

D11.半导体材料与器件

分会主席：郝跃院士、王占国院士

D11-01

题目待定

郝跃

西安电子科技大学

D11-02

III-V 族窄禁带半导体量子光电器件

牛智川

中国科学院半导体研究所

新型半导体低维材料与光电量子器件技术发展正处于重要转折期。经典光电器件技术按照摩尔定律迅速演进，支撑着光电信息系统技术向极低功耗、超高速率的不断发展。量子信息器件的研究近几年来也不断获得重要突破，为量子通信、量子计算机和量子测量技术的实用化提供核心器件的解决方案。基于半导体低维材料及其复合量子结构、实现高性能光电器件和量子功能器件是目前主流技术途径。本文主要介绍半导体量子点纳米线复合、量子谐振腔耦合结构的单光子与纠缠光子源器件、光纤耦合量子光源芯片的研究进展；概要报告铋化物 I 型能带量子阱结构的单模激光器、大功率激光器、以及铋化物 II 型能带超晶格红外探测材料与焦平面芯片的研究成果及其应用演示，并展望了上述各类光电与量子器件的发展趋势与研究设想。

D11-03

InP 基 2 微米波段量子阱激光器研究

杨涛

1.中国科学院半导体研究所，半导体材料科学重点实验室

2.中国科学院大学，材料科学与光电技术学院

2-2.5 微米波段是大气窗口之一。目前，该波段激光器有源区材料主要采用 GaSb 基量子阱和 InP 基量子阱结构。与 GaSb 基材料相比，InP 基材料具有以下几方面的优势：1) 高质量、低成本的衬底。此外，InP 的导热率为 GaSb 两倍以上，有利于器件散热。2) 得益于通讯用激光器的发展，具有成熟的器件工艺技术且易与其它器件实现集成。3) 可用适于规模化生产的 MOCVD 制备，有利于降低成本。

本报告将介绍我们在发展 MOCVD 高性能 InP 基 2 微米波段量子阱激光器方面的主要研究进展，包括：1) 实现高质量 1.9-2.4 微米波段 In(Ga)As/InP 多量子阱材料的制备[1]；2) 实现高性能 2 微米波段 In(Ga)As/InP 多量子阱激光器。激光波长 2.15 微米的激光器（脊宽：30 μm，腔长：1.5 mm）单面室温连续出光功率超过 215 mW，无限腔长激光器的阈值电流密度低至 180.8 A/cm²；脉冲电流注入下，室温单面最大峰值出光功率达到 1.35 W [2]；3) 实现高性能 2 微米波段多量子阱分布反馈（DFB）激光器。DFB 激光器边模抑制比达 49 dB [3]；4) 实现 2 微米波段多量子阱耦合脊激光器阵列。在脉冲注入条件下，器件能够在 15-105℃温度范围内稳定工作。15℃时，器件最大单面输出功率达到 2W 以上，阈值电流和斜率效率分别为 0.57A 和 0.5W/A [4]。

本研究得到了国家自然科学基金（61574139）和国家重点研发计划（2017YFB0405302）项目的资助。

关键词：半导体激光器；大晶格失配；InP；InAs；量子阱；中红外

参考文献

[1] 汪明，杨涛，专利授权号：ZL 201110100538.6。

[2] S. Luo et al, Opt. Express, 23(7), p. 8383, 2015.

[3] F. Xu et al, IEEE Photonics Technology Letters, 28(20), p. 2257, 2016

[4] Z. K. Zhang et al, J. Nanosci. Nanotechnol., in press, 2018

D11-04

GaN 基光电子材料与器件

赵德刚

中科院半导体所

D11-05

宽禁带磷化物材料及其光电探测器

张永刚，顾溢

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

工作在可见到紫外波段的光电器件需要由宽禁带的材料构建，采用直接带隙材料对光电探测器而言采用会有更好的效果，对激光器而言则几乎是必须的。在诸多已获应用的 III-V 族化合物材料体系中，含磷的一类化合物材料特别是 AlGaInP 体系可具有除氮化物外的最大禁带宽度，因此也是构建这些波段光电探测器的良好材料，而气态源分子束外延（GSMBE）方法在生长这个体系的材料方面具有不少优点，是可优先采用的方法。

本报告将报道我们采用 GSMBE 方法在 GaAs 基三元系 GaInP 和 AlInP 材料的外延生长及特性表征等方面开展的研究，以及将这些材料应用于可见到紫外波段的特殊类型光电探测器的相关工作。研究中在材料和器件结构两方面进行了设计和优化来满足波长裁剪的需要，使之能满足特定的应用场景，具体包括针对双色制导应用的紫外增强/红外盲探测器以及针对水下通信和传感应用的窄带蓝光探测器等。

关键词：磷化物材料；宽禁带；光电探测器

D11-06

InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器

马文全

中国科学院半导体研究所

铋化物 InAs/GaSb 二类超晶格材料具有二型能带结构，电子有效质量大，俄歇复合率低，波长调节范围大，在高性能制冷型红外探测器领域具有重要应用。与碲镉汞红外探测器相比，二类超晶格红外探测器材料均匀性好，成本低；与量子阱红外探测器相比，其量子效率高，载流子寿命长，性能远高于量子阱红外探测器。因此铋化物 InAs/GaSb 二类超晶格材料目前在国际上红外探测器领域引起了广泛关注，在国防建设、医疗、抗灾等方面都有广泛的应用。

在本报告中我将向大家汇报我们在铋化物二类超晶格材料与器件研究方面的进展，我们已经可以生长出质量极高的超晶格材料，并且研制成功短波、中波、长波及双色红外探测器器件，探测波长最短可达约 1 微米，最长达到甚长波波段。同时，我将向大家汇报我们对于铋化物二类超晶格红外探测器焦平面发展所面临的挑战的认识及一些体会。

D11-07

InP 基光子集成芯片研究进展

赵玲娟

中国科学院半导体研究所

云计算与存储、物联网、数据中心等现代信息技术均建立在高速信息传输和处理基础上，而承载信息網路的基础是光纤通信。光纤通信光电子器件正在朝着大容量、低功耗、小型化方向发展，光子集成成为光电子芯片的主要发展方向。光子集成芯片技术在微波光子学以及光传感方面也有很多重要的应用。本报告主要介绍光子集成芯片技术的国内外研究进展以及未来产业化发展方向。重点介绍本课题组在光子集成芯片方面取得的研究成果，内容包括光子集成发射芯片，基于集成光子芯片光生微波技术，集成少模发射芯片等。

D11-08

宽禁带半导体紫外光电探测器

陆海

南京大学

以 III 族氮化物和碳化硅（SiC）为代表的宽禁带半导体是近年来国内外重点研究和发展的新型第三代半导体材料，用于工作在紫外波段的光探测器件，具有显著的材料性能优势。由于紫外辐射对有机体与无机体都有强烈的影响，因而紫外探测器在工业、农业、医药卫生、以及环境方面有着广泛的应用，典型的民用领域包括：环境监测、食品消毒、引用水净化、火焰探测、电力工业、紫外固化等；此外，超高灵敏度紫外探测器在关乎国家安全的国防预警领域也有着重要的应用前景。南京大学近年来针对宽禁带半导体紫外探测器开展了系列工作，在材料生长、器件研制、和产业化推广等方面均取得了重要进展。本文重点介绍南京大学小组在 III 族氮化物紫外探测器和 SiC 紫外单光子探测器领域的研究工作，包括：产业化水平的 GaN 可见光盲紫外探测器、低漏电流/高量子效率 AlGaIn 日盲紫外探测器、AlGaIn 日盲紫外成像阵列、SiC 紫外 APD 的终

端结构设计与实现、吸收与雪崩区分离的低工作电压 SiC 紫外 APD、可在 150 摄氏度高温环境工作的 SiC 紫外单光子探测器、以及 SiC 紫外单光子成像线阵等。

D11-09

量子级联激光器：从中红外到 THz

刘峰奇

中国科学院半导体研究所

量子级联激光器 (Quantum Cascade Laser, 简称 QCL) 的波长在中远红外到 THz 范围, 目前的研究重点在于大功率、高光束质量、低阈值功耗, 该报告简要介绍 QCL 的工作原理、技术难点, 以中科院半导体研究所的工作为实例, 说明实现高性能 QCL 的思路和技术: (1) 采用应变补偿理论与技术, 研制出波长 4.3~11 微米室温工作的 QCLs; 其中波长 4.6~5.1 微米的 QCL 室温连续工作输出功率 1.5W、室温脉冲功率超过 60W; (2) 研制出连续波工作温度大于 100°C 的面发射单模可调谐 QCL、室温阈值功耗仅 0.39W; (3) 采用基于多孔 InP 阵列的复合结构光栅技术和亚波长金属光栅的复合光栅技术, 研发出室温连续工作的高光束质量面发射 QCLs; (4) 提出二级应变补偿技术研发量子点 QCL 的思路, 研制出室温连续工作的量子点 QCL; (5) 采用调制掺杂技术、优化注入势垒, 研制出瓦级大功率 THz-QCLs、大功率单模可调谐分布反馈 THz-QCLs。

D11-10

题目待定

罗帅

江苏华兴激光

D11-11

GaAs 非平衡热电子的近场红外显微成像研究

杨乐, 翁钱春, 钱瑞杰, 小宫山进, 安正华*, 陆卫*

中国科学院上技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 复旦大学

固体环境尤其是半导体材料中的电子行为调控是现代信息技术的基石。传统半导体能带工程技术很好地实现了近平衡载流子的输运调控, 随着器件尺寸的不断缩小, 处于非平衡态的热电子行为被预期越来越显著, 为此对于非平衡态的热电子研究越来越受到人们的关注并逐渐成为该领域新的前沿。我们采用自行研发的电荷敏感型 GaAs 量子阱红外光晶体管 (Charge Sensitive Infrared Phototransistor, 简称 CSIP) 作为核心探测器件[1], 结合扫描探针显微技术和共焦显微等研制了具有 50nm 空间分辨能力的红外近场显微镜[1]。利用该自主研发设备我们研究了室温 GaAs 纳米器件在高电场激发下的非平衡热电子输运行为, 首次在实验上观测到热电子的非局域能量耗散过程, 从而为固态环境的非平衡载流子动力学行为研究提供了一种全新的技术途径。

参考文献:

[1] Zhenghua An, J. Chen, T. Ueda, S. Komiyama, and K. Hirakawa, Infrared phototransistor using capacitively coupled two-dimensional electron gas layers, Appl. Phys. Lett. 86, 172106 (2005).

[2] Qianchun Weng, Susumu Komiyama, Le Yang, Zhenghua An*, Pingping Chen, Svend-Age Biehs, Yusuke Kajihara, Wei Lu*, Imaging of nonlocal hot-electron energy dissipation via shot noise, Science Vol. 360, Issue 6390, pp. 775-778, (2018).

D11-12

三代半导体光电器件中的压电光电子学效应及其在应力传感与成像系统中的研究

潘曹峰

中国科学院北京纳米能源与系统研究所, 中国科学院大学

通过电子手段模拟人的感知一直是人工智能领域的重大挑战, 相比于发展较为成熟的几种感觉 (视觉、听觉、嗅觉和味觉) 的微纳敏感器件仿生, 触觉的仿生还是一个尚未攻克的难题。压电光电子学效应在应力应变检测方面有极大的应用前景, 其与硅基技术的集成可望在智能电子签名、人工皮肤和人机接口等领域提供独特的应用。

我们将自上而下的微电子加工工艺与自下而上的纳米材料的制备有机结合起来, 制备了长径比、间距、排布方式、密度、取向等可控的 n-ZnO/p-GaN 大规模纳米线 LED 阵列。并在外应力对单根纳米线 LED 发光强度调控的研究成果的指导下, 设计和制备了由大规模 ZnO 纳米线 LED 阵列集成的应力传感器件 (超过 10 万个 LED 单元)。利用压电电子学效应对 LED 发

光强度的调控,通过对比器件中每个 LED 单元受力前后发光强度的改变率,重构器件承受应力的空间分布特征,构建了 2.7 微米高分辨率的、快速并行检测的大规模应力感应系统,奠定了压电光电子学效应及其在大规模传感成像中的应用,在人造皮肤、光子通讯等领域有极大的应用前景。该工作在 Nat. Photon.发表后得到国际同行的高度关注。其后,将压电光电子学效应与有机半导体柔性的特点结合起来,研制出具有压电光电子学效应的大面积柔性 PEDOT:PSS/ZnO 纳米线 LED 阵列,实现了大尺度应力传感系统柔性化,朝着智能皮肤等领域的应用向前迈进了一大步。

自供能化和应力实时成像记录是上述高分辨率应力感应系统发展的终极目标。我们合成 ZnS:Mn 的纳米颗粒,通过压电光电子学效应调节能带结构,实现应力触发的光发射过程。并且设计并制备了大尺寸、高分辨率、高稳定的柔性手写数字签名器件,其在书写压力作用下的发光强度与所受压力呈准线性关系且灵敏度可调,可提供所施加动态压力、书写速度等细节个人特征,丰富了手写签名的个人身份识别特征。这些特征使其他人更难伪造复制这种携带多种个体识别特征的签名,进而提高了手写签名的安全性,具有非常重大的应用价值,为通信、电子商务、电子政务和信息安全等领域的信息安全提供了新的解决方案。

关键词:三代半导体;光电器件;压电光电子学效应;应力传感与成像

参考文献:

[1] Pan, C. F. et al. Nat. Photon. 7, 752-758, doi:Doi 10.1038/Nphoton.2013.191 (2013).

[2] Pan, C. F. et al. ,Nature Communications,2018, 9, 244

D11-13

新型半导体光电材料的优化设计

张立军

吉林大学材料科学与工程学院

具有一定带隙的半导体材料在光电领域中被广泛应用,例如太阳能电池、光电探测、发光二极管及光催化等。从光电功能性的需求出发,优化设计新型半导体材料,可实现光电器件性能的突破性提高。随着超级计算机计算能力的显著增强以及算法的不断发展,人们通过材料模拟,只需花费实验研究所需时间的一小部分,就可以探索巨大数量候选功能材料的特性。这使得功能导向的新材料设计在计算机模拟中得以实现。在这里,我将主要汇报我们近期在新型半导体光电材料的优化设计方面开展的工作。具体内容包括我们发展的具有自主知识产权的高通量材料设计计算软件 JUMP2,及应用其在钙钛矿光伏材料、透明导体材料、光电探测材料等光电半导体体系开展的新材料设计研究。

D11-14

铋化物超晶格及带间级联结构光电材料与器件研究

陈建新

中国科学院上海技术物理研究所研究员

铋化物超晶格兼具均匀性好及较高量子效率的优点,是研制高性能红外焦平面器件的优选技术之一,近年来发展迅速,显示了广阔的前景;而带间级联结构融合了带间子带跃迁、声子共振散射、共振隧穿,是获得中红外波段高性能激光器和探测器的有效途径。本文将报道我们在铋化物超晶格红外焦平面,带间级联激光器以及带间级联探测器的相关结果。

D11-15

半导体金刚石光电性质表征研究

金鹏

中国科学院半导体研究所研究员,中国科学院大学岗位教授,博士生导师

金刚石为超宽带隙半导体材料,禁带宽度 5.5 eV 左右,具有及其优越的电学、光学、热学等综合性质。其高的载流子迁移率、高的击穿电场、极高的热导率、强的化学稳定性和热稳定性等使它在高温大功率电力电子器件、微波功率器件、深紫外和核辐射探测器、深紫外发光器件等众多半导体器件中有着极大的应用潜力。本文主要介绍半导体金刚石光电性质表征方法和部分实验结果。

D11-16

宽禁带半导体氧化锌的研究现状及其对超宽禁带半导体发展的启迪

顾书林,叶建东,汤琨,朱顺明,郑有焘

南京大学电子科学与工程学院

宽禁带半导体氧化锌中化学键的离子性成分偏高，易于偏离化学配比而形成本征点缺陷，而点缺陷的聚集则会在单晶晶粒之间形成晶界。通常外延生长的氧化锌薄膜呈现为柱状甚至颗粒结构，其柱状或颗粒尺寸从几十纳米到微米量级，依赖于不同的制备方法与生长技术。因此，氧化锌薄膜其实是由氧化锌微纳米柱密排而成，微纳米柱之间则由点缺陷聚集的晶界所填充。一般柱状或颗粒尺寸越大，薄膜的晶体结构与质量也越高，晶界密度越小，缺陷浓度也越低。本征缺陷的形成将极大的降低半导体的晶体质量，但也有助于减小掺杂形成能，显著提高 p 型掺杂效率。研究显示掺杂往往容易在缺陷密度较高的晶界处形成，实际上人们所观察到的相关受主发光也往往局域在层错或晶界附近。另外，这种本征缺陷的形成强烈依赖于费米能级的位置，其中的施主型缺陷如氧空位与间隙锌是实现 p 型掺杂最主要的补偿施主，从而将极大的限制氧化锌中 p 型掺杂调控技术的实现。由此导致氧化锌 p 型掺杂效率与其载体—氧化锌薄膜的结构与质量及其掺杂补偿度所呈现的不可调和的矛盾，也成为目前氧化锌半导体材料与器件研究发展所面临的最大的科学问题与技术困难。

报告将简述作者所在的南京大学课题组与国内外同行在过去数年在针对上述重大科学难题与技术困难在氧化锌半导体的材料质量控制、掺杂与杂质缺陷的调控上的努力，试图分析与探讨氧化锌半导体研究的真实状况及未来趋势。在此基础上，针对目前高速发展的超宽禁带氧化物半导体与金刚石半导体的研究状况提出自己的研究设想，特别是针对与氧化锌半导体材料生长与掺杂中所存在的类似问题，提出合适的超宽禁带半导体材料与掺杂发展的技术路线，以尽量避免走氧化锌半导体曾经走过的弯路。最后将汇报南京大学课题组目前在超宽禁带半导体材料与器件研究方面所开展的相关工作以及研究进展。

关键词：宽禁带半导体；氧化锌；超宽禁带半导体

D11-17

碳化硅半导体技术与产业发展态势

陆敏

北京天科合达半导体股份有限公司 中关村天合宽禁带半导体技术创新联盟

碳化硅半导体是支撑国防装备、5G 通信、新能源汽车等产业创新发展的重点领域，因其在国家安全、智能制造、和节能减排等国家重大战略需求方面的重要作用，正成为国际发达国家竞争的技术及产业战略制高点。本报告从技术和产业层面纵观碳化硅半导体的现状，并就发展态势给出预估。重点从产业政策、技术标准体系和专利保护等产业生态环境角度评述了我国碳化硅半导体产业面临的机遇和挑战。

D11-18

激情拥抱超宽禁带氧化镓半导体新时代

夏长泰

中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室

氧化镓 (β -Ga₂O₃) 是一种新兴宽禁带半导体材料，其禁带宽度约为 4.9 eV。随着其单晶质量的提高以及相关物性研究的深入，氧化镓已成为新的研究热点。在世界范围内引起了学术界和产业界的广泛关注，其在以功率半导体器件、深紫外光电子器件为代表的诸多领域展现出了广阔的应用前景。

