

## D06.先进微电子与光电子材料

分会主席：王曦、汪正平、杨德仁、赵超、林庆煌

### D06-01

#### 高速低功耗相变存储材料与应用 (Keynote)

宋志棠

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

相变存储器 (PCRAM) 具有微缩性能好、可三维集成、擦写速度快、与新型 COMS 工艺相兼容等优点, 正以变革计算机框架的存储型内存 (Storage Class Memory) 角色进入主流存储器市场。中科院上海微系统与信息技术研究所已经研制成功 128M 相变存储芯片, 可以满足绝大多数嵌入式系统升级换代的需求。英特尔发明的 3D PCRAM 认为是“自 1989 年 NAND 问世以来, 时隔 25 年取得新突破”, 其速度和寿命都是 NAND 的 1000 倍, 主要技术是: 约 20 纳米狭缝存储结构, 金属交叉电极以减小存储阵列阻值差异, 高驱动电流、低漏导的 OTS 选通管, 代表了国际新型存储技术的最高水平。而相变材料可逆相变机理的阐明是发现新材料进一步实现其高速、低功耗、长寿命、高数据保持力存储器的关键。本文重点回顾了相变存储器的发展历史及各国科学家对可逆相变机理的研究与认识过程, 作者提出相变八面体原子基元与面心立方亚稳态理论, 要点是: 1、非晶态和晶态中的八面体原子基元 (简称八面体) 是可逆相变的基本单元, 主流的相变材料是由单一或两个套构八面体, 共享 Te 形成面心立方体 (FCC) 结构, 释放空位可转变为更稳定的六方体 (HEX) 结构; 2、晶格与电子结构匹配的八面体是构建单项、稳定相变材料的物理本质, 是实现高密度、长寿命存储的核心; 3、稳定八面体是实现快速、有序成核, 由非晶向多晶快速生长关键, 从而实现存储性能的低功耗、高速; 4、抑制 FCC 向 HEX 转变, 可有效保存可逆相变润滑剂 (FCC 相中的空位), 促进多晶向非晶的转变, 从而实现高速、低功耗与高数据保持力, 这一理论对于开发自主新型相变材料具有重要的指导意义, 将会极大地推动相变存储器研发与产业化的进程。

### D06-02

#### 新型超高隧穿磁阻 STT-MRAM (Invited)

曹凯华, 王梦醒, 彭守仲, 张博宇, 周家琦, 赵巍胜

费尔北京研究院, 北京市大数据与脑机智能高精尖创新中心

北京航空航天大学

基于氧化镁-钴铁硼结构的垂直磁性隧道结 (perpendicular magnetic tunnel junctions, p-MTJs) 具有高热稳定性、低耗能以及易于尺寸缩小等优势, 已成为自旋转移力矩磁性随机存取存储器 (spin-transfer torque magnetic random-access memories, STT-MRAM) 最具研究价值的可选单元。我们已经深入研究并揭示出氧化镁/钴铁硼界面以及钴铁硼/重金属界面都能产生垂直磁各向异性, 因此基于氧化镁/钴铁硼/重金属的垂直磁性隧道结可以通过调整这两个界面来增强其垂直磁各向异性, 便于获得高性能垂直磁性隧道结。基于之前垂直磁各向异性来源研究, 我们通过第一性原理研究了不同覆盖层金属在氧化镁/钴铁硼/重金属结构的磁各向异性能 (magnetic anisotropy energy, MAE) 证明了选择合适的重金属将大大增强结构的垂直磁各向异性。此外, 我们通过时间分辨的磁光克尔效应及磁特性测试研究了不同覆盖层金属对铁磁金属磁特性的影响实验, 实验结果显示钴/重金属界面对结构界面磁各向异性及阻尼系数影响很大, 尤其是当覆盖层金属为钨时, 相比较与金属钽和钼, 磁性多层膜具有更小的阻尼系数。此外我们计算了金属 X/钴铁硼/氧化镁/钴铁硼/金属 X 结构的隧穿磁阻比率 (tunnel magnetoresistance, TMR), 具体方法为构建原子模型, 通过第一性原理计算结构在不同自旋态的电导, 从而得到磁阻比率, 其中金属 X 包含钨、钽及钼, 结果显示采用金属钨做缓冲及覆盖层的结构获得了最大的磁阻比率。高隧穿磁阻比及低阻尼系数都是实现高性能磁性隧道结的关键, 因此我们基于金属钨设计了垂直磁性隧道结全膜层结构 (包括钽钨电极, 钴钼多层膜钉扎层及钨做隔离的双界面存储层等), 该结构经过磁控溅射、410 °C 退火、图形化及互联工艺成为独立垂直磁性隧道结器件, 测试结果显示器件具有高达 249 % 室温隧穿磁阻比率, 低到 7 的电阻面积矢量积以及相对小的临界翻转电流密度。此外通过计算, 我们发现发现单层钨可以使得结构发生共振隧穿使得结构具有更高的隧穿磁阻比率。总的来说, 我们首次在钨插入层垂直磁性隧道结中实现了纯电流驱动磁矩翻转, 实验结果及理论分析都得出单层钨对高性能垂直磁性隧道结意义重大, 将对新型超高隧穿磁阻 STT-MRAM 的研发奠定了基础。

### D06-03

#### 三维闪存存储器电荷存储层的可靠性研究 (Invited)

陈杰智<sup>1</sup>, 武继璇<sup>1</sup>, 姜向伟<sup>2</sup>

1.山东大学 信息科学与工程学院

2.中国科学院半导体研究所

随着大数据等新兴技术的迅速发展, 存储分析的信息量需求正在爆炸式地增长。为克服器件尺寸缩小所面临的物理极限, 继续提高集成密度, 三维立体闪存存储器已逐步取代二维平面闪存存储器成为未来十几年大容量非挥发存储器的主流产品形态。本文将从系统回归材料全面讲述目前三维 NAND 闪存存储器的可靠性问题, 并重点探讨了三维电荷俘获型 NAND 闪存存储器中与数据保持特性密切相关的电荷扩散的物理机制。在利用第一型原理计算方法研究电荷存储层中氢原子和氧原子相关各种缺陷的基础之上, 我们发现虽然可以通过氢工艺优化来降低浅能级缺陷的存在几率, 但要有效抑制写/擦除循环期间产生的浅能级缺陷却需要新的工艺途径和方法。

#### D06-04

##### 基于离子注入的空位调制相变存储材料 (Oral)

王勇<sup>1,2</sup>, 宋三年<sup>1</sup>, 宋志棠<sup>1</sup>

1.上海微系统与信息技术研究所

2.中国科学院大学

在过去的 20 年里, 相变存储器技术获得了飞速的发展, 其中以 GeTe-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 伪二元线上的材料研究最为广泛。近几年来, Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 基材料的研究成为热点, 我们已有的研究表明 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 存在低温下大量空位随机分布的亚稳态面心立方相, 在较低的温度下, 就可以发生空位有序化, 完成面心立方相向六方相的转变。由于 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 较差的非晶态热稳定性, 通过物理气相沉积获得的沉积态薄膜就已经是晶态 (面心立方相)。因此我们提出了一种空位调控机制, 利用惰性气体 Ar 对沉积态的 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 薄膜进行离子注入, 使得沉积态 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 薄膜中的空位重新分布。通过不同剂量的 Ar 离子注入我们获得了不同电阻率的非晶态 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 材料, 我们发现在注入剂量达到  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  以后, 继续提高注入剂量对薄膜电阻率的影响可以忽略。通过离子注入后, 使得亚稳态的面心立方相向六方相的转变温度提高, 有利于提高器件的功耗和疲劳特性。基于 Ar 离子注入剂量为  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  的 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 相变材料存储单元可以在 100 ns 完成擦写操作, 表现出低功耗的潜力。我们这份工作为以后的缺陷调控在相变存储器研究领域的应用提供了一种新的思路和方法。

#### D06-05

##### 超薄薄膜表界面的电荷行为 (Invited)

张小娴

国家纳米科学中心

在固态材料中, 界面电荷行为比如电荷转移、离子输运等是非常重要的过程。这里我们将介绍我们在一些超薄薄膜体系中界面电荷运动的研究进展。首先, 通过结合实验结果和计算, 我们发现有机半导体, 特别是超薄有机半导体 (几纳米厚度) 的界面电荷转移会对半导体进行有效的掺杂, 在费米能级附近引入新的杂质态, 从而影响载流子的输运进而影响热电效应。同时, 我们还实现了微观尺度对忆阻器中氧离子运动的原位探测, 从而首次从实验上澄清了氧空位导电细丝的运行机制。该研究方法充分的结合了离子的电荷和质量两种属性, 为固体中离子的运动提供了一种高精度的普适的方法, 可以广泛的应用在固态体系如锂电池、太阳能电池、传感器等, 为这些体系中离子相关的微观过程的深入理解提供新的研究思路。

#### D06-06

##### 锰氧化物薄膜表面轨道调控导致的磁性增强效应 (Oral)

彭晶晶

中国航发北京航空材料研究院

锰氧化物具有高的自旋极化率、高的居里温度、庞磁阻效应等特性, 因而是最有希望应用于氧化物自旋电子学器件的材料。然而, 锰氧化物薄膜的磁性衰退成为限制其运用的瓶颈。锰氧化物的磁性衰退主要是指铁磁锰氧化物薄膜在临界厚度以下转变为反铁磁甚至无磁状态。之前关于此问题的研究都集中在界面而忽略了表面的重要作用。值得指出的是, 表面对于超薄薄膜具有重大的影响。锰氧化物表面存在着由于氧原子缺失 (表面对称性破坏) 导致的面外  $3z^2 - r^2$  轨道择优占据, 其被证明能削弱面内铁磁耦合作用。本论文采用在 LaMnO<sub>3</sub> 薄膜上覆盖 SrTiO<sub>3</sub> 层的方式, 使其表面的  $3z^2 - r^2$  轨道变为界面的

x<sub>2</sub>-y<sub>2</sub> 轨道, 显著地增强了面内双交换作用, 成功将 6 个晶胞厚度以下 LaMnO<sub>3</sub> 薄膜的饱和磁化强度提高至 3 倍, 使其磁性衰退的临界厚度从 4 个晶胞降低至 2 个晶胞厚度。本论文证明了调控表面的轨道占据是解决磁性衰退的一个可行的途径。

#### D06-07

##### Magnetic Anisotropy in [Pt/Co]<sub>4</sub>/MgO/[Co/Pt]<sub>2</sub> Multilayers (Oral)

李倩, 李磊, 周伟, 陈军, 张思远, 蔡建华

西北有色金属研究院

In [Pt/Co]<sub>4</sub>/MgO/[Co/Pt]<sub>2</sub> multilayers prepared by magnetron sputtering, we have observed antiferromagnetic interlayer coupling with increasing MgO spacer thickness. Perpendicular magnetic anisotropy of free layer in [Pt/Co]<sub>4</sub>/MgO/[Co/Pt]<sub>2</sub> multilayers are measured by Extraordinary Hall Effect with the external magnetic field parallel to the current direction. The perpendicular magnetic anisotropy constant  $K_u$  oscillates with MgO thickness between 1.3 to 3.3 nm. The oscillation period is about 0.43 nm which is very close to the monolayer (100) MgO. This oscillation behavior of magnetic anisotropy constant  $K_u$  may be related to the periodic variation of the interface with increasing MgO monolayer.

