



光栅局域调控二维光电探测器

雷挺 吕伟明 吕文星 崔博焄 胡瑞 时文华 曾中明

Photogating effect in two-dimensional photodetectors

Lei Ting Lü Wei-Ming Lü Wen-Xing Cui Bo-Yao Hu Rui Shi Wen-Hua Zeng Zhong-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 027801 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201325

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201325>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于二维材料异质结可饱和吸收体的超快激光器

Ultrafast pulse lasers based on two-dimensional nanomaterial heterostructures as saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 188102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201235>

基于二维材料的全光器件

All-optical devices based on two-dimensional materials

物理学报. 2020, 69(18): 184216 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200654>

低功耗、高灵敏的 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 光电导探测器

$\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ photoconductive detector with low power consumption and high sensitivity

物理学报. 2020, 69(24): 248502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201044>

基于超导纳米线单光子探测器深空激光通信模型及误码率研究

Model of bit error rate for laser communication based on superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2017, 66(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.198501>

二维过渡金属硫化物二次谐波: 材料表征、信号调控及增强

Second harmonic generation of two-dimensional layered materials: characterization, signal modulation and enhancement

物理学报. 2020, 69(18): 184210 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200452>

二维材料/铁电异质结构的研究进展

Research progress and device applications of multifunctional materials based on two-dimensional film/ferroelectrics heterostructures

物理学报. 2020, 69(1): 017301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191486>

综述

光栅局域调控二维光电探测器*

雷挺¹⁾²⁾ 吕伟明¹⁾ 吕文星¹⁾ 崔博垚¹⁾ 胡瑞¹⁾ 时文华^{1)†} 曾中明¹⁾

1) (中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 多功能材料与轻巧系统重点实验室, 苏州 215123)

2) (中国科学技术大学纳米技术与纳米仿生学院, 合肥 230026)

(2020年8月13日收到; 2020年9月3日收到修改稿)

近年来, 二维材料独特的物理、化学和电子特性受到了越来越多的科研人员的关注. 特别是石墨烯、黑磷和过渡金属硫化物等二维材料具有优良的光电性能和输运性质, 使其在下一代光电子器件领域具有广阔的应用前景. 本文将主要介绍二维材料在光电探测领域上的应用优势, 概述光电探测器的基本原理和参数指标, 重点探讨光栅效应与传统光电导效应的区别, 以及提高光增益和光响应度的原因和特性, 进而回顾光栅局域调控在光电探测器中的最新进展及应用, 最后总结该类光电探测器面临的问题及对未来方向的展望.

关键词: 二维材料, 光电探测, 光栅局域调控, 异质结, 内建电场

PACS: 78.66.-w, 78.67.-n, 85.35.-p, 73.61.-r

DOI: 10.7498/aps.70.20201325

1 引言

二维材料^[1]是指电子仅可在两个维度的纳米尺度(1–100 nm)上平面运动的材料. 自从2004年^[2]石墨烯被发现以来, 有关二维材料的研究得到了科学界的广泛关注. 由于石墨烯具有缺陷密度低、易实现大面积转移、制备成本低、比表面积大和载流子迁移率高等优异特性^[3–5], 使它在高频光电探测器中得到了广泛的应用^[6,7]. 但石墨烯具有的零带隙能带结构, 导致光生载流子寿命不高, 在光电探测应用方面受到了很大的限制. 除了石墨烯外, 目前典型的二维材料还包括过渡金属硫化物(TMDs)^[8,9]、黑磷(BP)^[10,11]及六方氮化硼(h-BN)^[12,13]等. 由于它们具有多种电子能带结构, 涵盖了导体、半导体、绝缘体、半金属和超导体等范围, 使其光谱响应包含了从红外到可见光区域, 甚至到紫外光^[14,15]区域. 不仅如此, 二维材料中的载流子在纵向上易被局域场调控, 在横向输运上流子可以被局域场

大幅抑制, 可以实现高信噪比光电探测. 同时, 局域场调控下的光电探测器具有超高的光增益, 可以得到超高的光响应度^[16–18], 使得二维材料成为了光电探测材料中有力的竞争者.

随着光电信息技术的快速发展, 光电探测器已经成为日常生活中不可或缺的一部分, 包括环境监测、光通信、热成像及军事化应用^[7,19]等. 常规的硅基光电探测器^[20,21]在可见到近红外波段占据了当前光电探测器的主导地位, 但是硅基光电探测器的应用也存在着一些限制. 随着硅基半导体的制造技术接近“摩尔定律”的极限, 器件尺寸进一步缩小时, 经典物理理论将不再适用; 硅基探测器对光的吸收率不高和吸收光谱窄也限制了它的广泛应用, 此外硅基光电探测器也难以在柔性器件中^[22,23]应用. 当前对光吸收效率高、宽频谱及柔韧性好的新材料的需求日益增长, 以及对二维材料研究的不断深入, 这些新颖的二维材料为高性能光电探测器的设计和制备提供了新的机遇, 弥补硅基探测器应用上的一些限制. 二维光电探测器^[14,24]技术的突破

* 国家重点研发计划(批准号: 2019YFB2005600)和国家自然科学基金(批准号: 51732010)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: whshi2007@sinano.ac.cn

有望实现柔性化、高性能、宽频谱探测, 在未来光电探测器的应用上有很好的前景。

在本文中, 我们首先介绍光电探测器性能参数指标和光栅局域调控的工作原理; 进而总结了基于光栅效应的二维材料及范德瓦耳斯力异质结的光电探测器应用; 最后对光栅局域调控二维探测器未来的挑战进行简要的总结和展望, 并对光栅局域调控探测器提出了新的结构。

2 光电探测器主要性能参数和光栅局域调控工作原理

光电探测器的关键原理是将吸收的光子转换为电信号^[25]。该光电转换过程通常涉及以下机制: 光电导效应 (photoconductive effect)^[26,27]、光栅效应 (photogating effect)^[28,29]、光伏效应 (photovoltaic effect)^[30,31] 和热电效应 (thermoelectric effect)^[32,33]。

2.1 光电探测器主要性能参数

一般来说, 可以采用一些参数评价光电探测器的性能, 下面将简要介绍这些参数。

光响应度 (R)^[34] 指光电流或光生电压与入射光功率之比。表达式为 $R = I_p/P$ 或 $R = V_p/P$ 。其中 P 为入射光功率, I_p 为光电流, V_p 为光生电压。由于光响应度与入射光波长和入射光的功率有密切的关系, 一般光探测器工作在一个特定的波段范围称为光谱响应特性。

光增益 (G)^[35] 揭示探测器灵敏度的重要指标, 指单位时间内收集的载流子与吸收光子之比。具体计算公式为 $G = R \frac{hc}{e\lambda}$, 其中 h 为普朗克常数, c 为光速, e 为元电荷, λ 为入射光波长。

噪声等效功率 (noise equivalent power, NEP)^[36] 是指带宽为 1 Hz 时, 信噪比达到 1 所需的最小入射光功率, 公式表示为 $NEP = P_1/\Delta f^{1/2}$, 其中 P_1 表示信噪比为 1 时的入射光功率大小, 因此, NEP 的单位为 $W \cdot Hz^{-1/2}$, NEP 的值代表了光电探测器的灵敏度, 也称作最小可探测功率。

探测率 (D^*)^[37] 用于判断的不同结构的光电探测器性能的重要参数, 排除了器件面积和带宽的影响, 用公式表示为 $D^* = (A\Delta f)^{1/2}/NEP$, 其中 A 是探测器有效面积, Δf 为带宽, D^* 的单位为 $cm \cdot Hz^{1/2} \cdot W^{-1}$ 或 Jones。

响应时间 (τ)^[38] 是光电探测器的重要工作参数之一。其中上升时间 (τ_r) 被定义随着时间从 10% 到 90% 净光电流; 下降时间 (τ_f) 被定义随着时间从 90% 到 10% 的净光电流。

