

基于二维材料的光通信波段光电探测器

柯宇轩¹, 岑颖乾², 慕殿禹^{2*}, 张文静^{2**}, 张青^{1***}¹北京大学材料科学与工程学院, 北京 100871;²深圳大学微纳光电子学研究院二维材料光电科技国际合作实验室, 广东 深圳 518060

摘要 光电探测器是光通信、光学成像系统的核心组件。光通信波段纳米光电探测器是当前光电信息技术领域的重要研究对象。目前,基于镓砷和汞镉碲等传统化合物半导体材料的光通信波段光电探测器面临着制备流程复杂、成本高昂、工作温度低、集成困难等问题。新型二维材料具有独特的结构和光电性质,是制备下一代低功耗、小型化光电探测器的重要材料。主要概述了二维材料光电探测器在光通信波段的研究进展,包括二维材料的独特物理化学性质、光电探测器的基本工作原理和参数指标等,重点论述了基于二维材料及其异质结的光电探测器的研究进展,最后总结了该领域面临的挑战以及发展前景。

关键词 探测器; 二维材料; 光电探测器; 光通信波段; 异质结; 范德瓦耳斯

中图分类号 O472 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221133

1 引言

光电探测器是一种将光信号转化为电信号的传感器件^[1]。高性能光电探测器,尤其是红外光电探测器,在许多领域中有着重要的应用,如光通信、热成像、医疗、军事和环境监控等^[2-5]。根据探测波长进行分类,红外光电探测器可以分为近红外(0.76~3.00 μm)光电探测器和中红外(3.00~30.00 μm)光电探测器等^[6]。光通信波段属于近红外波段的范围,因此本文主要讨论近红外光电探测器。目前,传统的商业化红外光电探测器主要是基于镓砷(InGaAs)和汞镉碲(HgCdTe)等材料^[6-7]。然而,基于II-VI/III-V族化合物半导体材料的传统红外光电探测器如InGaAs和HgCdTe光电探测器面临一些问题^[8],难以满足日益增长的商业需求。首先,制备流程比较复杂且昂贵;其次,要求低温的工作环境来减小暗电流,因此需要额外的冷却设备,从而造成了设备部署的困难和成本的增加;最后一点,由于与硅基底的晶格失配,InGaAs和HgCdTe很难与互补型金属-氧化物-半导体晶体管集成^[6,9-11]。因此,用于制备低廉、高性能光电探测器的新材料成为了迫切的需求。

自2004年起,以石墨烯^[12]为代表的二维材料由于其新颖的结构和物理化学性质而获得了广泛关注和研究,为新一代高性能电子逻辑器件、光电器件和柔性器件领域注入了新的活力,并出现诸多变革性原理与技术^[13-14]。二维层状材料由原子层通过弱的层间范德瓦

耳斯力组成,其中原子层是由强的面内原子间共价键构成的。二维材料具有高的表比面积、原子级别的平整度、高的载流子迁移率、强的物质-光相互作用、强的机械韧性和强的栅极控制性等优点,且无表面悬挂键,可应用在可穿戴、便携式高性能电子和光电器件上^[2,10,15]。根据禁带宽度的大小,二维材料呈现为绝缘体、半导体、金属性和超导性等,其吸收光谱范围包括紫外到太赫兹波段。由于二维层状材料强的面外量子限域效应和层间耦合效应,它们具有受层数调控的光学和电学性质^[16-17]。在通常情况下,二维层状材料具有受层数调控的带隙,从而其光谱响应范围受层数的调控^[16-17]。此外,也可以通过电场调控和化学掺杂等手段来调控二维层状材料的带隙,进而调节吸收光谱范围^[13,18-19]。无带隙石墨烯呈现半金属态^[20]且具有极高的载流子迁移率^[21],可应用在宽光谱响应的高频光电器件上,响应光谱范围包括可见、红外甚至太赫兹波段^[2,22-23]。但原子级别薄的厚度导致了弱的光吸收和低的光电探测灵敏度^[2,23]。此外,带隙的缺乏导致了短的光生载流子寿命,从而抑制了光电流的产生,并引起高的暗电流^[22,24-25]。这些弱点限制了石墨烯在光电子学领域中的进一步应用。

除了石墨烯外,还有过渡金属硫族化合物(TMDs)、黑磷(BP)和六方氮化硼(h-BN)等常用的二维层状材料。BP具有0.3~2.0 eV的带隙,其光谱响应范围包括了光通信波段,可作为光通信波段光电探测器理想的吸光材料,然而对于实际应用来说,其

收稿日期: 2022-08-11; 修回日期: 2022-09-12; 录用日期: 2022-10-05; 网络首发日期: 2022-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(52072006, 51991340, 51991344)、北京市杰出青年基金(JQ21004)

通信作者: *qidianyuqi@sina.com; **wjzhang@szu.edu.cn; ***Q_zhang@pku.edu.cn

材料的稳定性问题亟须解决。研究发现,碲烯^[26]、二维拓扑绝缘体(Bi_2Se_3)^[27]和贵金属硫族化合物(PdSe_2 、 PtSe_2 、 PtTe_2)等^[7,28-30]是一类具有红外至可见波段合适带隙的稳定性层状半导体材料,是光通信波段光电探测器的理想材料。 h-BN 是一种具有 6 eV 带隙^[31]的绝缘体材料,可作为介电层、封装层等材料^[32-33]。

此外,二维材料无晶格匹配限制,可组装多样化的范德瓦耳斯异质结,具有许多原先单一材料不具备的新颖物理特性^[34-37],可实现原子规模的器件集成和多功能化器件应用。异质结具有原子级突变的界面,形成的 II 型层间带隙可延长光电探测的截止波长,进而实现宽光谱响应的光电探测器应用。这些优点有效弥补了当前光电探测器的缺陷,为下一代新型高性能光

电器件的发展提供了一种策略。

本文首先介绍了二维材料的基本性质,其次阐述了光电探测器的基本工作原理和性能指标,然后论述了由二维材料及其异质结构建的光电探测器在光通信波段的研究进展,最后总结了二维材料在光通信波段光电探测器件领域的应用前景和未来挑战。

2 二维材料的基本性质

二维材料是指某一个维度尺寸是原子级厚度而另外两个维度尺寸远大于这个维度的一类材料。随着 2004 年单层石墨烯的成功剥离^[12],许多二维材料被相继发现,包括 TMDs 和 BN 等。大部分的二维材料都表现出了独特的物理性质,而我们主要介绍其光电特性(图 1)。

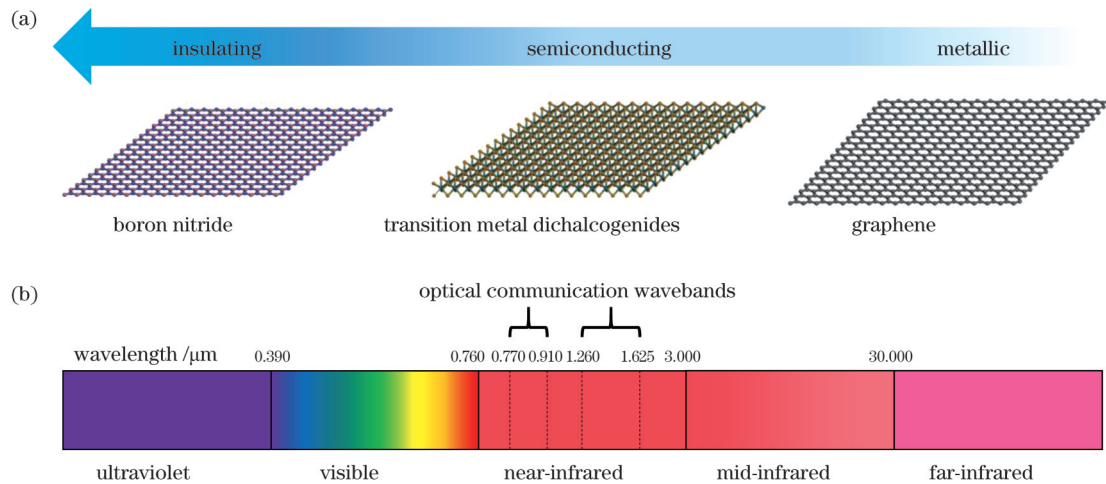


图 1 覆盖宽光谱的二维材料。(a)氮化硼、过渡金属硫族化合物和石墨烯的结构和带隙示意图;(b)紫外到远红外光谱范围,其中光通信波段属于近红外范围内

Fig. 1 Two-dimensional materials covering broad spectrum. (a) Schematics of structure and bandgap of boron nitride, transition metal dichalcogenides and graphene; (b) spectrum range from ultraviolet to far-infrared where optical communication waveband is in near-infrared range

2.1 单元素二维材料

石墨烯和BP是两种典型的单元素二维材料。石墨烯是碳原子以共价键的形式在平面内无限键合成的蜂窝状单一原子层晶体,具有原子级别的平整度,在光电器件设计方面具有以下优点:1)载流子迁移率为 $10^5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,可用于制备高频晶体管^[2,22-23];2)电子带隙为零,呈现半金属态,利用掺杂、应力调控等技术,可使其具有宽光谱(从紫外到太赫兹)探测能力^[13,18-19];3)良好的光学透明性,可用在导电玻璃上等。因此,石墨烯在光电子领域具有重要的应用前景^[38]。

BP具有受层数调控的直接带隙。带隙随着层数的减小而增大,电子带隙调控范围达0.3~2.0 eV,因此其光谱吸收范围从可见光到中红外^[39-41]。因此,BP可作为光通信波段光电探测器的吸光材料。

2.2 双元素二维材料

TMDs作为一类典型的双元素二维层状材料,其种类超过了40多种。化学通式为 MX_2 ,其中M为过渡金属原子,通常有钼、钨、铂等;X为硫族元素,通常有硫、硒、碲等。大部分TMDs具有随层数减小而增大的间接带隙^[42]。此外,TMDs的带隙可以通过电场、应力和化学掺杂等手段来调节,能实现从半导体态到半金属态的转变,从而实现对光灵敏度和截止波长的调节。目前研究最多的TMDs(如 MoS_2 、 WS_2 、 MoSe_2 、 MoTe_2 等)的禁带宽度为1.0~2.0 eV,多被用在可见、近红外光电探测器上^[15,34-35]。近期发现的 PtSe_2 、 PtS_2 、 PtSe_2 、 PtTe_2 等双元素二维材料的禁带宽度为0~2 eV,且具有随层数减小而增强的可调特性。此外,其迁移率为 $10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,可作为光通信波段光电探测器的吸光材料^[7,43-45]。

h-BN 是另一种重要的双元素二维绝缘体材料,其

禁带宽度约为 $6\text{ eV}^{[31]}$, 具有类似于石墨烯蜂巢的晶格结构。它的吸收光谱对应中紫外区域, 被应用在高性能深紫外光电探测器上^[46-48]。被剥离至单层或少层的氮化硼可被广泛应用到隧穿势垒层、超平绝缘衬底、介电层和封装材料等^[32-33, 49]。

3 光电探测器的工作原理和主要性能参数

3.1 光电探测器的工作原理

根据光信号-电信号转换的工作原理, 光电探测器可分光电导效应(PCE)、光伏效应(PVE)、光栅控效应(PGE)、光热效应(PTE)等四种类型。

3.1.1 光电导效应

无光照时, 在外加偏压下, 光电探测器件内部有电流通过。在光照下, 光敏材料吸收光子产生电子-空穴对, 并被施加偏压分离而参与导电。光生载流子浓度(Δn)导致电导增加, 表述为 $\Delta\sigma = \Delta ne\mu$, 其中 $\Delta\sigma$ 为电导变化量, μ 为沟道材料的迁移率, e 为电子电荷量。光电导增益和弛豫与光生载流子的产生和消失有内在联系, 反映了器件的光电导大小和响应速度。一般来说, 光电导增益(G)为光生载流子寿命($\tau_{\text{Photocarriers}}$)与渡越时间(τ_{transit})的比值:

$$G = \frac{\tau_{\text{Photocarriers}}}{\tau_{\text{transit}}} = \frac{\tau_{\text{Photocarriers}} \cdot \mu \cdot V_{\text{DS}}}{L^2}, \quad (1)$$

式中: L 为源极和漏极的距离; V_{DS} 为漏源电压。因此, 光电探测器的光电导增益与载流子寿命和迁移率成正比。然而, 较长的载流子寿命将导致较长的弛豫时间, 从而降低响应速度。

3.1.2 光伏效应

对于 p-n 或肖特基结, 当入射光子能量高于结区势垒时, 内建电场引起电子-空穴对的快速分离和输运, 使其积聚在结边缘, 进而形成一个与内电场方向相反的外路电压(开路电压, V_{oc})。当 p-n 结两端短路时, 光生载流子在光生电场下定向漂移, 从而产生光电流(短路电流, I_{sc})。基于光伏原理的光电探测器具有“自驱动”的特点, 不需要外加电压也可以工作。不过为了降低暗电流, 该类光电探测器通常在反向偏压下工作(详见下文)。

3.1.3 光栅控效应

PGE 通常发生在有缺陷或杂质的光敏材料中。根据光吸收的位置分为两种情况: 1) 在沟道中的光生电子(空穴)被缺陷(或表面吸附物)捕获。以 n 型半导体为例, 在光照时, 光生载流子分离, 光生电子参与电荷传输, 光生空穴会被缺陷捕获, 从而无法参与电荷传输。2) 光生电子-空穴对在表面吸附物中产生, 电子或空穴迁移到沟道中参与导电, 另一种载流子(空穴或电子)则被留在吸附物上, 不参与电荷传输。在上述情况下, 被捕获的电荷虽然不直接参与导电, 但会在沟道上产生静电场吸附, 相当于对沟道外加了

