

文章编号: 1001-3806(2024)06-0856-11

2 维材料/IV 族体材料异质结多光谱光晶体管

林光杨, 蔡欣慰, 李 硕, 汪建元, 李 成*

(厦门大学 物理科学与技术学院 物理学系, 厦门 361005, 中国)

摘要: 多光谱探测在工业等很多领域有着重要应用, 研制集多波段响应于一体的高性能宽谱光电探测器已成为光学成像技术发展的重要研究方向之一。简要介绍了当前宽谱探测器的研究进展, 阐述了 2 维/3 维混合维范德华异质结在宽谱探测器研制的前景; 总结了本课题组在 2 维过渡金属二硫化物/3 维 IV 族体材料范德华异质结宽谱光晶体管研制方面取得的一些进展, 其中包括传统的 NPN 型、PNP 型光晶体管以及基于肖特基结集电极的新型光晶体管, 并对这些混合维光晶体管的应用前景进行了展望。

关键词: 探测器; 光晶体管; 范德华异质结; 多光谱探测; 2 维材料; IV 族材料

中图分类号: TN304.054; TH362 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.011

Multi-spectral phototransistor based on 2-D materials/group IV bulk materials heterojunctions

LIN Guangyang, CAI Xinwei, LI Shuo, WANG Jianyuan, LI Cheng*

(Department of Physics, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Multi-spectral detection had significant applications in many fields of industry. High-performance broadband photodetectors integrating multi-band responses became one of the important research directions of optical imaging technology. Current research progress of broadband photodetectors was briefly introduced. The prospects of 2-D/3-D mix-dimensional van der Waals (VDW) heterojunctions in the development of broadband photodetectors were elaborated. Some progress of broadband phototransistors based on 2-D transition metal dichalcogenides/3-D group IV materials VDW heterojunctions by the research group, including traditional NPN-type, PNP-type phototransistors and emerging phototransistors with Schottky junction collectors were reviewed. Ultimately, the applications of these phototransistors were prospected.

Key words: detectors; phototransistor; van der Waals heterojunction; multi-spectral photodetection; 2-D materials; group IV materials

0 引言

多光谱探测器及其成像技术结合不同光波段探测的优势, 在军事、农业、工业、医学等各个领域有着重要的应用前景, 例如计算机视觉、全天候激光雷达、太空成像、夜视、火灾预警、医学诊断等^[1]。研制集多波段响应于一体的高性能宽谱光电探测器已成为光学成像技术发展的重要研究方向之一。根据材料带隙的不同, 已相继研发出工作在不同波段的半导体光电探测器, 并实现商业化, 例如, 基于 SiC^[2]、GaN^[3] 材料的紫外光电探测器; 基于 Si 材料的可见光探测器^[4]; 基于 Ge^[5]、InGaAs^[6]、PbS^[7]、HgCdTe^[8] 等材料的红外光电探测器^[9]。为满足多光谱探测需求, 科研人员不断尝

试异质融合技术, 例如外延、键合等, 以通过异质异构集成实现多波段响应, 然而传统半导体材料的异质融合往往面临晶格失配、热失配、不同材料间工艺兼容性差、工艺复杂等问题, 因此, 采用传统异质融合技术研发低成本、高性能的室温宽谱光电探测器仍面临巨大的挑战。

与传统材料相比, 2 维材料表现出许多新奇的结构和光电性质。2 维材料单层厚度仅为纳米级, 其层内原子以共价键或化学键连接, 而层间以较弱的范德华(van der Waals, VDW)相互作用力结合。2004 年, 研究人员首次通过机械剥离获得单层石墨烯并发现了许多新奇的性质^[10], 揭开了 2 维材料的研究热潮。之后, 研究者们不断探索、丰富了 2 维材料体系。除石墨烯外, 2 维过渡金属硫族化物(transition metal chalcogenides, TMDs)^[11]、六方氮化硼(hexagonal boron nitride, h-BN)^[12]、黑磷(black phosphorus, BP)^[13]、2 维无机化合物^[14]等相继被发现, 扩充了 2 维材料的性能