2.2 光栅局域调控工作原理

光栅效应是指在光照作用下, 吸收光子产生的电子或空穴处于陷阱态, 电荷陷阱态作为局域光栅对导电沟道进行调制的现象, 如图 1(a) 所示^[39]。

光栅效应是光电导效应的一种特殊情况, 也表现为在光照下电导率的变化。光激发会产生两种载流子, 其中一种载流子会被陷阱捕获, 另一种载流子在导电沟道中进行传输, 被陷阱状态捕获的载流子这时可看作为局部光栅, 来调制沟道的电导率^[40]。若陷阱捕获空穴带正电, 则转移特性曲线左移; 若陷阱捕获电子带负电, 则转移特性曲线右移, 如图 1(b) 所示。因此, 基于光栅效应光电探测器产生的光电流可能小于暗电流, 也可能大于暗电流。根据已报道的文献, 形成 $I_{ds}-V_g$ 转移曲线移动的主要有 3 种

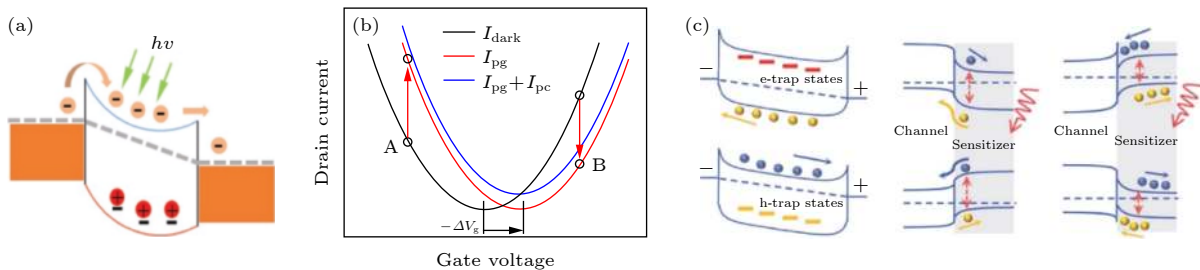


图 1 光栅效应特性 (a) 光栅效应示意图^[39]; (b) 光照后, 转移特性曲线 $I_{ds}-V_g$, 其中, 黑线、红线和蓝线分别代表暗电流、光栅效应下的光电流以及光栅效应和光电导效应的叠加的光电流; (c) 光栅效应器件中的能带排布示意图^[44]。

Fig. 1. The characteristics of the photogating effect: (a) Schematic diagram of the photogating effect^[39]; (b) the $I_{ds}-V_g$ transfer characteristic curve after illumination. The black line, red line and blue line represent dark current, photocurrent of photogating effect, the superimposed photocurrent of photogating effect and photoconductive effect, respectively; (c) schematic diagram of band arrangement in photogating effect devices^[44].

可能的情况,如图 1(c)所示,对于单一材料结构,表面或界面处的陷阱状态的特定空间分布是形成局域光栅的主要原因(如图 1(c)中左图所示).在光照时,这些陷阱状态可以捕获一种类型的光生载流子,并产生局域栅极电场来调制沟道电导.陷阱态的填充与费米能级也有着重要关系,n型沟道主要具有空穴陷阱态,p型沟道主要具有电子陷阱态.对于异质结构而言,通过异质界面的电荷交换(如图 1(c)的中间图)或在界面处的电荷积累(如图 1(c)中右图)会导致 $I_{ds}-V_g$ 转移曲线移动(仅考虑光敏材料作为光栅层). $I_{ds}-V_g$ 转移曲线移动在很大程度上取决于异质结构中的能带排列,界面处的内置电场或光敏层表面附近的能带弯曲可实现有效的电子空穴对分离,并且集中在光栅层的光生载流子来调节导电沟道.

基于光栅效应的光电探测器产生的光电流可能小于暗电流,会出现负电导(negative photoconductance, NPC)^[41,42],如图 1(b)所示,光照后,转移特性曲线向正方向移动,表明由捕获电子引起负栅压($\Delta V_g < 0$).在 A 点和 B 点的光响应行为是完全不同,当器件在 A 点工作时,黑暗中的多数载流子为空穴($g_m < 0$),导致光电流为正;而对于工作点 B,黑暗中的多数载流子是电子($g_m > 0$),光电流为负与公式 $I_{ph} = g_m \Delta V_g$ 相符^[44].如果注入到导电通道中的光生载流子的类型与通道材料的多数载流子的类型相同,或留在光栅层或陷阱状态中的光生载流子的类型与通道材料的多数载流子的类型相反,那么将获得正光电导(positive photoconductance, PPC).

图 1(b)中的 $I_{ds}-V_g$ 曲线的水平移动是十分理想的,在实验中不可能如此均匀,光栅层产生的局部栅压 ΔV_g 与施加的栅极电压具有很大的关系.对于单一材料的沟道,随着费米能级的升高,电子陷阱态将逐渐被电子填充;而当费米能级的下降时,空穴陷阱态将被空穴逐渐填充.因此,在不同的栅极电压下,可用陷阱态数量决定了 ΔV_g 的大小.对于异质结构,栅极电压能够调整异质结能带对准并影响电子空穴对分离效率,也导致了栅极电压与 ΔV_g 的相关性,使得 $I_{ds}-V_g$ 的偏移在实践中不应如此均匀.

NPC 是指在光照的条件下材料的电导下降的现象^[43].由于 NPC 需要多数载流子和多数载流子陷阱状态的共存,导致 NPC 更有可能在异质结

结构中被发现,而不是在单一材料二维探测器中.通常,大多数载流子陷阱状态在光照之前已被大多数载流子填充,使其难以产生明显的光电压,异质结构中的 NPC 现象也成为了光栅效应的有力证据^[44].

3 单一二维材料

与传统半导体相比,由于二维材料的电子被限制在二维的环境中,从而表现出独特的物理、化学和电子特性^[10],在电学和光学器件的应用上显示出了巨大的潜力^[45,46].近几年来,二维材料在光电探测器方面的优异性能,使得二维材料光电探测器的研究层出不穷,刺激了二维材料制备方法的发展,主要为:机械剥离^[47,48]、液相剥离^[49,50]、CVD 生长^[51,52].接下来将对最近几年基于光栅局域调控的二维材料光电探测器的发展状况进行介绍.

3.1 石墨烯光电探测器

Liu 等^[6]设计出超带宽的石墨烯光电探测器,由两层石墨烯夹着薄隧道势垒组成,如图 2(a)所示.与常规的光电晶体管及横向石墨烯器件^[53,54]相比,光生载流子会隧穿进入底层石墨烯,减少了载流子的复合.因此,顶部石墨烯积累了大量载流子,导致较强的光栅效应,对底部石墨烯沟道层进行调控.利用这种结构,实现了从可见光到中红外光的探测范围,器件光响应度超过 1000 A/W.通过改变隧穿层的材料,还可以进一步提高光响应度.现有光电探测器器件受到光栅效应的限制,实现超高光响应度的同时牺牲了响应时间.为解决光栅效应中响应时间慢的问题,Guo 等^[55]采用石墨烯/SiO₂/轻掺杂 Si 结构,如图 2(b)所示,利用界面栅控机制来平衡超快响应和超高响应度之间的差距.SiO₂/Si 之间存在正电荷局部界面态,并在界面附近的硅中感应出负耗尽层,并形成内建电场.光照时,在内建电场作用下,轻掺杂 Si 中的光生电子空穴对被分离,电子聚集在 SiO₂/Si 界面处形成负栅压对石墨烯导电沟道进行调控.利用这个原理,器件能够检测 < 1 nW 的信号,响应度高达 1000 A/W,光响应时间缩短为 400 ns,并且光谱响应范围从可见光扩展到近红外.这项工作为基于石墨烯的高性能光电器件开辟道路,而且在超快微弱信号检测方面也具有巨大潜力.

