

文章编号: 1672-8785(2022)03-0008-08

基于低维材料的光电探测器的发展

牛佳佳 刘 铭 邢伟荣 李 乾 折伟林

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 为了更有效地抢占新型资源, 各个国家都致力于航空、航天和海洋等空间的探索, 以占据最大的优势位置。光电系统在资源占领过程中起决定性作用。针对其核心部件——光电探测器, 介绍了量子点、石墨烯、过渡金属硫化物和黑磷等新型探测器材料的基本结构、特点以及发展现状, 并就未来发展方向和应用领域进行了预测。

关键词: 量子点; 二维材料; 黑磷; 石墨烯; 过渡金属硫化物

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.03.002

Development of Photoelectric Detectors Based on Low-Dimensional Materials

NIU Jia-jia, LIU Ming, XING Wei-rong, LI Qian, SHE Wei-lin

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to more effectively seize new resources, various countries are committed to space exploration such as aviation, aerospace and ocean to occupy the most advantageous position. The optoelectronic system plays a decisive role in this process. For the core component photodetector, the basic structure and characteristics of new detector materials such as quantum dots, graphene, transition metal sulfides and black phosphorus are introduced. Their development status is described, and future development directions and application fields are predicted.

Key words: quantum dot; two-dimensional material; black phosphorus; grapheme; transition-metal sulfide

0 引言

当今国际形势愈发紧张, 提高自身的军事实力和在航空航天等领域的话语权刻不容缓。由于具有被动工作、不受天气干扰等优势, 红外光电探测器已成为众多军用设备的“眼睛”, 并在工业、医学、气象等领域占据了越来越重

要的位置。从地球资源勘测、天气预报到体温检测及新冠筛查, 红外技术被更加广泛地应用于人类生活的方方面面。红外光电探测器是红外技术的直接体现。它是一门集物理学、光学、材料学、热力学、电子技术等多方学科为一体的高精尖技术, 其主要工作方式是将入射

收稿日期: 2021-10-31

作者简介: 牛佳佳(1994-), 女, 山西晋城人, 硕士, 主要从事红外材料研究与测试。

E-mail: niujj1222@163.com

的红外辐射光信号转换成电信号, 并将其显示在图像中^[1]。

自进入人们的视野开始, 红外光电探测器便经过诸多变革。随着社会发展和生产进步, 其发展也根据需求侧重不同, 但都逐步向 SWaP³ 目标靠拢, 最终获取高性能、大规格、小尺寸、轻重量、低功耗、低成本的红外光电探测器^[2]。目前常用的红外光电探测器材料有碲镉汞、铟化铟、II 类超晶格等。其中, 碲镉汞红外光电探测器由于量子效率高、波长易控等优点成为红外光电探测器的主流选择。然而, 碲镉汞的固有缺陷和长波难控制等缺点难以避免, 瓶颈问题难以突破。为满足光电探测器高性能、低成本的发展需求, 一些研究者通过开发新的材料体系来制备新型红外光电探测器(如零维、二维材料光电探测器), 从而实现能带剪裁并在特定领域具有独特的优势。因此, 本文就具有代表性的量子点、石墨烯、黑磷、过渡金属硫化物等光电探测器材料的特点和应用状况进行综述, 并对其发展趋势进行展望。

1 基于零维材料的光电探测器

量子点是一种经典的零维材料, 在空间三个维度上的尺寸都介于 1~100 nm 之间, 与电子的德布罗意波长相近或者更小。由于势垒的存在, 空穴和电子在每个维度上均不能自由运动。量子点探测器的结构如图 1(a)所示。主体结构为三明治结构, 发射极和收集极均为重掺杂层, 势垒层之间堆叠二维量子点阵列^[3]。当外界光线射入时, 导带上发生带内跃迁; 量子点内由于电子跃迁发生光电离效应, 产生自由电子, 由发射极注入后, 被位于有源区的量子点俘获。当有源区被红外光照射时, 量子点内发生光电离效应, 由两极偏压产生的外电场使得电子移向收集极, 形成光电流。

量子点探测器主要分为 PIN 结构量子点探测器、CMOS 结构量子点探测器、雪崩二极管量子点探测器和胶体量子点红外光电探测器等。新兴的胶体量子点探测器研究主要针对光电二极管、光电导体和场效应光电晶体管, 如

图 1(b)~图 1(d)所示。主要应用的材料包括硫化镉 (CdS)、硫化铅 (PbS) 和二硫化钼 (MoS₂) 等。制备方法主要包括水热法、气相合成法、溶胶-凝胶法、微乳液法、热注入法和连续离子层吸附法。上述方法各有利弊, 反应温度、反应压力、靶材选择、合成的难易程度等都会影响材料及器件的性能。