本报告将在总结氧化镓半导体材料研究现状的基础上，重点报道实现氧化镓晶体电学性能调控的新掺杂方案。主要分析高价离子掺杂对氧化镓晶体的生长、光谱以及电学性能等的影响，并与现有掺杂方案进行分析、对比，讨论其应用前景。

报告人结合自身研究经历，向各位同胞发出了一起追梦超宽禁带氧化镓半导体新时代的邀请，共同为中国梦挥洒汗水，让中国芯照亮未来。

D11-19

超宽禁带氧化镓功率器件研究进展

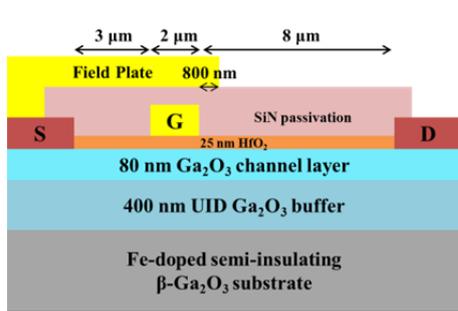
吕元杰，宋旭波，谭鑫，王元刚，周幸叶，梁士雄，冯志红

专用集成电路国家级重点实验室，河北半导体研究所

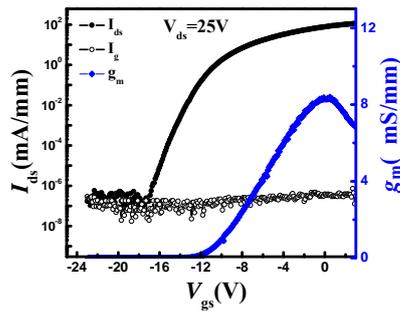
归因于超宽的禁带宽度 (~4.8 eV) 和超高的临界击穿场强 (~8 MV/cm)，氧化镓 (Ga₂O₃) 半导体材料在紫外探测器和高压大功率器件领域有广泛的应用前景，尤其是在高压功率器件领域近年来受到广泛关注。本报告主要介绍了国内外氧化镓功率器件研究进展情况，包括 Ga₂O₃ MOSFET (金属氧化物半导体场效应晶体管) 和 SBD (肖特基二极管) 功率器件等，同时探讨了目前氧化镓功率器件存在的难点和问题等。

此外，介绍了本单位 (河北半导体研究所) 近年来在 Ga₂O₃ MOSFET 器件方面的一些研究进展。近期，我们通过引入源场板结构，大幅提升了器件的击穿特性。器件基于同质外延的 n 型 β -Ga₂O₃ 薄膜材料实现，同时栅下绝缘层采用高 K 介

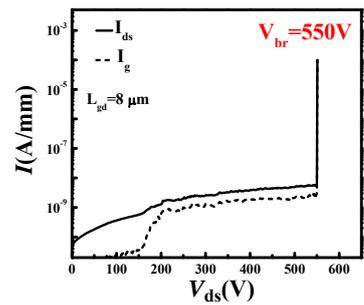
质 HfO₂ 用以降低栅漏电。研制的 Ga₂O₃ MOSFET 器件漏源饱和电流超过 100 mA/mm，电流开关比达到 108，三端击穿电压达到 550V，这是目前国内报道的最高水平。



器件结构示意图



转移特性



击穿特性

D11-20

碳化硅外延生长技术进展与产业化趋势

冯淦

瀚天天成电子科技（厦门）有限公司

碳化硅(SiC)半导体因其优异的物理、化学和电学性能，成为制作高温、高频和大功率电力电子器件最佳电子材料。同时，SiC 也是目前晶体生长技术和器件制造水平最成熟、应用最广泛的宽禁带半导体材料之一。但与传统硅(Si)器件制作工艺不同的是，SiC 电力电子器件不能直接制作在 SiC 衬底上，而是需要在衬底上额外沉积高质量的外延膜来完成。因此，SiC 外延生长在整个 SiC 半导体产业链中，占有举足轻重的地位。本报告结合瀚天天成公司 SiC 外延系列产品的开发，回顾一下 SiC 外延生长技术的进展及对今后产业发展趋势的展望。

D11-21

III 族氮化物半导体紫外光电器件与射频器件

张韵

中科院半导体所

III 族氮化物半导体材料具备优良的紫外光电和射频性能。本文将介绍笔者近两年在紫外 LED、HBT、射频 HEMT 以及 SAW 等器件和关键材料方面的最新工作进展。

关键词：氮化镓；石墨烯

D11-22

碳化硅 MOSFET 器件研究进展

李士颜，陈允峰，刘昊，黄润华，柏松

宽禁带半导体电力电子器件国家重点实验室

基于碳化硅(SiC)材料宽禁带宽度及高的临界击穿场强等特点，使得 SiC 电力电子器件相对于传统 Si 器件，可以实现更高的工作温度和更低的比导通电阻，相对于 Si IGBT 器件，高压 SiC MOSFET 具有更高的工作频率和更低的开关损耗。因此，SiC 功率 DMOSFET 器件在电动汽车，光伏逆变器，轨道交通，智能电网及高压输电等领域具有重大应用需求。在本论文中，我们详细介绍了本研究组在 SiC 功率 MOSFET 器件方面的研究进展：

本研究组目前实行了 1200V，1700V，3300V 和 6500V 多个等级的 SiC MOSFET 器件样品的研制。其中完成了 1200V 等级 40 mΩ、80 mΩ 和 160 mΩ 多个电流等级的 MOSFET 器件研制，器件雪崩电压可以达到 1600V，在阻断电压 1200V 下，器件漏电流小于 1uA，器件比导通电阻达到了 3.4 mΩ·cm²。在可靠性方面，完成了栅氧可靠性，阈值电压可靠性，高温阻断可靠性等多项验证。在 6500V SiC MOSFET 研制中，本研究组还实现了一款 6.5 kV/10A SiC DMOSFET 芯片的研制，器件采用外延层厚度为 65um，掺杂浓度为 1.3*10¹⁵ cm⁻³ 的材料做为器件漂移层。该器件有源区面积为 14 mm²，在栅压 20V 下，器件正向导通电流大于 10A，对应器件的比导通电阻为 56mΩ·cm²。该器件阻断耐压可以达到 8 kV，并且在漏极电压 6.5 kV 时，器件漏电流密度小于 2.4 uA/cm²。

D11-23

化合物半导体—我国半导体产业发展的突破口

朱邵歆

工信部赛迪研究院

全球半导体产业正面临深刻变革。摩尔定律演进趋缓，超越摩尔定律受到业界高度关注；5G 通信、人工智能、智能驾驶等新技术、新应用不断涌现；全球集成电路产业呈现全方位及多层次产业转移趋势。化合物半导体在射频和电力电子领域具有性能优势和 market 潜力，且在我国有强大的市场需求和一定的技术积累，有望成为产业发展的突破口。

D11-24

硅基 III-V 族高迁移率异质集成研究和进展

李海鸥

桂林电子科技大学信息与通信学院

拥有直接带隙的 III-V 族半导体是光发射与接收的理想材料，这将为超大规模集成电路中光互连技术以及集成光电子系统的发展带来新的契机。与同等技术水平的硅基微电子技术相比，III-V 族半导体具有显著的速度优势、超低的电压工作和极低的功耗。与新兴的分子、量子电子器件相比，III-V 族半导体材料将是新一代超高频低功耗集成电子系统的必然选择。目前需要解决的关键技术主要包括：在大尺寸、价格低廉的硅衬底上外延生长高质量 III-V 族半导体材料；III-V 族半导体技术与现有硅基集成电路技术相结合等。因此将 III-V 族半导体外延生长在硅衬底上来突破衬底材料的限制，使其成本大幅度下降，同时综合利用硅与 III-V 族半导体材料各自的优良特性，实现多种半导体的更强功能、更高性能的单芯片集成等技术，将会在半导体产业引发一场技术革命，带来巨大的经济效益和科学技术的重大进步。

D11-25

可融合 GaN/Si 半导体器件与集成技术

黄伟

复旦大学微电子学院

随着硅基 GaN 材料外延技术日趋成熟，GaN 半导体工艺技术正呈现由 4 寸化合物工艺平台向成熟的 6 寸、8 寸硅基 MOS 工艺平台转移的新特征，这为硅基 GaN 工艺开发、新器件设计及其集成技术提供了光明的前景，但也面临着较大的挑战。本报告重点介绍基于 Si 工艺开发的 GaN 功率器件并进而开发了面向 POL 应用的 GaN DC/DC 功率模块等工作，从而支持 GaN 功率集成技术的发展。

D11-26

氮化镓半导体器件技术

陈万军

电子科技大学

D11-27

GaN 基 VCSEL 研究进展

张保平

厦门大学电子科学与技术学院

GaN 基垂直腔面发射激光器（VCSEL）在显示、照明、识别、通信等方面有广阔应用前景，成为信息领域和半导体学科越来越受到关注的器件[1]。由于其特殊性和高难度，国际上主要有日本的大型企业（如日亚、松下、索尼、史丹利）和著名研究机构（如两位诺贝尔奖得主美国加州大学 Nakamura 教授以及日本名城大学 Akasaki 教授的研究小组，台湾交大等）进行了该器件的研究报道[2-4]。采用 InGaN 量子阱（QW）有源区结构，自 2008 年第一个电注入 GaN 基 VCSEL 以来，已经报道了从近紫外(400nm)到蓝绿光（503nm)波段的激光。最新的报道是单管 VCSEL 蓝光（440nm）输出功率达到连续注入条件下的 6mW[5]。然而由于大 In 组分下带来的晶格失配等原因，存在绿色带隙（即“green gap”，500~600 nm），在该波段内的量子效率极低，获得 VCSEL 更加困难。

我们是大陆唯一进行了 GaN 基 VCSEL 研究报道的团队，经过多年的研究，至今掌握了多项关键技术，如表面平坦、低损伤蓝宝石衬底上 GaN 外延材料的激光剥离、将外延层转移到高散热性金属基板的低温键合和电镀、实现对谐振腔内光

损耗的有效抑制等。在此基础上,采用耦合量子阱和量子点有源区结构,成功实现了 GaN 基在蓝色和绿色光谱波段的激光,所得阈值电流达到国际领先水平,并且激光波长延伸到 565 nm,覆盖了大部分 green gap[6-8]。此外,我们还实现了蓝光和绿光双波长激光 VCSEL 以及大范围(129nm, 紫外-绿光)波长可调谐窄线宽光源等新型器件[9,10]。

本研究得到国家自然科学基金委(U1505253, 11474235)、科工局挑战计划(TZ2016003)、国家重点研发计划(2016YFB0400803)的大力支持。

参考文献:

- [1] (综述) H. C. Yu et al., *Progress in Quantum Electronics*, 57 (2018) 1-19.
- [2] C. A. Forman et al., *Appl. Phys. Lett.*, 112 (2018) 111106.
- [3] N. Hayashi et al., *Phys. Status Solidi A*, (2018) 1700648.
- [4] T. C. Lu et al., *Appl. Phys. Lett.*, 92 (2008) 141102.
- [5] M. Kuramoto et al., *Appl. Phys. Lett.*, 112 (2018) 111104.
- [6] Y. Mei et al., *Light: Sci. & Appl.* 6 (2017) e16199.
- [7] G. E. Weng et al., *Optics Express*, 24 (2016), 15546.
- [8] W. J. Liu et al., *Applied Physics Letters*, 104 (2014) 251116.
- [9] R. B. Xu et al., *Semiconductor Science and Technology*, 32 (2017) 105012.
- [10] Y. Mei et al., *Appl. Phys. Lett.*, 111 (2017) 121107.

D11-28

Raman spectroscopy of two-dimensional semiconductor materials and related heterostructures

谭平恒

中科院半导体所

Two-dimensional materials (2DMs), such as graphene and transition metal dichalcogenides (TMDs), have been under intensive investigation. The rapid progress of research on graphene and TMDs is now stimulating the exploration of different types of 2DMs. The atoms within each layer in 2DMs are joined together by covalent bonds, while van der Waals interactions keep the layers together to form multilayer 2DMs, which makes the physical and chemical properties of 2DMs strongly dependent on their thickness (or layer numbers). These various 2DMs could be re-stacked/assembled horizontally or vertically in a chosen sequence to form van der Waals heterostructures (vdWHs), which can offer huge opportunities for designing the functionalities of such heterostructures. Two or more 2DMs with similar properties can be alloyed into a new type of 2DMs, namely, 2D alloy, which can offer tunable band gaps for promising applications in nanoelectronics and optoelectronics. Raman spectroscopy is becoming increasingly important in the area of 2DMs. Raman spectroscopy can reveal information on the crystal structure, electronic structure, lattice vibrations and flake thickness of 2DMs, and can be used to probe the strain, stability, charger transfer, stoichiometry, and stacking orders of 2DMs. In particular, the unique interlayer vibrations have been widely used to develop a substrate-free layer-number identification of 2DMs, and to probe the strength of interlayer coupling in 2DMs and the interface coupling in artificial vdWHs. Here, we will review the recent advances on Raman spectroscopy in the characterization of different kinds of 2DMs and the corresponding 2D alloy and vdWHs. We will show that Raman spectroscopy is an ideal tool to probe the fundamental physics and potential applications of these various 2DMs, particularly when they are reduced down to monolayers or multilayers.

D11-29

三维原子探针技术及其在半导体器件研究中的应用

胡蓉, 沙刚

南京理工大学材料科学与工程/格莱特纳米科技研究所

三维原子探针凭借其在原子尺度上揭示定量成分和结构信息独特的能力和优势,近年来在先进材料研究的前沿领域得到许多重要的应用。与具有在微纳尺度进行精准加工制造能力的聚焦离子束技术相结合,可以实现对任何材料的特定感兴趣的局部区域进行样品制备和分析。两者的完美结合,对原子探针技术在各种先进材料研究中的广泛应用产生深远的影响。近年来,南京理工大学的原子探针研究团队对各种材料,包括半导体器件,重离子辐照材料的表面损伤区域及先进材料的晶界和相界面,进行了大量的探索,成功地实现了对掺杂元素在半导体器件分布的准确掌握,揭示了材料中辐照缺陷的成分和结构特征,掌握了影响双相不锈钢中温脆性的关键组织结构。本报告将介绍原子探针工作原理及其可以获得的重要成分和结构信

息，以及我们在半导体器件分析方面的研究进展。

关键词：原子探针；FIB；元素分布；微区成分和结构；半导体器件

D11-30

Application of Aberration-corrected TEM on thermoelectric materials

葛炳辉

中科院物理所副研究员

PbTe 作为一种性能优异的热电材料已经广泛的在商业化应用，但由于 PbTe 中的 Pb 具有毒性，因此科研人员提出用具有相同晶体结构的 SnTe 来代替 PbTe。以往的研究表明 SnTe 的热电性能要略低于 PbTe，因此便提出了许多方法来改善 SnTe 的热电性能。其中 In 掺作为一种改善 SnTe 热电性能的有效方法被提出。In 掺 SnTe 能够显著降低材料的晶格热导率，从而极大地改善材料的热电性能。本文主要利用透射电子显微学方法从原子尺度揭示 In 掺 SnTe 晶格热导降低的本质。

通过 TEM 明场和暗场像的分析，我们发现材料的母体中存在着不同衬度的析出相。通过对原子分辨率的高角环形暗场像（HAADF）和电子能量损失谱（EELS）的分析，我们认为析出相不同于母体的盐岩结构（rock-salt），是具有闪锌矿结构（Zinc-Blende）的 In_2Te_3 。与此同时我们还发现在材料的析出相中存在大量不规则的二维面缺陷，通过对缺陷附近的原子排布分析表明这种面缺陷是一种倒反畴界。最后，我们通过几何相位分析[1]（Geometry phase analysis）的方法发现畴界的附近存在明显的应力集中，从而证实在材料中除了空位和晶界对声子的散射降低材料的晶格热导率之外，倒反畴界是另外一种主要的声子散射机制。

D11-31

球差校正电镜在催化剂和半导体材料中的部分应用

罗俊

天津理工大学材料学院

球差校正电子显微术与多种谱学的结合已成功使得原子结构解析、原子分辨谱学成像、原子间电场表征技术、结构信息三维重构、原位电子显微术等手段能够被综合使用，从而能在原子分辨的水平上表征材料的表面与内部的原子结构和化学信息及其在服役期间的变化。罗俊与其领导的天津理工大学电镜中心最近将上述方法成功用于数种新能源纳米金属催化剂和半导体纳米材料的结构表征上，不仅清楚阐明了催化剂表面上的每种元素的单一晶格结构及其相互之间的外延生长结构，而且在原子分辨的尺度上揭示了这些表面结构在电化学过程中的演变，并与合作者一起共同获得同时具备高催化活性和高稳定性的催化剂表面结构。同时，该中心也成功解析数种半导体纳米材料及其异质界面的原子结构，为合作者的相关科研提供了重要的数据支持。

D11-32

题目待定

王英民

中国电科装备集团公司

D11-33

题目待定

华卫群

中国电科中微掩模有限公司

D11-34

CVD 石墨烯透明电极在 GaN 光电子学中的应用

孙捷

1.Chalmers University of Technology

2.北京工业大学

化学气相沉积(CVD)石墨烯面积大、与半导体技术兼容。自 2009 年以来，Chalmers 大学开展了过渡金属(Cu, Pt, Ta 等)上 CVD 石墨烯的研究，并牵头了欧盟史上最大的项目石墨烯旗舰。石墨烯是用 Aixtron 商用系统生长的，并用化学腐蚀或电化学鼓泡法转移。

GaN 化合物半导体在发光二极管 (LED) 中有广泛应用, 光谱覆盖从黄光到紫外。我们首先研究了致密和排列有序的 GaN 纳米柱 LED, 使用悬浮在纳米柱上的 CVD 石墨烯作为透明电极。使用这种石墨烯透明电极作为 ITO 的替代, 回避了填充纳米柱之间缝隙的复杂工艺, 以及随后的表面平坦化过程。这是因为石墨烯的机械强度高, 所以可直接悬浮在纳米柱上。石墨烯的高电导率可有效扩散电流且增强载流子注入。与传统的平面 GaN-石墨烯二极管相比, 所制备的器件的光输出功率提高了 32%, 这主要归功于大大增加的发光面积。

不过, 尽管石墨烯导电性很好且透明度高, 但其费米能级与 GaN 不相配, 因此它们的电学接触可能不是严格的欧姆接触, 导致很高的工作电压, 对器件的实际应用造成障碍, 但这一点学术界并无统一认识。为详细研究此问题, 我们将 CVD 石墨烯应用于 (平面的) GaN LED 作为透明电极, 并且用 7-10 纳米 ITO 接触层插入石墨烯和 p-GaN 之间, 以求提高空穴注入效率。这样, 器件的正向工作电压和透明度达到了与 240 纳米 ITO 器件相当的水平, 并具有更佳的紫外波段透明度。这些结果证明, 石墨烯-GaN LED 的高工作电压的确是源于石墨烯-GaN 的接触不佳造成的, 可通过加入超薄 ITO 插层解决。