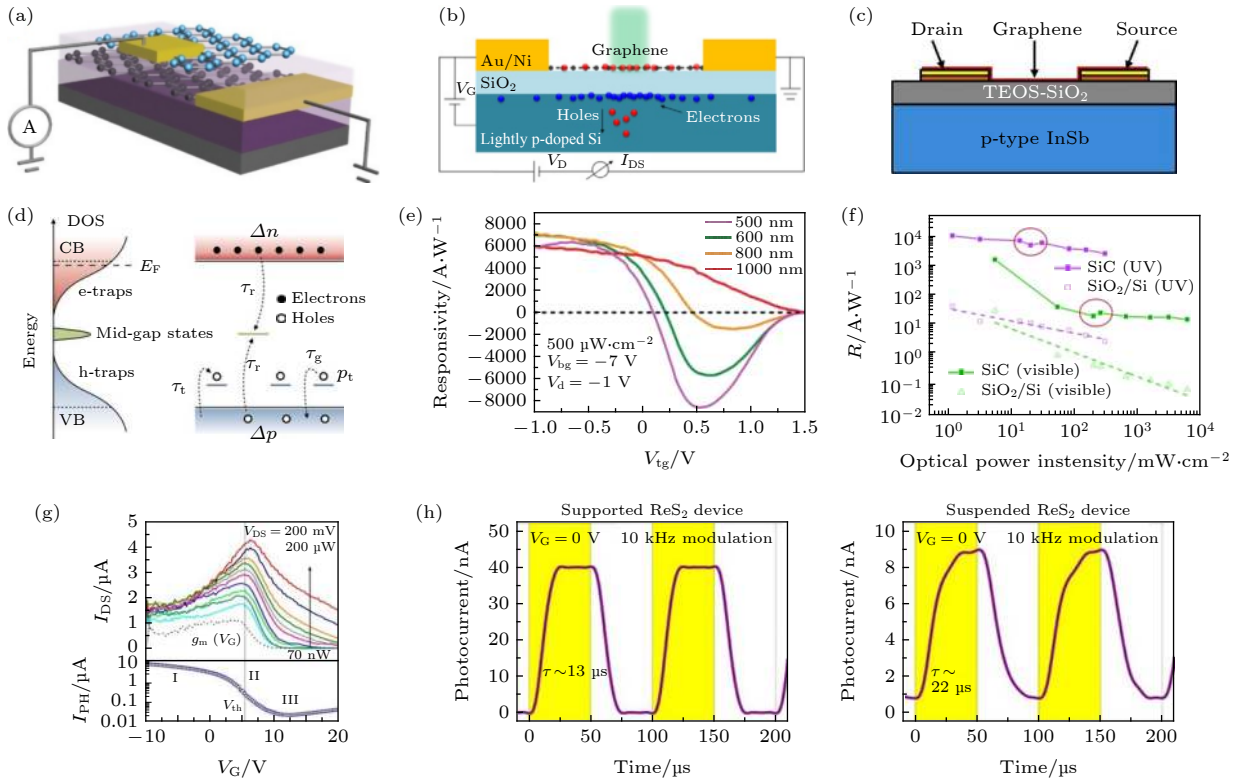


图 2 单一二维材料光电探测器 (a) 双层石墨烯异质结中的光激发热载流子隧穿^[6]; (b) p 型轻掺杂 Si/SiO₂ 衬底上的石墨烯光电探测器的示意图^[55]; (c) p 型 InSb 衬底上石墨烯场效应晶体管的示意图^[59]; (d) 电荷陷阱模型和简化的能带图^[40]; (e) 光响应度与顶栅 V_{tg} 的关系^[65]; (f) 不同衬底下的光响应度^[58]; (g) 在不同入射功率下, 在最大跨导附近实现最大光电流^[35]; (h) 光电流与时间的关系^[67].

Fig. 2. Single two-dimensional material photodetector: (a) Photoexcited hot carrier tunnelling in graphene double-layer heterostructures^[6]; (b) schematic diagram of the graphene photodetector on lightly p-doped silicon/SiO₂ substrate^[55]; (c) schematic diagram of the InSb-based graphene field effect transistor (FET)^[59]; (d) the relationship between photoresponsivity and V_{tg} ^[65]; (f) photoresponsivity under different substrates^[58]; (g) the maximum photocurrent is realized near the maximum transconductance at different incident power^[35]; (h) the relationship between photocurrent and time^[67].

为了进一步提高石墨烯探测器响应度, Howell 等^[56]提出了一种基于深耗尽的石墨烯-绝缘体-半导体的光电探测器. 器件绝缘体层选用 50 nm HfO₂, 由于 HfO₂ 层的介电常数大^[57], 能削弱载流子间的库仑相互作用, 因此减少了载流子散射, 提高了迁移率. 深耗尽的低掺杂硅衬底内产生的光生载流子聚集在半导体/绝缘体界面形成的势阱中, 产生光生栅压对石墨烯场效应晶体管进行调控, 增加导电沟道浓度. 由此产生的器件在可见光波长范围内显示出高达 2500 A/W 响应度. 改变器件衬底也是提升器件性能的方法^[58], Fukushima 等^[59]利用光栅效应制造了基于铟化铟 (InSb) 衬底的中波长红外 (MWIR) 波长的高响应性石墨烯光电探测器, 如图 2(c) 所示. 利用 InSb 响应入射的红外光而生成光生载流子, 产生光生栅压, 调制了石墨烯导电沟道, 并感应出大的光电流. 在 50 K 时实现

了 33.8 A/W 的超高响应度, 为提高光响应度提供了新的思路. Cao 等^[60]设计出混合 InGaAs-SiO₂-石墨烯光电探测器, 此探测器将窄带隙 InGaAs 作为光吸收层, 石墨烯作为透明的沟道传输层. 对比于 InGaAs PIN 光电二极管, 混合结构光电探测器表现出了从紫外到近红外波段的宽频谱响应, 在弱光照下, 光响应度高达 10³ A/W, 响应时间提高到了微秒级别.

3.2 其他光电探测器

除了石墨烯光电探测器外, TMDs 作为典型的二维材料, 具有较大的带隙和适中的载流子迁移率, 适合在电子/光电子器件方面的研究. 其中, MoS₂ 光电探测器在性能方面就表现优异^[40,61-63].

Furchi 等^[40]研究了 MoS₂ 中的光电导机理时, 确认了光栅效应和光电导效应是并存. MoS₂/SiO₂

界面处或附近分子的光生载流子充当额外的栅极电压并导致转移曲线漂移. 同时, 带尾态捕获的多余载流子有助于形成局域光栅, 如图 2(d) 所示. 与光电导相比, 光栅效应的光电流分量幅度较大, 但速度较慢. 同样的现象也被 Kufer 等^[63]发现, 通过控制栅极电压, 可以将 MoS₂ 器件的响应度和时间响应上调几个数量级. 当施加强负 V_g 时, 探测器显示出更快的速度 (毫秒级) 和更高的检测能力, 超过 10^{11} Jones. 尽管已经公认气体吸附物 (例如水和氧气) 会形成电荷陷阱并显著增加响应度和响应时间, 但其潜在机制仍不清楚. Han 等^[64]研究了在真空和暴露空气下, 不同波长的光照下吸附物对 MoS₂ 光电探测器的影响, 表明对于足够短的波长可以激发 MoS₂ 中的电子空穴对, 光照射会导致水和氧分子的分解, 物理吸附的分子提供的光栅是器件光响应的主要因素. 大多数基于光栅效应的探测器对入射强度敏感, 缺乏区分不同波长的能力. Deng 等^[65]提出了一种具有区分波长能力的 MoS₂/HfO₂/SOI 场效应光电晶体管. 该晶体管在 Si 衬底和顶部的 MoS₂ 层均用作光栅层, 来控制该光电晶体管中的中间 Si 沟道层, 可用于分辨率高达 2 nm 的光波长检测. 通过调节这两个栅极上的施加电压, 该器件可用于获得可调谐的双极性光响应, 从 +7000 A/W (Si 底栅为主) 到 0 A/W (平衡), 最后到 -8000 A/W (以 MoS₂ 光栅为主), 如图 2(e) 所示. 因此, 实验结果表明, 随着入射波长的增加, 零光响应度 (0 A/W) 点的顶栅电压也相应正向移动, 并且对入射强度不敏感. Zhang 等^[58]也提出了“双重光栅效应”, 改变器件衬底, 使用禁带宽度更大的 SiC, 在 325 nm 波长光照下, 获得了高达 10^4 A/W 的响应度, 增益约为 4×10^4 , 如图 2(f) 所示. 不仅如此, 使用柔性聚酰亚胺 (kapton) 膜, 光响应度也有 319 A/W, 增益约为 1.2×10^3 , 探测率高达 4.5×10^{11} Jones, 开关比高达 10^5 , 在柔性器件领域提供了思路. Tu 等^[66]通过在栅极介质层中插入铁电 Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ 层, 利用铁电局域静电场引起的强光栅效应和铁电负电容效应, 实现了 4.75×10^{14} cm²·Hz^{1/2}·W⁻¹ 的超高光电探测率.