相对于主流的碲镉汞、II 类超晶格、量子阱探测器, 量子点探测器的有源区是零维材料, 规避了高维材料结构器件上的问题。首先, 量子点探测器的暗电流更低, 探测灵敏度更高。由于存在声子瓶颈效应, 载流子的寿命较其他更长, 电子弛豫时间也 longer, 更易形成光电流, 从而提高响应率和灵敏度。其次, 通过调控量子点的尺寸、成分、形状和阻挡层, 可以调控能级并达到调控波长的目的。此外, 载流子在量子点内特有的三维受限, 使其直接对垂直光线响应, 降低了后续器件工艺的复杂性和加工成本。最后, 量子点探测器的抗辐射能力更强^[4], 能够承受空间中大量质子和宇宙射线的辐射。

2002 年, 研究人员首次制备了能够成像的量子点红外光电探测器(像元阵列为 13×13)。经过十几年的发展, 阵列已能达到 1024×1024。量子点红外光电探测器主要应用在以下几个方面: 激光雷达系统、空间光通信系统、空间激光通信系统和空间成像系统。其中, 激光雷达系统的光电探测器需要实现多波段检测。量子点光电探测器在中波、长波和甚长波段均能有效工作, 同时工作温度较高。这些特点使其具有较大的优势。此外, 在空间区域内的卫星与地面的通信存在两个主要问题: (1) 空间环境恶劣, 特殊的温度特性和辐射信号对探测器提出了更高的要求; (2) 距离过长, 光强随着距离的增长而逐渐减弱, 信号不易被接收。量子点探测器将会在空间领域特有的抗辐射性和抗温变性独树一帜。可以预见, 经材料、器件和结构多方面优化后, 量子点探测器将会在未来的空间光电领域占据重要的位置。

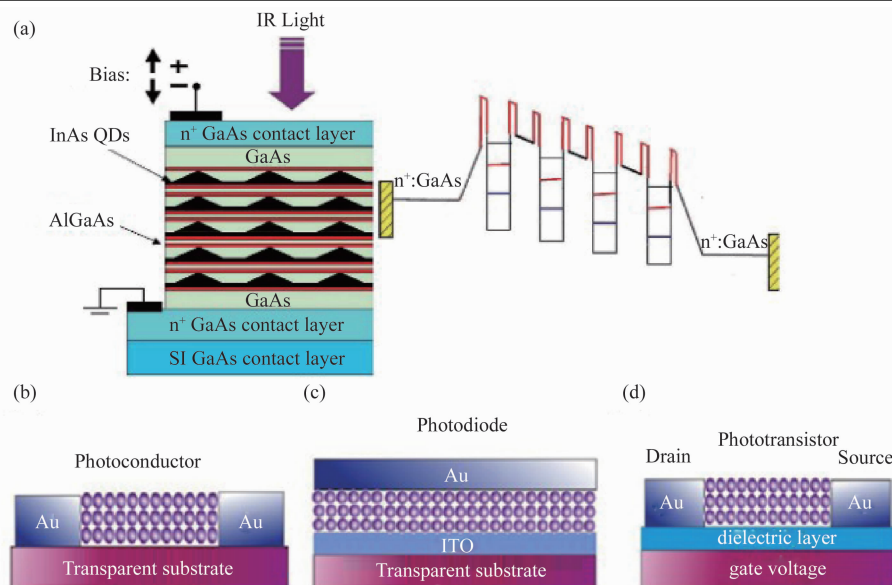


图 1 (a)量子点探测器的原理图；(b)基于光电导体的胶体量子点探测器的原理图；(c)基于光电二极管的胶体量子点探测器的原理图；(d)基于场效应光电晶体管的胶体量子点探测器的原理图^[3]

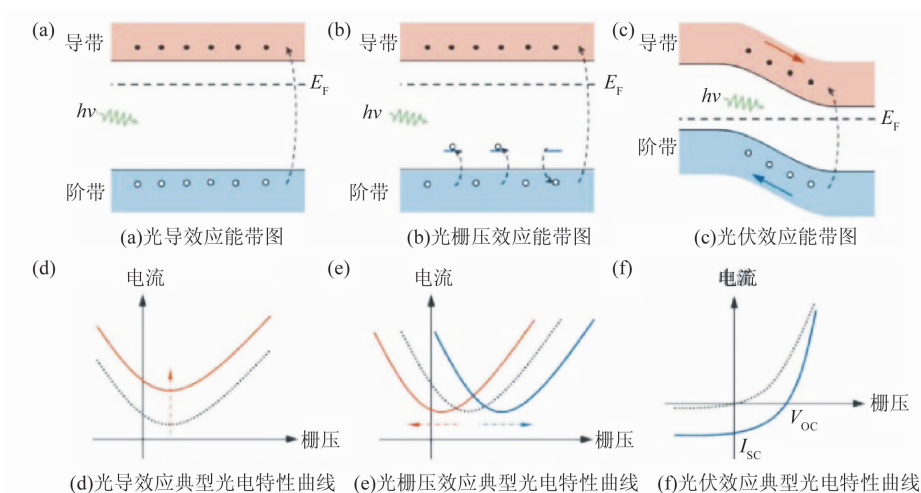


图 2 三种光电转换机理对应的能带图和典型光电特性^[5]

