增强，局域电场和场梯度的空间分布可以直观地从不同振动模式的 TERS 成像中反映出来。考虑到 TERS 成像的空间分辨率与探针分子的大小有关，对于更加局域的等离激元场及其梯度，我们采用吸附在衬底上的一氧化碳小分子作为探针，实现了高达 0.1 纳米的空间分辨率下的局域场梯度成像。我们提出的方法有望在实验中得到进一步验证，并为研究等离激元学和纳米光学中的高空间分辨率和非线性过程提供新的手段。

关键词：针尖增强拉曼光谱，单分子，场梯度效应，实空间成像

参考文献:

- [1] R. Zhang, Y. Zhang, Z. C. Dong,* S. Jiang, C. Zhang, L. G. Chen, L. Zhang, Y. Liao, J. Aizpurua, Y. Luo, J. L. Yang, and J. G. Hou, "Chemical mapping of a single molecule by plasmon enhanced Raman scattering", *Nature* 498, 82 (2013).
- [2] Y. Zhang, Z. C. Dong, J. Aizpurua, "Theoretical treatment of single-molecule scanning Raman picoscopy in strongly inhomogeneous near fields", *J. Raman Spectrosc.* 52, 296 (2021).

通过匹配算法实现长链 DNA 分子 TERS 光谱的快速生成

朱路遥¹ 张尧^{1, 2*} 董振超^{1, 2*}

¹ 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心和量子协同创新中心, 安徽合肥, 邮编 230026;

² 合肥国家实验室, 安徽合肥, 邮编 230088

*Emails: zhy2008@ustc.edu.cn; zcdong@ustc.edu.cn

摘要: DNA 碱基序列携带了重要的遗传信息, 对生物学和医学研究具有重要意义。尽管目前已经有很多方法可以实现对 DNA 分子的测序, 但在准确率和长读长等方面还存在很多困难需要克服。针尖增强光谱技术 (TERS) 具有单个化学键级别的空间识别能力, 并且能反映分子基团的化学特征, 从而实现单个分子内部结构的可视化[1], 因此实现对 DNA 分子的 TERS 光谱研究具有重要意义。传统的 TERS 光谱理论计算过程需要利用 DFT 等量子化学方法计算整个分子的极化特性[2], 但对于 DNA 这种生物大分子, 原子数在 10^2 - 10^{11} 量级, 传统方法进行 TERS 光谱的计算是不现实的, 更不用说进行实空间成像的模拟。本文提出了一种新的 DNA 分子 TERS 光谱生成方法, 将传统计算的时间复杂度 $o(N^3)$ 降低到了 $o(N^2)$, 空间复杂度从 $o(N^2)$ 降低到了 $o(N)$ 。本方法利用 DNA 序列的碱基重复特性, 首先利用密度泛函理论计算了短序列的 DNA 分子, 得到各个子结构内部的原子极化率, 然后通过与长序列 DNA 大分子进行子结构匹配和空间取向匹配, 获得大分子内的原子极化率信息, 进而结合针尖等离激元局域场计算得到 TERS 实空间成像图。此外, 我们还进行了 ns 级的 DNA 分子动力学模拟, 计算出每一帧的 TERS 成像图, 发现该方法能快速且良好的在时间序列上展示 DNA 分子的碱基种类和位置信息。该方法快速生成光谱的特点可以为长序列 DNA 分子的 TERS 光谱测量以及与超快光谱技术的结合提供有力的理论支持, 并且有望在 RNA、蛋白质等具有重复单元的生物大分子上得到广泛应用。

关键词: 尖端增强拉曼光谱, 扫描拉曼成像, 单分子, DNA, 分子动力学

参考文献:

- [1] R. Zhang, Y. Zhang, Z. C. Dong,* S. Jiang, C. Zhang, L. G. Chen, L. Zhang, Y. Liao, J. Aizpurua, Y. Luo, J. L. Yang, and J. G. Hou, "Chemical mapping of a single molecule by plasmon enhanced Raman scattering", *Nature* 498, 82 (2013).
- [2] Y. Zhang, Z. C. Dong,* J. Aizpurua,* "Theoretical treatment of single-molecule scanning Raman picoscopy in strongly inhomogeneous near fields", *Journal of Raman Spectroscopy* 52, 296-309 (2021).

On-Surface Synthesis of Electron-Deficient Bisanthene Tetraimide

刘叶¹, 迟力峰¹

¹ 苏州大学功能纳米与软物质研究院, 江苏苏州, 邮编 215123

*Email: yliu996@stu.suda.edu.cn

Abstract: Imide-based conjugated molecules have emerged as a highly promising class of building blocks for constructing *n*-type semiconducting materials with low-lying LUMOs and exceptional stability.^[1] Although imides, such as naphthalene diimides (NDI), perylene diimides (PDI) and their lateral fused analogs, have been synthesized extensively, the design and synthesis of larger π -extended molecules incorporating more than two imide groups are significant but still very challenging.^[2] Herein, we report the synthesis of an unprecedented electron-deficient bisanthene tetraimide (ATI) containing a bisanthene conjugated core and four five-membered imide groups, which is successfully achieved via a combined approach of solution and on-surface synthesis. The chemical structures, electronic states, formation mechanism and aromaticity of ATI are systematically investigated by scanning tunneling microscopy (STM), noncontact atom force microscopy (nc-AFM), scanning tunneling spectroscopy (STS) and density functional theory (DFT) calculations.

Key words: Bisanthene Tetraimide • Dehydrocyclization • Combined Solution and On-Surface Strategy • Mild Temperature

参考文献:

[1] Y. Zhou, W. Zhang, G. Yu, Chem. Sci. 2021, 12, 6844-6878.

[2] S. M. Luo, K. A. Stellmach, S. M. Ikuzwe, D. D. Cao, J. Org. Chem. 2019, 84, 10362-10370;

层状金属超原子晶体中的交织极化电荷序

邢淑雅^{1,#}, 伍琳璐^{1,#}, 王子禄^{1,#}, 陈旭^{2,#}, 程志海^{1,*}, 郭建刚^{2,3,*}, 王善才^{1,*}, 季威^{1,*}

¹ 中国人民大学, 北京, 邮编 100872

² 中科院物理所, 北京, 邮编 100190

³ 松山湖材料实验室, 广东东莞, 邮编 523808

*Email: wji@ruc.edu.cn

摘要: 超原子是指一组原子集体表现出类似单个原子的某些性质的团簇。当超原子通过非共价键排列成晶体时, 单元间结合能的降低使得它们可以很容易地组装成纳米结构。目前尚不清楚这种超原子之间减弱的能量相互作用是否伴随着单元间电子相互作用的抑制。为此, 我们探索了超原子晶体 Au₆Te₁₂Se₈ 表面的奇特电子结构, 发现其在 120K 以下依次出现两种电荷序: 一种是沿着 Au₆Te₁₂Se₈ 立方体链间方向的三倍周期电荷密度波(triple-cube charge density wave, tc-CDW), 另一种

是在链内方向的极化金属态。在每个三列周期内，两侧的极化态以反平行的方式锁定以维持中心立方体的反演对称性（见 Figure 1），即由电荷密度波和极化金属态交织形成反极化(anti-polar)金属态。拉曼光谱和理论计算等结果表明两种电荷序主要源于电子关联而非电声耦合。这项研究表明，强的电子相互作用在确定非共价超原子晶体的电子结构性质方面可能起着不可忽视的作用，从而为将现有的量子材料类别扩展到非共价晶体提供了重要的启示。

关键词：超原子，扫描隧道显微镜（STM），密度泛函理论（DFT），极化金属，电荷密度波

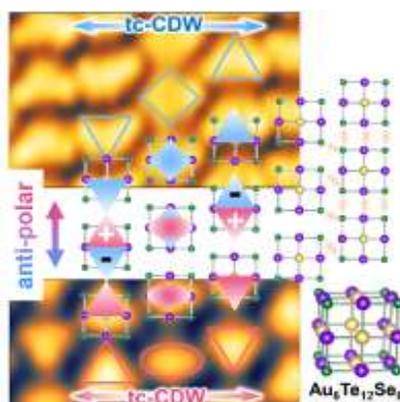


Figure 1. $\text{Au}_6\text{Te}_{12}\text{Se}_8$ 表面的电荷密度波和反极化金属态.

参考文献：

[1] Shuya Xing, *et al.*, "Interweaving Polar Charge Orders in a Layered Metallic Superatomic Crystal", *Phys. Rev. X* 041034, 12 (2022).

Tip-induced bond weakening, tilting and hopping of a single CO molecule on Cu(100)

Xiao-Ru Dong^{1,†}, Ben Yang^{1,†}, Rui Zhu¹, Rui-Pu Wang¹, Yang Zhang¹, Yao Zhang^{1,a*} and Zhen-Chao Dong^{1,b*}

¹ Hefei National Research Center for Physical Sciences at the Microscale and Synergetic Innovation Centre of Quantum information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, China

a* zhy2008@ustc.edu.cn, b* zcdong@ustc.edu.cn

Abstract. The interaction between a probing tip and an adsorbed molecule could greatly impact the molecular chemical structure and even induce its motion on a surface^{1,2}. Here, we use single carbon monoxide (CO) molecules adsorbed on the Cu (100) surface as a model system to investigate tip-induced bond weakening, tilting and hopping processes of a single molecule by sub-nanometer resolved tip-enhanced Raman spectroscopy (TERS)^{3,4}. The vibrational frequency of the C–O stretching mode is

found always redshifted as the tip approaches, revealing the weakening of the C–O bond due to tip-molecule interactions. Further analyses on both the vibrational Stark effect and TERS imaging patterns suggest a delicate tilting phenomenon of the adsorbed CO molecule on Cu(100), which eventually leads to the lateral hopping of the molecule. While the tilting orientation is found toward the hollow site along the [110] direction of the Cu(100) surface, the hopping event is more likely to proceed via the bridge site to the nearest Cu neighbor along the [100] or [010] direction. Our results provide deep insights into the microscopic mechanism of tip-molecule interactions and tip-induced molecular motions on surfaces at the single-bond level.

Keywords: Scanning tunneling microscope, Tip-enhanced Raman spectroscopy, Carbon monoxide, Electrostatic field, Force field, Stark effect, Tip-molecule interaction

Reference

- [1] Ternes, M., Lutz, C. P., Hirjibehedin, C. F., Giessibl, F. J. & Heinrich, A. J. The force needed to move an atom on a surface. *Science* 319, 1066-1069 (2008).
- [2] Ladenthin, J. N. *et al.* Force-induced tautomerization in a single molecule. *Nature Chemistry* 8, 935-940 (2016).
- [3] Zhang, R. *et al.* Chemical mapping of a single molecule by plasmon-enhanced Raman scattering. *Nature* 498, 82-86 (2013).
- [4] Zhang, Y. *et al.* Visually constructing the chemical structure of a single molecule by scanning Raman picoscopy. *National Science Review* 6, 1169-1175 (2019).

针尖增强拉曼光谱活性针尖的自动化修饰方法

冒文杰¹ 杨犇¹ 董小茹¹ 韩瑞麟¹ 张杨^{1,2*} 董振超^{1,2*}

¹ 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心和量子协同创新中心, 安徽合肥, 邮编 230026;

² 中国科学技术大学合肥国家实验室, 安徽合肥, 邮编 230088

*Emails: zhyangnano@ustc.edu.cn; zcdong@ustc.edu.cn

摘要: 针尖增强拉曼光谱 (TERS) 技术结合了扫描探针显微镜 (SPM) 的空间高分辨率以及拉曼光谱的灵敏的化学分辨力, 成为微纳尺度下有利的表征工具^[1,2]。TERS 探测的实现离不开具有优异 TERS 活性探针的制备与修饰。传统的探针修饰方法, 一般依赖于探针的可控下扎以及施加脉冲来修饰探针形貌, 并需要通过测量 STM 扫图的电流信号、变偏压的 dI/dV 谱以及采集的光谱信号来监控远场光子与隧道结的耦合情况^[3]。传统的修饰方法极度依赖于人的经验。因此, 如何发展自动化地修饰探针的方法, 避免对人的依赖以及提高实验效率, 就变得极为重要。本报告中, 我们发展了一种程序控制的基于针尖可控快速振荡的自动化探针修饰方法。其原理是利用探针可控抖动来快速修饰探针尖端形貌并通过监控由光生电流引入的抖动停止点来进行探针修饰的。具体地, 可控地让

针尖抖动,使其与衬底接触以改变其尖端形貌,再利用针尖获得 TERS 活性之后光电流所带来的针尖性质变化及时停止抖动以保护针尖。整个修饰流程仅仅会花费数秒至数分钟的时间。经过测试,对于人工可以修饰出 TERS 活性的探针,利用程序控制的自动化修饰方法都可以 100%地修饰出来;对于程序控制方法无法修饰出 TERS 活性的探针,人工也无法修饰成功。这样一来,我们发展的自动化方法可以有效地替代人,提高实验效率。我们所发展的方法有利于 TERS 实验技术的进一步发展,相关的实验流程设计思路也为提升扫描探针实验的自动化效率提供了新思路。

关键词: 针尖增强拉曼光谱活性探针, 程序控制的探针自动化修饰, 针尖可控快速振荡

参考文献:

- [1] R. Zhang, Y. Zhang, Z. C. Dong,* et al., "Chemical mapping of a single molecule by plasmon enhanced Raman scattering", *Nature* 498, 82 (2013).
- [2] B. Yang, G. Chen, A. Ghafoor, et al., "Sub-nanometre resolution in single-molecule photoluminescence imaging", *Nat. Photonics* 14, 693 (2020).
- [3] X. B. Zhang, Y. F. Zhang, H. Li, et al., "Fast Fabrication and Judgement of Tip-Enhanced Raman Spectroscopy-Active Tips", *Chin. J. Chem. Phys.* 35, 713 (2022).

C 薄膜科学与技术
分会张贴报告

高性能氧化镁次级发射层制备

李诚迪* 邓涛 张杰

(南京三乐电子集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800)

*Email: sanlegdkj2020@163.com

摘要: 本文主要叙述一种适用于磁选态铯束管用电子倍增器次级发射层的制造工艺, 根据对电子倍增器性能衰减机理的研究, 综合考虑现有各种氧化镁次级发射层制备方法的优势, 提出一种热敏化与热解沉积结合的氧化镁次级发射层制备方法。以此解决国产磁选态铯束管用电子倍增器寿命过短的问题。

关键词: 电子倍增器; 制备方法; 氧化镁; 次级电子发射

Abstract: This paper mainly describes a method of manufacturing method of secondary emission layer of electron multiplier for magnetically selected cesium beam tube. Based on the study of the performance attenuation mechanism of electron multiplier, we comprehensively consider the advantages of various preparation methods of magnesium oxide secondary emission layer, a method of preparing the secondary emission layer of MgO by combining thermal sensitivity and pyrolytic deposition is proposed. In order to solve the problem that the lifetime of the electron multiplier used in the homemade magnetically selected cesium beam tube is too short.

Key words: Electron multiplier; MOCVD; MgO; Secondary electron emission

引言

铯原子钟是导航定位系统及深空探测器中衡量空间定位精度的关键设备, 应用于各军兵种导航平台与作战时频体系、高速通信网等地、海、空、天测控与通讯系统。电子倍增器是铯原子钟最为重要的部件, 直接决定了铯原子钟的使用寿命、主要技术性能指标以及可靠性等。长期以来, 国产电子倍增器一直未解决的使用寿命短的问题严重制约了铯原子钟工程化应用, 根本原因在于现有电子倍增器增益低, 且次级发射体在轰击能量较高的离子或较强电子束流长期作用下耐轰击能力弱, 增益衰减过快^[1]。电子倍增系统是电子倍增器的核心关键件, 由多个相同的次级发射体组合而成。故单个次级发射体性能的好坏直接决定了电子倍增器的技术指标水平, 也是影响铯原子钟性能指标与可靠性的关键因素, 因而研究高次级电子发射特性、高稳定性的次级发射体制备工艺对于提高电子倍增器使用寿命至关重要。

* 科研项目: 国防基础科研计划 (No.JCKY2019211C001)

作者简介: 李诚迪 (1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事高性能次级电子发射与光电探测器件技术及其应用的研究。

倍增极的作用是发射大于入射电子若干倍的次级电子。常用的倍增极材料有铯化碱和合金两类,

铋化碱倍增极制备工艺简单,且在较低电压下能产生较大的二次电子发射系数,但其温度稳定性差,负荷能力较低,活性层不能暴露大气;而合金倍增极次级发射能力虽然相对较弱,但其具备工作性能稳定,可以承受较大的电流密度,无光照时暗电流小,可以暴露大气等优点。目前国内外主要采用氧化镁薄膜作为电子倍增器的次级发射体,它具有较高的二次发射系数、抗溅射能力强,在国外磁选态铯束管中被广泛应用^[2]。

1、氧化镁次级发射层制备工艺

1.1 传统氧化镁次级发射层制备方法

目前用于制备电子倍增器次级发射层的氧化镁(MgO)膜层的方法有很多种,主要有电子束蒸发、脉冲激光沉积、磁控溅射、金属有机物化学气相沉积、分子束外延、溶胶凝胶法和金属敏化法等。不同的制膜方法具有不同的特点,制备方法的不同必将影响薄膜的性质,譬如结晶取向、表面粗糙度、致密性等^[3]。目前主要用于制备电子倍增器次级发射层的有两种工艺方案,即金属敏化工艺和磁控溅射工艺。

(1) 金属敏化法

金属敏化法是将以银为主体,含镁量约 3%~6%的真空熔炼银镁合金带冲压成零件后,在高温下镁从合金内部向表面扩散,与充入的气体(如氧、水蒸气、一氧化碳、空气等)发生作用,镁被氧化形成具有良好次级发射性能的氧化镁发射层^[4]。通过合理的设定和控制氧化温度、氧化时间和氧气压力这三个工艺参数,使合金表层生成一层厚度适当的 MgO 次级电子发射层。

此工艺优点是工艺易操作,设备成本低,表面形成的氧化镁次级发射层耐轰击能力强,性能相对稳定;缺点是次级发射层性能受材料含镁量影响较大,使电子倍增器工作电压较高。

(2) 磁控溅射法

磁控溅射法是利用镁作为靶材,将入射离子轰击靶材表面,使镁原子或分子按照相应的方向射出,利用磁场将加速的正离子约束在靶面,溅射出靶面原子或分子沉积在待镀衬底表面,再通入一定量氧气使氧化镁直接附着在基体表面形成氧化镁次级发射层^[5-6]。

此工艺优点是有效解决了金属敏化法中次级发射层性能受银镁合金含镁量影响大的问题,溅射沉积的薄膜致密度高,薄膜的成分与靶材具有较好的一致性,但实际使用时发现,其性能较金属敏化法制备的次级发射层衰减过快。

1.2 高性能氧化镁次级发射层制备方法

根据以往对电子倍增器性能衰减的研究,氧化镁次级发射层在高电压下受到大电流电子的长期轰击导致膜层质量受损,降低次级发射系数最终导致产品失效^[7]。所以在工艺过程中制备致密的、厚度适中的氧化镁次级发射层并有效的提高次级发射层的次级电子发射能力以及在金属零件表面的附着力是制备长寿命次级发射体的关键^[8]。

(1) 热沉积制备氧化镁次级发射层方法

根据电子倍增器的使用特点,延长其寿命的首要措施就是要提高次级发射层的二次发射系数,提高电子倍增器增益从而降低工作电压,减缓高工作电压对次级发射层性能衰减带来的加速效应。不同于传统的金属敏化法和磁控溅射法,我们提出了一种新的氧化镁膜层制备方法,即镁盐热解沉积法。我们设计了一种专用反应设备实现热解沉积工艺。

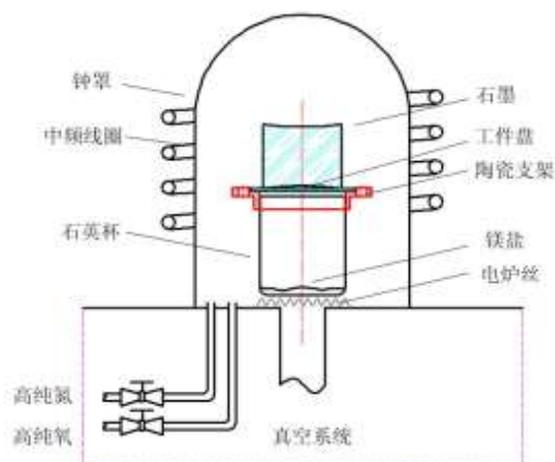


图1 热解沉积设备示意图

- 1) 将可受热挥发的有机镁盐乙酰丙酮镁与氧化铝粉末充分研磨混合均匀后制备成蒸发源后倒入图中的石英杯中；
- 2) 并将表面已制备氧化镁膜层的工件放置于图中工件盘处；
- 3) 用图中的玻璃钟罩将蒸发源和基体置于封闭腔体中，并开启真空系统抽真空；
- 4) 待真空度达到 $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 后，开启图1的中频线圈将石墨加热到微红；
- 5) 待石墨变回黑色，且真空度回到 $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 后，关闭分子泵，保留干泵工作；
- 6) 开启图1的电炉丝对蒸发源加热，加热温度至 $200^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 之间；
- 7) 再次开启中频对基体发射极加热，加热温度至 $600^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ 之间；
- 8) 再按1:4充入氧气和氮气；
- 9) 保持反应时间为20in~30min。

(2) 高性能次级发射体复合分层结构的设计

在过往的研究中已经由诸多学者提出复合膜层的结构，其中衬底/镍(Ni)附着层/银(Ag)电荷缓冲层/MgO&Ag 渐变层/MgO 次级发射层组成的特殊复合膜层对于提高次级发射层性能最为有效。利用 NiO 与 MgO 相近的晶格常数，制备 NiO 层提高次级发射层的附着力；利用纯银薄膜良好的导电能力作为电荷缓冲层，降低电荷积累，降低 MgO 薄膜表面势垒，解决氧化镁次级电子发射膜在发射电子的过程中需要持续补充电子的需求，提高电子补充能力；最后在银层与次级电子发射层之间应用掺杂原理增加 MgO/Ag 金属膜基体结构，改善衬底表面的平整度，使得薄膜与基底之间结合得更好，从而改善复合薄膜的成膜质量^[9]。MgO 的含量随着厚度增加而减少，Ag 的含量逐渐增高，该渐变层可以在已有纯银电荷缓冲层的基体膜层基础上，提高 MgO 膜层导电性，降低电荷累积，延长 MgO 膜层寿命。

我们对以上的方案进行了优化，首先使用导电性能更好的金代替银作为电荷缓冲层材料，进一步提高电子补充的能力；其次在电荷缓冲层上直接磁控溅射银镁合金层代替镁靶和银靶交替溅射的方案来简化工艺流程。最后在镁盐沉积制备 MgO 次级发射层时，在氧气氛围中，银镁合金敏化表面形成 MgO 次级发射层，与热解沉积制备的 MgO 膜层结合形成致密均匀的高性能氧化镁次级发射层。

2、验证情况

经过测试，具有复合分层结构的次级发射体样品二次电子发射系数测试结果稳定在4.75~4.89，明显高于合金敏化法制备样品，与磁控溅射法制备样品水平相当，体现了热沉积制备氧化镁次级发

射层制备方法可获得较好的次级发射体制备水平提升。

表 1 次级发射体的二次电子发射系数测试结果对比

测试样品		δ (100eV)	δ (200eV)	δ (300eV)
合金敏化法	样品 1	2.2	3.78	5.5
	样品 2	2.1	3.66	5.25
磁控溅射法	样品 1	2.4	4.56	6.3
	样品 2	2.5	4.63	6.35
镁盐热解沉积法	样品 1	2.77	4.89	6.4
	样品 2	2.59	4.75	6.38

同时，我们对合金敏化法、磁控溅射法以及热敏化与热解沉积结合的氧化镁次级发射层制备的倍增极进行了高精度装配，分别制成电子倍增器^[10]。在专用测试设备中进行电子倍增器工作寿命对比验证，连续监测电子流入射状态下的电子倍增器工作电压变化情况。结合试验过程中工作电压的实测增加幅度，完成总体变化趋势数据对比分析，利用实时的工作电压变化来表征电子倍增器性能衰减情况。

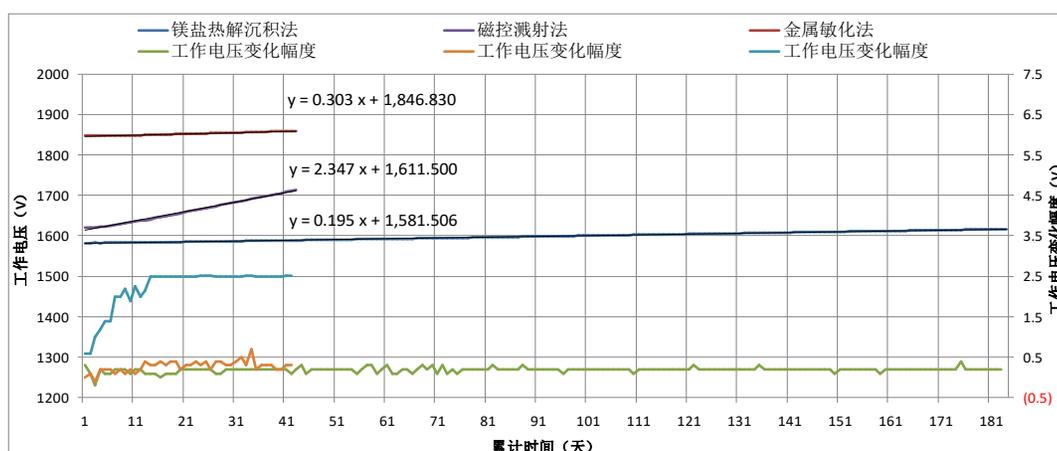


图 2 电子倍增器工作电压变化趋势

对比验证试验数据分析结果表明，利用电子流入射状态下的工作电压变化表现为前期 3-5 天内略有起伏，后续工作电压基本平缓，并呈现出长期小幅度变化的线性趋势。线性拟合结果显示，金属敏化法制成的电子倍增器工作电压平均变化幅度约 0.303V/天，起始工作电压超过 1800V；磁控溅射法制成的电子倍增器工作电压平均变化幅度约 2.347V/天，起始工作电压达到 1600V 左右；热敏化与热解沉积结合制成的电子倍增器工作电压平均变化幅度约 0.195V/天，同时起始工作电压位于 1600V 以下。由此可见，高性能次级发射体复合分层结构改进结合了金属敏化法和磁控溅射法的优点，线性拟合预测的工作寿命延长一倍以上。

3、结论

本文提出了镁盐热解沉积 MgO 次级发射层制备方法，将镁盐热解反应速率受控型表面化学气相沉积 MgO 活性层制备应用于次级发射体关键制造过程，满足了电子倍增器整管高增益性能需求，同时提出了高性能次级发射体复合分层结构改进方案。该方法结合了 MgO 膜层制备方法中金属敏化法和磁控溅射法的优点，适当增加了银镁合金敏化后表面 MgO 层厚度，又制备纯金的电荷缓冲层在工作时有电子对次级发射层进行补充，减缓次级发射层性能衰减。制备的氧化镁次级发射层二次发射系数得到一定程度提高，且制备出的电子倍增器寿命大大延长。

参考文献

- [1] 何一蕾,王多书,郭磊.打拿极材料二次电子发射系数计算模型研究现状[J].真空与低温,2017,23(04):207-211.
- [2] Tan H, Xu N, Deng S. Synthesis and electron emission properties of MgO nanowires[J].Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures,2010, 28(2):C2B20-C2B23.
- [3] 王志俊,胡礼中,王兆阳,赵杰,张贺秋.MgO 薄膜的制备方法及其工艺条件对薄膜特性的影响[J].真空与低温,2006(01):41-45.
- [4] Rappaport P. Methods of Processing Silver - Magnesium Secondary Emitters for Electron Tubes[J].Journal of Applied Physics, 1954, 25(3):288 - 292.
- [5] 李亨,胡文波,吴胜利,魏强.MgO/Au 复合薄膜的反应射频磁控溅射法制备及表面形貌研究[J].真空科学与技术学报,2014,34(08):842-846.
- [6] 张骏. 磁控溅射制备 MgO 薄膜及物性研究[D].南京邮电大学,2016.
- [7] CAAUX J.E-induced secondary electron emission yield of insulators and charging effects [J].Nuclear instruments and Methods in Physics Research,2006,244 (2): 307-322.
- [8] 王浩东,李诚迪,芮杰,邓涛,张杰. 一种氧化镁次级发射体的制备方法[P]. 江苏省: CN113471034A,2021-10-01.
- [9] 李洁,胡文波,华星,郝玲. MgO/Au 复合薄膜的表面形貌及其二次电子发射特性的研究[C]//.2016 真空电子学会第二十届学术年会论文集(下),2016:78-81.
- [10] 周荣楣.电子倍增器探讨[J].真空电子技术, 1997(06):10-14.DOI:10.16540 /j.cnki.cn 11-2485/tn.1997.06.003.