除了 MoS₂ 之外, 还有很多其他二维材料例如 BP 和 ReS₂ 等也在光电器件中使用光栅效应来加强光响应度. Guo 等^[17]利用光栅效应实现了具有高增益的 MIR BP 光电探测器. 光电探测器的光

电流在阈值电压附近的最大跨导点处达到峰值, 这与公式 $I_{ph} = g_m \Delta V_g$ 一致, 如图 2(g) 所示, 也意味着这是光栅效应主要的位置. 实验表明在 3.39 μ m 波长下, 探测器具有很高的内部增益, 光响应度达到 82 A/W. Thakar 等^[67]制作了两种 ReS₂ 光电探测器, 一种 ReS₂ 和 SiO₂ 衬底直接接触, 另一种 ReS₂ 悬空在 SiO₂ 衬底上. 他们对直接接触和悬空的 ReS₂ 光电晶体管的响应速度和响应速度的体系结构, 激光功率和栅极偏置依赖性进行了全面研究. 尽管悬空会导致栅极调控能力的削弱, 但界面缺陷的减少使之能达到和前者相同的响应速度. 通过栅极电压的调节, 两种结构的器件的光响应度均能达到约 4 A/W, 响应时间最短能达到 20 μ s, 如图 2(h) 所示, 是目前为止速度最快的光电探测器.

4 范德瓦耳斯异质结

4.1 与石墨烯构成的异质结

自从 2004 年石墨烯被发现以来, 多种二维材料不断被发现, 研究人员对二维材料的研究也不断深入, 这些新颖的二维材料为高性能光电器件的设计和制备提供了新的机遇, 特别在光电探测器方面^[68]. 在室温下, 石墨烯的光电响应波段可以到中波红外^[69–71]乃至到太赫兹波段^[72], 其具有超高的载流子迁移率, 超过 15000 cm²·V⁻¹·s⁻¹^[73] 可用于制作超快响应速度的射频器件. 但是石墨烯作为光电探测器, 受到厚度的限制, 对光的吸收不高, 因此光响应率一直都不是很高, 在几到几十 A/W 的量级^[74–76]. 另外石墨烯的零带隙和高导电率, 使得暗电流较大, 探测率也会大大降低. 在如何充分利用石墨烯迁移率高、吸收波段宽等优势, 而又解决石墨烯探测器光响应度不高、暗电流大等劣势, 利用光栅局域调控在解决这些问题上起着很大作用.

光增益 $G = \tau_{life}/\tau_{tra}$ 很大程度上取决于载波传输时间, 可以通过更短的沟道长度, 更大的偏置电压及更高的载流子迁移率来提高. 为了更高的增益, 石墨烯的超高迁移率是作为导电沟道的最佳选择. 2013 年, Roy 等^[77]利用石墨烯和 MoS₂ 的异质结结构设计了具有超高响应度的光电器件, 如图 3(a) 所示. 其中石墨烯充当导电通道, MoS₂ 充当局域光栅层. 在负偏压下, 界面处的能级对齐, 光激发电子转移到石墨烯, 空穴仍留在 MoS₂ 中形成光栅层. 在室温下, 器件光响应度达到 5×10^8 A/W,

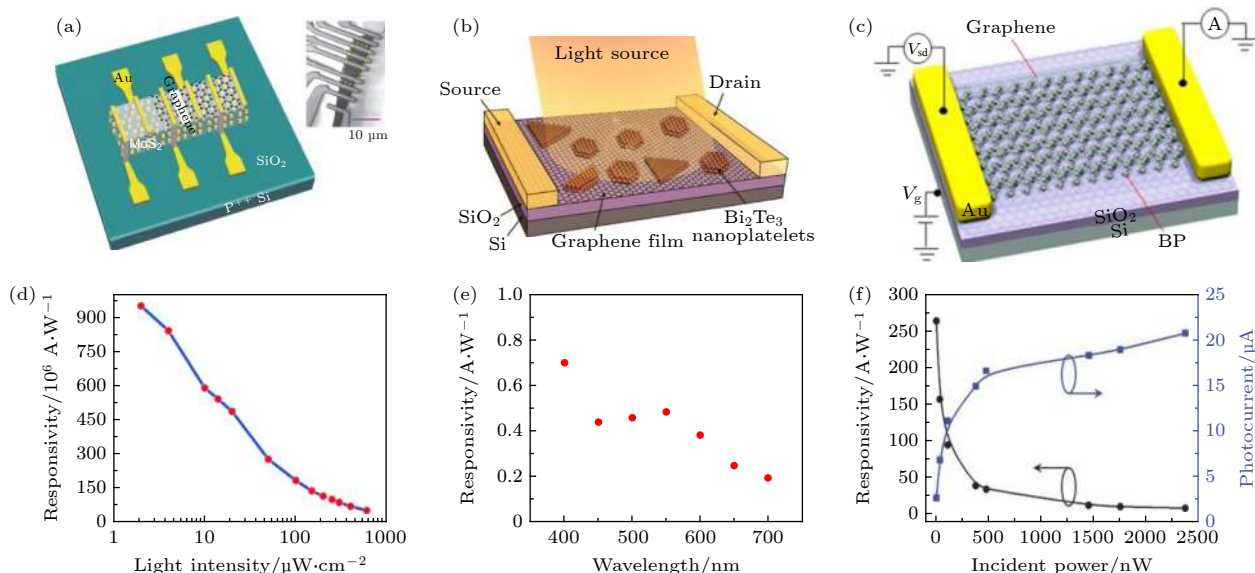


图3 石墨烯异质结光电探测器: (a) 石墨烯/MoSe₂异质结光电探测器的示意图; (b) 石墨烯/Bi₂Te₃异质结光电探测器的示意图; (c) 石墨烯/BP异质结光电探测器的示意图; (d) 光响应度与光照强度的关系; (e) 光响应度与波长的关系 ($V_D = -3$ V, $V_G = -30$ V); (f) 在波长为980 nm, 光电流和光响应随入射光强的关系 ($V_{DS} = 1$ V, $V_G = 0$ V).

Fig. 3. The photodetectors based on graphene heterostructures: (a) Schematic of device architecture graphene/MoSe₂ photodetector^[77]; (b) schematic of the heterostructure phototransistor device^[78]; (c) graphene/BP heterostructure photodetector^[82]; (d) the relationship between photoresponsivity and light intensity^[89]; (e) responsivity as a function of the wavelength ($V_D = -3$ V, $V_G = -30$ V)^[85]; (f) photocurrent and photoresponsivity versus incident light power at 980 nm. ($V_{DS} = 1$ V, $V_G = 0$ V)^[86].

在温度为 130 K 时, 其光响应度高达到 10^{10} A/W. Qiao 等^[78]设计的石墨烯-Bi₂Te₃异质结光电探测器具有从可见光到近红外波长宽带的光电检测能力, 如图 3(b) 所示, 是纯单层石墨烯器件光响应度的 1000 倍左右, 达到几十 A/W 的量级, 光增益达到 83 左右, 更重要的是, 器件拥有较快的光响应速度, 上升时间只有 8.7 ms. Kim 等^[38]使用 CVD 方法生长石墨烯, 用 MBE 合成 Bi₂Se₃^[79,80], 设计出石墨烯-Bi₂Se₃异质结新型中红外光电探测器. 通过在窄带隙 Bi₂Se₃ 拓扑绝缘体对中红外和红外光子的宽频谱吸收和石墨烯-Bi₂Se₃ 界面处的光栅效应对光生载流子进行分离提高了响应光谱范围和光响应度, 在中红外波段和近红外波段, 光响应度分别达到 1.97 A/W 和 8.18 A/W. Xu 等^[81]使用直接带隙的多层 BP 作为增强的光吸收材料, 设计了石墨烯-黑磷 (BP) 异质结光电探测器. 在内建电场作用下, 光激发电子进入 BP 作为光栅层, 空穴流入石墨烯层进行导电传输. 在 655 nm 波长处光响应度达到 55.75 A/W, 在 785 nm 波长处光响应度达到 1.82 A/W. 同样的, Liu 等^[82]采用 CVD 合成及干法转移的方法实现了超快响应、性能稳定的石墨烯/BP 红外波长的光电探测器, 器件中的顶层的石墨烯不仅充当封装层, 而且还充当高效率