2 基于二维材料的光电探测器

随着性能要求越来越高，探测器的种类和选择也多种多样。高性能、多波段是目前的主流需求，在此基础上也有非制冷和柔性的需求。由于具有表面天然钝化、带隙覆盖整个光谱范围、多种光信息捕获、易调控和力学性质良好等优点，二维材料受到了越来越多的关注，为以后探测器的发展提供了更多的可能性。

目前的二维材料探测器大多采用以下三种工作机理^[5]：光导效应、光栅压效应和光伏效应。图 2 所示为二维材料探测器的三种光电转

换机理。其中，图 2(a)显示了光导效应的能带结构。入射光照射到半导体材料上，当能量大于禁带宽度时，电子会跃迁到导带，产生电子空穴对。基于光导效应产生图 2(d)中的光电特性曲线，电流是电子空穴对动态过程的稳态表现。图 2(b)所示为光栅压效应的转换机理。当入射光激发光导效应后，材料自身的空位或者杂质原子使载流子被束缚，难以形成电子空穴对。图 2(e)所示为光栅压效应的光电特性曲线。由于这种特殊性，自由载流子的存在使探测器的光电流能大幅增加，响应度也提升；然而部分被捕获的载流子难以释放，探测器的响

应时间也会增长, 响应速度较差。图 2(c)所示为光伏效应的能带结构。入射光照射后产生的电子空穴对在材料内部电场的作用下会自发分离, 载流子的迁移带来了短路电流。图 2(f)所示为上述光伏效应的光电特性曲线。以光伏效应为基础的探测器的暗电流较低, 探测率较高。

与经典的半导体材料相比, 二维材料易于调控, 主要表现在以下四个方面: (1)能够实现应力调控。(2)带隙可调。通过改变二维材料的厚度可调控带隙。厚薄不同的材料具有不同的能带。常利用厚薄材料的能带差实现光生激子分离, 从而改善响应时间和提高响应速率。(3)栅压可调。通过改变外加电场来调控材料的导电类型, 从而实现 P/N 型的转换。(4)掺杂可调控。原位掺杂能改善材料的能带结构, 实现波长控制。

2.1 石墨烯探测器

石墨烯是最早大范围应用于探测器的二维材料之一。图 3(a)为碳材料的结构示意图。其中右侧的石墨烯是由单层 sp^2 杂化碳原子构成的薄膜, 二维单层结构呈蜂窝状, 且单层厚度仅为 0.335 nm 左右^[6]。由于电子在二维平面内不受纵向力的限制, 可以自由移动, 因此石墨烯具有良好的导电性。石墨烯是零带隙材料,

单层材料具有金属特性。多层石墨烯被加工成细线(纳米带)状后, 带隙能进一步扩大。利用外加电场可在室温下控制其打开禁带。带隙在 0~250 meV 之间变化, 探测范围可覆盖各个红外波段和可见光波段, 在实际应用中不受波长的限制。因此石墨烯是一种优良的探测器核心材料。与传统的半导体材料(如 GaAs 等)相比, 单层石墨烯对光的显著吸收率使其饱和强度更低、光载流子密度更高。

基于石墨烯的突出优点, 很多学者尝试制备石墨烯光电探测器。图 3(b)为石墨烯光电探测器的示意图^[7]。它的主要缺点是探测率比传统 III-V 族探测器小很多, 仅为几十毫安/瓦。通过改变退火温度可以改善探测率, 但是变化幅度不大, 主要受材料本征特性限制。究其原因如下: (1)石墨烯的光吸收效率低, 单层石墨烯的吸收率不到 2.3%, 调控后有所提升, 但仍无法满足实际应用的需求; (2)提取光生载流子的难度较大, 有贡献度的区域占比很小。基于此, 一些学者尝试通过将石墨烯和半导体纳米材料复合成薄膜来制备探测器, 以实现宽光谱、高响应率特性。此探索处于初级阶段, 仍有许多方面需要进一步改进和优化, 但其潜力较大, 具有较高的研究价值。