卷绕真空热蒸发镀膜中金属蒸汽运输特性研究

马刚强 谢元华 郝明 鲁现航 高晨 刘坤*

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: 柔性薄膜凭借延展性好、集成性高等优点,是目前材料领域的研究热点。以电池领域为例,柔性薄膜的应用能提高电池能量密度,增加电池寿命,被广泛应用于新能源、光伏及智能穿戴等多个领域⁰。卷绕真空热蒸发镀膜是高效制备动力电池集流体电极材料的技术之一,通过将金属材料置于镀膜室热源系统中,加热使其在真空下蒸发为金属蒸汽,在超短时间内沉积到基材表面成膜。热蒸发过程中,扩散系数、粘性系数、热传导系数等物性参数的影响。研究金属蒸汽传输行为与相关参数之间的关系,可指导镀膜工艺参数的制定及镀膜设备的设计,实现薄膜厚度和均匀性的精确控制。

本研究针对卷绕真空热蒸发镀膜过程,直接蒙特卡洛(Direct Simulation Monte Carlo, DSMC)方法,金属蒸汽输送过程开展研究⁰。模拟过程中,克努森数用于定义入口密度和整体流场稀疏度、入口质量流量和密度用于定义入口速度、入口剖面用于调整径向和轴向动量的比例、压力边界条件用于调整本底真空度。通过计算不同蒸发源温度、本底真空度、气体流动状态及气体物性参数下的

金属蒸发速率、蒸发产物分布；探究不同真空度、克努森数和流量入口等条件下金属蒸汽的输运特性如输送速率输运流量等。通过建立 PET 薄膜材料附近金属蒸汽分子的统计函数，确定柔性基材上金属蒸汽分子的沉积规律。本研究通过数值模拟方法，探究镀膜过程蒸汽传输行为与相关参数的关系，优化热蒸发参数条件，减少能源消耗，提高镀膜质量。

关键词：卷绕真空镀膜，金属热蒸发，直接蒙特卡洛方法，参数优化

Kim S H, Lee M Y, Woo K, et al. "A study on thin film uniformity in a roll-to-roll thermal evaporation system for flexible OLED applications", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 18,1111-1117 (2017).

Fan J, Boyd I D, Shelton C. "Monte Carlo modeling of electron beam physical vapor deposition of yttrium", *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 18(6), 2937-2945 (2000).

作者简介：马刚强（1997.12-），男，硕士研究生，主要研究方向：稀薄气体模拟，E-mail: 2170317@stu.neu.edu.cn。

通讯作者：刘坤（1979.07-），男，教授，博士生导师，主要研究方向：真空科学与微纳机械，真空装备技术，气体流动理论与应用，E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助：辽宁省应用基础研究计划项目（2022JH2/101300215），辽宁省科技攻关项目（2021020832-JH1/104-03），沈阳市自然科学基金（22-315-6-01）。

真空热蒸发卷绕镀膜的成膜质量优化研究

杨胜权 谢元华 陈树雷 付云鹤 滕帅 李永晟 刘坤*

东北大学机械工程与自动化学院，辽宁沈阳，邮编 110819

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要：真空热蒸发卷绕镀膜是通过加热膜材，在柔性基底上连续沉积原子或分子，实现成膜，是一种发展较早、应用广泛的真空镀膜技术[1]。卷绕镀膜过程中，基底温度影响着膜微观行为，即基底温度会引起原子迁移、原子凝结系数、成核的临界尺寸等，从而影响成膜质量。此外柔性基底耐热性较差，镀膜过程中需对其进行冷却，防止褶皱、变形或断裂。由于不同膜材成膜温度不同、不同基材耐受温度不同，因此调控柔性基底与镀膜辊之间的换热效率，精准控制基底温度尤为重要^[2]。本研究在柔性基底上一次性镀制厚金属膜层，采用红外测温方式测量基底温度，测量结果反馈至温度控制程序。系统根据温控程序的指令，基于主辊与柔性基底的贴附控制技术，改变张力、辊间距及接触面积等操作参数，控制柔性基底与镀膜辊之间的贴附程度，调节二者之间的换热效率，进而调控基底温度。采用扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscope, SEM）、原子力显微镜（Atomic Force Microscope, AFM）、表面方阻测量仪等仪器，对薄膜表面形貌、表面粗糙度及方阻值等进行表征，评价成膜质量。基于上述研究，建立操作参数、基底温度与薄膜质量之间的映射关系，完善温度控制逻辑，通过精准调控柔性基底与镀膜辊之间的换热效率，实现成膜质量的优化。

关键词: 真空卷绕镀膜, 热蒸发, 基底温度控制, 换热效率, 成膜质量优化

参考文献:

- [1] 张以忱.真空镀膜技术与设备.北京: 冶金工业出版社,(2014)
[2] J. P. Heinß*, P. Lang, and P. Ruppelt, “Temperature control of metal strip during high-rate vacuum coating”, *Surface & Coatings Technology* 290, 39-42 (2016).

作者简介: 杨胜权 (2001.06-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 柔性镀膜科学技术, E-mail: 2170329@stu.neu.edu.cn。

通讯作者: 刘坤 (1979.07-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 真空科学与微纳机械, 真空装备技术, 气体流动理论与应用, E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助: 辽宁省应用基础研究计划项目 (2022JH2/101300215), 辽宁省科技攻关项目 (2021020832-JH1/104-03), 沈阳市自然科学基金 (22-315-6-01)。

基于反应离子刻蚀的复合微纳制备工艺

谭世龙¹, 杨帆², 李锐豪¹, 江绍基^{1,*}

¹ 中山大学物理学院, 广东省广州市海珠区新港西路 135 号, 510275

² 中山大学理学院, 广东省深圳市光明区公常路 66 号, 528406

*Email: stsjsj@mail.sysu.edu.cn

摘要: 通过构建表面微纳结构和制备纳米涂层可使材料表面获得特殊功能, 在特定应用下表现出优异特性。目前常见的微纳制备策略很难同时兼顾高效率与高精度, 为此我们探索了由微球自组装、反应离子刻蚀、磁控溅射三种工艺组成的复合工艺, 实现了微纳结构的高效率、大面积、低成本制备。此复合工艺有望适用于多种基底, 例如我们在熔石英及聚酰亚胺柔性衬底上成功制备了纳米柱、纳米圆台、纳米锥等大面积周期性微纳结构。此外, 通过调整工艺参数, 我们可以灵活调控微纳结构的特征尺寸, 例如周期、占空比、深宽比。进一步, 我们期望基于多种工艺组合的思想, 探索出更多高效的复合工艺, 以制备更多类型的微纳结构, 为各类微纳器件的工业生产提供新思路。

关键词: 微球自组装, 反应离子刻蚀, 磁控溅射, 复合工艺, 微纳制备

参考文献:

- [1] Yang, F., Li, R. H., Tan, S. L., Dong, J. W.* , & Jiang, S. J.* . Visible-mid infrared ultra-broadband and wide-angle metamaterial perfect absorber based on cermet films with nano-cone structure. *Nanophotonics* (2023), 10.1515/nanoph-2023-0021.
[2] Hou, W. J., Yang, F., Chen, Z. M., Dong, J. W., & Jiang, S. J.* . Wide-angle and broadband solar absorber made using highly efficient large-area fabrication strategy. *Optics Express* (2022), 30(3), 4424-4433.

D 纳米科学与技术
分会张贴报告

Structure of Amorphous Two-Dimensional Materials: Elemental Monolayer Amorphous Carbon versus Binary Monolayer Amorphous Boron Nitride

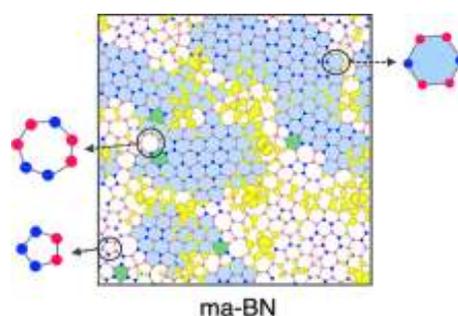
Xi Zhang¹, Yu-Tian Zhang¹, Yun-Peng Wang², Yu-Yang Zhang^{1*} and Shixuan Du¹

¹University of Chinese Academy of Sciences and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

²Hunan Key Laboratory for Super Microstructure and Ultrafast Process, School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China

*Email: zhangyuyang@ucas.ac.cn

Abstract: The structure of amorphous materials has been debated since the 1930s as a binary question: amorphous materials are either Zachariasen continuous random networks (Z-CRNs) or Z-CRNs containing crystallites. It recently demonstrated, however, that amorphous diamond can be synthesized in either form. Here we address the question of the structure of single-atom-thick amorphous monolayers. We reanalyze the results of prior simulations for amorphous graphene and report kinetic Monte Carlo simulations based on alternative algorithms. We find that crystallite-containing Z-CRN is the favored structure of elemental amorphous graphene, as recently fabricated, whereas the most likely structure of binary monolayer amorphous BN is altogether different than either of the two long-debated options: it is a compositionally disordered “pseudo-CRN” comprising a mix of B–N and noncanonical B–B and N–N bonds and containing “pseudocrystallites”, namely, honeycomb regions made of noncanonical hexagons. These results suggest that compound amorphous 2D or 3D materials have more options than the binary choice, which has implications for other nonelemental 2D and bulk amorphous materials. ^[1]



been
was

Keywords: Amorphous materials, 2D materials, kinetic Monte Carlo, pseudocrystallites

Reference:

[1] Yu-Tian Zhang *et al.* Nano Lett. (2022) (DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c02542>)

Thermal transport of monolayer amorphous carbon and boron nitride

Yi-Yang Yin,¹ Yu-Tian Zhang,¹ Yun-Peng Wang,^{2*} Yu-Yang Zhang,^{1*} and Shixuan Du,¹

¹ University of Chinese Academy of Sciences and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 100049

² Hunan Key Laboratory for Super Microstructure and Ultrafast Process, School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, China, 410083

*Email: yunpengwang@csu.edu.cn and zhangyuyang@ucas.ac.cn

Abstract: Two-dimensional materials show intriguing properties in many aspects, including thermal transport properties. Graphene and h-BN are two well-known examples among them that possess very high thermal conductivities. However, thermal transport properties of their amorphous counter parts remain unclear due to the absence of an accurate model. In this work, we report calculations of the in-plane thermal conductivities of monolayer amorphous carbon (MAC) and monolayer amorphous boron nitride (ma-BN), by reverse nonequilibrium molecular dynamics simulations. We find that the thermal conductivities of both MAC and ma-BN are about two orders of magnitude smaller than their crystalline counter parts, and are independent of temperature and strain due to their extremely short heat carrier mean free paths. Furthermore, the ma-BN shows strong vibrational localization across the frequency range, while the MAC exhibits a unique extended G diffusion mode due to its sp² hybridization and the broken E_{2g} symmetry. The present results reveal the intrinsic low thermal conductivities of MAC and ma-BN, suggesting potential applications of these two materials in thermal management^[1].

Key words: 2D materials, amorphous, thermal transport, carbon, boron nitride

Reference:

[1] Yu-Tian Zhang *et al*, Appl. Phys. Lett. 120, 222201 (2022); doi: 10.1063/5.0089967

First-principle study of the electronic structure of layered Cu₂Se

Ju-Xia Yi, Rui-Zi Zhang, Yu-Yang Zhang* and Shi-Xuan Du

University of Chinese Academy of Sciences and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

*Email: zhangyuyang@ucas.ac.cn

Abstract: Copper selenide (Cu₂Se) has attracted significant attention due to the extensive applications in thermoelectric and optoelectronics over the last few decades. Among various phase structures of Cu₂Se, layered Cu₂Se is found to exhibit many intriguing properties, such as purely thermal phase transition, high carrier mobility, high optical absorbance, high photoconductivity and relatively large band gap. In this work,

we carry out a systematic investigation for electronic structures of layered Cu_2Se with several exchange-correlation functionals at different levels through first-principle calculations. It can be found that the electronic structures of layered Cu_2Se are extremely sensitive to the functionals. Moreover, the correction of on-site Coulomb interaction also has a significant effect. Compared with the results calculated with hybrid functional and G_0W_0 method, it is found that the electronic structures with LDA+U functional are relatively accurate for the layered Cu_2Se . In addition, it's found that in-plane biaxial strain can lead to the transition of electronic property of layered Cu_2Se from metal to semiconductor. We further explore the spin-orbit coupling (SOC) effect of Cu_2Se . The results demonstrate that the slight effect of SOC for electronic structures mainly results from spatial inversion symmetry of Cu_2Se . These results provide a guidance for further deep investigation of this compound.

Keywords: first-principle calculations, layered Cu_2Se , exchange-correlation functional, on-site Coulomb interaction, strain, spin-orbit coupling

基于 OAM 的多波段主动变焦超透镜

郑睿瑄^{1,2} 潘如豪¹ 李俊杰¹ 顾长志^{1,2*}

¹ 中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心, 北京, 邮编 100190;

² 中国科学院大学物理学院, 中国科学院真空物理重点实验室, 北京, 邮编 100049

*Email: czgu@iphy.ac.cn

摘要: 在传统的光学系统中, 镜头的变焦功能主要依赖改变镜片间的相对位置, 这是导致占据了较大的空间体积。传统的光学透镜的功能依赖于表面曲率或者表面镀膜, 与之不同的是, 基于亚波长人工结构的超表面提供折射率梯度来任意调节电磁波。超表面在减小光学元件的尺寸和实现复杂功能方面显示出巨大的潜力。然而, 关于变焦超表面[1]的实现, 特别是能够在可见光波段工作的超表面的实现, 报道甚少。本工作中采用电子束光刻结合原子层沉积法制备了高长宽比(>10)的 TiO_2 纳米柱的变焦超透镜, 通过改变入射涡旋光的轨道角动量(OAM)来获得不同的焦距。OAM 提供了一个新的自由度来调节电磁波的振幅和相位[2]。超透镜以 C_2 对称性纳米鳍的 Pancharatnam Berry (PB) 相为基础, 基于入射光 OAM 变化, 并通过包含螺旋相板功能的相位配置实现对特定 OAM 的独立解码实现焦距变化。实验上采用四个非零 OAM 在 532nm 处验证了 5 mm 到 35 mm 的焦距切换, 和 633nm 处 4.5 mm 到 29 mm 的变焦范围。

关键词: TiO_2 , OAM, 超表面, 变焦超透镜

参考文献:

[1] D. Hu, H. Li, Y.P. Zhu, Y.Q. Lei, J. Han, S.L. Xian, J.J. Zheng, B.O. Guan, Y.Y. Cao*, L. Bi* and X.P. Li*, "Ultra-sensitive nanometric flat laser prints for binocular stereoscopic image", Nat. Commun. 12, 1154 (2021).

[2] H. Ren*, X.Y. Fang, J. Jang, J. B ürger, J. Rho* and S. A. Maier*, "Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space", Nat. Nanotechnol. 15, 948-955 (2020).

基于等离激元增强的二维材料偏振光电探测器

白庆虎^{1,2} 黄鑫^{1,2} 顾长志^{1,2*}

¹中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心, 北京, 邮编 100190;

²中国科学院大学物理学院, 中国科学院真空物理重点实验室, 北京, 邮编 100049

*Email: czgu@iphy.ac.cn

摘要: 线性偏振光电探测器广泛应用于遥感成像、环境监测和军事装备等方面, 二维材料由于其在可见光谱范围内高光响应度、高开关比以及快速响应时间, 在光电子器件领域具有广阔的应用前景, 然而其原子层的厚度限制了光与物质相互作用, 此外由于大部分二维材料具有各向同性的晶体结构, 无法实现对线偏振光的探测。为了克服这一缺点, 我们提出一种将 MoS₂ 与各向异性等离激元纳米结构集成的方法, 通过等离激元纳米结构产生的各向异性强局域电场增强 MoS₂ 光电探测器中光与物质的相互作用。在本文中, 纳米凹槽结构产生的局域电场可以增强 MoS₂ 器件的光吸收, 在垂直于纳米凹槽结构的方向光电流增强了 8 倍, 同时, 该器件对于不同偏振方向的入射光会产生偏振敏感的光电流, 其各向异性比高达 0.8。这项研究证明了等离激元纳米结构在制备高性能偏振光电探测器中具有很好的应用前景。

关键词: 线偏振, 光电探测器, 二硫化钼, 等离激元, 纳米凹槽

参考文献:

- [1] Zhi-Qian Wu, Jing-Liang Yang, Nallappagar K. Manjunath, Yue-Jiao Zhang, Si-Rui Feng, Yang-Hua Lu, Jiang-Hong Wu, Wei-Wei Zhao, Cai-Yu Qiu, Jian-Feng Li, Shi-Sheng Lin, * "Gap-Mode Surface-Plasmon-Enhanced Photoluminescence and Photoresponse of MoS₂", *Adv. Mater.* 30, 1706527(2018).
- [2] Yungang Sang, Chun-Yuan Wang, Soniya S. Raja, Chang-Wei Cheng, Chiao-Tzu Huang, Chun-An Chen, Xin-Quan Zhang, Hyeyoung Ahn, Chih-Kang Shih, Yi-Hsien Lee, Jinwei Shi, and Shangjr Gwo, * "Tuning of Two-Dimensional Plasmon-Exciton Coupling in Full Parameter Space: A Polaritonic Non-Hermitian System", *Nano Lett.* 21, 6, 2596-2602(2021)

Controlled synthesis method of sulfide nanorod

Longwen Yang¹, Yun Ye^{1,2*}, Enguo Chen^{1,2}, Sheng Xu^{1,2}, Qun Yan^{1,2}, Tailiang Guo^{1,2}

¹National & Local United Engineer Laboratory of Flat Panel Display Technology, Fuzhou University, ²

Xueyuan Road, Fuzhou, 350116 Fujian Province, China

²Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China

Corresponding author: ceg@fzu.edu.cn

Keywords: nanorods, Hot-injection, Cation exchange reaction, Heterojunction

In this paper, the Cu_{2-x}S nanorods with good morphology and controllable size were prepared by a hot injection method, and the nucleus and growth mechanism were explored. The experimental results show that the prepared products are rod-shaped, the stoichiometry of Cu:S is 1.93:1, close to 2:1, the size is uniform, the diameter is about 22 nm, and the length is about 62 nm. Experiments have found that the type of sulfur source, the amount of sulfur source, the reaction time, and the nucleation temperature have an effect on the size and morphology of the Cu_{2-x}S nanorod. The experiment found that the type of mercaptan is the key to the synthesis of rod-like Cu_{2-x}S , the change of injection temperature will change the diameter and length of the nanorod, the reaction time has less impact on the synthesis of the nanorod, and the amount of mercaptan injection has a greater impact on the size of the nanorod, the more mercaptan is injected, the larger the size and the more obvious the change. Using cation exchange technology, the Cu^+ ions in the prepared single-oblique djurleite $\text{Cu}_{1.93}\text{S}$ nanorods were replaced with other cations, such as Zn^{2+} , Cd^{2+} , etc., and the single heterojunction $\text{ZnS-Cu}_{1.93}\text{S}$ nanorods and the $\text{ZnS-Cu}_{1.93}\text{S-ZnS}$ nanorods were prepared by two different synthesis schemes, and the morphology was maintained well. According to XRD analysis, the arrangement of atoms within the crystal was almost unchanged when the replacement region crystal was transformed from the djurleite crystal structure of $\text{Cu}_{1.93}\text{S}$ to the ZnS of the wurtzite crystal phase. By adjusting the reaction temperature, reaction time, and volume of the ion exchange solution, the length ratio of the two materials in the heterojunction can be adjusted, and the complete transition from $\text{Cu}_{1.93}\text{S}$ to ZnS can be achieved.

It is expected that the preparation process of light-emitting nanorods will be simplified by cation exchange technology.

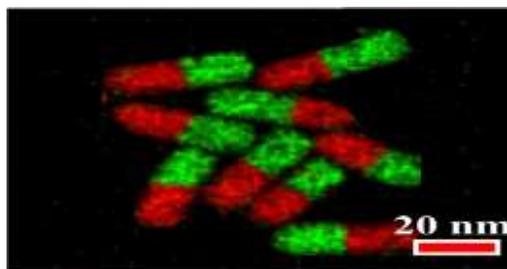


Figure 1 Ultra-high resolution field emission scanning electron microscope images

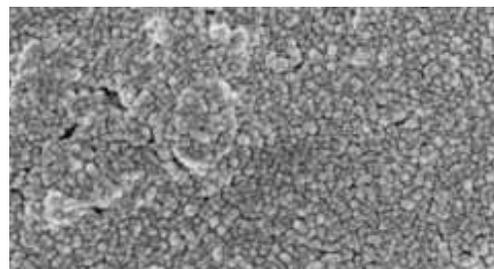


Figure 2 Single-ended $\text{ZnS-Cu}_{1.93}\text{S}$ heterojunction nanorods

Direct synthesis of moiré superlattice through chemical vapor deposition growth of monolayer WS_2 on plasma-treated HOPG

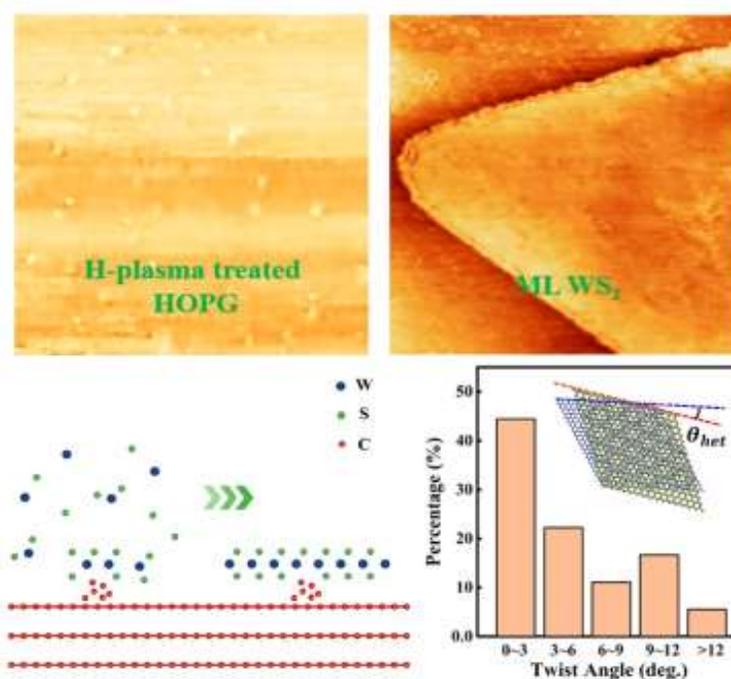
Zongnan Zhang, Xiaowen Zhou, Xinlong Zeng, Yaping Wu*, Feiya Xu, Chunmiao Zhang, Xu Li*, Zhiming Wu* and Junyong Kang

Department of Physics, Engineering Research Center for Micro-Nano Optoelectronic Materials and Devices at Education Ministry, OSED, Fujian Provincial Key Laboratory of Semiconductor Materials and Applications Xiamen University, Xiamen 361005, People's Republic of China

* Email: ypwu@xmu.edu.cn, xuliphys@xmu.edu.cn, zmwu@xmu.edu.cn,

Abstract: Vertical van der Waals (vdW) heterostructures composed of two-dimensional (2D) layered materials have recently attracted substantial interests due to their unique properties. However, the direct synthesis of moiré superlattice remains a great challenge due to the difficulties in heterogeneous nucleation on smooth vdW surfaces. Here, we report a controllable chemical vapor deposition growth of complete monolayer WS₂ on highly ordered pyrolytic graphite (HOPG) substrates through the plasma pretreatment. The results show that the morphologies of the grown WS₂ have a strong dependence on the plasma parameters, including gas composition, source power, and treatment time. It is found that the surface C-C bonds are broken in the plasma pretreated HOPG, and the formed small clusters can act as the nucleation sites for the subsequent growth of WS₂. Moreover, the height of cluster dominates the growth mode of WS₂ islands. A transition from a 2D mode to three-dimensional (3D) growth mode occurs when the height is higher than the interlayer spacing of the heterostructure. Besides, diverse moiré superlattices with different twist angles for WS₂/HOPG heterostructures are observed, and the formation mechanism is further analyzed by first-principles calculations

Keywords: chemical vapor deposition, plasma pretreatment, van der Waals (vdW) heterostructures, moiré superlattice



Reference:

[1] Kobayashi, Y.; Sasaki, S.; Mori, S.; Hibino, H.; Liu, Z.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Suenaga, K.; Maniwa, Y.; Miyata, Y. Growth and optical properties of high-quality monolayer WS₂ on graphite. *ACS Nano* 2015, 9, 4056-4063.

[1] Chen, P. Y.; Zhang, X. Q.; Lai, Y. Y.; Lin, E. C.; Chen, C. A.; Guan, S. Y.; Chen, J. J.; Yang, Z. H.; Tseng, Y. W.; Gwo, S. et al. Tunable moiré superlattice of artificially twisted monolayers. *Adv. Mater.* 2019, 31, e1901077.