但超薄 ITO 插层毕竟不是最终解决方案, 因为之所以使用石墨烯替代现有 ITO 透明电极的一个重要动机是, ITO 需消耗大量稀缺资源铟, 因此可持续发展性不佳, 而石墨烯则资源无限。因此, 我们又从事了在 GaN 上直接用 CVD 技术生长石墨烯的研究。由于石墨烯-GaN 界面是在高温高真空 CVD 腔室中制备的, 其质量得到大大提高, 电学性能亦加强了。此外, 石墨烯可在 CVD 腔室中原位掺杂, 进一步提高其费米能级与 p-GaN 的匹配性。最重要的是, 这是有重复性和可按比例放大的工艺, 彻底解决了与复杂的 CVD 石墨烯的转移过程相关的一切不确定性和不可重复性。本报告中将介绍一些使用直接生长方法取得的初步结果, 显示出这种技术在未来 GaN 光电子学材料和器件工业应用中的前景。报告中还将介绍一些其他结果, 例如石墨烯-GaN 光电探测器。
关键词: 氮化镓; 石墨烯

D11-35

高效提升科研效率: 集成分析测试平台与信息化管理

刘家龙, 杨继进

中国科学院地质与地球物理研究所

开展样品微纳米尺度几何尺寸与表面形貌、成分结构分析是地质行业与半导体等材料行业的研究基础与质量保证, 在当前科技发展与国际接轨的过程中, 搭建长期运行、规范化、制度化的集成分析测试平台, 建立一个训练有素、专业知识储备丰富的检测团队, 保证测试过程中不同技术的合理运用, 越来越突显其重要性。以中科院地质与地球物理研究所“微纳结构成像实验室”为例, 介绍了具有宏观到微观尺度系列仪器的大型集成测试分析平台相较于单一仪器分析测试平台的优势, 同时介绍了信息管理系统与云服务器在降低人工成本、时间消耗、信息交互方面的管理创新。集成检测分析平台与信息管理的有机结合, 有助于减低实验失败率与无效时间, 成倍地提升科研效率。

关键词: 集成; 信息化; 分析测试

D11-36

基于升华法大尺寸 SiC 晶体生长装备合作开发

赵丽丽^{1,2}, 范国峰², Yuri Makarov³

1. 哈尔滨工业大学

2. 哈尔滨化兴软控科技有限公司

3. Nitride Crystals Group, Ltd.

随着半导体材料和器件的发展以及国防、电子等行业对半导体材料越来越高的要求, 第三代宽禁带半导体 SiC 因其耐高温、耐高压和耐高频等优秀性能并常用于制作可见和紫外光 LED, 半导体二极管, 和其它光学电学器件的先进的材料进入广大科研工作者的视野。其中最具有前途的用于生长 SiC 大尺寸晶体的技术为升华法。由于此法在实验研究过程中难度大、成本高。并且国内市场上还没有较为完备的升华法晶体生长工艺装备。本文依据升华法 SiC 晶体生长工艺的要求, 针对 SiC 晶体生长过程中影响晶体生长的设备缺陷, 并结合模拟仿真技术对设备生长室内热场和流场的优化设计, 进而对设备整体的机械、真空密封、电器控制等关键部分的优化设计, 解决了如何有效的掌握晶体生长过程中复杂热场和流场变化的过程的问题和设备整体的密封性、精确性及稳定性这些我们长期以来面临的问题。其中包括可控的复杂的热场和流场变化问题 (使用特有的坩埚 TaC, 在生长源体升华过程中, 可生成惰性碳化物和氮化物, 阻止 Si 和 C 及 O 的化合物产生。因此在晶体生长过程中 SiC₂ 和 SiO 等杂质减少, 从而改善了晶体生长过程中成核现象, 使晶体生长过程产生更少的微管、位错、多型体和孔洞等。根据实验结果, 使用 TaC 坩埚生长出的 SiC 晶体材料的位错密度只有 $1 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$, 而未使用 TaC 坩埚时, 位错密

度达到 $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 。), 设备的真空室石英管与金属之间的高温高真空问题, 炉内坩埚温度的测量问题和控制, 炉内坩埚或炉内加热器的可精确移动性问题以及高频电源的程度化稳定控制问题等技术难题。经过模拟优化和设备调试, 对设备整体进行了分阶段性的优化, 实现并满足了 SiC 晶体生长的要求。

关键词: 宽禁带半导体; SiC 晶体生长装备; 升华法; TaC 坩埚; 设备调试

D11-37

集成电路核心元器件、仿生器件信号和光电能源器件的优化和表征

戴明志

中科院宁波材料所

集成电路是我国进口第一大产品, 集成电路核心元器件是提高集成电路性能的关键。现代光电能源器件和芯片核心元件亟待升级改进。本报告将介绍几种优化的光电器件和单器件存储器、门电路等晶体管元件。所介绍器件, 比原有器件如 DRAM 等面积减小, 性能提高, 均有文章在 Nano Letters、Advanced Electronics Materials、Advanced Theory and Simulations 等。

另外, 提出了半经验公式、通过调控电学参数更好地实现对仿生器件信号的定量获取。能带间态密度 DOS 是影响器件电学性能的关键参数。我们设计出瞬态表征原理和搭建出平台, 文章发表在 2016 年 Scientific Reports, 并用来研究了非晶氧化物晶体管对温度的变化趋势和 DOS 的关系, 解释了转移曲线随升温右移现象的机制。

D11-38

半导体材料检测与分析技术进展

闫方亮

米格实验室

D11-39

题目待定

魏学成

D11-40

核辐射探测器用 CdZnTe 晶体的共掺杂研究

王涛, 艾莘, 杨帆, 周伯儒, 查钢强, 介万奇

西北工业大学

CdZnTe 被认为是目前最有前途的室温核辐射探测材料。载流子迁移率与寿命乘积低是影响 CdZnTe 探测器应用的主要问题之一。针对单元素掺杂效率低以及可能引入复合缺陷降低载流子迁移率与寿命乘积的问题, 本文结合高阻相互补偿原理, 尝试采用共掺杂方法降低深能级缺陷浓度、改善载流子输运性能, 为实现高能射线探测和大剂量探测应用奠定基础。采用布里奇曼法制备了 Yb 和 In 共掺杂的 CdZnTe 晶体。热激电流谱 (TSC) 和光致发光谱 (PL) 结果表明, 共掺引入了新的浅能级 YbCd⁺, 同时 Cd 空位的浓度大大降低。PL 结果表明, 对于单掺杂和共掺杂晶体, A0X /D0X 峰比值变化较大, 说明晶体中杂质类型和浓度变化较大。飞行时间 (TOF) 测试结果表明, 载流子迁移率提高到 1148-1300 cm²/Vs, 相比较单元素掺杂 CdZnTe 晶体提高了 26%到 40%。认为主要原因在于稀土掺杂元素的吸杂效应导致的杂质浓度降低和掺杂效率提高导致的深能级缺陷浓度降低。因此, 稀土元素共掺杂是改善核辐射探测器用 CdZnTe 晶体载流子输运性能的有效手段。

关键词: 核辐射探测; 晶体生长; CdZnTe; 共掺杂

D11-41

黑磷、类黑磷二维原子晶体材料的电子器件与输运性质

鲍丽宏, 王国才, 裴腾飞, 马瑞松, 郇庆, 杜世萱, 高鸿钧

中国科学院物理研究所

黑磷是一种新型层状结构的直接带隙二维半导体材料, 少层黑磷场效应晶体管表现出了优异的电流开关比性能 (~10⁵) 和高空穴迁移率 (1000 cm²/Vs), 显示了其在逻辑、开关器件应用领域的巨大潜力。针对黑磷的不稳定性、调控导电类型的难题, 我们在实验上首次发现了过曝 PMMA 覆盖层对黑磷的保护及调控导电类型的作用, 实现了黑磷的 P 型 (空穴型) 及 N 型 (电子型) 分立场效应单元器件, 进而将它们集成在一起, 构筑了基于黑磷的栅调制二极管、双向整流器与逻辑反相器等一系列平面逻辑器件。另外我们成功实现了具有类黑磷结构的超薄 SnSe 单晶在 PDMS 柔性衬底上的外延生长, 最薄厚度

到 9 nm, SnSe 纳米薄片呈现八边形结构。并且首次在较大厚度范围内 (> 10nm) 发现了 SnSe 的拉曼频移与其厚度的依赖关系, 最后通过在芯片上制备微型加热电极和热电偶温度计, 对小尺度的 SnSe 单晶纳米薄片进行了热电性能测试, 发现其塞贝克系数与体材相当, 而且表现出了栅极调控的特性。针对高载流子浓度的二维原子晶体材料体系的导电控制的难题, 我们利用高介电常数介质与离子胶栅极相结合的办法, 首次实现了基于二维原子晶体材料 SnSe₂ 的场效应晶体管的高电流开关比 (~10⁴)。为了实现对二维原子晶体材料的本征输运性质的测量, 我们成功搭建了一套超高真空扫描隧道显微镜系统, 实现了对石墨烯等二维原子晶体材料的稳定 原子级分辨, 并成功测量了多晶石墨烯中晶界的电阻率、迁移率等输运性质。

参考文献:

- [1] G. C. Wang, L. H. Bao, H. -J. Gao et al. Nano Lett. 16 (2016) 6870.
- [2] G. C. Wang, L. H. Bao, H. -J. Gao et al. 2D Mater. 4 (2017) 025056.
- [3] T. F. Pei, L. H. Bao, H. -J. Gao et al. Adv. Electron. Mater 2 (2016) 1600292.
- [4] T. F. Pei, L. H. Bao, H. -J. Gao et al. Appl. Phys. Lett. 108 (2016) 053506.
- [5] R. S. Ma, Q. Huan, L. H. Bao, H. -J. Gao et al. Rev. Sci. Instrum. 88 (2017) 063704.
- [6] R. S. Ma, Q. Huan, L. H. Bao, H. -J. Gao et al. Nano Lett. 17 (2017) 5291.

关键词: 黑磷; 二维原子晶体材料; 场效应晶体管; 逻辑反相器; 塞贝克系数

D11-42

基于离子型 p-n 结的柔性低频能量收集器

侯莹

1. 华东理工大学
2. 宾夕法尼亚州立大学

如今, 便携式电子产品功能的日新月异, 不断对电池的续航能力提出新的要求。为了满足下一代便携式电子产品进一步智能化、集成化、可持续化的发展需求, 迫切需要开发可长时间持续稳定工作的电源系统以弥补电池容量的不足。若能将日常浪费掉的人类活动产生的机械能收集起来并有效转化为电能为电池充电, 将为便携电子产品提供源源不断的电能。而目前基于压电效应的能量收集器往往适于收集高频机械振动, 无法直接用于收集低频的人类日常活动能量。频率的不匹配必将降低收集效果和效率, 无法满足实际应用的需求。

我们用带有相反电荷的聚电解质纳米复合材料组装了有机离子 p-n 结, 研究了其机械能-电能的转换机制。研究发现, 当向 p-n 结施加机械应力时, 内部载流子的平衡将被打破, 载流子开始重新扩散, 直至新的平衡重新建立。这一过程完成了机械能到电能的转换。由于离子运动的特点, 整个过程恰好可以匹配人类日常运动的频率, 从而实现柔性可穿戴的低频能量收集器。基于这种机制的能量收集器的设计开发, 将有望用于手机等便携式产品中, 用来提供电池所需的部分能量从而大大降低电池的充电需求。将通常浪费掉的人类四肢活动能量转化为电能, 也是节能环保的必然趋势。

关键词: 能量收集器; 离子型 p-n 结; 低频响应

D11-43

ZrxSn1-xO2 三元合金半导体外延薄膜的性质及其在深紫外探测领域的应用

程阳, 龙德兵, 孟冬雪, 张腾, 黎明锴†, 何云斌*

湖北大学材料科学与工程学院

SnO₂ 作为一种典型的直接带隙的宽禁带半导体材料其带隙达到 3.6eV[1-2], 随着近年来短波光电器件的发展, 例如紫外发光二极管、深紫外光电探测器等, 使得人们把越来越多的目光转移到 SnO₂ 上。

本实验通过对纯的 SnO₂ 进行掺锆处理制备得到一种三元合金体系, 并利用脉冲激光沉积的方法在 c 面蓝宝石衬底上制备生长出一系列高质量的 ZrxSn1-xO₂ 外延薄膜, 通过 XRD 表征发现当锆的掺杂浓度小于 36% 时可以得到纯相的以锡氧原子为溶剂原子的固溶合金, 且薄膜的平均半高宽约为 0.05 θ , 表明薄膜的结晶质量较好, 除此之外, 我们又分别对薄膜和衬底的 (110) 和 (11-23) 晶面进行了 ϕ 扫描, 得到外延薄膜的面内取向关系为: ZrxSn1-xO₂(200)||c-Al₂O₃(0006), ZrxSn1-xO₂[110]||c-Al₂O₃ [11-23]。从本实验得到的透射和吸收光谱可以知道此种外延薄膜材料的带隙随着掺杂浓度的增加而增大, 并且在未分相之前, 合金的带隙就已经能够调大到 5eV, 完全可以满足深紫外波长段对探测器带隙的要求。本实验还发现随着掺杂浓度的增加薄膜的电阻率也会急剧的增大, 这一特性可以有效的降低探测器中暗电流的大小, 从而提高探测器的探测灵敏度。最后本实验采用光刻和真空蒸镀的方法在外延薄膜上镀上高纯铝质的金属电极得到 MSM 结构型的光探测器, 发现此种探测器在深紫外波长段具有较快的光响应速度以及较高的光响应度, 表明 SnO₂ 在深紫外探测领域具有比较

积极的应用前景。

[1] Z. Zhu, J. Ma, C. Luan, L. Kong, Q. Yu, Epitaxial relationships and optical properties of SnO₂ films deposited on sapphire substrates, *Applied Surface Science*, 257 (2011) 2516-2519.

[2] M. Zhang, M. Xu, M. Li, Q. Zhang, Y. Lu, J. Chen, M. Li, J. Dai, C. Chen, Y. He, SnO₂ epitaxial films with varying thickness on c-sapphire: Structure evolution and optical band gap modulation, *Applied Surface Science*, 423 (2017) 611-618.

关键词：深紫外线；外延薄膜；半高宽；光响应度

D11-44

化学气相沉积硫化锌中分层现象的表征及形成机理分析

张鹏飞¹, 李红卫¹

1.有研科技集团有限公司

2.有研国晶辉新材料有限公司

化学气相沉积生长硫化锌过程中，沿着沉积方向会出现明显的颜色分层差异，影响 CVD ZnS 的光学性能均匀性及后续的热处理效率。采用 XRD、金相显微镜、SEM 对其晶体结构、晶粒尺寸及微观形貌进行检测；采用 EDTA 滴定法、XRF、ICP、高频燃烧红外吸收法对主要成分 Zn、S 含量进行测试。结果表明亮层区域晶粒尺寸显著偏大，六方相含量较多，同时 Zn 含量相对暗层偏少而 S 含量偏多。分析其形成原因，发现主要因素来自于沉积过程中生长前沿的反应物空间浓度差异，影响了晶体生长的速率及完整性，并且反应物 Zn/H₂S 偏小时更易形成亮层且长成大晶粒，因此确定最优的反应物配比对制备均匀、高质量的硫化锌具有重要意义。

关键词：CVD ZnS；均匀性；化学计量配比

D11-45

连续波 2.5 THz 量子级联激光器的材料制备与器件性能

沈昌乐^{1,2}, 蒋涛^{1,2}, 王雪敏^{1,2}, 湛治强^{1,2}, 吴卫东^{1,2}

1.中国工程物理研究院激光聚变研究中心

2.微系统与太赫兹研究中心，中国工程物理研究院

2.5 THz 是大气传输中损耗较小的一个频点，且处于太赫兹量子级联激光器 (THz QCL) 主要工作频段的低频区，对系统集成中辅助电路和其他元件的要求更容易满足，因此是开展 QCL 太赫兹源应用系统原理性研究重要频点，有必要对性能进行针对性研究。2.5 THz 量子级联激光器研制的难点在于其波长较长，辐射跃迁能差小，载流子对辐射跃迁上能级的选择性注入和对辐射跃迁下能级的选择性抽取困难，且自由载流子吸收和波导损耗较大。本文基于束缚-连续有源区结构，通过分子束外延方法制备了百余周期、千层纳米薄膜的有源区材料，采用湿法腐蚀和半绝缘等离子体波导结构，制备了频率为 2.5 THz 的太赫兹量子级联激光器，单边实测连续波功率大于 10 mW，连续波最高工作温度达到 84K。

关键词：太赫兹；量子级联激光器；分子束外延

D11-46

P 型透明导电氧化物 NiO 的电子结构及电学性能研究

张佳业, 张洪良

厦门大学化学化工学院

透明导电氧化物(Transparent conducting oxides, TCO)是一种集光学透明($E_g > 3.1$ eV)和导电性于一体的重要功能材料，在当今蓬勃兴起的太阳能电池、触摸屏、液晶显示、柔性电子器件等领域具有广泛的实际应用，主要代表材料有 In₂O₃ 和 SnO₂。当前的 TCO 大部分是 n 型半导体。高性能 p 型 TCO 的缺乏是阻碍此类材料在透明电子器件、紫外光电探测等重要应用的主要瓶颈。原因是由金属氧化物本身的电子结构所引起的，即价带(valence band)主要是由局域化的 O 2p 轨道构成。氧化镍(NiO)是一种性能优异的 p 型 TCO，其价带由 Ni 3d-O 2p 杂化构成。制备高质量 NiO 薄膜，理解并调控器件界面电子结构、光学和电学性质，对提高器件性能至关重要。我们通过脉冲激光溅射沉积(Pulsed laser deposition, PLD)获得了一系列的高质量 NiO 外延薄膜材料，研究了 Li 掺杂对电子结构，光学和电学性能的影响。结果表明，Li 掺杂可以有效的提高 NiO 的导电性，并将 NiO 的功函数由 4.88eV 提高到 5.2eV，但均在室温附近表现出低迁移率(< 0.05 cm² V⁻¹ s⁻¹)的小极化子跳跃导电模型。我们结合 X-ray photoemission spectroscopy (XPS)和 O K-edge X-ray absorption spectroscopy，证明了以上电学性质主要来自于 NiO 的价带顶和空穴态所具有的 Zhang-Rice 束缚态的特性。另外，我们还利用 PLD 构建了高质量的 p-n 异质结

NiO/BaSnO₃ 和 NiO/SrTiO₃, 并利用 XPS 对界面能带排布进行了表征。结果表明, 其特征性的能带弯曲和排布有利于光生电子-空穴对的有效分离和传输, 可构建高性能紫外探测器和光电催化剂。我们还将 NiO 作为空穴传导层来构建太阳能电池器件, 通过调控其与活化层 BiOI 的能带排布获得了高达 80% 的单色光外量子效率。