#### D06-08

##### B 离子注入 4H-SiC 晶体损伤特性的研究 (Oral)

赵金花, 秦希峰, 李爽

山东建筑大学

SiC 晶体具有优异的物理学及电子学性质, 针对其进行离子辐照改性方面的研究对未来高压、低损耗电子学设计具有重要意义。本文中所用样品为 4H-SiC 晶体。我们利用能量为: 50-400 keV, 剂量为:  $5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 的硼 (B) 离子注入 4H-SiC 晶体。利用原子力显微镜观察了不同注入条件下的晶体表面形貌; 利用棱镜耦合方法测试了不同注入条件下晶体表面折射率的变化; JY-T64000 三级拉曼光谱仪测试了共聚焦微拉曼光谱; 用 Jasco-U570 型分光光度计测试了吸收光谱。实验结果表明: 晶体表面形貌基本没有受注入过程影响; 表面折射率随注入能量的改变呈现规律性的变化, 我们认为这与注入离子的电子能量损失有关; 通过共焦微拉曼测试, 我们观察到了 4H-SiC 晶体典型的四种振动模式。实验结果表明离子辐照后拉曼峰的频率和强度均降低。辐照剂量相同的情况下, 拉曼峰的频率和强度随辐照能量的降低而降低。也就是能量越低, 4H-SiC 晶体表面的晶格畸变越明显。这个现象可以用 SRIM2010 模拟的晶格损伤情况解释, 随辐照能量的降低, 晶体表面的损伤变大; 吸收光谱测试结果表明我们的注入条件对 4H-SiC 晶体材料吸收性质的影响不大。根据实验数据的对比分析得到晶格损伤与离子辐照条件之间的关系, 分析离子束与 4H-SiC 晶体的晶格相互作用机制。本论文的研究为探索离子辐照调控 4H-SiC 晶体性质的规律提供了可靠依据。

#### D06-09

##### 柔性导热基板材料及其在柔性电子器件散热应用研究 (Keynote)

许建斌

中国科学院深圳先进技术研究院

香港中文大学

近年来, 柔性电子以其独特的柔性、延展性以及低成本制造工艺, 在信息、能源、医疗、国防等领域具有广泛应用前景, 如柔性电子显示器、有机发光二极管、薄膜太阳能电池板、电子用表面粘贴等。柔性基板材料在柔性电子中发挥着不可替代的作用。但是电子器件的小型化使得器件产生的热量急剧增加, 如何有效散热已经成为制约电子器件发展的重要问题。

本报告将介绍我们采用静电纺丝技术制备了一种高导热低介电的环氧树脂纤维柔性基板材料。环氧树脂纤维柔性基板材料表现出高的导热系数, 最高达到  $0.8 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。由于静电纺丝技术形成的液晶环氧树脂纤维膜的多孔结构, 制备的材料具有低的介电性能, 1.0 MHz 时的介电常数和介电损耗分别为 1.8 和 0.075。力学性能方面, 静电纺丝技术实现了液晶环氧树脂由脆性向韧性的转变。我们制备了一款简单的柔性电路, 验证了多孔纤维状材料在柔性有机基板材料中应用。采用红外热像技术证实了有机基板材料对功率器件 (LED) 具有散热效果。结果表明, 以环氧树脂纤维膜作为柔性基板材料可以有效的提高功率器件的使用效率和寿命。因此, 制备的柔性、高导热以及低介电的环氧树脂纤维膜有望代替传统的柔性基板, 应用于下一代柔性电子器件的基板材料。

#### D06-10

## 聚合物基电子封装材料研究与应用 (Invited)

孙蓉

中国科学院深圳先进技术研究院

随着摩尔定律失效，集成电路的发展尤其依赖先进电子封装技术的革新突破。因此，先进电子封装材料将起到至关重要的作用。集成电路的封装形式由二维过渡到三维，向着更高密度方向发展。然而，国产化电子材料占比非常低（通常不超过 10%），高端封装材料几乎空白，严重阻碍了我国封测产业的发展；刚性的需求蕴含巨大的机会。本报告将概述近几年以美国工程院院士、中国工程院外籍院士，被业界誉为“现代半导体封装之父”的汪正平教授和孙蓉研究员团队在聚合物电子封装材料基础研究与应用取得的进展。通过凝练关键科学问题：封装材料在器件（芯片及模组）中的电学、热学、力学以及封装气密性问题。以关键技术突破为目标，坚持材料-工艺-器件完整的工作思路。同时，本报告将对聚合物电子封装材料研究现状、存在问题以及未来发展方向进行了展望。尤其是聚合物电子封装材料在高端通讯、柔性穿戴、植入式医疗、功率器件等终端领域的应用；以及如何实现完全自主的高端电子封装材料技术。

### D06-11

#### 无铟氧化物半导体薄膜与全透明电子学 (Oral)

吕建国，岳士录，吕容恺，章佳琪，陆波静，叶志镇

浙江大学

ZnO 是一种 II-VI 族化合物半导体 ( $E_g=3.37$  eV)。ZnO 基半导体薄膜是一类理想的透明电子材料。我们将重点阐述 ZnO:Al 和 ZnMSnO 薄膜两种无 In 材料，原料丰富，成本低，可广泛应用于透明电子器件。ZnO:Al (AZO) 是一种典型透明导电氧化物，优化 Al 含量 4 at.%，可室温大面积沉积，电阻率 $\sim 10^{-4}$   $\Omega\text{cm}$ ，可见光透过率 $\sim 90\%$ 。AZO 透明电极用于 GaN LED，正向开启电压 3.36 V，发光波长 526 nm，20 mA 时光输出强度 386 mcd。AZO 薄膜可在醋酸铵溶液中形成均匀绒面结构，用于太阳能电池透明电极，单结 a-Si:H 薄膜太阳能电池转换效率达 10.75%，还可作为晶硅太阳能电池的透明电极。AZO 薄膜用于电容传感层，制作新型触摸屏。AZO 薄膜在 Low-E 玻璃、隐身技术等领域也有很好的应用。AZO 薄膜还可用于各种柔性器件中。

开发出新型非晶氧化物半导体 (AOS) 体系，ZnMSnO (M=Al, Si, Ti, and Nb)。Sn<sup>4+</sup>具有与 In<sup>3+</sup>相似的电子结构 (4d<sup>10</sup>5s<sup>0</sup>)，可起到电子传输通道的作用；M 元素可增加材料稳定性和致密性，抑制氧空位的形成。特别是，a-ZnAlSnO 性能最佳，a-ZnAlSnO TFT 器件参数：开关电流比 $\sim 10^7$ ，场效应迁移率 $\sim 40$   $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ ，阈值电压 $\sim 2.39$  V，亚阈值摆幅 $\sim 0.32$  V/decade。无 In 的 ZnAlSnO TFT 可望在清晰显示、3D 显示、透明显示和柔性显示领域获得广泛应用。此外，我们还将介绍无铟 AOS 薄膜在气敏、紫外探测、生物传感、湿敏等传感领域的应用。

采用 a-ZnAlSnO 沟道层，AZO 透明电极，研制出全透明 TFT。我们希望我们的工作能够促进国际透明与柔性电子学的发展。

### D06-12

#### 印刷液滴操控制备多分析柔性电子器件 (Oral)

李风煜

1.暨南大学

2.中国科学院化学研究所

新型纳米结构器件是现代微电子设备的核心器件，其加工制造技术与系统集成设计是现代微电子工业关键技术。通过打印、印刷的方式构建纳米结构，将克服传统光刻蚀减材工艺的污染排放与生产效率低下的问题，实现绿色、高效、快速、大面积、多材料制备新型纳米结构器件。针对印刷过程中墨滴在不同基材上的可控图案化涉及众多国际科学难题，液滴在固体表面的收缩、铺展、融合与转移等行为，是由液滴在材料表面的浸润与粘附特性所决定，涉及 Wenzel 态和 Cassie 态等不同浸润模式。深入研究墨滴在不同材料表面的动态浸润行为，发现材料表面浸润性、液滴表面张力和粘附力与液滴扩散、粘附、移动及液膜破裂等过程控制的基本规律，实现墨滴从零维到三维图案化过程的精确调控。通过深入研究实现材料表面各向异性的可控浸润与粘附，控制液滴干燥过程中三相线的滑移，实现液滴内容质或纳米粒子的均匀分布及可控组装，并通过各向异性的浸润性控制实现图案化与器件制备。通过液滴操控技术控制溶剂挥发过程中液滴中纳米颗粒的三维精细自组装，制备具有等量三维微结构的光子晶体阵列芯片，确保芯片上每个检测点具有相同的荧光增强效应，实现了单一普通化学传感器对多重 (12 种) 金属阳离子的辨别分析；制备高质量的柔性光子晶体薄膜，实现 12 种糖类分子的分析。设计利用液滴操

控技术,控制银纳米颗粒的自组装成形貌多样的银纳米曲线,在应对外界不同的拉伸应力变化时给出细微的差异化电阻变化响应,贴敷在人面部的6个标准肌肉群,运用多通道统计分析,则可以对不同的表情进行识别。针对实际检测应用中的实用性,通过设计新型的高集成多底物识别传感器芯片,发展高效化学与生物传感器,可以为适用于复杂目标与环境识别的便捷传感器器件提供具有重大意义的思路、方法与工艺。近年来,随着人工智能的不断升级和衍化,交叉响应传感阵列被集成化为可携带器件、可穿戴器件,更加便利和广泛应用于人们的生活当中。

#### D06-13

##### 高质量纳米银线的一步合成及其在柔性透明电极中的应用研究 (Oral)

李郁秀,杨宏伟,巢云秀,原禧敏,王川

昆明贵金属研究所

透明电极作为光电器件的重要组成部分,被广泛应用于触摸屏、液晶显示器、薄膜太阳能电池、导电玻璃等领域。随着柔性电子、可穿戴电子、便携式电子技术的发展,对透明电极提出了更高的要求,不仅需要优异的光电性能,而且要求高度的柔韧性和耐曲挠性。氧化铟锡(ITO)是目前应用最广泛的透明薄膜电极,然而因其制备工艺复杂冗长、材料利用率低,且ITO膜层脆弱易折、缺乏柔韧性等,使其不能满足柔性电子器件任意弯折的应用要求。而纳米银线相比于硬质的ITO具有较好的导电性和透光性、较小的弯曲半径、优异的柔韧性,以及大的长径比效应,使其成为唯一一个具有现实应用前景的ITO替代材料。纳米银线的优异性能取决于材料的形貌、结构和尺寸,量化快速可控合成高质量的纳米银线是实现工业化实际应用的关键。