拓扑半金属 $\text{Co}_3\text{In}_2\text{S}_2$ 的反常霍尔效应研究

吕森浩^{1,2}, 潘禄禄¹, 郭辉¹, 何峻², 杨海涛^{1*}

¹中国科学院物理研究所北京凝聚态物理研究中心, 北京 100190

²钢铁研究总院功能材料研究部, 北京 100081

Email: htyang@iphy.ac.cn

摘要: 磁性拓扑半金属材料可以通过改变磁序来操纵拓扑态, 是二维极限下实现量子反常霍尔效应非常有前途的材料, 受到了广泛的研究和关注。 $\text{Co}_3\text{In}_2\text{S}_2$ 作为一种磁性 weyl 半金属, 由于其具有较大的反常霍尔效应(AHE)和高的磁可调谐性而得到了广泛的探索研究, 而通过寻找合适的替代原子来探索 shandite 家族体系中其他材料的物理性能成为研究的重点。本文通过化学气相传输(CVT)方法, 制备出高质量的磁性 shandite 化合物 $\text{Co}_3\text{In}_2\text{S}_2$ 。磁化曲线显示其在 5 K 左右出现反铁磁转变, 低温电输运测试发现其磁阻(MR)、载流子迁移率、反常霍尔电导率(AHC)和反常霍尔角(AHA)分别为 1100%、 $9810 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、 $9.5 \times 10^5 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 和 65%, 表明 $\text{Co}_3\text{In}_2\text{S}_2$ 中存在较大的反常霍尔效应。我们的工作为高质量磁性拓扑半金属材料的制备开辟了一条可行的途径, 为在二维极限下推动量子反常霍尔效应的实现和可能的拓扑量子器件提供了希望。

关键词: $\text{Co}_3\text{In}_2\text{S}_2$, 载流子迁移率, 反常霍尔电导率, 反常霍尔角

高质量 PtP_2 晶体中的三维弱局域化和负磁阻效应

程秋振^{1,2} 余维琪^{1,2} 杨海涛^{2*}

¹中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京, 邮编 102249;

²北京凝聚态物理国家研究中心和中国科学院物理研究所, 北京, 邮编 100190;

*Email: htyang@iphy.ac.cn

摘要: 近年来, 含有五元环排列结构的 PtP_2 单晶和二维材料因具有丰富的物理和化学性能而得到广泛关注, 有望应用于高性能电子和光电子器件。本文通过优化 Pt 和 P 的初始摩尔比, 采用助溶剂法制备了高质量的 PtP_2 单晶, 并在 PtP_2 单晶中首次发现了三维弱局域化和负磁阻效应。晶体结构、磁性和光谱测试表明, PtP_2 单晶中的少量缺陷对负磁阻效应和磁有序态产生抑制作用。本文提出了合成高质量贵金属磷化物单晶的有效方法, 为研究磷化物中多种关联电子态以及新型特殊结构低维材料的制备提供了新的途径。

关键词: PtP_2 , 单晶, 五元环结构, 3D 弱局域, 负磁阻

参考文献:

- [1] Vahid Mohammadi A, Rosen J, and Gogotsi Y, "The world of two-dimensional carbides and nitrides (MXenes)", *Science* 372, eabf1581(2021).
- [2] X. L. Zhu, P. F. Liu, J. Zhang, P. Zhang, W. X. Zhou, G. F. Xie, and B. T. Wang, "Monolayer SnP_3 : An excellent p-type thermoelectric material", *Nanoscale* 11, 19923 (2019).

厚度调制的铁磁半金属 EuB_6 的电输运性质研究

潘禄禄¹, 解育岚¹, 杨海涛^{1*}

¹ 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理研究中心, 北京 100190

Email: htyang@iphy.ac.cn

摘要: EuB_6 是稀土六硼化物家族中唯一的铁磁半金属, 其晶体结构为简单立方结构, 表现出顺磁-铁磁相变、拓扑能带、快速降低的低温电阻率、大的负 MR 磁电阻等诸多有趣的奇异物理性质, 同时具有很好的化学稳定性和高熔点特性 (2600 °C)。但其电输运性质的物理机制尚不明晰。本文通过助溶剂法, 制备出了高质量的 EuB_6 单晶, 磁性测量显示其在 15 K 附近出现顺磁-铁磁相变, 低温电输运测试发现在 5 K 以下主要表现为正磁电阻 (MR, $\sim +100\%$), 而在 5 K 以上主要表现为负 MR ($\sim -80\%$)。当单晶样品的厚度由 180 微米减小到约 3 微米时, 其临界磁场 B_c 由 1.4 T 增加至 2.8 T, 同时在 1.9 K 时, 其扫场磁电阻曲线随着厚度减小由正 MR 主导逐渐转变为由负 MR 主导, 这一输运性质的变化可能与低温下 EuB_6 单晶的铁磁性有着密切关联。我们的工作探索了 EuB_6 铁磁半金属随维度变化的电输运性质, 也为探究其本征的物理机制提供的新的实验依据。

关键词: EuB_6 , 电输运性质, 临界磁场, 厚度

Development of a cryogen-free sub-3K low-temperature scanning probe microscope by remote liquefaction scheme

Ruisong Ma, Le Lei, Yuanzhi Huang, Yani Liu, Huan Shan, Li Liu,

Qing Huan* and Hong-Jun Gao*

Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, P.O. Box 603, Beijing 100190, China

*Email: huanq@iphy.ac.cn; hjgao@iphy.ac.cn

Abstract: We developed a new scheme for cryogen-free cooling down to sub-3-Kelvin temperature range and ultra-low vibration level. An ultra-high-vacuum (UHV) cryogen-free scanning probe microscope (SPM) system was built based on the new scheme. Instead of mounting a below-decoupled cryocooler directly onto the system, the new design was realized by integrating a Gifford-McMahon (GM) cryocooler into a separate liquefying chamber, providing two-stage heat exchangers in a remote way. About 10 L of helium gas inside the gas handling system was cooled and liquefied in the liquefying chamber and was then transferred to a continuous-flow cryostat on the SPM chamber through a $\sim 2\text{m}$ flexible helium transfer line. The exhausted helium gas from the continuous-flow cryostat was then returned to the liquefying chamber for reliquefaction. A base temperature of $\sim 2.84\text{ K}$ at the scanner sample stage and a temperature fluctuation of almost within $\pm 0.1\text{ mK}$ at 4 K were achieved. The cooling curves, tunneling current noise, variable-

temperature test, STM and non-contact AFM imaging, and first and second derivatives of I(V) spectra are characterized to verify that the performance of our cryogen-free SPM system is comparable to the bath cryostat-based low-temperature SPM system. We also successfully upgraded a bath cryostat-based SPM system with our cryogen-free scheme to realize long-term data acquisition. This remote liquefaction close-cycle scheme shows an ultra-low vibration level and paves a way for other applications requiring low temperature but sensitive to vibration.

Keyword: Cryogen-free, Scanning probe microscope (SPM), Low-temperature, Remote liquefaction scheme. Submitted to Review of Scientific Instruments

On-surface synthesis and edge states of NBN-doped zigzag graphene nanoribbons

Yao Xiao^{1,2} Xiao Chang^{1,2} Li Huang^{1,2} Yixuan Gao^{1,2} Yubin Fu^{3,4} Ji Ma^{3,4} Huan Yang^{1,2} Junzhi Liu⁵ Xiaoshuai Fu^{1,2} Xiao Lin^{1,2} (✉) Xinliang Feng^{3,4} (✉) Shixuan Du^{1,2,6} (✉) and Hong-Jun Gao^{1,2,6} (✉)

¹ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

² Beijing National Center for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

³ Center for Advancing Electronics Dresden (CfAED) and Faculty of Chemistry and Food Chemistry, Technische Universität Dresden, Dresden D-01069, Germany

⁴ Max Planck Institute of Microstructure Physics, Weinberg 2, Halle 06120, Germany

⁵ Department of Chemistry, State Key Laboratory of Synthetic Chemistry, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

⁶ Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China

§ Xiao Chang, Li Huang, Yixuan Gao, and Yubin Fu contributed equally to this work.

*Email: yxiao@iphy.ac.cn

ABSTRACT: Zigzag graphene nanoribbons (ZGNRs) with spin-polarized edge states have potential applications in carbon-based spintronics. The electronic structure of ZGNRs can be effectively tuned by different widths or dopants, which requires delicately designed monomers. Here, we report the successful synthesis of ZGNR with a width of eight carbon zigzag lines and nitrogen-boron-nitrogen (NBN) motifs decorated along the zigzag edges (NBN-8-ZGNR) on Au(111) surface, which starts from a specially designed U-shaped monomer with preinstalled NBN units at the zigzag edge. Chemical-bond-resolved non-contact atomic force microscopy (nc-AFM) imaging confirms the zigzag-terminated edges and the existence of NBN dopants. The electronic states distributed along the zigzag edges have been revealed after a silicon-layer intercalation at the interface of NBN-8-ZGNR and Au(111). Our work enriches the ZGNR family with a new

dopant and larger width, which provides more candidates for future carbonbased nanoelectronic and spintronic applications.

KEYWORDS: zigzag graphene nanoribbons, nitrogen-boron-nitrogen (NBN) dopant, edge states, scanning tunneling microscopy (STM), non-contact atomic force microscopy (nc-AFM), density functional theory (DFT) calculations

References:

- [1] Han, W.; Kawakami, R. K.; Gmitra, M.; Fabian, J. Graphene spintronics. *Nat. Nanotechnol.* 2014, 9, 794 – 807.
- [2] Nakada, K.; Fujita, M.; Dresselhaus, G.; Dresselhaus, M. S. Edge state in graphene ribbons: Nanometer size effect and edge shape dependence. *Phys. Rev. B* 1996, 54, 17954 – 17961.
- [3] Han, P.; Akagi, K.; Canova, F. F.; Mutoh, H.; Shiraki, S.; Iwaya, K.; Weiss, P. S.; Asao, N.; Hitosugi, T. Bottom – up graphene-nanoribbon fabrication reveals chiral edges and enantioselectivity. *ACS Nano* 2014, 8, 9181 – 9187.
- [4] Ruffieux, P.; Wang, S. Y.; Yang, B.; Sánchez-Sánchez, C.; Liu, J.; Dienel, T.; Talirz, L.; Shinde, P.; Pignedoli, C. A.; Passerone, D. et al. On-surface synthesis of graphene nanoribbons with zigzag edge topology. *Nature* 2016, 531, 489 – 492.
- [5] Talirz, L.; Söde, H.; Dumslaff, T.; Wang, S. Y.; Sanchez-Valencia, J. R.; Liu, J.; Shinde, P.; Pignedoli, C. A.; Liang, L. B.; Meunier, V. et al. On-surface synthesis and characterization of 9-atom wide armchair graphene nanoribbons. *ACS Nano* 2017, 11, 1380 – 1388.
- [6] Gröning, O.; Wang, S. Y.; Yao, X. L.; Pignedoli, C. A.; Barin, G. B.; Daniels, C.; Cupo, A.; Meunier, V.; Feng, X. L.; Narita, A. et al. Engineering of robust topological quantum phases in graphene nanoribbons. *Nature* 2018, 560, 209 – 213.
- [7] Rizzo, D. J.; Veber, G.; Cao, T.; Bronner, C.; Chen, T.; Zhao, F. Z.; Rodriguez, H.; Louie, S. G.; Crommie, M. F.; Fischer, F. R. Topological band engineering of graphene nanoribbons. *Nature* 2018, 560, 204 – 208.
- [8] Rizzo, D. J.; Veber, G.; Jiang, J. W.; McCurdy, R.; Cao, T.; Bronner, C.; Chen, T.; Louie, S. G.; Fischer, F. R.; Crommie, M. F. Inducing metallicity in graphene nanoribbons via zero-mode superlattices. *Science* 2020, 369, 1597 – 1603.
- [9] Cai, J. M.; Ruffieux, P.; Jaafar, R.; Bieri, M.; Braun, T.; Blankenburg, S.; Muoth, M.; Seitsonen, A. P.; Saleh, M.; Feng, X. L. et al. Atomically precise bottom – up fabrication of graphene nanoribbons. *Nature* 2010, 466, 470 – 473.
- [10] Liu, J. Z.; Li, B. W.; Tan, Y. Z.; Giannakopoulos, A.; SanchezSanchez, C.; Beljonne, D.; Ruffieux, P.; Fasel, R.; Feng, X. L.; Müllen, K. Toward cove-edged low band gap graphene nanoribbons. *J. Am. Chem. Soc.* 2015, 137, 6097 – 6103.
- [11] Senkovskiy, B. V.; Usachov, D. Y.; Fedorov, A. V.; Marangoni, T.; Haberer, D.; Tresca, C.; Profeta, G.; Caciuc, V.; Tsukamoto, S.; Atodiresei, N. et al. Boron-doped graphene nanoribbons: Electronic structure and Raman fingerprint. *ACS Nano* 2018, 12, 7571 – 7582.
- [12] Sun, K. W.; Silveira, O. J.; Saito, S.; Sagisaka, K.; Yamaguchi, S.; Foster, A. S.; Kawai, S. Manipulation of spin polarization in boronsubstituted graphene nanoribbons. *ACS Nano* 2022, 16, 11244 – 11250.

- [13] Cloke, R. R.; Marangoni, T.; Nguyen, G. D.; Joshi, T.; Rizzo, D. J.; Bronner, C.; Cao, T.; Louie, S. G.; Crommie, M. F.; Fischer, F. R. Site-specific substitutional boron doping of semiconducting armchair graphene nanoribbons. *J. Am. Chem. Soc.* 2015, 137, 8872 – 8875.
- [14] Blackwell, R. E.; Zhao, F. Z.; Brooks, E.; Zhu, J. M.; Piskun, I.; Wang, S. K.; Delgado, A.; Lee, Y. L.; Louie, S. G.; Fischer, F. R. Spin splitting of dopant edge state in magnetic zigzag graphene nanoribbons. *Nature* 2021, 600, 647 – 652.
- [15] Cao, Y.; Qi, J.; Zhang, Y. F.; Huang, L.; Zheng, Q.; Lin, X.; Cheng, Z. H.; Zhang, Y. Y.; Feng, X. L.; Du, S. X. et al. Tuning the morphology of chevron-type graphene nanoribbons by choice of annealing temperature. *Nano Res.* 2018, 11, 6190 – 6196.
- [16] Liu, X. M.; Li, G.; Lipatov, A.; Sun, T.; Mehdi Pour, M.; Aluru, N. R.; Lyding, J. W.; Sinitskii, A. Chevron-type graphene nanoribbons with a reduced energy band gap: Solution synthesis, scanning tunneling microscopy, and electrical characterization. *Nano Res.* 2020, 13, 1713 – 1722.
- [17] Cai, J. M.; Pignedoli, C. A.; Talirz, L.; Ruffieux, P.; Söde, H.; Liang, L. B.; Meunier, V.; Berger, R.; Li, R. J.; Feng, X. L. et al. Graphene nanoribbon heterojunctions. *Nat. Nanotechnol.* 2014, 9, 896 – 900.
- [18] Pawlak, R.; Liu, X. S.; Ninova, S.; D’Astolfo, P.; Drechsel, C.; Sangtarash, S.; Häner, R.; Decurtins, S.; Sadeghi, H.; Lambert, C. J. et al. Bottom – up synthesis of nitrogen-doped porous graphene nanoribbons. *J. Am. Chem. Soc.* 2020, 142, 12568 – 12573.
- [19] Wen, E. C. H.; Jacobse, P. H.; Jiang, J. W.; Wang, Z. Y.; McCurdy, R. D.; Louie, S. G.; Crommie, M. F.; Fischer, F. R. Magnetic interactions in substitutional core-doped graphene nanoribbons. *J. Am. Chem. Soc.* 2022, 144, 13696 – 13703.
- [20] Kawai, S.; Saito, S.; Osumi, S.; Yamaguchi, S.; Foster, A. S.; Spijker, P.; Meyer, E. Atomically controlled substitutional borondoping of graphene nanoribbons. *Nat. Commun.* 2015, 6, 8098.
- [21] Yang, H.; Gao, Y. X.; Niu, W. H.; Chang, X.; Huang, L.; Liu, J. Z.; Mai, Y.; Feng, X. L.; Du, S. X.; Gao, H. J. Fabrication of sulfurdoped cove-edged graphene nanoribbons on Au (111). *Chin. Phys. B* 2021, 30, 077306.
- [22] Nguyen, G. D.; Toma, F. M.; Cao, T.; Pedramrazi, Z.; Chen, C.; Rizzo, D. J.; Joshi, T.; Bronner, C.; Chen, Y. C.; Favaro, M. et al. Bottom – up synthesis of N = 13 sulfur-doped graphene nanoribbons. *J. Phys. Chem. C* 2016, 120, 2684 – 2687.
- [23] Chen, Y. C.; Cao, T.; Chen, C.; Pedramrazi, Z.; Haberer, D.; De Oteyza, D. G.; Fischer, F. R.; Louie, S. G.; Crommie, M. F. Molecular bandgap engineering of bottom – up synthesized graphene nanoribbon heterojunctions. *Nat. Nanotechnol.* 2015, 10, 156 – 160.
- [24] Senkovskiy, B. V.; Nenashev, A. V.; Alavi, S. K.; Falke, Y.; Hell, M.; Bampoulis, P.; Rybkovskiy, D. V.; Usachov, D. Y.; Fedorov, A. V.; Chernov, A. I. et al. Tunneling current modulation in atomically precise graphene nanoribbon heterojunctions. *Nat. Commun.* 2021, 12, 2542.
- [25] Rizzo, D. J.; Wu, M.; Tsai, H. Z.; Marangoni, T.; Durr, R. A.; Omrani, A. A.; Liou, F.; Bronner, C.; Joshi, T.; Nguyen, G. D. et al. Length-dependent evolution of type II heterojunctions in bottom – upsynthesized graphene nanoribbons. *Nano Lett.* 2019, 19, 3221 – 3228.
- [26] Nguyen, G. D.; Tsai, H. Z.; Omrani, A. A.; Marangoni, T.; Wu, M.; Rizzo, D. J.; Rodgers, G. F.; Cloke, R. R.; Durr, R. A.; Sakai, Y. et al. Atomically precise graphene nanoribbon heterojunctions from a single molecular precursor. *Nat. Nanotechnol.* 2017, 12, 1077 – 1082.

- [27] Li, J. C.; Sanz, S.; Merino-Díez, N.; Vilas-Varela, M.; Garcia-Lekue, A.; Corso, M.; De Oteyza, D. G.; Frederiksen, T.; Peña, D.; Pascual, J. I. Topological phase transition in chiral graphene nanoribbons: From edge bands to end states. *Nat. Commun.* 2021, 12, 5538. Guo, G. P.; Lin, Z. R.; Tu, T.; Cao, G.; Li, X. P.; Guo, G. C. Quantum computation with graphene nanoribbon. *New J. Phys.* 2009, 11, 123005.
- [29] Luis, F.; Coronado, E. Spinning on the edge of graphene. *Nature* 2018, 557, 645 – 647.
- [30] Mandal, B.; Sarkar, S.; Pramanik, A.; Sarkar, P. Doped defective graphene nanoribbons: A new class of materials with novel spin filtering properties. *RSC Adv.* 2014, 4, 49946 – 49952.
- [31] Berdonces-Layunta, A.; Lawrence, J.; Edalatmanesh, S.; CastroEsteban, J.; Wang, T.; Mohammed, M. S. G.; Colazzo, L.; Peña, D.; Jelínek, P.; De Oteyza, D. G. Chemical stability of (3,1)-chiral graphene nanoribbons. *ACS Nano* 2021, 15, 5610 – 5617.
- [32] Lawrence, J.; Berdonces-Layunta, A.; Edalatmanesh, S.; CastroEsteban, J.; Wang, T.; Jimenez-Martin, A.; De La Torre, B.; Castrillo-Bodero, R.; Angulo-Portugal, P.; Mohammed, M. S. G. et al. Circumventing the stability problems of graphene nanoribbon zigzag edges. *Nat. Chem.* 2022, 14, 1451 – 1458.
- [33] Fu, Y. B.; Yang, H.; Gao, Y. X.; Huang, L.; Berger, R.; Liu, J. Z.; Lu, H. L.; Cheng, Z. H.; Du, S. X.; Gao, H. J. et al. On-surface synthesis of NBN-doped zigzag-edged graphene nanoribbons. *Angew. Chem., Int. Ed.* 2020, 132, 8958 – 8964.
- [34] Fu, Y. B.; Chang, X.; Yang, H.; Dmitrieva, E.; Gao, Y. X.; Ma, J.; Huang, L.; Liu, J. Z.; Lu, H. L.; Cheng, Z. H. et al. NBN-doped bistetracene and peri-tetracene: Synthesis and characterization. *Angew. Chem., Int. Ed.* 2021, 60, 26115 – 26121.
- [35] Wang, X. Y.; Zhang, F.; Schellhammer, K. S.; Machata, P.; Ortmann, F.; Cuniberti, G.; Fu, Y. B.; Hunger, J.; Tang, R. Z.; Popov, A. A. et al. Synthesis of NBN-type zigzag-edged polycyclic aromatic hydrocarbons: 1,9-Diaza-9a-boraphenalene as a structural motif. *J. Am. Chem. Soc.* 2016, 138, 11606 – 11615.
- [36] Mao, J. H.; Huang, L.; Pan, Y.; Gao, M.; He, J. F.; Zhou, H. T.; Guo, H. M.; Tian, Y.; Zou, Q.; Zhang, L. Z. et al. Silicon layer intercalation of centimeter-scale, epitaxially grown monolayer graphene on Ru (0001). *Appl. Phys. Lett.* 2012, 100, 093101.
- [37] Li, G.; Zhou, H. T.; Pan, L. D.; Zhang, Y.; Huang, L.; Xu, W. Y.; Du, S. X.; Ouyang, M.; Ferrari, A. C.; Gao, H. J. Role of cooperative interactions in the intercalation of heteroatoms between graphene and a metal substrate. *J. Am. Chem. Soc.* 2015, 137, 7099 – 7103.
- [38] Guo, H.; Wang, X. Y.; Huang, L.; Jin, X.; Yang, Z. Z.; Zhou, Z.; Hu, H.; Zhang, Y. Y.; Lu, H. L.; Zhang, Q. H. et al. Insulating SiO₂ under centimeter-scale, single-crystal graphene enables electronic device fabrication. *Nano Lett.* 2020, 20, 8584 – 8591.
- [39] Deniz, O.; Sánchez-Sánchez, C.; Dumsloff, T.; Feng, X. L.; Narita, A.; Müllen, K.; Kharche, N.; Meunier, V.; Fasel, R.; Ruffieux, P. Revealing the electronic structure of silicon intercalated armchair graphene nanoribbons by scanning tunneling spectroscopy. *Nano Lett.* 2017, 17, 2197 – 2203.

E 电子材料与器件、真空微纳电子学
分会张贴报告

基于喷墨印刷有机薄膜晶体管的压力传感器应用

王晓冬* 刘正峰¹

*东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819

¹东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819

*Email: zhengfengliu2021@163.com

摘要: 传统的电子探测器满足了高能检测技术的关键要求, 它在亚毫秒级时间尺度上提供精确的定时控制。然而, 这些检测器价格昂贵, 并且涉及在高电压下工作的组件, 很容易因意外短路或电磁干扰引起的误触而发生故障^[1,2]。相比之下, 物理传输保险丝更坚固, 不受电磁干扰, 有机薄膜晶体管 (OTFT) 是一种很有前途的低成本途径可用于制造传感器^[3]。可使用高速印刷技术在低成本的柔性基材上制造, 低成本制造的潜力使这种有机电子设备非常适合一次性使用, 如: 用于葡萄糖检测、酶识别元件、生物传感器等^[4-6]。

本次报告即通过电话性有机半导体材料的喷墨打印, 制备的高灵敏度压力检测器。系统介绍 OTFT 加工器件集成、器件结构和原理性验证。具体包括: (1) 工作原理: 压力脉冲信号可以使用量子隧穿复合 (QTC) 材料耦合到电子元件。在对复合材料施加压力时, 柔性基质会压缩, 并且可以通过导电组分之间电子的量子隧穿获得高电导率。(2) 微纳加工: 基准测试的 QTC 压敏样品, 在铸造过程中将导电银纳米颗粒分散其中将制备好的 QTC 样品溶液浇注到集成的 OTFT 传感器中。(3) 实验性验证: 经过优化的印刷器件在施加低压时, 可在极低的源漏电压 (0~5 V) 下工作, 从而实现从非导电状态到导电状态的快速切换^[3]。虽然这种也存在电磁干扰的相关风险, 但薄膜晶体管 (TFT) 将电压信号切换为放大的电流输出信号 (开关比约为 10^2), 比感应电流输出更容易受到电压输出的影响, 电磁干扰风险被抵消。

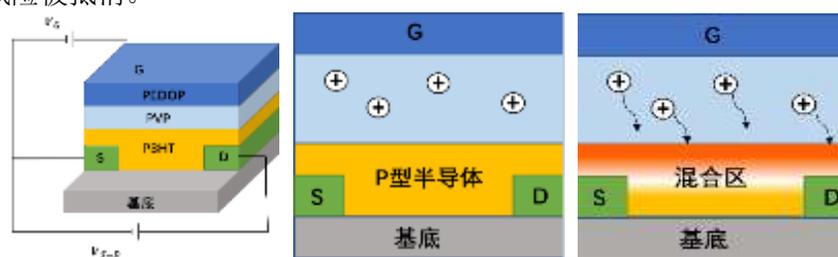


Fig 1 (a) Schematic diagram of the organic thin film transistor (OTFT) structure. (b) without any applied bias, and (c) the movement of protons to dope the p-type P3HT channel upon application of a gate voltage.

关键词: 超高真空, 喷墨印刷, 有机电子, 压力传感器, 晶体管

参考文献:

[1] Matthew J G, Nathan A C, Ben V, et al. Combining Printing, Coating, and Vacuum Deposition on the Roll-to-Roll Scale: A Hybrid Organic Photovoltaics Fabrication[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016,22(1).

- [2] Griffith M J, Holmes N P, Elkington D C, et al. Manipulating nanoscale structure to control functionality in printed organic photovoltaic, transistor and bioelectronic devices.[J]. Nanotechnology, 2020,31(9).
- [3] Griffith M J, Cooling N A, Elkington D C, et al. Controlling Nanostructure in Inkjet Printed Organic Transistors for Pressure Sensing Applications.[J]. Nanomaterials (Basel, Switzerland), 2021,11(5).
- [4] Kergoat L, Piro B, Berggren M, et al. Advances in organic transistor-based biosensors: from organic electrochemical transistors to electrolyte-gated organic field-effect transistors[J]. Anal Bioanal Chem, 2012,402(5):1813-1826.
- [5] Lee M Y, Lee H R, Park C H, et al. Organic Transistor-Based Chemical Sensors for Wearable Bioelectronics[J]. Acc Chem Res, 2018,51(11):2829-2838.
- [6] Elkington D, Wasson M, Belcher W, et al. Printable organic thin film transistors for glucose detection incorporating inkjet-printing of the enzyme recognition element[J]. Applied physics letters, 2015,106(26).

