

分会场二：纳米物理分会

低维InSe基高效光电探测与视觉仿生器件

刘为振*

东北师范大学

硒化铟（InSe）作为一种新型二维层状硫属化合物半导体，具有优异的电学性能（理论载流子迁移率 $\sim 104\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ）以及适中且可调的直接带隙，光谱响应范围覆盖近红外到近紫外区，在光电探测器应用中表现出了巨大的潜力。此外，InSe具有非中心对称的晶体结构，表现出了显著的热释电效应，可以将强光照射下，光热效应引起的随时间变化的温度波动转化为瞬时电位，产生热释电流。这种瞬时电学现象类似于人类视觉系统对外界入射光强的自适应调节行为。因此，低维InSe在构筑智能光响应器件（如人类视觉仿生器件）方面同样显示出了巨大的可能性。

有鉴于此，本文开发了基于多层 γ -InSe薄片的紫外探测器和人类视觉仿生器件。一方面，团队构筑了基于低维 γ -InSe/石墨烯的单边肖特基结探测器。得益于其强大的单边内建电场， γ -InSe中的光生高能热电子无需经过冷却，即可高效地转移到石墨烯中，进而通过“级联碰撞激发”效应在石墨烯中产生载流子倍增，最终实现具有高外量子效率（ $>160\%$ ）的近紫外光探测。另一方面，团队基于该材料进一步研发出一款视觉仿生自适应光传感器。该传感器基于低维 γ -InSe材料，采用“非中心对称结构”和“非对称电极接触”的设计思路，以光-热释电和光伏效应为基本工作机制，实现了在自驱动模式下，对宽波段范围（从近紫外到近红外）入射光的感知和处理，并很好地模拟了人眼的多种视觉自适应行为。

报告人简介：

刘为振，教授，博士生导师，教育部青年长江学者，国家重点研发计划青年科学家项目首席、吉林省中青年科技创新团队带头人，主要从事低维光电半导体材料与器件物理研究，面向国家重大战略需求，在宽禁带氧化物半导体材料与器件、新型层状半导体材料合成与物性研究等领域开展了系列创新性研究工作；相关结果以第一或通讯作者发表于Light:Science&Applications、Adv. Mater.、NanoLetters、ACSNano、AppliedPhysicsReviews等期刊50余篇，SCI他引2000余次，h-index32；授权国家发明专利6项；主持国家重点研发计划青年科学家项目、国家自然科学基金面上项目、青年项目，吉林省重点项目等课题。

关键词低维InSe，光电探测，视觉仿生

低维二硫化钼晶体管的回滞调控

纪清清*

上海科技大学

单层MoS₂等二维半导体材料因其高比表面而对外部环境非常敏感，一个重要的体现便是二维场效应晶体管转移曲线的回滞效应。利用稳定的回滞窗口可构建一类关键电子器件，即电荷存储器。本报告将介绍在MoS₂晶体管中引入稳定回滞的两种策略：(1)通过维度转化将单层MoS₂卷曲成准一维纳米卷，其高曲率表面存在电场增强效应，而两端开口的中空结构可容纳溶剂分子作为电荷捕获中心，由此构建的微型存储器具备亚微秒级的超快擦写潜力；(2)利用具有I-型异质结的核壳量子点与单层MoS₂复合，形成类浮栅结构的存储器件，其回滞窗口显著依赖于量子点结构，且可实现稳定的长时存储(10年电荷损失~18%，循环擦写次数>5000)。

关键词 二硫化钼；晶体管；回滞效应；纳米卷；核壳量子点

层状半导体拉曼散射中的声子腔和光学腔效应

林妙玲、谭平恒*

中国科学院半导体研究所

拉曼散射是探测材料中元激发（如声子）和电子（激子）-光子、电子（激子）-声子相互作用不可或缺的工具。基于电偶极近似和群论对称性分析所建立的拉曼张量，构成了拉曼选择定则的基础，即拉曼实验中只能观察到拉曼活性的声子模，而观察不到拉曼禁戒的声子模。这些结论与激发光波长以及样品所在的衬底无关。该理论框架几乎可以理解所有的拉曼散射结果。近期，我们研究发现，层状半导体材料 (LSM) 中存在的与层数相关的层间呼吸声子的振动形式具有驻波特征，即 LSM 形成了天然的声子腔，其驻波波矢与 LSM 厚度成反比，随着 LSM 厚度增加，声子腔可能与光子波矢大小相当，电偶极近似的前提条件不再成立，破坏了电偶极近似所确定的拉曼选择定则；同时，放置在衬底上的 LSM 可形成空气/LSM/衬底多层结构的法布里珀罗腔，在空间上调制了光子-电子相互作用。声子腔和光学腔的共同作用，形成了空间调制的光子-电子和电子-声子相互作用，我们由此提出了空间调制的光子-声子耦合拉曼散射理论，建立了光子-声子耦合的空间相干模型，计算了 LSM 中层间呼吸声子的拉曼强度随厚度、激发光波长和材料与衬底间折射率失配度变化的演变规律，定量揭示了实验上所观察的拉曼禁戒层间呼吸声子活性和强度对这些参数的依赖性。该研究揭示了受光学腔和声子腔调控的光子和声子场空间相干性对声子激发的重要影响。