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62074134; 62104205); 国家重点研发计划资助项目(2018YFB2200103)

* 通信作者: lich@xmu.edu.cn

收稿日期: 2024-01-24; 修回日期: 2024-04-17

和应用范围。由于材料的光吸收边由带隙决定,窄带隙 2 维材料例如 InSe、In₂Se₃、BP 等被广泛应用于宽谱探测器的研制,例如相继报道了工作在 254 nm ~ 850 nm 的 InSe 探测器^[15]、工作在 254 nm ~ 1064 nm 的 In₂Se₃ 探测器^[16]、工作在 3.7 μm ~ 7.7 μm 的 BP 探测器^[17] 等。利用 2 维材料表面无悬挂键这一特性,通过垂直堆叠的方式构筑能带互补的 2 维材料异质结是实现 2 维材料多光谱响应的另一途径^[18],例如,SHIN 等人通过构筑 P-WSe₂/N-MoS₂ 异质结,实现了 450 nm ~ 800 nm 的光响应^[19];LONG 等人在 2 维材料 P-N 结中插入石墨烯制备 P-WSe₂/石墨烯/N-MoS₂ 异质结,获得了 400 nm ~ 2400 nm 的宽谱响应^[20];JIN 等人利用 WSe₂/α-In₂Se₃ 异质结,实现了 400 nm ~ 1020 nm 的光响应^[21];YAN 等人采用 MoS₂/BP 异质结,获得了 2000 nm ~ 4000 nm 的宽谱响应^[22]。然而,大多数 2 维材料室温稳定性较差,制备困难,难以实际应用,且 2 维材料之间的对准堆叠工艺较为复杂,限制了其规模化应用。

以 MoS₂ 为代表的 2 维 TMDs 由于具有较好的室温稳定性受到广泛的研究。通过将 2 维 TMDs 与传统的半导体材料结合构筑 2 维/3 维混合维异质结是实现宽谱探测的理想平台。相比传统异质融合技术,2 维材料/3 维体材料混合维异质集成结合了传统 3 维体材料成熟的加工工艺优势和 2 维材料异质堆叠的灵活性,可以免受传统异质外延面临的晶格失配、热失配等问题,也无需复杂的离子注入、高温激活等工艺,具有成本低、规模化应用的优势。近年来,已相继报道了 2 维 TMDs/Si^[23]、2 维 TMDs/Ge^[24]、2 维 TMD/GeSn^[25]、2 维 TMDs/GaN^[26]、2 维 TMDs/GaAs^[27]、2 维 TMDs/钙钛矿^[28] 等宽谱探测器。目前已报道的 2 维材料/3 维体材料混合维异质结探测器主要采用二极管结构,工作在反向偏压或零偏压下。受限于界面附近缺陷对载流子的陷阱作用,2 维材料/3 维体材料异质结二极管光电探测器并不能很好地权衡器件的响应度和响应时间,通常表现为响应度低,或响应度高但响应时间长。若 2 维材料/3 维体材料混合维异质结施加正向偏置,缺陷对载流子的陷阱作用将减弱。从这一点考虑,以 2 维材料/3 维体材料异质结作为发射结的光晶体管工作在放大模式时有望打破响应度与响应时间相互制约的限制。但由于晶体管的工艺较为复杂,目前基于 2 维材料/3 维体材料异质结晶体管的报道仍较少。

2 维 TMDs/IV 族体材料异质结由于与成熟的 Si CMOS 工艺兼容,在低成本、规模化应用上具有巨大的优势。本文中将要介绍课题组在 2 维 TMDs 材料/