一种长寿命 $\text{La}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ 直热式阴极的研究

王兴起^{1,2*} 王小霞¹ 罗积润¹ 李云¹

¹ 中国科学院空天信息创新研究院, 北京, 邮编 101407;

² 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京, 邮编 100049

*Email: 15650703108@163.com

摘要: 随着微波电真空电子器件在通讯、工业加热、医疗诊断等军事、民用领域中应用越来越广泛, 对器件的性能要求也越来越高。例如应用于微波加热的连续波磁控管不断地向高功率、长寿命、宽频带的方向发展^[1,2], 医疗 CT 的关键部件球管同样向高可靠、长寿命的方向发展^[3]。这类器件工作真空度低且需耐电子离子轰击能力强, 电子发射源一般采用钨丝阴极。然而, 纯钨丝阴极发射效率低, 大电流工作时阴极温度高, 很难满足上述要求。

本文首次采用 La_2O_3 , Gd_2O_3 和 HfO_2 作为发射活性物质制备一种 $\text{La}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ 阴极, 以期提高直热式阴极的发射效率, 从而延长阴极的使用寿命。初期测试热发射结果显示, 该阴极在1300,1350,1400,1450,1500,1550,1600°C工作温度下, 饱和发射电流密度分别为0.3,0.5, 0.9,1.7,2.7,4.3,5.5A/cm², 工作温度比纯W丝阴极低500°C以上。阴极寿命测试结果(如图1)表明, 该阴极在1500°C、直流负载0.65A/cm²的条件下, 已稳定工作10656h。初步机理分析认为该阴极在高温激活老炼过程中, 发射活性物质晶格中生成缺氧型的 $\text{LaO}_x(x<1.5)$ ^[4], 同时, 加速氧空位的生成, 增强阴极表面的电导率, 提高阴极的热发射能力^[5]。

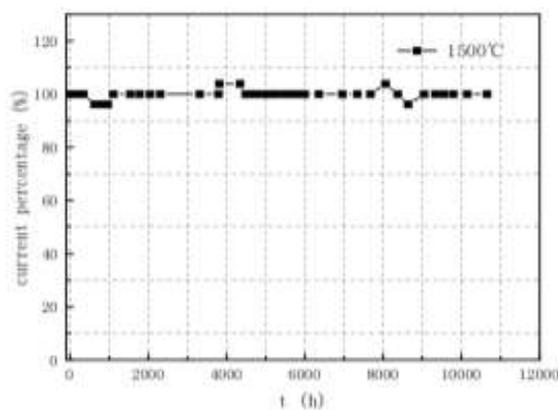


图 1 阴极寿命测试曲线

关键词：高温阴极，热发射，寿命，氧空位

参考文献：

- [1] T.Xun, Y.Zhao, H.Yang, T.Hu, and H.Zhong, "Developments of Pulsed Electron Beam Sources for High-Power Microwave Applications", *IEEE Access*8,101351-101358(2020).
- [2] 王兴起,王小霞,罗积润,漆世锴,李云,"一种Sc2O3掺杂Y-Gd-Hf-O压制式直热式阴极发射特性研究",*电子与信息学报*44,1382-1387(2021).
- [3] 石灵,张富治,王瑞海,王宇红.真空电子技术,"医用CT球管国内外现状及发展趋势",2,5(2018).
- [4] 聂祚仁,左铁铺,周美玲,王亦曼,王金淑,张久兴,"Mo-La2O3模拟阴极的高温XPS/AES研究II.激活过程中La的变化及对发射的影响",*中国稀土学报*4,342-346(1999).
- [5] 漆世锴,王小霞,王兴起,胡明玮,刘理,曾伟,"大功率磁控管用新型 Y2Hf2O7 陶瓷阴极研究",*物理学报*69,270-279(2020).

氧化铝钝化超薄 ITO 场效应晶体管电学性能研究

曹天凡^{1,2} 黎家兵^{1,2} 高庆国^{1,2*}

¹电子科技大学中山学院电子信息学院, 广东中山, 邮编 528402;

²电子薄膜与集成器件国家重点实验室中山分室, 广东中山, 邮编 528402

*Email: gqgemw@163.com

摘要：近些年，超薄氧化铟锡(ITO)因其优异的电学性能，如超低的关态电流密度和超短的沟道缩放潜力，在后摩尔时代超短沟道晶体管研制和应用于 3D 集成的 BEOL 兼容晶体管中展现出巨大应用潜力^[1, 2]。研究发现，氧化铝钝化处理是提升氧化物场效应晶体管电学性能的有效手段^[3, 4]。在本文中，我们对氧化铝钝化超薄 ITO 场效应晶体管电学性能进行了研究，发现氧化铝钝化可以大幅提升 ITO TFT 的场效应迁移率。与钝化前相比，氧化铝钝化 ITO 晶体管，场效应迁移率由 32 cm²/V s 提高到了 178 cm²/V s，电流开/关比由 4.1×10³ 提高到了 4.4×10⁸。同时，本文对氧化铝钝化前后 ITO 晶体管老化现象进行了研究。在空气中放置 10 天后，无氧化铝覆盖的 ITO TFT，迁移率由 32 cm²/V 提高到了 121 cm²/V s，电流开/关比由 4.1×10³ 提高上升到了 4×10⁶ 并且阈值电压由 -13 V 正向移动到了 1.7 V。阈值电压的正偏移可能是由于氧分子在反向通道上的吸附所致，同时氧缺陷的减

少使迁移率有了显著提升。在空气中放置 10 天后,氧化铝钝化的 ITO TFT,迁移率由 $178 \text{ cm}^2/\text{V s}$ 减少到 $135 \text{ cm}^2/\text{V s}$, 电流开/关比由 4.4×10^8 下降到了 9×10^6 和阈值电压由 8.9 V 负向移动到 4.2 V 。这与无 Al_2O_3 覆盖的器件有着相反的老化趋势,需要进一步讨论。本文对氧化铝钝化 ITO 场效应晶体管进行了研究,相关研究结果为后摩尔时代新型信息器件研究和发展提供科技支撑。

关键词: 氧化铟锡; 场效应晶体; 场效应迁移率; 氧化铝钝化; 可靠性;

参考文献:

- [1] S. Li *et al.*, "Nanometre-thin indium tin oxide for advanced high-performance electronics," *Nat. Mater.*, vol. 18, no. 10, pp. 1091-1097, 2019.
- [2] M. Si *et al.*, "Indium-tin-oxide transistors with one nanometer thick channel and ferroelectric gating," *ACS Nano*, vol. 14, no. 9, pp. 11542-11547, 2020.
- [3] S. Hu *et al.*, "High mobility amorphous indium-gallium-zinc-oxide thin-film transistor by aluminum oxide passivation layer," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 38, no. 7, pp. 879-882, 2017.
- [4] X. Wang *et al.*, "Huge mobility enhancement of InSnZnO thin-film transistors via Al-induced microstructure regularization," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 119, no. 21, p. 212102, 2021.

Ka 波段大功率宽带行波管耦合腔慢波结构研究

陈天培、季大习、令狐昌刚、陈扬*

南京三乐集团有限公司 江苏南京 211800

*Email: 648645317@qq.com

摘要: Ka 波段大功率宽带耦合腔行波管作为末级功率放大器,是 MMW 雷达的核心器件。宽带大功率功率源的性能是限制其发展的主要因素之一,行波管作为一种宽频带大功率器件是其功率源的首选。本文介绍了一种基于休斯结构耦合腔慢波电路的优化的 Ka 波段大功率宽带行波管耦合腔慢波电路,实现满足项目指标要求的仿真设计结果,通过对慢波电路的优化设计实现了 Ka 波段脉冲输出功率大于 15kW 、工作带宽大于 4GHz 。

超薄氧化铟锡场效应晶体管真空退火性能研究

黎家兵^{1,2} 曹天凡^{1,2} 高庆国^{1,2*}

¹电子科技大学中山学院电子信息学院,广东中山,邮编 528402;

²电子薄膜与集成器件国家重点实验室中山分室,广东中山,邮编 528402

*Email: gqgemw@163.com

摘要: 近些年, 纳米厚超薄氧化铟锡场效应晶体管因其在超短沟道晶体管领域的应用潜力引起了广泛的关注^[1,2]。本文采用射频磁控溅射法制备了 4 nm 厚的超薄氧化铟锡(ITO)薄膜, 并制备了底栅型薄膜晶体管 (BG TFT), 我们对制备的晶体管采用真空退火处理。发现随着退火温度由 170 °C 升高至 210 °C, 晶体管由半导体特性逐渐转变为导体特性, 开关比逐渐下降, 阈值电压负向移动, 迁移率先上升后下降, 在 200 °C 退火时迁移率达到最大值 58.9 cm²/V s。在 200 °C 退火条件下, 研究了不同退火时间对晶体管性能的影响, 发现随着退火时间的增加 (5 min~20 min), 器件的迁移率逐渐增大, 阈值电压负向移动, 开关比逐渐减小。主要原因是真空退火导致 ITO 薄膜氧空位的增多, 进而产生过量的载流子, 使得器件的阈值电压负向移动, 开关比减小。并且由于 Sn⁴⁺和 In³⁺阳离子的 5s 轨道之间的协同嵌入提供了有效的渗流传导路径, 导致有效电子质量较低, 载流子迁移率随着载流子浓度的增加而增加^[3,4]。

关键词: 氧化铟锡; 薄膜晶体管; 真空退火;

参考文献:

- [1] S. Li *et al.*, "Nanometre-thin indium tin oxide for advanced high-performance electronics," *Nat. Mater.*, vol. 18, no. 10, pp. 1091-1097, 2019/10/01 2019.
- [2] M. Si *et al.*, "Indium-tin-oxide transistors with one nanometer thick channel and ferroelectric gating," *ACS Nano*, vol. 14, no. 9, pp. 11542-11547, 2020/09/22 2020.
- [3] N. On *et al.*, "Boosting carrier mobility and stability in indium-zinc-tin oxide thin-film transistors through controlled crystallization," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 18868, 2020/11/02 2020.
- [4] T. Kamiya, K. Nomura, and H. Hosono, "Origin of definite Hall voltage and positive slope in mobility-donor density relation in disordered oxide semiconductors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 12, p. 122103, 2010/03/22 2010.

Ka 波段千瓦级宽带大功率脉冲行波管的研制

周朝阳* 孙萌 邹雯婧 胥辉 季大习 刘逸群

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 毫米波行波管在雷达、电子对抗及通信等电子装备中发挥着日益重要的作用。本文介绍了一种研制的 Ka 波段 1KW 脉冲行波管, 最大工作带宽可达 8GHz, 占空比 25%, 工作电压 18.8KV, 工作电流 325mA, 饱和增益 38dB, 效率 40% 以上。重点介绍高流通电子枪和高效慢波电路设计, 解决了大功率螺旋线行波管返波振荡抑制技术。产品填补了国内 Ka 波段千瓦级宽带放大器的空白, 技术指标达到国际先进水平。

关键词: Ka 波段, 1kW 脉冲输出功率, 宽带, 返波振荡

参考文献

- [1]官朝晖.行波管技术现状与发展趋势, 真空电子技术; 2011, NO.6:41-43.
- [2]David Chernin, Thomas M. Antonsen, Jr., Member, IEEE, and Baruch Levush, Fellow, IEEE, “Power Holes” and Nonlinear Forward and Backward Wave Gain Competition in Helix Traveling-Wave Tubes”, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, no.12, pp.2540-2547, December 2003
- [3]郭开周.行波管研制技术 P166-167
- [4]微波管模拟器套装 2011, 电子科技大学, 2011.

6~18GHz 大功率脉冲行波管研制

许淮^{1*} 王源¹ 贺小平¹ 杨洪焱¹ 胥辉¹ 邹雯婧¹ 季大习¹ 梁田¹ 张春晖¹ 吴刚雄²

¹ 南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

² 电子科技大学 电子科学与工程学院 微波电真空器件国家重点实验室, 邮编 610054

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 本文介绍了南京三乐集团有限公司研发的一种 6GHz~18GHz 大功率脉冲行波管, 重点介绍了研制过程中针对于大功率实现及返波振荡技术难点的分析与解决方法, 最终实现在 C-X-Ku 频带范围内脉冲输出功率 $\geq 5\text{kW}$ (6~17GHz)、 $\geq 4\text{kW}$ (17~18GHz), 平均功率大于 250W 的行波管样管研制。

关键词: 6-18GHz, 大功率, 返波振荡, 行波管

参考文献:

- [1] C. K. Chong, D. A. Layman, R. H. Martin, W. L. McGeary, W. L. Menninger, M. L. Ramay, N. R. Robbins, X. I. Zhai, “1.5-kW DBS-band and 2.0-kW Ku-band helix TWTs for direct broadcast satellite uplink applications,” in Proc. IEEE Int. Vacuum Electron. Conf. (IVEC), Apr. 2016, pp. 1–2.
- [2] M. K. Alaria, A. Bera, R. K. Sharma, and V. Srivastava, “Design and development of helix slow-wave structure for Ku-band TWT,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 39, no. 1, pp. 550–554, Jan. 2011.
- [3] A. Fan, Y. Xue, W. Li, and S. Chang, “Design of coating on helix for high-power traveling wave tube,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 44, no. 12, pp. 3471–3473, Dec. 2016.
- [4] G. X. Wu, H. R. Yin, Z. Xu, R. C. Yang, X. Lei, Q. Li, L. N. Yue, G. Q. Zhao, S. P. Gun. and Y. Y. Wei, “Design and Experimental Measurement of Input and Output Couplers for a 6–18-GHz High-Power Helix Traveling Wave Tube Amplifier,” IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(4):1826-1831.
- [5] G. X. Wu, H. R. Yin, Z. Xu, R. C. Yang, X. Lei, Q. Li, S. Z. Fang, L. N. Yue, J. Xu, G. Q. Zhao, W. X. Wang, and Y. Y. Wei, “Design of a Pseudoperiodic Slow Wave Structure for a 6-kW-Level Broadband Helix Traveling-Wave Tube Amplifier,” IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(6):1910-1916.
- [6] 电子管设计手册编辑委员会. 中小功率行波管设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社.

Ka 频段 170W 空间行波管输出输能系统设计

张颖* 孙萌 何金梅 胥辉 陈平 刘颖博

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 本文通过电磁仿真软件建立了一种适用于 Ka 频段 170W 空间行波管的输出输能系统模型, 仿真计算设计并优化了该系统的尺寸结构参数, 实现了一种适用于空间环境的小型化盒型窗结构的输能系统设计。通过实测结果验证了该设计方案能够有效降低带内冷驻波指标, 提高输能系统的稳定性。

关键词: 输出窗, 空间行波管, 电磁仿真, 驻波比

参考文献

- [1] A.S.Gilmour,Jr. Klystrons,Traveling Wave Tubes,Magnetrons,Crossed-Field Amplifiers,and Gyrotrons[M].National Defense Industry Press
- [2] 郭开周.行波管研制技术[M].电子工业出版社, 2008

Ka 频段行波管高频仿真与冷测对比研究

季大习* 黄万超 王玉蓉 令狐昌刚 王大明 胥辉

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 本文研究了 Ka 频段耦合腔行波管高频慢波电路的仿真与工程测试冷特性验证方法, 通过工程计算、仿真设计、冷测等手段, 实测了 Ka 频段宽带耦合腔高频电路的色散特性, 采用缩尺法设计放大到 C 频段以更精确的进行冷测试验和对比验证, 为毫米波行波管产品研制改进及更高频率的耦合腔行波管高频电路设计提供了思路和研究方法。

关键词: Ka 频段, 大功率, 宽带高频电路, 耦合腔

参考文献:

- [1] 王文祥. 真空电子器件[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012, 1-10
- [2] 廖复疆.真空电子技术:信息化武器装备的心脏[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008, 1-55
- [3] 电子管设计手册编辑委员会. 中小功率行波管设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979, 211-217

- [4] 张晓冉. X 波段脉冲 900W 空间行波管宽带高效率技术研究[C].中国电子学会真空电子学会第二十一届学术年会论文集, 2018, 平凉

Ka 频段 200W 行波管高效率样管研制

何金梅* 王源 孙萌 刘颖博 张颖 胥辉 季大习 刘逸群

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: Ka 频段 200W 辐冷型空间行波管是未来 Ka 频段通信链路下行末级射频功放的关键器件。其高输出功率、宽频带及辐冷型散热加大了研制难度。本文针对该类型产品研制的难点, 给出了在 2GHz 带宽内输出功率大于 203.3W、频带内效率大于 66.6%、非线性相移低于 43° 的设计方案, 并通过装管实测结果验证了该方案的可行性。

关键词: Ka 频段, 宽频带, 大功率, 辐冷行波管

参考文献

- [1] “中小功率行波管设计手册”, 1977
[2] A.S.吉尔默著.行波管原理
[3] JE 罗埃著.电子与波的非线性相互作用
[4] S.Raina,A k Agrawal,M V Kumar,et al.Design of a K-Ka band helix TWT,IEEE International Vacuum Electronics Conference IEEE Computer Society,2011

钡钨阴极用高性能铝酸盐发射活性物质的研究

范亚松* 马静 赵请 郇琮 王源 梁田 邹雯婧

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

Abstract: Millimeter-wave high power devices demand long life and high current density for cathodes. As the electron emitting material of dispenser cathode, the active composition ratio of the barium-calcium-aluminates directly affects the emissivity and lifetime of the cathodes. In this paper, the sol-gel method was used to precisely adjust the ratio of the barium-calcium-aluminates, and the water cooled anode diode was used as performance test carrier to study the effects of excess BaO and CaO on the cathode emission

properties and lifetime reliability. The experimental results show that BaO:CaO:Al₂O₃=4:1:0.6 aluminate has a strong emission capability, working temperature 1050 °C, the inflection point emission current density reached $J_0=52.2\text{A}/\text{cm}^2$, $K=1.39$; under $(1.2\sim 1.5)\times 10^{-5}\text{Pa}$ vacuum conditions, the current density of working load at 3 A/cm², working life is 15400h, emission fell 5.9%, and the current density of working load at 11 A/cm², working life 3500h, emission fell 4.2%. The dispenser cathode prepared by high performance barium-calcium-aluminates can meet the application requirements of millimeter wave kW pulsed traveling wave tube.

摘要: 毫米波大功率器件对阴极提出了长寿命、大电流密度需求。铝酸盐作为钡钨阴极的电子发射材料,其活性物质成分配比直接影响阴极的电子发射能力、寿命可靠性。本文采用溶胶凝胶法精确调整铝酸盐活性物质配比,并以水冷阳极玻璃二极管为性能测试载体,研究过量 BaO/CaO 对阴极发射性能、寿命可靠性的影响。试验结果显示:溶胶凝胶法制备的 BaO:CaO:Al₂O₃=4:1:0.6 盐发射能力强,工作温度 1050°C,拐点电流发射密度达到最大值 $J_0=52.2\text{A}/\text{cm}^2$, $K=1.39$;在 $(1.2\sim 1.5)\times 10^{-5}\text{Pa}$ 条件下,阴极寿命可靠性较好,支取 11 A/cm²,稳定运行 3500h,发射电流下跌 4.2%;支取 3 A/cm²,稳定运行 15400h,发射电流下跌 5.9%;高性能铝酸盐发射活性物质制备的钡钨阴极可满足毫米波大功率脉冲行波管应用需求。

关键词: 钡钨阴极, 铝酸盐, 大电流密度, 长寿命

参考文献

- [1] 廖复疆, 大功率微波真空电子学术技术进展[J]. 电子学报, 2006, 3139 (3): 513-516.
- [2] Microsystems Technology Office, DARPA -BAA-15-40, "Broad Agency Announcement, Innovative Vacuum Electronics Science and Technology (INVEST)", August 11, 2015; BAA-15-50 "High power Amplifier using Vacuum electronics for Overmatch Capability (HAVOC)".
- [3] Peter N John Q, Grant S. Special Technology Area Review on Vacuum Electronics Technology for RF application. U S advisory group on electron devices, 2002.
- [4] J.L.Cronin. Modern dispenser cathode, IEEE Proc, 128(1) (1981) 19-32.
- [5] R.Forman. Surface studies of barium and barium oxide on tungsten and its application to understanding the mechanism of operation of an impregnated tungsten cathode.[J]Journal of applied physics 47, (1976) 5272-5279.
- [6] J J Farrell, S Conkwright, The effect of Chemical on Impregnant Removal as a Function of Impregnant Type[J]2004, IEEE.
- [7] 范亚松, 无机溶胶凝胶法制备铝酸盐对钡钨阴极性能的影响研究[J]. 真空电子技术 2021, 351 (2), 63-66.

单晶金刚石在 3mm 宽频带行波管微波窗中的应用

任重* 梁田 宋泽纯 胥辉 黄鹏潮 王鹏鹏 夏同川

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 本文基于 3mm 宽频带行波管微波窗对低损耗以及封接可靠性要求, 开展了单晶金刚石的应用性工艺研究, 并采用微焦点工业 CT、SEM、EDS 等分析手段, 对其封接质量予以评价。

关键词: 行波管, 单晶金刚石, 宽频带, 可靠性

参考文献

- [1] 高陇桥.陶瓷-金属封接材料实用封接技术[M].化学工业出版社, 2017.7: 33-34.
- [2] 梁田, 高志强, 杨磊, 等.W 波段行波管用金刚石微波窗封接工艺及机理研究[J].真空电子技术, 2015.

间热式阴极热子组件温度一致性研究

赵请* 武元元 马静 范亚松 胡文景 张毅

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 对间热丝阴极热子组件分别从影响热阻组件温度的各因素、发射体与阴极筒配合以及焊接情况等方面进行温度一致性的研究, 从而识别出热子组件各因素对温度的影响权重以及阴极筒与发射体的最佳配合尺寸, 通过各因素的控制, 使得阴极热子组件的温度波动缩小至 $\pm 12^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 间热式, 阴极热子组件, 温度一致性

参考文献:

- [1] 刘学恂, 阴极电子学[M].北京: 科学出版社, 1980: 1-105.
- [2] 刘冬梅. 阴极热丝组件一致性研究, 电子科技大学硕士学位论文, 2010: 43-47.
- [3] 胡太康.微波管阴极热子热特性分析,中古科学院硕士学位论文, 2007: 5-50.
- [4] 孟鸣凤, 俞世吉等.行波管阴极热子组件结构的热分析[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29 (5): 513-516.
- [5] 张明晨,张洪来等.阴极-热子组件加热功率的研究[J]. 真空电子技术, 2006, (2): 13-14.

空间行波管用小尺寸隔板式阴极组件结构设计和工艺研究

马静* 赵请 胡文景 范亚松 梁田 李强

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 本文通过对某阴极组件发射体结构设计、曲面尺寸设计、发射体与阴极筒尺寸控制、焊接工艺研究, 提高热子组件的热传导, 降低加热功率, 提升其可靠性; 有效减少车削阴产生的应力, 解决了阴极边缘破损问题, 提高阴极发射稳定性与组件的可靠性。

关键词: 空间行波管, 阴极组件, 结构设计, 可靠性

参考文献:

- [1] 孙小菡, 樊鹤红等。微波管阴极可靠性试验数据处理与寿命分析,
- [2] 李伟, 许昆等。阴极组件钎焊用 RUB 合金焊料研制, 焊接, 2011 年第 3 期。

钼铜合金在 Ka 波段行波管磁屏组件焊接中的应用

任重¹* 盛思佳² 杨梦瑶¹ 梁田¹ 刘洋¹

¹ 南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

² 陆装驻南京地区第一军事代表室, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 本文基于 Ka 波段行波管高可靠、小型化以及高强度方向发展需要, 为解决磁屏组件中的漂移管形变而带来的电子注形状偏转问题, 采用钼铜合金代替无氧铜, 开展了应用性焊接与验证试验, 经验证钎焊的磁屏组件气密性、强度以及微观形貌均满足行波管可靠性要求。

关键词: 行波管, 漂移管, 钎焊, 钼铜合金

千瓦级大功率毫米波耦合行波管的研究

李新义* 季大习 陈天培 黄万超 胥辉 王玉蓉

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 本文研究了构成千瓦级大功率毫米波耦合腔行波管的主要部件慢波系统、电子光学系统

和输能窗，通过理论仿真并结合我厂大功率器件工艺基础，设计了短管试验的装配结构，以期实现 42000V、2.5A、半径 0.4mm 的圆形电子注的稳定传输、在规定频带内测到的符合设计要求的千瓦级大功率微波输出功率，进而验证各部件的设计符合度，并为后续宽频带大功率行波管样管的研制积累设计和工艺经验。

关键词：毫米波，大功率，行波管，慢波系统，耦合腔

参考文献：

- [1]王文祥. 真空电子器件[M]. 北京：国防工业出版社，2012，1-10
- [2]廖复疆.真空电子技术:信息化武器装备的心脏[M]. 北京：国防工业出版社，2008，1-55
- [3]甘体国.毫米波工程[M].成都:电子科技大学出版社, 2006,1-289
- [4]王琪. Ka 波段 5kW 耦合腔行波管关键技术研究[D]. 成都：电子科技大学，2019，1-8
- [5]电子管设计手册编辑委员会. 中小功率行波管设计手册[M]. 北京：国防工业出版社，1979，211-217

卫星通信地面站大功率高效率 C 波段螺旋线行波管的研究

刘逸群* 张晓冉 姚会香 沈勇 李新义 胥辉 黄鹏潮 田航 綦伟玲 吴亚琴 邹雯婧

南京三乐集团有限公司，江苏南京，邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要：本文研究了构成卫星通信地面站大功率高效率 C 波段螺旋线行波管的主要部件，如电子枪、慢波系统、两级降压收集极和输能窗，通过理论分析和仿真设计并结合我公司大功率螺旋线行波管工艺基础，设计了该管的整管结构，以实现 C 波段、800MHz 带宽、连续波 2250W 输出功率、40%总效率样管的研制，进而验证各部件的设计符合度，并为后续该产品的研制和投产积累设计和工艺经验。

关键词：卫星通信地面站，C 波段 2250W，行波管，高效率

参考文献：

- [1] 王文祥. 真空电子器件[M]. 北京：国防工业出版社，2012，1-10
- [2] 廖复疆.真空电子技术:信息化武器装备的心脏[M]. 北京：国防工业出版社，2008，1-55
- [3] 电子管设计手册编辑委员会. 中小功率行波管设计手册[M]. 北京：国防工业出版社，1979，211-217
- [4] 张晓冉. X 波段脉冲 900W 空间行波管宽带高效率技术研究[C].中国电子学会真空电子学分会第二十一届学术年会论文集，2018，平凉

一种 Ku 波段慢波电路的设计

令狐昌刚* 陈天培 罗敏 黄鹏潮 田航 季大习 王大明

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 本文研究了构成千瓦级大功率耦合腔行波管的主要部件慢波系统, 通过理论仿真并结合我厂大功率器件工艺基础, 设计了慢波系统结构及其性能验证方案, 以期在 48000V 条件下在 Ku 波段 2GHz 带宽内实现 60kW 脉冲输出功率, 从而验证该部件的设计符合度, 为后续宽频带大功率行波管的研制积累设计和工艺经验。

关键词: Ku 波段、大功率、行波管、慢波系统、耦合腔

参考文献

- [1] 廖复疆.真空电子技术:信息化武器装备的心脏[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008, 1-5
- [2] 王文祥. 真空电子器件[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012, 1-10
- [3] 顾茂章, 张克潜. 微波技术. 清华大学出版社, 1989, 224-235

一种 X 波段 120kW 高流通过率、低线包功耗宽带耦合腔行波管的研制

黄万超* 刘斌 季大习 王大明 胥辉

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 百千瓦级大功率宽带行波管由于其宽频带、高峰值功率及高平均功率的特点, 需要较高的电子注流通过率及低功耗的聚焦线包来保证行波管长时间工作的稳定性。本文介绍了一种 X 波段 120kW 高流通过率、低线包功耗宽带耦合腔行波管的研制工作, 通过一系列的技术攻关, 该管在带宽、电子注流通过率、一体化线包聚焦等方面取得突破, 实测带宽 1.5GHz (相对带宽 16.5%), 脉冲输出功率大于 126kW, 平均功率大于 5kW, 静态电子注流通过率 $\geq 99.2\%$, 动态电子注流通过率 $\geq 98.1\%$, 线包功耗 $\leq 3.3\text{kW}$ 。

关键词: X 波段; 百千瓦级大功率; 宽带行波管; 高峰值功率; 电子注流通过率; 低线包功耗;

参考文献:

- [1] 字张雄.大功率行波管的现在与发展 [J].真空电子技术, 2008, (5): 58-61.
- [2] 电子管设计手册编辑委员会.微波电子管磁路设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.