关键词: 氧化镍; 电子结构; 电学性能

D11-47

室温辐射探测器材料碲锰镉晶体的退火改性研究

俞鹏飞

长安大学

化合物半导体材料碲锰镉(CdMnTe)的能带结构和光电性质与 CdZnTe 十分相似, 并在某些方面表现更为优异, 成为制造室温 X/γ 射线探测器的候选材料之一。但是, 熔体法生长的晶体中不可避免地存在 Cd 空位、位错、Te 夹杂相等缺陷, 这些缺陷严重降低了晶体的质量从而影响了辐射探测器材料的应用。因此, 对生长态晶体进行合适的退火改性处理是提高晶体性能的一种非常有效的途径。本课题组采用多步骤组合退火、氢气气氛、同成分粉体包覆等方法对 CdMnTe 晶体进行退火改性研究, 取得了一定的成效。采用多步骤组合(先 Cd 气氛后 Te 气氛)退火工艺最佳条件为 Cd 气氛下 800℃退火 240 h, 再经 Te 气氛下 500℃退火 120 h, 退火后 Te 夹杂相的密度显著减少, 电阻率和红外透过率增加, 晶体质量和探测器性能均提高。探测器最佳能量分辨率为 11.13%, ($\mu\tau$)_e 值为 1.25×10⁻³ cm²/V; 采用氢气气氛退火最佳条件为 300℃退火 30 h, 氢有效地钝化了电活性的杂质和缺陷, 电阻率和红外透过率增加, 晶体质量探测器性能均提高, 探测器最佳能量分辨率为 13.56%, ($\mu\tau$)_e 值为 8.72×10⁻⁴ cm²/V; 采用同成分 CMT 粉体包覆退火最佳条件为 800℃退火 120 h, Te 夹杂相明显减少但不能完全消除, 红外透过率和电阻率都明显增加, 晶体质量提高, 晶体发生了质的飞跃。探测器最佳性能为能量分辨率为 10.11%, ($\mu\tau$)_e 为 1.20×10⁻³ cm²/V。三种方法退火后的晶体均达到了制备高性能探测器的要求, 为探测器的实际应用奠定了基础。

D11-48

织构 AZO 陶瓷的微结构调控及热电性能

杨爽¹, 陈斐², 黄奥¹, 顾华志¹

1. 武汉科技大学

2. 武汉理工大学

通过控制电场活化烧结过程中电流的作用方式, 有效调控 AZO 陶瓷的晶粒大小和晶体缺陷, 无电流作用 AZO 陶瓷的晶粒大小显著大于电流直接作用的 AZO 陶瓷, 且导致了较少的晶体缺陷, 大晶粒和较少的晶体缺陷对 AZO 陶瓷的 Hall 迁移率及导电性能具有显著影响, 使 AZO 陶瓷电阻率由 1.3×10⁻³Ω·cm 降低至 6.7×10⁻⁴Ω·cm; 此外, 结合电场辅助热变形制备高度 c 轴取向的织构 AZO 陶瓷, 通过热变形工艺有效控制 AZO 陶瓷的织构因子, 其织构因子最高达 0.41, 随着织构因子的升高, AZO 陶瓷的 Hall 迁移率及电导率显著提高, 使其功率因子提升 60.6%, 对 AZO 陶瓷的热电性能产生积极作用。

关键词: AZO 陶瓷; 织构; 热电性能

D11-49

钒基氧化物纳米材料的制备及其锂/钠离子电池上的应用

朱凯, 方永正, 曹殿学

哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院

锂离子电池已经广泛应用在手机, 笔记本电脑等移动电子设备。同时锂离子电池具有在电动汽车和大规模储能装置的应用前景。但是传统锂离子电池正极材料无法满足人们对高比容量, 高倍率性能的电池的需求。因而, 钒基氧化物作为高比容量的锂离子电池正极材料成为了研究热点。同时钒基氧化物展现出其应用于下一代钠离子电池的潜力。针对钒基氧化物循环稳定性差, 倍率性能不佳这些问题, 我们通过对材料的微观尺寸, 内部结构和表面界面进行调节, 来提高材料的电化学性能。

我们利用稻壳碳作为硬模板, 制备出 V₂O₅ 纳米颗粒。我们发现将材料纳米化可以显著的提高材料的电化学性能。同时, 我们通过水热法制备出 H₂V₃O₈ 纳米线与石墨烯复合材料, 发现 H₂V₃O₈ 与石墨烯之间形成 V-C 键。并且复合材料具有优秀的循环稳定性和倍率性能。此外, 对材料的内部结构和表面界面进行改性, 利用 Al 离子掺杂以及石墨烯复合对 V₂O₅ 纳米材料进行双修饰, 可以有效地提高材料的电化学性能。最后, 利用真空冻干技术制备出适合钠离子电池的片状 V₂O₅ 纳米材料。

参考文献:

[1] Zhu K, Qiu H, Zhang Y, et al. ChemSusChem, 2015, 8(6): 1017-1025.

[2] Zhu K, Yan X, Zhang Y, et al. ChemPlusChem, 2014, 79(3): 447-453.

致谢：感谢国家青年科学基金（51702063）的资助。

关键词：纳米材料；锂离子电池；钠离子电池；表面修饰；掺杂

D11-50

绿光激光器 InGaN 量子阱有源区 trench 缺陷研究

田爱琴, 刘建平*, 张立群, 黄思溢, 周伟, 池田昌夫, 张书明, 李德尧, 张峰, 温鹏雁, 杨辉

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 纳米器件与应用重点实验室

半导体激光器具有成本低、体积小、寿命长等优点, 正在兴起的激光显示技术迫切需要高性能的 GaN 基绿光激光器。绿光 InGaN 量子阱是 GaN 基绿光激光器的核心结构, 其缺陷密度和晶体质量直接决定了器件的性能。相比于蓝光 InGaN 量子阱, 绿光 InGaN 量子阱生长温度低、晶格失配大, InGaN 量子阱的界面易形成 trench 缺陷, 是限制 GaN 基绿光激光器效率提升的瓶颈之一。我们通过对绿光 InGaN 量子阱有源区进行界面处理, 研究了 trench 缺陷的形成机理。研究表明, 绿光 InGaN 量子阱中 In 偏析导致的富 In 团簇是 trench 缺陷形成的原因。采用界面高温热处理的 InGaN/GaN 量子阱有源区可以抑制量子阱与量子垒界面的 trench 缺陷, 从而内量子效率可达 59%。并且采用界面高温热处理的绿光 InGaN/GaN 量子阱激光器具有较小的半宽以及更少的局域态。制成激光器芯片后, 绿光激光器的阈值电流密度从 8.5 kA/cm² 降低到 1.85 kA/cm²。

D11-51

反铁磁绝缘体中的自旋庞磁阻效应

邱志勇¹, 侯达之², Joseph Barker², Kei Yamamoto², Olena Gomonay³, Eiji Saitoh²

1.大连理工大学

2.日本东北大学

3.德国美因茨大学

纯自旋角动量的传输（自旋波）因其完全摆脱了电子散射所带来的热损耗, 并可在绝缘体中远距离传播, 因此被期待在新一代低能耗电子器件中成为替代电流的信息及能量的理想载体。然而如何实现自旋波的高效激发、调控、探测仍是自旋波应用亟待解决的关键科学问题。报告人近年致力于将反铁磁等新型自旋材料引入自旋电子学研究中, 并在其中探寻自旋波调控的解决方案[1, 2]。

最近在基于反铁磁绝缘体的研究中, 我们在奈尔温度附近首次观测到了自旋波传输的金属-绝缘体相变, 并证实该相变起源于自旋波的自旋极化方向与反铁磁绝缘体中奈尔矢量间的几何关系的变化。当奈尔矢量与自旋极化方向垂直时, 自旋波的传输被反铁磁材料完全隔绝。更进一步, 通过外磁场对奈尔矢量的调制, 我们成功的实现了磁场对自旋波传输的有效控制。该效应的特征与电子体系中磁场可控的金属-绝缘体相变效应: 庞磁阻效应 (CMR) 极具可比性, 因此被命名为自旋庞磁阻效应 (SCMR), 被期待在未来的基于自旋波新型逻辑及存储器件中应用。[3]

参考文献:

[1] D. Hou, Z. Qiu*, J. Barker, K. Sato, K. Yamamoto, S. Vélez, J. M. Gomez-Perez, L. E. Hueso, F. Casanova, and E. Saitoh, "Tunable Sign Change of Spin Hall Magnetoresistance in Pt/NiO/YIG Structures" Phys. Rev. Lett. 118, 147202 (2017).

[2] Z. Qiu, J. Li, D. Hou, E. Arenholz, A. T. N'Diaye, A. Tan, K. Uchida, K. Sato, S. Okamoto, Y. Tserkovnyak, Z. Q. Qiu, and E. Saitoh, "Spin-current probe for phase transition in an insulator" Nat. Comm. 7, 12670 (2016).

[3] Z. Qiu, D. Hou, J. Barker, K. Yamamoto, O. Gomonay and E. Saitoh, 'Spin Colossal Magnetoresistance an antiferromagnetic insulator', Nat. Materials (2018) accepted.

关键词：自旋电子材料；自旋波；反铁磁绝缘体；庞磁阻

D11-52

Ge_{1-x}Sn_x 和 Ge_{1-x-y}Si_xSn_y 单晶薄膜的溅射外延制备研究

郑军, 成步文, 刘智, 薛春来, 左玉华, 王启明

中国科学院半导体所

Ge_{1-x}Sn_x 合金通过调节 Sn 组份, 可以实现硅基直接带隙的半导体材料。Ge_{1-x-y}Si_xSn_y 合金则在能带结构和晶格常数两方面独立调节。因此, IV 族 Sn 化合物可以充分利用能带工程和应变工程制备和设计新颖、高效的硅基光电器件, 引起了研究人员的广泛关注。与通常采用 MBE 或 CVD 法不同, 本报告研究采用溅射外延法, 制备高质量 Sn 化合物单晶薄膜材料,

成功实现了 Sn 组份高达 28% 的 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 单晶薄膜以及 Si 组份在 0~12%、Sn 组份在 0~12% 之间连续可调的 $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ 单晶薄膜。高分辨透射电子显微镜、X-射线衍射以及卢瑟福沟道随机谱等研究表明溅射外延 GeSn 和 GeSiSn 薄膜材料具有较高的晶体质量。我们研究了溅射外延的 GeSiSn 单晶材料的拉曼光谱, 得出 Ge-Ge, Ge-Si 峰强度与位置与 Sn 和 Si 组分之间的关系, 对后续 GeSiSn 合金组分的表征具有指导意义。以上结果表明, 采用溅射外延法完全可以制备出高质量的 Sn 化合物单晶薄膜, 对推动 Sn 化合物在光电子和微电子等领域应用具有重要的意义。

关键词: 锗锡; 锗硅锡; IV 族材料; 硅基光子学

D11-53

P 型透明氧化物半导体的开发

张洪良, 张佳业

厦门大学

透明氧化物半导体是一种集光学透明和导电性于一体的重要材料, 在当今蓬勃兴起的太阳能电池、显示、紫外光电探测等领域具有广泛的实际应用。然而, 以 ZnO 、 In_2O_3 、 SnO_2 和近期较为热门的 Ga_2O_3 为代表都是 n 型半导体。高性能 p 型半导体的缺乏严重阻碍了此类材料的广泛应用。其内在原因是由金属氧化物内禀的电子结构所引起的: 即价带顶部主要是由局域化的 O 2p 轨道构成。针对此问题, Hosono 等人提出通过引入 Cu 3d 轨道与 O 2p 轨道进行杂化来提高空穴迁移率的策略; 近期研究人员也尝试利用 Sn 或 Bi 的 s 轨道的孤独电子来设计高性能 p 型氧化物, 如 SnO。本报告将从以上所提及电子结构的角度对 p 型透明氧化物半导体进行总结。同时介绍我们在钛矿结构 LaCrO_3 和 NiO 方面的研究结果。我们发现 Sr 掺杂的 LaCrO_3 是一种性能优异的 p 型透明氧化物半导体, 并提出 Cr 3d 轨道和 O 2p 轨道杂化可以获得性能优异的 p 型的原因。我们通过脉冲激光溅射沉积获得了一系列的高质量 NiO 外延薄膜材料, 研究了 Li 掺杂对电子结构, 光学和电学性能的影响。结果表明, Li 掺杂可以有效地提高 NiO 的导电性, 并将 NiO 的功函数由 4.88eV 提高到 5.2eV, 但均在室温附近表现出低迁移率($< 0.05 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)的小极化子跳跃导电模型。另外, 我们还构建了高质量的 NiO/ BaSnO_3 和 NiO/ SrTiO_3 p-n 异质结, 并利用光电子能谱对界面能带排布进行了表征。结果表明, 其特征性的能带弯曲和排布有利于光生电子-空穴对的有效分离和传输, 可构建高性能紫外探测器和光电催化剂。

关键词: 氧化物; 电子结构; NiO; 薄膜; p 型半导体

D11-54

溶胶-凝胶法制备的 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}:\text{Al}$ 透明导电薄膜及在非晶硅薄膜太阳能电池中的应用

孟磊*, 杨晓光, 柴宏宇, 吕尊仁, 杨涛

中国科学院半导体研究所材料科学重点实验室

$\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ 薄膜材料具有可调谐的能带结构、原料易得、低成本、非毒性、热稳定性好等优点, 成为声波器件、薄膜晶体管、紫光发光二极管、紫外探测器和太阳能电池等领域的关键材料。在薄膜太阳能电池领域, $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ 作为透明电极、缓冲层或载流子输运层材料、不仅利用禁带拓宽效应有效降低传统 ZnO 基透明电极中产生的短波长入射光的光损失, 而且可形成可控的界面能带阶而抑制界面的复合, 可进一步提高电池的综合性能。

本文采用溶胶-凝胶法制备出带隙可调谐的、高透过率、表面平坦且具有 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 数量级电阻率的 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}:\text{Al}(0 \leq x \leq 0.20)$ 透明导电薄膜。本文系统地研究了 Mg 含量对 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}:\text{Al}$ 薄膜的结构、电学和光学性能的影响。研究发现在 $0 \leq x \leq 0.20$ 组分范围内, $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}:\text{Al}$ 薄膜呈现 c 轴择优取向的纤锌矿型晶体结构且随着 Mg 含量的增加 c 轴方向的晶格常数逐渐减小。Mg 含量的增加会拓宽 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}:\text{Al}$ 薄膜的光学禁带宽度, 同时也降低霍尔迁移率和载流子浓度而降低电阻率。在此基础上, 本文首次将这些溶胶-凝胶法制备的 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}:\text{Al}(0 \leq x \leq 0.20)$ 薄膜作为透明电极应用于单结非晶硅薄膜太阳能电池, 并研究了薄膜中 Mg 含量对电池性能的影响。结果表明 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}:\text{Al}$ 薄膜凭借禁带拓宽效应显著地增强了电池在短波长区域的光吸收, 但是 $\text{Zn}_{0.80}\text{Mg}_{0.20}:\text{Al}$ 薄膜会劣化电池的开路电压和填充因子而降低器件性能。 $\text{Zn}_{0.87}\text{Mg}_{0.13}:\text{Al}$ 实现了相对于 $\text{ZnO}:\text{Al}$ 9% 的短路电流密度增益、0.89 V 的开路电压、0.71 的填充因子和 7.74% 的光电转化效率。以上结果预示着具有渐变 Mg 含量的 $\text{ZnO}-\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}:\text{Al}$ 将成为非常有前途的新型太阳能电池用透明电极材料。

D11-55

紫外激光瞬态热反射法测量 GaN 晶片热物性

刘康

哈尔滨工业大学深圳校区理学院物理系

GaN 的射频和功率器件工作时在接近结点处会产生大量余热，该区域的热管理至关重要，因为它会影响器件的可靠性和长期使用的稳定性。特别是，存在于 GaN 外延层和衬底之间的界面热阻是限制器件在高功率密度下散热的重要参数；界面热阻的表征对器件热设计和可靠性评估有重要的价值。当前可用于 GaN 外延晶片热表征的方法，比如时域热反射法和拉曼热成像，需要沉积金属换能层或进行器件加工。在这项工作中，我们开发了一种基于紫外激光瞬态热反射的快速非破坏性方法测量 GaN 外延层和衬底之间的界面热阻。该方法针对刚生长好的 GaN 外延晶片进行测量，不需要晶片的任何加工。我们已将初步结果与以往通过其他方法获得的结果进行比对，证明了该方法的可行性。我们相信，紫外瞬态热反射法可以成为对 GaN 外延晶片快速无损热表征的有效工具。

D11-56

新型 ZnO_{1-x}S_x 基透明薄膜太阳能电池

陈剑，张武忠，丁雅丽，黎明锴，卢寅梅，张清风，何云斌*

湖北大学材料科学与工程学院

太阳能被认为是最清洁、可持续的替代化石燃料的能源之一。提高太阳光利用率的主要方法是提高吸收太阳光的面积和拓宽太阳光谱的利用范围。然而，传统太阳能电池主要通过吸收可见光来实现光电转换，这极大限制了其对不可见光波段的利用率和其安装使用范围。汽车和建筑物窗玻璃虽然对可见光透明，却有可能利用太阳光谱中的紫外和红外光发电。[1] 因此，发展利用紫外线来实现光电转换的透明太阳能电池，是克服太阳能电池大规模安装限制的有效途径。

氧化锌 (ZnO) 作为一种直接宽带隙 (3.37 eV) 半导体，在太阳能电池、紫外发光二极管和光电探测器等光电器件中都有巨大应用潜力。[2] 在本工作中，我们将 S 引入 ZnO 中，得到较窄带隙的 ZnO_{1-x}S_x 合金薄膜，从而拓宽其对太阳光谱的利用范围。实验上，我们通过脉冲激光沉积法在 m-Al₂O₃ 衬底上外延生长非极性 m-ZnO_{1-x}S_x 薄膜，再在 m-ZnO_{1-x}S_x 薄膜表面蒸镀一对平行的金电极，成功制备了 ZnO_{1-x}S_x 基新型平面透明太阳能电池。在 ZnO_{1-x}S_x 基平面薄膜电池中，我们利用非极性 m-ZnO_{1-x}S_x 内部自发极化诱导的退极化电场来有效分离光生电子和空穴以实现光电转换。

我们对 m-ZnO_{1-x}S_x 薄膜的结构、形貌和光学性质，以及所得器件的光伏特性进行了系统研究。结果表明，在 5 Pa 氧压下制备的 ZnO_{1-x}S_x 基薄膜器件的短路电流和开路电压分别为 122.3 μ A/cm² 和 0.694 mV。ZnO_{1-x}S_x 器件的光伏特性不仅取决于 ZnO_{1-x}S_x 薄膜的取向，而且与薄膜的界面、带隙密切相关。此外，我们还讨论了 ZnO_{1-x}S_x 基薄膜器件光电转换的物理机制。

参考文献：

[1] B. Liu et al. Applied Physics Letters, 98 (2011), 113305.

[2] Y. B. He et al. Journal of Alloys and Compounds, 534 (2012), 81–85.