一个栅电压, 因此这种特殊的光探测机制被称为光栅控效应。

3.1.4 光热效应

当入射光斑面积比器件通道的尺寸小时, 局部光照射使半导体材料产生了温度梯度, 从而在不同的区域产生温差 ΔT , 由于塞贝克效应, 出现光-热电压差。塞贝克效应引起的光电压为

$$V_{\text{PTE}} = (S_1 - S_2)\Delta T, \quad (2)$$

式中: S_1 和 S_2 是具有不同热伏响应(例如不同掺杂水平)的不同区域的塞贝克系数。因此, 基于光热效应的光电探测器可以在没有施加偏压的情况下运行。这类光探测器件较少, 并不在本文的讨论中。

3.2 光电探测器的性能参数

3.2.1 暗电流和光电流

暗电流(I_{dark})是指在无光照的环境下, 半导体内本征载流子在外加电场的驱动下所形成的电流。

光电流(I_{ph})是指探测器光照下的电流($I_{\text{illumination}}$)与暗电流之差, 定义为

$$I_{\text{ph}} = I_{\text{illumination}} - I_{\text{dark}}. \quad (3)$$

对于没有缺陷态的光电探测器, 在达到饱和吸收之前, 光电流与入射光功率(P_{in})呈线性关系: $I_{\text{ph}} \propto P_{\text{in}}^\alpha$, 其中 α 等于 1 或者非常接近 1。此外, 利用非线性光响应($0 < \alpha < 1$)可以证明半导体中出现了载流子的产生、捕获和重组。由于外加偏压会显著影响光电流, 在对比器件性能时, 需要标注测试的外加电压。

3.2.2 开关比

在光电探测器中, 开关比($R_{\text{on/off}}$)是指光电流与暗电流之比, 定义为

$$R_{\text{on/off}} = \frac{I_{\text{ph}}}{I_{\text{dark}}}. \quad (4)$$

3.2.3 光灵敏度

光灵敏度(R)是指光照条件下器件的光电流(或光电压)与入射光功率之比, 定义为

$$R = \frac{I_{\text{ph}}}{P_{\text{in}}}, \quad (5)$$

或

$$R = \frac{V_{\text{ph}}}{P_{\text{in}}}, \quad (6)$$

式中: V_{ph} 为器件的光电压。该指标反映了光电探测器的光电转换能力。光灵敏度受人射光波长、功率、量子效率和器件材料等诸多因素的影响。

3.2.4 量子效率

量子效率(QE)有外量子效率和内量子效率之分。外量子效率(EQE)为光电流对应的电子-空穴对数目与入射光子数目之比:

$$E_{\text{Q}} = \frac{I_{\text{ph}}/q}{P_{\text{in}}/(h\nu)}, \quad (7)$$

式中: h 是普朗克常数; ν 是入射光频率; q 是电子电荷量。在许多情况下, 计算出的 EQE 大于 1。由于光生

载流子寿命比渡越时间长,因此电子和空穴之间的电荷捕获和/或迁移率差异造成了这种现象。

内量子效率(IQE)为单位时间内光电流对应的电子数目与吸收的光子数目的比值:

$$I_Q = \frac{I_{ph}/q}{P_A/(h\nu)}, \quad (8)$$

式中: P_A 为探测器吸收的光功率。在通常情况下,测量入射光的功率比较容易,而光探测器具体吸收了多少光则较难测量,因此大都用外量子效率而不用内量子效率来表征光电探测器的性能。

3.2.5 等效噪声功率

等效噪声功率(NEP)是光电探测器可以检测到的最小光信号功率,定义为

$$N_E = \frac{\sqrt{i_n^2}}{R}, \quad (9)$$

或

$$N_E = \frac{\sqrt{v_n^2}}{R}, \quad (10)$$

式中: $\sqrt{i_n^2}$ 和 $\sqrt{v_n^2}$ 分别为在黑暗中以1 Hz带宽测量的均方噪声电流和均方噪声电压,单位分别为 $A \cdot Hz^{-1/2}$ 和 $V \cdot Hz^{-1/2}$ 。因此,NEP的单位为 $W \cdot Hz^{-1/2}$ 。从式(9)中可以看到,较小的NEP意味着低噪声信号和大响应度。

3.2.6 比探测率

比探测率(D^*)是评价光电器件探测能力的参数,单位为 $cm \cdot Hz^{1/2} \cdot W^{-1}$,表达式为

$$D^* = \frac{\sqrt{AB}}{N_E}, \quad (11)$$

式中: A 和 B 分别为光电探测器的面积和带宽。假设总噪声都来自暗电流的散粒噪声,则 D^* 可表示为

$$D^* = \frac{R \cdot A^{1/2}}{(2q \cdot I_{dark})^{1/2}}. \quad (12)$$

由式(12)可知,具有低暗电流的光敏材料有利于在光电探测器中实现大的 D^* 。

3.2.7 响应速率

响应速率由上升时间(rise time)和下降时间(fall time)表征,是反映光电流信号响应快慢的参数。上升时间定义为光电流从稳定值的10%升至稳定值的90%所需的时间,而下降时间定义为光电流从稳定值的90%降至稳定值的10%所需的时间。到目前为止,基于二维材料及其异质结的光电探测器的响应时间普遍在微秒到毫秒级,也有少数达到皮秒级^[50]。

4 基于单元素二维材料的光通信波段光电探测器

二维材料具有大的比表面积、原子级别薄的厚度和适当的带隙,故在电子和光电子器件中具有极大的应用潜力^[51-52]。近些年来,很多二维材料光电探测器展现了高灵敏度和宽光谱探测范围等优异的探测性能。此外,不同的结构设计和制备方法可能会导致探测器的光电性能差异较大。接下来主要论述基于二维材料的光电探测器在光通信波段的应用状况,如表1所示。

表1 基于二维材料的光通信波段光电探测器小结

Table 1 Summary of 2D materials photodetectors for optical communications

| Category | Material | Detecting wave-length /nm | $R / (mA/W)$ | $D^* / (cm \cdot Hz^{1/2} \cdot W^{-1})$ | EQE / % | Bandwidth / Hz | Response time | Ref. | |
|----------------|------------|---------------------------|--------------|--|---------|---|---|------|------|
| Single-element | Graphene | 1550 | 6.1 | - | - | 1.6×10^{10} | - | [53] | |
| | | 1550 | - | - | - | 2.62×10^{11} | 2.1×10^{-12} s | [54] | |
| | | 1550 | 16 | - | - | 4.1×10^{10} | - | [55] | |
| | | 1550 | 230 | - | - | - | 3×10^{-6} s | [56] | |
| | | 1470 | 1500 | - | - | - | - | [57] | |
| | Phosphorus | 1550 | 657 | - | - | - | - | [40] | |
| | | 1550 | 5 | - | - | - | - | [41] | |
| | | 1550 | 230 | - | - | - | $4.8 \times 10^{-3} - 6.8 \times 10^{-3}$ s | [58] | |
| | Tellurium | 750-4000 | 0-13000 | 2×10^9 | - | - | - | - | [59] |
| | | 1550 | 19.2 | - | - | 3.7×10^7 | - | [60] | |
| | | 1550 | 9380 | - | - | - | 7×10^{-5} s | [61] | |
| | | Germanium | 1530-1565 | 620 | - | 50 | 3.3×10^{10} | - | [62] |
| Bismuth | 370-1550 | 250 | - | - | - | 0.9 s (rise time) and 1.9 s (fall time) | [63] | | |
| Arsenic | 405-4000 | 10000 | - | 10 | - | - | [64] | | |

续表

| Category | Material | Detecting wave-length / nm | $R /$ (mA/W) | $D^+ /$ (cm \cdot Hz $^{1/2}\cdot$ W $^{-1}$) | EQE / % | Bandwidth / Hz | Response time | Ref. |
|-------------------|--|----------------------------|-------------------|--|---------|-------------------|------------------------|------|
| Double-element | MoS ₂ | 500–1550 | – | – | – | – | – | [65] |
| | 2H-MoTe ₂ | 1260–1360 | 400 | – | – | 5×10^8 | – | [66] |
| | | 1550 | 500 | – | – | 3.5×10^7 | – | [67] |
| | T _d -MoTe ₂ | 1260–1625 | – | – | – | – | – | [68] |
| | PdSe ₂ | 1460–1625 | 20 | – | – | 4×10^{10} | – | [69] |
| | | 1550 | 1.76 | – | 95 | 1.5×10^9 | – | [70] |
| | PtSe ₂ | 1550 | 1.1 | – | – | – | – | [11] |
| | PtTe ₂ | 1260–1625 | 5 | – | – | – | – | [71] |
| | Bi ₂ Se ₃ | 1456 | 2700 | 3.3×10^{10} | – | – | 0.5 s | [27] |
| | Bi ₂ Te ₃ | 1550 | 778000 | 1.4×10^{10} | – | – | – | [72] |
| Mo ₂ C | 405–1310 | 10^6 | – | – | – | – | [73] | |
| Heterostructure | Mo ₂ S/BP | 1550 | 153.4 | 2.13×10^9 | – | – | 1.5×10^{-5} s | [74] |
| | WSe ₂ /BP | 1550 | 500 | – | – | – | – | [75] |
| | MoTe ₂ /MoS ₂ | 1550 | 4×10^{-5} | – | – | – | – | [76] |
| | GaTe/InSe | 400–1600 | 2000 | – | – | – | – | [77] |
| | MoSe ₂ /WSe ₂ | 1550 | 127 | – | – | – | – | [78] |
| | ReS ₂ /ReSe ₂ | 1310 | 1.58×10^8 | – | – | – | – | [79] |
| | MoS ₂ /graphene/WSe ₂ | 400–2400 | 300 | 4×10^9 | – | – | 3.03×10^{-5} s | [80] |
| | MoTe ₂ /graphene/SnS ₂ | 405–1550 | 11700 | 1.06×10^9 | – | – | – | [81] |

4.1 基于石墨烯的光通信波段光电探测器

由于石墨烯具有零带隙和超高的迁移率,因此通常被应用在高频、宽光谱的光电探测器中。

如图 2(a)所示,2010年,Mueller等^[53]采用了交叉排列的金属/石墨烯/金属器件结构,该结构分别以钛(Ti)和钯(Pd)作为电极金属,不同金属功函数的差异性导致能带弯曲和沟道不对称电场,进而在光通信C带1550 nm处获得了 $6.1\text{ mA}\cdot\text{W}^{-1}$ 的灵敏度和 $10\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数据传输速率,可应用于高速光电探测。紧接着,Alexander等^[54]指出,基于金属/石墨烯/金属结构的光电探测器具有 2.1 ps 超短的本征响应时间(对应262 GHz的带宽),从而解释了器件的超高响应速度是由于超短寿命的光生载流子。这充分表明了高频石墨烯光电探测器在光通信波段具有巨大的潜力。如图 2(b)所示,2014年,Schall等^[55]通过化学气相沉积(CVD)方法与波导(硅)集成了石墨烯基光电探测器,该探测器具有 $50\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光学数据传输速率。

基于石墨烯的光通信波段探测器虽具有超快响应速度,但存在光灵敏度低的问题。为了解决这个问题,如图 2(c)所示,Chen等^[56]基于硅衬底制备了石墨烯基光电探测器,其中石墨烯作为光吸收和电荷传输层,该探测器在1550 nm波长处具有 $0.23\text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$ 的灵敏度[图 2(d)]和 $3\text{ }\mu\text{s}$ 的响应时间[图 2(e)],这是由于石墨

烯和硅形成的内建电场有效地延长了光生载流子的寿命。Yu等^[57]在石墨烯上沉积了高质量的HfO₂并将其作为封装层,该光电探测器在1470 nm处的光灵敏度提高了8倍,这是由于介电屏蔽减弱了石墨烯的载流子散射,进而载流子迁移率得到提高。

4.2 基于黑磷的光通信波段光电探测器

BP也是一种单元素二维层状半导体材料,具有 $0.3\sim 2.0\text{ eV}$ 的直接带隙和较高的迁移率,常被应用在新颖光通信波段光电探测器中。

如图 3(a)所示,2014年Engel等^[41]制备的BP光电探测器在1550 nm波长处可实现 $5\text{ mA}\cdot\text{W}^{-1}$ 的灵敏度。紧接着Youngblood等^[40]制备了与硅光学波导集成的BP光电探测器,器件的结构示意图如图 3(b)所示。少层BP作为光吸收层,少层石墨烯作为顶栅,在光通信波长1550 nm处实现了 $3\text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数据传输速率。厚度为11.5 nm的器件在1550 nm处的本征灵敏度和内量子效率分别为 $135\text{ mA}\cdot\text{W}^{-1}$ 和11%,而厚度为100 nm的器件的本征灵敏度和内量子效率为 $657\text{ mA}\cdot\text{W}^{-1}$ 和52%^[40]。2018年Liu等^[58]制备了基于BP/Au肖特基的光电探测器,在C带1550 nm处实现了 $230\text{ mA}\cdot\text{W}^{-1}$ 高的灵敏度和 $4.8\sim 6.8\text{ ms}$ 的响应时间。这表明BP在光通信领域具有重要的应用潜力。