IV 族体材料混合维异质结光晶体管上取得的一些进展。首先,简介光晶体管的光增益理论和表征探测器性能的相关指标,选取 N 型 2 维 TMDs 材料,在 Ge、GeSn 体材料的 P-N 结上构筑 NPN 型光晶体管,包括 N-MoSe₂/P-Ge/N-Ge 和 N-MoSe₂/P-GeSn/N-Ge 范德华异质结光晶体管;通过 2 维 TMDs 与 IV 族体材料之间的大禁带宽度差异,提高光生载流子的注入比,引入大的光电流增益,从而提高器件的响应度和比探测率。然后选取 P 型 WSe₂ 2 维材料与 N-Ge 组建晶体管的发射结,采用 N-Ge/金属肖特基结替代传统晶体管的 P-N 集电结构光晶体管。具有较大势垒高度的肖特基结可以显著降低光晶体管的暗电流,而 2 维 TMDs 材料在拓宽材料响应波段的同时,通过异质结提高了光生载流子的注入比,大大提高器件的响应度和比探测率。所制备的上述两类光晶体管相比已报道的同类材料构成的范德华异质结二极管在响应度、比探测率及响应时间等整体性能上具有很大的优势,可以为高性能室温宽谱探测器的研发提供新思路。

1 光晶体管光电流增益理论和表征探测器的相关指标

1.1 光晶体管光电流增益理论

以 NPN 型光晶体管为例(PNP 型光晶体管类似),工作在共射放大模式下,光照时集电极电流 I_c 可表示为^[29]:

$$I_c = I_e = I_p + I_d = (\beta + 1)(I_{PO} + I_{CBO}) \quad (1)$$

式中: I_e 为发射极电流; I_p 为集电极放大后的光电流; I_d 为集电极暗电流; β 为光电流增益系数; I_{CBO} 为集电结反向饱和电流; I_{PO} 为初始光电流,可由下式计算^[30]:

$$I_{PO} = qP_i(h\nu) \quad (2)$$

式中: q 为单位电荷量; P_i 为入射光功率; h 为普朗克常数; ν 为入射光子频率。假定内量子效率为 1,由式(1)可知,光电流增益系数 β 可通过线性拟合 I_p - I_{PO} 曲线的斜率得到。对于异质结光晶体管而言,其光电流增益系数 β 很大程度上取决于发射结的载流子注入比 γ_0 。 γ_0 可通过下式计算^[31]:

$$\gamma_0 = \frac{i_{N,e}}{i_{P,e}} = \frac{D_N L_P N_d}{D_P L_N N_a} \left(\frac{m_{P,h} m_{P,e}}{m_{N,h} m_{N,e}} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad (3)$$

式中: $i_{N,e}$ 和 $i_{P,e}$ 分别为异质结光晶体管的发射结在正向偏置时的电子电流和空穴电流; D_N (D_P) 和 L_N (L_P) 分别表示电子(空穴)的扩散系数和扩散长度; N_d 和 N_a 分别是 N 型发射区和 P 型基区的掺杂浓度; $m_{P,h}$ ($m_{P,e}$) 和 $m_{N,h}$ ($m_{N,e}$) 分别表示 P 型基区和 N 型发射区的空穴(电子)有效质量; k 是玻尔兹曼常数; T 为样品

温度; ΔE_g 为发射区和基区间的带隙差。可以看到, 通过提高异质结晶体管发射区与基区之间的带隙差可以显著提高射基结的载流子注入比, 从而增大光电流增益系数。

1.2 表征探测器的相关指标

响应度 R 、比探测率 D^* 和响应时间是反映探测器综合性能的几个常用指标。响应度表示探测器在光照下每单位光功率产生的光电流。对于异质结晶体管, R 可表示为^[32]:

$$R = \frac{I_p}{P_i} \quad (4)$$

比探测率是反映探测器辨别弱光信号的能力, 可以用下式计算^[32]:

$$D^* = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{P_{NEP}} \quad (5)$$

式中: A 为探测器的光敏面积; Δf 为频率带宽; P_{NEP} 为等效噪声功率, 表示探测器信噪比等于 1 时的最小入射光功率, 可由下式获得^[32]:

$$P_{NEP} = \frac{i_n}{R} \quad (6)$$

式中: i_n 为噪声电流, 可通过下式计算^[32]:

$$i_n = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [I(t) - \langle I \rangle]^2 dt} \quad (7)$$