关键词层状半导体；声子腔；光学腔；拉曼散射；层间呼吸声子

二维半导体激子极化激元的电学调控

张龙*

XiamenUniversity, China

过去十年，二维半导体微腔激子极化激元已经在各种微腔结构中得到广泛研究，这得益于二维半导体较大的激子振子强度以及范德华晶体特性。然而，过去的研究大多聚焦于激子与光子耦合，二维半导体在电子多体物态调控方面的优势并没有被充分利用。通过静电掺杂，我们在二维半导体及其异质结中引入二维电子气。基于这样的二维电子气、激子、光子的混合体系，我们实现了极化激元色散以及等效塞曼分裂的电学调控。同时，我将展示莫尔超晶格对该玻色费米混合系统的调控。

关键词 激子极化激元；二维电子气；掺杂；极化子

CrSBr中的激子行为及其相关光电子器件

叶培*

PekingUniversity

CrSBr具有强的激子共振以及磁性、光学和电学特性之间的相互作用，是一种很有前途的光电子材料。结合光学表征技术以及扫描透射电子显微镜-能量损失谱技术，我们揭示了CrSBr中激子能量随厚度变厚蓝移的反常现象。进一步结合扫描透射电子显微镜亚皮米的空间分辨率，证实了CrSBr中激子的局域特性。在构筑的MoSe₂/CrSBr异质结构中，我们揭示了存在的局域激子，它以一种新的光致发光发射特征X*为代表。我们的研究表明，X*源自受CrSBr层中固有缺陷限制的激子。最后，利用CrSBr固有的各向异性和独特的自旋电子耦合，我们构筑的CrSBr隧道器件中光电流的线性分色比在1.65K时可达60，而且随着磁场的增加，光响应也会显著增强。此外，独特的自旋电荷耦合产生了依赖于光子能量的光电流，这种光电流受外部磁场调制。我们的研究结果阐明了基于范德华磁体CrSBr激子特性，可以构筑多参数控制的光电子器件。

关键词CrSBr；激子；电致发光；光电探测器

利用STM针尖在T'-WTe₂表面构建具有原子精度的新奇结构

韩紫依、何林*

北京师范大学

层状范德华过渡金属二硫化物（TMDCs）每层由X-M-X三层原子（X为硫族元素，M为过渡金属）构成，是探索二维量子现象的重要平台。由于M-X间由共价键链接，TMDCs的解理通常发生在层间。在这里，我们报道了一种利用STM针尖操纵技术将单层TMDCs原子级减薄的方法。我们利用STM针尖脉冲实现了对T'-WTe₂表层数百个Te原子的剥离，形成了局部的2/3层TMDCs。这种分数层结构由于自发原子重构产生了不同于传统整层的电学性质，展现出了能量相关的电荷密度波。该工作突破了层状材料仅沿层间解理的固有范式，为低维体系中分数层TMDCs衍生量子物态的研究开辟了新途径。

基于STM针尖的原子操控技术，我们也实现了T'-WTe₂表面基于Te原子的新奇量子结构的精准构筑。通过热退火和针尖脉冲诱导深层Te原子向表面迁移，这些Te原子自组装成具有确定原子数（ $n=6, 12, \dots$ ）的全同量子点，并以单层闭环结构稳定存在。此外，STM的针尖操纵也可以精确地重新配置Te量子点的几何结构，包括对量子点的平移、合并与分解。这种自下向上的自组装和原子尺度的操纵在单一体系中的结合，为构建和定制原子级精准的结构开辟了新途径，也为探索新兴量子现象和设计下一代功能材料提供了理想平台。

关键词 分数层过渡金属二硫化物；T'-WTe₂；原子精确量子点；Te分子

二维半导体异质结构的原子级制造和光、电器件应用

孙颖慧*

北京科技大学

二维过渡金属硫族化合物具有原子级光滑表面、纳米级厚度、特殊的能带结构，以及独特的电学、光学、磁学和力学特性，成为下一代信息器件的候选材料之一。我们的研究聚焦在金属/二维半导体、金属氧化物/二维半导体异质结构界面的精准构筑、原位结构演化表征和光电性能优化方面，在原子尺度揭示界面结构、界面相互作用与材料性质、器件性能的关联和物理机制，为基于二维半导体异质结构的器件研制及其在光、电领域的应用提供实验基础。