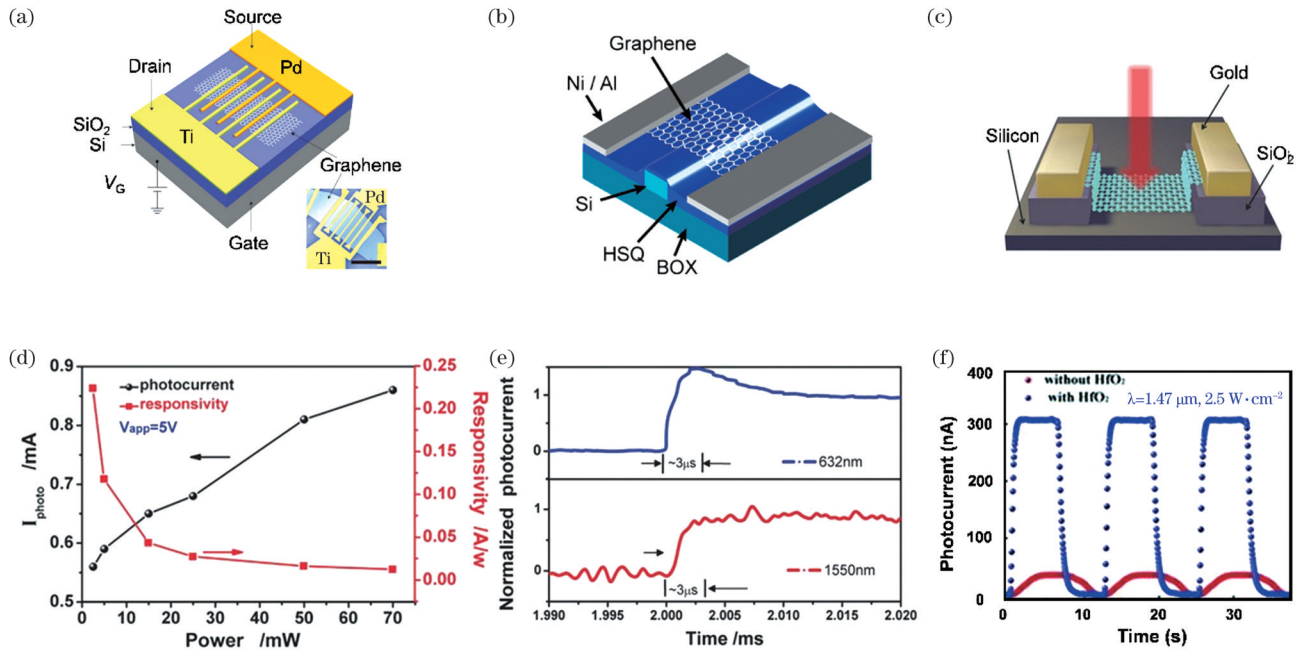


图 2 用于光通信的石墨烯基光电探测器。(a)基于金属/石墨烯/金属结构的非对称金属接触的光电探测器示意图和扫描电子显微镜图片(插图)^[53]; (b)集成在硅光波导上具有非对称接触的石墨烯基光电探测器示意图^[55]; (c)位于硅衬底的石墨烯基光电探测器的结构示意图,电极与衬底之间的二氧化硅确保电极收集的载流子只来源于石墨烯^[56]; (d)在 1550 nm 光照下,光电流和灵敏度与功率的依赖情况^[56]; (e)在 632 nm 和 1550 nm 光照下上升沿的时间光电流响应^[56]; (f)有氧化铪和无氧化铪覆盖的石墨烯纳米带器件在 1470 nm 光照下的时间依赖的光电流测试^[57]

Fig. 2 Graphene-based photodetectors for optical communications. (a) Schematic and scanning electron image (inset) of metal/graphene/metal (MGM) photodetectors with asymmetry metal contacts^[53]; (b) schematic of graphene-based photodetector integrated on silicon optical waveguide with asymmetry contact^[55]; (c) structural diagram of graphene-based photodetector on silicon substrate where silica between electrodes and substrate ensures collected carriers originating only from graphene^[56]; (d) photocurrent and responsivity as functions of power under 1550 nm illumination^[56]; (e) rising-edge photocurrent response as a function of time under 632 nm and 1550 nm illuminations, respectively^[56]; (f) photocurrent as a function of time on graphene nanoribbon-based devices covered with and without hafnium oxide under 1470 nm illumination^[57]

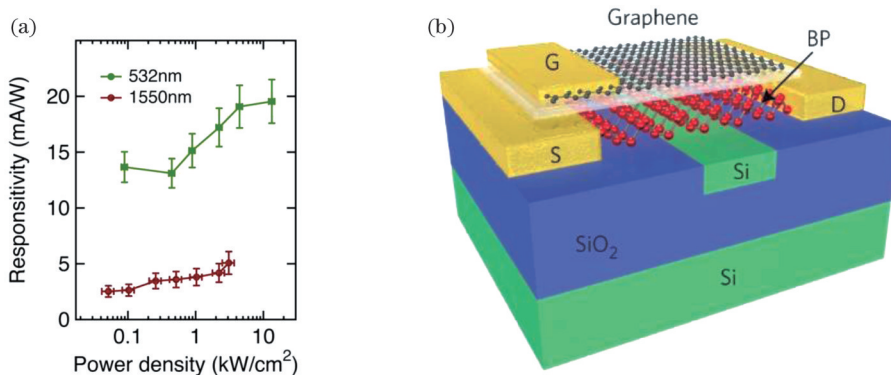


图 3 用于光通信的 BP 光电探测器。(a)在 532 nm 和 1550 nm 光照下的功率密度依赖的灵敏度^[41]; (b)集成在硅光波导上的 BP 光电探测器,其中少层石墨烯作为顶栅^[40]

Fig. 3 BP-based photodetectors for optical communications. (a) Responsivity as a function of power density under 532 nm and 1550 nm illumination, respectively^[41]; (b) BP photodetectors integrated on silicon optical waveguide where few-layer graphene is as top gate^[40]

4.3 基于碲的光通信波段光电探测器

最近,碲烯作为一种新型单元素二维材料,由于具有高迁移率和强稳定性等,从而获得了广泛的研究和关注。碲是一种稳定的窄带隙半导体材料,可应用于可见、红外、太赫兹和微波波段探测。下面简要论述碲

在光通信波段上的应用。

如图 4(a)所示,Amani 等^[59]在 Au 和氧化铝上制备了碲光电探测器,其中 Au 薄膜既作为底栅也作为光学腔底部的反射面,而氧化铝既作为器件的介电层也作为光学腔的隔离层,可实现短波红外探测。Au/氧化

铝构成的光学腔可以增强碲的光吸收,从而增强探测器的灵敏度。通过调节氧化铝的厚度便可调节光电探测器在不同探测波长处的灵敏度,如当氧化铝的厚度为 150 nm,在光通信波长 1550 nm 处实现了 $7 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 高的灵敏度[图 4(b)]。优化后的光电器件在 1700 nm 探测波长处的探测率为 $2 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。Shen 等^[60]制备的碲光电探测器在光通信波长 1550 nm 处具

有 $19.2 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 的灵敏度[图 4(c)]和 37 MHz 的带宽。2022 年 Ma 等^[61]通过物理气相沉积生长了碲纳米片并制备成光电探测器[图 4(d)],可实现从可见到厘米波段的探测。如图 4(e)、(f)所示,在光通信波长 1550 nm 光照下,会产生明显的光电导效应,其灵敏度为 $9.38 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,上升沿和下降沿的响应时间分别为 $70 \mu\text{s}$ 和 $72 \mu\text{s}$ 。

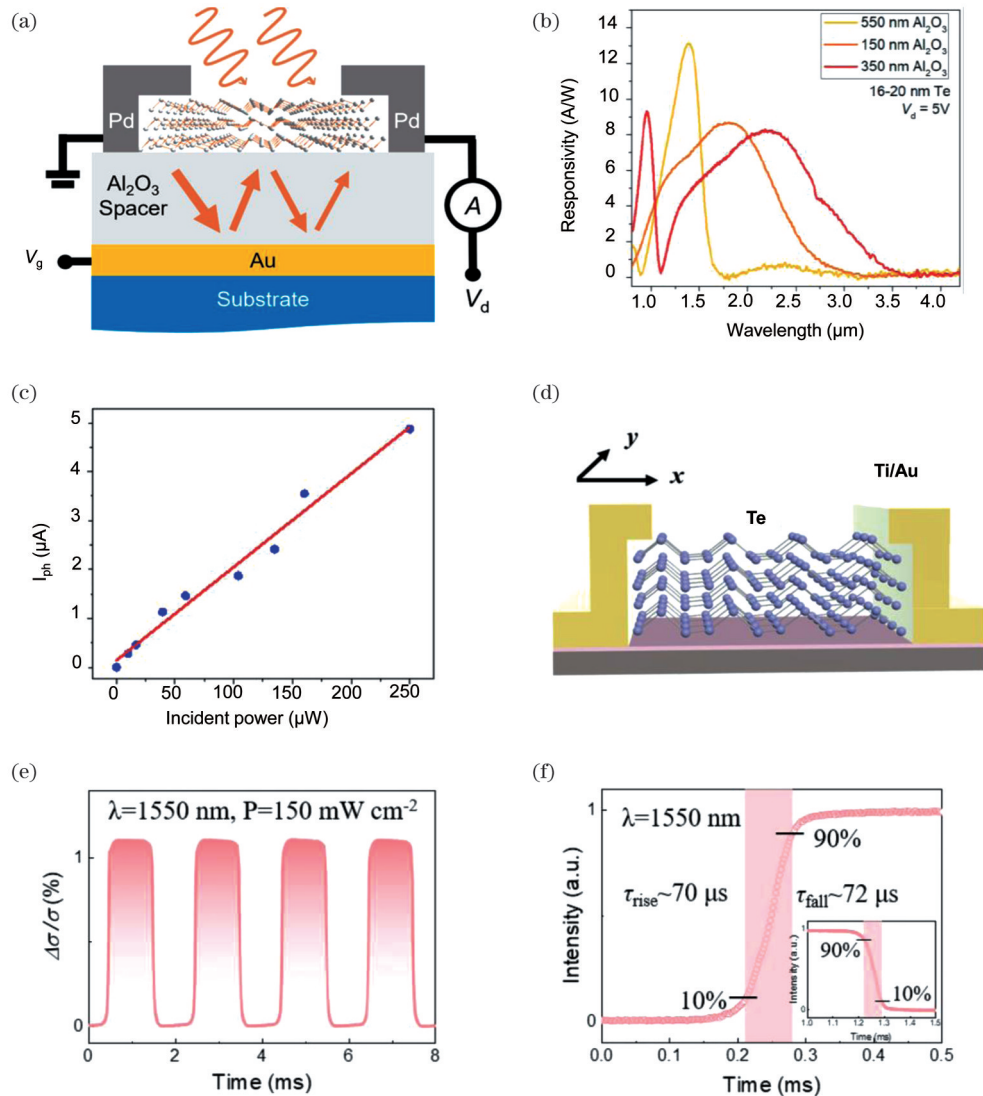


图 4 用于光通信的碲光电探测器。(a)基于光学腔的用于短波红外探测的碲光电探测器结构示意图^[59]; (b)在不同厚度的氧化铝下,波长依赖的灵敏度^[59]; (c)在 1550 nm 光照下功率依赖的光电流,拟合斜率为 $19.2 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ ^[60]; (d)基于碲的光电探测器结构示意图^[61]; (e)在波长为 1550 nm、功率密度为 $150 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 光照下,时间依赖的光电导变化率^[61]; (f)在 1550 nm 光照下上升沿的时间光电导响应,插图为下降沿的时间光电导响应^[61]

Fig. 4 Tellurium-based photodetectors for optical communications. (a) Structural diagram of tellurium photodetector based on optical cavity for short-wave infrared detection^[59]; (b) responsivity as a function of wavelength under Al_2O_3 with different thicknesses^[59]; (c) photocurrent as a function of power under 1550 nm illumination where fitting slope is $19.2 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ ^[60]; (d) structural diagram of photodetector based on tellurium^[61]; (e) change rate of photoconductance as a function of time under 1550 nm illumination with power density of $150 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ^[61]; (f) rising-edge photoconductance response as a function of time under 1550 nm illumination with falling-edge photoconductance response as a function of time shown in inset^[61]

4.4 基于其他单元素二维材料的光通信波段光电探测器

除了石墨烯、BP 和 Te 之外,还有其他的单元素二

维材料,比如锗(Ge)、铋(Bi)和砷(As)等。这些材料具有高迁移率、窄带隙等特点,可被应用在光通信波段光电探测器上^[82-84]。这里我们将介绍下 Ge、Bi 和 As 在

光通信波段光电探测器上的应用。

如图 5(a) 所示, Song 等^[62]报道了一种光子晶体共振结构的 Ge 光电探测器, 在通信波长 1550 nm 处实现了 $0.62 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 高的灵敏度, 在整个 C 带实现了 50% 的外量子效率。此外, 该器件实现了 33 GHz 的带宽和 $56 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据传输速率。Yao 等^[63]首次报道了一种稳定的宽光谱 (370~1550 nm) 探测的 Bi 光电探测器 [图 5(c)、(d)], 实现了 $0.25 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 高的

灵敏度、0.9 s 的上升时间和 1.9 s 的衰减时间, 进而实现了 O、E、S 和 C 波段探测。而 Nidhi 等^[64]构建了基于黑硅/硅混合结构的光电探测器 [图 5(e)], 实现了 405 nm~4 μm 的超宽范围的探测, 在整个光通信波段实现了 $>10 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 高的灵敏度和 $>10\%$ 的外量子效率 [图 5(f)]。这充分说明了 Ge、Bi 和 As 等单元素二维材料在光通信波段光电探测器中的应用潜力。