本文采用双离子助剂(Br-/Cl-)辅助一步合成超细/超长纳米银线。在乙二醇还原体系中,通过调控Br-/Cl-的比例以及反应时间共同实现超细/超长的高质量纳米银线的合成。采用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)、透射电子显微镜(TEM)等手段对银线的微观形貌和尺寸进行了表征。发现当Br-/Cl-的摩尔比为1:2,在170 °C下反应2 h 10 min可以制备出线径~20 nm,线长~40 μm,长径比达到2000的超细纳米银线。当Br-/Cl-的摩尔比为1:4,反应时间为2 h 30 min时,制备得到的纳米银线的平均线径约为40 nm,平均线长约为120 μm,长径比高达2500。通过物理法将纳米银线分散到含有匹配基体树脂的溶剂体系中制成导电油墨,经过涂布、固化形成透明网络电极。结合四探针电阻率测试仪、透光率/雾度测试仪等对透明电极的光电性能进行测试。结果显示,超细纳米银线透明网络电极具有高达89.63%的透光率,低至2.45%的雾度,以及~15 Ω sq<sup>-1</sup>的方阻。超长纳米银线透明网络电极的透光率和雾度分别为88.20%和4.12%,方阻低至~3.5 Ω sq<sup>-1</sup>。该研究表明,在同一个反应体系中通过调控双离子助剂的比例和反应时间能够共同实现超细和超长纳米银线的制备,为高质量纳米银线的合成提供了新的思路。

#### D06-14

##### 基于水基ALD技术石墨烯/高κ介质异质结直接形成方法和机理研究 (Oral)

郑理,程新红,周文,徐大伟,沈玲燕,王谦,张栋梁,顾子悦,吴灯鹏,俞跃辉

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

随着微电子技术的飞速发展,作为Si基集成电路核心器件的金属氧化物场效应管(MOSFET)特征尺寸需不断减小。由于量子隧穿效应的影响,作为传统栅介质的SiO<sub>2</sub>减小到原子尺寸时将失去介电性能,而传统Si沟道将面临迁移率下降等问题。采用高介电常数(高κ)栅介质替代传统介质SiO<sub>2</sub>已经得到业界认可。石墨烯由于优异的载流子输运特性有望代替Si成为下一代集成电路的沟道材料;石墨烯良好的透光性与导电性,又使其适用于光电器件的制备。通过形成石墨烯/高κ介质异质结可实现对石墨烯费米能级的栅压调控,因此石墨烯/高κ介质异质结形成技术是实现石墨烯晶体管和石墨烯光电探测器等石墨烯基器件应用的关键技术。由于石墨烯表面呈化学惰性、缺少成核的悬挂键,无法直接利用原子层沉积(ALD)技术形成石墨烯/高κ介质异质结,通常需要对石墨烯表面进行功能化处理,然而石墨烯表面功能化易对石墨烯晶格造成损伤,且部分功能化方式引入的过渡层介电常数低,不利于提高栅极调控沟道电荷的能力。因此,如何利用ALD技术直接形成高质量的石墨烯/高κ介质异质结,且对石墨烯晶格不造成损伤是迫切需要解决的难题。

鉴于此,本论文针对ALD技术直接形成石墨烯/高κ介质异质结及其形成机理开展系统研究工作,创新性提出利用石墨烯表面范德瓦尔斯力物理吸附的水分子作为ALD技术中金属前驱体的成核点,通过自限制反应直接形成石墨烯/高κ介质异质结。通过双温区生长窗口优化,实现低温区水分子均匀地物理吸附在石墨烯表面,提供均匀致密分布的成核点,促使石墨烯/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>异质结形成;形成连续的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介质层后,提高ALD工艺温度、增大Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介质层的致密性,并减小介质层中羟基基团含量。通过水基ALD技术双温区生长模式优化,所形成的石墨烯/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>异质结中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的相对介电常数可达

7.2, 击穿场强达 9 MV/cm; 通过同样方式优化, 亦可直接形成石墨烯/HfO<sub>2</sub> 异质结, 其中 HfO<sub>2</sub> 介质层的相对介电常数可达 25; 且通过水基 ALD 对 HfO<sub>2</sub> 进行 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂, 可直接形成石墨烯/HfAlO 异质结, 并通过 HfO<sub>2</sub> 上 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 堆垛方式优化, HfAlO 介质层的相对介电常数大于 10 且在 800 °C 高温退火后仍能保持非晶状态。水基 ALD 技术形成石墨烯/高  $\kappa$  介质异质结过程温和且高效, 不会对石墨烯引入缺陷。

#### D06-15

##### 金属氧化物半导体纳米纤维场效应晶体管的制备及电学性能调控 (Oral)

王风云<sup>1,2</sup>, 张洪超<sup>1,2</sup>, 宋龙飞<sup>1,2</sup>, 朱鑫旭<sup>1,2</sup>

1. 青岛大学
2. 青岛大学国家重点实验室培育基地

近年来, 一维金属氧化物半导体纳米材料尤其是 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZnO 由于具有优异的物理和化学性能, 包括独特的电子通道, 较大的比表面积, 优异的稳定性等, 在未来高性能消费型电子器件中显示了较大的应用潜力。然而, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米纤维 (NFs) 虽然具有优异的电学性能, 但是较高的载流子浓度导致其纳米纤维场效应晶体管 (NFFET) 关态电流较高 ( $5 \times 10^{-6}$  A)、开关比较小 ( $10^2$ )、阈值电压较负 (-28 V)、功耗较大。我们利用简便易行的静电纺丝工艺, 通过掺杂不同浓度 Mg、Sr 元素成功地实现了 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NFFETs 电学性能的调控。实验结果表明, Mg、Sr 掺杂均能有效地补偿 NFs 中的氧空位, 达到降低其中载流子浓度的目的, 使器件关态电流下降至  $10^{-12}$  A, 开关提高至 108, 阈值电压向右移动, 由耗尽型转变为增强型。通过进一步与高  $\kappa$  介电层 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、HfO<sub>2</sub>) 集成, 可将器件操作电压降低十倍, 极大地降低了能耗。此外, ZnO NFs 由于表面比较粗糙, 表面陷阱态过多, NFs 中颗粒较大甚至断裂, 导致器件性能下降。我们通过简单地调节静电纺丝工艺制备的 ZnO 前驱体 NFs 的退火温度来调控 ZnO NFs 的形貌和晶粒的尺寸, 从而获得了高电学性能、增强型 NFFETs, 开关比为  $\sim 10^7$ , 阈值电压 < 1 V, 操作电压低至 3 V。因此, 我们通过静电纺丝工艺制备的 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZnO NFs 在未来大面积、高性能、低成本纳米电子器件、传感器、显示器等领域具有较大的应用前景。

#### D06-16

##### Epitaxial growth of GaN-based heterostructures on Si substrates (Invited)

X.L.Yang, J.Zhang, Y.X.Feng, P.F.Ji, J.P.Chen, and B.Shen\*

Peking University

Recently, GaN-on-Si substrates have attracted much attention for next generation high power electronic devices. Despite the promising applications, GaN-on-Si technology is facing reproducibility and reliability issues, which are likely to be related to growth processes and crystalline quality. Although several complicated stress-control approaches such as LT-AlN, AlN/GaN superlattice, and compositionally graded AlGaIn layer have been proposed, the crystalline quality (defects and residual stress), as well as uniformity issues still remain, especially for growth onto large diameter substrates. In this study, a large lattice-mismatch induced stress control technology with a single low Al content AlGaIn layer has been used to grow high quality GaN layers on Si substrates by means of MOCVD. Strain relaxation and dislocation evolution mechanisms have been investigated. It is demonstrated that the large lattice mismatch between the low Al content AlGaIn layer and AlN buffer layer could effectively promote the edge dislocation inclination with relatively large bend angles and therefore significantly reduce the dislocation density in the GaN epilayer. By further balancing the compressive stress induced and consumed during the growth, and the thermal tensile stress induced during the cooling down process, the use of this technology allows for high uniformity AlGaIn/GaN heterostructures with electron mobility of 2260 cm<sup>2</sup>/Vs. The sheet resistance is  $313 \pm 4 \Omega/\square$  with  $\pm 1.3\%$  variation. Our results demonstrate a promising approach to simplifying the growth processes of GaN-on-Si to reduce the wafer bow and lower the cost while maintaining high material quality.

#### D06-17

##### 锆预非晶化工艺在先进钛硅化物接触技术中的应用 (invited)

罗军<sup>1,2</sup>, 毛淑娟<sup>1,2</sup>, 张丹<sup>1,2</sup>, 许静<sup>1</sup>, 罗雪<sup>1,2</sup>, 赵超<sup>1,2</sup>, 王文武<sup>1,2</sup>, 王桂磊<sup>1</sup>

1. 中国科学院微电子研究所
2. 中国科学院大学

集成电路工艺进入 3D FinFET 技术代, 源/漏金属硅化物的选择标准不再是平面器件时代的以金属材料自身电阻率( $\rho_b$ )为主, 而是转变为由金属材料与硅衬底的接触电阻率 ( $\rho_c$ ) 导向。钛硅化物由于与硅衬底形成低接触电阻率、Ti 填充高深宽比接触孔的能力优于 Ni、Ti/TiN 作为钨塞的扩散阻挡层, 采用钛硅化物可简化工艺、以及与 Ni 不同, Ti/Si 固相反应中 Si 是主导扩散原子, 避免了镍硅化物工艺中金属原子向沟道横向扩散导致器件失效的现象等优势成为 3D FinFET 技术代的主流源/漏金属硅化物。为实现超低 TiSix/Si 接触电阻率, 满足 16/14 nm 及以下技术代对源/漏接触电阻率的要求, 锗预非晶化工艺(Ge PAI)被广泛应用于钛硅化物接触技术中。本文研究了 Ge PAI 对 Ti 硅化反应以及 TiSix/Si 接触电学特性的影响。我们发现 Ge PAI 在低温下能够显著促进 Ti 硅化反应, 生成的钛硅化物厚度随着硅衬底非晶化程度增强而线性增加。5 nm Ti/Si 在 550 °C 反应生成的钛硅化物厚度( $t_{TiSix}$ )= $0.17 \times Ge\ PAI$  产生的非晶硅厚度( $t_{a-Si}$ )+3.9 nm。TiSix 中 Ti 与 Si 的原子比渐变不固定, 靠近硅衬底一侧为富 Si 相而靠近 Ti/TiN 一侧为富 Ti 相。Ge PAI 并未显著降低 TiSix/n-Si 接触势垒, 但其仍能有效降低 TiSix/n-Si 接触电阻率。经 Ge 3 keV/ $2 \times 10^{15} cm^{-2}$  非晶化处理后, TiSix/n-Si 接触势垒仅降低 0.03 eV, 而其接触电阻率却较参照样品减小~21%, 低至  $5.25 \times 10^{-8} \Omega \cdot cm^2$  ( $Nd \sim 1 \times 10^{20} cm^{-3}$ ), 这得益于 Ge PAI 促进了 Ti/Si 反应以及提升了 TiSix/Si 界面。我们观察到 Ge PAI 存在一工艺窗口, 只有低能量/剂量的 Ge PAI 才能有效降低 TiSix/n-Si 接触电阻率, 能量/剂量过高则将导致接触电阻率退化。在应用 Ge PAI 工艺降低 TiSix/n-Si 接触电阻率的同时, 需要考虑到该工艺的引入对漏/衬底 PN 结反向漏电的影响。实验表明低能量/剂量的 Ge PAI 导致 n+/p 结的反向漏电较参照样品增加~25%。