此次报告介绍我们利用环境透射电镜原位调控不同气氛下单层MoS₂表面Pd纳米晶的生长过程，结合原位EELS和理论计算，揭示气-固、固-固界面相互作用对纳米晶成核生长机制的影响，有助于推动二维材料表面纳米晶的精准合成；通过缺陷锚定策略，在单层MoS₂表面分别合成Pt单原子、团簇以及2.5nm以下的纳米颗粒，采用片上微反应器技术实现了特定区域催化活性的精确测量，发现Pt团簇-MoS₂体系展现出94mV的过电位，显著低于Pt单原子体系和Pt颗粒体系，建立了制备-微观结构-性能间的精确构效关联。发展了一种制备二维MoO₂纳米片的新方法，它作为p型WSe₂的接触触点，表现出比使用Ti/Au电极接触的器件更高的迁移率和开关比，证实了高功函数MoO₂在实现理想p型接触中的优势。设计制备了CuO_x/WSe₂混合维度异质结构，CuO_x纳米颗粒的Cu空位能级和CuO_x/WSe₂的能带排列，以及CuO_x/WSe₂的范德华界面保证了界面载流子转移，使得WSe₂光电晶体管从紫外到近红外的宽光谱范围内表现出数倍的光响应增强。

关键词 二维半导体；环境透射电镜；原子尺度调控；光电探测



报告人简介：

孙颖慧，西安交通大学应用物理系学士（2003），清华大学物理系博士（2008）。曾在清华大学材料科学与工程系做博士后，在美国劳伦斯-伯克利国家实验室、美国加州大学伯克利分校物理系做研究助理。现为北京科技大学数理学院应用物理系教授、项目博导。长期从事低维纳米结构、二维半导体等的界面设计、调控和物性研究。负责国家自然科学基金面上项目2项、青年以及

国际合作与交流项目各1项，参加国家重点研发计划项目课题2项，以第一或通讯作者在包括 Nat. Commun.、NanoLett.、Adv. Funct. Mater.、Appl. Phys. Rev. 等期刊发表SCI论文26篇，全部论文SCI他引5300余次；已授权美国和中国发明专利20余项。曾获2020年度中国材料研究学会科学技术奖一等奖（排名第3）。兼任《稀有金属》期刊青年编委、Nanomaterials期刊客座编辑。

石墨烯中贝里相位调控与新奇量子物态研究

任雅宁、何林*

北京师范大学

相位是所有干涉现象的根源，是量子力学中极其重要的物理量。贝里相位作为一种几何相位，在揭示微观体系中的新奇量子现象以及探索新型量子物态方面发挥着关键作用。在以往的实验研究中，材料的贝里相位通常被视为一个常数。然而，贝里相位本质上是贝里曲率在闭合路径所围区域上的积分，因此通过调节电子运动路径或调控贝里曲率的分布，都可以实现对贝里相位的有效控制。

这里，我们通过在石墨烯中引入量子点并施加外磁场，有效调控了电子轨迹，从而实现了对外系贝里相位的控制[1, 2]。在单层石墨烯量子点中，磁场导致贝里相位从0到 π 的跳变，进而导致量子受限能谱中 $\pm m$ 角动量简并度的解除[1]。在双层石墨烯量子点中，我们首次发现磁场导致贝里相位从0到 2π 连续变化，产生了随磁场演化的谷极化能谱，为能谷电子学中谷极化量子态的实现提供了全新思路[2]。

进一步，我们发展了一种具有可调背栅的量子点制备方法[3, 4]，能够在实验中精确调控垂直电场，从而实现了对外系曲率的连续调节。通过该方法，我们成功在双层石墨烯量子点中实现了 $M=0$ 和 $M=1$ 角动量简并度的解除，进一步验证了贝里曲率在量子点能谱调控中的关键作用[5]。这一进展不仅展示了贝里几何相位对量子能级结构的深远影响，也为未来基于几何自由度的量子器件设计提供了新的平台。

关键词 石墨烯量子点，贝里相位，谷极化，轨道角动量，扫描隧道显微镜

二维硼烯的精准合成与化学调控

李秋瑾*

厦门大学

二维硼烯是一种由硼原子构成的新型二维材料，具有很强的电子-声子耦合特性，被预测为二维超导体。实验上也证实了硼烯是一种二维金属，并观测到了狄拉克能带结构和电荷密度波现象，近年来在材料科学和低维物理等领域引起广泛关注。但是由于硼原子丰富的成键结构与高化学活性，硼烯在大气环境下很快就会被氧化，这使得它的合成和应用被局限于超高真空环境。我们的工作围绕着二维硼烯的精准合成与物性调控展开。本次报告将介绍三个工作，分别通过调控硼烯的表面化学、层间键合以及维度效应，来对硼烯的化学和物理性质进行精密调控。

关键词 二维硼烯；精准合成；表界面调控；扫描隧道显微镜

基于铜氧面终止表面的无限层铜氧化物超导薄膜研究

马旭村*

清华大学物理系

Cuprate superconductivity emerges in the copper oxide plane by doping the charge reservoir layers, while the undoped copper oxide is well known as a Mott insulator. How the carriers are transferred from the doped charge reservoir layers into the intact CuO_2 planes remains to be elucidated. In 2012 we discovered the interface-enhanced superconductivity in single unit-cell $\text{FeSe}/\text{SrTiO}_3$ system and also pointed out that the high transition temperature of the layered cuprates may very likely result from a single unit cell of the material. Meanwhile, in order to unravel the underlying physics in cuprate superconductors, it is highly tempting to investigate directly the copper oxide plane in experiment.