关键词：ZnO_{1-x}S_x 合金薄膜；退极化电场；透明太阳能电池

D11-57

大功率绿光 GaN 基光栅外腔可调谐半导体激光器研究

吕雪芹*，徐滨滨，丁鼎

厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院

近年来，GaN 基边发射激光二极管发展迅速，波长已覆盖紫外到绿光范围。其中，绿光激光二极管以其所具有的效率、体积小、寿命长等优点，成为传统的氩离子激光器和固体激光器的理想替代品。然而，受制于半导体材料宽的增益谱特征以及琥珀腔结构差的选模特性，边发射激光二极管的模式特性并不理想，大功率输出下多呈现多纵模特征，并且，此类激光器的激射波长不易连续调谐，这使其应用受到了极大限制。以激光二极管芯片作为增益器件，利用外加光栅进行光反馈和选模，GaN 基光栅外腔激光器不仅可以单纵模工作，而且激射波长可调。这些优势对于拓展 GaN 基激光二极管在非线性光学倍频技术、高分辨率光谱测试、原子冷却和俘获等领域的应用具有重要意义。

本文基于商用的大功率 GaN 基绿光边发射激光二极管，采用 Littrow 型光栅外腔结构，成功研制出绿光 GaN 基光栅外腔波长可调谐激光器，对其输出功率、调谐带宽、激射线宽等性能进行了测试分析，详细研究了衍射光栅参数对大功率绿光光栅外腔激光器性能的影响。当选用一级衍射效率 50%、零级衍射效率 31% 的衍射光栅做为外部光反馈元件时，1500mA 注入电流下，外腔激光器在 515.8-526.8nm 波长范围内连续可调，调谐范围达 11nm，且单波长最大输出功率近 400mW，外腔耦合输出效率 43.5%；当选用一级衍射效率 10%、零级衍射效率 78% 的衍射光栅做为外部光反馈元件时，外腔激光器波长可调谐范围为 5nm (517.1-522.1nm)，单波长最大输出功率近 750mW，外腔耦合输出效率达 82.8%。并且，依赖于光栅外腔的选模作用，激光器光谱性能得到极大改善，1500mA 电流注入下，外腔激光器输出光谱半高宽由自由运行器件的 3nm 压窄至 0.08-0.18nm。

以上研究结果表明, 对于以光栅一级衍射光做为反馈光、以零级衍射光做为输出光的 Littrow 型光栅外腔激光器, 光栅参数的选择对于优化外腔激光器性能至关重要。光栅较高的一级衍射效率有利于获得较宽的波长调谐范围, 而光栅较高的零级衍射效率有利于提高外腔激光器输出功率。因此, 对于实际应用, 可根据不同的应用要求选择不同参数的光栅, 以获得外腔激光器合适的性能参数。

关键词: 半导体激光器; 光栅外腔; 波长调谐

D11-58

生长温度对 MSM 型 β -Ga₂O₃ 基日盲紫外光电探测器性能的影响

王其乐, 杨蓉慧子, 陈剑, 黎明锴, 卢寅梅, 何云斌*

湖北大学材料科学与工程学院

近年来, 日盲紫外探测技术因其抗干扰能力强、灵敏度高的优点被广泛关注。[1]相较于 AlGa_N、ZnMgO 等常见的日盲紫外敏感材料, β -Ga₂O₃ 因其优异的热稳定和化学稳定性而更容易制备出高质量的薄膜。[2]此外, β -Ga₂O₃ 具备较宽的直接带隙 (4.9 eV), [3]非常适合用于制造日盲紫外光电探测器。在本实验中, 我们利用脉冲激光沉积 (PLD) 通过调控薄膜生长温度制备出一系列的 β -Ga₂O₃ 薄膜, 进而研制基于该薄膜的 MSM 型日盲紫外光电探测器, 并系统研究了生长温度对薄膜结构、光学性能及光电探测性能的影响。

我们使用自制的氧化镓陶瓷作为靶材, 在 4Pa 的沉积氧压下, 通过改变薄膜生长温度, 在 c-Al₂O₃ 衬底上, 生长了一系列的 β -Ga₂O₃ 外延薄膜。然后采用真空蒸镀的方法在薄膜表面沉积了厚度约为 50 nm, 沟道宽度为 10 μ m 的金平行电极, 成功制得了 MSM 型 β -Ga₂O₃ 基日盲紫外光电探测器。研究结果表明, 当薄膜生长温度高于 600 $^{\circ}$ C 时, 成功制备了 (-201) 取向的 β -Ga₂O₃ 外延薄膜, 生长温度低于 600 $^{\circ}$ C 时, 所制备的 β -Ga₂O₃ 薄膜为多晶薄膜。随着生长温度的升高, 薄膜结晶质量逐渐提高, 光学带隙逐渐变宽; 相应器件的响应时间和回复时间分别从 144.445 s 和 17.921 s 降至 0.768 s 和 0.155 s。在 700 $^{\circ}$ C 的生长温度下所制备的器件的性能最佳, 开关比 $I_{\text{light}} / I_{\text{dark}} = 13602.36\%$, 响应度 $R = 18.23 \text{ A/W}$ 。

参考文献:

[1] A.S. Pratiyush, et al. High responsivity in molecular beam epitaxy grown beta-Ga₂O₃ metal semiconductor metal solar blind deep-UV photodetector, Applied Physics Letters, 110 (2017), 221107.

[2] L.X. Qian, et al. Ultrahigh-Responsivity, Rapid-Recovery, Solar-Blind Photodetector Based on Highly Nonstoichiometric Amorphous Gallium Oxide, ACS Photonics, 4(9) (2017), 2203-2211.

[3] B. Zhao, et al. An Ultrahigh Responsivity (9.7 mA/W-1) Self-Powered Solar-Blind Photodetector Based on Individual ZnO-Ga₂O₃ Heterostructures, Advanced Functional Materials, 27 (2017), 1700264.

关键词: PLD; β -Ga₂O₃ 薄膜; 生长温度; 日盲光电探测器

D11-59

非极性 m-BeMgZnO 薄膜制备及其光电探测器研究

杨蓉慧子, 张武忠, 张腾, 黎明锴, 卢寅梅, 何云斌*

湖北大学材料科学与工程学院

ZnO 作为一种宽带隙 (3.37 eV) 直接半导体材料, 具有优异的光电特性, 在多种光电器件, 如: 太阳能电池、发电机、传感器、探测器、发光二极管和激光器[1]等上都有广泛应用。相比于 GaN, ZnO 薄膜具有生长温度低和激子结合能 (60 meV) 高和阈值电压低等优点, 因而在紫外光电探测器中极具应用潜力。ZnO 的带隙调控是拓宽其紫外光探测范围的关键。目前, 人们已在三元合金 (如 MgZnO[2]、BeZnO[3]等) 方面做了大量工作, 但是由于晶体结构不同、原子尺寸差异过大等问题, 难以获得高掺杂量单相合金。鉴于此, 我们通过 Be、Mg 共掺[4]的方法来提高 ZnO 的光学带隙, 同时避免了因掺杂量过高而导致的相分离以及晶格失配问题。此外, 我们通过外延薄膜产生的自发退极化电场来有效地分离光生电子和空穴, 从而使 BeMgZnO 光电探测器的性能得到提高。

本实验中, 我们采用自制的 BeMgZnO 陶瓷靶材, 通过脉冲激光沉积 (PLD) 方法在不同氧压条件下, 在 m 面 Al₂O₃ 衬底上制备了一系列 BeMgZnO 四元合金薄膜。然后采用真空蒸镀方法在薄膜表面沉积了沟道宽度为 100 μ m 的金平行电极, 制得了 MSM 型 BeMgZnO 紫外光电探测器。研究表明: 我们在 2 Pa 的氧压条件下成功制备出了 m 面取向的纤锌矿结构 BeMgZnO 四元合金薄膜; 随着氧压的增大, 薄膜中除了 m 面衍射峰也出现了 c 面的衍射峰, 薄膜中 Be、Mg 含量逐渐减小、Zn 含量逐渐增大, 因而薄膜带隙宽度不断减小。我们发现薄膜面内自发极化诱导的退极化场对光电探测性能有明显影响。相比于外加电场与退极化场反向时, 当外加电场方向与退极化场方向一致时, BeMgZnO 紫外光电探测器的光暗电流比值增

大, 探测器响应速度以及光响应度均有明显提高。

参考文献:

- [1] Ü. Özgür, Y. I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S. J. Cho and H. Morkoç. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98 (2005) 041301.
- [2] A. Ohtomo, M. Kawasaki, T. Koida, K. Masubuchi, H. Koinuma, Y. Sakurai, Y. Yoshida, Y. Yasuda, Y. Segawa. *MgxZn1-xO as a II-VI Widegap Semiconductor Alloy*. *Applied Physics Letter*, 72 (1998) 2466-2468.
- [3] J. M. Khoshman, P. Jakkala, D. C. Ingram, M. E. Kordesch. Optical conductivity tuning and electrical properties of a-BexZnyO thin films. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 440 (2016) 31-37.
- [4] X. Y. Su, P. P. Si, Q. Y. Hou, X. L. Kong, W. Cheng. First-principles study on the bandgap modulation of Be and Mg co-doped ZnO systems. *Physica B*, 404 (2009) 1794-1798.

关键词: 非极性 m-面; BeMgZnO 薄膜; 脉冲激光沉积; 紫外光探测器

D11-60

单晶硅中变形致非晶化相变的原位透射电镜研究

王悦存¹, 张伟¹, 汪丽媛², 庄苗², 李巨^{1,3}, 马恩^{1,4}, 单智伟^{1*}

1. 西安交通大学材料科学与工程学院 微纳尺度材料行为研究中心
2. 清华大学航天航空学院
3. 约翰霍普金斯大学材料科学与工程学院
4. 麻省理工大学能源科学与工程学院

晶体硅是当今半导体行业的支柱材料,它作为一种极具潜能、亟待开发利用的先进材料,正引起越来越多的关注和重视。硅基的芯片、集成电路、太阳能电池等都已广泛应用于我们的生活中。单晶硅在从晶圆到晶块再到晶片的过程中需要经历切割、打磨、抛光等机械加工工序,人们发现:处理完以后的单晶硅片表面经常会留有一层非晶硅,用其制作的半导体器件性能不可避免地要受到影响。因此硅中力致非晶化的问题吸引了众多科研人员的研究兴趣。然而经过几十年的努力,力致非晶化的机理仍处于争论中,因为之前的非晶化研究都是在比较复杂的应力状态下进行,这不仅为定量分析带来了困难,也很难借助先进的原位手段直接观察到非晶化的发生过程。另外,考虑到单晶硅本身在室温下易于开裂的特性,因此在较简单的单轴加载条件下实时观察整个非晶化过程一直都被认为是不可能的。

针对上述问题,我们利用聚焦离子束加工出了一种外面包覆非晶软层的单晶硅纳米柱结构,该结构在抑制单晶硅脆性开裂的同时还显著提高了心部单晶硅中的应力水平,为非晶化的发生提供了前提条件。高分辨透射电镜中的原位观察表明:单晶硅可以通过塑性变形积累大量的单层、非稳层错直接导致非晶化的发生,从而更新了人们长久以来的认知:即非晶硅可以不经过高压中间相的转变也能产生。通过第一性原理计算从电子层面揭示了层错的产生、聚集和最终导致非晶化的整个过程,与实验结果相辅相成。该研究不仅探明了硅中非晶化相变产生的原因,同时为其他脆性材料塑性变形与相变的原位研究提供了新的思路和方法。

参考文献:

1. Deb, S. K., Wilding, M., Somayazulu, M. & McMillan, P. F. *Nature* 414, 528-530, (2001).
2. Ge, D., Minor, A. M., Stach, E. A. & Morris, J. W. *Phil. Mag.* 86, 4069-4080, (2006).
3. Wang, Y.-C., Xie, D.-G., Ning, X.-H. & Shan, Z.-W. *Appl. Phys. Lett.* 106, 081905, (2015).

D11-61

Improved thermoelectric properties of Ag-doped polycrystalline SnSe with facile electroless plating

Hong-Xing Mi^{1,2}, Zhong-Yue Huang^{3*}, Li Han^{1,2}, Ju Xu^{1,2*}

1. Micro-nano Fabrication Technology Department, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, PR China
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, PR China
3. Liquid/Solid Metal Processing Institute, School of Materials Science & Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, PR China

Recently, huge enthusiasm has been taken for a new thermoelectric material of SnSe whose n type material with single crystalline structure has ZT value reached 2.6 ± 0.5 at 773K since it is published on Science magazine. However, the mechanical

properties of this single crystalline structure material has a brittle nature and resulting in researchers are taken their interests to the polycrystalline structure SnSe bulks prepared by power sintering method. To achieve homogeneously n type doped SnSe polycrystalline bulks, a rapid and effective way of Electroless plating Ag is taken to dope Ag in polycrystalline SnSe in this paper. The results showed a high thermoelectric performance of the Ag doped SnSe was achieved, in which a peak $ZT=1.0$ was obtained in 1.0at% Ag doping compared with the original none doping $ZT=0.4$ at 873K, and the thermal conductivity reduced 40% to 0.5 $Wm^{-1}K^{-1}$, while keeping the electrical conductivity and Seebeck coefficient unchanged at the same temperature. What's more, Ag doping more or less than 1.0at% will cause arise of thermal conductivity, owing to the balance between charge carrier transportation and phonon scattering caused by Ag doping defects.

墙展

D11-P01

静电纺丝制备 PEDOT:PSS 基纳米纤维及其热电性能研究

金胜男, 江莞, 王连军

东华大学

温差发电是一种实现设备自供电的能量采集方式, 这种方式能让可穿戴设备利用人体热量发电。当今可穿戴柔性热电材料具有质轻、适形、可延展等优势, 在智能穿戴电子产品方面有广泛的应用前景。PEDOT (聚(3,4-乙撑二氧噻吩)) 良好的电子传输性能、可加工处理性、环境稳定性使其在有机热电材料领域中备受青睐。静电纺丝纳米纤维具有比表面积大、直径小等优点, 在新能源、过滤防护装置、柔性电子器件等领域都具有应用潜力。本文利用静电纺丝技术制备了 PVA/PEDOT:PSS/DMSO 复合纳米纤维膜, 并利用原位聚合反应在纤维表面包覆了 PEDOT。此纤维膜的 Seebeck 系数和电导率分别为 $13.6\mu V/K$ 和 $1.2S/cm$, 经过 H_2SO_4 和 Na_2SO_3 处理后可进一步提高纤维膜的热电性能。与抽滤、悬涂制得的薄膜相比, 此纤维膜具有更加良好的机械柔性, 更能满足穿戴式电子设备所需求的机械性能要求, 在未来柔性热电材料发展中具有潜在应用前景。

关键词: 静电纺丝; PEDOT:PSS; 热电

D11-P02

一种碳化硅粉料的简单制备方法

韦玉平¹, 何丽娟¹, 袁振洲¹, 靳丽婕¹, 陈颖超¹, 张云伟¹, 杨丽雯², 程章勇², 王玥平¹, 刘欣宇¹

1.北京世纪金光半导体有限公司

2.北京华进创威半导体有限公司

本文以碳粉和硅粉为原料, 在中频感应炉、石墨坩埚及保温毡所提供的温场下合成了浅绿色碳化硅粉料。拉曼光谱显示, 粉料的主晶形是 6H, 含有少量 15R, 显微镜下的平均统计粒径为 $200\mu m$ 。实验发现, 与碳硅的比例等因素相比较, 温度和梯度控制是合成碳化硅的关键参数。加热阶段反应室中气流的变化可以降低产物中杂质元素的含量。Si、C 混合物在 $1900^\circ C$ 和 $104Pa$ 下反应 12 小时, 可获得 3C 碳化硅粉末, 重新加热到 $2000\sim 2300^\circ C$, 氩气压力降至 $5000Pa$, 即可获得 6H 碳化硅粉末。当碳粉的粒径小于 $30\mu m$ 时, 二次生长后产物粒径可以增加 3 倍。这可能与小粒径 C 参与反应时的溶解、成核及反应后的连接生长方式有关。最后, 相比直接加热硅碳混合物到 $2000\sim 2300^\circ C$, 两步转变法获得粉料更加均匀, 反应更加完全。

关键词: 碳化硅; 粉料; 制备

D11-P03

CNTs/Na-SnSe 复合材料的制备和热电性能研究

杜鹏鹏, 王连军, 范宇驰, 江莞

东华大学

SnSe 单晶材料展现了极为优异的热电性能, 但是只在 b 轴方向具有极高的热电性能, 且机械性能较差, 严重限制了其制备热电器件走向实际应用, 因此制备高性能的多晶 SnSe 热电材料已成为当前的研究热点。为了提高多晶 SnSe 材料的热电性能, 本文通过在 Na 掺杂的多晶 SnSe 基体中引入 CNTs, 得到了具有高热电性能和强机械性能的多晶 SnSe。通过低温研磨和放电等离子烧结技术将 CNTs 均匀分散在 Na 掺杂的 SnSe 基体中。发现 Na 掺杂的多晶 SnSe/CNTs 复合材料维持了高的载流子浓度, 室温下约为 $4\times 10^{19}cm^{-3}$, 使得功率因子很高。均匀分散在基体中的 CNTs 在没有降低电导的情况下显著

降低其热导。当加入 0.25vol%CNTs 时，在 773K 获得最高的 ZT 值 0.96。更重要的是，Na 掺杂的多晶 SnSe 样品复合 CNTs 后表现出优异的机械性能，这有利于器件制造和实际应用。

关键词：SnSe；碳纳米管；热电材料；ZT 值

D11-P04

Al Mg Cu 等元素掺杂 ZnO 的制备与光电性能研究

王洪科，程兴旺

北京理工大学材料学院

氧化锌 (ZnO) 是一种 II-VI 直接带隙宽禁带半导体材料，具有优良的铁电压电性能。室温下禁带宽度为 3.37eV、激子束缚能高达 60meV，这使 ZnO 材料成为光电子领域中的研究热点。

本文采用磁控溅射的方法，以纯锌为靶材，溅射基底为高纯硅(晶向 100)。首先探究了不同 Ar/O₂ 比例，不同加热温度(200℃、250℃、300℃)，不同靶材高度对制得 ZnO 薄膜性能的影响。之后探究了掺杂不同金属元素 (Al、Mg、Cu 等) 的影响，具体步骤是将纯的 Al 靶和 Mg 靶切成 1/4 圆，Zn 靶切为半圆共同溅射，实现共掺杂。最后在 800℃ 下对所得薄膜进行退火处理。利用 XRD、TEM、SEM、PL 等方法分析了薄膜的形貌结构、光致发光和压电性能，得出了如下的结果：

掺杂了其他元素的 ZnO 薄膜依然具有六角纤锌矿结构，但是随元素含量增加，生长晶向发生变化；掺杂比例较低时，得到的薄膜是单一相，掺杂原子会替代 Zn 原子位置；掺杂比例较高时，易发生团聚，难以形成均一稳定的薄膜。SEM 分析可知，随着其他元素掺杂量的增加薄膜由颗粒状向棒状转变。共掺杂薄膜在可见光区内的透射率大于 50%，紫外吸收峰发生蓝移。在室温下的 PL 谱表明共掺杂 ZnO 薄膜的紫外发射峰向短波长方向移动；Mg-Al 共掺杂 ZnO 薄膜，随着 Al 掺杂比例的增加，会发射出峰值分别为 603 nm 的黄光和 559 nm 的绿光。掺杂 Mg、Al 可以有效的改善其光性能，掺杂比例 5% 时效果最好；而 Cu 的掺杂则可以改善其室温铁磁性。

关键词：ZnO 薄膜；AlMn 掺杂；磁控溅射法

D11-P05

基于有机-无机杂化钙钛矿的超高响应度光电探测器的研究

谢超

合肥工业大学

有机-无机杂化钙钛矿材料由于其合适的直接带隙、高的光吸收系数、高的载流子迁移率和大的载流子扩散长度等优异的电学和光学性质，在包括高性能光电探测器等一系列光电子器件领域吸引了广泛的研究兴趣。在这次报告中，我将介绍如何利用有机-无机杂化钙钛矿材料与有机半导体材料结合，通过溶液制备法构建基于垂直异质结的在紫外-可见-近红外波段具有高达 10⁹ 响应度的光电探测器；我们系统地研究了器件的相关参数并对器件工作机理进行了探究。利用异质结界面载流子俘获效应，我们进一步提升了该类器件的光响应度和响应速度。此外，我还将介绍如何利用具有高载流子迁移率的石墨烯进一步优化器件电荷传输，实现具有 10¹⁰ 超高响应度的光电探测器。

关键词：有机-无机杂化钙钛矿；光电探测器；超高响应度

参考文献：

1. Chao Xie, et al, "Ultrasensitive Broadband Phototransistors Based on Perovskite/Organic-Semiconductor Vertical Heterojunctions", Light: Science & Applications, 2017, 6, e17023.
2. Chao Xie, et al, "Perovskite/Poly(3-hexylthiophene)/Graphene Multiheterojunction Phototransistors with Ultrahigh Gain in Broadband Wavelength Region", ACS Appl. Mater. Interfaces, 2017, 9, 1569.
3. Chao Xie, et al, "Enhanced Performance of Perovskite/Organic-Semiconductor Hybrid Heterojunction Photodetectors with The Electron Trapping Effects", J. Mater. Chem. C, 2018, 6, 1338.