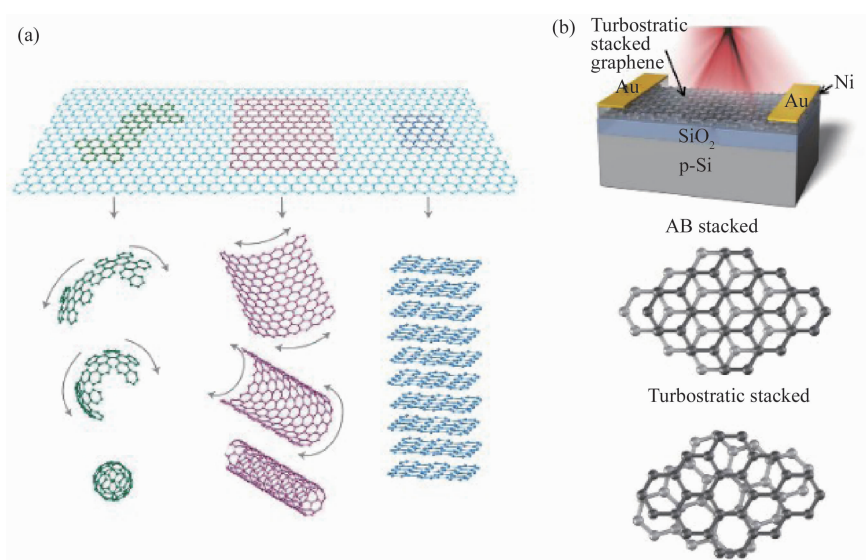


图 3 (a)多维度碳材料结构图^[6]; (b)金属/石墨烯/金属型石墨烯光电探测器的结构图^[7]

石墨烯光电探测器距离大规模、普遍化应用还有很长一段距离, 主要受以下限制: (1) 现今常用的方法是机械剥离, 所得石墨烯的品质相对较好, 但耗时长且尺寸较小。其他制备方法如氧化还原法也能大规模制备石墨烯, 并且工艺简单, 但得到的石墨烯的缺陷较多; 用 SiC 外延生长制备的石墨烯难以从基底上完整地转移; 化学气相沉积方法需要投入大量的成本, 因此石墨烯的制备仍是难点和重点。(2) 通过掺杂可提高石墨烯的性能, 其主要方法包括电学掺杂、化学掺杂和金属掺杂, 施加外加电场和氧化还原制备, 掺杂浓度和杂质引入是需重点研究的一个方向。

2.2 过渡金属硫化物探测器

过渡金属硫化物的分子式通常为 MX_2 。其中, M 常是以 Ti、Zr 为代表的 IV 族元素和以 Mo、W 为代表的 VI 族元素, X 常是 S、Se、Te 等元素。如图 4(a) 所示, MX_2 整体呈现层状结构, 层与层之间通过弱作用力结合, 形成特定的堆叠顺序和配位结构^[8]。超薄二硫化钼 (MoS_2) 是过渡金属硫化物半导体材料的典型材料之一。图 4(b) 为单层 MoS_2 的能带结构图^[9]。在近红外波段, MoS_2 可实现单层 1.8 eV 的直接带隙到多层 1.2 eV 的间接带隙的调控, 而且具有 $200 \sim 500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的载流子迁移率。上述优点使 MoS_2 成为新型探测器材料的选择之一。

MoS_2 的光响应范围较广, 但在红外波段的光响应度特别低。研究人员使用不同的方法 (如场效应法^[10]、物理剪裁^[11]、掺杂^[12]等) 对其性能进行了改善。其中, 掺杂是对 MoS_2 进

行改性的有效手段。掺杂的物质主要是金属纳米颗粒, 包括金 (Au)、银 (Ag) 等。颗粒与半导体材料形成光电耦合, 产生激元共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR), 以提高探测器的光电转换速率。掺杂银颗粒容易氧化, 不易保存, 但是其 SPR 效应更明显。图 5(a) 和图 5(b) 分别为纳米 Au 颗粒^[12] 和银球壳^[13] 结构的二硫化钼光电探测器的制备及结构示意图。国内也有一些相关研究。Yu Y 等人^[14] 制备了纳米 Au 与单层二硫化钼的复合结构, 增强了其对光子的捕获能力。掺杂方法有磁控溅射、电化学和化学合成等。与普通的 MoS_2 光电探测器相比, 掺杂金颗粒能有效提高响应度和光电流。 MoS_2 的激子能量被掺杂颗粒表面的等离共振吸收, 近红外光的吸收率显著提升, 从而增大了探测器的截止波长。