#### D06-18

##### Ge 和 GOI 材料的外延与键合及其应用 (Invited)

王桂磊, 罗军, 焦斌斌, 顾世海, 孔真真, 云世昌, 杨涛, 李俊峰, 王文武, 赵超, Henry H Radamson

中国科学院微电子研究所

本研究在 8 英寸硅衬底上采用化学气相淀积 (CVD) 的方法外延生长高质量的锗材料, 并通过键合等工艺形成应变的 sGOI (Strained Ge On Insulator) 衬底, 制备的 sGOI 衬底经过表面处理, 粗糙度小于 1 nm。研究表明, Ge 材料在外延过程中的循环 H<sub>2</sub> 退火可以将缺陷密度降低到  $10^6 cm^{-2}$  以内; 另外, 键合质量对锗表面粗糙度, 氧化物厚度, 施加的机械力和热退火参数敏感。同时发现 sGOI 中 Ge 膜的应变可以通过键合过程施加的机械力的量以及通过改变 Ge 层的厚度来调整改变。制备的厚 Ge 薄膜 GOI 衬底未来可用于制造垂直和侧向光电探测器; 当 Ge 减薄为薄层用作沟道材料时, 其主要应用于制造高迁移率晶体管。本研究生长的材料通过光致发光 (PL) 谱, 高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM), 霍尔迁移率测量和高分辨率 X 射线衍射技术 (HRXRD) 来表征薄膜材料的性质。

#### D06-19

##### FIB-TEM 分析技术在晶圆芯片质量改良中的应用 (Oral)

黄亚敏, 王秀芳, 董业民

中国科学院上海微系统信息与技术研究所

在现代集成电路制造工艺中, 芯片加工需要经历一系列化学、光学、热加工等工艺环节, 每道工艺都可能引入各种缺陷, 同时, 由于芯片特征尺寸的不断缩小, 每道工艺工成本及所需设备成本也急剧上升, 器件加工缺陷导致的芯片制造损失将付出极为高昂的代价。因此, 有效控制工艺过程中产生的器件缺陷, 确保芯片质量, 对集成电路制造有非常重要的意义。

在芯片制造过程中, 每道工艺完成后都需要进行质量检测, 所发现的这种芯片表面的缺陷不一定是当道工艺失误导致, 有可能是之前工艺就有隐患。这需要进行深入细致的检测分析, 找出产生芯片质量问题的根本原因。芯片的缺陷分析主要是对半导体器件进行电性及物理缺陷分析。电性分析主要研究芯片参数性能是否正常, 通过测试芯片的 DC/AC 参数、阻抗值、漏电流等, 结合电路故障隔离诊断分析, 从而判断发生缺陷的大致位置。针对电性分析所得到的缺陷位置, 还需要进一步进行物理缺陷分析, 即通过芯片平面减薄观测、侧面截取观测等方法剖析缺陷, 并进行缺陷成分结构分析, 揭示缺陷形成机理。最终通过所检测出的各种缺陷形式, 建立缺陷模型统计, 从而对芯片质量改良提出有效措施。

本研究深入发展了 FIB 技术在芯片制样中的应用能力, 并采用 FIB-TEM 技术结合的分析手段, 针对芯片中检测难度高的物理缺陷进行了有效分析。对于最容易发生缺陷的前端工艺, 进行了实际案例分析, 包括 1) 栅极保护氧化层的空洞和残余物缺陷, 导致器件功能失效; 2) 栅极氧化层的不均匀性, 导致器件中形成漏电流等异常参数性能; 3) 有源层的掺杂缺陷, 导致的应变分布不均匀。本文提出的 FIB-TEM 技术, 扩展了原有分析技术的应用能力, 为更加高效和精准的进行芯片质量检测提供了有力支持。

#### D06-20

## 氮化硅陶瓷覆铜板活性钎焊制备工艺研究 (Oral)

陈波

中国航发北京航空材料研究院

氮化硅陶瓷 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) 具有强度高、韧性好、绝缘性好、热导率高、热膨胀系数低等特点, 作为基板材料在电子领域具有广阔的应用前景。和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{AlN}$  等陶瓷相比, 很难通过在界面形成  $\text{Cu-Al-O}$  化合物的方法实现覆铜, 需要采用特殊的工艺来实现  $\text{Si}_3\text{N}_4$  与  $\text{Cu}$  带的连接。本文中采用  $30\ \mu\text{m}$  厚的  $\text{Ag-Cu-Ti}$  和  $\text{Ag-Cu-In-Ti}$  两种活性钎料箔带, 分别在  $850^\circ\text{C}/10\ \text{min}$  和  $750^\circ\text{C}/10\ \text{min}$  规范下对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  与纯  $\text{Cu}$  带进行了连接, 分析了界面微观组织, 测试了覆铜层的抗撕裂强度。结果表明, 钎料中的  $\text{Ti}$  元素在钎焊过程中发挥了活性作用, 与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  发生了反应并生成了一层薄薄的扩散反应层, 钎料与两种母材之间形成了良好的冶金结合。另外, 还针对覆铜后的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  板进行了  $250^\circ\text{C}/5\ \text{min}$ /空冷共 50 次的热冲击试验, 经过热冲击后的覆铜板  $\text{Cu}$  层未出现裂纹、脱落等缺陷。

### D06-21

## 柔性锗硅薄膜材料及三维器件 (Invited)

梅永丰

复旦大学

近年来, 锗硅纳米薄膜在诸多领域开展了深入广泛的研究, 特别是微电子, 柔性电子, 可拉伸电子等。因为其优异的力学性能, 锗硅纳米薄膜材料可以通过应变工程进行功能化, 并组装成三维结构和集成器件。并且, 超薄化之后的优异弯折性能允许薄膜材料通过组装和自组装的方式在微纳米范围内进行大尺度的弯折, 从而形成三维结构, 譬如卷曲管状, 褶皱状等介观结构。这种从二维组装到三维结构的工程化可以获得新的物理性质 (力学, 光学, 电学等), 从而提供一个优质的平台用于探测, 能量收集转换, 生物集成, 柔性电子等前沿研究。在这个报告中, 我们会展示锗硅纳米薄膜材料在应变工程和自组装方面表现, 并探索其基本性质和器件应用, 从而为大家展示一个独特的微电子和光电子材料的研究形式和平台。

### D06-22

## 硅纳米晶体: 一种重要的硅基光电子材料 (Invited)

皮孝东

浙江大学材料科学与工程学院和硅材料国家重点实验室

硅纳米晶体是一种重要的纳米尺度上的硅材料, 无毒、低成本而且稳定性高。硅纳米晶体具有传统的体硅材料所不具有的新颖电子和光学性能, 有望有力拓展硅材料在光电领域的应用。我们近年来利用掺杂和表面改性调控了硅纳米晶体的光电性能, 并将其应用在了光电探测器、发光二极管和光电神经突触器件中, 展示了基于硅纳米晶体的新型光电器件的发展潜力。

### D06-23

## 在斜切 $\text{Si}(001)$ 衬底上 $\text{GeSi}$ 纳米结构的异质外延生长及其特性研究 (Oral)

钟振扬

1. 复旦大学物理系

2. 应用表面物理国家重点实验室

3. 先进微结构协同创新中心

自组织  $\text{GeSi}$  纳米结构由于跟现有硅基集成技术的兼容性, 高载流子迁移率和准直接带隙特性使其成为倍受关注的半导体纳米材料。 $\text{GeSi}$  纳米结构的物理特性与其结构特性, 如尺寸和形貌等, 密切相关, 为了设计和制备基于  $\text{GeSi}$  纳米结构的新型高效的功能器件, 需要对其相关的结构特性进行精确调控。另一方面,  $\text{Ge/Si}$  系统只涉及两种元素, 在一定程度上, 它可以作为一种原型来研究半导体异质外延生长过程中的基本物理规律及其内在机理。因此, 研究人员对  $\text{Si}(001)$  衬底上锗硅纳米材料的外延生长进行了大量的研究, 发现了生长过程中的诸多因素, 例如温度、生长速率、淬火、盖帽层等, 对这些纳米结构的影响。期望通过对其生长条件的优化, 调控其结构从而改善材料的特性, 提高相应器件的性能。

本报告利用分子束外延技术对斜切  $\text{Si}(001)$  衬底上的  $\text{GeSi}$  纳米结构的生长和相关特性进行了系统研究。实验结果表明衬底的斜切角度和方向能有效改变  $\text{GeSi}$  纳米结构的形貌, 例如通过  $\text{Si}(001)$  衬底斜切角度的调节, 可以实现量子点密度近三个数量级的提高; 于不同角度斜切衬底上量子点成核行为的研究揭示了随着斜切角度的增加浸润层的厚度不断减小直至消失的现象, 并从能量和生长动力学两方面进行了分析。另一方面, 斜切  $\text{Si}(001)$  衬底上的锗硅纳米结构的形貌还受斜切方向



的影响,在偏离<100>方向斜切 Si(001)衬底实现了不依赖于特定偏角的 GeSi 纳米线。对 GeSi 纳米线的光电特性和输运特性进行了分析和研究,发现紧密排列的 GeSi 纳米线中存在比较明显的耦合作用,而且发现 GeSi 纳米线阵列具有异常的磁阻特性。在室温下,从斜切衬底上的高密度小尺寸 GeSi 量子点观测到了相当强的光致发光。我们的结果表明斜切衬底引入的表面原子台阶可以改变表面能和表面吸附原子的迁徙,从而提供了一个改变异质外延生长的自由度,可以有效调控纳米结构的生长及其特性。

#### D06-24

##### 二维层状薄膜电学及光电器件 (Oral)

胡平安, 冯伟

哈尔滨工业大学

二维层状无机材料有望应用于未来纳米电子学和光电子器件。我们还研究了介电层和金属接触对二维半导体器件性能的影响规律,我们发现:在氧化介质中,从化学杂质的羟基和被吸收的水分子的载流子散射在确定 2D 层状半导体基 FET 的迁移率中起着中心作用,并且抑制这种载流子散射可以显著增强 2D 层状半导体器件的特性。此外,我们展示了高性能多层内嵌晶体管在聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) /Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 双层介质中,室温迁移率 >1000 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>,与硅基器件相媲美。在机械刚性和柔性衬底上加工了二维半导体光电探测器。二维 InSe 光电晶体管的光电流测量显示出高达 10<sup>4</sup> AW<sup>-1</sup> 的光响应率,超过石墨烯、MoS<sub>2</sub> 或其他基于 2D 材料的器件的光响应。此外, SiO<sub>2</sub>/Si 和 PET 衬底上器件的线性动态范围分别为 97.7 dB 和 78.73 dB。这两个都超过了目前开发的 InGaAs 光电探测器 (66 分贝)。我们的研究表明,硒化铟的二维纳米结构是一种新的高性能电子材料和光电子材料。

#### D06-25

##### 气固控制生长高性能<111>-GaSb 纳米线 (Oral)

杨再兴<sup>1</sup>, 何颂贤<sup>2</sup>

1.山东大学

2.香港城市大学

尽管基于 GaSb 纳米线不同结构的微电子器件已经实现,但是,相关的器件性能却一直受限于纳米线生长过程遇到的纳米线横向生长问题,导致器件的性能不能进一步提高。比如,在常规的化学气相沉积法 (CVD) 合成 GaSb 纳米线过程中,由于纳米线横向生长的问题,导致晶体质量不高,致使其空穴迁移率长期得不到提高 (一般 <40 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>)。在前期的工作中,在传统的 CVD 方法中引入表面活性剂,采用硫表面活性剂抑制纳米线横向生长的方法,合成了空穴迁移率 200 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> 的 GaSb 纳米线。进一步通过改变金 (Au) 薄膜催化剂的厚度,合成了不同直径分布的铟化镓 (GaSb) 纳米线。发现纳米线的生长方向随直径的增大,从 <211> 转变为 <111>,并且伴随一个中间过渡生长方向 <110>。重要的是,研究还发现 <111> 生长方向的纳米线空穴迁移率达到了 400 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>,这正是具有空穴浓度 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> 铟化镓材料的理论极限。