D11-P06

深色氧化锌准一维纳米结构的水热制备方法及其光学性质调变

陈昊，徐法强，王凯，姚一，董纳

中国科学技术大学

氧化锌是一种宽禁带半导体材料，通常只能吸收紫外光部分的能量。水热法是一种传统的制备纳米晶体的方法，其具有产物结晶度高、成本低廉等优点。为了提高氧化锌对太阳光的吸收强度，本文采用了水热法，并直接以锌片作为原料和衬底，通过调控温度、时间、溶液浓度等变量制备出了深色氧化锌。利用场发射扫描电镜观察到其呈现垂直生长的纳米棒状阵列。

通过 X 射线衍射仪和透射电子显微镜发现氧化锌为纤锌矿结构，且沿着[0001]方向生长。紫外-可见光吸收谱表明，随着温度的升高，氧化锌对可见光的吸收能力显著增强。通过光致发光谱的数据发现，温度的升高可以显著提升氧化锌的发光水平。另外，我们发现氢氧化钠和双氧水浓度的变化对氧化锌吸光能力的影响较小。这种优异的吸光和发光性质可能与氧化锌纳米棒的尖端结构有关。该深色氧化锌材料将会在太阳能吸收方面有广泛的应用。

关键词：水热法；深色氧化锌；吸光性；发光性

D11-P07

低频超声波打印 Tips-pentacene 相关研究

刘晨宁，刘川

广州中山大学

有机半导体材料因其能够溶解于各种有机物的特性在柔性电子器件制备中备受关注，其溶液制程也有了更多新的发展方向，除了传统的旋涂技术外，印刷制备有机半导体的各种技术也不断涌现，其中打印制备有机半导体技术操作简洁快速，可大面积制备且成本低，在柔性电子技术领域中获得很大关注。

本研究中基于 sonoplot 设备，即采用了低频超声波打印方式制备 Tips-pentacene 晶体管，着力研究打印过程中衬底温度、溶液浓度和打印速度这三个因素对打印制备的半导体薄膜质量及性能的影响。根据实验结果的分析发现，上述三种因素的改变都会造成半导体薄膜结晶形态的变化，其中适宜的衬底温度能够使半导体在打印过程中有序结晶，而浓度的增加会改变晶体的密度，打印速度需要在适宜的区间内才能使半导体结晶有序。通过测试并提取迁移率分析后证实载流子在有序结晶的薄膜中传输更畅通。除此之外还发现只有当三种因素相互协调，使溶液蒸发速度与结晶速度匹配时，结晶的有序性才最佳，所制备的器件提取的迁移率也较好。

关键词：OTFT Sonplot Tips-pentacene；打印；有序

D11-P08

MEMS 低频电容传感器的设计

沈倪鑫，张国军，张文栋

中北大学

随着减振降噪技术的发展，人们对各种设备的低频信号的精准探测提出了更高的要求。目前，传感器主要分为压电式和电容式两种。相比于压电式传感器，电容传感器因其以下几个显著优点而受到广泛关注：

- (1) 特别适宜用来解决输入能量低的测量问题，灵敏度、分辨率非常高。
- (2) 动态响应好。
- (3) 声阻抗与传播媒介相匹配。因其对声音的接收只依赖于薄膜的振动，无需匹配层的添加就能实现声阻抗的良好匹配。
- (4) 体积小，成本低，结构简单便于制作，易实现批量化生产。

本文的 MEMS 低频电容传感器主要针对低频水声信号的探测，该电容传感器是在 SOI 片顶层导电硅上定义带孔的振动薄膜和上电极，在硅片上定义下电极、绝缘层及腔体，通过 SOI 片与硅片键合形成电容敏感结构。整个电容敏感结构置于硅油中（包括电容空腔内也注满了硅油），用聚氨酯封装。该 MEMS 低频电容传感器的工作原理是：当外部声波信号作用于薄膜表面，引起薄膜振动发生挠曲，上下电极间因挠曲带动电极间距的改变，从而产生交变电容。通过四臂阻抗电路，实现电容变化的检测到输出电压的变化的检测，从而实现声能到电能的转化。

在该低频电容传感器设计中，薄膜是电容敏感结构的核心部分。薄膜的低频性能与其外形尺寸是一对相互矛盾的指标，为降低传感器的工作频率必须以增大薄膜的尺寸为代价。由于电容振动膜很薄极易被压破，在振动薄膜边缘处开设 4 大小相同且对称分布的注油孔，可有效的提高振动薄膜的承压能力，同时硅油的流动可减少薄膜振动时的阻尼。通过 ANSYS workbench 14.5 建立电容模型，进行了设计结构的仿真，验证了结构设计的合理性和正确性。该低频水声电容传感器敏感结构置于与水性能相似的硅油中 and 用聚氨酯封装中可以大大降低水声信号的衰减，提高声信号的接收利用率。

关键词：MEMS；电容传感器；水声信号

D11-P09

纤毛式 T 型 MEMS 仿生低频水听器的设计

廉宇琦，张国军

中北大学

随着海洋政策的实施,加强海洋开发,管理,利用和控制将成为各国未来持续健康发展的重点。但是安静的舰艇和潜艇产生的噪音几乎低于 500Hz,目前水听器的接收灵敏度并不高。为了进一步提高接收灵敏度,本文设计了一种基于仿生原理、压阻效应和 MEMS 技术的低频 500Hz 以下水声信号检测的纤毛式 T 型 MEMS 仿生低频水听器结构。该结构具有灵敏度高,加工简单,成本低等优点。

本文分析了鱼类侧线感觉传播的仿生理理论和材料的压阻效应。基于上述理论,设计了纤毛式 T 型 MEMS 仿生低频水听器的敏感微观结构。在分析了 T 型敏感微结构机械特性之后,建立了数学模型,并确定了 T 型敏感微结构的尺寸、并利用 ANSYS 仿真软件,模型由单束微结构和固定在中心连接器中心的仿生纤毛柱组成。用于形成惠斯登电桥的四个等效压敏电阻器 R1 至 R4 分布在单光束上。通过对敏感组织的静态分析和模态分析,得出最大应力为 24830Pa,固有频率为 675Hz。在 MEMS 处理平台上,器件芯片被制造和封装。模仿鱼的侧面感觉器官制作了纤毛式 T 型 MEMS 仿生低频水听器原型。

最后,用矢量水听器校准装置完成原型的灵敏度测试实验。实验结果表明,T 型敏感微观结构是可行的,设计的纤毛式 T 型 MEMS 仿生低频水听器能够实现水听器在低频信号时的灵敏度得提高。

关键词: MEMS; 纤毛式; 水听器; T 型

D11-P10

基于 Au/BaTiO₃/Sr₂IrO₄ 异质结的阻变行为和类神经突触可塑性

徐琿

中国科学技术大学医院

随着信息技术的发展,对计算机的信息存储和处理能力都提出了更高的要求。在 CMOS 工艺日渐趋于物理极限的背景下,发展具有更高存储密度和运算效率的信息器件显得尤为迫切。阻变存储器是近年来逐渐发展出的一类新型存储器件。该存储器根据其电阻的高低状态来存储信息,具有非易失性、存储密度高、能耗低等优点。本文研究了 Au/BaTiO₃/Sr₂IrO₄ 异质结的阻变行为,当 BaTiO₃ 电极化方向发生变化时,异质结的两个界面势垒发生变化,从而导致电阻值的高低变化。电阻转换表现出优异的保持性和耐久性。在此基础上,我们也研究了 Au/BaTiO₃/Sr₂IrO₄ 异质结作为类神经突触的潜力,在不同电压脉冲的激发下,器件表现出短程可塑性(STP)和脉冲时间依赖的可塑性(STDP)。这些结果表明 Au/BaTiO₃/Sr₂IrO₄ 异质结在具有低能耗和高运行效率的人造神经突触器件中有很好的应用前景。

D11-P11

基于仿生纤毛簇的高灵敏度 MEMS 矢量水听器设计

张兰胜, 张国军

中北大学

随着水声对抗与反对抗的发展,特别是多数潜艇采用消声瓦之后,目标信号的强度严重减弱,结合远距离探测的需要,高灵敏度检测问题变得非常迫切。在 MEMS 仿生器件研究方面,已有多家研究机构通过模仿鱼类侧线器官、蟋蟀的听觉纤毛制作出不同传感器。由中北大学设计的压阻式 MEMS 仿生矢量水听器实现了对低频远距离信号的矢量探测,其探测灵敏度高于压电陶瓷水声传感器。压阻式 MEMS 矢量水听器将仿生原理、压阻原理、MEMS 技术相结合,将 MEMS 技术引入水声领域,可在传感器的微型化设计方面及阵列集成方面带来益处。

本文设计的簇型微结构将压阻式 MEMS 仿生矢量水听器传统结构做进一步完善,簇型微结构主要包括两部分:高精度四梁-中心连接体微结构和成中心对称的四根刚硬塑料柱体簇,四梁-中心连接体采用 MEMS 基硅微机械加工技术加工而成,刚硬塑料柱体则采用塑料成型技术制作而成。当被测声源发出信号,引起水下声压变化,通过水质点作用于仿生纤毛簇上引起纤毛簇的摆动,继而引起高精度敏感四梁结构产生应力、应变,此时分布在四梁根部的压敏电阻阻值产生变化,从而利用惠斯通电桥将电阻阻值变化转化成电压变化量输出,这就是此种传感器的工作原理。

采用有限元分析软件 Ansys17.0 建立传感器微结构的有限元模型进行仿真,簇型微结构在相同条件下比传统结构悬臂梁上的最大应力可以提高 3.98 倍,即灵敏度可以提高 11.99dB,并且一阶共振频率可以达到 900HZ,利用水听器校准系统,对簇型矢量水听器的灵敏度及指向性进行校准测试,并对所测数据进行后处理。

与之前设计出的 Lollipop-Shaped, Cup-Shaped 和 Two-component cilia 等结构相比较,在保证相同带宽的同时,簇型微结构灵敏度有显著的提高,而且之前三种微结构仿生纤毛的制作都需要两部分的合成,增加了设计和工艺的难度,本文提出的簇型结构,分别将四根纤毛成中心对称分布在中心质量块上,不需要多余的工艺设计,在保证 20-900HZ 带宽的同时,灵敏度可以达到-185 dB(900Hz, 0dB at 1V/ μ Pa),且具有良好的“8”字型余弦指向性曲线,凹点深度可以达到 31.6dB。

关键词: 纤毛簇; MEMS; 灵敏度; 矢量水听器; 压敏电阻

D11-P12

有机半导体中的电荷传输机制模型

黄凯荣, 刘川

中山大学

有机场效应晶体管 (OFET) 因为拥有将电子电路集成到柔性的塑料基板上的潜力, 具有广阔的应用范围, 在最近的几十年来成为了微电子行业中快速发展的分支和研究热点。目前针对有机半导体 (OSC) 中电荷传输, 不同学者提出了不同的理论。然而, 各种电荷传输理论的通常具有材料的局限性, 使得不同微观机制和不同聚合物中的电荷传输不能直接和一般地进行比较。更重要的是, 多种模型之间的使用范围有所重叠, 这就提出了一个问题, 我们应该在何种情况选择哪种模型? 因此我们在本文中提出基于广义爱因斯坦关系 (GER) 的统一有机半导体电荷传输机制的理论模型。通过改变状态密度和离域程度在高斯分布密度状态下的方差, 能够成功预测各种结晶度的有机半导体中的电荷输运。大量的有机薄膜晶体管实验数据中, 该模型能够在不同温度下迁移率与栅极电压的关系实现良好的拟合。以此, 借助模型中的两个重要参数可以在图中直接比较各种有机半导体的电荷输送有序度, 揭示了动态混乱度和离域程度决定有机半导体中的电荷输送。

关键词: 有机半导体; 电荷传输; 爱因斯坦关系

D11-P13

溶液法制备二维有机小分子薄膜及其晶体管非理想特性的优化

戴富华, 刘川

广州中山大学

近年来, 溶液法制备有机场效应晶体管由于其工艺简单、成本低廉而备受关注, 在印刷器件、柔性电子等领域有广泛的应用前景。其中, 溶液法下制备高质量的有机半导体薄膜是获得性能晶体管的关键。常见的提拉法、刮棒涂布等方法均可获得高质量的有机小分子单晶及高迁移率的场效应晶体管器件。然而, 由于有机材料与金属存在注入势垒以及介电层表面的缺陷态等, 晶体管容易表现出非理想的特性, 包括非线性的场效应电导、较大的亚阈值摆、较低的可靠性系数等。

在本次工作中, 我们通过倾斜旋涂的方法, 有效得控制了晶体的生长过程, 并得到了大面积的有机二维小分子单晶。其晶体管迁移率达到了 $4.6 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 但是, 其特性曲线展现出明显的非理想特征。我们将该方法进一步应用到图形化后的表面上, 从而获得了取向性优异的二维单晶阵列。采用印刷工艺在室温下制备了有机场效应晶体管阵列, 其最高迁移率达到了 $10.1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 平均迁移率达到了 $7.5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 并且可靠性系数超过了 90%, 非常接近于理想的晶体管器件。

关键词: 溶液法; 二维有机小分子单晶; 场效应晶体管; 非理想特性

D11-P14

基于柔性铟镓锌氧薄膜晶体管的反相器

郑集文, 刘川

中山大学

随着科学技术的发展, 氧化物薄膜晶体管, 特别是铟镓锌氧化物薄膜晶体管在显示和大规模集成电路领域中受到越来越多人的关注。铟镓锌氧薄膜晶体管具有高迁移率, 良好的稳定性和柔韧性, 因此被视为最有潜力的半导体器件之一。在本工作中, 主要在聚对苯二甲酸二醇酯的衬底上低温制备铟镓锌氧薄膜晶体管, 迁移率最高可达到 $8 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ 。并且基于伪 CMOS 的连接方式, 制备了柔性反相器, 最大增益可达到 20, 性能可以媲美硅基反相器, 并且在未来柔性电路中有很大应用前景。

关键词: 铟镓锌氧薄膜晶体管; 反相器; 柔性器件

D11-P15

一种新型的 MEMS 压阻式心音传感器

王卫东

中北大学

心脏听诊是诊断心血管疾病和了解心脏功能的一种最古老的方法之一。迄今为止这项技术仍然是诊断心血管疾病的一种基本方法, 而心音图谱的出现进一步提高了心血管疾病的诊断。心音信号虽然包含了人体心脏和血管中丰富的原始信息, 但

是其有效信息的提取相当困难。正是这种难度，使心音技术的研究受到了冷落。造成这种困难的原因有三：一是人们对心音产生的机理还不十分了解，对产生心音的机理存在许多的假设，这些假设目前还不能完善的解释心脏的病理、生理。二是缺乏对心音信号的系统性的定量的分析，容易受到医生主观性的影响。三是心音信号的随机性和复杂性，从中提取病理特征是非常困难的。现在随着电子技术的迅猛发展，电子计算机数据采集、现代数字信号处理技术以及模式识别技术的广泛应用，心音信号的小波分析、时频分析、神经网络模式识别技术等相继出现，使得心音的研究有了新的突破，大大的增加了心音听诊在临床上的应用潜力和价值。传统心音学与现代信号处理技术相结合，可能会给冠心病早期诊断技术带来突破性的进展。

新型的听诊器微结构由中心质量块，单悬臂梁，外部支撑框架组成，因为该心音传感器采用接触式传导，所以当心音信号透过胸腔传递到该微结构时，该微结构可以对心音信号准确感知。由于中心质量块的体积、质量远大于单悬臂梁，所以中心质量块由心音信号引起的振动可以看作是刚体运动，并不会发生形变，而支撑梁则会因为中心质量块的振动发生横向位移，导致梁上正应力的变化。单悬臂梁在最大形变处设有压敏电阻，形变大小的不同会导致压敏电阻阻值的不同，引起后续电信号的改变，电信号直观的反应了心音信号的变化，医生可以根据该电信号的波形，诊断患者。

心音的频率响应范围主要集中在 20-600HZ。针对心音频率响应的特点，设计出一种基于 MEMS 压阻式心音传感器。并且确定了其结构尺寸。相比于之前的结构设计，若想提高灵敏度，总是以牺牲固有频率为代价。但是本文设计的微结构不仅提高了结构的灵敏度，而且极大的提高了该微结构的固有频率。并且最终的测试结果表明，该传感器能够明显的得到第一心音与第二心音的波形，心动周期约为 750ms，心率约为 85 次/分，S1S2 间期与 S2S1 间期之比大致为 1:2，与正常的心音标准一致，便于临床诊断。将 MEMS 压阻式传感器应用于心音检测，极大的降低了医用成本，有着广泛的应用前景。