超薄 MoS_2 和其他二维材料复合成异质结, 也是改善光电性能的有效方法之一。由于 MoS_2 本身是 n 型半导体, 通过寻找 p 型半导体与之复合, 可以形成天然的异质结。目前研究 p 掺杂石墨烯、硅、二碲化钼等材料, 以任意角度进行堆叠, 层与层之间通过范德华力发生作用。这为制备更高性能的光电探测器提供了一个可行的方向。林媛等人^[15] 采用快速退火的方法制备了垂直台阶状的 p-n 结。它主要是重掺杂的 p 型硅和二硫化钼的异质结结构 (VSL- MoS_2), 在较宽的波长范围内展现了超高的响应度, 响应速率和探测率也得到了大幅提升。二碲化钼 (MoTe_2) 是一种天然的窄带隙 p 型半导体材料。Li S 等人^[16] 使用干法转移的方法在氧化铟锡 (ITO) 衬底上形成 $\text{MoTe}_2/\text{MoS}_2$ 异

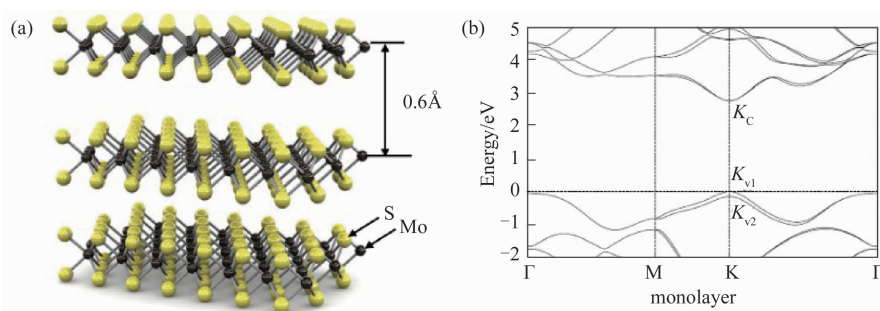


图 4 (a) MX_2 硫化物的原子结构图^[8]; (b) 单层 MoS_2 的能带结构^[9]

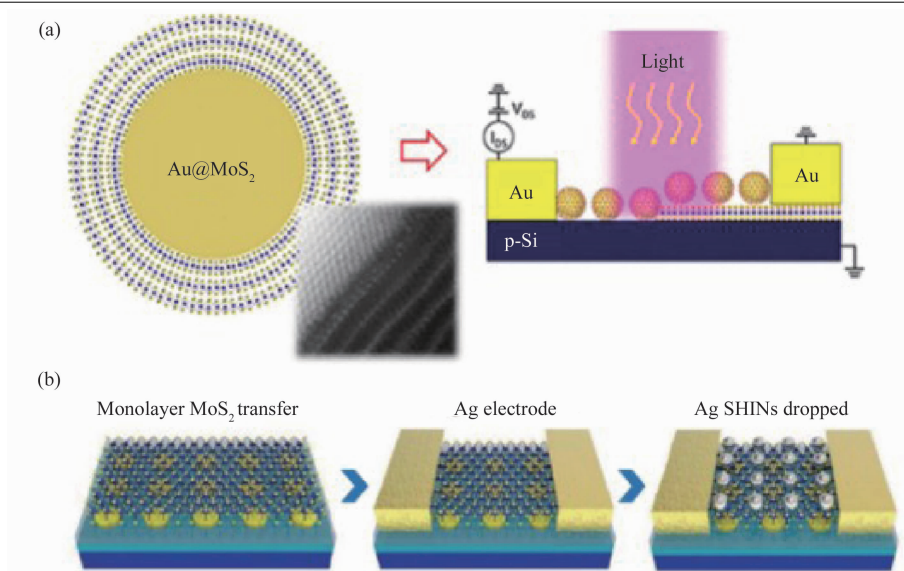


图 5 二硫化钼光电探测器: (a) 金掺杂^[12]; (b) 银球壳^[13]

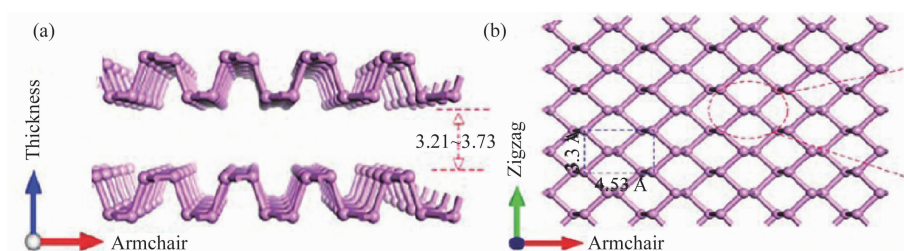


图 6 黑磷的原子结构示意图^[18]