的载流子传输层, 如图 3(c) 所示. 石墨烯-BP 异质结光电探测器在近红外波长 (1550 nm) 处表现出的超高的光响应, 达到 3.3×10^3 A/W, 光增益高达 1.13×10^9 , 上升响应时间也只有 4 ms. Liu 等^[83]设计的石墨烯/MoSe₂ 光电探测器同样获得超高光响应, 在 550 nm 波长处高达 1.3×10^4 A/W. Lan 等^[84]在单层石墨烯上用 CVD 生长 WS₂ 构成石墨烯-WS₂ 范德瓦耳斯异质结. 由于石墨烯-WS₂ 界面的内建电场, 有效地分离了光生电子空穴对, 让探测器显示出了更高光响应度, 在 405 nm 波长处光响应度达到 950 A/W, 如图 3(d) 所示, 在 340—680 nm 范围内具有宽光谱响应. 利用多层 ReS₂ 具有直接带隙, 吸光率高的特点, Kang 等^[85]采用堆叠方法设计了石墨烯-ReS₂ 异质结光电探测器. 由于 ReS₂ 作为光吸收层引起光栅效应, 器件在偏压为 -3 V, 栅压为 -30 V 和 400 nm 光照下达到最大光响应度为 7×10^5 A/W, 如图 3(e) 所示, 对应的外量子效率高达 $2.2 \times 10^{8\%}$, 探测率为 1.6×10^{13} Jones 和只有 30 ms 的快速响应时间, 比单纯的 ReS₂ 探测器高 3 个数量级, 说明了光栅效应能够明显提高光电流的产生. 将探测器结构中的 ReS₂ 光栅层替换为 MoTe₂, Yu 等^[86]获得高效的近红外探测器, 电子被局域在 MoTe₂ 中引起光栅效应, 使器件表现

表 1 基于石墨烯异质结 (Gr) 的光栅局域调控光电探测器
Table 1. Graphene(Gr)-based photodetectors with grating photogating.

Material	Responsivity/(A·W ⁻¹)	Gain	Response time/ms	Detection range/nm	Ref.
Gr/MoSe ₂	1.3 × 10 ⁴	—	22000.0	550	[83]
Gr/MoTe ₂	970.82	4.69 × 10 ⁸	78.0	1064	[86]
Gr/ReS ₂	7 × 10 ⁵	—	30.0	550 nm	[85]
Gr/WS ₂	950	—	—	340–680 nm	[84]
Gr/MoS ₂	10 ⁷	10 ⁸	—	650	[87]
Gr/BP	55.75	—	36.0	655	[82]
Gr/BiI ₃	6 × 10 ⁶	—	8.0	532	[88]
Gr/PbSe	6613	7824	25.0	—	[16]
Gr/Bi ₂ Te ₃	35	83	8.7	532–1550	[78]
Gr/MoS ₂	5 × 10 ⁸	—	—	635	[77]
Gr/Bi ₂ Se ₃	8.18	—	—	near-IR 750–2500	[38]

出极高光增益达到 4.69×10^8 和探测率达到 1.55×10^{11} Jones. 不仅如此, 该器件拥有高带宽光电检测从可见光到 1064 nm, 特别是在 1064 nm 波长下, 光响应达到 970.82 A/W, 如图 3(f) 所示. 此外, 在易弯曲基板上仍保持良好的光电检测能力, 在 $V_D = 1$ V, 1064 nm 处具有 60 A/W 的高响应度, 它为高效, 柔性, 低成本的高宽带近红外光电探测器提供了方向. 另外, 这里列举了近些年基于石墨烯异质结 (Gr) 的光栅局域调控光电探测器的文章, 在光响应度、增益和响应速度方面比石墨烯光电探测器都有明显提高, 如表 1 所示.

4.2 不同二维材料构成的异质结

4.1 节主要介绍了基于石墨烯的异质结光电探测器, 接下来将讨论其他非石墨烯异质结的光电性能. 利用 pn 异质结构成的强烈内建电场可有效地分离光生电子空穴, 缩短响应时间的同时, 还可以用静电作用调控载流子的浓度及能带结构来提高光电探测器的性能.

Qi 等 [89] 采用两次 CVD 生长的方法实现了超快响应、性能稳定的 PbI₂/WS₂ 红外波长的光电探测器, 如图 4(a) 所示, 其中顶层的 PbI₂ 既为封装层也为载流子传输层, WS₂ 作为光栅层来调节载流子浓度. 由于 pn 异质结中的强烈的内建电场, 加速了光激发电子-空穴对的分离和抑制了光生载流子的复合, 从而导致高达 5.57×10^2 A/W 的光响应性, 上升时间和衰减时间也分别只有 24 ms 和 33 ms, 如图 4(b) 所示. 其中, 光响应度是其他气相生长垂直 pn 异质结构中的最高值, 与单纯 PbI₂

相比, PbI₂/WS₂ 异质结光电探测器的光响应性提高了 3 个数量级. 此外, 在施加 -60 V 的栅极电压偏置时, 可将其进一步提高至 7.1×10^4 A/W; 在栅极电压为 -40 V 时, 探测率超过 4.9×10^{13} Jones. Yang 等 [90] 利用 CVD 制备了毫米级大尺寸 WSe₂/SnS₂ 纵向双层异质结, 如图 4(c) 所示. Krause 等 [91] 用第一性原理计算出的双层 WSe₂/SnS₂ 异质结构的相对能带排列. 由于异质结中 WSe₂ 的价带高于 SnS₂ 的导带, 形成了 III 型断裂能带结构 [92], 如图 4(d) 所示, 抑制了光生载流子的复合, 从而提高了光响应度. 他们利用多电极的背栅场效应晶体管, 测出 3 种不同工作模式: 纯 WSe₂ 晶体管、WSe₂/SnS₂ 串联晶体管及 WSe₂/SnS₂ 并联晶体管. 其中, 串联模式 WSe₂/SnS₂ pn 结具有极低的漏电流, 只有 10^{-14} A, 开关比高达 10^7 . 在光电方面, 串联模式 WSe₂/SnS₂ 异质结光响应性为 108.7 mA/W, 探测率为 4.71×10^{10} Jones 和响应速度为 500 μs. 相较于文献所报道的 CVD 生长的纵向异质结探测器, 其光电性能有了一定的提升, 甚至优于部分机械剥离堆叠而成的异质结光电探测器. Ye 等 [93] 以 BP 为光敏层、WSe₂ 为沟道层, 制备出了纵向光栅结构的 BP/WSe₂ 的高带宽光电探测器, 如图 4(e) 所示. 在光激发条件下, BP 和 WSe₂ 都可以产生光生载流子, 内建电场促使 BP 中的光生电子转移到 WSe₂ 中, 导致沟道材料 WSe₂ 中更多的电子被收集从而形成更大的光电流. 而 WSe₂ 中的光生空穴被内建电场转移到 BP 中并留在 BP, 作为光栅对沟道进行调制. 室温下可见光和红外光响应率分别可以达到 10^3 和 5×10^{-1} A/W, 探测