式中: $I(t)$ 为 t 时刻电流; $\langle I \rangle$ 为 T 时间周期内的平均电流。噪声的主要来源包括散粒噪声、热噪声和闪烁噪声(又称 $1/f$ 噪声)。散粒噪声是由于形成电流的载流子的分散性造成的, 其引起的噪声电流 i_s 可由下式计算^[32]:

$$i_s = \sqrt{2qI_d\Delta f} \quad (8)$$

热噪声来源于载流子的随机运动, 引起的噪声电流 i_t 可通过下式计算^[32]:

$$i_t = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R_c}} \quad (9)$$

式中: R_c 为器件电阻。闪烁噪声是由于器件的局部不均匀引起电子的缓慢随机起伏, 通常出现在较低频率上, 引起的噪声电流 i_f 可表示为^[32]:

$$i_f = K \frac{\Delta I_d^b}{f^a} \quad (10)$$

式中: K 为常数; f 为器件工作频率; a 和 b 为指数因子, 与具体器件有关。当器件的暗电流较大时, 散粒噪声通常占主导, 此时比探测率可简单用下式估算^[32]:

$$D^* = R \sqrt{\frac{A}{2qI_d}} \quad (11)$$

响应时间用以评估探测器的最高工作频率。2 维材料由于表面、界面存在许多载流子捕获中心, 响应时

间通常大于微秒量级。实验中, 可通过脉冲光照射探测器, 测量探测器产生的光电流脉冲上升沿或者下降沿来提取响应时间。测量光电流从稳定值的 10% 上升到 90% 或者从稳定值的 90% 降低到 10% 时所经历的时间, 即为探测器的响应时间。

2 2 维材料/IV 族体材料混合维 NPN 型光晶体管

2.1 N-MoSe₂/P-Ge/N-Ge 范德华异质结光晶体管

Ge 的间接带隙和直接带隙分别为 0.67 eV 和 0.80 eV, 是理想的 Si 基短波红外探测材料之一。ANG 等人制备了 N-Ge/P-Ge/I-Ge/N + Si 异质结光晶体管^[33], 在 1550 nm 处获得了 2.0 A/W 的响应度。但由于发射结采用 Ge 同质结, 光电流增益系数仅为 5。SORIANELLO 等人^[34]采用 P + Si/N-Ge/P + Si 结构制备了波导结构的光晶体管, 在 1 V 偏压下, 器件在 1550 nm 的响应度提高到了 42 A/W。FROUNCHI 等人^[35]采用 90 nm 的 Si 光 CMOS 工艺加工平台在绝缘衬底 Si 波导上制备了 Ge 的 N-P-I-N 结构光晶体管, 其中 I 区的插入是为了降低集电区的掺杂浓度, 通过该设计, 在 1 V 偏压下, 器件在 1310 nm 的响应度为 53 A/W, 增益高达 53。但受限于 Ge 的带隙, 上述 Si/Ge 光晶体管仍缺乏多光谱探测能力。为进一步拓展响应波段、提高响应度, 本课题组提出采用 N-MoSe₂/P-Ge 作为发射结, 在 N-Ge 衬底上构筑 NPN 型光晶体管^[36], MoSe₂ 的禁带宽度为 1.40 eV^[37], 可将响应范围拓展至可见光波段。同时, MoSe₂ 和 Ge 之间大的带隙差有望提高载流子注入比, 获得大的光电流增益系数。

采用掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} 的 N-Ge 衬底进行实验。首先在 N-Ge 衬底上生长 100 nm 厚、硼掺杂浓度为 $3.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 P-Ge 薄膜。之后利用机械剥离、湿法转移技术^[30]在 P-Ge 层上方转移 6 nm 厚的 N-MoSe₂。采用激光直接光刻、湿法腐蚀、磁控溅射金属、剥离等工艺制备出直径为 170 μm 的圆形器件台面, 在 N-Ge 和 MoSe₂ 表面分别沉积上 TaN/Al^[38] 和 Ti/Au 电极。最后将器件置于 Ar 气氛中进行 300 $^\circ\text{C}$ 退火 1 h 以形成欧姆接触。