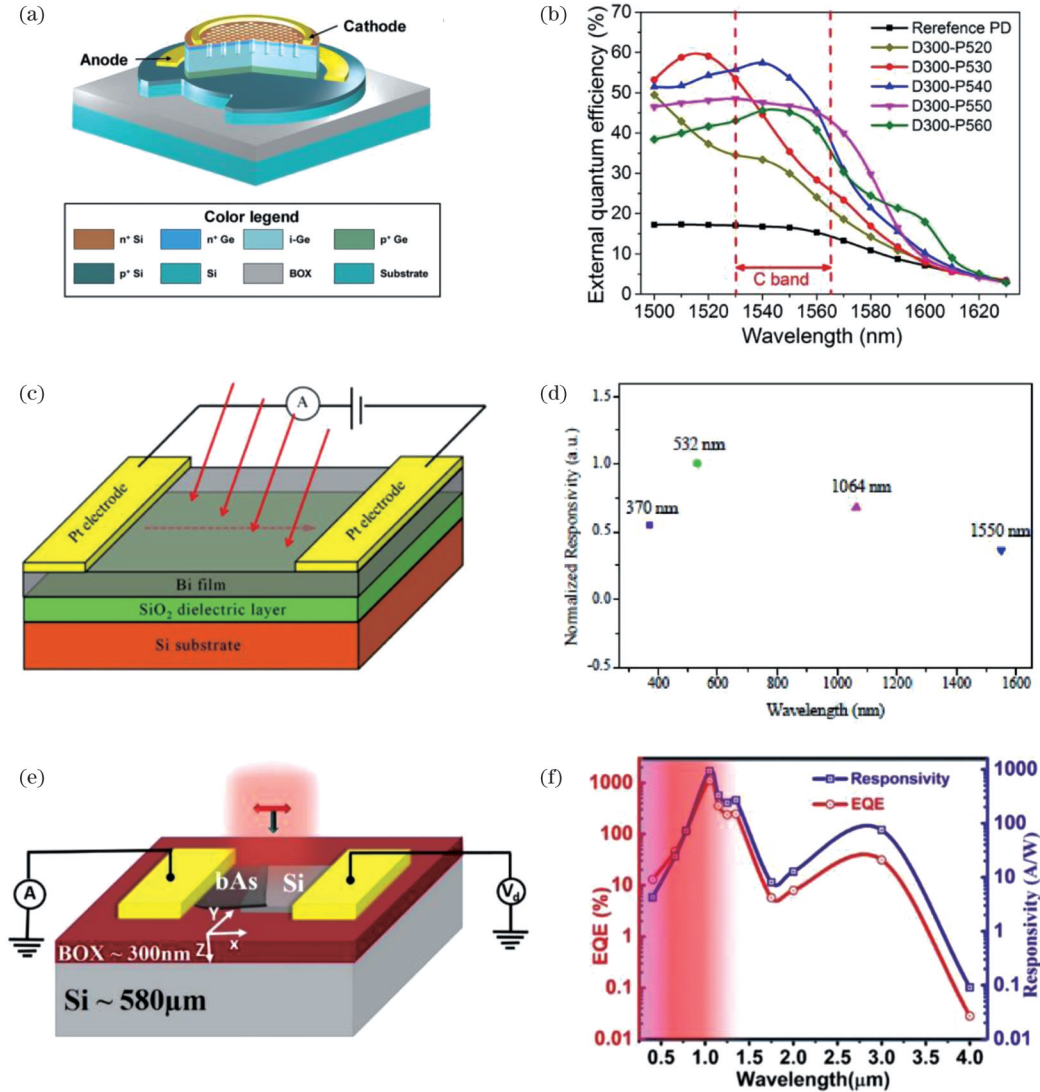


图 5 用于光通信的锗、铋和砷光电探测器。(a)与光子晶体共振的锗光电探测器的示意图^[62];(b)30 μm 直径图案光电探测器阵列的外量子效率光谱,其孔直径为 300 nm,周期为 520~560 nm^[62];(c)铋光电探测器的三维结构示意图^[63];(d)铋光电探测器的波长依赖的归一化灵敏度^[63];(e)砷-硅光电探测器的结构示意图^[64];(f)砷光电探测器的波长依赖的外量子效率和灵敏度^[64]

Fig. 5 Germanium-, bismuth-, and arsenium-based photodetectors for optical communications. (a) Schematic of resonant-photonic crystal germanium photodetector^[62]; (b) measured EQE as a function of wavelength for 30- μm -diameter patterned photodetectors with hole-array (hole diameter of 300 nm) period of 520–560 nm^[62]; (c) 3D schematic of Bi photodetector^[63]; (d) normalized responsivity for Bi photodetector as a function of wavelength^[63]; (e) schematic of As-Si photodetector^[64]; (f) EQE and responsivity for photodetector as functions of wavelength^[64]

5 基于双元素二维材料的光通信波段光电探测器

单元素二维材料虽然具有高迁移率、窄带隙等优

良特性,但它们的化学活性高,容易被空气中的氧气氧化^[85]。而双元素二维材料相对更加稳定,因此,我们在这里进一步综述最近双元素二维材料在光通信波段光电探测器领域中的应用进展。双元素二维材料种类繁

多,如 TMDs、拓扑绝缘体、过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物(MXenes)等,具有高迁移率和适当大小的带隙,因此被广泛应用于光通信波段光电探测。

5.1 基于过渡金属硫族化合物的光通信波段光电探测器

过渡金属硫族化合物是最近热门的二维材料,由于它们具有高迁移率、适当的带隙(0~2 eV)、强的光吸收和强稳定性等优良性能,因此被广泛应用在高性能

能宽谱探测的光电器件中^[29-30]。接下来将简述该类材料在光通信波段光电探测器中的应用。

MoS₂作为一种典型的 TMDs 材料,在单层具有 1.89 eV 的直接带隙,而在多层时具有 1.3 eV 的间接带隙,且其带隙随层厚的增加而减小^[16]。因此,MoS₂不适合应用在光通信波段光电探测器中,而 Wang 等^[65]利用偏氟乙烯三氟乙烯铁电聚合物膜作为介电层,制备了 MoS₂ 光电探测器[图 6(a)],从而实现了

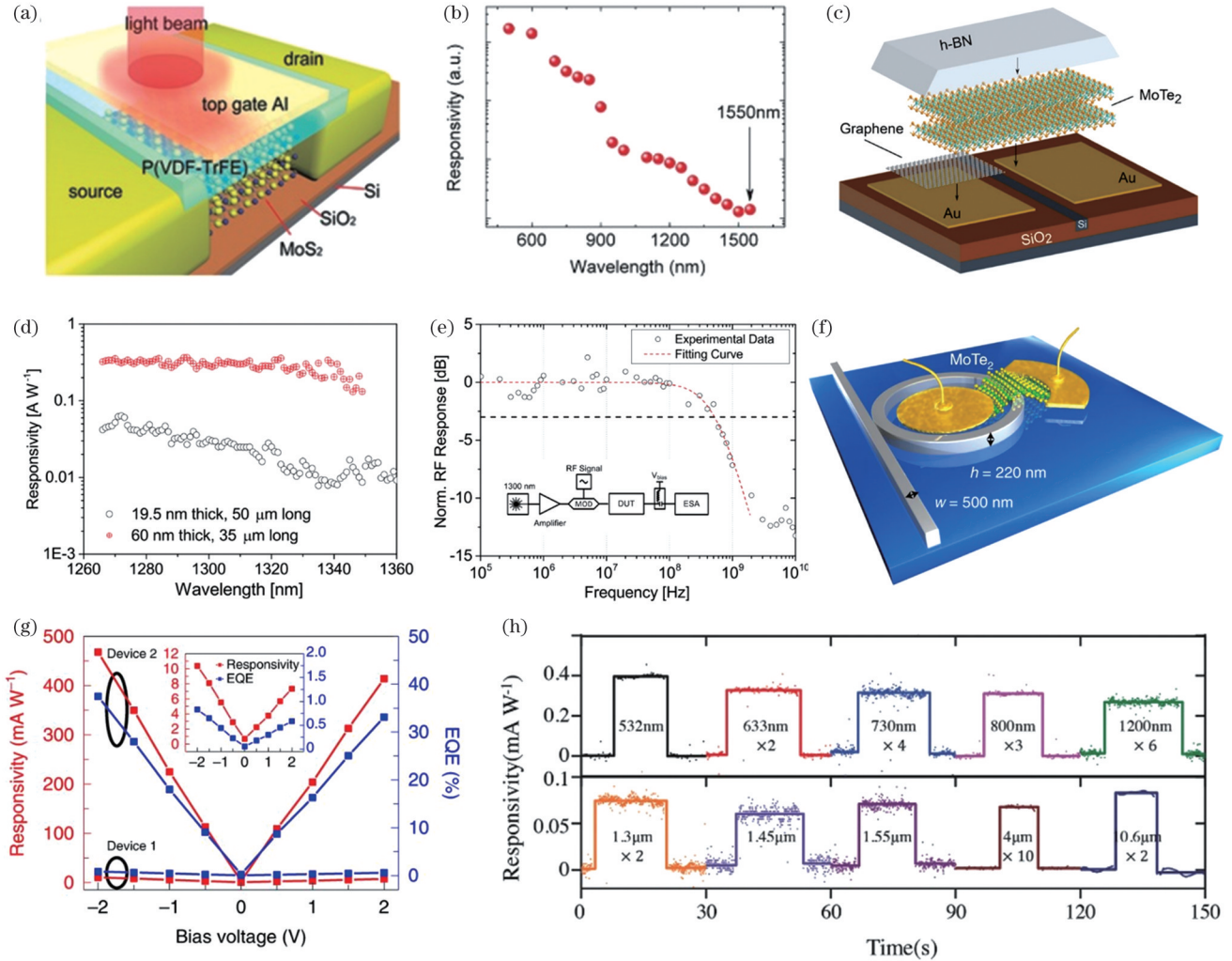


图 6 用于光通信的 MoS₂ 和 MoTe₂ 光电探测器。(a) 三层 MoS₂ 光电探测器的三维结构示意图^[65]；(b) 硫化钼光电探测器的波长依赖的灵敏度^[65]；(c) 堆叠在硅波导上的石墨烯/MoTe₂/金光电探测器的结构示意图,该器件用大的 h-BN 薄片封装^[66]；(d) 19.5 nm 和 50 nm 厚的光电探测器的波长依赖的灵敏度^[66]；(e) MoTe₂ 光电探测器的频率依赖的光响应,插图为实验设备示意图^[66]；(f) 与硅微环谐振器集成的 MoTe₂ 光电探测器(半径为 40 μm, 高度为 220 nm, 宽度为 500 nm)^[67]；(g) 两个器件(器件 1 的厚度为 40 nm, 覆盖长度为 15 μm, 器件 2 的厚度为 60 nm, 覆盖长度为 30.7 μm)的偏置电压依赖的灵敏度和外量子效率,插图为器件 1 的放大灵敏度和外量子效率图^[67]；(h) II 型外尔半金属 T_d-MoTe₂ 光电探测器在不同激发波长下的光响应^[68]

Fig. 6 MoS₂- and MoTe₂-based photodetectors for optical communications. (a) 3D schematic of triple-layer MoS₂ photodetector^[65]; (b) responsivity of MoS₂ photodetector as a function of excitation wavelength^[65]; (c) schematic of graphene/MoTe₂/Au photodetector stacked onto silicon waveguide, which is encapsulated by large h-BN flake^[66]; (d) wavelength dependence of responsivity for 19.5 nm thick and 50 nm thick photodetectors^[66]; (e) frequency dependence of responsivity for MoTe₂ photodetector with measurement setup shown in inset^[66]; (f) schematic of silicon microring resonator-integrated MoTe₂ photodetector (radius of 40 μm, height of 220 nm, width of 500 nm)^[67]; (g) responsivity and EQE as functions of bias voltage for two devices (device 1 with thickness of 40 nm and coverage length of 15 μm and device 2 with thickness of 60 nm and coverage length of 30.7 μm) with magnified responsivity and EQE curves for device 1 shown in inset^[67]; (h) photoresponse of type II Weyl semimetal MoTe₂ photodetector under different excitation wavelengths^[68]

500~1550 nm[图 6(b)]的探测范围(包含了 O、E、S 和 C 等光通信波段),进而大大拓宽了基于传统介电层材料(SiO_2 和 HfO_2 等)制备的 MoS_2 光电探测器的吸收光谱范围,这是由于强的垂直电场引起了带隙的减小。而多层 MoTe_2 是一种具有 0.9 eV 左右的间接带隙的半导体^[86],可被应用在光通信波段光电探测器中。如图 6(c)所示, Ma 等^[66]制备了 MoTe_2 波导光电探测器,在通信波段的整个 O 段实现了 $0.4 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 高的灵敏度[图 6(d)]、500 MHz 的带宽[图 6(e)]和 1 Gbit/s 的数据传输速率。2020 年, Maiti 等^[67]在硅微环谐振器上制备了 MoTe_2 光电探测器,如图 6(f)所示,其微环的半径、高度和宽度分别为 $40 \mu\text{m}$, 220 nm 和 500 nm 。该光电探测器在 C 段 1550 nm 处实现了 $0.5 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 的灵敏度[图 6(g)]和 35 MHz 的带宽,这是由于局部的应力引起了 MoTe_2 带隙的减小,从而实现了长波长

1550 nm 的探测。此外, MoTe_2 还存在另外一种 II 型外尔半金属态(T_d - MoTe_2),可以实现宽光谱探测范围。2018 年 Lai 等^[68]制备了基于 T_d - MoTe_2 的光电探测器,成功实现了超宽光谱探测范围,覆盖整个光通信波段范围[图 6(h)]。这充分表明了 MoTe_2 等 TMDs 材料在集成光子学和光通信光电探测器中的应用潜力。

贵金属硫族化合物作为一类特殊的 TMDs 材料,它们具有 $10^3 \text{ cm} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 高的迁移率、0~2 eV 的带隙和强稳定性等优良性能,可被应用在光通信波段光电探测器上,故引起了科学家们的广泛关注^[29,87]。

Wang 等^[69]在硅光学波导上集成了 PdSe_2 光电探测器,其结构示意图如图 7(a)所示。该器件在光通信波长 1550 nm 处的灵敏度达到 $20 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ [图 7(b)],带宽为 40 GHz。图 7(c)为探测波长依赖的光电流,其数值基本上保持不变,这说明了其覆盖的光通信波段