质结。这种结构能为光电探测器提供驱动力, 极大地提高了光子捕获率。利用 ITO/MoTe₂ 与 MoTe₂/MoS₂ 两种结响应的差异性, 展示出双向光电流。

2.3 黑磷探测器

黑磷(Black Phosphorus, BP)是一种不同于石墨烯和过渡金属硫化物的二维光电材料。它是天然的窄带隙直接半导体, 其带隙从单层的 1.5 eV 跨越到块状的 0.3 eV。与之结构相近的黑磷也具备类似的性能。2014 年, 张远波^[17]和陈仙辉等人首次报道了 BP 场效应晶体管, 至此 BP 以光电材料的身份进入研究者的视野。超薄 BP 在近红外和可见光波段都具有较好的光电响应。近几年, BP 的探测范围能达到中红外波段。BP 是以空穴为主的 p 型半导体, 室温下的载流子迁移率与硅半导体基本相同($\sim 1000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 通过厚度和应变力可调节带隙。利用单轴压缩应变能使 BP 从

直接带隙转换为间接带隙, 这是应变改变带隙的最直接显示。基于以上优点, BP 成为新型光电探测器的潜力材料之一。

如图 6 所示, BP 主要是由磷原子按一定顺序排列的层状结构, 层与层之间通过范德华力连接, 层内通过共价键结合。这是一种类石墨烯的结构^[18]。单层 BP 的光响应波段较广, 且迁移率/开关比较高。在已有的报道中, BP 能够兼顾迁移率和开关比, 为以后在光电探测器领域的进一步发展提供了基础。BP 在单层平面内呈现各向异性。从结构中可以看出, 载流子沿纵向比沿横向更易传输。这种性质可使 BP 在等离子体共振中占独特的优势。BP 的制备方法分为以下三种: 机械剥离法、液相剥离法和化学气相沉积法。BP 的稳定性较差, 易与空气中的氧气和水分发生反应, 生成磷的氧化物。针对此特点, 已有的改性方法如图 7 所示, 包括表面保护层^[19]、化学修饰^[20]、

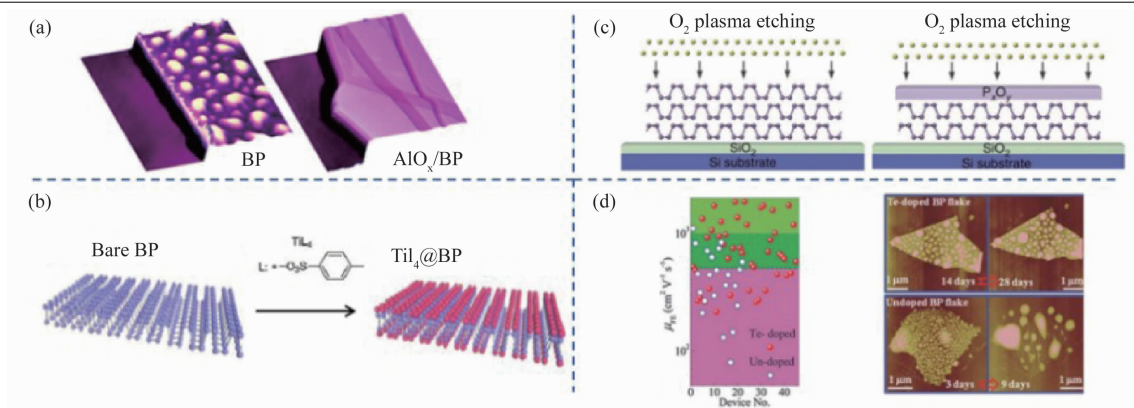


图7 黑磷修饰技术：(a)保护层^[19]；(b)化学修饰^[20]；(c)刻蚀^[21]；(d)掺杂^[22]