器件的 3 维结构示意图和光学显微镜图分别如图 1a 和图 1b 所示, 其中 N-MoSe₂ 作为晶体管的发射区、P-Ge 为基区、N-Ge 为集电区。图 1c 为 MoSe₂ 表面两电极之间的电流-电压 (I - V) 曲线。电流随电压线性变化说明电极与 MoSe₂ 形成了良好的欧姆接触。采用卤钨灯作为光源^[39]测试器件在放大模式下(集电极与发射极间电压 $V_{c,e} > 0 \text{ V}$, 后续光电晶体管测试均采用该工作模式不再赘述)的光响应谱。图 1d 显示了在

N-Ge 和 N-MoSe₂ 之间施加 $V_{c,e} = 2.0$ V 时器件的光响应谱。器件在 600 nm ~ 1600 nm 具有明显的光响应，

覆盖了可见光到短波红外波段。器件的截止响应波长在 1600 nm 附近,对应 Ge 的直接带隙吸收边。器件的峰值响应在 640 nm 附近,响应度高达 800 A/W 左右。图 1e 是器件工作在放大模式下 ($V_{c,e} > 0$ V) 的能带示意图,MoSe₂ 和 Ge 形成 I 型能带结构。此时,P-Ge/N-Ge 集电结处于反向偏置,而 N-MoSe₂/P-Ge 发射结处于正向偏置。在光照下,由于 MoSe₂ 较薄,吸收部分可见光增大发射极电流,但光吸收主要发生在集电结。在内建电场的帮助下,光生电子向 N-Ge 集电区运动,光生空穴向 N-MoSe₂ 发射区运动。由于 N-MoSe₂/P-Ge 价带间存在高达 0.52 eV 的势垒,空穴将累积在界面靠 P-Ge 一侧,使得 N-MoSe₂ 发射区向 P-Ge 基区注入大量的电子,从而引起光电流增益。

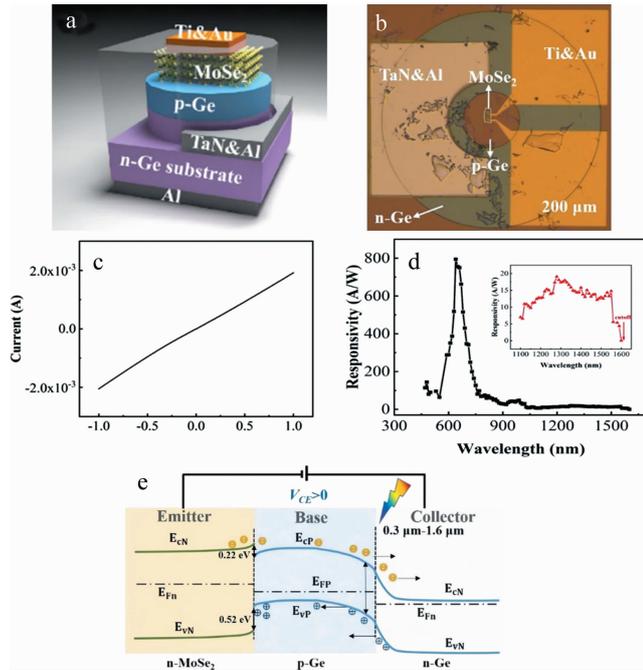


图 1 制备的 N-MoSe₂/P-Ge/N-Ge 光晶体管^[36]

a—3 维结构示意图 b—光学显微镜图 c—MoSe₂ 表面两电极之间的 I-V 曲线 d— $V_{c,e} = 2.0$ V 偏压下的光响应谱 e—能带示意图

Fig. 1 The fabricated N-MoSe₂/P-Ge/N-Ge phototransistor^[36]

a—3-D schematic structure b—optical image c—I-V curves between two electrodes on MoSe₂ d—response spectrum under $V_{c,e} = 2.0$ V e—bandgap alignment