Among all cuprate compounds in infinite layer cuprates ($\text{Sr}_{1-x}\text{Ln}_x\text{CuO}_2$) have the simplest crystal structure and also can be prepared with a CuO_2 -terminated surface. By using molecular beam epitaxy and scanning tunneling microscopy techniques we have conducted the direct measurement of the CuO_2 plane upon doping in infinite layer cuprates, promising a more profound comprehension of cuprate superconductivity through the lens of the CuO_2 surface.

关键词 铜氧面；铜氧化物；超导电性

范德华压强诱导的界面结构和量子态相变

何林*

北京师范大学

在通过原子层堆叠组装的范德华（vdW）异质结中，天然存在定义明确的二维（2D）原子尺度的空间。该二维原子空间的独特特性在于，范德华封装可产生数吉帕的局部压力，这已被证实能够改变界面受限材料的结构与性质。在此，我们报道了石墨烯/WSe₂异质结中局域范德华压力诱导的界面WSe₂量子点（QDs）的结构和量子态相变。在原子界面处，大部分界面WSe₂量子点（ $\approx 86\%$ ）从1H相转变为1T'相，表明由于局部高范德华压力，1T'相而非半导体性的1H相成为更稳定的相。通过扫描隧道显微镜，我们直接成像了界面1T' WSe₂量子点的准粒子干涉图样和边缘态回路，揭示了纳米级1T' WSe₂量子点为量子自旋霍尔绝缘体。我们的发现为利用原子级范德华层间的二维原子空间实现结构和量子态相变开辟了新途径。

关键词 范德华异质结；范德华压强；界面相变

二维材料界面物性调控的理论计算研究

杜世萱*

中国科学院物理研究所

二维（2D）材料由于具有原子级厚度且表面无悬挂键的特性，为通过同质、异质界面工程精确调控材料性能提供了独特平台。这种调控方式不仅能增强材料现有的性能，还能引发新的涌现现象。在本报告中，我将介绍我们在利用界面工程调控二维材料物性方面取得的进展。首先，我们通过磁近邻效应，诱导出单层母体材料原本不具备的新奇物性，包括磁斯格明子、自旋极化、能带拓扑以及能谷极化。接着，我会阐述界面诱导在增强非线性光学系数、提升氨合成活性方面的应用。最后，我将介绍我们构建的二维材料与衬底界面数据库，并通过几个示例，展示该材料数据库在发现新材料和新物性方面的应用。

关键词 磁电耦合；斯格明子；谷极化；非线性光学；数据库

新型稀土卤氧化物高 κ 栅介质介电性能及电子器件研究

杨圣雪*、许维婷

北京航空航天大学

为突破硅基半导体器件微缩面临的短沟道效应与量子隧穿效应限制，本报告聚焦二维稀土金属卤氧化物（GdOCl/NdOCl）栅介质及其场效应晶体管应用，取得的创新成果如下：

（1）揭示稀土氯化物水合物辅助化学气相沉积（CVD）生长动力学机制，攻克卤氧化物均匀成核难题。实现GdOCl/NdOCl纳米片横向尺寸达亚毫米级（最大169 μm ），厚度分别降至5.2nm与5.0nm，对应等效氧化层厚度（EOT）仅1.3nm与1.6nm。

（2）证实材料兼具高 κ 值（GdOCl: $\kappa=15.3$ ；NdOCl: $\kappa=11.7$ ）与强绝缘性（漏电流 $<10^{-6}\sim 10^{-7}\text{A/cm}^2$ ）。能带计算显示超宽带隙（ $>4.5\text{eV}$ ），击穿场强高达7.7~9.9MV/cm。

（3）GdOCl基MoS₂场效应晶体管（FETs）界面态密度低至 $7.81\times 10^{11}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ ，开关比 $>10^6$ ，亚阈值摆幅（SS）达67.9mV/dec（接近理论极限）。43nm短沟道器件漏致势垒降低（DIBL）值仅196mV/V，显著抑制短沟道效应。范德华间隙（5.7Å）与能带偏移（CB0=1.41eV）形成载流子限域势垒。NdOCl基器件在-2~0.5V低电压下实现超高开关比（ $>10^7$ ）、超低漏电流（ 10^{-12}A ）及近理想SS（78mV/dec）。NdOCl的高 κ 特性使MoS₂FET在低温下的迁移率提升3.2倍，其100nm短沟道器件DIBL值低至160mV/V。所构建的NMOS反相器电压增益达23.7（GdOCl）与60.9（NdOCl），成功实现了“与”门/“或”门/“非”门逻辑功能。