关键词：心音；MEMS；压阻式心音传感器

D11-P16

全无机 CsPbBr₃ 钙钛矿微米线光电探测器

桂鹏彬

武汉大学

近年来，备受瞩目的有机-无机杂化钙钛矿光敏材料有望推动下一代溶液法制备、高响应度、快速、大线性动态范围光电探测器的发展。特别地，钙钛矿型光敏电阻具有低成本制备和易集成等特性，在便携式、大规模集成器件等领域越来越受到研究人员的关注。然而，光敏电阻相对于光二极管具有较高的暗电流仍然是限制钙钛矿型光敏电阻进一步发展的因素。在这里，我们介绍了一种基于全无机钙钛矿多晶微米线制备的高性能光电探测器。这种全无机 CsPbBr₃ 微米线可通过在室温下简易低成本的两步溶液法来制备，其表面附着有大量纳米晶，以期增强微米线对光的吸收能力。通过调节接触，我们制备了基于 ITO/CsPbBr₃/ITO 肖特基型的光电探测器，得益于肖特基势垒，在低电压区域其暗电流和噪声都能够被有效抑制。被组装在氧化铟锡（ITO）电极上的该种基于 CsPbBr₃ 多晶的单根微米线探测器展现出了高达 118 A/W 的高响应度和 40 ms 以内的快速响应。与此同时，由于此光敏电阻具有很小的暗电流（pA）和噪声（1~10 fA/Hz^{1/2}），其探测度达到了 10¹² Jones，这些优异的性能显示了全无机钙钛矿在弱光探测等领域的潜在运用。

关键词：探测器；钙钛矿

D11-P17

钙钛矿单晶的制备

姚方

武汉大学

钙钛矿材料具有许多的优异性能而广受研究者的关注，钙钛矿太阳能电池更是发展迅速，效率从 3.9%已经提升到超过 22%，在发光二极管上也具有良好的应用，其电致发光外量子效率超过 15%，此外在探测器，激光等领域也有着广泛的应用。钙钛矿单晶，具有更长的扩散长度、寿命具有良好的应用，例如钙钛矿单晶电池，其效率超过 18%，钙钛矿单晶探测器，其具有的广泛的探测性能，探测 X 射线， γ 射线，可见光等。

近年来，钙钛矿单晶的合成方法主要有缓慢蒸发法，逆温度生长法，反溶剂蒸发辅助法，顶部籽晶熔盐法，底部籽晶结晶法，降温法，溶剂热生长等，常用的方法为逆温度生长法和反溶剂蒸发辅助法。制备高质量，大尺寸的钙钛矿单晶对于制备高性能的器件至关重要。FAPbI₃ 钙钛矿晶体，在常温下不稳定，容易形成黄色非钙钛矿相，通过掺入少量的 Cs⁺离子可以生长出稳定的 FA1-XCsXPbI₃ 单晶，在室温下保存数月未发生相变。此外，我们还通过反溶剂蒸发的方法，制备了 R₂PbX₄（APbX₃）_{n-1} 结构的二维单晶(n=1)。二维钙钛矿相比于三维体相钙钛矿具有更好的空气稳定性，准二维的钙钛矿具有更好的光致发光外量子效率，通过调节 n 值和 X 位卤素原子，可以实现不同带隙的调控。我们制备了基于 n=1 的准二维单晶，

在紫外光照射下具有明显的荧光，其在探测与发光领域具有良好的应用前景。

关键词：光电；钙钛矿；单晶；二维

D11-P18

具有有机光吸收覆盖层的铟镓锌氧光敏薄膜晶体管的设计与制造

王昭桂¹，郑集文¹，周航²，刘川¹

1.广州大学城中山大学东校区

2.北京大学深圳研究院

基于非晶铟镓锌氧 (IGZO) 的薄膜晶体管 (TFT) 有着大的开关比和高的迁移率 ($>10\text{cm}^2/\text{Vs}$)，然而由于 IGZO 宽的带隙使得其对可见光范围的光响应度很低，不适合做光电器件。相较之下，许多有机半导体或钙钛矿有着窄带隙，对可见光范围的光响应度很高，但是它们的 TFT 器件开关比小，迁移率低。所以我们结合上述两者的特点，在本文中提出了具有光吸收覆盖层的铟镓锌氧光敏薄膜晶体管的新型结构，在保证合适的开关比和迁移率的同时又实现了较高的对可见光的光响应度，其中光吸收层包括钙钛矿 $\text{CN}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (PSK)、C8-BTBT 和 TIPS-pentacene 等有机材料。

我们借助 Silvaco Atlas 二维器件仿真软件对我们提出的 IGZO/PSK 双层晶体管进行了仿真模拟，通过定义合理的材料参数，诸如带隙和光吸收系数等，我们得到了器件在不同波长光照下的转移特性曲线。同时，我们也实际制造了具有不同光吸收层覆盖的 IGZO TFT。我们将 $\text{CN}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 、C8-BTBT 和 TIPS-pentacene 这三种材料旋涂在 IGZO 有源层 (溶液法制备得到) 上，TFT 采用的是底栅顶接触结构，测试得到了它们在不同波长光照射下的转移特性曲线。

实验和仿真结果都表明这种双层 IGZO/光吸收层 TFT 相较单层 IGZO TFT 在对可见光范围的光响应度有着显著的提升，尤其是覆盖有 PSK 层的 IGZO TFT。IGZO/PSK TFT 展现宽至 800 nm 的光响应波长范围，在波长为 780 nm 时其关态电流与暗态下的关态电流比仍旧有 20 左右。所以本文中提出的具有有机光吸收覆盖层的铟镓锌氧光敏薄膜晶体管的结构设计可为光敏晶体管的发展提供参考。

关键词：铟镓锌氧；钙钛矿；光敏晶体管；溶液法

D11-P19

集成低温多晶硅和金属氧化物薄膜晶体管的设计

陈昌东，刘川

State Key Lab of Opto-Electronic Materials & Technologies, Guangdong Province Key Lab of Display Material and Technology, School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-Sen University

在过去的十年里，非晶金属氧化物半导体，特别是铟镓锌氧 (IGZO)，由于它们自身较高的载流子迁移率，低的制备温度和良好的大面积制备均匀性，受到了研究人员的持续关注。然而在柔性电路和可穿戴式电子的应用领域，由于空穴载流子的缺失，基于 IGZO 的电路设计都有一个高功耗的问题。这是因为当输入电平为高时，所有的氧化物晶体管都处于开启工作状态，因此横跨电流也就很大。为了解决这个问题，我们把 n 型的 IGZO 晶体管和 p 型的低温多晶硅薄膜晶体管集成在一起以构成互补型反相器 (CMOS)。为了获得好的晶体管性能，我们使用 H 等离子体处理来氢化多晶硅薄膜。并且，为了避免氢对 IGZO 薄膜的污染，我们还对样品做了一个额外的快速热退火处理。最后，我们获得了一个具有高增益，大噪声容限和较低功耗的互补型反相器。

关键词：非晶铟镓锌氧；低温多晶硅；互补型反相器

D11-P20

混相 ZnO/MgZnO 核壳纳米线的电子带间跃迁

屈媛，薛忠贤，班士良

中国 呼和浩特 内蒙古大学 物理科学与技术学院 010021

ZnO 纳米线由于具有宽带隙、高激子结合能(60meV)以及体表面积大等特点，从而在光电器件领域[1-2]展现出应用潜力。 $\text{ZnO}/\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 核壳纳米线(CSNWs)可以减少 ZnO 纳米线的表面缺陷，提高对载流子的限制效应。实验显示 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 随 x 组分增大会出现纤锌矿至盐矿结构的结构相变，在一定组分区间内出现呈混相结构，使其物理机制变得复杂[3]。本文讨论了具有混相晶体结构的 $\text{ZnO}/\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ CSNWs 的带间跃迁及其三元混晶与尺寸效应。

我们在有效质量近似下求解薛定谔方程求解电子(空穴)的本征态，然后根据费米黄金法则获得 $\text{ZnO}/\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ CSNWs 的线性及非线性光吸收系数，并进一步讨论其三元混晶和尺寸效应。结果显示，在纤锌矿 $\text{ZnO}/$ 纤锌矿 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 和纤锌矿

ZnO/岩盐矿 $Mg_xZn_{1-x}O$ 两种 CSNWs 中,均发现随着 Mg 组份的增加及 ZnO 核半径的减小将提高对载流子的限制效应,导致光吸收系数的峰值及光饱和效应出现的光子频率发生蓝移现象。此外,计算结果表明 ZnO 核的厚度比 $Mg_xZn_{1-x}O$ 壳层的厚度对光吸收系数的影响大。ZnO/Mg_{0.6}Zn_{0.4}O(纤锌矿)和 ZnO/Mg_{0.6}Zn_{0.4}O(岩盐矿)(5/10nm) CSNWs 中价带至导带的光吸收峰值所对应的波长接近,分别为 371nm 和 370nm,岩盐矿结构比纤锌矿结构的光吸收系数小。而在 ZnO/ $Mg_xZn_{1-x}O$ (混相结构) CSNWs 中发现会有两个光吸收峰值。期待本工作的结果可以对含混相结构 $Mg_xZn_{1-x}O$ 的纳米线光电器件的光电性能分析和优化提供理论依据。

本工作由国家自然科学基金资助(项目编号:61274089 和 11304142)。

关键词:混相;核壳纳米线;光吸收

参考文献:

- [1] E. Akbarnejad, et al., J. Phys. D: Appl. Phys., 51, 095105 (2018).
- [2] Q. Q. Du, et al., Nanotechnology, 29, 115204 (2018).
- [3] I. Takeuchi, et al., J. Appl. Phys., 94, 7336 (2003).

D11-P21

一种基于六角氮化硼的忆阻器

吴全潭

- 1.中国科学院微电子研究所
- 2.中国科学院大学

本文制备了一种通过化学气相沉积制备的多层六角氮化硼 (h-BN) 二维材料作为介质层的电阻转换器件。这种器件不需要 forming 操作,同时该器件展现了自限流的双极性转变行为,具有良好的耐久性和较长的保持时间。另外,该器件在脉冲条件下显示了模拟的转变特性,如在连续的电压脉冲下器件的电阻态能被连续的调控,这说明器件能够模仿在神经形态系统中的突触权重改变的行为。因此,基于 h-BN 二维材料的电阻转换器件在神经计算和非易失性存储领域中有很大的应用潜力。

关键词:六角氮化硼;忆阻器;电阻转变;神经形态

D11-P22

1200V 4H-SiC MOSFET 优化设计与特性仿真

徐妙玲,倪炜江,李明山,袁俊,张敬伟

北京世纪金光半导体有限公司

4H-SiC 金属氧化物半导体场效应管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)具有高击穿电压、高开关速度、低导通电阻及良好的高温、抗辐照等优点,在军用和民用领域具有广阔的应用前景[1-6]。本文设计了一种击穿电压大于 1200V 的碳化硅 (SiC) MOSFET 器件,利用解析模型和数值仿真相结合的优化方法,采用 Sentaurus TCAD 有限元仿真的方法对 SiC MOSFET 器件的有源区结构进行设计优化,重点研究了 JFET 区宽度及浓度对 SiC MOSFET 器件电学特性的影响。器件采用 11 μ m 厚度掺杂浓度为 $6E15\text{ cm}^{-3}$ 的外延材料。仿真结果表明,适当增加 JFET 区掺杂浓度,可以在保证器件击穿特性的基础上,有效降低 JFET 区域电阻,提高 4H-SiC MOSFET 器件导通特性。另一方面,JFET 区域宽度对 SiC MOSFET 器件各项电学特性有较大影响。当 JFET 区宽度为 2.0 μ m、掺杂浓度为 $2E16\text{ cm}^{-3}$ 时,4H-SiC MOSFET 器件获得最优综合电学特性,优化设计的 SiC MOSFET 器件在漏电流密度 J_{DS} 为 $1\times 10^{-9}\text{ A}/\mu\text{m}$ 时,漏源击穿电压为 1517 V;界面栅氧电场强度最大为 3.6 MV/cm²;在 $U_{GS}=20\text{ V}$, $U_{DS}=2\text{ V}$ 的线性工作条件下,优化设计的器件其特征导通电阻 $R_{sp,on}$ 仅为 3.79 m $\Omega\cdot\text{cm}^2$,达到了设计指标要求。

关键词:4H-SiC; SiC MOSFET; 有限元仿真; 特征导通电阻

参考文献:

- [1] Losee P, Bolotnikov A, Yu L, et al. 1.2 kV class SiC MOSFETs with improved performance over wide operating temperature[C]//Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 2014 IEEE 26th International Symposium, Hawaii, 2014: 297-300.
- [2] Othman D, Lefebvre S, Berkani M. Robustness of 1.2 kV SiC MOSFET devices[J]. Microelectronics Reliability, 2013(53): 1735-1738.
- [3] Baliga B J. Silicon carbide power devices[M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2006: 225-239.
- [4] Hu Chenming, Chi Min-Hwa, Patel V M. Optimum design of power MOSFET [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, 31(12): 1693-1700.

[5] 杨勇, 封先锋, 林涛, 臧源, 蒲红斌, 杨霏. 1 200 V/30 A SiC MOSFET 的结构设计与特性仿真[J]. 智能电网, 2015(3):1154-1158.

[6] 张雯, 阎冬梅. VDMOSFET 的最佳化设计研究(500 V)[J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2004(1): 34-37.

D11-P23

SiC 高温氧化速率研究

李明山, 倪炜江, 徐妙玲, 张敬伟

北京世纪金光半导体有限公司

碳化硅(SiC)由于高的临界击穿电场、高热导率等优点,使得SiC材料在制备大功率、耐高温、半导体器件方面具有极其广泛的应用[1-3]。并且SiC是唯一可以通过热氧化生长二氧化硅(SiO₂)的宽禁带半导体。1996年为了解释SiC的热氧化,2004年,Song.Y[4]在Si的Deal-Grove氧化模型[5]的基础上提出了修正的Deal-Grove模型,考虑了SiC氧化过程中C元素由界面向氧化物表面扩散的影响,并且通过950°C-1150°C下SiC热氧化试验进行了验证,但是在高温下SiC氧化并没有进行论证。本文主要对4H-SiC在1150°C到1350°C下干氧化速率进行了研究,并且将实验获得的氧化层厚度与修正的Deal-Grove氧化模型拟合厚度进行了对比,结果表明SiC高温氧化基本满足Song.Y提出的SiC氧化的修正Deal-Grove氧化模型。但是,随着温度的升高,拟合值与实际氧化厚度的误差逐渐增大,这主要是由于温度升高导致SiC中局部C浓度升高,增加了SiC氧化正向反应速率常数K_f,使得实际氧化膜厚度逐渐高于模型拟合值。

关键词: 4H-SiC; 热氧化; 氧化速率; Deal-Grove 模型

参考文献:

[1] YAMAMOTO T, HIJIKATA Y, YAGUCHI H, et al. Oxide Growth Rate Enhancement of Silicon Carbide (0001) Si-Faces in Thin Oxide Regime [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47 (10): 7803-7806.

[2] VICKRIDGE I, GANEM J, HOSHINO Y, et al. Growth of SiO₂ on SiC by dry thermal oxidation: mechanisms [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40 (20): 6254-6263.

[3] DAAS B K, ISLAM M M, CHOWDHURY I A, et al. Doping Dependence of Thermal Oxidation on n-Type 4H-SiC [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011, 58 (1): 115-121.

[4] SONG Y, DHAR S, FELDMAN L C, et al. Modified Deal Grove model for the thermal oxidation of silicon carbide [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95 (9): 4953-4957.

[5] HIJIKATA Y, YAMAMOTO T, YAGUCHI H, et al. Model Calculation of SiC Oxidation Rates in the Thin Oxide Regime [J]. Materials Science Forum, 2008, 600-603: 663-666.

D11-P24

SiC 漂移阶跃超快恢复器件(SiC DSRD)

牛喜平, 黄兴, 陈欣璐, 窦娟娟

北京世纪金光半导体有限公司

以Si为材料的DSRD制造技术已相当成熟,费用低、可靠性高[1]。利用新材料SiC提高管子性能的研究仍在继续, SiC的击穿电压是Si的10倍以上;饱和载流子漂移速度约为Si两倍;其导热性比铜还高;能带隙宽,器件可以工作在很高的温度[2]。SiC DSRD输出功率可达几百兆瓦,且具有长寿命(可连续发射10¹¹次脉冲)、高稳定性、高重复频率、宽频带等优点,在雷达系统方面具有潜在的应用价值。

对于SiC DSRD器件而言,其掺杂的分布对器件的最大脉冲电流和脉冲前沿时间有很大的影响。本文研究了p+pn+和p+nn+两种不同掺杂类型的SiC DSRD器件,并建立了SiC DSRD的仿真模型,优化漂移区掺杂结构,并在外延生长中得到相应结构。通过电路仿真,模拟充电时间分别为2ns、5ns、10ns和15ns时,对p+pn+和p+nn+两种结构的脉冲电流波形进行了对比。对比结果为p+pn+和p+nn+两种器件在充电时间10ns和15ns时均可以达到1kA以上的脉冲电流,但是对于p+pn+器件的脉冲电流比p+nn+器件的脉冲电流高(200A~300A),而且p+pn+器件脉宽比p+nn+器件的脉宽小。因此p+pn+器件更适合用于雷达系统。

参考文献:

[1] GREKHOV I V, EFANOV V M, KARDO-SYSOEV A F, et al. "Formation of high nanosecond voltage drop across semiconductor diode" Sov Tech Phys Lett, 1983, 9(4): 188-191.

[2] T.R.Chow, R.T. Sodhi. "Wide bandgap compound semiconductors for superior high-voltage power devices" Proceedings of the International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics, 1993, 84-88.