星载 X 频段宽带脉冲空间行波管高匹配性输能系统的设计与验证

张晓冉* 刘逸群 王源 成红霞 刘强 黄鹏潮 罗敏

南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800

*Email: yisuo20220722@163.com

摘要: 本文针对星载 S*R 系统用 X 频段脉冲空间行波管宽带宽、低驻波比、低增益波动的要求, 对 X 频段脉冲宽带空间行波管输能系统开展高匹配特性研究。根据工程用 X 频段产品绝对带宽 3.6GHz、相对带宽 35.6%的带内低驻波比要求, 利用仿真手段开展新型结构研究, 对输能窗陶瓷尺寸及各零件关键结构、尺寸开展仿真优化, 设计出工作频带内输入冷驻波在 1.2 以内, 输出冷驻波在 1.3 以内。通过整管装配验证, 实测带内冷驻波在 1.45 以内, 饱和增益波动在 1.5dB 以内, 达到了工程使用要求。

关键词: X 频段 空间行波管 宽带宽 低驻波比

参考文献:

- [1] 安文韬. 国外星载 SAR 系统未来计划及发展趋势[J].中国遥感应用协会, 2011
- [2] 樊会明, 肖刘, 李莉, 等. 空间行波管耦合结构的设计[J].真空电子技术, 2006, (5): 1-3
- [3] 电子管设计手册编辑委员会. 中小功率行波管设计手册[M]. 1976: 122-174

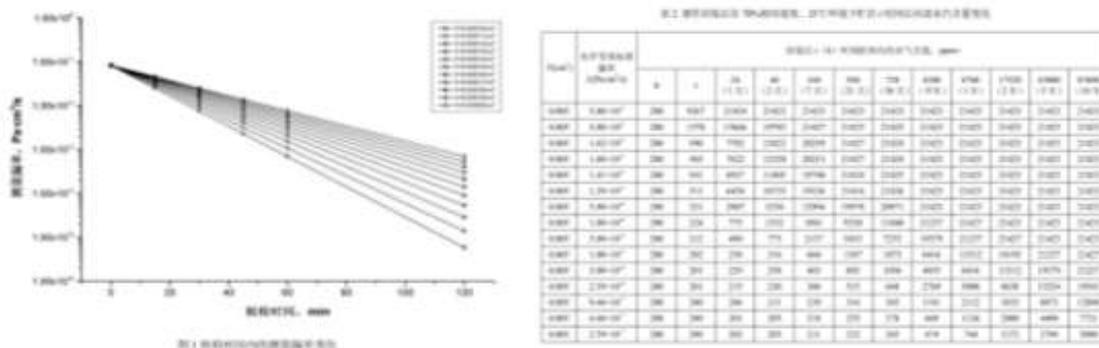
超小尺寸器件的密封性能评价

肖汉武 李阳

无锡中微高科电子有限公司, 江苏无锡, 邮编 214035

*Email: hwxiao0106@163.com

摘要: 内空腔容积小于 0.01cm^3 的超小尺寸密封器件在器件贮存期内环境气氛对其内部水汽含量的影响尤为明显, 在较短的储存期内水汽含量有可能超过 20000ppm 并趋于饱和, 无法满足 5000ppm 的规范要求。且在进行氦气背压法检漏时, 还存在器件候检阶段测量漏率快速下降问题。本文讨论了超小尺寸器件密封试验的等效标准漏率判据不足问题, 提出了相应的密封性评价及检漏方法。



关键词: 超小尺寸器件, 最小理论漏率, 泄漏时间常数, 严酷等级, 光学检漏

参考文献:

- [1] GJB548C-2021. 微电子器件试验方法和程序[S].
- [2] QJ2227A-2005. 航天器件有效贮存期和超期复验要求[S].
- [3] Greenhouse H, Lowry R, Romenesko B. Hermeticity of Electronic Packages(Second edition)[M], Elsevier, 2012.
- [4] GB/T2423.23-1995. 电工电子产品环境试验 试验 Q:密封, 1995.
- [5] 王庚林,王莉研,董立军[J],漏率公式与判据和内部气体含量的分析研究(三), 电子与封装, 2007, 7(11):45-48.
- [6] 薛大同. 氦质谱检漏仪背压检漏标准剖析及非标漏率计算程序[J]. 真空科学与技术学报, 2005,25(增刊):20 - 26.
- [7] James M. Laffery, Foundations of vacuum science and technology[M]. JohnWiley& Sons, Inc.
- [8] 肖汉武.光学检漏的试验时间问题[J], 真空与低温, 2021, 27(6): 564-571.

MEMS-TOF 质量分析器结构与仿真优化

蒋睿¹, 郝明¹, 闫泽¹, 张虎忠², 王璿², 王永军², 谢元华¹, 刘坤^{1*}

¹ 东北大学, 机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819;

² 兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理重点实验室, 甘肃兰州, 邮编 730000

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 质谱计作为一种微型化质谱技术^[1,2], 能够在微小的空间内实现物质的鉴别, 其便携化、集成化与低功耗的特性使其成为航天任务中理想的分析工具, 使其易于搭载在航天器上实现实时、原位的分析。本研究基于飞行时间 (TOF) 原理, 设计双场加速与离子反射镜结构, 进行离子加速、飞行时间的理论计算。利用 COMSOL 建立 MEMS-TOF 质量分析器计算模型, 探究电极电压、电极宽度、离子初动能等对于离子束形、离子束发散角的影响规律, 利用 MATLAB 对仿真所得的质量分选结果进行质荷比谱图的构建, 并基于该结果进行质量分析器结构的迭代优化。基于分辨率、飞行时间差等关键设计指标确定最终质量分析器结构, 模拟计

算结果表明,该 MEMS-TOF 质量分析器具有较高的离子传输效率,对于质荷比为 17、18 的离子飞行时间差为 10 ns,可实现两种目标粒子的完全分离。该研究为离子传输和离子束控制分析方法提供理论支撑,对于 MEMS-TOF 质谱芯片的整体设计具有指导意义。

关键词: 质谱分析, 飞行时间, MEMS-TOF, 离子传输

参考文献:

[1] Z. Y. Ren, M. R. Guo, Y. J. Cheng, Y. J. Wang, W. J. Sun, H. Z. Zhang, M. Dong, G. Li, "A Review of the Development and Application of Space Miniature Mass Spectrometers", *Vacuum* 155, 108-117 (2018).

[2] C. Tassetti, R. Mahieu, J. Danel, O. Peyssonneaux, F. Progent, J. Polizzi, X. Machuron-Mandard, L. Duraffourg, "A MEMS Electron Impact Ion Source Integrated in a Microtime-of-flight Mass Spectrometer", *Sensors and Actuators B: Chemical* 189, 173-178 (2013).

作者简介: 蒋睿(2000.02-),男,硕士研究生,主要研究方向:微纳质谱技术,2100458@stu.neu.edu.cn。

通讯作者: 刘坤(1979.07-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:真空科学与微纳机械,真空装备技术,气体流动理论与应用, E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助: 辽宁省应用基础研究计划项目(2022JH2/101300215),辽宁省科技攻关项目(2021020832-JH1/104-03),沈阳市自然科学基金(22-315-6-01)。

MEMS 质谱芯片内带电粒子与稀薄气体碰撞过程仿真分析

滕帅¹, 郝明¹, 张虎忠², 王璘², 王永军², 谢元华¹, 刘坤^{1,*}

¹ 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳, 邮编 110819;

² 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 甘肃兰州, 邮编 730000

*Email: kliu@mail.neu.edu.cn

摘要: 随着中国空间站的正式投入运行以及探月工程的顺利进展,太空中长期载人驻留的时代正式开启,空间真空环境探测仪器的便携性、低耗性对于执行科考任务至关重要。微型电子枪、离子源、质谱计等真空仪器均在 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 领域得到了关注^[1-3]。以 MEMS 质谱计为例,其在使用过程中需要微尺度空间内不同真空度背景气体分子与电子、离子等碰撞所引起的分辨率和灵敏度干扰,因此开展该领域的理论研究极为重要。本研究基于 OpenFOAM 平台,针对 MEMS 质谱计微尺度空间内的亚声速流动问题,对 dsmcFoam+求解器进行了二次开发,并对质谱检测过程物理边界的准确性及其在微尺度空间内应用问题的适用性进行了验证。基于 DSMC 模拟结果,通过 MATLAB 建立微流道离子输运模型,以揭示背景稀薄气体碰撞对质谱检测分辨率和灵敏度的影响机制。以离子收集率及离子束束形作为 MEMS 质谱芯片的评价指标,通过非支配排序遗传算法-II 算法进行了多目标优化研究,以期为 MEMS 质谱芯片性能提升提供理论数据。

关键词: MEMS 质谱芯片; 带电粒子; 稀薄气体; DSMC

参考文献:

- [1]. Yang, W., Liu, W., Wang, X., Li, Z., Zhan, F., Zhang, G., Wei, X., “A Miniature Ionization Vacuum Sensor With a SiO_x-Based Tunneling Electron Source”. IEEE Transactions on Electron Devices, 68(10), 5127-5132 (2021).
- [2]. Velasquez-Garcia, L. F., Gassend, B. L. P., Akinwande, A. I., “CNT-based MEMS/NEMS Gas Ionizers for Portable Mass Spectrometry Applications”. Journal of Microelectromechanical Systems, 19(3), 484-493 (2010).
- [3]. Zhang, Q., Lu, X., Chen, T., Xiao, Y., Yao, R., & Yao, J., “A miniature four-channel ion trap array based on non-silicon mems technology”. Micromachines, 12(7), 831 (2021).

作者简介: 滕帅 (2000.02-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 稀薄气体动力学, E-mail: 2200498@stu.neu.edu.cn。

通讯作者: 刘坤 (1979.07-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 真空科学与微纳机械, 真空装备技术, 气体流动理论与应用, E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn。

基金资助: 辽宁省应用基础研究计划项目 (2022JH2/101300215), 辽宁省科技攻关项目 (2021020832-JH1/104-03), 沈阳市自然科学基金 (22-315-6-01)。

基于矩阵型集成 LED 发光源的飞机空中加油灯

王浩东*、丁晓尘、邓涛

(南京三乐集团有限公司, 江苏南京, 邮编 211800)

*Email: sanlegdkj2020@163.com

摘要:本文介绍了研发一种以矩阵型集成 LED 芯片作为发光源的飞机空中加油灯, 为了使该 LED 空中加油灯能够满足飞机夜航空中加油的大散射角照明需求, 主要从 LED 芯片的选择、结构设计以及光学设计等方面解决了散热、中心光强以及大散射角方面的技术问题, 并对研制的样品进行了测试, 结果表明其参数能达到飞机空中加油灯的指标要求, 具备取代同类航空照明钨丝光源的技术能力。

关键词: 矩阵型集成 LED, 空中加油灯, 大散射角航空照明, 光学设计, 取代钨丝光源

参考文献:

- [1] 吴淑梅, 霍彦明, 徐梅, 等. LED 光源在照明中的应用[J]. 现代显示, 2008, 7: 55-58.
- [2] Mehmet Arika, Charles Beckerb, Stanton Weaverb, et al. “Thermal management of LEDs package to system,” Third International Conference On Solid State Lighting, San Diego CA, USA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004.
- [3] 程恩来. 肋片在 LED 灯具散热设计中的应用[J]. 中国照明电器, 2012, 2: 17-20.

Low power flexible monolayer MoS₂ integrated circuits

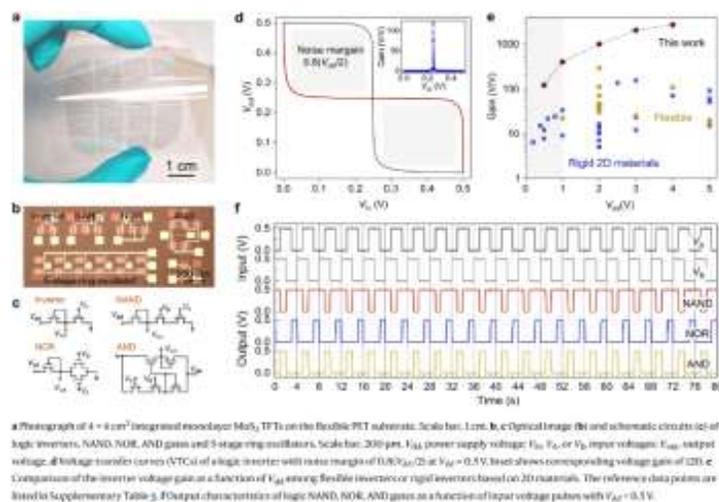
汤建¹ 王琴琴¹ 田金朋¹ 李晓梅¹ 李娜^{1,2} 彭雅琳¹ 李修臻¹ 时东霞¹ 张广宇^{1,2*}

¹北京凝聚态物理国家研究中心, 北京, 邮编 100190;

²松山湖材料实验室, 广东东莞, 邮编 523808

*Email: gyzhang@iphy.ac.cn

摘要: Monolayer molybdenum disulfide (ML-MoS₂) is an emergent two-dimensional (2D) semiconductor holding potential for flexible integrated circuits (ICs). The most important demands for the application of such ML-MoS₂ ICs are low power consumption and high performance. However, these are currently challenging to satisfy due to limitations in the material quality and device fabrication technology. In this work, we develop an ultra-thin high- κ dielectric/metal gate fabrication technique for the realization of thin film transistors based on high-quality wafer scale ML-MoS₂ on both rigid and flexible substrates. The rigid devices can be operated in the deep-subthreshold regime with low power consumption and show negligible hysteresis, sharp subthreshold slope, high current density, and ultra-low leakage currents. Moreover, we realize fully functional large-scale flexible ICs operating at voltages below 1 V. Our process could represent a key step towards using energy-efficient flexible ML-MoS₂ ICs in portable, wearable, and implantable electronics.^[1]



关键词: 2D materials, MoS₂, flexible electronics, low power consumption, integrated circuits

参考文献:

[1] Tang, J., Wang, Q., Tian, J. et al. Low power flexible monolayer MoS₂ integrated circuits. Nat Commun 14, 3633 (2023)

F 显示分会
分会张贴报告

Full-Color Micro-LED Based on Confocal Cavity

Liwen Deng¹, Enguo Chen^{1,2*}, Tailiang Guo^{1,2}

1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2. Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou
350108, China

*Corresponding author: ceg@fzu.edu.cn

Abstract: Micro-LED [1-3] display technology is one of the most important advances in the LED field after blue GaN materials and white LED lighting. Gallium nitride based Micro-LEDs are considered to be the most promising display technology with high contrast ratio, low power consumption and high response frequency. Therefore, Micro-LED has a wide application prospect in near-eye display and 3D display. However, research on the Micro-LED device itself is still insufficient. Due to the Lambertian emission of traditional Micro-LED, optical components such as Microlens gratings are needed, resulting in complex systems, bulky volumes, and low efficiency.

A Micro-LED with adjustable unidirectional emission should have potential in a naked-eye 3D display and near-eye display. Different from controlling the emission direction of coherent lasing, it is difficult for an incoherent micro-LED. Photonic crystals (PhCs) can only finitely improve the light emission pattern. A resonant cavity has been used to increase the LED spatial coherence. Schubert reported a GaAs-based Fabry-Perot (F-P) resonant cavity LED with an emission spectrum full width at half-maximum (FWHM) to be 6.4 nm and light output power that is 3.3 times that of conventional LEDs.

Here we demonstrate a confocal cavity based design of a vertical micro-LED that generates unidirectional emission with controllable FWHM at arbitrary subpixel. And the simulation model was built in FDTD with the light source generated by the Micro-LED was simulated with a dipole to collect some preliminary data. We propose a bottom metal reflector that utilizes two layers of Ag at top and bottom of Micro-LED to form the confocal cavity that is simultaneously compatible with the GaN device fabrication process. This new structure produces 5.4 times light output power than conventional Micro-LEDs, with efficiency of 11.2%. New structure diagram of confocal cavity, light intensity distribution and simulation model are shown in Fig.1.

Keyword: Micro-LED, Microcavity, FDTD.

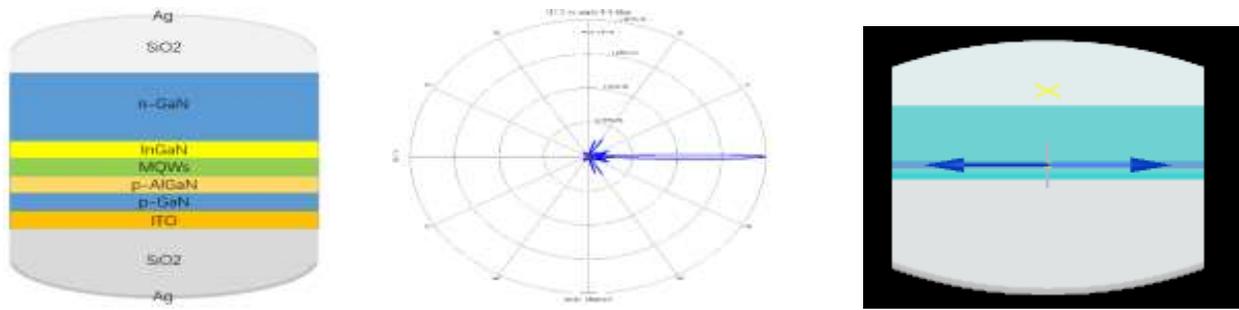


Fig. 1. Diagram of confocal cavity-based Micro-LEDs(a)Light intensity distribution of dipole
(b)simulation model in FDTD(c)

References

- [1] L Chen, et al., Research Article, 6, 2102090 (2022).
- [2] C L Lin, et al., Applied Physics Letters,87,021101(2005).
- [3] Joo et al., Science ,370, 459–463 (2020).

H 大科学装置
分会张贴报告

基于机器学习的分子泵故障诊断系统在 EAST 装置上的研究

袁啸林^{1*} 左桂忠¹ 周阳² 陈跃¹ 胡建生¹

¹中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥, 邮编 230031

²安徽工程大学, 安徽芜湖, 邮编 241000

*Email: xlyuan@ipp.ac.cn

摘要: EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 是我国自主研发的全超导托卡马装置, 用于可控核聚变研究。分子泵作为高真空获得设备, 为其提供良好的真空环境。分子泵在长期运行过程中, 由于内部件退化磨损等原因引起的故障会破坏 EAST 整体真空环境, 影响 EAST 实验效果, 甚至对整个装置造成不可预估的损失, 因此研究分子泵故障诊断技术, 实现分子泵故障的早发现和早诊断, 可以有效提高 EAST 真空系统和装置的安全性^[1-3]。本研究提出了一种基于机器学习的故障诊断方法并将其应用于 EAST 装置的分子泵, 通过对分子泵运行数据进行数据清洗和特征提取获得模型的训练数据集和测试数据集, 在此基础上改进 SVM 模型使其适用于小样本数据集的故障状态识别。结果表明该方法可以对分子泵故障进行准确及时的诊断, 可以有效避免由于分子泵故障引起的真空系统和 EAST 装置的次生故障, 为真空系统和 EAST 装置安全运行提供了保障。

关键词: EAST 装置, 分子泵, 故障诊断, 机器学习

参考文献:

- [1]X.L. Yuan*, J. Kai, C. Yue et al., A support vector machine framework for fault detection in molecular pump. JOURNAL OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY. (2022). DOI10.1080/00223131.2022.2080124
- [2]Hu J.S.*, Wang X.M., Li J.H., et al. Vacuum and wall conditioning system on EAST[J]. Fusion Eng Des. 2167-2173,84 (2009).
- [3]Nakagawa S, Hochin T*, Nomiya H, et al. Prediction of unusual plasma discharge by using support vector machine. Fusion Eng Des. 112360,167(2021).

自由电子激光注入段废束桶束窗的设计及热结构分析

张浩¹ 林涵文¹ 赵峰² 黄礼明¹ 常仁超¹ 魏建平¹ 鄂得俊¹ 尉伟^{1*} 陶凯¹ 杨家岳¹ 张未卿¹

¹深圳综合粒子设施研究院, 广东深圳, 邮编 518107;

²大连化学物理研究所, 辽宁沈阳, 邮编 116023

*Email: weiwei@mail.iasf.ac.cn

摘要: 深圳中能高重频 X 射线自由电子激光 (S³FEL) 将建设成为全球唯一软 X 射线波段的高

重频自由电子激光。废束桶束窗作为 S³FEL 的重要组成部分，其位于真空系统的末端，主要用来隔离和保护加速器超高真空系统。本文针对 S³FEL 注入段废束桶束窗进行设计与计算，包括束窗材料选取、沉积功率计算、热结构分析等，得到最佳的束窗材料与结构，且计算结果满足实际使用需求。此研究为 S³FEL 的废束桶束窗设计提供了重要的理论依据。

关键词：自由电子激光，高重频，超高真空，废束桶，束窗

自由电子激光自 1971 年首次提出以来，国内外已研制出多台自由电子激光装置，主要包括欧洲 XFEL，美国 LCLS，日本 SACLA，韩国 PAL-XFEL，上海 SXFEL，大连 DCLS 等，还有正在建设中的上海 SHINE^[1-4]。深圳自由电子激光（S³FEL）将采用超导加速器，提供高重复频率、高亮度、飞秒级超短时间脉冲、高相干性、多用户的软 X 射线光源，满足国家在重要科学领域的重大需求，提升我国科技发展水平。废束桶束窗^[5]作为 S³FEL 的重要组成部分，它位于真空系统的末端，主要用来隔离和保护加速器超高真空系统。系统运行时，电子束需要穿过束窗进入废束桶，在此过程中部分能量会沉积在束窗上，引起束窗的升温 and 结构强度的改变。因此束窗设计需要综合考虑材料、结构和厚度等多方面因素^[6]。

束窗材料选取是束窗设计的关键，要求其具有良好的热力学性能、优异的机械性能、较低的放气和较少的能量沉积，此外还要具备良好的加工性能和焊接性能。目前国内外光源项目中用来做束窗材料的包括铍、钛合金、铝合金和无氧铜等^[6]。束窗中还应当包含水冷结构，实时将热量带走，避免束窗持续升温引起结构破坏^[7]。

深圳自由电子激光（S³FEL）处于初期研究阶段，需要进行关键技术的研究。本文主要根据注入段的电子束参数进行废束桶束窗的设计，通过束窗材料选取、沉积功率计算和热结构计算，得出束窗温度、应力与变形结果，分析优化得到最佳束窗结构，为后续深圳自由电子激光的废束桶束窗设计提供重要理论依据。

1 电子束参数和能量分布

注入段的电子束参数包括，电子束最大功率 800W，最大能量 8MeV，最大重复频率 1MHz，束流在束窗表面呈现二维高斯分布，束窗中心与高斯分布中心重合，束流能量分布函数如下式：

$$f(x, y) = \frac{P}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2})}$$

式中： P 为束流在束窗上的沉积功率，单位为 W； σ_x ， σ_y 分别为高斯分布的标准差，根据物理设计均取 0.84 mm； x ， y 分别为以束窗中心为原点的二维平面坐标。根据上述公式可得出，中心处的能量最大，离中心越远能量越低。

2 束窗材料选取与设计

2.1 束窗材料选取

束窗材料选取是束窗设计的关键，要求其具有良好的热力学性能、优异的机械性能、较低的放气和较少的能量沉积，此外还要具备良好的加工性能和焊接性能。国内外光源项目中用来做束窗材料的包括铍、钛合金（Ti-6Al-4V）、铝合金（A5083）、不锈钢 316L、无氧铜（OFHC）和铍等，其材料物性参数如表 1：

表1. 材料物性参数

Table 1 Material physical parameter

material	density/ (kg m^{-3})	elastic modulus/ (GPa)	Poisson' s ratio	yield stress/(MPa)	thermal conductivity/ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	thermal expansion coefficient/($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Ti-6Al-4V	4430	113.8	0.36	880	6.7	8.6×10^{-6}
A5083	2660	71	0.33	145	117	23×10^{-6}
316L	7980	193	0.3	290	15	12×10^{-6}
OFHC	8940	115	0.343	340	391	17.7×10^{-6}
Be	1844	303	0.1	240/345	216	12×10^{-6}

通过表 1 可以看出, 铍在机械强度、导热性能方面具有较高的综合性能。这里铍窗存在两种屈服强度, 硬铍为 345 MPa, 软铍为 240 MPa。由于束窗材料密度越大, 沉积能量就会越大, 因此铍的能量沉积有较大优势。特别是注入段(此处接近电子枪)对真空度要求非常高, 而铍在温度低于 300 °C 的放气率很低^[8], 因此在放气率方面铍也是合适的选择。此外, 铍可通过钎焊的方式同不锈钢或铜进行焊接, 综合考虑下选用铍作为束窗的材料。

2.2 束窗结构设计

基于材料热膨胀系数的考虑, 束窗采用不锈钢 316L 真空管中钎焊铍窗的设计, 束窗的结构设计如图 1 所示。铍窗上游为高真空侧, 下游为低真空侧, 在高真空侧真空管内设置凸台, 强化铍窗结构, 避免铍窗两侧压差导致铍结构破坏。

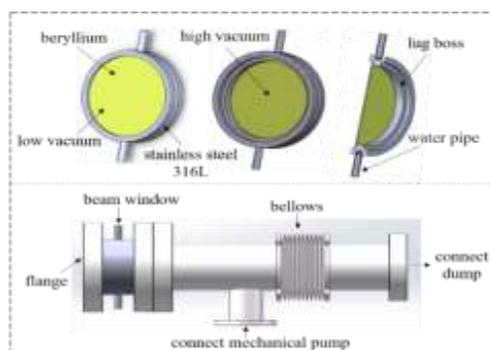


图 1 束窗模型

根据物理设计要求, 束窗有效直径为 80 mm, 考虑到凸台的设计, 因此铍窗直径为 90 mm。此外, 凸台外侧设置水冷通道, 在真空管垂直方向分别焊接进、出水管, 水流采用下进上出的方式。

3 束窗结构计算与分析

3.1 束窗沉积功率计算

电子束在穿过束窗的过程中会产生沉积功率, 计算公式如下:

$$q = \frac{nP}{E} \left(\frac{dE_e}{dx} + \frac{dE_n}{dx} \right)$$

式中: q 为束窗沉积能量, 单位为 W/mm; E 为电子束能量, 单位为 MeV; P 为电子束功率, 单位为 W; n 为安全系数; dE_e/dx , dE_n/dx 分别为电子和质子损失的能量, 单位为 MeV/mm。因此, 束窗的总沉积功率为上式中的 q 与束窗厚度的乘积。

电子束透过束窗的沉积功率还可通过蒙特卡洛粒子输运程序 FLUKA 软件近似计算得出, 根据来流电子束参数, 通过 FLUKA 软件对不同厚度 (0.5 - 2 mm) 铍窗的沉积功率进行计算, 结果如图 2 所示。

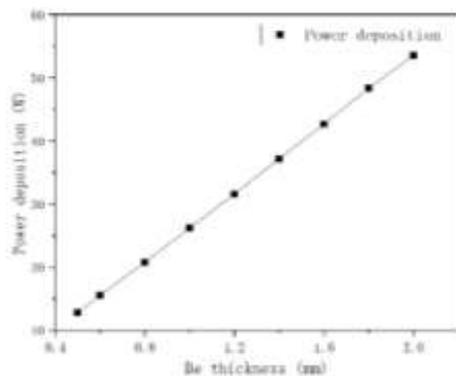
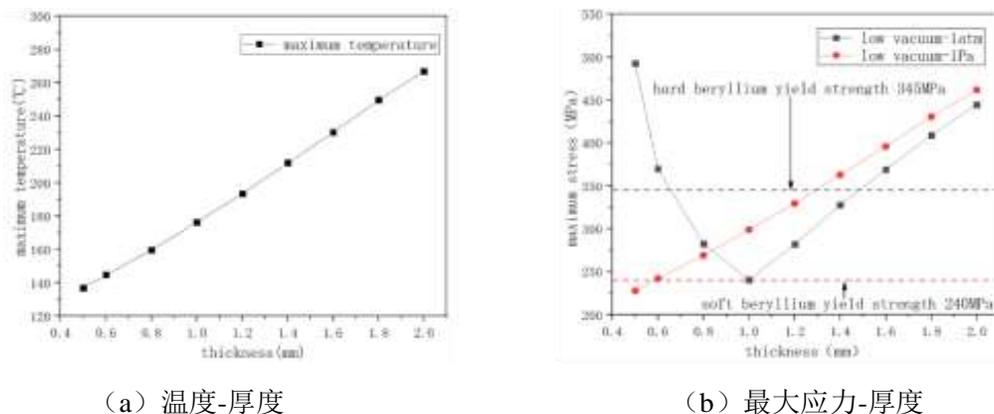