本研究建立了二维稀土卤氧化物从合成到集成的技术路径，揭示了介电性能调控新机制，为发展超薄高 κ 栅介质及低功耗集成电路提供了新材料范式。

关键词 二维高 κ 栅介质；稀土卤氧化物；场效应晶体管；短沟道效应；多功能逻辑器件

二维铁电半导体单晶制备和器件构筑

史建平*

武汉大学

二维半导体材料具备独特的物理化学性质，并且其原子层厚度和平面结构与现有微纳加工工艺兼容，有望成为新一代高性能电学、磁学、光学、热学等器件应用的核心材料。然而，其可控制备还存在诸多科学与技术问题；二维半导体材料的精准掺杂可提高载流子最近邻跳跃速率和跳跃几率，增加载流子迁移率。但是过量浓度的金属掺杂会在其表面引入大量缺陷，增加载流子散射，降低电子器件性能。我们主要从事晶圆尺寸二维半导体TMDCs单晶的可控制备、新物态调控和新器件构筑。围绕高性能新原理器件中关键电子材料的设计和内在物理机制的阐释开展研究。合成了晶圆尺寸二维半导体TMDCs单晶并建立了新生长理论，为高性能电子器件的研制提供了新材料；提出了过渡金属掺杂提升半导体晶体管性能的新机理，开发了全二维电子器件构筑的新技术，获得了单层TMDCs超高的载流子迁移率；设计了新型二维铁电/多铁材料，并揭示了鲁棒的室温磁电耦合特性，丰富了场效应晶体管的功能，为新原理二维电子器件的研制提供了新方案。

关键词 二维半导体；过渡金属二硫族化合物；可控制备；电子器件构筑

报告人简介：



2017年博士毕业于北京大学（师从张艳锋教授），2019年入职武汉大学何军教授团队，主要从事二维半导体材料的可控制备和新型电子器件研究。近年来在Nature Communications, Advanced Materials发表学术论文100余篇，承担国家自然科学基金重大研究计划、科技部重点研发计划等国家级科研项目多项，荣获中国新锐科技人物突出成就奖、湖北省杰青、湖北省楚天学者等奖励。

极端高压下的二维层间耦合效应研究

陈亚彬*

北京理工大学

压力是独立于温度和化学组分的第三个热力学参量。在极端压力下，低维纳米材料能够展现出丰富的结构转化路径，并表现出诸多新奇的物理性能。报告人将首先结合课题组情况简要概述极端环境科学；其次重点介绍极端高压下纳米功能材料的结构转变及物性研究，主要包括：1) 高压条件下层状材料的层间耦合标定及力学模量研究。基于超低波数拉曼光谱，测试了高压下不同层数二硫化钼的光谱性质，分析了高压下二维层状材料的压致形变路径，阐述了二硫化钼层间剪切模及呼吸模量的层数依赖性；2) 在超薄二维金刚石的可控制备及转变机理研究方面，采用激光加热高温高压技术，实现了从石墨烯前驱物到二维金刚石的可控转变，该二维金刚石具有可控的厚度和优异的物理性能。截获到常温常压条件下的二金刚石表现出尖锐的 T_{2g} 拉曼模式（线宽 $\sim 3.6\text{cm}^{-1}$ ），以及SiV和NV等色心的超强光致发光。极端材料化学研究有望为传统理工学科注入新的生命力，并在解决我国卡脖子科技难题中发挥重要作用。

关键词 极端环境，金刚石对顶砧，二维材料，高温高压，层间耦合

晶圆级单晶金属薄膜的可控制备与石墨烯外延生长

贾开诚*

北京石墨烯研究院

Cu(111)单晶薄膜因其优异的催化特性与表面平整度，被广泛认为是石墨烯等二维材料单晶外延生长的理想衬底。在此基础上，通过合金化策略构筑铜基合金(111)单晶薄膜，可以进一步拓展二维材料生长的衬底体系，并有望实现对其结构和性能的精准调控。本研究以蓝宝石单晶晶圆为衬底，发展了一系列4~8英寸、超平整、无孪晶Cu(111)单晶薄膜的可控制备方法与通用合金化技术。依托上述衬底，并结合自主开发的规模化装备，我们实现了高质量、高均匀性单晶石墨烯晶圆的化学气相沉积外延生长与批量制备，为新一代电子与光电子器件研发提供了材料基础。

关键词 石墨烯单晶晶圆 金属合金外延

等离激元纳米结构与单层过渡金属硫族化合物的强耦合

魏红*

中国科学院物理研究所

金属纳米结构的表面等离激元可以将光场束缚在纳米尺度空间，实现突破衍射极限的光场操控。以单层过渡金属硫族化合物为代表的二维半导体材料具有独特的光学性质，在纳米光学方面展示出很大的应用潜力。等离激元纳米结构与二维半导体材料的耦合体系为增强和调控纳米尺度光与物质的相互作用提供了优异的平台。等离激元模式具有极小的模式体积，非常有利于在室温下实现表面等离激元与激子的强耦合。本报告将介绍我们在等离激元纳米结构与单层过渡金属硫族化合物强耦合方面的研究工作。