D11-P25

Broadband antireflection sub-microstructures on 4H-SiC

J. Yuan *, X. Huang, W. J. Ni, M. S. Li, M. L. Xu, X. P. Niu, J. W. Zhang, X. L. Chen, J. J. Dou, L. Li

Beijing Century Goldray Semiconductor Co. Ltd

By using insufficient baked resist as etching mask, CENGOL team has developed a global initiative and cost-effective process for fabricating antireflective sub-microstructures on SiC wafer's surface. The etched sub-micro structure is a mesh-trenched pattern thus as the so called "mesh patterning etching". The mesh patterning process is more time-effective than the nano-imprint lithography or e-beam lithography process. The impact of the RIE process conditions and post bake temperature of the resist film to the profile of sub-microstructures and the according surface reflectance has been investigated. Under optimized process conditions, a perfect mesh patterning sub-micro structures is formed upon a 4-inch 4H-SiC wafer surface. In the broadband range of 390-800 nm, the average reflectance of the silicon carbide is dramatically suppressed from 40 % to around 8%

References:

- [1] Sciuto A, Roccaforte F, Di Franco S, et al. Photocurrent gain in 4H-SiC interdigit Schottky UV detectors with a thermally grown oxide layer. *Appl. Phys. Lett.* 90, 223507(2007).
 - [2] Quanbao Ma, Patricia Carvalho, Augustinas Galeckas, et al. Characterization of B-implanted 3C-SiC for intermediate band solar cells. *Materials Science Forum*, ISSN: 1662-9752, Vol. 897, pp 299-302 (2017) © 2017 Trans Tech Publications, Switzerland.
 - [3] J. Yuan, W. J. Ni, X. Huang, et al. A theoretical study of two novel SiC and GaN ultraviolet avalanche drift detectors with front-illumination. 2017 14th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS) pp 228-231 (2017).
 - [4] Stanislav Soloviev, Peter M Sandvik. Solar-Blind 4H-SiC Avalanche Photodiodes. *Materials Science Forum*, 24(2009).
 - [5] R. Kawai, T. Kondo, A. Suzuki, et al. Realization of extreme light extraction efficiency for moth-eye LEDs on SiC substrate using high-reflection electrode. *Phys. Status Solidi C* 7, 2180-2182 (2010).
 - [6] J. K. Kim, S. Chhajed, M. F. Schubert, et al. NASA's Goddard Space Flight Center. Hybrid AlGaIn-SiC Avalanche Photodiode for Deep-UV Photon Detection. *NASA Tech Briefs*, September 2010
 - [7] J. K. Kim, S. Chhajed, M. F. Schubert, et al. "Light-extraction enhancement of GaInN light-emitting diodes by graded-refractive-index indium tin oxide anti-reflection contact. *Adv. Mater.* 20, 801-804 (2008).
 - [8] Y. K. Ee, R. A. Arif, N. Tansu, et al. Enhancement of light extraction efficiency of InGaIn quantum wells light emitting diodes using SiO₂/polystyrene microlens arrays. *Appl. Phys. Lett.* 91, 221107 (2007).
 - [9] Wan D, Chen HL, Tseng TC, et al. Antireflective nanoparticle arrays enhance the efficiency of silicon solar cells. *Adv. Funct. Mater.* 2010, 20, 3064–3075
 - [10] Guy OJ, Lodzinski M, Teng KS et al. Investigation of the 4H-SiC surface. *Appl Surf Sci* 2008, 254:8098.
 - [11] Koynov S, Brandt MS, Stutzmann M et al. Black nonreflecting silicon surfaces for solar cells. *Appl Phys Lett* 2006, 88:203107.
 - [12] G. Lutz, Zhao J, Wang A, et al. A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping. *IEEE Trans Electron Dev* 1999, 46:1978.
 - [13] Y. Ou, V. Jokubavicius and H. Ou, et al. Broadband and omnidirectional light harvesting enhancement of fluorescent SiC. *Opt. Express* 20, 7575-7579 (2012).
 - [14] C. H. Sun, P. Jiang, and B. Jiang et al. Broadband moth-eye antireflection coatings on silicon. *Appl. Phys. Lett.* 92, 061112 (2008).
 - [15] Ou Yiyu, Aijaz Imran, Ou Haiyan et al. Broadband antireflection silicon carbide surface by self-assembled nanopatterned reactive-ion etching. *Optical Materials Express*, 3(1), 86-94.
 - [16] Ou Yiyu, Ahmed Fadil, Ou Haiyan et al. Antireflective SiC Surface Fabricated by Scalable Self-Assembled Nanopatterning. *Micromachines*, 2016.
 - [17] Ou Yiyu, Corell C. Dam-Hansen, P. Petersen et al. Antireflective subwavelength structures for improvement of the extraction efficiency and color rendering index of monolithic white light-emitting diode. *Opt. Express* 19, A166-A172 (2011)
- Keywords: Silicon Carbide; sub-microstructure; surface antireflection; Intermediate Band Solar Cells; UV detector,.

D11-P26

溶剂热法合成二维纳米片状铈钨青铜的研究

刘光辉¹, 徐菊^{2,3*}, 李锐星^{1,*}

1.北京航空航天大学 材料科学与工程学院

2.中国科学院电工研究所

3.中国科学院大学

以仲钨酸铵为钨源、氯化铯为铯源、油胺为还原剂。采用溶剂热法制备了二维纳米片状铯钨青铜 (Cs_xWO₃)。并通过 X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、透射电子显微镜 (TEM)、X 射线光电子能谱 (XPS)、红外光谱 (FT-IR) 对所制备的铯钨青铜的物相结构、形貌等进行分析表征。并考察了 PH、温度、时间对 Cs_xWO₃ 形貌的影响。结果表明: 反应温度为 220 °C, 时间为 30 h, PH 为 1~2 及少量的硫脲存在下, 所制备的 Cs_xWO₃ 为长方形纳米片, 其平均宽度约为 120 nm, 长度约为 800 nm, 厚度约为 15 nm。

关键词: 溶剂热法; 二维纳米片; 铯钨青铜; 硫脲

D11-P27

不同背面金属化热处理温度对 IGBT 参数一致性的影响

金锐¹, 吴鹏飞¹, 董少华¹, 孔凡标², 杨晓鸾², 訾彤彤², 姚阳², 张金平², 崔磊¹

1.先进输电技术国家重点实验室, 全球能源互联网研究院有限公司

2.江苏中科君芯科技有限公司

参数一致性是 IGBT 量产化中的关键课题之一。针对 IGBT 参数一致性的研究很多, 但是至今背面金属化条件对 IGBT 参数一致性的影响的研究并不多。本文讨论了 150°C, 200°C, 300°C 和 400°C 不同背面金属化热处理温度对 IGBT 静态参数和动态参数的影响, 数据显示 IGBT 参数一致性和背面金属化热处理温度具有强相关性。通过 X-ray 分析了不同温度对背面金属化结构和成分的影响。最终确定了最佳背面金属化热处理温度条件为 300°C。本论文研究成果对 IGBT 量产化具有实际指导意义。

参考文献:

[1] Ye Lijian, Zou Mian, Yang Xiaohui. Review on Development of IGBT Technology. Semiconductor Technology, 2008, 33(11): 937

[2] B.Jayant Baliga. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. 2008: 737~741

[3] Wu Weibin. Appliance Research of IGBT in Induction Cookers. Electronic Engineering & Product World, 2012, 01: 62~64

D11-P28

高压 IGBT 阈值电压 V_{th} 改善方案

董少华¹, 金锐¹, 吴鹏飞¹, 孔凡标², 杨晓鸾², 訾彤彤², 张金平², 崔磊¹

1.先进输电技术国家重点实验室, 全球能源互联网研究院有限公司

2.江苏中科君芯科技有限公司

本文分析了 IGBT 工艺过程中氮化硅工艺对阈值电压 V_{th} 的影响, 同时提出了一种有效地消除氮化硅应力影响的工艺方法。氮化硅由于其阻挡能力强, 且硬度大[1-3], 是 IGBT 由正面转入背面工艺的常用保护和隔离介质, 但会产生较强应力, 特别是经过热处理过程后, 较强的应力会改变芯片的表面态, 引起 V_{th} 的降低。分组试验结果表明, 通过合理调整工艺过程可以消除氮化硅应力, 改善表面态, 提升阈值电压 V_{th}。本文的研究成果针对 IGBT 实际的生产过程, 对相关 IGBT 后续的设计和生产具有参考意义。

参考文献:

[1] 张广英. 氮化硅薄膜制备及其相关特性研究[D].[硕士学位论文]. 大连理工大学, 2009

[2] 方俊峰. 氮化硅在集成电路铜互联中的应用和改善[D].[硕士学位论文]. 大连理工大学, 2009

[3] 柳聪. PECVD 工艺参数及退火对氮化硅对氮化硅薄膜性能的影响[D].[硕士学位论文]. 电子科技大学, 2012

仅发表论文

D11-PO-01

二维 MoS₂/MoO₂ 混合层结构材料的制备与表征

叶晨晓, 邓加军, 黄燕峰

华北电力大学

近年来,半导体性的二维过渡金属硫族化合物(TMDCs)由于其在半导体工业上的潜在应用而备受青睐。本文化利用化学气相沉积法(CVD),以 MoO₃ 粉末和 S 粉为前驱体,制备出了 MoS₂/MoO₂ 混合层结构。通过 Raman、PL、SEM、XPS 以及 EDS 等测试对样品的形貌、成分及结构等性能进行了表征。通过对比测试结果,我们发现,S 粉的蒸发的时机以及衬底摆放的位置会影响样品的生长。当 S 粉与 MoO₃ 粉末同时蒸起时,会得到单一组分的 MoS₂ 薄膜;S 粉的蒸发晚于 MoO₃ 粉末的蒸发时,气态的 MoO₃ 不能被 S 蒸气充分还原,进而形成了 MoS₂/MoO₂ 的混合层结构,同时,在沉积区域,不同位置处的 S 蒸气浓度不同,最终形成了六边形和四边形两种形貌的 MoS₂/MoO₂ 混合层结构。

关键词:二维材料;化学气相沉积法;MoS₂/MoO₂ 混合层结构

D11-PO-02

基于微桌面加工系统的深硅刻蚀工艺研究

刘钊成,魏峰

北京有色金属研究总院

近年来,随着网络越来越成熟,人们对电子设备的使用越来越多,使得智能传感器也变得越来越高。微机电系统(MEMS)的应用需要更高的生产率和更精确的控制。现在的 MEMS 传感器器件对蚀刻的粗糙度和轮廓形貌很敏感,这就对刻蚀有了更高的要求,需要更小的侧壁倾斜角度,更好的蚀刻均匀性和更好的对称性以及更严格的特征尺寸和深度的均匀性。

微细加工技术的一个不可或缺部分就是刻蚀,在不断发展的微电子学的推动下,它与其它获得了飞速发展的微细加工技术一样也有了长足的进展。总的来说,刻蚀可分为湿法和干法两种刻蚀,最开始的刻蚀是以湿法刻蚀为主,但随着器件制造进入微米、纳米时代,湿法刻蚀由于其本身固有的缺点,越来越不能满足科研和生产的需要,同时干法刻蚀技术又取得了很大进展,所以湿法刻蚀逐渐被以等离子体技术为基础的干法刻蚀取代。

感应耦合等离子(Inductively Coupled Plasma,ICP)刻蚀技术这些年成为微机电系统(MEMS)加工工艺中的一种重要加工方法。由于其在大面积刻蚀方面均匀性好、控制精度高、刻蚀表面平整光滑、侧壁垂直度好和污染较少等优点,常用于刻蚀需要高深宽比的器件,在 MEMS 工业中应用的地方越来越多。

现代半导体制造设备的建造费用一般需要超过十亿美元,这一规则对寻求将新型半导体设备推向商业化的群体来说是一个重大障碍,因为这需要一个专门的流程。为了消除成本壁垒,美国 MIT 基于 ICP 技术制造了一个小型生产工具套件,处理小型的基板,成本低于 100 万美元。通过缩小基板的尺寸,可以在材料使用、能源消耗和最重要的资本成本上实现可观的节省。

在本文中,我们提出了这套小型基板处理设备的第一个作用,深反应离子刻蚀(DRIE)。DRIE 工具用于在硅片上制造高各向异性,高深宽比的沟槽,这在微机电系统(MEMS)设备生产中是一个至关重要的元素。我们的第一个目标是 Bosch 工艺,这是两个步骤不断交替的过程,一个是基于 SF₆ 的各向同性的反应离子刻蚀步骤,一个是基于 C₄F₈ 的等离子体增强化学气相沉积步骤,C₄F₈ 会使刻蚀的侧壁钝化。快速交替的 RIE 和 PECVD 可以在硅片上刻蚀出高度各向异性的特征。这个深反应离子蚀刻系统的大小只有一个微波炉大小,成本只是商业蚀刻系统的一小部分。

D11-PO-03

有源区翘曲度对 GaN 基激光器外延质量以及发光特性的影响

兰天,周广正,李颖,于洪岩,闫岸如,王智勇*

北京工业大学激光工程研究院

GaN 材料作为第三代半导体材料的代表,具有宽带隙、高稳定性、高量子效率等优点,其相关半导体光电器件已经广泛用于新一代固态照明、激光显示等领域。通常情况下为了削减成本,GaN 外延薄膜通常采用异质外延方式生长,如蓝宝石(Al₂O₃)衬底、碳化硅(SiC)衬底、硅(Si)衬底,衬底和外延膜之间均存在较大的晶格失配以及热失配,导致外延片产生严重的翘曲,甚至龟裂;高质量的 GaN 基激光器虽然会利用晶体质量更好的 GaN 自支撑衬底外延生长,但由于有源区中 InGa_N 阱层和 GaN 垒层之间也存在较大的晶格失配,因此在外延过程中外延片也会发生翘曲,最终使晶体质量恶化,降低量子效率,影响器件的发光性能。本文通过量子阱/垒同温生长的方法有效抑制 GaN 激光器有源区外延过程中翘曲度的波动,结合在线监测(in-situ)、高分辨率 X 射线衍射(HR-XRD)、原子力显微镜(AFM)、变温光致发光(TDPL)以及阴极发光(CL)等测试手段,分别研究在蓝宝石衬底和 GaN 自支撑衬底上有源区翘曲度变化对外延质量以及发光特性的影响。实验结果表明,在蓝宝石衬底上采用同温生长后,InGa_N 阱层和 GaN 垒层的翘曲度在外延过程中基本保持一致,InGa_N/GaN 多量子阱表面的 V 型缺陷密度由 3.5 x 10⁸/cm² 降低至 2.8 x 10⁸/cm²,表面粗糙度由 0.62nm 减小至 0.46nm;XRD 摇摆曲线扫描结果可知 002 面半高宽(FWHM)由 295arcsec 减小到 280arcsec,102 面半高宽由 308arcsec 降低至 274arcsec。采用 GaN 自支撑衬底外延 GaN 基蓝光激光器,CL 结果表明缺陷密度由 5.5 x 10⁶/cm² 降低至 3.5 x 10⁶/cm²;室温下 PL 峰值波长由

447.2nm 增大到 454.7nm, 红移约 7nm, 峰值强度增大了约 4.5 倍; 由变温 PL 结果可知内量子效率(IQE)从 56%增大到 68%, 增加了 21.4%。除此之外, 沿外延片径向方向的 PL 均匀性也得到很大改善。通过合理控制有源区翘曲度的波动来调节有源区内部应力分布状态, 可获得更高外延质量以及更好发光特性的 GaN 基蓝光激光器外延片。

关键词: 氮化镓; 翘曲度; 内量子效率; InGaN/GaN 有源区

D11-PO-04

4H-SiC MPS 二极管的浪涌能力设计

倪炜江¹, 徐妙玲², 李明山², 冯春¹, 肖红领¹, 王晓亮¹

1.中国科学院半导体研究所材料科学重点实验室

2.北京世纪金光半导体有限公司

4H-SiC 肖特基二极管(SBD)是一种多子器件, 具有非常快的开关速率和非常小的反向恢复损耗, 已经在 PFC 电路和变换器中得到广泛的应用, 对系统的性能提升带来明显的效益。但是, 导通电阻的正温度系数和缺少电导率调制的效应, 限制了 SBD 的电流过载能力, 使其远小于 pin 二极管。很多实际应用如在开关电路中, 由于输入端的滤波电容的存在, 电路在开始接入母线电压时会产生一个很高的过载电流, 需要器件能承受一定的浪涌电流。为了提高 SBD 的浪涌电流能力, 业内纷纷采用了 MPS (merged pin/Schottky diode) 二极管结构, 目前 infineon 公司的 SiC 二极管产品都已经是 MPS 结构的二极管[1-2]。

SiC pin 二极管虽然受到 SiC 内建电势高的影响而开启电压高, 但是得益于双极性器件的优势, 在 $V_f > 3V$ 时电流能力立刻超过 SBD, 电流成指数上升, 而 MPS 正好在两者之间, 很好的结合了两者的优势。因此在结构方面, 提高 MPS 的浪涌能力的主要方法是提高嵌入的 pin 二极管的电导率调制效应来实现。一般的观点认为, 随着 P 区面积占比的增加, pin 二极管面积比例增加浪涌电流会大幅增加, 但是额定电流下的导通电阻增加, 因此存在着折中设计[4-5]。

我们用 2-D TCAD 工具进行仿真研究, TCAD 为 Synopsis 公司的 sentaurus 软件, 其中包含了 4H-SiC 的参数和模型。对不同耐压的 MPS 二极管, 分析 P 区和 schottky 接触区的尺寸 W_p 和 W_s 对器件的电流密度及浪涌电流能力的影响。

通过仿真结果, 可以看到 V_f 增加到一定值时 IV 曲线有一个拐弯和负微分电阻, 这是由于嵌入的 pn 二极管开启导致电导率的调制所致。随着 W_p 的增加, pn 开启电压降低, 但是 MPS 在低压下的导通电阻增加。在电流密度足够大时, 即各个 pn 二极管都开启后, 器件的正向压降相差非常小, 微分电阻几乎相同, 电流密度并无与 p 区的比例一致。最终的微分电阻由器件的其他部分电阻决定, 如衬底电阻和接触电阻等。当结温升高时, pn 二极管的开启电压降低, 在 100A/mm² 电流密度下, 正向压降的相差变得更加小, 甚至小于 0.1V, 几种结构的 V_f 相差小于 5%。由于衬底和接触电阻不受到电导率的调制, 这些电阻的大小直接决定了浪涌电流下的电压降及几种结构间的压降差百分比, 而电压降的差则有不包含衬底电阻的理想二极管决定。由于 pn 二极管电流随电压呈指数增长, 因此相对于面积比例, 开启电压的大小对电流能力的影响更大。最后, 对于高耐压器件和低耐压器件, 给出了综合额定电流能力和浪涌能力的优化设计方案。

关键词: 4H-SiC; MPS; TCAD 仿真; 浪涌

参考文献

- [1] M. Treu, R. Rupp, C. S. Tai, P. Blaschitz, and J. Hilsenbeck, "A Surge Current Stable and Avalanche Rugged SiC Merged pn Schottky Diode Blocking 600V Especially Suited for PFC Applications," vol. 529, pp. 1155–1158, 2006.
- [2] M. Draghici, R. Rupp, R. Elpelt, R. Gerlach, and R. Schörner, "A new SiC diode with significantly reduced threshold voltage," ISPSD, pp. 355–358, 2017.
- [3] J. Hilsenbeck, M. Treu, R. Rupp, K. Rüschemschmidt, R. Kern, and M. Holz, "Investigations on Surge Current Capability of SiC Schottky Diodes by Implementation of New Pad Metallizations," Mater. Sci. Forum, vol. 645–648, pp. 673–676, 2010.
- [4] R. Radhakrishnan and J. H. Zhao, "Influence of Anode Layout on the Performance of SiC JBS Diodes," vol. 720, pp. 937–940, 2012.
- [5] Y. Huang, T. Erlbacher, J. Buettner, and G. Wachutka, "A trade-off between nominal forward current density and surge current capability for 4.5kV SiC MPS diodes," Proc. Int. Symp. Power Semicond. Devices ICs, vol. 2016–July, pp. 63–66, 2016.