图 2 铍窗沉积功率

根据图 2 可以得出，随着厚度的增大，电子束在束窗上的沉积功率呈线性趋势随之增大。而沉积功率的增大会导致束窗温度的升高，进而使得结构的热应力不断增大，因此需对束窗模型进行热结构计算与优化。

3.2 束窗结构计算与分析

首先对束窗模型进行简化，省去进出水管，保留凸台外侧的水冷通道。采用有限元分析软件 Ansys 进行热结构计算，束窗材料为铍，真空管材料为 316L，其物性参数见表 1。采用自由网格进行划分，根据实际使用情况确定边界条件，真空管外壁设置空气对流换热系数 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ，水冷通道壁面设置水冷换热系数 $5000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ 。束窗高真空侧设置高斯热源，沉积功率见图 2，热源分布情况见式 (1)。将温度计算结果导入静力学模块进行结构计算，模型整体添加重力，真空管两端采用固定约束，束窗高真空侧压力为 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ ，低真空侧压力为 1 Pa ，真空管外壁面压力为 1 atm 。此外还考虑到束窗低真空侧真空度变差，极限为 1 atm 的情况，其他约束相同，不同厚度温度和两种应力计算结果如图 3 所示。



(a) 温度-厚度

(b) 最大应力-厚度

图 3 不同厚度铍窗的最大温度、最大应力

由图 3 可以得出，随着铍窗厚度的不断增大，在温度变化方面，电子束通过其产生的沉积功率不断增加，导致最大温度随之不断增大；在应力变化方面，低真空侧为 1 Pa 情况下的最大应力不断增加，而低真空为 1 atm 情况下的最大应力总体呈现先降低后增大的趋势。这是由于低真空侧为 1 Pa 情况下，铍窗的应力主要来源于温度的升高，而低真空为 1 atm 的情况，铍窗两侧压差同样会对铍窗产生影响，两者的双重作用使得铍窗出现先降后升的趋势。

此外，还针对不同厚度铍窗的变形进行计算，结果如图 4 所示。可以看出低真空侧为大气时，随着厚度的不断增加，最大中心变形呈逐渐降低的趋势。变形量在前期迅速下降，在厚度 0.1 mm 以

上变化量趋于平稳；低真空侧为 1 Pa 时，随着厚度的不断增加，最大中心变形呈逐渐升高的趋势，但其总体变形量很小可忽略不计。

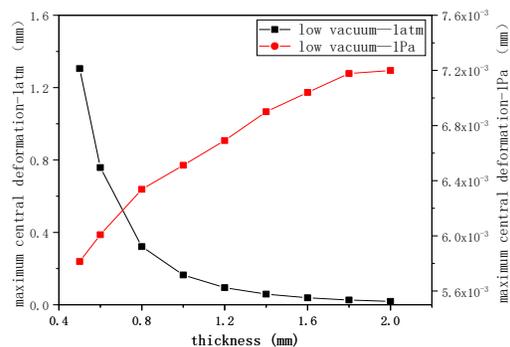
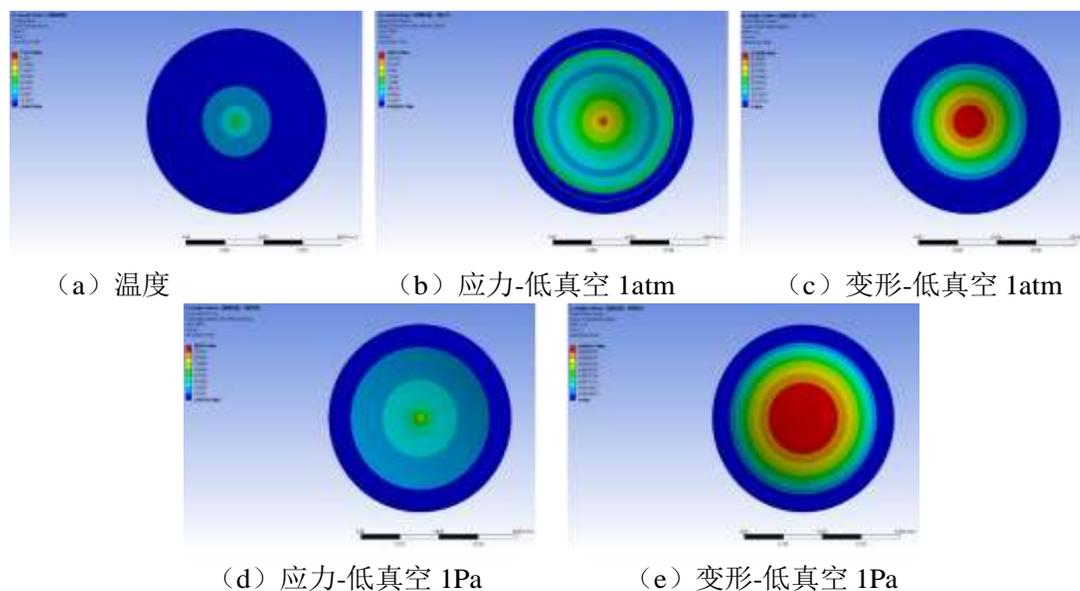


图 4 不同厚度铍窗的中心变形

综合上述最大温度、最大应力和中心变形变化趋势，可以得出温度均在可承受的范围内，在该范围内的放气率很低且远远低于铍的熔点；铍窗厚度在 0.8 - 1.2 mm 范围内，两种情况的最大应力都处于硬铍和软铍的屈服强度之间，这都满足使用需求的；低真空为 1 Pa 时的中心变形量可忽略不计，低真空为 1 atm 时的中心变形量随厚度增加呈逐渐降低趋势。考虑到束窗厚度满足强度的情况下，尽量保证束窗的温度低、沉积功率少，因此厚度 0.8 mm 的铍窗效果最佳。0.8 mm 铍窗的计算结果如图 5 所示，其最大温度为 159.7 °C，低真空侧为 1 atm 情况下最大应力为 282.6 MPa，中心变形为 0.32 mm；低真空侧为 1 Pa 情况下最大应力为 269.1 MPa，中心变形为 0.0063 mm。



4 结论

本文设计了一种高重频自由电子激光注入段废束桶束窗，通过多种材料物性参数对比分析，最终采用不锈钢 316L 真空中钎焊铍窗的方式。采用蒙特卡罗方法获得束窗的沉积能量，通过有限元分析方法计算不同厚度束窗的温度、应力和变形情况，得到 0.8 mm 铍窗效果最佳，最大温度为 159.7 °C，低真空侧为 1 atm 情况下最大应力为 282.6 MPa，中心变形为 0.32 mm；低真空侧为 1 Pa 情况下最大应力为 269.1 MPa，中心变形为 0.0063 mm。计算结果满足材料使用要求，验证了束窗结构的安全性，为 S³FEL 的废束桶束窗设计提供了重要的理论依据

参考文献:

- [1] Geloni G, Saldin E, Samoylova L, et al. "Coherence properties of the European XFEL", *New Journal of Physics* 12, 035021 (2010).
- [2] Dan G, Eichhorn R, Furuta F, et al. "Nitrogen-Doped 9-Cell Cavity Performance in a Test Cryomodule for LCLS-II", *Journal of Applied Physics* 117, 935-937 (2015).
- [3] Chung T Y, Fu H L, "Lee H C DCLS: A Fair and Efficient Scheduling with Bandwidth Guarantee in WiMAX Mesh Networks", *Journal of Information Science & Engineering* 26, 1429-1442 (2010).
- [4] 万钧, 冷用斌, 赖龙伟, 等. "SHINE 丝扫描截面测量系统样机数据采集系统研制", *核技术* 45, 050101 (2022).
- [5] 孟才, 唐靖宇, 敬罕涛, "散裂靶中质子束窗的散射效应", *强激光与粒子束* 23, 2273-2280 (2011).
- [6] 聂小军, 刘磊, 康玲, 等. "一种废束站束窗结构设计与优化", *强激光与粒子束* 30, 105105 (2018).
- [7] 马文静, 赵壮, 王思慧, 等. "合肥先进光源前端光子吸收器的设计及热分析", *强激光与粒子束* 34, 104007 (2022).
- [8] 陈旭, 杨新建, 齐京, 等. "金属 Be 真空出气性能的测试", *真空科学与技术* 22, 459-462 (2002).

球马克超高真空金属密封的设计与研究

余清洲^{1,2} 杨庆喜^{1*}

¹ 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽合肥, 邮编 230031;

² 中国科学技术大学, 安徽合肥, 邮编 230026

*Email: yangqx@ipp.ac.cn

摘要: 超高真空金属密封技术作为推动聚变发电的关键工程技术之一, 直接影响着聚变装置的安全与稳定运行。针对球马克装置主机及附属真空设备中密封面临高辐射、高温烘烤及超高真空的复杂使用环境和大圈径、低漏率的使用要求, 本文通过建立密封泄漏数学模型, 分析并提出了一种可用于聚变复杂环境的正六边形金属密封环构型, 并基于蒙特卡洛粒子追踪代码 MCNP 优选金属密封材料为 6063 铝板材; 建立密封弹塑性模型, 仿真模拟了密封圈在不同几何结构参数和不同压缩率下的加载-卸载特性曲线, 探究其在不同工况下的回弹率、等效应力分布、最大接触应力分布及接触宽度大小, 并基于多目标优化分析手段确定了密封最优结构参数, 提高了密封性能; 其次, 提出“车削与线切割组合方式”加工球马克装置正六边形超高真空金属密封的成型工艺技术, 简化了金属密封圈加工工艺。基于相关研究结果, 研制了用于球形托卡马克真空室密封的金属密封圈样件(如图 1 所示), 并进行负压法检漏测试, 实验结果表明: 正六边形构型金属密封圈的密封性能良好, 其真空泄漏率为 $6.18 \times 10^{-10} \text{ Pa m}^3/\text{s}$, 满足球马克真空室设计要求。上述金属密封圈研究方法和成型工艺为未来聚变装置的密封设计奠定了基础, 同时也为其他领域的金属密封研发提供了指导。

关键词: 球马克, 正六边形金属密封, 模拟仿真, 成型工艺, 负压检漏

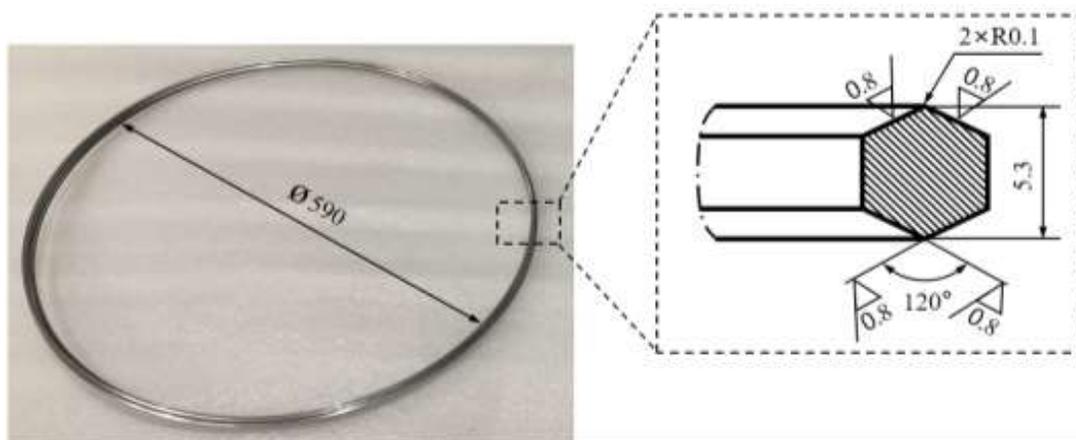


图 1 正六边形金属密封圈样件及其截面尺寸

Fig. 1 Hexagon metal seal ring sample and its sectional dimensions

杂质对液态锂中氘脱附行为的影响

李琳^{1, 2*} 孟献才^{1, 3} 元京升^{1, 2} 左桂忠¹ 胡建生¹

¹中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽合肥, 邮编 230031;

²中国科学技术大学, 安徽合肥, 邮编 230026;

³合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室), 合肥 230031

*Email: lilin@ipp.ac.cn

摘要: 锂(Li)化壁处理/液态Li第一壁是核聚变装置EAST采取的常规壁处理方式,对抑制托卡马克中高Z杂质的产生、减少燃料再循环起着关键的作用,从而有助于提高等离子体性能参数^[1],获得更好的H模约束。这得益于Li活泼的化学性能,可与真空中残余的活性气体发生化学/吸附反应,但同时也带来了氘滞留的问题。为构建与未来液态Li第一壁应用相配套的氘回收系统,需对氘(含同位素,下同)在液态锂中的脱附行为进行研究。

本文设计了真空条件下液态Li的气体吸附/脱附系统,在400℃时进行不同含量氘气(D₂)在液态Li中的吸附实验并分析其脱附过程,通过对系统抽速标定计算热脱附过程中气体的抽除量。结果表明,当液态锂中吸附D₂含量较高(4.1 at.%和2.5 at.%)时^[2],样品中D₂脱附峰温度约为485℃,对应溶解在液态锂中的D₂,但当吸附D₂含量较少(0.5 at.%)时,其脱附峰温度发生明显变化,这是受Li表面污染物的影响。重点研究了N₂、O₂、H₂O等杂质气体对氘脱附行为的影响,其中N₂和H₂O可与溶解在Li中的D₂发生反应形成新的化合物,该化合物脱附D₂的温度高于溶解相D₂在Li中的脱附温度,但低于LiD的分解温度。该研究对未来解决液态Li中燃料回收问题的解决方案及在线氘测量技术产生重要意义。

关键词: 液态锂, 核聚变, 氢同位素, 脱附

参考文献:

[1] G.Z. Zuo et al., Improvement on the plasma performances via application of flowing lithium limiters in EAST tokamak, *Physica Scripta*. 2020, T171, 014008.

[2] L. Li et al., Effect of N₂ on release behavior of D₂ in liquid lithium, *Nuclear Materials and Energy*. 2021, 28, 101049.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0402500、2017YFA0301103、2022YFE03130000), 国家自然科学基金 (11905138、11905148、11905254), 中国科学院合肥大科学中心“高端用户培育基金 (2020HSC-UE010、2021HSC-UE013)。

大靶面拼接相机探测器真空低温封装的设计

曾锋^{1,3} 张军^{1,3} 张鸿飞^{1,3} 朱杰² 石鑫¹ 朱瑞¹ 陈金挺¹ 王坚^{1,2,3*}

¹核探测与核电子学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026;

²先进技术研究院, 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³深空探测实验室, 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

*Email: wangjian@ustc.edu.cn

摘要: 天文学观测的基础是天文望远镜及其终端设备, 随着时代的发展, 对观测的要求也在不断提升。为了探索各类新天体, 需要进行大天区的重复观测, 国际上便开始进行大口径、大视场的巡天望远镜的建设。为了追赶国际先进水平, 中国科学技术大学与中国科学院紫金山天文台提出共同建设 2.5 米口径大视场巡天望远镜 (Wide Field Survey Telescope, WFST)。WFST 的建成将成为北半球巡天能力最强的巡天望远镜。

望远镜的核心部件是一台焦面直径 325mm, 有科学成像、波前传感、导星成像的三合一主焦相机, 其科学成像面由 9 片 CCD290-99 拼接而成, 像元数达 7.6 亿。整个焦面需要工作在 -100℃ 以减小探测器的暗电流, 因此需要开展对探测器进行低温真空封装的研究和设计。

面向大靶面探测器的主焦相机设计中, 低温杜瓦主要由接口法兰, 前法兰以及镜室组成。为了降低相机在主焦光路的挡光效应, 真空监控与维持、探测器读出以及制冷系统都需在接口法兰上完成。为达成这一紧凑型设计, 本文提出了一体式的双胶圈密封方案, 完成了超过 1600 个电信号的真空穿透, 并配合低温制冷以及离子泵达到真空绝热并避免微震动造成的像质退化; 同时测定了腔体内各部件的放气率, 确保了在烘烤除气后, 腔内组件的长时间放气不会对真空维持产生破坏。在此基础上, 使用残余气体分析仪 (RGA) 测试分析了杜瓦内存在的大分子物质, 避免对 CCD 器件的污染。实际使用中过程中发现 CCD 表面会存在一定污染物, 需要通过防护和去除污染来避免对高精度成像造成影响。最终实现了主焦相机的长时间真空维持和低温制冷, 满足望远镜实际使用需求。

关键词: WFST, CCD, 真空技术, 杜瓦

参考文献:

[1] ZHENG X. The 2.5m wide-field survey telescope (WFST): Goals and status[Z]. 24.

- [2] Lou Z, Liang M, Yao D, et al. "Optical design study of the Wide Field Survey Telescope (WFST)" [C]// Proceedings of the SPIE, Volume 10154, id. 101542A 10 pp. (2016). Proceedings of the SPIE, Volume 10154, id. 101542A 10 pp. (2016). 2016:101542A.
- [3] Cheng Chen, Jun Zhang, Hongfei Zhang, Jian Wang, Qi-Jie Tang, Hui Wang, Zhiyue Wang, Yi-Hao Zhang, Wei-Jie Jiang, Jin-Ting Chen, Qi Feng, Feng Zeng, Qian Zhang, Jie Zhu, Han-Fei Zhu, "Design of CCD test platform of scientific imaging for wide field survey telescope," J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 8(1) 016005 (16 March 2022) <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.1.016005>.
- [4] J. Chen et al., "The verification platform for the mosaic CCD camera in WFST," Proc. SPIE, 11101 111010D (2019). <https://doi.org/10.1117/12.2528417> PSISDG 0277-786X
- [5] "CCD290-99 back illuminated scientific CCD sensor," (2016) <https://www.e2v.com/resources/account/download-datasheet/1897>
- [6] 徐成海. 真空工程技术(精)[M]. 化学工业出版社, 2006:235

EAST 托卡马克弹丸注入加料系统及最新物理实验进展

侯吉磊¹, 南凯博^{1, 2}, 陈跃¹, 胡建生¹, 左桂忠¹, 袁啸林¹

¹中科院等离子体物理研究所, 合肥 230031

²中国科学技术大学, 合肥 230026

摘要: 托卡马克是未来最有希望实现聚变能商业利用的途径。为了实现较高的聚变功率输出, 托卡马克聚变堆在运行时芯部等离子体必须具有较高的密度。另一方面, 为了降低聚变装置的建造成本, 未来聚变堆的基本运行模式是高约束模(H 模)等离子体。由于弹丸注入具有较高的粒子注入深度, 弹丸加料已被确认为 ITER 和 CFETR 等未来聚变堆主要的加料方式。国家大科学工程 EAST 托卡马克装置上目前配备了两套弹丸注入系统, 用于提升等离子体的运行参数。利用弹丸注入系统, 在 EAST 上目前已经进行了多次 H 模等离子体加料实验, 实现了高密度 H 模等离子体运行, 并且发现弹丸加料能够引起辐射不对称性(MARFE)的移动。此外, 在无边界局域模(ELM)的 H 模等离子体中发现弹丸注入虽然能够引起 ELM 的爆发, 但等离子体整体上仍然维持无 ELM 的状态, 并且芯部撕裂模在弹丸注入后得到有效缓解, 初步证明了弹丸加料与无 ELM 等离子体的兼容性。

关键词: EAST 托卡马克、弹丸注入

薄壁钛合金内衬二极铁真空室及其真空性能改善技术研究

魏宁斐¹ 蒙峻^{1,2*} 罗成^{1,2} 杨伟顺^{1,2} 柴振^{1,2}

¹ 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州, 邮编 730000;

² 中国科学院大学, 北京, 邮编 100049

*Email: mengjun@impcas.ac.cn

摘要: 为瞄准国际上重离子科学研究的最前沿, 中国科学院近代物理研究所研制的强流重离子加速器 (HIAF) [1,2], 是具备重粒子加速能力的大科学工程装置, 可以提供能量高达 4.25 GeV/u 的脉冲重离子束流。增强环 (BRing) 是 HIAF 的核心组成部分, 其二极磁铁磁场上升速率为 12 T/s, 为了减小二极磁铁在对应管道上的涡流效应。本文提出了一种以钛合金为内衬并外覆 0.3 mm 壁厚不锈钢的二极铁真空室, 并基于有限元分析方法, 对薄壁钛合金内衬二极铁真空室的受力、变形进行了理论分析。二极铁真空室截面为 230 mm×97 mm、长度为 3.4 m, 中间位置因无法安装真空泵导致压力梯度较大, 为了改善其真空性能, 采用直流磁控溅射技术在钛合金环表面沉积 Ti-Zr-V 薄膜, 待薄壁钛合金内衬二极铁真空室加工完成后, 采用螺线管磁控溅射镀膜技术对二极铁真空室内部进行 Ti-Zr-V 薄膜补镀。最后对其极限真空、压力分布在 Ti-Zr-V 薄膜激活的条件下进行了测试, 其极限压力可低至 3.6×10^{-10} Pa, 且薄壁钛合金内衬二极铁真空室中间位置压力梯度有明显的改善, 证明薄壁钛合金内衬二极铁真空室在结构、真空性能改善方面均具有可行性。

关键词: 强流重离子加速器 (HIAF), 薄壁钛合金内衬二极铁真空室, 有限元分析, 真空性能改善, Ti-Zr-V 薄膜

参考文献:

- [1]. J.C. Yang, J.W. Xia, G.Q. Xiao, et al., High intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) in China, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 317 (2013) 263–265.
- [2]. J.C. Yang, High-intensity heavy ion accelerator facility general design and status, in: HIAF Design Review Meeting. Lanzhou., 2017. Apr 03th, <http://hiaf.impcas.ac.cn/download/detail-178.html>.

深圳产业光源直线加速器电子束窗的结构设计与优化

朱潇潇 雷艳辉 李磊 刘鹏飞*

深圳综合粒子设施研究院, 深圳, 邮编 518000

*Email: liupf@mail.iasf.ac.cn

摘要: 废束站作为粒子加速器装置的重要设备, 在系统调束中发挥着重要作用。束窗是废束站的重要部件, 用来隔离和保护超高真空环境。深圳产业光源 (SILF) 200 MeV 直线加速器末端废束站同样需要设计满足工程需要的电子束窗, 其结构合理性、性能可靠性是机器调束和长期运行的重要保证。本文设计了焊接密封结构的电子束窗真空盒, 利用蒙特卡罗软件 Fluka 计算了束窗的沉积功率, 采用有限元分析软件 Ansys 对比分析了不同材料、厚度的束窗温升、变形和应力, 为研究 SILF

废束窗设计提供了重要理论依据。经模拟分析, SILF 电子束窗拟设计为 1mm 厚的钛窗, 在束流轰击与压差作用下, 其最高温度为 24.96°C, 最大等效应力为 11.7MPa, 最大变形为 5.3×10^{-6} m, 结果均满足使用要求。

关键词: 超高真空, 电子束窗, 应力, 蒙特卡罗, 有限元分析

参考文献:

- [1] 李迪开, 曹磊峰, 池云龙, 周征, 陈秋宏, 张春晖, 代艳萌, 俞健, 颜苗苗, 邓嘉玲, 汪雪, 周沧涛. 95 MeV 射频电子直线加速器辐射防护分析[J]. 强激光与粒子束, 2022, 第 34 卷(6): 100-107.
- [2] C.R.Ader, M.W.McGee, L.E.Nobrega, E.A.Voirin, Overview of Fabrication Techniques and Lessons Learned With Accelerator Vacuum Windows[J]. Physics, 2018.
- [3] 聂小军, 刘磊, 康玲, 陈佳鑫, 王安鑫, 余洁冰, 贺华艳, 朱东辉. 一种废束窗结构设计及优化[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30 卷(10): 123-127.
- [4] 王勇, 尉伟. 大尺寸电子束引出窗[J]. 真空科学与技术学报, 2001, (3): 182-184.
- [5] 张浩, 黄礼明, 赵峰, 林涵文, 常仁超, 魏建平, 鄂得俊, 尉伟, 陶凯, 杨家岳, 张未卿. 一种高重频废束窗的设计及热结构分析[J]. 强激光与粒子束, 2023, 第 35 卷(3): 88-93.
- [6] Haijing Wang, Cai Meng, Huamin Qu, Xiaoyang Sun, Pengcheng Wang, Donghui Zhu. Primary Study of High Power Graphene Beam Window[C]. IPAC 2018: 47-50.
- [7] Monteil, M. Blanco, J. Veness. R. A transparent vacuum window for high-intensity pulsed beams[J]. Vacuum: Technology Applications & Ion Physics: The International Journal & Abstracting Service for Vacuum Science & Technology, 2011, Vol. 85(12): 1165-1169.
- [8] Böhlen T T, Cerutti F, Chin M P W, et al. The FLUKA code: developments and challenges for high energy and medical applications[J]. Nuclear Data Sheets, 2014, 120: 211-214.

HEPS 光束线真空系统设计

田野, 韩庆夫, 石泓

中国科学院高能物理研究所

E-mail: tianye@ihep.ac.cn

摘要: 真空系统是高能同步辐射光源 (HEPS) 光束线的基础工程, 只有在高真空甚至超高真空环境中运行, 才能避免光学反射镜碳沉积而降低镜面的光学反射率, 才能减少残余气体对同步辐射光的吸收。真空系统设计的目的是获得和维持合理的真空度, 保证光束线的稳定运行。本文从压强分布计算, 真空材料选取, 真空获得、测量设备选择, 真空系统气载分析和真空设备布局等方面对 HEPS 光束线的真空系统设计进行介绍。重点用基于试验粒子蒙特卡罗法的 Molflow 软件对无束流条件下的静态压强和经束流清洗后的动态压强分布进行了分析、模拟计算。

关键词: 压强分布计算, 静态压强, 动态压强, 真空设备布局

Vacuum System Design of HEPS Beamlines

Abstract: Vacuum system is the basic component in High Energy Photon Source(HEPS) beamlines. Only when the optical devices in beamlines are operated in a high vacuum or even ultra-high vacuum environment, can avoid the carbon deposition of the optical mirror which might result in the optical reflectivity reduction, and reduce the absorption of synchrotron radiation light by residual gas. The purpose of vacuum system design is to obtain and maintain a reasonable vacuum degree to ensure the stable operation of the beamline. This article introduces the vacuum system design in HEPS beamlines from the aspects of pressure distribution calculation, vacuum material selection, vacuum acquisition, measurement equipment selection, vacuum system gas desorption analysis and vacuum equipment layout. The key point lies in using Molflow software based on test particle Monte Carlo method to analyze and simulate the static pressure distribution which is without beam throughout the vacuum system and the dynamic pressure distribution after beam cleaning.