关键词 表面等离激元；激子；强耦合；单层过渡金属硫族化合物

二维半导体/ALD栅介质界面的无损异质集成

吴金雄*

南开大学

高质量二维半导体/栅介质异质界面是构筑高性能二维场效应晶体管的关键和前提。目前，因与电子工业主流的原子层沉积（ALD）工艺不兼容，二维半导体/栅介质异质界面的原子级精准构筑及均匀无损集成仍具挑战。针对该挑战，本课题组从开发新型高迁移率二维半导体、创制高 κ 二维栅介质以及发展新型无损集成方法等方面开展了系列研究，并取得了系列研究成果[1-6]。本报告，将从上述几个方面展开阐述。譬如，针对“现有二维栅介质体系介电常数偏小且难以洁净转移”的领域难题，率先提出“二维高 κ 单晶栅介质直立生长”理念，实现Bi₂SiO₅单晶栅介质的直立生长，成功构筑低功耗无回滞MoS₂晶体管。针对“难以实现亚3nm超薄栅介质与二维半导体无损集成”的领域难题，率先提出“直立二维金属预原子层沉积超薄栅介质”的理念，利用一步法集成超薄栅介质/顶电极方法，首次实现亚3纳米原子层沉积栅介质与二维半导体的直接无损集成，构筑了等效电容厚度小于1nm的超高栅电容密度无迟滞晶体管。

关键词 二维半导体；ALD栅介质；异质界面；无损集成

报告人简介：



吴金雄，男，江西鹰潭人，博士，2019年9月任南开大学材料科学与工程学院研究员，博士生导师。主要从事新型电子信息材料与器件研究，近年来以通讯/第一作者身份在Nature Nanotechnology、Nature Communications等高水平杂志发表论文20余篇。

聚丙烯腈辅助的石墨烯晶圆转移、器件阵列构筑与封装

尚明鹏^{1,2}、林立^{1,2}、刘忠范^{*1,2}

1. 北京大学

2. 北京石墨烯研究院

石墨烯由于其高载流子迁移率、高透光性、高柔性等优异的物理化学、电学、光学等性质，而具有巨大的应用潜力和广阔的应用前景。目前，高品质、大面积的石墨烯通常需要在铜等金属衬底上生长，而为了实现其在不同的应用场景下的应用需求，需要将其转移到不同的目标衬底上，因此开发一种大面积、洁净、无损的转移技术对于石墨烯的应用至关重要。在传统转移工艺中，需要借助柔性的聚合物转移介质辅助石墨烯向目标衬底转移，然而聚合物的去除过程会污染石墨烯表面、产生破损，并使转移后的石墨烯处于裸露状态，易受到空气的水、氧气及其他污染物颗粒的影响。在这项工作中，我们采用聚丙烯腈（PAN）作为转移晶圆级石墨烯的聚合物介质和封装。由于PAN与石墨烯器件的制造工艺相兼容，因此不需要在后续应用中去除。最终，我们实现了4英寸石墨烯晶圆向SiO₂/Si衬底上的洁净、无损转移，并构筑了晶圆级的石墨烯场效应晶体管（FET）阵列，构筑的石墨烯器件阵列未观察到明显的掺杂，并表现出极高的载流子迁移率（约11,000 cm² V⁻¹ s⁻¹），并且在室温下具有长期稳定性。

关键词 化学气相沉积；石墨烯单晶晶圆；载流子迁移率；封装；石墨烯转移

石墨烯晶圆的自动化批量转移

赵一萱^{1,2}、刘忠范^{1,2}、林立^{*1,2}

1. 北京大学

2. 北京石墨烯研究院

石墨烯因其优异的电学、光学等性能，在电子和光电子器件领域展现出广阔的应用前景。化学气相沉积（CVD）法可制备高质量、层数可控、具备批量化潜力的石墨烯薄膜。然而，当前大面积高质量石墨烯通常生长在金属衬底上，需转移至功能衬底以实现后续应用。传统湿法转移易引入破损、褶皱和污染，严重影响石墨烯性能，实现大面积、无损、洁净转移仍是关键技术瓶颈。

本工作提出一种“干法”石墨烯转移策略，避免了传统工艺中溶液过程所引发的污染和水氧掺杂问题，保留了石墨烯的本征性质，并为实现晶圆级石墨烯的自动化批量转移提供了新路径[1]。该方法以金属铝为转移介质，利用其与石墨烯较强的结合力实现从生长基底的直接剥离，随后通过氧化处理调控界面黏附力，形成氧化铝以降低其与石墨烯之间的作用力。低温处理进一步促使氧化层断裂，增强石墨烯与目标衬底的接触与结合，实现转移介质的精准剥离。通过设计自动化剥离装置，本方法可精确控制剥离过程中的薄膜张力，成功实现石墨烯晶圆的无损、批量化转移。转移后的石墨烯展现出优异的电学性能（平均载流子迁移率达 $1.40 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ）。该工艺已成功集成至自动化设备中，大幅提升了转移效率和良率。