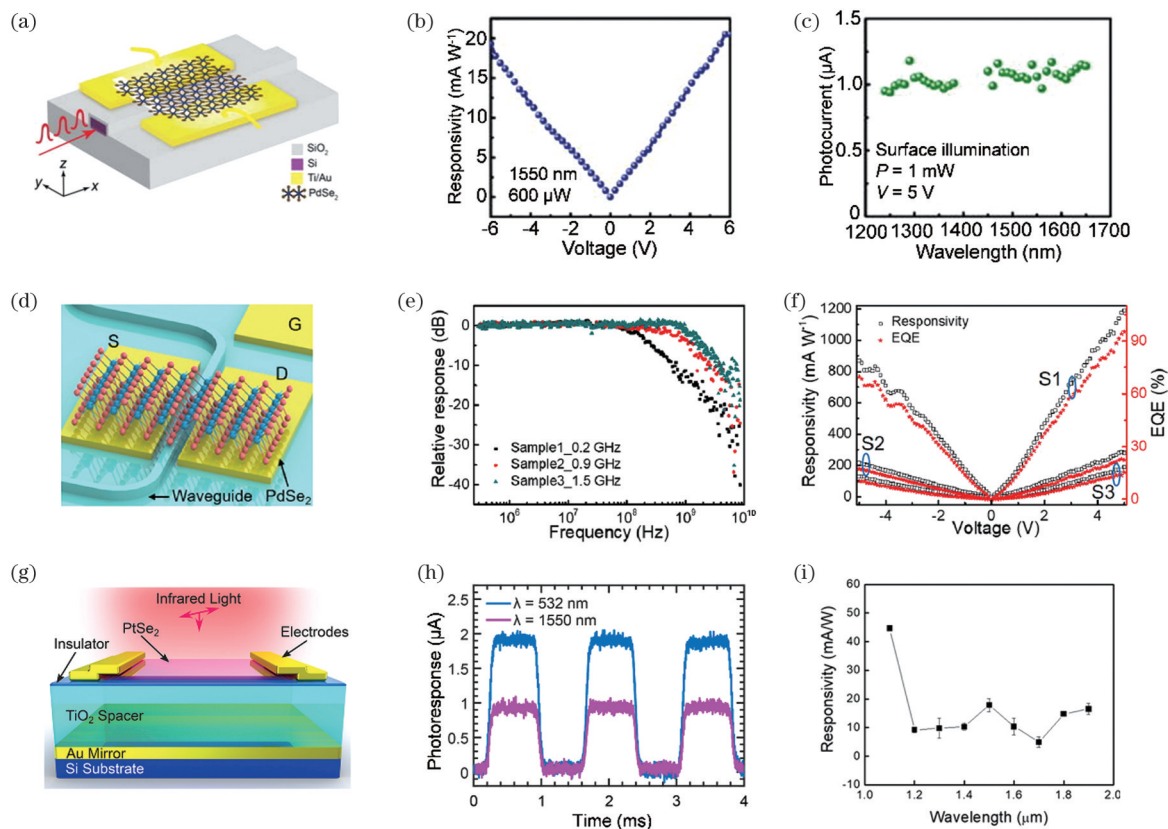


图 7 用于光通信的贵金属硫化物光电探测器。(a)集成在硅光波导上基于硒化钯的光电探测器结构示意图^[69];(b)在 1550 nm 照射下,偏置电压依赖的灵敏度^[69];(c)在光功率为 1 mW、偏置电压为 5 V 下的探测波长依赖的光电流^[69];(d)与波导集成的基于硒化钯的光电探测器结构示意图^[70];(e)三个硒化钯光电探测器在 3 V 的偏置电压下的频率响应曲线^[70];(f)三个光电探测器的偏置电压依赖的灵敏度和外量子效率^[70];(g)在金/二氧化钛光学腔衬底上的硒化钯光电探测器的结构示意图^[11];(h)在 532 nm 和 1550 nm 光照下的时间光电流响应^[11];(i)碲化铂光电探测器的波长依赖的灵敏度^[71]

Fig. 7 Noble metal dichalcogenides-based photodetectors for optical communications. (a) Schematic of palladium selenide-based photodetector integrated on silicon optical waveguide^[69]; (b) responsivity as a function of bias voltage under 1550 nm illumination^[69]; (c) photocurrent as a function of detecting wavelength under light power of 1 mW and bias voltage of 5 V^[69]; (d) schematic of palladium selenide-based photodetector integrated with waveguide^[70]; (e) frequency response curves of three palladium selenide photodetectors under bias of 3 V^[70]; (f) responsivity and external quantum efficiency of three photodetectors as functions of bias voltage^[70]; (g) schematic of palladium selenide photodetector on gold/titanium dioxide optical cavity substrate^[11]; (h) photocurrent response as a function of time under 532 nm and 1550 nm illuminations, respectively^[11]; (i) responsivity on platinum telluride photodetector as a function of wavelength^[71]

S、C 和 L 带的灵敏度基本都为 $20 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 。2022 年 Wu 等^[70]在硅光学波导上集成制备的 PdSe_2 光电探测器 [图 7(d)] 实现了 1.5 GHz 的带宽 [图 7(e)] 和 $2.5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据传输速率。该器件在通信波长 1550 nm 处的灵敏度为 $1.76 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$, 外量子效率为 95% [图 7(f)], 噪声等效功率为 $4.0 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$ 。2021 年 Azar 等^[11]在金/氧化钛衬底上制备了 PtSe_2 光电探测器 [图 7(g)], Au 薄膜既作为底栅也作为光学腔的底部反射, 氧化钛既作为器件的介电层也作为光学腔的隔离层, 氧化钛和金薄膜构成的光学腔衬底能够加强 PtSe_2 的光吸收。图 7(h) 给出了该结构器件在 532 nm 和 1550 nm 处的光电流响应, 其灵敏度分别为 $2.1 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $1.1 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 。图 7(i) 为 Shawkat 等^[71]在硅衬底上制备的 PtTe_2 光电探测器的探测波长依赖的灵敏度, 该探测器在光通信波段的灵敏度均大于 $5 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 。这表明了这些贵金属硫化物在光通信波段具有重要的实际应用前景。

5.2 基于拓扑绝缘体的光通信波段光电探测器

二维拓扑绝缘体如薄层 Bi_2Se_3 等具有 0.3 eV 窄带隙, 且具有与 MoS_2 相当的迁移率^[27], 因此它们也成为一

种被应用在高性能红外波段光电探测器上的候选材料。下面将简述该材料在光通信波段光电探测器中的应用。

2018 年 Wang 等^[27]通过范德瓦耳斯外延法生长了厘米级的 Bi_2Se_3 薄片 (厚度为 3~10 nm), 并制备了光电探测器 [图 8(a)]。图 8(b) 为在偏置电压为 1 V、光波长为 1456 nm、功率为 $142.93 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 下该器件的时间分辨的光电流响应, 其上升时间和衰减时间分别为 0.54 s 和 0.52 s。图 8(c) 给出了该器件的灵敏度和探测率在 1456 nm 波长处随温度变化的情况, 它们均随温度的增加而减小。图 8(d) 给出了该探测器在光通信波段 E 带 1456 nm 处的温度依赖的响应时间, 其上升沿和下降沿的响应时间随温度的变化基本上保持不变, 在 0.8 s 附近浮动, 在室温下的响应时间为 0.5 s 左右。这说明 Bi_2Se_3 的性能不受缺陷态的影响。Sharma 等^[72]制备了基于另一种拓扑绝缘体 Bi_2Te_3 的光电探测器, 其在光通信波段的灵敏度高于 $330 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 探测率高于 $1.0 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。器件优化后, 在光通信波长 1550 nm 处的灵敏度为 $778 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 探测率为 $1.4 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。这充分表明了拓扑绝缘体材料在光通信波段光电探测器中的应用潜力。

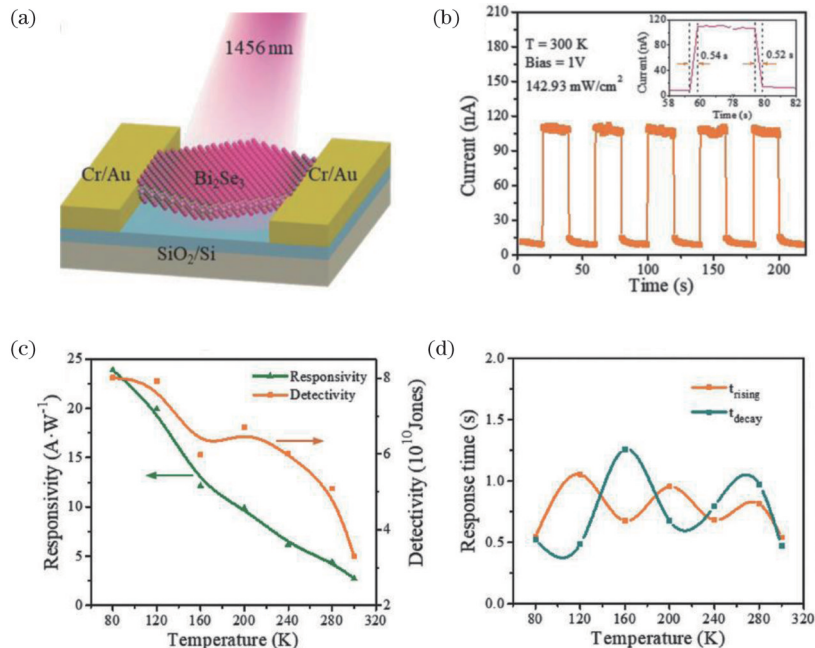


图 8 用于光通信的硒化铋光电探测器^[27]。(a) 基于硒化铋的光电探测器的结构示意图; (b) 在 1 V 偏置电压、 $142.93 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 光功率下的时间依赖的光电流响应; (c) 温度依赖的灵敏度和探测率; (d) 温度依赖的上升时间和下降时间

Fig. 8 Bismuth selenide-based photodetectors for optical communications^[27]. (a) Schematic of photodetector based on bismuth selenide; (b) photocurrent as a function of time under bias voltage of 1 V and light power of $142.93 \text{ mW}/\text{cm}^2$; (c) responsivity and detectivity as functions of temperature; (d) rising time and decay time as functions of temperature

5.3 基于 MXenes 的光通信波段光电探测器

MXenes 薄膜具有 90% 以上的宽波段光学透射率, 大部分的 MXenes 都是金属态和半金属态, 因此通常被应用在电磁屏蔽、等离子体和光电探测器中^[88]。本文主要简介 MXenes 在光电器件中的应用。

由于 MXenes 的电学特性, 它们在光电器件中通

常作为透明电极、辅助导体和电荷转移层。Jeon 等^[73]构建了基于 $\text{Mo}_2\text{C}/\text{MoS}_2$ 混合结构的光电探测器, 如图 9(a) 所示, Mo_2C 通过电子束曝光被处理成光栅结构。当光栅结构的周期为 1000 nm 时, 该混合光电探测器能够在 405~1310 nm 探测范围内实现 10^3 高的光开光比 [图 9(b)]; 当光栅结构为多周期时, 该混合探

探测器能实现 $>10^3 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 高的灵敏度和 $>10^2$ 高的光开光比 [图 9(c)], 相比于 MoS_2 光电探测器在光通信波长 1310 nm 处的灵敏度提高了 3 个数量级。 $\text{Mo}_2\text{C}/\text{MoS}_2$ 界面强耦合导致低的肖特基势垒 (70 meV) 的形成, 光

栅结构的金属态 Mo_2C 在光照下产生的表面等离子体转化成了热载流子, 进而高效地转移到 MoS_2 上。这充分证明了 MXenes 在高灵敏度光通信波段光电探测器中具有重要的应用前景。

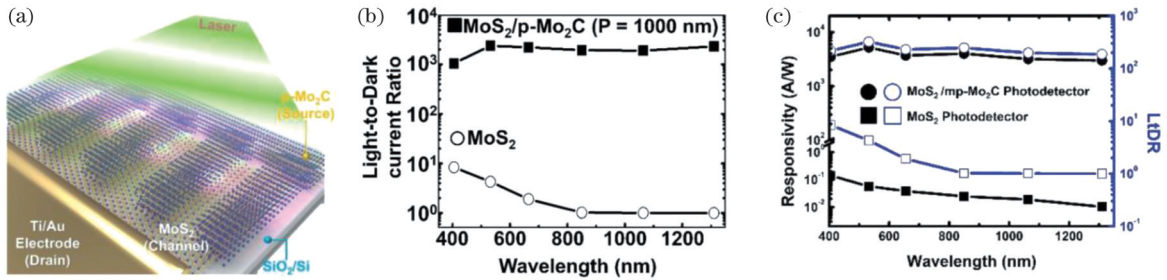


图 9 用于光通信的 Mo_2C 光电探测器^[73]。(a)光照下的基于 $\text{MoS}_2/\text{p-Mo}_2\text{C}$ 混合结构的光电探测器的结构示意图; (b) MoS_2 和 $\text{MoS}_2/\text{p-Mo}_2\text{C}$ (周期 $P=1000 \text{ nm}$) 光电探测器的波长依赖的光/暗电流比; (c) MoS_2 和 $\text{MoS}_2/\text{mp-Mo}_2\text{C}$ 光电探测器的波长依赖的灵敏度和光/暗电流比

Fig. 9 Mo_2C -based photodetectors for optical communications^[73]. (a) Schematic of photodetectors based on $\text{MoS}_2/\text{p-Mo}_2\text{C}$ hybrid structure under light illumination; (b) wavelength dependence of light-to-dark current ratio for MoS_2 and $\text{MoS}_2/\text{p-Mo}_2\text{C}$ ($P=1000 \text{ nm}$) photodetectors; (c) wavelength dependences of responsivity and light-to-dark current ratio for MoS_2 and $\text{MoS}_2/\text{mp-Mo}_2\text{C}$ photodetectors

6 基于范德瓦耳斯异质结构的光通信波段光电探测器

原子级别的二维层状材料具有较宽的带隙覆盖范围, 无悬空键, 可构建范德瓦耳斯 (vdWs) 异质结^[2-3,5,9,89-90]。vdWs 堆叠构成的异质结器件具有丰富的独特光电特性, 为器件性能改善和多功能化提供了一种有效的策略^[91-92]。基于二维半导体材料构建 vdWs 异质结有几个优点: 1) 异质结包含多个光敏层, 拓宽了吸收光谱范围; 2) 异质结的势垒可以有效抑制随机载流子的传输, 降低了器件中的暗电流和噪声水平; 3) 异质结的内建场能促进电子-空穴对分离, 从而导致更高、更快的光响应^[36,93-95]。