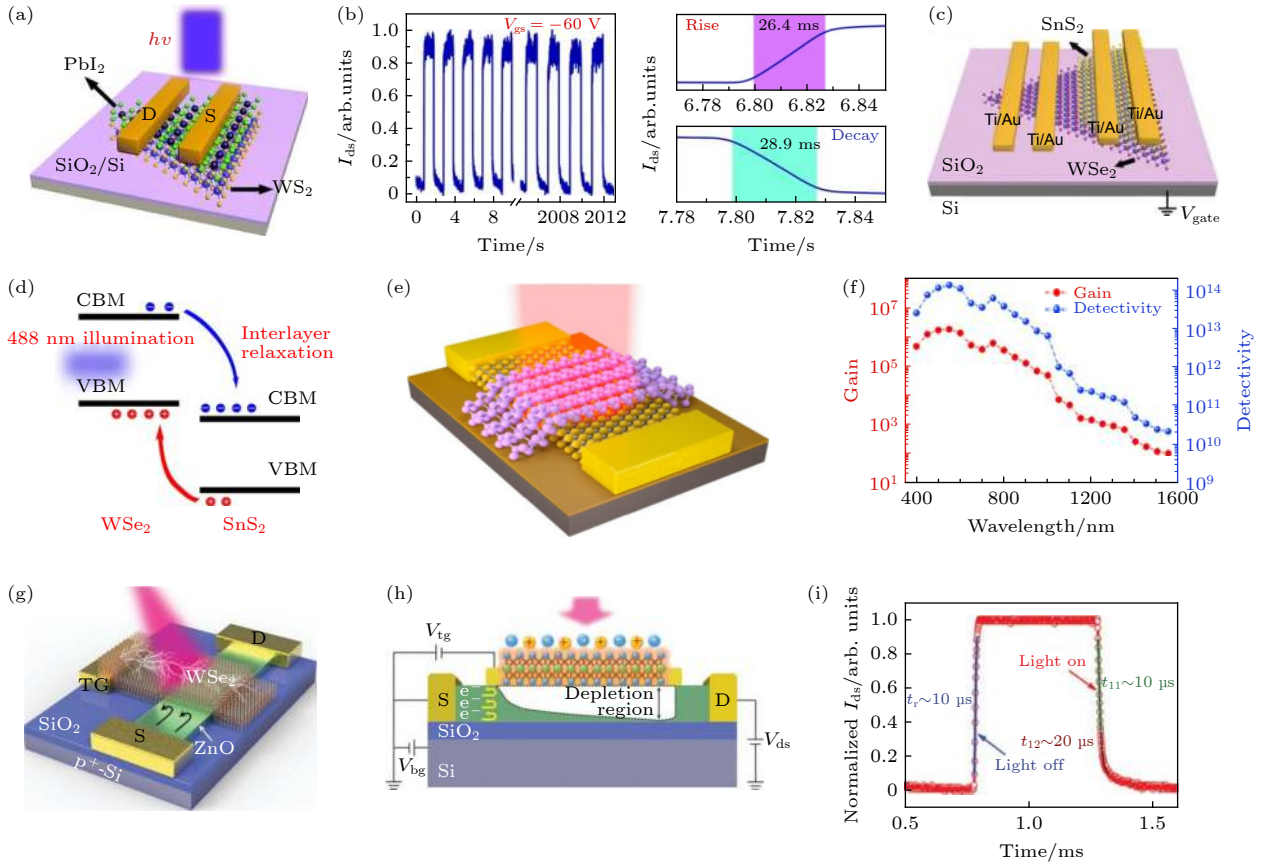


图 4 基于光栅效应的PN异质结光电探测器 (a) PbI₂/WS₂异质结构光电探测器; (b) PbI₂/WS₂光电探测器的光响应时间^[89]; (c) WSe₂/SnS₂多电极异质结构背栅器件的示意图; (d) WSe₂/SnS₂异质结的能带结构和光激发、层间弛豫过程的示意图^[90]; (e) 基于光栅效应的WSe₂/BP光电探测器示意图; (f) 在1 mW/cm²的入射功率密度和0.5 V偏置下, 光增益G和探测率D对 不同波长照明的依赖关系^[93]; (g) 在637 nm光照下器件的示意图; (h) 顶栅电极侧面和重叠区域之间形成导电通道 V_{tg}; (i) 一个 调制周期: 上升时间为10 μs、下降时间为10 μs的快速分量和20 μs的慢速分量组成^[94].

Fig. 4. PN heterojunction photodetector based on photogating effect: (a) Schematic device structure of PbI₂/WS₂ photodetector fabricated on SiO₂/Si substrate; (b) time-resolved photoresponse of PbI₂/WS₂ phototransistors^[89]; (c) schematic diagram of the multi-electrode WSe₂/SnS₂ vdW heterostructure backgate device; (d) schematic diagram of WSe₂/SnS₂ heterostructure band structure and photoexcitation, interlayer relaxation process in WSe₂/SnS₂ heterojunction^[90]; (e) schematic illustration of the BP on WSe₂ photodetector with photogate structure; (f) the dependence of the photogain G and detectivity D^* on the different wavelength illumination at 1 mW/cm² incident illumination power density and 0.5 V bias^[93]; (g) schematic illustration of the device in the dark under 637 nm illumination; (h) a conductive path for V_{tg} is formed between side top-gate electrode and overlapped region; (i) a single modulation cycle The rise time is $\approx 10 \mu s$ The fall time consists of a fast component of $\approx 10 \mu s$ and a slow component of $\approx 20 \mu s$ ^[94].

率分别高达 10^{14} 和 10^{10} Jones, 如图 4(f) 所示. 器件利用 BP 具有各向异性^[10] 特点, 测得器件在 1550 nm 波长下偏振依赖光响应度最大约 40 mA/W, 其入射光沿水平轴偏振 (定义为 0°); 最小响应度约 68 mA/W, 其偏振方向沿竖直方向 (定义为 90°), 器件表现为比较敏感的极化红外光照探测. Guo 等^[94] 提出一种新结构, 通过引入陷阱层来提高增益, 实现了超高的光响应度, 如图 4(g) 所示. 光照时, p 型 WSe₂ 纳米片作为光敏栅极提供外部电压对 ZnO 导电沟道内的耗尽区域进行调制, 如图 4(h) 所示. 其中, 光电探测器的增益和响应时间分别由

场效应调制和光驱动晶体管的转换速度确定, 利用此机制光电探测器的光响应度和增益分别达到 4.83×10^3 A/W 和 10^4 , 同时, 也得到了较快的响应时间为 10 μs, 如图 4(i) 所示.

5 总结和展望

本文主要阐述了光栅效应形成的原因和特性, 总结了二维材料及其异质结在光栅局域调控方面的最新研究进展. 虽然近几年关于光栅局域调控在二维光电探测器中的研究不断取得突破, 利用此效应制备的光电探测器的性能也有显著提高, 但依然

存在着一些问题需要去解决. 目前绝大部分二维材料都是通过机械剥离获得, 无法大规模制备, 与实际应用要求还有较大的差距; 光栅局域调控的二维光电探测器在高光响应度和高响应速度上依旧难以同时获得.

为了解决以上问题, 未来可在以下方面进行探究: 优化材料的合成方式, 实现能规模化制备的方法; 改善器件结构, 可将石墨烯和 pn 异质结结合起来, 利用石墨烯的高迁移率获得高增益和高响应度, 同时 pn 结中的内建电场加速电子空穴对的分离与复合提高响应速度, 如图 5 所示, 进一步去提高二维光电探测器的性能. 总的来说, 光栅局域调控在改善二维光电探测器性能有着优异的表现, 在未来光电探测器应用上有着巨大潜力.

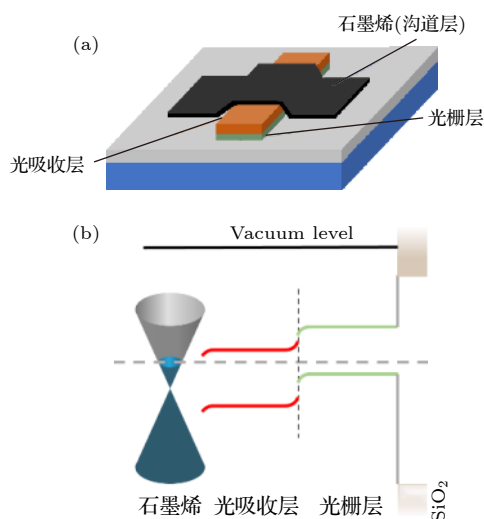


图 5 基于光栅效应的光电探测器新结构 (a) 器件结构示意图; (b) 器件结构能带图

Fig. 5. New structure of photodetector based on photogating effect: (a) Schematic diagram of device structure; (b) schematic diagram of energy band structure.