Keywords: pressure distribution calculation static pressure dynamic pressure vacuum equipment layout

深圳产业光源储存环真空系统设计

雷艳辉 刘鹏飞* 李磊 朱潇潇

深圳综合粒子设施研究院, 广东深圳, 邮编 518000;

*Email: liupf@mail.iasf.ac.cn

摘要: 真空系统是粒子加速器的基础工程, 是保证电子束稳定运行的关键。本文主要描述了深圳产业光源储存环真空系统的总体设计和真空盒结构设计。基于当前的设计, 对真空盒结构设计、标准单元压力分布及同步辐射光密度进行了仿真计算。通过以上仿真计算来验证当前设计的合理性和可行性。

关键词: 储存环, 真空盒, 同步光, 压力分布

深圳产业光源(Shenzhen Innovation Light-source Facility, SILF)是一台第四代中能同步辐射光源。加速器的主要部分是一个周长 696m, 束流能量 3.0GeV, 最高设计流强 300mA 的储存环。储存环由 28 个改进型混合 7BA 标准单元组成, 以实现 $\leq 100\text{pm}\cdot\text{rad}$ 的自然发射度。作为第四代同步辐射光源, 7BA 磁聚焦结构非常紧凑, 储存环的真空系统的设计难度大幅度提高, 主要体现在以下两个方面: 1、相较于三代光源, 7BA 磁聚焦结构磁铁数量更多, 结构更加紧凑复杂, 且对磁铁的场强和梯度提出了更高的要求, 使得磁铁的孔径和磁间隙进一步减小, 这迫使真空盒截面尺寸相比第三代同步辐射光源的真空盒截面大为缩小。SILF 储存环真空盒内径 24mm, 外径 26mm, 属于薄壁小孔径真空盒, 这使得真空盒材料选型和结构设计面临新的挑战; 2、SILF 储存环静态真空要求优于 $1.0\times 10^{-8}\text{Pa}$,

由于磁聚焦结构紧凑，储存环标准单元内能够方便布泵的空间有限，严重限制了集中式离子泵的数量，另一方面真空盒截面尺寸小，流导限制严重，再加上抽气口阻抗要求，离子泵的有效抽速会进一步受到限制。同时由于真空盒截面更小，传统的分布式离子泵或分布式吸气剂泵抽气方案不再适用，因此要获得均匀的超高真空压力分布，在技术方案上提出了更大的挑战。

1 储存环真空系统设计

1.1 储存环真空系统设计要求

储存环真空系统主要由真空盒、真空泵、真空阀、真空规、屏蔽波纹管、光子吸收器和支撑单元构成，储存环真空系统设计整体要求如下：1 静态真空优于 1.0×10^{-8} Pa；2 动态真空优于 1.0×10^{-7} Pa；3 真空盒束流孔径 $H \times V(\text{mm} \times \text{mm}) = 24 \times 24$ ；4 法兰连接处、真空盒内壁应光滑，真空盒之间的连接波纹管层屏蔽弹簧指接触良好，满足物理的阻抗要求；5 真空盒同步光照射面应具有好的冷却方式，以消除同步辐射产生和高次模损失产生的热负载；6 光子吸收器能够屏蔽不必要的同步辐射光，以避免其他部件受到损伤。

1.2 真空系统设计方案

1.2.1 总体布局

储存环全长 696m，由 28 个 7BA 标准单元构成，每个 7BA 标准单元长度约 18.86m，直线节长 6m。根据区域布局，将储存环划分为 I、II、III、IV 四个象限区域，每个区域由 7 个标准单元构成。储存环总体布局和标准单元的真空配置如图 1 所示。

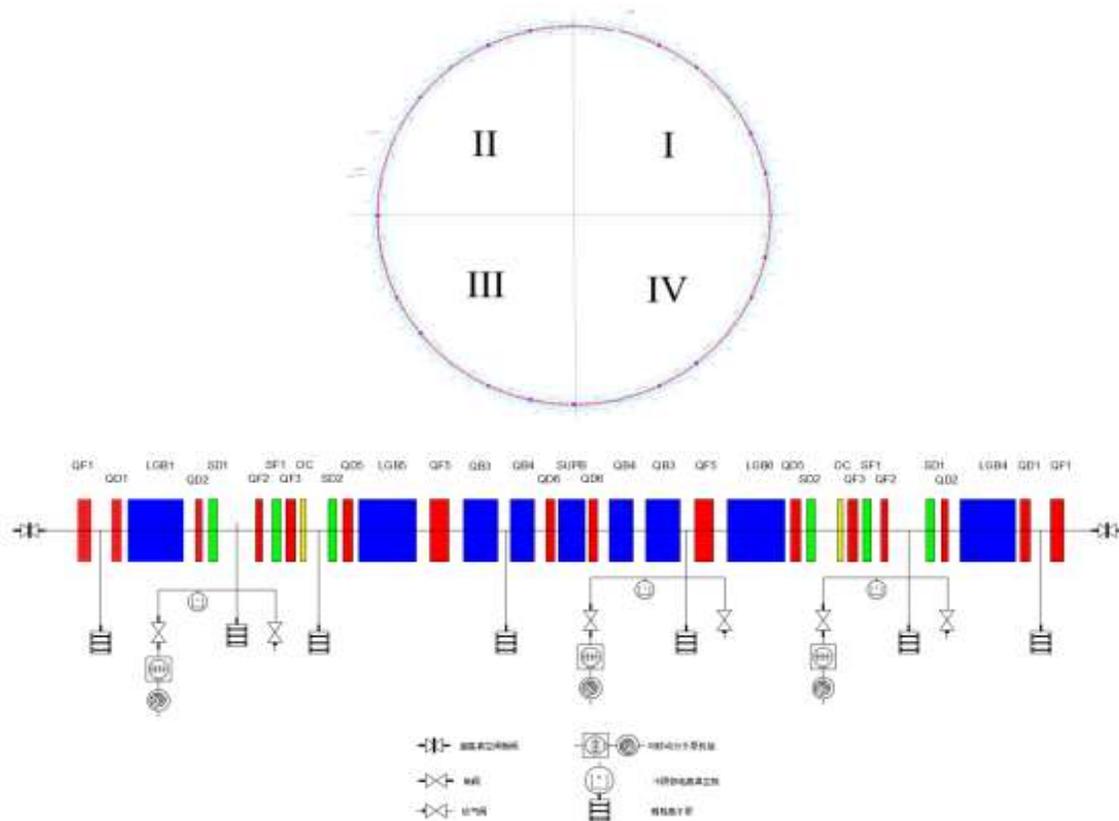


图 1. 储存环 Lattice 布置示意图

根据 7BA 标准单元结构及磁铁之间间隙以及束测元件的空间布局，储存环真空系统布局为：每两个相邻 7BA 标准单元通过 4 个全金属超高真空 RF 屏蔽插板阀划分为三个区段，使得相邻的两个 7BA 之间的直线节为独立区段，方便插入件的安装。每个标准单元配置 3 套冷阴极电离真空规、7 台

离子泵(6 台 30L/s 和 1 台 50L/s)。直线节根据高频系统、注入系统及插入件设备的不同和放气状况单独考虑泵的选型及数量。

1.2.2 标准单元真空盒分段

储存环标准单元真空盒分段、设计主要考虑以下几点原则：1、标准单元有 12 个 BPM，物理明确的给出了坐标，考虑到安装准直以及 NEG 膜激活时真空盒的热变形，所以 BPM 和屏蔽波纹管采用一体式加工，不与真空盒焊接在一起，便于后期维护、更换；2、前室真空盒跨度比较大，真空盒变形比较严重，尽可能减少前室真空盒的长度和数量；3、标准单元的长 18.86m，根据空间位置至少要设计 3 个泵站，用于系统预抽；4、真空盒结构设计要充分考虑同步辐射光的吸收和同步光的引出需要，并设计必要的水冷结构，以确保真空盒的运行安全。为了减小前室真空盒的跨度，引光口在满足设计需要的情况下尽可能前置。

基于以上 3 点，目前将整个标准单元划分为 20 个真空盒，见图 2。

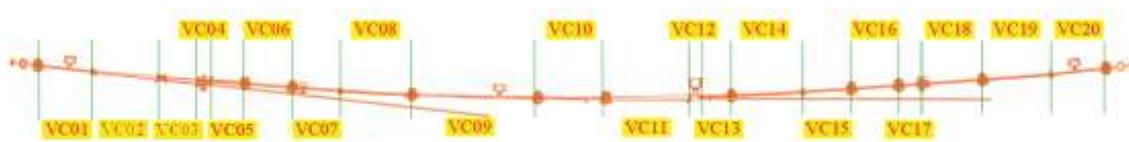


图 2. 真空盒分段

1.3 真空盒材料和结构

1.3.1 材料选择

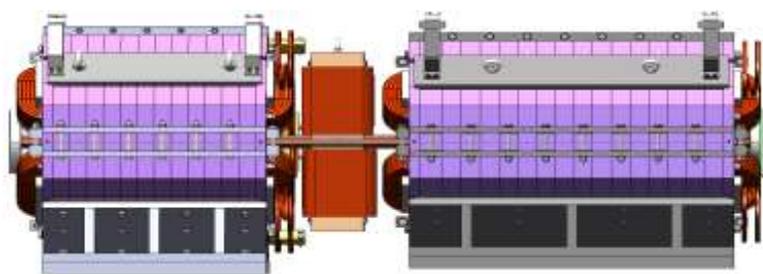
每个 7BA 标准单元包含多种规格真空盒，非引出光位置主要采用内径 24mm，壁厚 1mm 的铜合金真空盒，因为铜合金具有良好的机械、磁和热性能，以及其可用性和可制造性，在国内外四代光源设计中已经得到了广泛应用[1]。考虑到软化温度和束流动力学的阻抗需求，真空盒的主材料选择铬钴铜 C18150（软化温度比含银合金铜 C10700 高 200℃）。引出光位置真空盒采用 316LN 不锈钢（内壁镀铜）或者铜合金（C18150 或 10700）加工制造。快校正子的真空盒材料将采用 Inconel 625。

1.3.2 标准真空盒结构

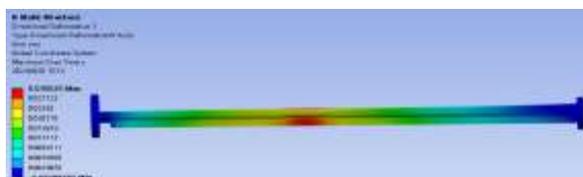
20 个真空盒中包含 5 个前室真空盒（VC02、VC03、VC10、VC11、VC19），2 个分光真空盒（VC04、VC12），其余均为圆截面管道，采用外水冷结构对上游的同步辐射光实现分布式吸收。下面以 VC11 和 VC12 为例，描述真空盒的相关设计过程。

➤ VC11 真空盒

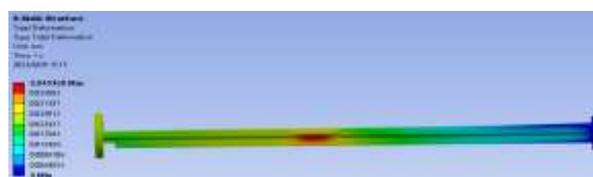
VC11 真空盒沿束流方向对应的磁铁依次是反向二四极组合铁、校正铁、正向二四极组合铁，如图 4(a)所示，两块二四极组合铁采用 C8150 材质，校正铁位置采用 Inconel 625，该真空盒由三段拼焊而成。因为在下游需要引出超强弯铁产生的同步辐射光，该位置真空盒设计为前室真空盒，前室侧面设计有水冷管道吸收部分同步辐射产生的热量。真空盒束流管道由向外、直线段、向外三部分拼焊而成，为了焊接壁厚一致，外轮廓也做了相应程度的圆弧处理。为了验证在真空条件下，结构变形是否满足要求，采用 Ansys Workbench 对 VC11 真空盒进行静态结构仿真计算，结果见图 4(b)和 (c)。X_{Max} 变形量 0.03mm，总变形量 0.04mm，形变在可接受范围内。



(a) 真空盒与磁铁装配示意图



(b) X 方向变形

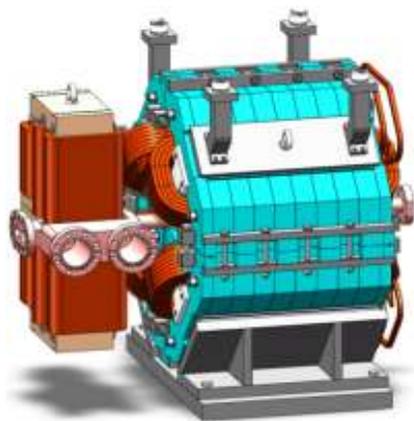


(c) 总变形

图 3. VC11 真空盒在大气压下的变形

➤ VC12 真空盒

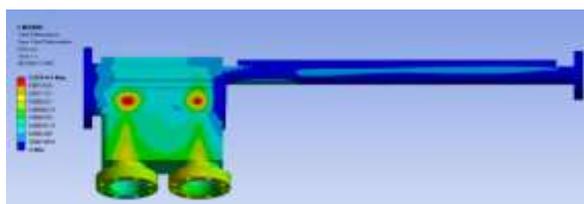
VC12 是超强弯铁同步光引出真空盒，考虑到同步辐射光会扫到束流管壁，并且该位置安装的是慢校正铁，所以真空盒整体采用 C8150 的材质，设计见图 4 (a) 和 (b)。沿束流方向，第一个侧向法兰口配置跨式光子吸收器，第二个法兰口用于连接主抽泵，以确保集中式光子吸收器位置引起的光致气体解析能够被有效、快速的抽走，维持稳定的系统压力。真空盒因为校正铁间隙以及光子吸收器尺寸影响，在校正铁的位置，壁厚薄、跨距大，采用 Ansys Workbench 进行结构仿真计算，在大气压力和重力作用下，最大形变 0.001mm，最大应力 8.9Mpa，形变在可接受范围内，仿真计算结果见图 4 (c) 和(d)。



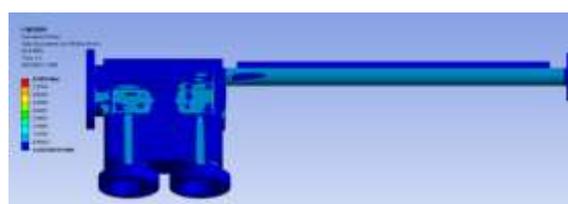
(a) 磁铁与真空盒装配图



(b) VC 真空盒



(c) 变形



(d) 等效应力

图 4. VC13 真空盒在大气压下的变形

2 同步辐射光对真空盒温升影响

储存环真空系统设计中，同步光产生的真空盒温升必须考虑。计算同步辐射功率分布以及同步光对真空盒造成的温升是真空盒系统设计的关键点之一。

为了估算热负载，假设一个电子束流均匀的在环中运行，那么它发射的辐射功率（kW）由著名的公式（Sands，1970）可以求出：

$$P_{SR} = \frac{88.5E^4I}{\rho}$$

式中：E 为总能量（GeV）；I 为总流强（A）；ρ 为弯铁半径（m）。

沿着环的线性功率密度（kW/m）为：

$$P_L = \frac{P_{SR}}{2\pi\rho} = \frac{88.5E^4I}{2\pi\rho^2}$$

对于深圳产业光源，按照设计参数 E=3.0 GeV，I=0.3 A，ρ=13.90 m，从上面的方程可算出最大总辐射功率 P_{SR} = 154.72 kW，最大线性功率密度 P_L = 1.77 kW/m。

7BA 标准单元弯转磁铁产生的同步辐射功率分布见表 1。

表 1. 标准单元产生的同步辐射功率

弯铁名称	LGB1	LGB2	BD1	BD2	BD1	LGB2	LGB1
长度 (m)	1.0350	1.0895	0.6120	0.5312	0.6120	1.0895	1.0350
弯铁半径 (m)	15.5701	82.0239	25.08	25.90	25.08	82.0239	15.5701
	21.5249	52.6126				52.6126	21.5249
	29.7648	33.7615				33.7615	29.7648
	4114.69	21.6694				21.6694	4114.69
	56.8575	13.9004				13.9004	56.8575
磁场强度 (T)	0.6427	0.1220	0.3990	0.3864	0.3990	0.1220	0.6427
	0.4649	0.1902				0.1902	0.4649
	0.3362	0.2964				0.2964	0.3362
	0.2432	0.4618				0.4618	0.2432
	0.1760	0.7199				0.7199	0.1760
功率 (kW)	0.589	0.647	0.333	0.271	0.333	0.647	0.589

采用 SynRad+ 进行同步辐射仿真计算，得到功率密度分布如图 5(a)所示。功率最大点位于 BD2 磁铁的下游位置，最大功率密度 21.7w/mm²。将得到的功率密度数据映射到真空盒受光面，进行仿真计算。采用 25℃冷却水和空气换热，真空盒温升最大点位于超强弯铁真空盒下游，温度为 73℃。温升最大位置截面图见图 5(b)。

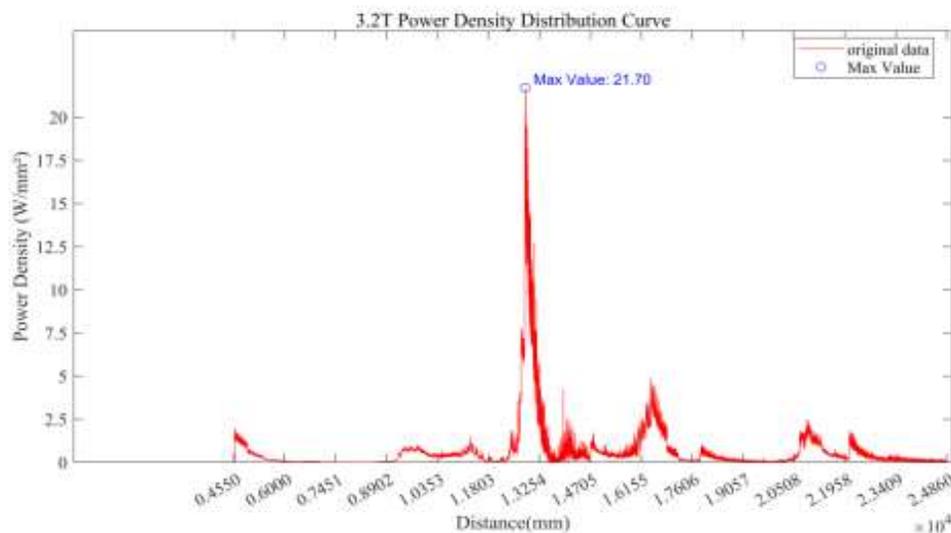


图 5. (a) 功率密度分布曲线

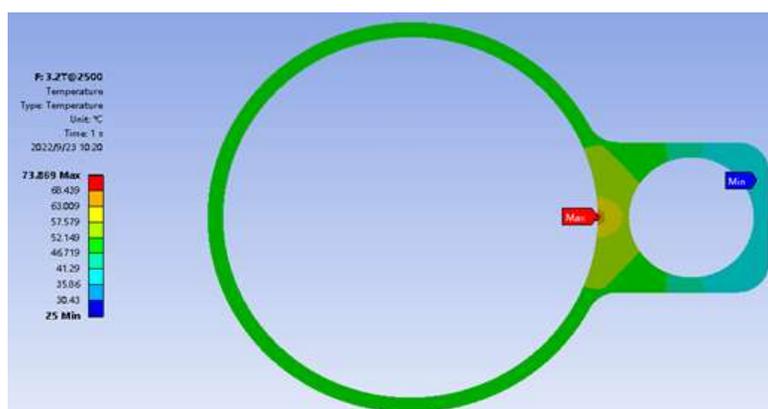


图 5. (b) 真空盒温升最高位置截面图

3 标准单元压力分布

一个 7BA 标准单元长度约 18.86m，拟配置 7 台离子泵（6 台 30L/s 和 1 台 50L/s）进行抽气。配泵位置基于空间位置、光致解析造成压力突增（光子吸收器）以及流导限制等因素，平均两台泵距离 2.5m 左右。单独依靠离子泵作为主泵抽气，会导致压强分布严重不均，同步辐射热解析及光致解析的存在又会进一步加剧压力的不均匀性，难以实现动态平均压强优于 $1.0 \times 10^{-7} \text{Pa}$ 的技术指标，同时也会对束流的稳定性和寿命造成严重影响。目前全球第四代光源普遍采用的解决方案是管道内壁通过磁控溅射镀厚度 $1 \mu\text{m}$ 左右的 Ti-V-Zr 吸气剂薄膜^[2]。利用 Ti-V-Zr 吸气剂薄膜对 H_2 、CO 等极性分子良好的吸气性作为同步辐射真空管道的主抽泵和维持泵。根据国外实验数据，吸气剂薄膜的抽速可达到 0.5L/s/cm^2 ^[3]，薄膜质量存在差异性，抽速也会有所不同，保留安全系数，薄膜抽速按照 0.4L/s/cm^2 进行仿真计算。

储存环气载主要有材料的热出气和同步辐射光导致的光子出气。所有的真空系统都存在热出气，真空管道保证良好的冷却可以降低热出气。热出气相对于同步辐射光产生的光致解析基本上可以忽略不计。因此，同步辐射光产生的气体负载决定了其动态压强的分布。

为了估算光致解析引起的放气量，采用一个近似公式(Grobneretal.)，光致解析产生的有效气载(Torr.L/s)为：

$$Q_{gas} = 24.2E\eta$$

深圳产业光源，总的动态气体负载 $Q_{\text{gas}} = 4.36 \times 10^{-5} \text{ Torr L/s}$ ($\eta = 2 \times 10^{-6}$)。在不考虑直线节长度 (6m) 的标准区段，对长度 18.86m 弧区进行 Moflow+ 压力分布仿真计算，结果见图 6。红色曲线 (仅离子泵的静态真空) 平均压力为 $2.5 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ ，由于细长管道流导的限制，真空度很难提高。橙色曲线 (离子泵+NEG 静态真空)，激活了 NEG 膜，整个管道的压力降到 $7.4 \times 10^{-10} \text{ Pa}$ ，而且压力比较均匀。蓝色曲线 (复合泵+NEG 动态真空)，存在光致解析的情况下，整个管道的压力为 $7.4 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ ，相比于静态真空，压力升高一个数量级，但整体满足设计指标。考虑到 NEG 膜抽速性能随着激活次数的增加存在一定衰减的客观事实，同时考虑到 NEG 薄膜在长期运行工况下的可靠性和稳定性问题，不排除在工程建设阶段，将现有的离子泵更换成为复合离子泵 (SIP+Saes Z400) 来提高系统的抽速冗余。

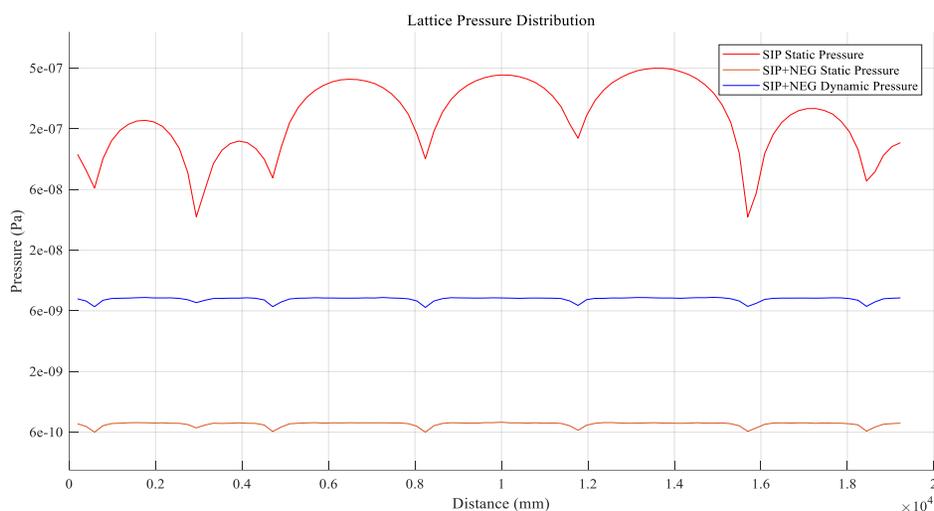


图 6 储存环 Lattice 真空压力分布仿真

4 结束语

深圳产业光源作为第四代同步辐射装置，储存环采用混合型 7BA 磁聚焦结构，空间布局紧凑，为超高系统的设计和实现提出了更高的要求 and 难度。本文围绕深圳产业光源储存环真空系统的设计、真空盒分段、同步辐射功率密度分布计算、真空系统配置和标准单元压力分布仿真计算做了相应的介绍。目前虽然国内 HEPS 在薄壁小孔径真空盒、引出光前室真空盒的成型工艺上有了一定的工程实践，但针对不同装置要求的差异性，我们依然需要在薄壁小孔径真空盒一体化拉拔成型、带前室的引出光真空盒成型、NEG 镀膜工艺研究和样机研制方面继续寻找新的突破口，以提高工程实践过程中大批量加工的技术可行性和运行可靠性。

参考文献:

- [1]. Cox M P, Burrows C W, Day A G, et al. Conceptual Design of the Diamond-II Vacuum System[C]//10th Int. Particle Accelerator Conf.(IPAC'19), Melbourne, Australia, 19-24 May 2019. JACOW Publishing, Geneva, Switzerland, 2019: 1362-1364.
- [2]. Detailed Design Report on the MAX IV Facility .
- [3]. Al-Dmour E, Einfeld D, Pasquaud J, et al. Vacuum System Design for the MAX IV 3 GeV Ring[J]. Proceedings of the IPAC, 2011, 11: 1554.