异质结的特性主要由界面的能带匹配情况决定。根据界面能带匹配特点, 异质结可分为跨能隙 (I 型)、交错能隙 (II 型)^[79] 和断隙 (III 型, 堆叠材料的能带之间没有重叠) 三种^[8], 如图 10 所示。I 型异质结中的电荷传输受高偏压区域中的多数载流子扩散的主导, III 型异质结主要受隧穿介导的传输控制。在 II 型范德瓦耳斯异质结中, 层间带隙分别由一个组分的价带最大值和另一组分的导带最小值决定, 导致更窄带隙的形成, 允许激发能量低于单个材料的固有带隙; 此外, 界面的内建电场通常会导致高效的电荷分离。因此, 具有强层间耦合的 II 型异质结可以用来实现红外通信波段的高性能光电探测。

迄今为止, 在红外光电探测方面也表现出高性能

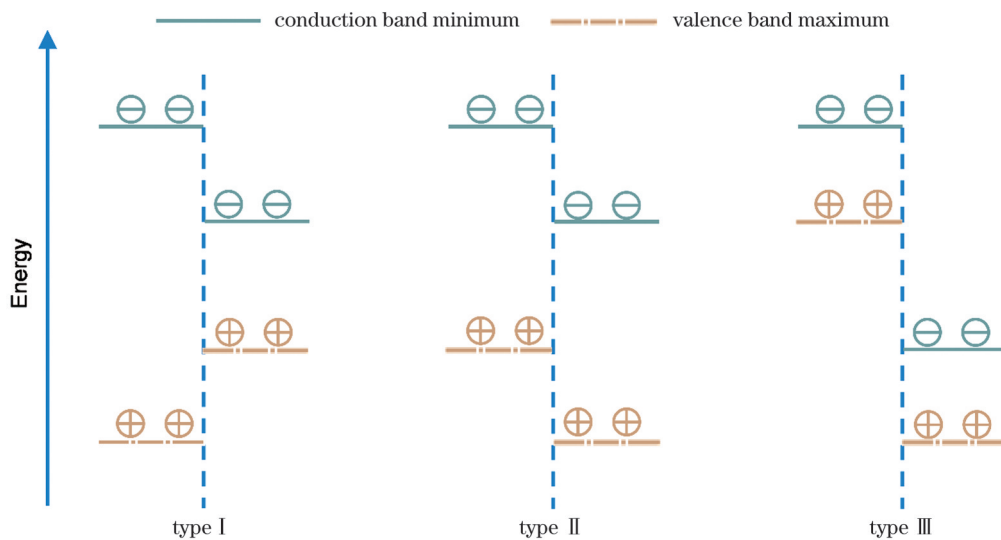


图 10 异质结的三种类型的能带结构

Fig. 10 Three types of energy band structures of heterojunctions

的 vdWs 异质结构种类繁多,如 MoS₂/MoTe₂、MoS₂/BP、BP/InSe、WS₂/MoS₂、PtSe₂/PtS₂ 和 WSe₂/SnSe₂ 等。在光通信波段有响应的异质结有 BP/PdSe₂、InSe/PdSe₂、WSe₂/SnSe₂、MoS₂/石墨烯、InSe/BP、MoTe₂/石墨烯/SnS₂、AsP/InSe、WSe₂/BP/MoS₂、BP/WSe₂、MoS₂/BP、MoSe₂/WSe₂、WS₂/Bi₂Te₃ 和 PdSe₂/WS₂ 等,除了 WS₂/Bi₂Te₃ 和 PdSe₂/WS₂ 外,大部分异质结的灵敏度均高于 0.1 A·W⁻¹ [74-75,78-79,81,94,96-107]。

6.1 二维材料/二维材料异质结构

窄带隙半导体具有吸收低能量光子的特性,但是

通常表现出较差的光响应和较低的响应速度,这是由于较弱的光吸收及低效的载流子分离和传输。通过 vdWs 构建的二维异质结,其内电场可以有效地抑制暗电流噪声和电荷复合,从而提高光电流和光响应 [34,95]。Ye 等 [75] 设计的 BP/WSe₂ 器件的光谱响应范围可达 1550 nm,在 C 带 1550 nm 处的灵敏度高达 0.5 A·W⁻¹,比同波长照射的 BP 光电探测器高 2 个数量级。BP/WSe₂ 红外检测探测器具有高灵敏度,这是由于异质结的内建电场促进了 BP 中光生电子-空穴对的分离。在他们的另一项工作中,如图 11(a)~(c) 所示,MoS₂/BP

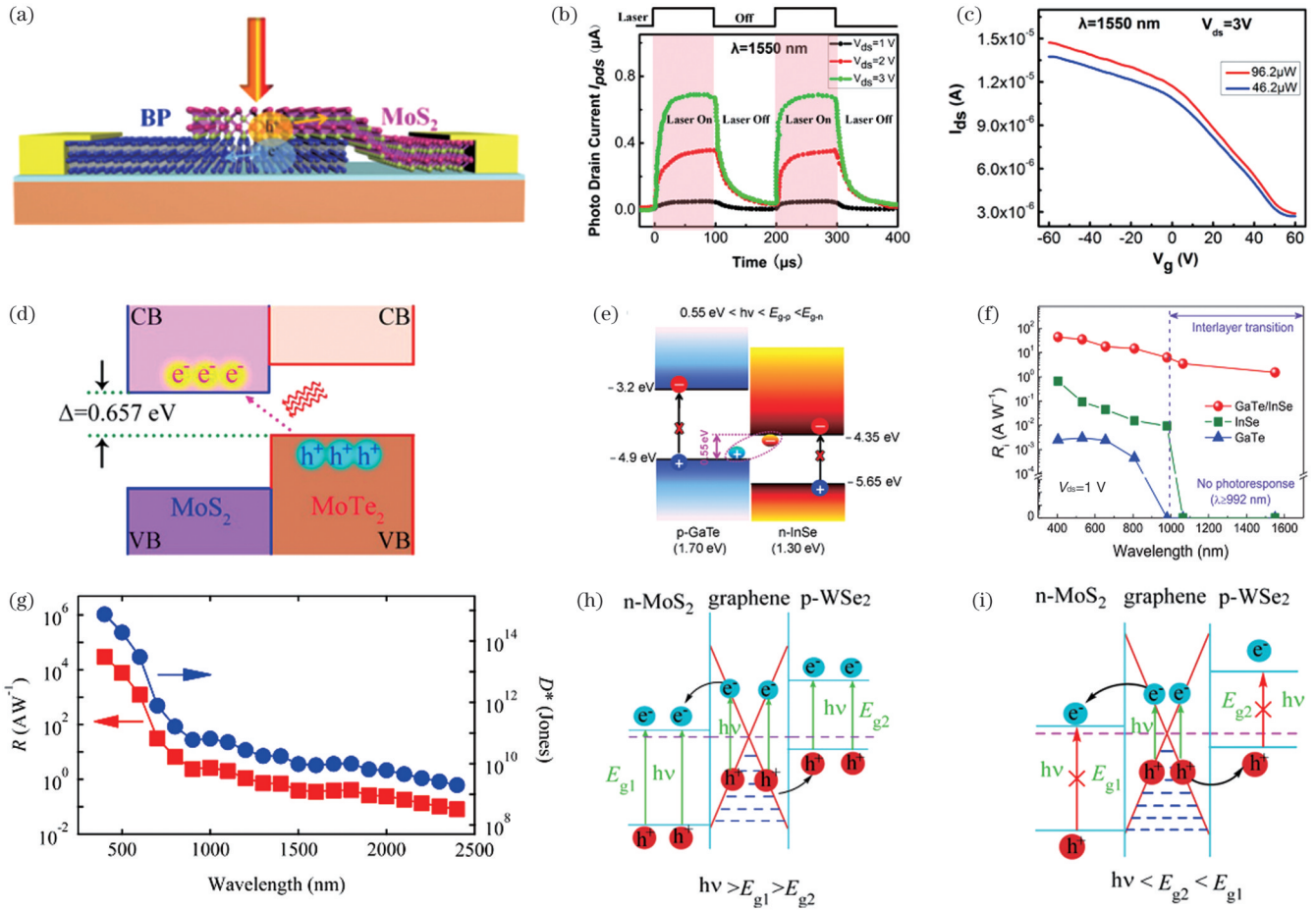


图 11 用于光通信的范德瓦耳斯异质结光电探测器。(a) 黑磷/硫化钼范德瓦耳斯异质结器件的示意图 [74]; (b) 在不同的偏置电压下的时间光电流响应,其照射光波长为 1550 nm,功率为 96.2 μW [74]; (c) 在不同功率 1550 nm 入射光照射下的转移曲线 [74]; (d) 碲化钼/硫化钼范德瓦耳斯 II 型异质结层间激发过程的示意图 [76]; (e) 碲化镓/硒化铜范德瓦耳斯异质结的 II 型能带排列和层间跃迁原理示意图, E_{g-p} 和 E_{g-n} 分别是 p 型碲化镓和 n 型硒化铜的带隙 [77]; (f) 碲化镓、硒化铜和碲化镓/硒化铜异质结器件的灵敏度与探测波长的依赖关系 [77]; (g) 碲化钨/石墨烯/硫化钼异质结器件的探测波长依赖的灵敏度和探测率,其探测波长范围为 400~2400 nm [80]; 该异质结在 (h) 紫外可见和 (i) 红外范围内的光吸收原理和能带结构示意图 [80]

Fig. 11 vdWs heterojunction-based photodetectors for optical communications. (a) Schematic of device based on BP/MoS₂ vdWs heterojunction [74]; (b) photocurrent response as a function of time at different bias voltages under incident light wavelength of 1550 nm and power of 96.2 μW [74]; (c) transfer curves under 1550 nm illumination with different powers [74]; (d) schematic of interlayer excitation process in MoTe₂/MoS₂ vdWs type II heterojunction [76]; (e) schematic of type II energy alignment and interlayer transition mechanism in GaTe/InSe vdWs heterojunction where E_{g-p} and E_{g-n} are bandgaps of p-GaTe and n-InSe, respectively [77]; (f) responsivity on GaTe, InSe and GaTe/InSe heterojunction devices as a function of detecting wavelength [77]; (g) responsivity and detectivity on WSe₂/graphene/MoS₂ heterojunction device as functions of detecting wavelength of 400–2400 nm [80]; schematics of optical absorption principle and band structure of heterojunction in (h) ultraviolet-visible and (i) infrared ranges [80]

异质结器件也表现出良好的整流行为,可以通过栅极偏置进行调整,显示出强大且可调谐的光伏效应,在 1550 nm 波长处具有 $153.4 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 的灵敏度、 $2.13 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 的探测率和 $15 \mu\text{s}$ 的响应速度^[74]。

TMDs 材料受带隙的限制,大多不能吸收通信波段的光,其在光通信上的应用面临着巨大的挑战。然而,通过堆叠不同的二维材料,巧妙地设计异质结的能带排列,有效波长的检测范围可扩展到红外区域。如图 11(d)所示,Zhang 等^[76]展示了一种基于 II 型能带排列的 $\text{MoTe}_2/\text{MoS}_2$ vdWs 异质结构的垂直堆叠,单层 MoTe_2 和单层 MoS_2 的直接带隙分别为 1.05 eV 和 1.8 eV,它们对应的本征响应截止波长分别为 1200 nm 和 700 nm。而 MoTe_2 的价带最大值与 MoS_2 的导带最小值之间的层间带隙仅为 0.66 eV,这种 II 型异质结在红外激发下可层间跃迁,探测波长被延展至 1550 nm。同样,如图 11(e)、(f)所示,单一材料 $\text{InSe}(\text{GaTe})$ 对大于 980 nm (808 nm) 波长的光响应显著降低,而 GaTe/InSe 形成的 II 型异质结的层间带隙为 0.55 eV,这使器件在 400~1550 nm 的范围内显示出宽光谱响应^[77]。

将栅极调控特性应用到 vdWs 异质结器件上,可提高器件的光灵敏度。由于接触区域的高肖特基势垒和重叠区域中的能带弯曲不足,Zhang 等^[76]设计的 $\text{MoTe}_2/\text{MoS}_2$ 异质结构在 1550 nm 处的响应只有 $40 \text{ nA} \cdot \text{W}^{-1}$ 。Xue 等^[78]在基于 $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ vdWs 异质结的光电探测器中,通过施加 -70 V 背栅电压来降低金属薄片区域的肖特基势垒高度,通过施加 -2 V 反向偏置电压来增加异质结区域的能带弯曲程度。在外加偏压、内置电场和场调控效应的协同作用下,发生了波函数的重叠,这促使隧穿辅助的层间价带电子跃迁至导带,从而引起了光响应,该器件在 1550 nm 波长处的光响应为 $127 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ ^[78]。在 $\text{ReS}_2/\text{ReSe}_2$ 器件中,通过施加栅极电压,在 980 nm 和 1310 nm 波长下的光响应度可到 $3.64 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $1.58 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ ^[79]。

6.2 基于 p-g-n 的异质结构

基于 p-g-n 的异质结构是一种用于高性能宽带光电探测的新兴器件架构。在 TMDs/TMDs 异质结构之间夹入石墨烯,可以改善 TMDs 层之间的接触、提高电子-空穴对分离效率和减少界面电荷陷阱以获得更快的光响应,借助石墨烯的无间隙还可以拓宽光电探测器的探测光谱范围。此外,通过改变石墨烯中间层的厚度,可以有效地调整和优化电极对光生载流子的光吸收及光生载流子的迁移率和传输距离。如图 11(g)~(i)所示,Long 等^[80]在 MoS_2 和 WSe_2 之间夹入石墨烯,制备了 p-g-n 范德瓦耳斯异质结,实现了 400~2400 nm 的宽探测波长范围和 53.6 μs /30.3 μs 短的上升/下降时间。类似地,还有 Li 等^[81]制作的 $\text{MoTe}_2/\text{graphene}/\text{SnS}_2$ 器件,该器件具有 405~1550 nm 的有效波长范围,在 1550 nm 波长处的探测率和灵敏度分别高达 $1.06 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $11.7 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,这归因