参考文献

- [1] Novoselov K S, Mishchenko A, Carvalho A, Castro Neto A H 2016 *Science* **355** aac9439
- [2] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Katsnelson M I, Grigorieva I V, Dubonos S V, Firsov A A 2005 *Nature* **438** 197
- [3] Novoselov K S, Jiang Z, Zhang Y, Morozov S V, Stormer H L, Zeitler U, Maan J C, Boebinger G S, Kim P, Geim A K 2007 *Science* **315** 1379
- [4] Butler S Z, Hollen S M, Cao L, Cui Y, Gupta J A, Gutierrez H R, Heinz T F, Hong S S, Huang J, Ismach A F, Johnston Halperin E, Kuno M, Plashnitsa V V, Robinson R D, Ruoff R S, Salahuddin S, Shan J, Shi L, Spencer M G, Terrones M, Windl W, Goldberger J E 2013 *ACS Nano* **7** 2898
- [5] Geim A K 2009 *Science* **324** 1530
- [6] Liu C H, Chang Y C, Norris T B, Zhong Z 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 273
- [7] Koppens F H, Mueller T, Avouris P, Ferrari A C, Vitiello M S, Polini M 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 780
- [8] Wang Q H, Kalantar Zadeh K, Kis A, Coleman J N, Strano M S 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 699
- [9] Choi W, Choudhary N, Han G H, Park J, Akinwande D, Lee Y H 2017 *Mater. Today* **20** 116
- [10] Chen P, Li N, Chen X, Ong W J, Zhao X 2017 *2D Materials* **5** 014002
- [11] Guo Z, Chen S, Wang Z, Yang Z, Liu F, Xu Y, Wang J, Yi Y, Zhang H, Liao L, Chu P K, Yu X F 2017 *Adv. Mater.* **29** 1703811
- [12] Brar V W, Jang M S, Sherrott M, Kim S, Lopez J J, Kim L B, Choi M, Atwater H 2014 *Nano Lett.* **14** 3876
- [13] Liu L, Feng Y P, Shen Z X 2003 *Phys. Rev. B* **68** 104102
- [14] Wang J, Fang H, Wang X, Chen X, Lu W, Hu W 2017 *Small* **13** 1700894
- [15] Zhang H 2015 *ACS Nano* **9** 9451
- [16] Ren Y X, Dai T J, He B, Liu X Z 2019 *Ieee Electron Device Lett.* **40** 48
- [17] Guo Q S, Pospischil A, Bhuiyan M, Jiang H, Tian H, Farmer D, Deng B C, Li C, Han S J, Wang H, Xia Q F, Ma T P, Mueller T, Xia F N 2016 *Nano Lett.* **16** 4648
- [18] Li L, Wang W K, Chai Y, Li H Q, Tian M L, Zhai T Y 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1701011
- [19] Li J, Niu L, Zheng Z, Yan F 2014 *Adv. Mater.* **26** 5239
- [20] Park H S, Ha T J, Hong Y, Lee J H, Lee B J, You B H, Kim N D, Han M K 2008 *JSID* **16** 1165
- [21] Aiello A, Hoque A K M H, Baten M Z, Bhattacharya P 2019 *ACS Photonics* **6** 1289
- [22] Son D I, Kim T W, Shim J H, Jung J H, Lee D U, Lee J M, Park W I, Choi W K 2010 *Nano Lett.* **10** 2441
- [23] Gwon H, Kim H S, Lee K U, Seo D H, Park Y C, Lee Y S, Ahn B T, Kang K 2011 *Energy Environ. Sci.* **4** 1277
- [24] Long M, Wang P, Fang H, Hu W 2018 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1803807
- [25] Colace L, Masini G, Galluzzi F, Assanto G, Capellini G, Di Gaspere L, Palange E, Evangelisti F 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 3175
- [26] Petritz R L 1956 *APS* **104** 1508
- [27] Jie J S, Zhang W J, Jiang Y, Meng X M, Li Y Q, Lee S T 2006 *Nano Lett.* **6** 1887
- [28] Huang H, Wang J, Hu W, Liao L, Wang P, Wang X, Gong F, Chen Y, Wu G, Luo W, Shen H, Lin T, Sun J, Meng X, Chen X, Chu J 2016 *Nanotechnology* **27** 445201
- [29] Rubinelli F A 2016 *Thin Solid Films* **619** 102
- [30] Kondo T, Hayafuji J J, Munekata H 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** L663
- [31] Ellsworth D, Lu L, Lan J, Chang H, Li P, Wang Z, Hu J, Johnson B, Bian Y, Xiao J, Wu R, Wu M 2016 *Nature Phys.* **12** 861
- [32] Xu X, Gabor N M, Alden J S, Van Der Zande A M, McEuen P L 2010 *Nano Lett.* **10** 562
- [33] Buscema M, Barkelid M, Zwiller V, Van Der Zant H S J, Steele G A, Castellanos Gomez A 2013 *Nano Lett.* **13** 358
- [34] Huang M, Wang M, Chen C, Ma Z, Li X, Han J, Wu Y 2016 *Adv. Mater.* **28** 3481
- [35] Island J O, Blanter S I, Buscema M, van der Zant H S J, Castellanos Gomez A 2015 *Nano Lett.* **15** 7853
- [36] Murali K, Abraham N, Das S, Kallatt S, Majumdar K 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 30010
- [37] Zhou X, Hu X, Zhou S, Song H, Zhang Q, Pi L, Li L, Li H,