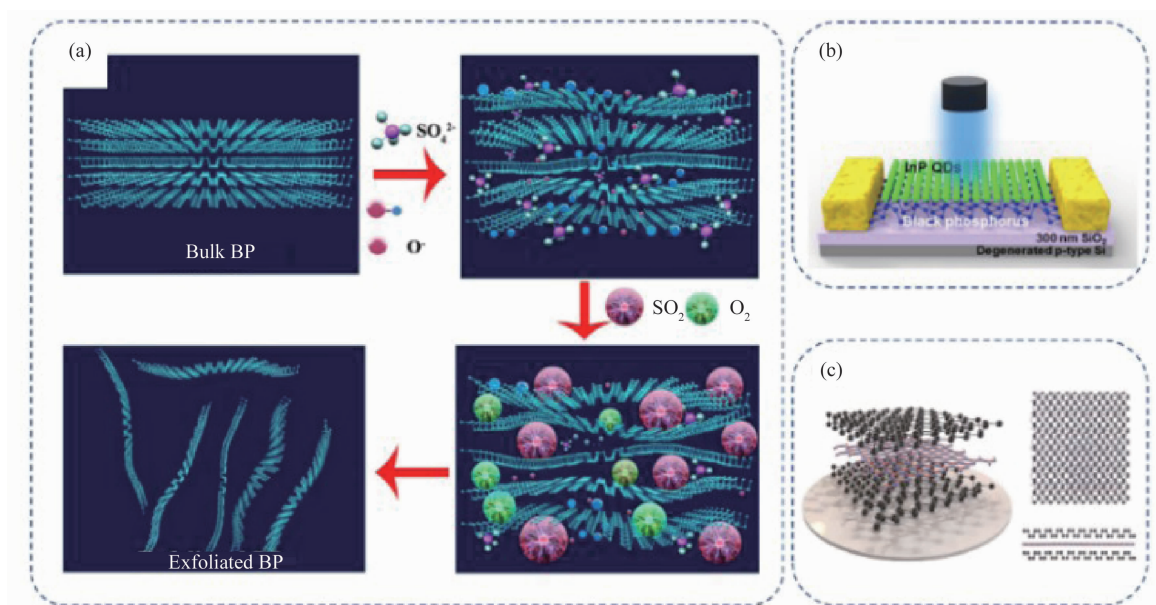


图8 (a)自支撑 BP 柔性光电探测器^[22]；(b)InP 量子点/黑磷探测器^[23]；(c)六方氮化硼(hBN)/黑磷/hBN 探测器^[24]

表面刻蚀^[21]和掺杂^[22]等。但是这些手段会接入其他分子的行为，进一步影响 BP 的结构，所以实现动态平衡仍需要进一步探索。随着钝化封装技术的进步，不稳定性已经不是制约其发展的关键问题。

Yang J 等人使用剥离后的 BP 纳米片成功制备了以 PET 为底的自支撑 BP 柔性光电探测器。图 8(a)展示了其材料生长及器件制备过程^[22]。除此之外，将 BP 与其他传统材料复合成异质结也是一大研究热点。图 8(b)和图 8(c)分别为 InP 量子点/黑磷^[23]和六方氮化硼(hBN)/黑磷/hBN 探测器^[24]的示意图。在已有传统材料器件的基础上研究异质结可以加

快光电器件的开发以及二维材料在实际应用中的脚步，促进其在光电领域的快速发展。除了上述材料之外，还有许多二维层状材料被应用于光电探测，比如超薄 GaS、少层 WS₂ 和少层 GaSe 等。对这些材料的研究仍处于开始阶段，距离实际的生产应用还有很长的路要走，需要研究人员的共同努力。

3 结论与展望

本文系统介绍了红外光电探测器中零维和二维材料的原子结构和能带特点，总结了新型探测器的研究现状和性能优化方向。量子点探测器具有抗辐射和高探测度的特点，未来主要应用于空间领域。二维材料主要采用光导效

应、光栅压效应、光伏效应等三种光电转换机理, 主要材料是以石墨烯、 MoS_2 为代表的过渡金属硫化物和 BP。系统介绍了三种材料的能带体系、材料制备、器件工艺以及后续发展方向。低维材料光电探测器的理论性能优良, 但受限于目前的材料制备和器件工艺, 其性能仍需要提升。未来经过发展, 高性能、低成本的红外光电探测器将会满足不同领域的需求。