于内建场引起的光生载流子的迅速分离和输运。

本节主要总结了部分可用于光通信波段的 vdWs 异质结器件,其要点在于设计特定能带排列的 II 型异质结,从而在所需光通信波段内实现高效响应。为了提高探测器的性能,还要进一步提高载流子分离效率和降低暗电流。

7 结束语

综述了光探测器的原理和评价参数指标、二维材料的优势及基于二维材料和其异质结的光通信波段光电探测器。尽管目前报道的二维材料在光探测方面具有优异的性能,但仍有一些困难需要解决。

首先,二维材料目前仍存在难以大规模制备及器件的均一性和可靠性差等问题。CVD 法是实现二维材料产业化制备的最有潜力的技术。然而,目前该方法在材料的结晶性和层厚方面的可控性较差,这使得 CVD 制备的二维材料的迁移率相对较低。

其次,二维材料光探测器件的研究往往受到接触端点肖特基势垒的影响。一方面势垒抑制了电荷传输,降低了器件的性能。另一方面肖特基势垒本身也具有强烈的光响应,这会对光电探测器光响应的研究产生严重干扰。因此,如何实现接触位点的欧姆接触一直是二维材料研究的热点问题。

再者,由于二维材料超薄的性质,二维材料的光吸收不足,灵敏度和 EQE 低。为了增强光吸收,通常会增加材料的层数,但这会产生较大的暗电流,降低了检测灵敏度。因此,除了文中介绍的构建异质结的方法外,还有以下策略:1)光栅控效应。光栅控效应是通过光诱导阱调制沟道电导的一种方法。活性材料吸收光子并产生电子-空穴对,其中一类载流子被捕获形成局域场。光诱导的局域场延长了光生载流子的寿命,获得了较高的增益^[108-109]。2)等离子共振场增强效应。在二维材料的二维电子气与表面等离子波相互作用的过程中,当等离子体波受到弱阻尼时,等离子体波与二维电子气体发生干涉,进而实现等离子体波的共振探测模式,共振检测模式的信号强度比非共振检测模式的信号强度通常强 5~20 倍^[110]。3)电场力调控效应。利用铁电材料超高的极化强度引起的极强电场,减小沟道材料的禁带宽度并抑制暗电流,从而拓宽探测范围和提高灵敏度^[65]。此外,可以尝试一些新颖的设计和结构,如在 p-n 结之间插入红外光吸收层可实现更低的暗电流和更高的灵敏度。

总之,基于二维材料的红外光电探测器具有优异性能,有望应用到下一代高性能红外光电探测器中。为了满足实际应用,在高品质的二维材料大规模制备以及器件制造工艺方面仍需要大量的研究工作。

参 考 文 献

- [1] Wang F, Wang Z X, Yin L, et al. 2D library beyond graphene and

- transition metal dichalcogenides: a focus on photodetection[J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(16): 6296-6341.
- [2] Koppens F H L, Mueller T, Avouris P, et al. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(10): 780-793.
- [3] Konstantatos G. Current status and technological prospect of photodetectors based on two-dimensional materials[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 5266.
- [4] Sun Z H, Chang H X. Graphene and graphene-like two-dimensional materials in photodetection: mechanisms and methodology[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(5): 4133-4156.
- [5] Buscema M, Island J O, Groenendijk D J, et al. Photocurrent generation with two-dimensional van der Waals semiconductors[J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(11): 3691-3718.
- [6] Wang F K, Zhang Y, Gao Y, et al. 2D metal chalcogenides for IR photodetection[J]. *Small*, 2019, 15(30): 1901347.
- [7] Wang Z, Wang P, Wang F, et al. A noble metal dichalcogenide for high-performance field-effect transistors and broadband photodetectors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(5): 1907945.
- [8] Guan X W, Yu X C, Periyanaounder D, et al. Recent progress in short-to long-wave infrared photodetection using 2D materials and heterostructures[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(4): 2001708.
- [9] Jiang J, Wen Y, Wang H, et al. Recent advances in 2D materials for photodetectors[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2021, 7(7): 2001125.
- [10] Xie C, Mak C H, Tao X M, et al. Photodetectors based on two-dimensional layered materials beyond graphene[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(19): 1603886.
- [11] Azar N S, Bullock J, Shrestha V R, et al. Long-wave infrared photodetectors based on 2D platinum diselenide atop optical cavity substrates[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6573-6581.
- [12] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [13] Geim A K. Graphene: status and prospects[J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [14] Li F, Zheng J B, Yao Q, et al. Recent progress of silicon integrated light emitters and photodetectors for optical communication based on two-dimensional materials[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(10): 3298-3320.
- [15] Wang G Y, Zhang Y Z, You C Y, et al. Two dimensional materials based photodetectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 88: 149-173.
- [16] Mak K F, Lee C G, Hone J, et al. Atomically thin MoS₂: a new direct-gap semiconductor[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(13): 136805.
- [17] Jin W C, Yeh P C, Zaki N, et al. Direct measurement of the thickness-dependent electronic band structure of MoS₂ using angle-resolved photoemission spectroscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(10): 106801.
- [18] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, et al. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides [J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(11): 699-712.
- [19] Jin Y, Keum D H, An S J, et al. A van der Waals homojunction: ideal p-n diode behavior in MoSe₂[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(37): 5534-5540.
- [20] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene[J]. *Nature*, 2005, 438(7065): 197-200.
- [21] Novoselov K S, Jiang Z, Zhang Y, et al. Room-temperature quantum Hall effect in graphene[J]. *Science*, 2007, 315(5817): 1379.
- [22] Xia F N, Mueller T, Lin Y M, et al. Ultrafast graphene photodetector[J]. *Nature Nanotechnology*, 2009, 4(12): 839-843.
- [23] Li J H, Niu L Y, Zheng Z J, et al. Photosensitive graphene transistors[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(31): 5239-5273.
- [24] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 611-622.
- [25] Bao W, Jing L, Velasco J, et al. Stacking-dependent band gap and quantum transport in trilayer graphene[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(12): 948-952.
- [26] Shi Z, Cao R, Khan K, et al. Two-dimensional tellurium: progress, challenges, and prospects[J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, 12(1): 99.
- [27] Wang F K, Li L G, Huang W J, et al. Submillimeter 2D Bi₂Se₃ flakes toward high-performance infrared photodetection at optical communication wavelength[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(33): 1802707.
- [28] Chen E, Xu W S, Chen J, et al. 2D layered noble metal dichalcogenides (Pt, Pd, Se, S) for electronics and energy applications[J]. *Materials Today Advances*, 2020, 7: 100076.
- [29] Pi L J, Li L, Liu K L, et al. Recent progress on 2D noble-transition-metal dichalcogenides[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(51): 1904932.
- [30] Wang Y W, Zhou L, Zhong M, et al. Two-dimensional noble transition-metal dichalcogenides for nanophotonics and optoelectronics: Status and prospects[J]. *Nano Research*, 2022, 15(4): 3675-3694.
- [31] Watanabe K, Taniguchi T, Kanda H. Direct-bandgap properties and evidence for ultraviolet lasing of hexagonal boron nitride single crystal[J]. *Nature Materials*, 2004, 3(6): 404-409.
- [32] Ross J S, Klement P, Jones A M, et al. Electrically tunable excitonic light-emitting diodes based on monolayer WSe₂ p-n junctions[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(4): 268-272.
- [33] Li L K, Ye G J, Tran V, et al. Quantum oscillations in a two-dimensional electron gas in black phosphorus thin films[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(7): 608-613.
- [34] Novoselov K S, Mishchenko A, Carvalho A, et al. 2D materials and van der Waals heterostructures[J]. *Science*, 2016, 353(6298): aac9439.
- [35] Ajayan P, Kim P, Banerjee K. Two-dimensional van der Waals materials[J]. *Physics Today*, 2016, 69(9): 38-44.
- [36] Geim A K, Grigorieva I V. Van der Waals heterostructures[J]. *Nature*, 2013, 499(7459): 419-425.
- [37] Huang X, Tan C L, Yin Z Y, et al. 25th anniversary article: hybrid nanostructures based on two-dimensional nanomaterials[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(14): 2185-2204.
- [38] Liu C H, Chang Y C, Norris T B, et al. Graphene photodetectors with ultra-broadband and high responsivity at room temperature[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(4): 273-278.
- [39] Guo Q S, Pospisil A, Bhuiyan M, et al. Black phosphorus mid-infrared photodetectors with high gain[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4648-4655.
- [40] Youngblood N, Chen C, Koester S J, et al. Waveguide-integrated black phosphorus photodetector with high responsivity and low dark current[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(4): 247-252.
- [41] Engel M, Steiner M, Avouris P. Black phosphorus photodetector for multispectral, high-resolution imaging[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(11): 6414-6417.
- [42] Manzeli S, Ovchinnikov D, Pasquier D, et al. 2D transition metal dichalcogenides[J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2: 17033.
- [43] Long M S, Wang Y, Wang P, et al. Palladium diselenide long-wavelength infrared photodetector with high sensitivity and stability [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(2): 2511-2519.
- [44] Zhao Y D, Qiao J S, Yu P, et al. Extraordinarily strong interlayer interaction in 2D layered PtS₂[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(12): 2399-2407.
- [45] Zhao Y D, Qiao J S, Yu Z H, et al. High-electron-mobility and air-stable 2D layered PtSe₂ FETs[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(5): 1604230.
- [46] Rivera M, Velázquez R, Aldabahi A, et al. High operating temperature and low power consumption boron nitride nanosheets

- based broadband UV photodetector[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42973.
- [47] Zhou A F, Aldalbahi A, Feng P. Vertical metal-semiconductor-metal deep UV photodetectors based on hexagonal boron nitride nanosheets prepared by laser plasma deposition[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(10): 3286-3292.
- [48] Sajjad M, Jadwisnienczak W M, Feng P. Nanoscale structure study of boron nitride nanosheets and development of a deep-UV photodetector[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(9): 4577-4582.
- [49] Cui X, Lee G H, Kim Y D, et al. Multi-terminal transport measurements of MoS₂ using a van der Waals heterostructure device platform[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(6): 534-540.
- [50] Massicotte M, Schmidt P, Violla F, et al. Picosecond photoresponse in van der Waals heterostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(1): 42-46.
- [51] Ke Y X, Song X F, Qi D Y, et al. Modulation of electrical properties with controllable local doping in multilayer MoTe₂ transistors[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2020, 6(10): 2000532.
- [52] Ke Y X, Qi D Y, Han C, et al. Facile p-doping of few-layer MoTe₂ by controllable surface oxidation toward high-performance complementary devices[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2(4): 920-926.
- [53] Mueller T, Xia F N, Avouris P. Graphene photodetectors for high-speed optical communications[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 297-301.
- [54] Alexander U, Karl U, Thomas M. Intrinsic response time of graphene photodetectors[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(7): 2804-2808.
- [55] Schall D, Neumaier D, Mohsin M, et al. 50 GBit/s photodetectors based on wafer-scale graphene for integrated silicon photonic communication systems[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(9): 781-784.
- [56] Chen Z F, Cheng Z Z, Wang J Q, et al. High responsivity, broadband, and fast graphene/silicon photodetector in photoconductor mode[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1207-1214.
- [57] Yu X C, Dong Z G, Liu Y P, et al. A high performance, visible to mid-infrared photodetector based on graphene nanoribbons passivated with HfO₂[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(1): 327-332.
- [58] Liu Y, Sun T, Ma W L, et al. Highly responsive broadband black phosphorus photodetectors[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(2): 020002.
- [59] Amani M, Tan C L, Zhang G, et al. Solution-synthesized high-mobility tellurium nanoflakes for short-wave infrared photodetectors [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(7): 7253-7263.
- [60] Shen C F, Liu Y H, Wu J B, et al. Tellurene photodetector with high gain and wide bandwidth[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(1): 303-310.
- [61] Ma W L, Gao Y Q, Shang L Y, et al. Ultrabroadband tellurium photoelectric detector from visible to millimeter wave[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(5): 2103873.
- [62] Song J W, Yuan S, Cui C C, et al. High-efficiency and high-speed germanium photodetector enabled by multiresonant photonic crystal [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(3): 1081-1087.
- [63] Yao J D, Shao J M, Yang G W. Ultra-broadband and high-responsive photodetectors based on bismuth film at room temperature[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12320.
- [64] Nidhi, Jakhar A, Uddin W, et al. Nanolayered black arsenic-silicon lateral heterojunction photodetector for visible to mid-infrared wavelengths[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(9): 9401-9409.
- [65] Wang X D, Wang P, Wang J L, et al. Ultrasensitive and broadband MoS₂ photodetector driven by ferroelectrics[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(42): 6575-6581.
- [66] Ma P, Flóry N, Salamin Y, et al. Fast MoTe₂ waveguide photodetector with high sensitivity at telecommunication wavelengths[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1846-1852.
- [67] Maiti R, Patil C, Saadi M A S R, et al. Strain-engineered high-responsivity MoTe₂ photodetector for silicon photonic integrated circuits[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(9): 578-584.
- [68] Lai J W, Liu X, Ma J C, et al. Anisotropic broadband photoresponse of layered type-II weyl semimetal MoTe₂[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(22): 1707152.
- [69] Wang Y, Zhou Y Q, Zhang Z Y, et al. 40 GHz waveguide-integrated two-dimensional palladium diselenide photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(23): 231102.
- [70] Wu J H, Ma H, Zhong C Y, et al. Waveguide-integrated PdSe₂ photodetector over a broad infrared wavelength range[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(16): 6816-6824.
- [71] Shawkat M S, Hafiz S B, Islam M M, et al. Scalable van der waals two-dimensional PtTe₂ layers integrated onto silicon for efficient near-to-mid infrared photodetection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(13): 15542-15550.
- [72] Sharma A, Srivastava A K, Senguttuvan T D, et al. Robust broad spectral photodetection (UV-NIR) and ultra high responsivity investigated in nanosheets and nanowires of Bi₂Te₃ under harsh nano-milling conditions[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17911.
- [73] Jeon J, Choi H, Choi S, et al. Transition-metal-carbide (Mo₂C) multiperiod gratings for realization of high-sensitivity and broad-spectrum photodetection[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(48): 1905384.
- [74] Ye L, Li H, Chen Z F, et al. Near-infrared photodetector based on MoS₂/black phosphorus heterojunction[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(4): 692-699.
- [75] Ye L, Wang P, Luo W J, et al. Highly polarization sensitive infrared photodetector based on black phosphorus-on-WSe₂ photogate vertical heterostructure[J]. *Nano Energy*, 2017, 37: 53-60.
- [76] Zhang K A, Zhang T N, Cheng G H, et al. Interlayer transition and infrared photodetection in atomically thin type-II MoTe₂/MoS₂ van der Waals heterostructures[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(3): 3852-3858.
- [77] Qi T L, Gong Y P, Li A L, et al. Interlayer transition in a vdW heterostructure toward ultrahigh detectivity shortwave infrared photodetectors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(3): 1905687.
- [78] Xue H, Wang Y D, Dai Y Y, et al. A MoSe₂/WSe₂ heterojunction-based photodetector at telecommunication wavelengths[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(47): 1804388.
- [79] Jo S H, Lee H W, Shim J, et al. Highly efficient infrared photodetection in a gate-controllable van der waals heterojunction with staggered bandgap alignment[J]. *Advanced Science*, 2018, 5(4): 1700423.
- [80] Long M S, Liu E F, Wang P, et al. Broadband photovoltaic detectors based on an atomically thin heterostructure[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2254-2259.
- [81] Li A L, Chen Q X, Wang P P, et al. Ultrahigh-sensitive broadband photodetectors based on dielectric shielded MoTe₂/graphene/SnS₂ p-g-n junctions[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(6): 1805656.
- [82] Ma Y D, Dai Y, Niu C W, et al. Halogenated two-dimensional germanium: candidate materials for being of quantum spin hall state [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(25): 12587-12591.
- [83] Zhang S L, Xie M Q, Li F Y, et al. Semiconducting group 15 monolayers: a broad range of band gaps and high carrier mobilities [J]. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 2016, 55(5): 1666-1669.
- [84] Zhang S L, Yan Z, Li Y F, et al. Atomically thin arsenene and antimonene: semimetal-semiconductor and indirect-direct band-gap transitions[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(10): 3112-3115.
- [85] Xie Z J, Zhang B, Ge Y Q, et al. Chemistry, functionalization, and applications of recent mono-elemental two-dimensional materials and their heterostructures[J]. *Chemical Reviews*, 2022,