深圳产业光源增强器真空系统设计

李磊 刘鹏飞* 雷艳辉 朱潇潇

深圳综合粒子设施研究院, 广东深圳, 邮编 230026

*Email: liupf@mail.iasf.ac.cn

摘要: 深圳产业光源增强器由 3 个超周期组成, 每个超周期由 18 个标准单元和 1 个直线节组成。本文介绍了深圳产业光源的增强器真空系统设计, 包括总体布局, 标准单元真空盒的结构设计、热分析, 标准单元真空系统的压力分布仿真计算。对标准单元真空盒进行热分析计算, 在室温下真空盒的运行温度可保持在 32℃ 以下; 模拟计算了增强器标准单元真空系统的静态平均真空度为 3.35E-9mbar, 动态平均真空度为 1.45E-8mbar。

关键词: 增强器, 真空系统, 真空盒, 压力分布

背景

深圳产业光源 (Shenzhen Industrial Light Source Facilities, SILF) 是深圳光明科学城规划的重大基础设施之一, 作为第四代同步辐射光源, 其主体是一台能量为 3.0GeV、流强 300mA、发射度不高于 100pm-rad 的电子储存环, 注入器主要由直线加速器、低能输运线、增强器、高能束流输运线构成。增强器将从直线加速器注入的 200MeV 的电子束加速到 3.0GeV 并通过高能输运线注入储存环。在增强器以 2Hz 的频率对电子束团进行升能的过程中, 受交变磁场影响, 会在真空盒上存在一定的涡流效应, 为了减少这种效应对束团运行的影响, SILF 增强器真空盒拟采用薄壁无磁不锈钢进行加工制造。在运行过程中, 电子在增强器中产生的同步辐射光会对真空盒造成一定的温升, 同时, 光致解吸的气载会对系统真空度产生较大的扰动。因此, 对增强器真空系统设计提出了一系列要求。

[1-3]

1. 增强器真空系统设计的基本要求

对增强器真空系统来说, 基本的物理要求如下:

- 1) 整个增强器真空系统静态真空度设计指标为 $\leq 1.33E-8$ mbar, 动态真空设计指标为 $\leq 1.33E-7$ mbar;
- 2) 真空盒内径包络束流清晰区;
- 3) 真空盒材料及壁厚的选择引起的涡流对弯铁磁场的影响要控制在物理对磁铁特性的要求以内;
- 4) 真空盒外径小于磁铁孔径, 留出一定的准直安装间隙;
- 5) 在满足性能要求的情况下, 结构设计要尽可能的简单可靠, 便于维护, 同时兼顾工程造价。

2. 总体布局

SILF 增强器是一个电子同步加速器, 作为注入器为储存环提供满能量的电子注入。在系统运行时, 增强器将束流能量从 200MeV 加速到 3.0GeV, 发射度小于 10nm.rad, 然后将束流通过高能输运线注入到储存环中完成流强累积, 在 top-up 注入运行模式下为储存环提供束流补充。深圳产业光源增强器全长 240m, 分为 3 个超周期, 单个超周期由 18 个 FODO 标准单元结构和两端的匹配直线节构成。直线节主要用于注入、引出和高频腔的安装布局, 总体布局图如图 1 所示。为方便安装调试, 进行真空获取、真空检漏和维护, SILF 增强器通过全金属闸板阀将全环划分为 9 个真空区段: 注入段、引出段和高频段两端分别设计一个全金属闸板阀, 同时每个超周期中设计一个全金属闸板阀。

图 2 展示了半个超周期的真空系统布局示意图，每个区段都有 2 套用于系统粗抽的全金属角阀。真空系统工作时，先通过无油涡轮分子泵机组将系统粗抽至 10^{-7} mbar，然后以离子泵和吸气剂泵为主泵实现超高真空获取和维持。

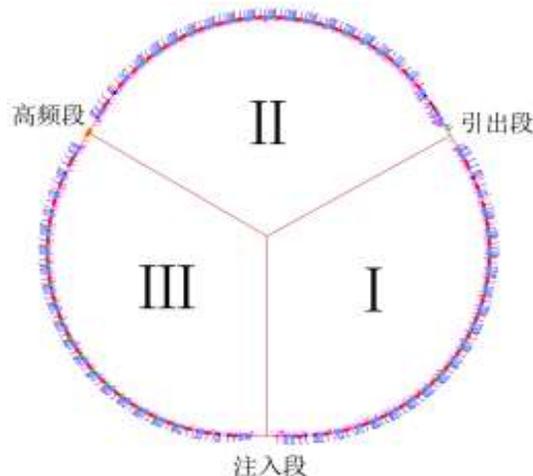


图 1. 增强器的总体布局示意图

每个区段拟配置 2 个冷阴极电离规，用以实时监测增强器系统的真空度，特殊部位进行单独考虑，用残余气体分析仪测量系统的分压强。各区段之间通过快阀进行连锁保护，如果某一区段真空度变差，连锁保护系统自动关闭全金属闸板阀，保护相邻区段的系统真空度。真空盒之间，束测元件与真空盒之间采用焊接波纹管作软连接，用来吸收整个真空系统热胀冷缩带来的真空盒位移，以及加工、准直和安装的误差。

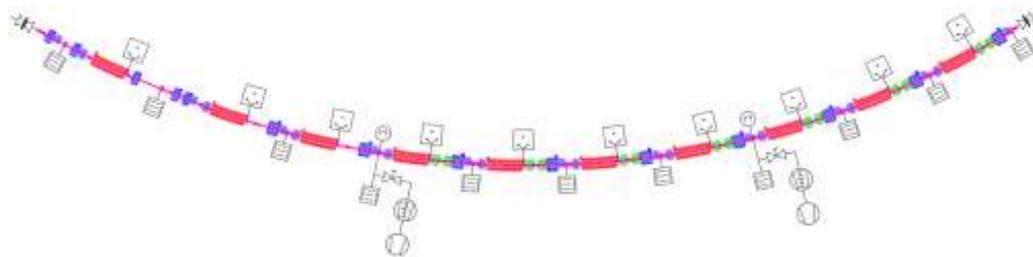


图 2. 半个超周期的真空系统布局示意图

3. 标准单元真空盒的设计计算

3.1 标准单元真空盒布局和选材

SILF 增强器真空系统主要由标准单元真空盒组成，还包括注入、引出、高频和束测等特殊真空盒，这里只考虑标准单元真空盒。如图 3 所示，根据物理设计要求，标准单元真空盒分为弧区和直线区。在弯铁下游的弧区真空盒设计了 NEG 泵法兰接口，在直线区设计了离子泵法兰接口。整个系统设计无集中式光子吸收器，弯铁产生的同步光直接照射在真空盒内壁，用分布式方式由真空盒直接吸收。

增强器全环选用 316L 不锈钢材料，其具有强度高、低的磁导率和电导率，并且容易加工、制造费用较低等特点。

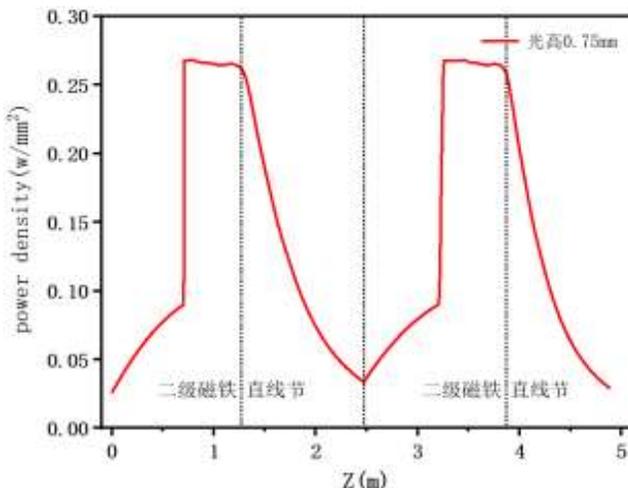


图 4. 沿束流方向真空盒内壁的功率密度分布

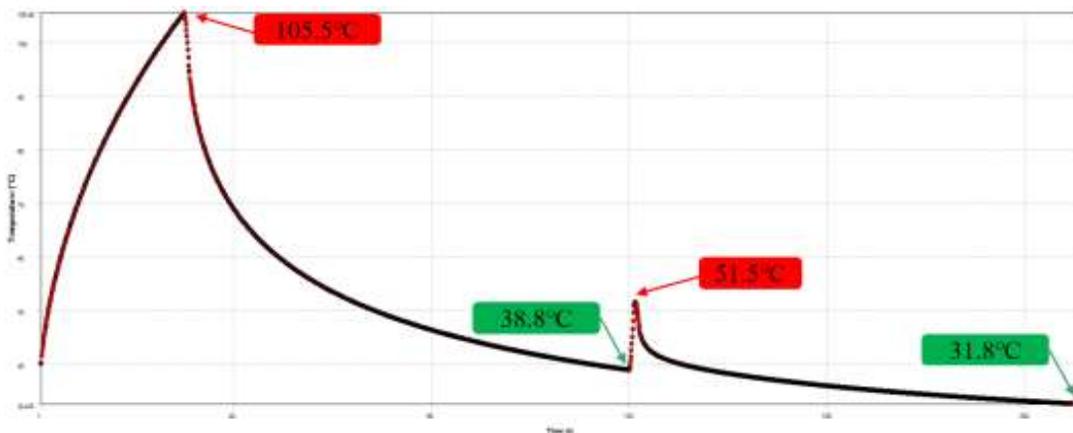


图 5. 椭圆真空盒的同步辐射光温升分析

从储存环注入方式分析，储存环第一次束流注入时间 30s，后续将采用 Top-up 模式注入，每次补充束流持续时间 1s，重复周期 90s。在这种注入运行模式下，增强器升能占比很低，增强器将在很长一段时间内处于待机状态。采用 ANSYS 瞬态热功率的方式进行了仿真计算，结果如图 5 所示，在隧道 25℃环境温度下，通过自然冷却完全可以保证增强器真空盒长期安全运行在 30℃左右，无需进行额外水冷。

4.标准单元真空盒的压力分布计算

4.1.气载分析

增强器真空系统的气载主要包括真空盒的热脱附气载和同步辐射光在真空盒内壁产生的光致解吸气载。没有束流时，热脱附气载对真空系统的压力分布起主导作用，所以静态压强由真空盒内壁热脱附放气决定。束流通过时，真空盒内壁由同步辐射光引起的光致解吸气载远高于真空盒的热脱附气载，光致解吸气载决定了增强器真空系统的动态压力分布。

4.2.泵的配置和标准单元的压强分布计算

深圳产业光源增强器全环采用不锈钢材料 316L，真空盒不进行烘烤，取气体热解吸速率 $q=1.0E-10 \text{ mbar l/(s cm}^2\text{)}$ ，一个超周期真空盒内表面积为 91398.2 cm^2 。所以热脱附气载 Q_s 计算为

$$Q_s = Aq = 9.2E-6 \text{ mbar l/s}$$

增强器的静态气载为 $Q_s = 9.2E-6 \text{ mbar l/s}$ ，要达到常温下静态真空 $\leq 1.33E-8 \text{ mbar}$ ，需要真空泵组的有效抽速约为 692 l/s 。名义抽速通常取有效抽速的 2 倍，取 $S_p = 1.38E3 \text{ l/s}$ ，按照单个超周期的真

空系统设计布局要求, 单个超周期配备 21 台离子泵, 所以选择名义抽速为 70 l/s 的离子泵。对于动态真空, 气体解吸主要发生在弯铁真空盒处, 为避免弯铁下游局部真空盒气载过大, 在每个弯铁真空盒下游设置了 SAES 的 Z200 吸气剂泵, 保证了增强器内束流通过时的平均真空度达到物理要求。

采用 Molflow+ 进行建模, 对 8 个标准单元的真空压力分布进行相关计算。

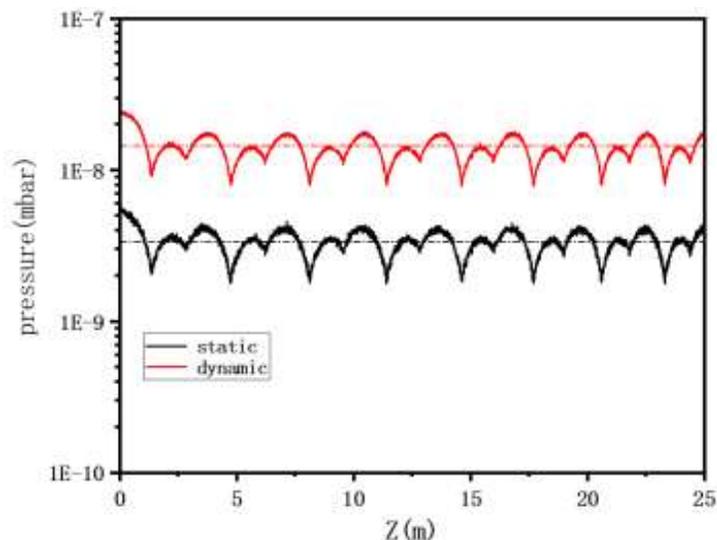


图 6. 8 个标准单元的压力分布

采用 CAD 软件对增强器的 8 个标准单元进行建模, 在 Molflow 中进行真空压力分布计算。黑色线表示离子泵和吸气剂泵同时工作的静态压力分布曲线, 其平均压力约为 $3.35\text{E-}9\text{mbar}$, 高于要求真空度 $1.33\text{E-}8\text{mbar}$, 满足设计要求。

动态压力计算结合 Synrad+, 将在真空盒表面累积的光子数换算为光致解吸放气量, 模拟计算了束流强度为 $3.0\text{GeV}, 1\text{Ah}$ 时的动态压力分布^[5], 如图 6 中红色线所示。动态平均压力计算为 $1.45\text{E-}8\text{mbar}$, 满足物理设计指标。

5. 总结

本文从总体布局、标准单元真空盒的设计以及压力分布计算方面介绍了深圳产业光源增强器真空系统的设计。全环真空盒均采用了圆截面结构, 简化了真空盒的加工工艺, 降低了工程造价。对真空盒的热仿真计算结果表明, 真空盒长期运行温度可保持在 32°C 以下, 无需水冷。标准单元节真空系统的静态平均真空度 $3.35\text{E-}9\text{mbar}$, 动态平均真空度 $1.45\text{E-}8\text{mbar}$, 压力分布均匀, 布泵合理。目前增强器真空系统的设计正在稳步推进。

参考文献

- [1] Kiselev V A, Anashin V V, Gurov S M, et al. NSLS-II Booster Vacuum System. Proceeding of RuPAC2014, Obninsk, Kaluga region, Russia, THPSC11, 2014.
- [2] Steve Dierker, National Synchrotron Light Source II Preliminary Design Report, 2017
- [3] 王志山, 蒋迪奎, 陈丽萍等. SSRF 增强器真空系统设计和真空室研制. 真空, 2002(01):42-45.
- [4] 真空设计手册, 达道安
- [5] Anashin V V, Collins I R, Dostovalov R V, et al. Comparative study of photodesorption from TiZrV coated and uncoated stainless steel vacuum chambers. Vacuum, 2004, 75(2): 155-159.

EAST 装置 MGI 与 SPI 注入对等离子体破裂缓解的比较

赵胜波^{1,2} 左桂忠^{1*} 庄会东^{1*} 元京升^{1,2}

¹中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031

²中国科学技术大学, 合肥 230026

*E-mails: zuoguizh@ipp.ac.cn, hdzhuang@ipp.ac.cn

摘要: 等离子体破裂是指等离子体的位形失控, 电流在毫秒量级内熄灭, 放电终止的事件。等离子体破裂时, 其内部巨大的储能瞬间释放, 对核聚变装置及周围人员安全构成巨大威胁。对于未来高参数条件下运行聚变装置, 直接承受等离子体破裂带来的破坏是不被允许的。研究发现, 在等离子体即将失控发生破裂之前。如果能向等离子体中注入一定量的中性粒子, 则中性粒子会被电离并辐射能量, 此过程会吸收等离子体能量, 等离子体的储能会被相对平和的耗散, 免除或降低等离子体破裂带来的危害。

MGI (Massive Gas Injection) 技术, 是指将高压的气体粒子注入即将破裂的等离子体中。该技术发展较早, 相对成熟, 优点在于反应迅速灵敏, 设备简单紧凑。缺点在于, 单纯的高压气体喷射难以到达等离子体芯部。

SPI (Shattered Pellet Injection) 技术, 是指将气体冷凝成冰弹丸, 再将冰弹丸加速注入即将破裂的等离子体中, 在进入等离子体前会经过一个破碎装置, 使整颗的冰弹丸散裂, 均匀的耗散等离子体能量。SPI 技术是一种新颖的技术, 其最大的优点就是固态的弹丸可以被打进更深的等离子体芯部。

EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 是世界首个全超导托卡马克装置, 创造了多项世界纪录。EAST 装置多次开展等离子体破裂缓解实验研究 MGI 与 SPI 技术在等离子体破裂缓解上的作用。研究发现, SPI 注入 (约 3.5ms) 有着比 MGI (约 2ms) 更长的 pre-TQ (Thermal Quench) 时间, MGI 注入会比 SPI 注入引起更强的边界辐射。同时, 实验中也明显的发现了 n=1 型 MHD (magnetohydrodynamics) 不稳定性的存在。

实验结果反应了 MGI 与 SPI 在等离子体破裂缓解效果上的异同, 在一定程度上证明了 SPI 技术作为一种新型的破裂缓解手段的优越性。为未来聚变装置的破裂缓解装置的设计积累了实践经验。

关键词: SPI, MGI, 破裂缓解, 托卡马克, EAST

国产 ODS-RAFM 在高温静态液态锂中的腐蚀特性研究

张德皓^{1, 2} 孟献才^{1, 3} 庞永强³ 李旭³ 左桂忠¹ 胡建生^{1*}

1 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031

2 中国科学技术大学, 合肥 230026

3 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室), 合肥 230031

E-mails: hujs@ipp.ac.cn (J. S. Hu)

液固偏滤器是未来聚变堆偏滤器的重要候选方案, 其中液态锂偏滤器最具发展前景。其核心包括固态靶板和液态锂回路系统, 而液态锂具有腐蚀性, 所以其与结构材料的相容性是整个液态锂回路系统的关键, 因此两者的相容性研究得到了广大科研工作者的关注^[1,2]。ODS-RAFM 钢是在 RAFM 钢的基础上添加了添加不同元素纳米氧化物, 提高其上限使用温度, 同时通过优化材料热处理工艺以获得更加均匀的微观组织结构和更高的机械强度, 是液态锂回路的候选的结构材料。本文开展了 ODS-RAFM 钢在 723 K 以及 823 K 高温液态锂中长达 500 小时的腐蚀实验, 对比了两种温度下 ODS-RAFM 钢在液态锂中的腐蚀行为, 评估了 ODS-RAFM 钢在液态 Li 中的耐腐蚀性。

研究表明 ODS-RAFM 钢在 723 K 和 823 K 液态锂中均发生质量损失, 且质量损失分别为 $5.8 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $3.8 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 质量损失速率随液态锂温度的升高明显增加, 823 K 下的腐蚀速率几乎是 723 K 的 2 倍, 耐腐蚀等级分别为 I 和 II 级, 评估结果为很耐蚀。腐蚀后的 ODS-RAFM 钢样件表面呈现为不均匀亮度, 说明样件发生了非均匀腐蚀。在高放大倍率下, 明显观察到样件表面上的小孔和沿晶界分布的腐蚀颗粒, 表明 ODS-RAFM 钢发生了孔蚀和晶界腐蚀。腐蚀后的样品表面成份相较于原始表面均出现明显的碳富集, 表面上的铬含量有轻微的消耗; 表面的腐蚀颗粒中几乎不含有 Fe 元素, 但含有大量的碳 (~15%) 和铬(30~40%) 以及少量的镍元素, 由此推测该腐蚀颗粒物可能是铬的碳化物。823 K 腐蚀后的样品表面腐蚀颗粒的数量明显比 723 K 腐蚀后的数量多, 而且呈现生长趋势, 说明随着温度升高, 样品发生了更加严重的晶界腐蚀。对腐蚀前后的机械性能进行了比较, 发现表面硬度的硬度值范围仍为 $231 \pm 5 \text{ HV}$; 而且其最大应力、最大应变以及屈服强度等性能参数在腐蚀实验后未发生明显变化, 说明液态锂的腐蚀对其机械性能未造成显著影响。

综合以上实验结果, 发现温度是影响液态锂对 ODS-RAFM 钢腐蚀的重要因素, 发现 ODS-RAFM 钢在液态锂中的腐蚀机制包含: 钢成份溶解、溶解成份的化学反应以及液态锂向材料内部渗透三个方面, 其中化学反应和液态金属渗透是造成钢材腐蚀的主要原因。提出减少钢中自由碳和铬的含量或在钢熔炼过程中使二者形成稳定碳化物来缓解 ODS-RAFM 钢在液态锂环境中腐蚀的建议。

致谢:

本研究内容得到国家重点研发计划项目(2022YFE03130000), 国家自然科学基金(11905138), 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室)项目(21KZS202、21KZS208), 中国科学院合肥大科学中心“高端用户培育基金(2020HSC-UE010、2021HSC-UE013)的经费支持。

参考文献:

[1] Q. Xu. et al, Fusion Eng. Des. 83(2008).

[2] P. He. et al, J. Nucl. Mater. 539 (2020).

EUV 光刻机中的真空技术

李小金, 蔡宇宏, 李正清, 韩仙虎, 秦丽丽, 刘筱文, 王毅

兰州空间技术物理研究所, 甘肃兰州, 邮编 730000

*Email: 375790285@qq.com

摘要: EUV 光刻机也叫极紫外光刻机 (Extreme Ultraviolet Lithography), 它是以 13.5nm 波长的极紫外光作为光源。由于极紫外光易被包括空气在内的所有物质所吸收, 因此 EUV 光刻机只能在真空环境下运行。与此同时, EUV 光刻机对真空系统有着特殊的要求, 与 EUV 光刻机有着良好兼容性的真空系统对提高 EUV 光刻机的寿命和良率有至关重要的影响。通过 EUV 光刻机中的关键架构和工艺所涉及的真空技术, 介绍和探讨了 EUV 光刻机主要腔室特定真空环境的获得、兼容性设计、真空系统的材料对光刻质量的影响以及真空环境下的污染监测方法。

关键词: EUV 光刻机; 真空技术; 兼容性设计; 污染监测

Vacuum technology of the EUV lithography

LI Xiaojin, CAI Yuhong, LI Zhengqing, QIN Lili, LIU Xiaowen, WANG Yi

Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China

Abstract: EUV lithography is also called Extreme Ultraviolet Lithography, which uses extreme ultraviolet light with a wavelength of 13.5nm as the light source. Extreme ultraviolet light is easily absorbed by many materials, including air, so EUV lithography can only operate in the vacuum environment. At the same time, EUV lithography have special request for vacuum system. In particular, vacuum system with good compatibility important impact on improving the life and yield of the EUV lithography. This paper described and summarized the acquisition of the specific vacuum environment in the main chambers, design of compatibility, influence of vacuum system materials on the quality of lithography, and the methods of monitoring contamination in the vacuum environment of the EUV lithography through the vacuum technology involved in the key architecture and process of the EUV lithography.

Key words: EUV lithography, vacuum technology, compatibility design, inhibit contamination

参考文献

- [1] J Miyazaki, Yen A . EUV Lithography Technology for High-volume Production of Semiconductor Devices[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2019, 32(2):195-201.
- [2] Hoon C S , San W C . Development of the Vacuum Spark as an EUV Source for Next Generation Lithography[C]. IEEE International Conference on Semiconductor Electronics. IEEE, 2006.
- [3] B.M. Mertens. Quantitative Measurement of EUV Resist Outgassing[J], Microelectronic Engineering 53 (2000) 659-662

1.3GHz 9cell 8 腔超导加速模组的真空系统

刘佰奇* 翟纪元 贺斐思 张占军 韩瑞雄 潘卫民

中国科学院高能物理研究所, 北京, 邮编 100049;

*Email: liubq@ihep.ac.cn

摘要: 含 8 个 1.3GHz-9cell 超导腔的超导加速模组是大连先进光源 (DALIS)、上海硬 X 射线自由电子激光装置 (SHINE)、深圳中能高重复频率 X 射线自由电子激光装置 (S3FEL)、美国直线加速器相干光源 (LCLS-II)、欧洲自由电子激光 (EXFEL) 等国内外大型超导直线加速器使用的标准加速结构。高能所经过十多年自主研发设计, 攻关解决了中温退火、冷电抛光、洁净真空控制等多项工艺技术, 完成了一整套高品质因数超导加速模组的研制、总装和整体调试, 其性能指标达到了国际先进水平。

与常规加速器真空系统不同, 高品质因数超导加速模组的真空系统需要考虑真空工艺对超导腔洁净度的影响, 以及低温环境对真空系统的影响。第一, 洁净真空是超导腔达到高性能参数的必要条件, 1 个百微米尺寸量级的微尘粘附在超导腔内表面就可能引起超导腔运行时产生场致发射, 降低超导腔的性能水平, 因此超导腔串在洁净间组装、抽真空、充气、转运, 普通环境中真空维护等方面均需要控制操作工艺, 避免微尘输运。第二, 超导组元运行时, 超导腔内壁为 2K 低温, 对束流真空具有气体吸附作用, 因此超导组元真空系统的设计、配泵与真空获得工艺, 束流真空压力在降温、复温过程中的变化, 均需要考虑低温环境的影响, 另外超导腔老练、耦合器老练、以及暗电流等情况也会导致束流真空产生波动变化。

本文详细介绍 1.3GHz-9cell 超导模组的束流真空系统。包括常温与低温状态下的真空压力设计计算、设备加工与腔串组装过程中的洁净控制、真空获得与恢复常压过程中的颗粒输运控制、超导腔降温与复温过程中真空压力的变化分析、超导模组调试对真空系统的影响等。该工作保障了高品质因数超导模组在水平测试过程中真空系统充分洁净、运行真空度稳定。

关键词: 洁净真空, 超高真空, 超导高频腔, 超导模组

参考文献:

- [1] 刘佰奇, 彭晓华, 翟纪元, 等. 1.3 GHz 9-cell 超导腔加速组元的真空系统[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(005):538-541. DOI:10.13922/j.cnki.cjovst.2016.05.08.
- [2] Experience with vacuum system from DESY and CEA solutions[C]. Technology Collaboration meeting, 2020.

一种单侧压封废束桶束窗的设计及热结构分析

林涵文¹ 张浩¹ 杨家岳¹ 尉伟^{1*} 黄礼明¹ 张未卿¹

鄂得俊¹ 陶凯¹ 赵峰¹ 魏建平¹ 常仁超¹

¹深圳综合粒子设施研究院, 广东深圳, 邮编 518107

*E-mail: weiwei@mail.iasf.ac.cn

摘要: 深圳中能高重频 X 射线自由电子激光 (S³FEL) 将建设成为世界上第一座工作在软 X 射线波段的高重频自由电子激光。废束桶^[1]是自由电子激光装置中用于调束的重要设备, 废束桶束窗则是废束桶的重要组成部分, 用于过滤低能光谱、吸收和释缓辐射功率, 同时还被用做低真空区间与高真空区间的隔离装置。本文设计了一种带有水冷结构的单侧压封废束桶束窗, 选择铍^[2-3]作为束窗的材料, 利用蒙特卡罗粒子输运程序 FLUKA 软件^[4-6]对不同厚度 (0.5~2mm) 的铍窗表面沉积功率进行了计算, 并使用有限元分析软件 ANSYS^[7]计算了 4 种厚度 (0.8mm、1.2mm、1.6mm 和 2mm) 铍窗的最大温度、应力以及形变量, 分析得出厚度为 1.6mm 的铍窗效果为 4 种厚度中最佳, 其表面最大温度为 103.98℃, 最大应力为 254MPa, 最大应力位于与铝镁合金密封圈接触的位置, 中心处最大形变为 0.055mm、应力为 152.65MPa。计算结果验证了所设计的束窗结构的整体稳定性, 为 S³FEL 废束桶束窗的后续设计提供了理论依据和参考。

关键词: 自由电子激光; 高重频; 废束桶; 束窗; 有限元分析

参考文献:

- [1] 李迪开,曹磊峰,池云龙,等.95 MeV 射频电子直线加速器辐射防护分析[J].强激光与粒子束, 2022, 34(6): 064008. (Li Dikai, Cao Leifeng, Chi Yunlong, et al. Radiation protection analysis of 95 MeV RF electron linac[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(6): 064008).
- [2] 陈旭,杨新建,齐京,朱秀珍.金属 Be 真空出气性能的测试[J].真空科学与技术,2002(06):65-68.
- [3] 张浩,黄礼明,赵峰,林涵文,常仁超,魏建平,鄂得俊,尉伟,陶凯,杨家岳,张未卿.一种高重频废束桶束窗的设计及热结构分析[J].强激光与粒子束,2023,35(03):88-93.
- [4] Boehlen T T, Cerutti F, Chin M, et al. The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications[J]. Nuclear Data Sheets, 2014, 120: 211-214.
- [5] Ahdida C, Bozzato D, Calzolari D, et al. New capabilities of the FLUKA multi-purpose code[J]. Frontiers in Physics, 2022, 9: 788253.
- [6] Battistoni G, Boehlen T, Cerutti F, et al. Overview of the FLUKA code[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 82: 10-18.
- [7] 张朝晖.ANSYS12.0 热分析工程应用实战手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010. (Zhang Chaohui. ANSYS12.0 practical handbook for the engineering thermal analysis. Beijing: China Railway Press, 2010).



■ 联系方式

地 址：北京市海淀区中关村南三街8号A楼2段304室 邮 编：100190

电 话：010-62607885、62607991 传 真：010-62605869

网 址：www.cvs.org.cn 邮 箱：meeting@cvs.org.cn

Q Q：2317369989 1563526075 微 信：2317369989 4683686