如何实现具有高空穴迁移率的纯 <111> 生长方向的 GaSb 纳米线是研究的要点。与利用传统 VLS 生长机理制备纳米线不同,本研究采用 VSS 生长机理制备了纯 <111> 生长方向的 GaSb 纳米线,其空穴迁移率同样达到了理论极限。进一步采用接触印刷技术实现了空穴迁移率达到 65 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> 纳米线阵列薄膜,在本征 p 型 III-V 族纳米线材料中,该薄膜空穴迁移率是具有极大竞争力的,在制作高性能半导体元器件中具有巨大优势。

#### D06-26

##### Hetero-integration of wide bandgap semiconductors and Si substrates by ion-cutting technique (Oral)

游天桂, 伊艾伦, 黄凯, 张师斌, 鄢有泉, 林家杰, 欧欣

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

The ability to tailor wide bandgap semiconductors (WBS) and to integrate them onto foreign substrates can lead to superior or novel functionalities with a potential impact on various areas in electronics and optoelectronics. In general, the epitaxy-based methods (e.g., MOCVD, HVPE etc.) are employed to realize the WBS/Si heterogeneous structures. However, the lattice parameter, thermal expansion coefficient, and crystal structure mismatches remain the most influential parameters in the heterogeneous epitaxy approaches. Alternatively, ion-cutting technique is a promising approach to realize wafer-scale WBS/Si heterogeneous structures by splitting and transferring fine monocrystalline WBS layers. In this work, we present the preparation of WBG/Si hetero-integration

materials by ion-cutting technique, including GaN-Si, SiC-SiO<sub>2</sub>, etc. Bulk-quality heterostructures frequently unattainable by direct epitaxial growth can be produced, thus offering an additional degree of freedom in the design and fabrication of heterogeneous and flexible devices.

#### **D06-27**

##### **新型碳基二维半导体材料 C<sub>3</sub>N 的制备与微电子器件应用 (Oral)**

杨思维, 何朋, 丁古巧

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

随着石墨烯的发现, 二维材料以其优异的电学性能为微电子领域带来了巨大的发展空间, 进而实现突破摩尔定律禁錮的目标。然而, 作为二维材料中最受关注的材料, 本征石墨烯因其零带隙的基本特性导致了其在微电子器件领域应用的困难。同时, 黑磷及其他金属化合物二维材料面临着稳定性、合适带隙、合适迁移率等一系列现实问题。因此, 如何发展高稳定、高迁移率且具备合适带隙的二维半导体材料是发展二维材料微电子器件的重要基石。

2017 年, 我们报道了一种新型碳基二维半导体材料 C<sub>3</sub>N, 该材料为一种由碳和氮原子构成的类似石墨烯的蜂窝状无孔有序结构, 是一种新型间接带隙半导体, 本征带隙为 0.39 eV, 带隙可以通过纳米尺寸效应进行调控, 理论计算和实验结果一致。基于单层 C<sub>3</sub>N 薄膜的 FET 器件开关比可以高达  $5.5 \times 10^{10}$ , 载流子迁移率可达  $220 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。通过调控 C<sub>3</sub>N 量子点的尺寸, 可以实现约 400-900 nm 的光致发光。值得注意的是该材料可以通过氢化实现电子注入, 并在 96 K 温度以下产生铁磁长程序。带隙的存在弥补了石墨烯没有本征带隙的缺憾, 氢化载流子注入为调控该材料的电学特性提供了新的手段, 铁磁性预示该材料体系具有丰富的物理内涵。该项发现为碳基二维材料家族增添了新成员, 为探索基于该二维新材料的新物理和新器件奠定了基础。

#### **D06-28**

##### **半导体光子增益材料的仿真计算 (Oral)**

于雅鑫

长安大学

半导体光子增益材料(如 III-V 族材料)是半导体激光器、光发射二极管等一系列有源光子功能器件工作的重要基础。目前, 对于新型有源光子微纳器件的研究开发已高度依赖于数值仿真来进行器件性能的快速评估与改进。本工作基于中央高校基本科研业务项目(300102328301)的资助, 针对增益介质中各能级间电子的跃迁表达出相应的能级速率方程, 然后与 Maxwell-Bloch 方程相耦合建立了一个电磁时域有限差分计算模型, 用以对有源半导体能级材料的光子增益特性进行计算。此模型可使满足泡利不相容原理的电子能级间跃迁、自发辐射与受激辐射等物理过程均包含在计算当中, 并且可在仿真过程中动态监控介质的激光阈值与各能级电子数的变化。此模型已被用于研究微盘激光、光子晶体激光、分布反馈式激光的光增益特性, 仿真结果与理论预期符合良好, 具体的技术细节与计算结果将会在会议报告中做详细介绍。

#### **D06-29**

##### **使用量子点喷涂来提升 GaN 微显示全彩化之可靠度研究 (Keynote)**

李俊甫, 林志豪, 余庆威, 郭浩中

國立交通大學

本研究我們將呈現實驗室在全彩量子點之研究成果, “基於(RGB)量子點 (QD) 材料並搭配一 UV Micro LED 晶片來實現具全彩顯示之微屏幕製作”。並搭配光阻來製作具微陣列結構之井格, 藉此來有效定位(RGB)量子點之均勻塗佈, 此外光阻井也能有效解決量子點材料彼此間之鍵結干擾效應。搭配最佳化 Aerosol Jet® 噴塗技術來作為(RGB)量子點 (QDs) 之光子轉換, 有效控制像素間之密度, 並搭配布拉格反射器 (DBR) 來改善輸出光之強度進而完成-(RGB)全彩量子點顯示陣列。

#### **D06-30**

##### **LED 芯片微缩化趋势与技术 (Invited)**

陈凯轩

厦门乾照光电股份有限公司

韩国 OLED 的垄断格局短期内无法被打破，韩国 OLED 正在逐渐蚕食中国和台湾的 LCD 市场。受 OLED 等新技术冲击，LED 背光市场急剧下滑。LCD+Mini-LED 背光的组合成为 LCD 产业对抗 OLED 冲击的法宝，也为逐渐萎缩的 LED 背光市场打了一剂强心针。另一方面，Micro-LED 已成为近两年 LED 产业和显示产业关注的焦点，将成为在显示领域彻底颠覆现有竞争格局的关键。无论是 Mini-LED 还是 Micro-LED，在 LED 芯片微缩化的道路上，仍然有不少问题值得业界共同研究和探讨。

#### D06-31

##### 添加绝缘树脂改善有机光伏器件性能 (Invited)

郝晓涛

山东大学

随着有机半导体新材料的合成，以及聚合物有机太阳能电池器件的不断优化，有机太阳能电池的光电转换效率不断取得突破性进展，因此，如何进一步实现聚合物太阳能电池的商业化应用成为新的研究热点。其中要满足几个核心技术，除了要求能量转换效率高外，还必须有良好的器件稳定性，能够适应室外条件下长时间工作，以及大的活性层厚度便于实现其在卷对卷印刷中的应用。

将非光敏材料引入到活性层中，可以有效改善器件性能和稳定性。在我们的工作中将一系列绝缘树脂，如聚丙烯 (PP)，聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)，和乙氧基双酚 A 二甲基丙烯酸酯 (BPA2EODMA) 添加到活性层中，这些树脂在热处理或者 UV 交联后能够在活性层中形成棒状或者网络框架，能够提高活性层的稳定性，并促进激子的有效分离以及载流子的传输。将 PP 和 PMMA 掺杂到 P3HT, PTB7, PBDB-T 等二元体系，发现即使绝缘树脂作为一种非光敏材料不能够增加光吸收，但是能够优化其形貌和形成通道骨架。PMMA 作为一种可以自组装的柱状纳米结构，在其富集区域，能够形成贯通活性层的柱状结构，有利于增加器件的迁移率从而抑制电荷重组。在活性层中掺入 PP 会促进给受体的相分离，增加空穴和电子的迁移率并使得两者更为平衡，减小了电子与空穴的复合。当制成大厚度活性层后，相对于二元体系来说，同一厚度下其光电转化效率会有提高，二元体系对活性层厚度的敏感程度降低。在器件稳定性方面，BPA2EODMA 的引入能够在活性层中形成网络结构，从而抑制富勒烯在高温下的聚集行为，提高了器件的稳定性和抗弯折性。该工作展示出了非光敏的绝缘树脂可以作为一类非常有潜力的材料应用于器件中，这为今后进一步扩展三元材料的选择，促进有机太阳能电池的商业化打下良好的基础。

#### D06-32

##### 金属表面等离子体多级共振在光电探测器中的应用研究 (Oral)

陈洪宇

哈尔滨工业大学

随着日新月异的科技进步，人们迎来了全新的工业 4.0 时代。当今的物联网时代是一个全新的智能化和信息化并生的时代，作为信息技术领域三大支柱之一的传感技术无疑是新技术革命和信息社会的重要技术基础，也是现代科技的开路先锋。如果说计算机是人类大脑的扩展，那么传感器就是人类五官的延伸。各种不同功能的传感器可以让我们“看”到原来看不见的物质(如紫外辐射)，“听”到听原来听不见的声音(如超声波)。以光电传感器为例，工作在不同电磁波段的光电传感器可以把我们的视觉范围从肉眼的可见光波段向短波长拓展到紫外，向长波长可以延伸到红外波段。目前，具有不同功能的光电传感器已经在现代化工业生产、基础科学研究、宇宙开发、海洋探测、军事国防、环境保护、医学诊断、交通运输等诸多领域发挥了越来越大的作用。因此，光电探测器的进一步研制和开发成为光电传感领域的研究热点。为了适应更广泛的应用需求，高性能或者特殊功能光电传感器的研制和开发成为目前光电探测领域的研究热点。近年来，研究者们发现将金属表面等离子体技术引用到光电探测器中，不但可以增加量子效率、提升信噪比而且还可以通过金属表面等离子体的非线性光学效应提高器件的响应速度，减小器件的光电转化能耗。但是由于金属表面等离子体和所诱导探测波长的能量匹配是实现共振场增强的首要条件，而最容易激发的金属表面等离子体的偶极子只在一定波长范围可调，这大大限制了其作用波长。针对上述难题，我们开展了一系列关于金属表面等离子体及其高级共振的研究工作，并且在前面研究基础上，我们通过金属表面等离子体诱导的方法在多层硒化铟纳米材料中实现了一种新型的高性能双波段光电探测器。