- 122(1): 1127-1207.
- [86] Lezama I G, Arora A, Ubaldini A, et al. Indirect-to-direct band gap crossover in few-layer MoTe_2 [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(4): 2336-2342.
- [87] 魏铭洋, 连洁, 姜清芬, 等. 二维二硒化钼薄膜光学性质的椭圆偏研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1203002.
Wei M Y, Lian J, Jiang Q F, et al. Ellipsometry study on optical properties of two-dimensional platinum selenide film[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1203002.
- [88] Zhang X W, Shao J H, Yan C X, et al. A review on optoelectronic device applications of 2D transition metal carbides and nitrides[J]. *Materials & Design*, 2021, 200: 109452.
- [89] Wang F, Wang Z X, Yin L, et al. 2D library beyond graphene and transition metal dichalcogenides: a focus on photodetection[J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(16): 6296-6341.
- [90] Long M S, Wang P, Fang H H, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(19): 1803807.
- [91] 姚杰, 缪鑫, 王帅, 等. 高响应度光电检测器件石墨烯-MoS₂垂直异质结的制备[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(15): 1516024.
Yao J, Miao X, Wang S, et al. Preparation of graphene-MoS₂ vertical heterojunction for high-responsivity photodetectors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(15): 1516024.
- [92] 林亚楠, 吴亚东, 程海洋, 等. PdSe₂纳米线薄膜/Si异质结近红外集成光电探测器[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2125001.
Lin Y N, Wu Y D, Cheng H Y, et al. Near-infrared integrated photodetector based on PdSe₂ nanowires film/Si heterojunction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2125001.
- [93] Gbadamasi S, Mohiuddin M, Krishnamurthi V, et al. Interface chemistry of two-dimensional heterostructures-fundamentals to applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(7): 4684-4729.
- [94] Ahmad W, Liu J D, Jiang J Z, et al. Strong interlayer transition in few-layer InSe/PdSe₂ van der Waals heterostructure for near-infrared photodetection[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(43): 2104143.
- [95] Jariwala D, Marks T J, Hersam M C. Mixed-dimensional van der Waals heterostructures[J]. *Nature Materials*, 2017, 16(2): 170-181.
- [96] Yuan J, Sun T, Hu Z X, et al. Wafer-scale fabrication of two-dimensional PtS₂/PtSe₂ heterojunctions for efficient and broad band photodetection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(47): 40614-40622.
- [97] Afzal A M, Dastgeer G, Iqbal M Z, et al. High-performance p-BP/n-PdSe₂ near-infrared photodiodes with a fast and gate-tunable photoresponse[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(17): 19625-19634.
- [98] Wang G C, Li L, Fan W H, et al. Interlayer coupling induced infrared response in WS₂/MoS₂ heterostructures enhanced by surface plasmon resonance[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(22): 1870151.
- [99] Ding Y, Zhou N, Gan L, et al. Stacking-mode confined growth of 2H-MoTe₂/MoS₂ bilayer heterostructures for UV-VIS-IR photodetectors[J]. *Nano Energy*, 2018, 49: 200-208.
- [100] Cao R, Wang H D, Guo Z N, et al. Black phosphorous/indium selenide photoconductive detector for visible and near-infrared light with high sensitivity[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(12): 1970047.
- [101] Kang X L, Lan C Y, Li F Z, et al. Van der Waals PdSe₂/WS₂ heterostructures for robust high-performance broadband photodetection from visible to infrared optical communication band[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(7): 2001991.
- [102] Xue H, Dai Y Y, Kim W, et al. High photoresponsivity and broadband photodetection with a band-engineered WSe₂/SnSe₂ heterostructure[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(7): 3240-3247.
- [103] Wu F, Xia H, Sun H D, et al. AsP/InSe van der Waals tunneling heterojunctions with ultrahigh reverse rectification ratio and high photosensitivity[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(12): 1900314.
- [104] Yao J D, Zheng Z Q, Yang G W. Layered-material WS₂/topological insulator Bi₂Te₃ heterostructure photodetector with ultrahigh responsivity in the range from 370 to 1550 nm[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(33): 7831-7840.
- [105] Li H, Ye L, Xu J B. High-performance broadband floating-base bipolar phototransistor based on WSe₂/BP/MoS₂ heterostructure[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(4): 823-829.
- [106] Vabbina P, Choudhary N, Chowdhury A A, et al. Highly sensitive wide bandwidth photodetector based on internal photoemission in CVD grown p-type MoS₂/graphene Schottky junction[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(28): 15206-15213.
- [107] Yu W Z, Li S J, Zhang Y P, et al. Near-infrared photodetectors based on MoTe₂/graphene heterostructure with high responsivity and flexibility[J]. *Small*, 2017, 13(24): 1700268.
- [108] Song Z G, Wang Y K, Zhu Y K, et al. Targeted transfer of self-assembled CdSe nanoplatelet film onto WS₂ flakes to construct hybrid heterostructures[J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, 42(8): 082901.
- [109] Sun T, Ma W L, Liu D H, et al. Graphene plasmonic nanoresonators/graphene heterostructures for efficient room-temperature infrared photodetection[J]. *Journal of Semiconductors*, 2020, 41(7): 072907.
- [110] Wang J, Han J Y, Chen X Q, et al. Design strategies for two-dimensional material photodetectors to enhance device performance[J]. *InfoMat*, 2019(1): 33-53.

Two-Dimensional Materials Photodetectors for Optical Communications

Ke Yuxuan¹, Cen Yingqian², Qi Dianyu^{2*}, Zhang Wenjing^{2**}, Zhang Qing^{1***}

¹*School of Materials Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;*

²*International Collaborative Laboratory of 2D Materials for Optoelectronics Science and Technology, Institute of Microscale Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China*

Abstract

Significance Photodetectors that convert a light signal into an electrical signal play an important role in optical communications, displays, and other such applications. Nanoscale photodetectors operating in the optical communication band are one of the most important research objects in optical chip technology. Optical communication bands contain two spectral ranges. One is called the 850 nm band from 770 nm to 910 nm; the photodetectors in this band mainly use technologically important Si semiconductors as photoactive materials. The other range includes the original (1260–1360 nm, O), extended-wavelength (1360–1460 nm, E), short-

wavelength (1460–1530 nm, S), conventional (1530–1565 nm, C), long-wavelength (1565–1625 nm, L), and ultra-long-wavelength (1625–1675 nm, U) bands. The photodetectors in these bands use indium gallium arsenide (InGaAs) and mercury cadmium telluride (HgCdTe) as photoactive materials. However, they still suffer from complex and high-cost growth processes, low detection efficiency, and low operation temperature.

Emerging two-dimensional (2D) materials, including graphene, transition metal dichalcogenides, black phosphorus, and perovskites, have attracted considerable attention owing to their extraordinary physical and chemical properties. They are atomically thin, with no surface dangling bonds, good electrostatic tunability of carrier concentration, and strong light-matter interactions. These advantages make them promising materials for high-efficiency nanoscale photodetectors for optical chips. For instance, monolayer molybdenum disulfide (MoS_2) can absorb 10% of light due to a large absorption coefficient of 10^7 m^{-1} . Platinum diselenide (PtSe_2) possesses high mobility of over $10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ and a bandgap of 0.3–2.0 eV, which is promising for wide-band optical communication photodetectors. Meanwhile, the non-dangling surfaces of 2D materials enable van der Waals (vdWs) integration for various heterostructures without the constraint of crystal lattice mismatching. 2D material photodetectors for optical communication, including single-element 2D materials, double-element 2D materials, and 2D heterostructures, have been extensively explored. They have demonstrated excellent performance, including high responsivity and detectivity, fast response time, and wide bandwidth. Despite the realization of these great successes, 2D photodetectors operating in optical communication bands still face many application challenges. Therefore, it is necessary to summarize the research progress and discuss the challenges of this important field.

Progress We first introduced the working principles and important characteristic parameters of photodetectors. The working principles include the effects of photoconductive, photovoltaic, photogating, and photo-thermoelectric properties. The characteristic parameters include the photocurrent, ON/OFF ratio, external quantum efficiency (EQE), and detectivity. Next, we discussed the research progress in photodetectors based on the 2D materials (single-element and double-element) and their heterostructures in optical communication bands (Table 1). For example, Avouris's group demonstrated a graphene photodetector with a 10 Gbit/s data transmission rate using the asymmetric metal contact technique. Xu's group demonstrated a graphene photodetector on silicon with high responsivity owing to the prolongation of the photon-generated carrier lifetime induced by the built-in field at the heterointerface between graphene and silicon. Mueller *et al.* demonstrated a graphene photodetector with ultrashort intrinsic response time of 2.1 ps using metal-graphene-metal structures. Javey's group designed optical cavity-enhanced tellurium photodetectors exhibiting a high responsivity ($>2.5 \text{ A/W}$) within the entire optical communication bands (Fig. 4). Similarly, Song *et al.* fabricated bismuth-based photodetectors with high responsivity (0.62 A/W) and EQE (50%) at C band using photonic crystal-enhanced structures (Fig. 5).

For double-element 2D material photodetectors, higher responsivities were achieved than those of single-element photodetectors. For instance, Leuthold's group fabricated few-layer MoTe_2 waveguide photodetectors with high responsivity (0.4 A/W), broad bandwidth (1 GHz), and fast data transmission rate (1 Gbit/s) using a graphene/ MoTe_2 /Au structure. Zhai's group achieved Bi_2Se_3 photodetectors with high responsivity (2.7 A/W) and detectivity ($3.3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$) at the C-band. For 2D heterostructures, Park's group demonstrated $\text{ReS}_2/\text{ReSe}_2$ photodetectors with ultrahigh responsivity of $1.58 \times 10^5 \text{ A/W}$ at the O-band. Zhang's group demonstrated GaTe/InSe photodetectors with a broad detection range (400–1600 nm) and high responsivity (2 A/W). Furthermore, Miao's group fabricated photodetectors with a broad detection range (400–1600 nm), high detectivity (11.7 A/W), and rapid response time (30.3 μs) using MoS_2 /graphene/ WSe_2 heterostructures. Finally, the challenges and ongoing research in this field are discussed, including scalable synthesis, low Schottky barriers for electrical contact, and high absorption.

Conclusion and prospects 2D material photodetectors have shown high responsivity and detectivity, fast response time, and wide bandwidth. This provides an effective strategy for the development of high-efficiency nanoscale photodetectors for next-generation optical chips and interconnections. We reviewed the recent progress made in 2D material photodetectors for optical communications. We focused on two types of material platforms: 1) 2D materials, including single- and double-element 2D materials, and 2) 2D heterostructures. Despite great progress, some challenges still exist for our ongoing exploration.

Key words detectors; two-dimensional materials; photodetector; optical communication band; heterostructure; van der Waals