- Lu J, Zhai T 2018 *Adv. Mater.* **30** 1703286
- [38] Kim J, Park V, Jang H, et al. 2017 *ACS Photonics* **4** 482
- [39] Wang F, Zhang Y, Gao Y, Luo P, Su J, Han W, Liu K, Li H, Zhai T 2019 *Small* **15** e1901347
- [40] Furchi M M, Polyushkin D K, Pospischil A, Mueller T 2014 *Nano Lett.* **14** 6165
- [41] Zhu J L, Zhang G, Wei J, Sun J L 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 123117
- [42] Lui C H, Frenzel A J, Pilon D V, Lee Y H, Ling X, Akselrod G M, Kong J, Gedik N 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 166801
- [43] Nakanishi H, Bishop K J, Kowalczyk B, Nitzan A, Weiss E A, Tretiakov K V, Apodaca M M, Klajn R, Stoddart J F, Grzybowski B A 2009 *Nature* **460** 371
- [44] Fang H H, Hu W D 2017 *Adv. Sci.* **4** 1700323
- [45] Wang L, Zou X, Lin J, Jiang J, Liu Y, Liu X, Zhao X, Liu Y F, Ho J C, Liao L 2019 *ACS Nano* **13** 4804
- [46] Deng Y, Luo Z, Conrad N J, Liu H, Gong Y, Najmaei S, Ajayan P M, Lou J, Xu X, Ye P D 2014 *ACS Nano* **8** 8292
- [47] Zhu W, Yogeesh M N, Yang S, Aldave S H, Kim J S, Sonde S, Tao L, Lu N, Akinwande D 2015 *Nano Lett.* **15** 1883
- [48] Schütz M, Maschio L, Karttunen A J, Usvyat D 2017 *J. Phys. Chem. Lett.* **8** 1290
- [49] Sun L, Lin Z, Peng J, Weng J, Huang Y, Luo Z 2015 *Sci. Rep.* **4** 4794
- [50] Hanlon D, Backes C, Doherty E, et al. 2015 *Nat. Commun.* **6** 8563
- [51] Smith J B, Hagaman D, Ji H F 2016 *Nanotechnology* **27** 215602
- [52] Reina A, Jia X, Ho J, Nezich D, Son H, Bulovic V, Dresselhaus M S, Kong J 2009 *Nano Lett.* **9** 30
- [53] Liu C H, Dissanayake N M, Lee S, Lee K, Zhong Z 2012 *ACS Nano* **6** 7172
- [54] Gabor N M, Song J C W, Ma Q, Nair N L, Taychatanapat T, Watanabe K, Taniguchi T, Levitov L S, Jarillo Herrero P 2011 *Science* **334** 648
- [55] Guo X, Wang W, Nan H, Yu Y, Jiang J, Zhao W, Li J, Zafar Z, Xiang N, Ni Z, Hu W, You Y, Ni Z 2016 *Optica* **3** 1066
- [56] Howell S W, Ruiz I, Davids P S, Harrison R K, Smith S W, Goldflam M D, Martin J B, Martinez N J, Beechem T E 2017 *Sci. Rep.* **7** 14651
- [57] Yu X, Dong Z, Liu Y, Liu T, Tao J, Zeng Y, Yang J K W, Wang Q J 2016 *Nanoscale* **8** 327
- [58] Zhang K, Peng M, Yu A, Fan Y, Zhai J, Wang Z L 2019 *Mater. Horizons* **6** 826
- [59] Fukushima S, Shimatani M, Okuda S, Ogawa S 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 061102
- [60] Cao G, Wang F, Peng M, Shao X, Yang B, Hu W, Li X, Chen J, Shan Y, Wu P, Hu L, Liu R, Gong H, Cong C, Qiu Z J 2020 *Adv. Electron. Mater.* **6** 1901007
- [61] Zhang W, Huang J K, Chen C H, Chang Y H, Cheng Y J, Li L J 2013 *Adv. Mater.* **25** 3456
- [62] Miller B, Parzinger E, Vernickel A, Holleitner A W, Wurstbauer U 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 122103
- [63] Kufer D, Konstantatos G 2015 *Nano Lett.* **15** 7307
- [64] Han P, Adler E R, Liu Y J, St Marie L, El Fatimy A, Melis S, Van Keuren E, Barbara P 2019 *Nanotechnology* **30** 284004
- [65] Deng J N, Zong L Y, Zhu M S, Liao F Y, Xie Y Y, Guo Z X, Liu J, Lu B R, Wang J L, Hu W D, Zhou P, Bao W Z, Wan J 2019 *Adv. Funct. Mater.* **19** 06242
- [66] Tu L, Cao R, Wang X, Chen Y, Wu S, Wang F, Wang Z, Shen H, Lin T, Zhou P, Meng X, Hu W, Liu Q, Wang J, Liu M, Chu J 2020 *Nat. Commun.* **11** 101
- [67] Thakar K, Mukherjee B, Grover S, Kaushik N, Deshmukh M, Lodha S 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 36512
- [68] Velický M, Bradley D F, Cooper A J, Hill E W, Kinloch I A, Mishchenko A, Novoselov K S, Patten H V, Toth P S, Valota A T, Worrall S D, Dryfe R A W 2014 *ACS Nano* **8** 10089
- [69] Zhang B Y, Liu T, Meng B, Li X, Liang G, Hu X, Wang Q J 2013 *Nat. Commun.* **4** 1811
- [70] Freitag M, Low T, Zhu W, Yan H, Xia F, Avouris P 2013 *Nat. Commun.* **4** 1951
- [71] Echtermeyer T J, Britnell L, Jasnó P K, Lombardo A, Gorbachev R V, Grigorenko A N, Geim A K, Ferrari A C, Novoselov K S 2011 *Nat. Commun.* **2** 458
- [72] Low T, Avouris P 2014 *ACS Nano* **8** 1086
- [73] Novoselov K S, Jiang D, Schedin F, Booth T J, Khotkevich V V, Morozov S V, Geim A K 2005 *PNAS* **102** 10451
- [74] Xia F, Mueller T, Golizadeh Mojarad R, Freitag M, Lin Y M, Tsang J, Perebeinos V, Avouris P 2009 *Nano Lett.* **9** 1039
- [75] Liu Y, Cheng R, Liao L, Zhou H, Bai J, Liu G, Liu L, Huang Y, Duan X 2011 *Nat. Commun.* **2** 579
- [76] Furchi M, Urich A, Pospischil A, Lilley G, Unterrainer K, Detz H, Klang P, Andrews A M, Schrenk W, Strasser G, Mueller T 2012 *Nano Lett.* **12** 2773
- [77] Roy K, Padmanabhan M, Goswami S, Sai T P, Ramalingam G, Raghavan S, Ghosh A 2013 *Nature Nanotech.* **8** 826
- [78] Qiao H, Yuan J, Xu Z, Chen C, Lin S, Wang Y, Song J, Liu Y, Khan Q, Hoh H Y, Pan C X, Li S, Bao Q 2015 *ACS Nano* **9** 1886
- [79] Wang N, West D, Duan W, Zhang S B 2019 *Nanoscale Adv.* **1** 470
- [80] Liu Y, Weinert M, Li L 2012 *APS* **108** 115501
- [81] Xu J, Song Y J, Park J H, Lee S 2018 *Solid State Electron.* **144** 86
- [82] Liu Y, Shivananju B N, Wang Y, Zhang Y, Yu W, Xiao S, Sun T, Ma W, Mu H, Lin S, Zhang H, Lu Y, Qiu C W, Li S, Bao Q 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 36137
- [83] Liu B Y, You C Y, Zhao C, Shen G L, Liu Y W, Li Y F, Yan H, Zhang Y Z 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 020002
- [84] Lan C, Li C, Wang S, He T, Zhou Z, Wei D, Guo H, Yang H, Liu Y 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 1494
- [85] Kang B, Kim Y, Yoo W J, Lee C 2018 *Small* **14** 1802593
- [86] Yu W, Li S, Zhang Y, Ma W, Sun T, Yuan J, Fu K, Bao Q 2017 *Small* **13** 1700268
- [87] Zhang W, Chuu C P, Huang J K, Chen C H, Tsai M L, Chang Y H, Liang C T, Chen Y Z, Chueh Y L, He J H, Chou M Y, Li L J 2014 *Sci. Rep.* **4** 3826
- [88] Chang P H, Li C S, Fu F Y, Huang K Y, Chou A S, Wu C I 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1800179
- [89] Qi Z Y, Yang T F, Li D, Li H L, Wang X, Zhang X H, Li F, Zheng W H, Fan P, Zhuang X J, Pan A L 2019 *Mater. Horizons* **6** 1474
- [90] Yang T, Zheng B, Wang Z, Xu T, Pan C, Zou J, Zhang X, Qi Z, Liu H, Feng Y, Hu W, Miao F, Sun L, Duan X, Pan A 2017 *Nat. Commun.* **8** 1906
- [91] Krause M, Dent E W, Bear J E, Loureiro J J, Gertler F B 2003 *Annu. Rev. Cell. Dev. Biol.* **19** 541
- [92] Shim J, Kang D H, Kim Y, Kum H, Kong W, Bae S H, Almansouri I, Lee K, Park J H, Kim J 2018 *Carbon* **133** 78
- [93] Ye L, Wang P, Luo W J, Gong F, Liao L, Liu T D, Tong L, Zang J F, Xu J B, Hu W D 2017 *Nano Energy* **37** 53
- [94] Guo N, Xiao L, Gong F, Luo M, Wang F, Jia Y, Chang H, Liu J, Li Q, Wu Y, Wang Y, Shan C, Xu Y, Zhou P, Hu W 2020 *Adv. Science* **7** 1901637

REVIEW

Photogating effect in two-dimensional photodetectors*

Lei Ting¹⁾²⁾ Lü Wei-Ming¹⁾ Lü Wen-Xing¹⁾ Cui Bo-Yao¹⁾ Hu Rui¹⁾

Shi Wen-Hua^{1)†} Zeng Zhong-Ming¹⁾

1) (*Key Laboratory of Multifunctional Nanomaterials and Smart Systems, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China*)

2) (*School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 13 August 2020; revised manuscript received 3 September 2020)

Abstract

In recent years, due to their unique physical, chemical and electronic properties, two-dimensional materials have received more and more researchers' attention. In particular, the excellent optoelectronic properties and transport properties of two-dimensional materials such as graphene, black phosphorous and transition metal sulfide materials make them have broad application prospects in the field of next-generation optoelectronic devices. In this article, we will mainly introduce the advantages of two-dimensional materials in the field of photodetection, outline the basic principles and parameters of photodetectors, focus on the difference between the grating effect and the traditional photoconductive effect, and the reasons and characteristics of improving optical gain and optical responsivity. Then we review the latest developments and applications of grating local control in photodetectors, and finally summarize the problems faced by the photodetectors of this kind and their prospects for the future.

Keywords: two-dimensional material, photoelectric detection, photogating effect, heterojunction, built-in electric field

PACS: 78.66.-w, 78.67.-n, 85.35.-p, 73.61.-r

DOI: [10.7498/aps.70.20201325](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201325)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2019YFB2005600) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51732010).

† Corresponding author. E-mail: whshi2007@sinano.ac.cn