#### D06-33

##### 单根 n-SnO<sub>2</sub>/p-CuZnS 微米线异质结型自驱动紫外光电探测器的性能研究 (Oral)

蔡健，苏龙兴，胡名翔，方晓生

复旦大学

SnO<sub>2</sub> 的禁带宽度较宽 (~3.6 eV)，可作为紫外光电探测器的材料，但是响应慢是限制其发展的一个常见因素。本文通过气相输运法在高温的条件下制备了高质量的单晶 SnO<sub>2</sub> 微米线，结果表明其具有很好的紫外选择性和较快的响应速度。在此基础上，通过水溶液法在微米线表面生长一层 p 型 CuZnS 透明导电薄膜，构筑了单根微米线的异质结。相比于纯 SnO<sub>2</sub> 微米线的探测器件，基于异质结的复合器件显示出了更高及更快的紫外响应，在 3 V 偏压下 on/off 比为 1300，上升响应时间为 0.045 ms，下降响应时间为 1.17 ms。此外，进一步研究发现该复合器件具有自驱动性能，其在 0 V 偏压下器件的光响应度为 1.6 mA/W (315 nm)。在 p-CuZnS 和 n-SnO<sub>2</sub> 界面处，形成的 II 型能带结构可对光生载流子进行有效分离和收集，从而在 0 V 偏压下表现出自驱动特性。

#### D06-34

##### 低维 PN 结构的设计组装及在光伏器件中的应用 (Oral)

张骐

杭州电子科技大学

光电材料是人类现代文明的物质基础之一，PN 结作为一种重要半导体光电结构单元，已成为设计制造新型光电器件的重要基石。在此，我们设计组装了两种基于低维纳米结构(BP 纳米线和 MoS<sub>2</sub>-WS<sub>2</sub> 二维面内)，并探讨了此类结构的光电特性及在光伏器件中应用。在通过一步化学气相沉积法制备出高质量单层 MoS<sub>2</sub>-WS<sub>2</sub> 平面异质结(样品形貌为三角形，尺寸大小可达~50 μm，厚度最薄为单层 0.8 nm)。对结区材料进行了系统的二次谐波响应测试，证实了其较强的响应强度和响应范围以及材料的空间非对称性。随后基于 MoS<sub>2</sub>-WS<sub>2</sub> 异质结结区构筑的光电器件显示了自驱动特性，表明面内异质结具有较强的光伏效应。异质结采用两种不同类型的半导体合金界面导致电子和空穴的严重散射，将降低此类功能器件的性能。在磷化硼(BP)体系中，我们通过精确调控前驱体气源 B 和 P 比例实现了磷化硼(BP)纳米线中 P 过量(n 型)或 B 过量(p 型)掺杂，达到了 BP 自身 pn 型特性的调控及纳米线载流子类型可控转变，并且成功应用于同质结光伏器，0.4 pW@600 nm 下的外量子效率达到 10%，源于光生电子空穴在界面上有效分离和传输。

#### D06-35

##### 肖特基结型 BeZnO 基紫外光电探测器的研究 (Oral)

苏龙兴, 蔡健, 方晓生

复旦大学

ZnO 是一种优越的光电子半导体材料，它的带隙可以通过形成 BeZnO 合金来调节，理论上该合带隙可从 3.37 eV 到 10.6 eV 连续可调。本文制备了不同 Be 组份的 BeZnO 合金，实现了带隙大范围连续可调，并在此基础上利用标准光刻和电子束蒸镀的方法制备了背对背对称和电极非对称的肖特结紫外探测器。由于 Be 掺入对表面 O 空位的抑制和肖特基结的优势，所制备的器件的响应速度达到了几十微秒量级，但响应度仍需进一步提升。通过对非对称电极器件的研究，我们发现该器件具有自驱动的特性，器件可在 0 V 偏压下具有较好的光响应。根据能带理论，非对称肖特基结型 BeZnO 探测器具有自驱动功能是由于空穴的修饰效应产生的非平衡势垒导致的。这是首次在新型合金 BeZnO 上实现了肖特基结型的自驱动紫外光电探测器，为未来实际应用提供了初步的器件基础。

#### D06-36

##### 钙钛矿微纳晶体激光及激光阵列 (Oral)

廖清, 何先雄, 张海华, 付红兵

首都师范大学

有机无机杂钙钛矿材料作为一种可溶液法制备的高性能的光伏材料在太阳能电池器件中受到广泛研究。高的发光效率，大的长程的平衡载流子迁移率和自由载流子密度，高的增益系数等特点使得其成为优秀的激光材料。常见的钙钛矿微纳激光有纳米线激光，微米片激光，微米片阵列激光，和其他形貌的微纳激光等。我们采用聚二甲硅氧烷(PDMS)圆柱形凹槽模板限域溶液自主装的方法制备大规模的钙钛矿微盘阵列。在模板限域的影响下，钙钛矿限域在圆孔内形成微米盘状结构。通过改变凹槽的尺寸和间距、母液的浓度，我们可以制备出不同尺寸的钙钛矿微盘阵列。制备的钙钛矿微盘具有规整的形貌好和良好的光学限域效果，可以作为回音壁光学谐振腔实现受激发射。同时，这些微盘激光表现出相似的低阈值和光学模式，实现同时受激发射形成激光阵列。通过气相阴离子置换反应，可以调节钙钛矿中卤素的比例，从而改变发射激光波长。实现

双色钙钛矿激光阵列。我们这种模板限域生长的钙钛矿纳米线的方法不仅能够精确的控制纳米线的位置而且能够很好与传统的光刻技术相结合，在制备光电子集成系统中将会有着重要的作用。

#### D06-37

##### 高度规则和均匀的 K3ScF6:Mn4+ 红色荧光粉的简易可控合成、显微结构、光致发光特性及其在 LED 器件中的应用 (Oral)

明红<sup>1,3</sup>, 刘水富<sup>1,3</sup>, 刘丽丽<sup>1,3</sup>, 彭家庆<sup>1,3</sup>, 傅俊祥<sup>1,3</sup>, 杜甫<sup>1,3</sup>, 叶信宇<sup>1,2,3</sup>

- 1.江西理工大学
- 2.离子型稀土国家工程研究中心
- 3.江西省稀土荧光材料与器件重点实验室

新一代由 Mn<sup>4+</sup> 激活的复合氟化物基质的红色荧光粉在获得高色彩质量和低色温的固态白光发光二极管 (WLED) 方面已经获得了广泛关注。然而, 这类荧光粉除了耐水性较差之外, 它们极其不规则和不均匀的形态也限制了其实际的工业应用。在本研究中, 我们在室温条件下通过简易共沉淀法成功合成了一种具有高度规则, 均匀形态和高色纯度的新型 K3ScF6:Mn<sup>4+</sup> 红色荧光粉。我们通过粉末 XRD 衍射, Rietveld 精修, 密度泛函理论 (DFT) 计算对其晶体结构进行了细致的分析。它具有 Fm3m 空间群的立方晶体结构, 它的晶格参数为 a=b=c= 8.4859(8)Å 和晶胞体积为 611.074(2) Å<sup>3</sup>。掺杂的 Mn<sup>4+</sup> 占据了 Sc<sup>3+</sup> 的晶格位点, 处于扭曲的 [ScF6] 八面体中心位置。K3ScF6 具有大约 6.15eV 的宽带隙, 可以提供足够的空间来容纳杂质能级。与其他大多数 Mn<sup>4+</sup> 离子激活的氟化物红色荧光粉不同的是, 所制备的 K3ScF6:Mn<sup>4+</sup> 荧光粉表现出高度均匀和规则的形貌, 并且它的形貌随着掺杂的 Mn<sup>4+</sup> 离子浓度的增加, 实现一个从立方体到八面体的转变。在蓝光照射下, 所制备的这种 K3ScF6:Mn<sup>4+</sup> 红色荧光粉展现出具有超高色纯度的强烈的线性红色荧光 (最强峰位于 631 nm)。一个加热和冷却循环实验表明 K3ScF6:Mn<sup>4+</sup> 具有优异的发光稳定性。此外, 使用所制备的 K3ScF6:Mn<sup>4+</sup> 红色荧光粉与购买的商业化 YAG 黄色荧光粉结合 GaN 蓝光芯片制造了一个具有低色温 (CCT= 3250 K), 高显色指数 (CRI= 86.4) 的暖白光 LED。这些结果表明 K3ScF6:Mn<sup>4+</sup> 红色荧光粉在实际应用方面具有巨大的潜力。

#### D06-38

##### 基于多孔氮化硼的复合发光材料的研究 (Oral)

何鑫, 林靖, 黄阳, 唐成春  
河北工业大学

我国具有非常丰富的稀土资源, 在稀土功能材料的研究中, 稀土发光材料是一个研究最为广泛最为重要的领域。我们发现多孔 BN 具有高的比表面积、大的孔体积和好的热稳定性等特征可以应用在很多领域, 这些优良的性能也使得多孔 BN 可以作为有机发光分子非常理想的新型主体基质材料。将 Tb(III) 配合物引入到多孔氮化硼 (BN) 基质中, 得到了一种新型的有机-无机杂化发光材料。所得的杂化材料的发光可以通过简单的改变配合物中的配体来调节, 特别是在杂化材料 Tb(acac)<sub>3</sub>/BN (acac=acetylacetonate) 和 Tb(acac)<sub>3</sub>phen/BN (phen=1,10-phenanthroline) 中观察到强烈的绿光发射。在 BN 基质和 Tb 配合物之间已经实现了独特的协同效应, 使得在 BN-配体-Tb<sup>3+</sup> 体系中存在有效的能量转移。将铽配合物引入到多孔 BN 中, 使得杂化材料显示出优异的热和光稳定性。多孔 BN 基质对杂化材料的优异性能起着重要作用, 基于此, 通过可控地将 Tb 和 Eu 配合物引入到多孔 BN 基质中, 合成了一系列有机-无机杂化材料 BN-T1Ex (T=Tb(BA)<sub>3</sub>, E=Eu(BA)<sub>3</sub>)。在紫外光激发下, BN-T1Ex 样品显示出 Tb<sup>3+</sup> 和 Eu<sup>3+</sup> 的特征发射峰。测试并讨论了激发和发射光谱以及荧光寿命, 结果表明, 在 BN 基质中, 发生了从 Tb<sup>3+</sup> 到 Eu<sup>3+</sup> 的能量转移。通过调节 Tb 和 Eu 配合物的比例, 杂化材料实现从绿色到红色的多色可调。另外, 通过调节激发波长和/或向样品中引入第二配体 phen, 可以进一步改变杂化材料的发光颜色。所获得的颜色可调的有机无机杂化材料可能在显示装置和 UV 白光发光二极管 (w-LED) 中具有潜在的应用。