参考文献

- [1] 吕衍秋, 鲁星, 卢正雄, 等. 铋化物红外探测器国内外发展综述 [J]. *航空兵器*, 2020, **27**(5): 1–12.
- [2] Alain M, Laurent R, Yann R, et al. Improved IR Detectors to Swap Heavy System for SWaP [C]. *SPIE*, 2013, **8353**: 835334.
- [3] Martyniuk P, Rogalski A. Quantum-dot Infrared Photodetectors; Status and Outlook [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2008, **32**: 89–120.
- [4] Narsingi K, Li S, Manasreh M O, et al. Optical Absorption of Proton Irradiated Colloidal CdSe/ZnS Core/Shell Nanocrystals [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, **57**(5): 2929–2932.
- [5] 张永哲, 李松宇, 陈小青. 二维材料光子型光电探测器研究进展 [J]. *北京工业大学学报*, 2020, **46**(10): 1149–1166.
- [6] Novoselov K S, Geim A. The Rise of Graphene [J]. *Nature Materials*, 2007, **6**(3): 183–191.
- [7] Mueller T, Xia F, Avouris P, et al. Graphene Photodetectors for High-speed Optical Communications [J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**: 297–301.
- [8] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, et al. Single-layer MoS_2 Transistors [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, **6**(3): 147–150.
- [9] Cheiwchanchamnangij T, Lambrecht W R L. Quasiparticle Band Structure Calculation of Monolayer, Bilayer, and Bulk MoS_2 [J]. *Physical Review B*, 2012, **85**(20): 205302.
- [10] Nourbakhsh A, Zubair A, Sajjad RN, et al. MoS_2 Field Effect Transistor with Sub-10 nm Channel Length [J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(12): 7798–7806.
- [11] Hansen L P, Ramasse Q M, Kisielowski C, et al. Atomic-Scale Edge Structures on Industrial-Style MoS_2 Nanocatalysts [J]. *Angewandte Chemie*, 2011, **43**(50): 10153–10156.
- [12] Lin J, Li H, Zhang H, et al. Plasmonic Enhancement of Photocurrent in MoS_2 Field-effect-transistor [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(20): 203109.
- [13] Wu Z Q, Yang J L, Manjunath N K, et al. Gap-mode Surface-plasmon-enhanced Photoluminescence and Photoresponse of MoS_2 [J]. *Advanced Material*, 2017, **30**(27): 1706527.
- [14] Yu Y, Ji Z, Zu S, et al. Ultrafast Plasmonic Hot Electron Transfer in Au Nano Antenna/ MoS_2 Hetero Structures [J]. *Advanced Function Material*, 2016, **26**(35): 6394–6401.
- [15] Guo J X, Li S D, Ke Y Z, et al. Broadband Photodetector Based on Vertically Stage-liked MoS_2/Si Heterostructure with Ultra-high Sensitivity and Fast Response Speed [J]. *Scripta Materialia*, 2020, **176**: 1–6.
- [16] Li S, He Z, Ke Z, et al. Ultra-sensitive Self-powered Photodetector Based on Vertical $\text{MoTe}_2/\text{MoS}_2$ Heterostructure [J]. *Applied Physics Express*, 2019, **13**(1): 015007.
- [17] Li L, Yu Y, Ye G J, et al. Black Phosphorus Field-effect Transistors [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, **9**(5): 372–377.
- [18] Ling X, Wang H, Huang S, et al. The Renaissance of Black Phosphorus [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**(15): 4523–4530.
- [19] Zhao Y T, Wang H Y, Huang H, et al. Surface Coordination of Black Phosphorus for Robust Air and Water Stability [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2016, **55**: 5003–5007.
- [20] Pei J J, Gai X, Yang J, et al. Producing Air-stable Monolayers of Phosphorene and Their Defect Engineering [J]. *Nature Communications*, 2015, **7**: 10450.

(下转第 21 页)

构可知, 冷量传递到冷台中心的时间要远远大于传递到冷台周围的时间。因此, 该方案的结构使得冷台面的温度均匀性更差, 导致芯片热应力增大。实际仿真结果也与理论相吻合。

3 总结

本文根据傅里叶定律对冷台结构进行优化, 将冷台零件的制冷面设计为球形。通过减小冷台制冷面到冷台上表面的路径差来提高冷台温度均匀性。经仿真对比, 分析了三种不同结构的 Invar 冷台方案对探测器芯片应力和变形的影响。结果表明, 该设计方法可以有效降低探测器芯片的热应力与热变形。

通常情况下, 降低芯片热应力均从材料热膨胀系数的匹配性上入手, 通过优化材料或者设计多层基板结构来达到这个目的。本文通过优化单一冷台结构也有效降低了芯片热应力, 且没有影响芯片的降温时间。该设计方法为以

后杜瓦冷头的设计提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] 陈星. 碲镉汞红外焦平面探测器可靠性相关技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [2] 吴永红, 武文. HgCdTe 焦平面探测器热应力有限元分析 [J]. *计算机辅助工程*, 2011, **20**(1): 113–118.
- [3] 胡晓宁, 张海燕, 李言谨, 等. 硅基 HgCdTe 面阵焦平面器件结构热应力分析 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(11): 1020–1022.
- [4] 任凯, 肖健, 袁夫通, 等. 不同装片工艺对硅片翘曲的影响 [J]. *电子与封装*, 2020, **20**(9): 1681–1070.
- [5] 陈国真, 吴静怡, 杨光, 等. 耦合传热下低温柱体温度均匀性的优化分析 [J]. *低温与超导*, 2018, **46**(8): 6–11.
- [21] Yang B C, Wan B S, Zhou Q H, et al. Te-doped Black Phosphorus Field-effect Transistors [J]. *Advanced Material*, 2016, **28**: 9408–9415.
- [22] Yang J, Pan Z, Qiu Y, et al. Free-standing Black Phosphorus Thin Films for Flexible Quasi-solid-state Micro-Supercapacitors with High Volumetric Power and Energy Density [J]. *ACS Applied & Materials Interfaces*, 2019, **11**: 5938–5946.
- [23] Kwak D H, Ramasamy P, Lee Y S, et al. High-performance Hybrid InP QDs/Black Phosphorus Photodetector [J]. *ACS Applied & Materials Interfaces*, 2019, **11**(32): 29041–29046.
- [24] Gabriel C. Constantinescu and Nicholas D. M. Hine. Multipurpose Black-Phosphorus/hBN Heterostructures [J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(4): 2586–2594.

(上接第 15 页)