关键词 石墨烯；转移技术；批量转移；自动化装置

二维半导体的激子物理与物性调控

尹婷婷*

东南大学

二维半导体材料由于其新颖的量子特性、易于调节的电子结构、高效率-体积比等性质被广泛认为是后摩尔时代半导体技术的重要突破口，是构建新一代高性能的半导体信息器件的理想候选体系。在二维半导体中，激子物理及其物性的有效调控不仅决定了材料的光学特性，也直接影响其在光电器件和量子器件领域的应用潜力，已成为凝聚态物理领域的重要研究方向。本报告围绕二维半导体材料中的激子，系统研究了其光与物质相互作用的物理机制，重点探讨了其发光能量、寿命、半峰宽的高压有效调控，且在单粒子水平上实现了二维激子主导的室温单光子发射。该系列研究工作不仅深化了对二维半导体中激子物理的理解，也为二维半导体材料光电器件和量子发光器件的结构设计和性能提升提供了丰富的光谱学信息。

关键词 激子；光致发光；单光子；高压。

大面积石墨烯晶圆的快速批量转移

李芳芳^{1,2}、胡兆宁²、林立^{*1,2}、刘忠范²

1. 北京大学材料科学与工程学院

2. 北京石墨烯研究院

近年来，通过消除晶界、褶皱和附加层等缺陷，研究人员已成功实现金属箔基底上高质量大面积石墨烯薄膜的规模化制备。然而，如何将化学气相沉积（CVD）法制备的石墨烯从生长金属基底高效、无损地转移至功能基底，仍是制约其商业化应用的主要技术瓶颈。现有转移工艺普遍存在以下局限性：一方面需要依赖耗时较长的化学反应过程，严重制约了生产效率；另一方面在转移过程中容易产生结构缺陷和界面污染，显著影响器件性能的重现性。针对这一技术难题，本研究团队通过创新性地设计转移介质的界面作用力调控策略，取得了重要突破：成功实现了4英寸石墨烯晶圆在15分钟内完成向硅晶圆的洁净、无裂纹转移。这项创新性的转移技术具有以下显著优势：首先，通过优化界面作用力，确保了转移后石墨烯薄膜的结构完整性；其次，特殊的转移介质设计有效避免了传统工艺中常见的污染问题；最后，大幅提升了转移效率，为规模化生产奠定了基础。该研究成果标志着在批量化石墨烯转移技术领域取得了突破性进展，在保证材料质量的前提下，成功解决了长期存在的转移效率与质量难以兼顾的技术难题。这一重要突破为石墨烯产品的实际应用铺平了道路，将有力推动石墨烯材料在柔性电子、光电集成等领域的产业化进程。

关键词 石墨烯薄膜；无损转移；界面调控

氧化铟辅助的石墨烯无损转移与封装

廖珺豪^{1,2}、刘忠范^{*1,2}、林立^{1,2}

1. 北京大学

2. 北京石墨烯研究院

石墨烯因其超高载流子迁移率、优异的热导率和超薄的二维结构，在电子器件等领域展现出巨大的应用前景。然而，从石墨烯材料制备到器件集成这一全过程中，涉及石墨烯转移、微纳加工与器件集成等工艺，不可避免会引入化学污染、机械应力和界面缺陷等问题，严重制约石墨烯在高性能电子器件中的应用。因此，如何实现石墨烯的无损转移与器件集成是该领域亟待解决的关键技术难题。

本工作采用优化的真空热蒸镀工艺，在石墨烯覆盖的Cu(111)表面上成功制备出厚度最低可达2nm的单晶氧化铟介电薄膜。单晶氧化铟介电薄膜表现出优异的介电性能，等效氧化层厚度为0.6 nm时，其漏电流低于 10^{-5} Acm⁻²。同时，氧化铟薄膜与石墨烯实现了原子尺度的共形接触，构筑出低缺陷密度的范德华结构，不仅在转移过程中有效保护了石墨烯免受聚合物与空气吸附物的污染，还显著屏蔽了外部电荷的散射效应，使得晶圆上石墨烯薄膜的平均载流子迁移率达到约14,000 cm²V⁻¹s⁻¹，同时石墨烯器件性能展示出优良的均匀性和长期稳定性。