## 墙展

#### D06-P01

##### 射频磁控溅射法制备 Mn 掺杂 CeO<sub>2</sub> 薄膜的结构与铁磁性能研究

阳生红, 蒋志洁, 张曰理  
1.中山大学

本文采用射频磁控溅射法在 Si(100)和石英玻璃衬底上制备了不同浓度 Mn 掺杂 CeO<sub>2</sub> 稀磁氧化物薄膜，通过 X 射线衍射(XRD)仪、原子力显微镜 (AFM)、拉曼光谱 (Raman) 仪、紫外-可见分光光度计以及超导量子干涉磁强计 (SQUID) 等仪器研究了 Mn 掺杂浓度对薄膜结构与形貌、光学性能与铁磁性能的影响。结果表明：所有薄膜表现了沿 (111) 晶面择优取向生长。随着 Mn 掺杂浓度的增加，(111) 晶面择优取向明显增强，晶粒尺寸逐渐增大，且未破坏 CeO<sub>2</sub> 原有的结构；薄膜表面比较平整，颗粒均匀致密，表面粗糙度随 Mn 掺杂浓度的增加略增大；薄膜的紫外吸收很强 (平均值>99%)，可见光透过率很高 (平均值>80%)，光学带隙随 Mn 掺杂浓度的增加而减小；超导量子干涉磁强计 (SQUID) 测量表明 Mn 掺杂 CeO<sub>2</sub> 薄膜具有室温铁磁性，随着 Mn 掺杂浓度的增加，饱和磁化强度和矫顽力增大。可见通过 Mn 掺杂浓度能够控制薄膜的铁磁性能。结合 XRD 和 Raman 研究结果，可以认为 Mn 掺杂 CeO<sub>2</sub> 薄膜的铁磁性是薄膜的本征性能。基于以上研究结果，本文最后探讨了铁磁性来源与掺杂离子状态之间的关系。

#### D06-P02

##### 氮、硫掺杂碳量子点的制备及其光学性能

付丽歌，殷月红

河南理工大学

近几年环境友好的碳量子点由于其良好的光学特性获得广泛关注。本文以柠檬酸为碳源，采用水热法一步合成了氮和硫共同掺杂的碳量子点，研究了氮、硫的掺杂比例对发光特性的影响，通过调控反应环境的酸碱性探索最优的合成条件。采用扫描电子显微镜、X 射线衍射技术对碳点进行结构表征，利用稳态光谱对其光学特性进行分析，通过碳点的荧光寿命测量分析其发光机理。结果表明，相比于单一 N 元素掺杂，N 和 S 元素的共同掺杂可以使碳量子点的荧光强度大幅度提高。当柠檬酸:亚硫酸钠:乙二醇比例为 1:1:2 (摩尔比) 时制得的碳量子点荧光强度最大。当溶液 pH 值趋于中性 (pH=7) 时，碳量子点的荧光强度最大，在酸性或碱性溶液中碳量子点的荧光强度明显降低。

#### D06-P03

##### 石墨烯-TiO<sub>2</sub> 复合结构的反常非线性光学特征

肖思，蒋永强

中南大学

采用空间自相位调制 (SSPM) 和 Z 扫描研究石墨烯与 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒 (GNP) 或纳米线 (GNW) 复合材料的非线性光学特性并探讨其物理机理。SSPM 研究发现，GNP 和 GNW 在 700 nm 没有自衍射环，在 1100 nm 具有自衍射环。这不同于现有报导的其他二维材料：空间自相位调制的环数随波长增加而减少。推测机制可能是 700 nm 波段是由 TiO<sub>2</sub> 的特性主导，而在 1100 nm 则是由石墨烯主导。通过 Z 扫描研究发现 GNP 和 GNW 在 700 nm 具有反饱和和吸收和自散焦，在 1100 nm 具有饱和吸收和自聚焦。实验结果表明，通过选择合适的耦合，我们可以设计二维复合材料在特定波长处具有特定的非线性特性用于特定目的的光电应用。

#### D06-P04

##### 硫化钼改性氧化锌量子点湿敏传感器的超快响应性能研究

龚跃球，李旭军

湘潭大学

用化学法制备了 ZnO 量子点，用水热法结合化学法两步水热法制备了 MoS<sub>2</sub>@ZnO QDs 纳米复合结构。采用 XRD、SEM、EDS 和 TEM 表征了所制备材料的表面形貌、晶体结构、材料成分和结合性能。结果表明：ZnO 材料为典型量子点结构，粒径约为 10 nm，粒径分布集中；MoS<sub>2</sub> 材料具有明显的片状结构；MoS<sub>2</sub>@ZnO QDs 为两者复合结构，并且富含孔洞。利用上述材料制作了 MoS<sub>2</sub> 和 MoS<sub>2</sub>@ZnO QDs 湿度传感器，利用智能湿敏测试系统测试了其湿敏性能。结果表明：在 10 Hz~100 kHz 的频率范围内，最佳工作频率为 100 Hz；在工作频率 100 Hz，室温下，全湿度变化范围 11~95% RH 内，MoS<sub>2</sub>@ZnO QDs 湿度传感器的阻抗变化值超过四个数量级，相对于纯 MoS<sub>2</sub> 湿度传感器提高了 2~3 个数量级，并且循环稳定性能优越；MoS<sub>2</sub>@ZnO QDs 湿度传感器相对于纯 MoS<sub>2</sub> 湿度传感器响应恢复时间大幅缩短，分别从 47/65 s 缩短到 1/20 s，相对于纯 MoS<sub>2</sub> 湿度传感器实现了超快响应和较快恢复。

#### D06-P05

##### 磁性掺杂对 LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> 的输运特性研究

闫虹, 金克新  
西北工业大学

LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> (LAO/STO) 作为氧化物界面二维电子气的经典代表, 由于其在器件方面具有很大应用潜力, 调控其输运特性引起了人们的广泛关注。本文通过在 Al 位掺杂磁性离子, 对 LAO/STO 界面电学及光学性质进行了很好的调控。AFM 结果表明利用脉冲激光沉积方法制备得到的样品表面具有规则平整的台阶结构。通过磁性离子掺杂, 电阻不仅明显增加, 而且在低温小于 40 K 时观察到了近藤效应, 并且可以通过 360 nm 光照增加迁移率来抑制。光响应测试结果表明, 掺杂磁性元素明显地增加了光诱导的电阻变化。此外, 在磁离子掺杂样品中观察到了明显的磁滞回线。所有结果表明, 磁性离子掺杂对于界面二维电子气的电学, 光响应以及磁性都起到了调控作用。这一工作对于控制复杂氧化物新奇特性以及研究全氧化物光电器件提供了帮助。

#### D06-P06

##### 具有高热稳定性和快速结晶速度的 Ta<sub>0.12</sub>Sb<sub>2</sub>Te 合金在相变存储器中的应用

薛媛<sup>1,2</sup>, 宋三年<sup>1</sup>, 闫帅<sup>1,2</sup>, 郭天琪<sup>1,2</sup>, 宋志棠<sup>1</sup>

- 1.中国科学院上海微系统与信息技术研究所
- 2.中国科学院大学

Ta 掺 Sb<sub>2</sub>Te 被提出并且进行了系统的研究。与纯的 Sb<sub>2</sub>Te 相变材料相比较, Ta<sub>0.12</sub>Sb<sub>2</sub>Te 具有更高的结晶温度和更大的结晶激活能, 使之热稳定性提高。更小的密度变化能够在相变层与电极之间产生空位, 减少了对器件循环寿命的影响。更多的是, 通过 TEM 观察, 经过 Ta 掺杂, 晶粒明显变小并且分布均匀。为了测试薄膜的电学性能, 制备了基于 Ta<sub>0.12</sub>Sb<sub>2</sub>Te 的 PCRAM 器件。器件具有极快的操作速度, 可以在 6 ns 的脉冲下进行操作。此外, 可以获得高达  $3.6 \times 10^6$  的循环次数。

#### D06-P07

##### 刀片电极结构相变存储器的低功耗研究

卢瑶瑶<sup>1,2</sup>, 蔡道林<sup>1</sup>, 宋三年<sup>1</sup>, 陈一峰<sup>1</sup>, 闫帅<sup>1,2</sup>, 吴磊<sup>1,2</sup>, 刘源广<sup>1,2</sup>, 李阳<sup>1,2</sup>, 宋志棠<sup>1</sup>

- 1.中国科学院上海微系统与信息技术研究所
- 2.中国科学院大学

相变存储器(PCRAM)利用硫系化合物材料在晶态时低阻与非晶态时高阻的特性来实现逻辑存储的一种技术, 是最有可能成为主流的商用非易失性存储器件。但是 PCRAM 的功耗仍然需要进一步减小, 而功耗主要取决于 RESET 过程, 目前公认的最有效的减小 RESET 电流的方法是减小加热电极的尺寸。然而加热电极的尺寸与 RESET 电流之间仍然没有建立起的量化关系公式。因此本文通过实际测量加热电极尺寸分别为 10 nm、6 nm、4 nm、3 nm 的 PCRAM 单元, 得到 RESET 电流大小与电极尺寸的清晰关系式。本文通过有限元分析法模拟刀片电极结构 PCRAM 单元在非晶化过程中的温度场和电场分布, 来探究决定 RESET 电流的关键因素, 并进一步探索加热电极的极限尺寸。结果表明, RESET 电流随加热电极尺寸减小呈指数衰减。同时, 虽然有限元仿真结果表明加热电极尺寸可以无限缩小, 然而受限于工艺过程的物理极限以及微缩尺寸后造成的良品率降低问题, 经权衡, 加热电极尺寸为 3 nm 是 PCRAM 单元的最优选择。本研究加热电极尺寸与 RESET 电流的关系, 对生产高性能低功耗的相变存储器单元具有理论指导意义。

#### D06-P08

##### 基于 OTS 选通器器件测试系统的研究

闫帅<sup>1,2</sup>, 蔡道林<sup>1</sup>, 薛媛<sup>1,2</sup>, 宋志棠<sup>1</sup>, 陈一峰<sup>1</sup>, 卢瑶瑶<sup>1,2</sup>

- 1.中国科学院上海微系统与信息技术研究所
- 2.中国科学院大学

通过计算机控制脉冲信号发生单元、高精度电流测量单元、切换单元等硬件设备, 实现对 OTS 选通器器件自动测试进而综合分析器件的性能。该测试系统具有直流电压-电流扫描测试、OTS 选通器开关速度测试以及 OTS 选通器疲劳测试等功能。在这几种功能中, 直流电压-电流扫描测试是为了探寻 OTS 选通器的开通和关断的阈值电压; OTS 选通器开关速度测试是在找到开通和关断阈值电压的基础上测试选通器开通和关断的时间; OTS 选通器疲劳测试能够衡量器件的最大操作次数。此测试系统在 OTS 选通器研发的初期, 不仅提供了多种 OTS 选通器器件测试的方法, 更为 OTS 选通器器件的测试提供了稳定的平台。

## D06-P09

### 抗氧化高速 AlSc-SbTe 相变材料与器件研究

章思帆<sup>1</sup>, 吴良才<sup>1,2</sup>, 陈莹<sup>1</sup>, 刘万良<sup>1</sup>, 石建军<sup>2</sup>, 宋三年<sup>1</sup>, 宋志棠<sup>1</sup>

- 1.中国科学院上海微系统与信息技术研究所
- 2.东华大学

为了克服单质 Sc 靶的氧化问题, 提高相变存储器的操作速度, 利用 AlSc 合金靶和高速 SbTe 靶共溅射的方法制备了性能优异的 AlSc-SbTe 相变薄膜。与单质 Sc 靶掺杂相比, AlSc 合金靶不易发生氧化, 有利于材料制备与器件制造过程中的工艺控制。利用 X 射线衍射、透射电子显微镜、原位加热电阻测试等手段, 研究了 AlSc-SbTe 薄膜的结构、结晶与相变特性, 相对于基体 Sb-Te 材料, AlSc-SbTe 材料的热稳定性、数据保持能力显著提高, 晶粒尺寸大幅减小; 与传统的 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 材料相比, AlSc-SbTe 材料具有更快的相变速度, 基于 AlSc-SbTe 材料的器件操作速度达到 10 ns, 同时具有优异的可逆 SET-RESET 操作窗口特性, 循环操作次数可达 105。研究结果显示 AlSc-SbTe 薄膜是一种有应用潜力的相变材料。