关键词 石墨烯；薄膜转移；界面调控；范德华集成

基于Janus石墨烯层堆叠的水汽阻隔膜制备原理

高红杰、周超凡、补赛玉、林立*

北京大学

石墨烯薄膜因其优异的阻隔性能，被认为是薄膜封装技术的理想材料。然而，目前基于化学气相沉积（CVD）法制备的石墨烯阻隔膜在实际应用中仍难以实现理想的水汽阻隔效果，这表明对于水分子在石墨烯堆叠结构中的扩散机制尚缺乏系统理解。本文中，我们通过结构与界面工程，成功制备出具有超低水蒸气透过率（WVTR）的大面积石墨烯阻隔膜，其WVTR值低至 $5 \times 10^{-5} \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，较已有报道低两个数量级。该性能突破源于一种基于堆叠Janus石墨烯结构的创新设计：其中，石墨烯一侧通过氟和氧官能团修饰，实现了无损转移；另一侧则引入羟基官能团，用于高效吸附水分子。此外，在两层Janus石墨烯膜之间插入toluidineblue0（TBO）亚单分子层。TBO层通过与水分子之间的强相互作用，进一步有效抑制了水蒸气的渗透。本研究为CVD石墨烯在阻隔膜领域的应用提供了理论基础与实验支撑，也为二维材料在先进封装技术中的功能化设计与工程化应用开辟了新的路径。

关键词 Janus石墨烯；水汽阻隔；薄膜封装

英寸级别镧系氯氧化物单晶的快速合成

马令森¹、史卓峰¹、补赛玉¹、林立^{*1}

1. 北京大学材料科学与工程学院

2. 北京大学前沿交叉学科研究院

层状镧系氯氧化物 (LnOCl) 家族具有低等效氧化物厚度、高击穿场和磁有序特性，在下一代范德华器件中具有很大的应用前景。然而，由于缺乏可靠的单晶生长方法， LnOCl 材料的开发一直受到阻碍。在这里，我们在几个小时内实现了英寸大小的 LnOCl 单晶和厚度降至单层的单晶薄膜的生长。单层 LnOCl 表现出超低的等效氧化厚度， LaOCl 和 SmOCl 的值分别为 0.25 和 0.34。此外，将 LnOCl 用作石墨烯器件中的介电材料，我们展示了晶圆级载流子迁移率的提升以及良好的量子霍尔效应。 SmOCl 和 DyOCl 引起的强磁邻近效应实现了高效的界面电荷转移和磁交换耦合。这项工作为合成大尺寸单晶层状材料提供了一种通用策略，丰富了极低等效氧化物厚度介电材料的库。以及具有强磁邻近效应的二维磁性材料。

关键词 单晶；二维材料；氯氧化物

各向异性层状材料角分辨拉曼光谱的定量预测

谭平恒*

Institute of Semiconductors, CAS, China

角度分辨偏振拉曼光谱（ARPR）能够揭示各向异性层状材料（ALMs）的光学各向异性及其对称性相关的电子-光子/电子-声子耦合作用。然而自十余年前发现以来，ALM薄片的ARPR响应始终存在令人费解的厚度依赖性、激发波长敏感性和介电环境效应，这为其机理理解和预测带来了巨大挑战。本研究以黑磷（BP）（ $\geq 20\text{nm}$ ）薄片和四层Td-WTe₂为例，通过引入本征拉曼张量（ R_{int} ），并结合实验测得的平面内轴向复折射率 and 对应声子模式的 R_{int} 复张量元，提出了预测厚层与原子级薄层ALM薄片ARPR强度分布的策略。该策略综合考虑了多层结构内部的双折射效应、线性二色性及多层干涉效应，进而推导出与ALM表面外入射/散射光偏振矢量直接关联的有效拉曼张量（ R_{eff} ）张量元，实现了对这些ALM薄片ARPR强度的定量预测，并揭示了其对ALM厚度、介电基底和激发波长复杂的依赖关系。该理论框架可推广至从原子薄层到块体材料的各类ALM体系，即使存在层数依赖的电子特性，也能实现其ARPR强度的全面预测。

关键词 角分辨偏振拉曼光谱；各向异性层状材料；黑磷；本征拉曼张量；有效拉曼张量

压电催化机理探究与性能调控

周小元*

重庆新型储能材料与装备研究院

随着二氧化碳排放增加导致碳循环失衡，推动碳中和经济成为当务之急。近年来，利用可再生太阳能将CO₂还原为CO和碳氢化合物的光催化方法受到广泛关注，成为一种被看作理想的解决方案。除了太阳能，自然界中还有其他形式的分散机械能。基于非中心对称材料的压电催化为机械能转化为化学能提供了一种新兴技术，并在绿色化学合成、生命科学、能源转换及环境修复等多个领域展示了其潜力。在我们的研究中，我们探索将压电催化应用于CO₂至CO的转化，并提出了压电催化CO₂还原反应（PECRR）的概念，旨在为碳中和提供新的思路。自2010年提出以来，关于压电催化的机制存在一定的争议，主要集中在筛选电荷效应与能带理论两种观点之间。我们发现，这些争议的根源在于这两种机制在大多数压电材料中可能共存，尤其是具有宽带隙的材料。我们提出了窄带隙压电催化剂的策略，初步证实了压电催化机制在PECRR过程中不依赖于带位，这为深入理解压电催化的基本机理提供了新的视角。

关键词 压电效应；压电催化；CO₂还原；反应机理；性能优化