## D06-P10

### 用于三维相变存储器的 GeSe 薄膜与器件研究

刘广宇<sup>1</sup>, 吴良才<sup>1,2</sup>, 李涛<sup>1</sup>, 朱敏<sup>1</sup>, 张菁<sup>2</sup>, 宋志棠<sup>1</sup>

- 1.中国科学院上海微系统与信息技术研究所
- 2.东华大学

相变存储器是近十多年来被公认为最具有发展前景的下一代非易失性存储器之一。随着半导体工艺和制造技术的发展, 相变存储器等新型存储器朝着大阵列高密度方向演进, 三维结构的存储器将成为相变存储器主流发展方向。传统的二极管选通技术已不能满足三维相变存储器的要求。基于硫系化合物薄膜材料的 OTS 选通器是适用于三维高密度相变存储器的理想器件。OTS 选通器的基本原理是基于硫系化合物的 Ovshinsky 阈值转变特性。当施加的电压达到阈值电压后, 选通单元由高阻态转变为低阻态, 与存储单元不同的是, 此时硫系化合物材料仍处于非晶态; 当电压撤除时, 选通单元又回到高阻态, 并没有发生存储转变现象。与传统的晶体管和二极管选通器相比, OTS 选通器具有开启电流大、漏电流小、开关比大、器件结构简单和微缩性好等优点。基于 GeSe 的硫系化合物是用作 OTS 选通器的最常用材料, 本文将针对 GeSe 薄膜本身的基本特性进行研究, 主要包括 GeSe 的结构特性、薄膜特性、微观特性以及基于 GeSe 薄膜的 OTS 选通器的电学特性, 以期对 GeSe 材料获得较为全面的认识, 为今后发展新型 OTS 选通器材料提供基础。

## D06-P11

### 铁电场效应晶体管相场有限元模型

蒋丽梅, 明浩

- 1.薄膜材料及器件湖南省重点实验室
- 2.湘潭大学

铁电存储器已经被学术界和产业界公认为是最具有潜力的新型存储器之一。但是一些失效行为会严重影响存储器信息的存储状态, 要实现突破性进展并最终取代主流存储器, 首先必须找出导致存储器失效的根本原因。晶体管所存储的信息状态由宏观的漏-源电流的大小来反映, 而漏-源电流的大小是由铁电薄膜的畴结构所控制。失效行为都能从畴结构中体现, 基于此, 建立了一个基于相场理论的二维铁电场效应晶体管模型。将铁电场效应晶体管的宏观电学性能与铁电薄膜的微观畴结构联系起来, 探究了位错、退极化场这些能引起晶体管失效的因素是如何通过畴结构影响晶体管的电学性能的。

## D06-P12

### 与 CMOS 工艺兼容的氧化铪基铁电栅高温快速切换研究

彭强祥<sup>1,2</sup>, 兰杨波<sup>1,2</sup>

- 1.薄膜材料及器件湖南省重点实验室
- 2.湘潭大学材料科学与工程学院

上世纪 90 年代兴起的 1T1C 电容结构的铁电随机存储器 FRAM 由于寿命长、速度快、抗辐射、功耗低是公认为最具发展前景的非易失性存储器, 但传统铁电材料与硅工艺平台的不兼容问题限制了 FRAM 容量的扩展, 其存储密度较低, 始终保持在 MB 的量级; 1T 结构的铁电场效应晶体管 FeFET 可以弥补 1T1C 结构存储密度低的不足, 以与硅工艺完全兼容的氧



化铅基铁电薄膜代替传统铁电薄膜的 FeFET 是铁电存储器的发展趋势；氧化铅基 MFIS 结构铁电栅在服役环境下的稳定性直接影响 FeFET 性能的发挥，因此很有必要研究 MFIS 铁电栅的可靠性，目前，国内尚未开展大规模氧化铅基铁电存储器可靠性研究。实验上，首先用原子层沉积技术制备了 MFIS(W/TiN/Hf0.5Zr0.5O2/HfO2/Si)铁电栅电容，之后将六组样品分别在快速退火炉中从常温快速切换到 100°C、200°C、300°C、400°C、500°C、600°C 烘烤 1min，借助铁电分析仪和半导体分析仪测量高温快速切换后的铁电性能，测量结果表明氧化铅基栅电容在高温快速切换烘烤后仍然具有良好的铁电性。切换前后饱和极化的剩余极化值均在 0-2 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  范围小幅波动，比较稳定，电滞回线始终保持良好的矩形度；保持性能切换前后无退化，Retention Times 均能保持 105s；切换改善了电容的疲劳性能，使多数电容的 Cumulative Cycles 达到 10<sup>9</sup> 数量级；从微观角度探讨了温度影响疲劳、保持性能的机理。基于漏电流分析了栅电容的电流密度-电场 (J-E) 特性，并讨论了作为切换温度函数的漏电流传导机制。

#### D06-P13

##### 基于 II-VI 族氧化物合金的能带工程及紫外光电器件研究

苏龙兴<sup>1</sup>，祝渊<sup>2</sup>，方晓生<sup>1</sup>，刘建林<sup>3</sup>，汤子康<sup>4</sup>

1. 复旦大学
2. 南方科技大学
3. 加州大学河滨分校
4. 澳门大学

近年来，紫外光电探测器因为在导弹预警、空间通讯、生化分析和火焰探测等领域具有广泛的应用而备受关注。而 II-VI 族氧化物 (CdO、MgO、ZnO 和 BeO) 的半导体合金因其宽广的能带调节范围 (2.4 eV~10.6 eV) 和强的空间抗辐照特性而被认为是性能优异的紫外光电探测材料。本文系统研究了 II 族氧化物半导体 (ZnO、MgO、BeO、CdO) 及其所有的三元和四元合金 (BeZnO、MgZnO、CdZnO 及 BeMgZnO) 的生长特性，阐清了不同合金材料的组份比例、相结构特性、生长条件之间的关系；获得了大范围可调的带隙 (2.4 eV~10.6 eV)，其中利用特定组份比例的 BeMgZnO 合金，在保持六方纤锌矿结构的基础上获得了 5.1 eV 的日盲带隙 (六方相 II 族氧化物半导体的最宽带隙)。在此基础上我们从第一性原理的角度出发，系统阐述了不同 Be、Mg、Zn 组份比例的合金的相结构特性，首次确认了 Be 的四配位优先法则是保持六方相的根本原因。基于带隙范围连续可调的合金材料，我们制备了 MSM 叉指结构的光电型紫外光电探测器，其截止波长从 360 nm 到 240 nm 连续可调，最大的光暗比达到 6 个量级，最高的光响应度达到 43 mA/W。另外我们制备了背对背结构对称及非对称结构的 BeZnO 基肖特基型紫外探测器，其光响应速度最快可达到微秒级别，远快于 ZnO (一般为秒级别甚至更长) 基的探测器件；另外利用非对称势垒首次实现了器件的自驱动特性。由于 p 型 ZnO 制备困难，我们利用 p 型 GaN 与 n 型 ZnO 构筑了异质结型紫外探测器，器件具有自驱动的特性，0 V 偏压下的光响应度达到 0.68 mA/W，截止响应波长为 358 nm。基于能带理论分析，p-GaN/n-ZnO 异质结器件的自驱动特性来源于内建电场，其耗尽层主要分布于 GaN 层，损耗层宽度的比例为 50:1。关于 II-VI 族氧化物合金的系统研究为实现 ZnO 基紫外光电器件的应用提供了重要的基础。

#### D06-P14

##### PCRAM 材料的电镜研究方法

辛天骄，陈鑫，王秀芳，宋志棠，朱敏  
中国科学院上海微系统与信息技术研究所

由于相变存储器 (PCRAM) 是通过相变材料在非晶态和晶态快速相变来实现存储，因而研究相变材料的微观结构对相变存储器热稳定性、操作速度、功耗等性能的优化至关重要。本文介绍了利用双球差校正透射电子显微镜来研究相变材料的几种方法：1. 通过透射电子显微镜 HAADF-STEM (高角环形暗场像) 成像，来研究晶态相变材料的结构和原子排列。2. 利用双探头超能谱极高的元素分辨能力来研究晶态相变材料的原子级元素分布。3. 构建透射电镜原位加热/通电装置对纳米器件直接施加热/电信号的方式，实现原位热场/电场作用下晶化与非晶化过程的实时观测。

#### D06-P15

##### 三维原子探针研究第六种键-金属价键

朱敏，程扬名，沈佳斌，宋志棠  
中国科学院上海微系统与信息技术研究所

现有物质均通过原子、离子以及分子间的作用力结合，即化学键。到目前为止，人类发现的化学键有五种，共价键、离子键、金属键、氢键以及范德瓦尔斯力。但是这五种键都不能解释相变材料特有的性质，即晶态和非晶态具有巨大的反射率差异，而正是由于这个特性使得相变材料能够广泛应用于光盘中。本工作利用三维原子探针技术断开不同材料中的键来研究晶态相变材料中键的类型。研究发现，晶态与非晶态相变材料在三维原子探针中表现出不同的场激发行为：晶态相变材料中的原子倾向于与其它原子一起被场激发，而非晶态相变材料中的原子倾向于单独被场激发。经过研究大量的样品发现，晶态相变材料的场激发行为是独一无二的，明显不同于共键键、金属键材料。该发现表明晶态相变材料中的化学键不同于已发现的五种化学键，是一种新的化学键（第六种键），即金属价键。

## 仅发表论文

### D06-PO-01

#### 氧化锌-石墨烯复合纳米材料的紫外-近红外双波段光电探测性能研究

张明光，沈典典，张翔晖，胡永明，顾豪爽

湖北大学

光电探测器是一种能将光信号转化为电信号的器件，是现代光电系统一个不可或缺的重要组成部分。按照响应波段范围，光电探测器可以细分为紫外线（UV）探测器、可见光（Vis）探测器、近红外（NIR）探测器和红外（IR）探测器等类型，在图像传感、通信、环境监测等领域发挥着重要作用。使用不同波段响应的复合型探测器来实现不同目标信息的获取，是提高光电探测的准确性、降低探测系统虚警率的重要途径之一。目前广泛研究的多波段探测器，探测波段主要包括 Vis-NIR 波段以及 MIR-FIR 波段，存在探测光谱不够宽、无法室温工作而导致的封装复杂、体积庞大等问题。

为实现室温环境下、单片集成的紫外-近红外双波段光电探测器，我们设计了一种基于喷墨打印技术的氧化锌-石墨烯（ZnO-Graphene）复合纳米材料光电探测器。测试了器件对紫外-可见-近红外光的光响应性能，发现该器件对 365 nm 和 980 nm 的光具有较好的响应性能，响应度分别达到 73.5 mA/W 和 30.8  $\mu$ A/W，器件对可见光波段响应非常微弱。器件特殊的结构，使其具有一定的柔性，不同的弯曲程度下，器件的光电响应衰减较小。本工作为发展复合型、双波段响应的柔性光电探测器提供了一种思路和方法。