图 2a 和图 2d 分别为器件在不同光功率的 650 nm 和 1550 nm 光照下的 I-V 曲线。随着光功率的增加,光电流显著增大。图 2b 和图 2e 中分别是 650 nm 和 1550 nm 光照下集电极光生电流 I_p 随初始光生电流 I_{p0} 的变化关系。对图 2b 和图 2e 数据进行线性拟合,得到其斜率分别为 15 和 9。根据式(1)可知,器件在 650 nm 和 1550 nm 的光电流增益系数 β 分别为 14 和 8,最大响应度分别为 8.38 A/W 和 18.53 A/W。采用式(11)可估算器件在 650 nm 和 1550 nm 对应的比探测率分别为 3.00×10^9 Jones 和 6.64×10^9 Jones。图 2c 和图 2f 进一步显示器件在 650 nm 和 1550 nm 光脉冲下的瞬态光响应。从上升沿和下降沿可提取在 650 nm

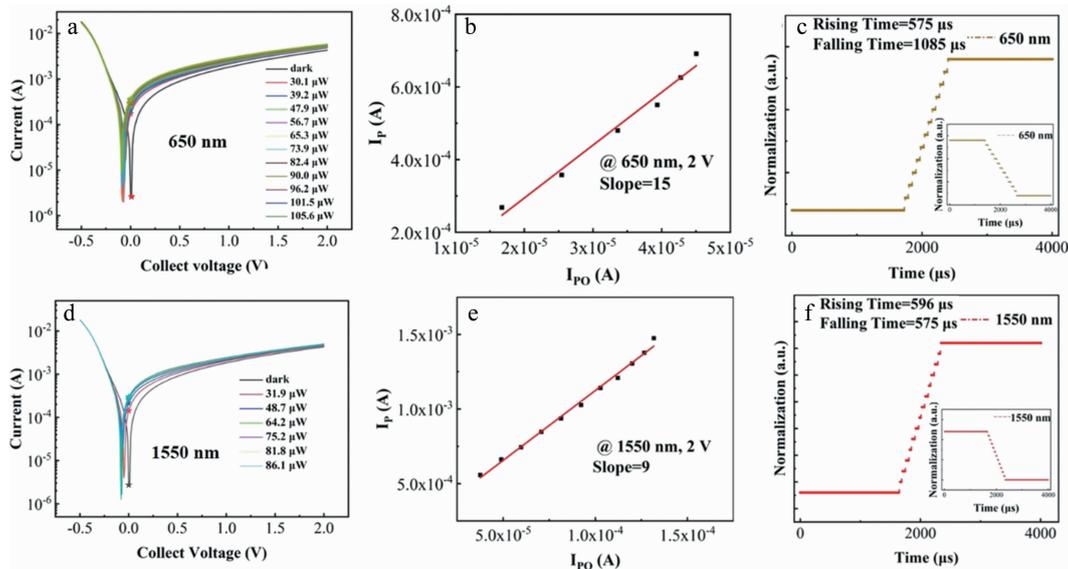


图 2 N-MoSe₂/P-Ge/N-Ge 光晶体管的光响应特性^[36]

a—650 nm 激光照射下的 I-V 曲线 b— $V_{c,e} = 2.0$ V 时,650 nm 激光照射下的光增益系数拟合 c—650 nm 激光照射下的瞬态响应 d—1550 nm 激光照射下的 I-V 曲线 e— $V_{c,e} = 2.0$ V 时,1550 nm 激光照射下的光增益系数拟合 f—1550 nm 激光照射下的瞬态响应

Fig. 2 Photoreponse properties of N-MoSe₂/P-Ge/N-Ge phototransistor^[36]

a—I-V curves under 650 nm laser illumination b—fitting of gain value at 650 nm under $V_{c,e} = 2.0$ V c—transient photoreponse under 650 nm laser illumination d—I-V curves under 1550 nm laser illumination e—fitting of gain value at 1550 nm under $V_{c,e} = 2.0$ V f—transient photoreponse under 1550 nm laser illumination

光照下响应上升时间和下降时间分别为 575 μs 和 1085 μs , 在 1550 nm 光照下上升和下降时间分别为 596 μs 和 575 μs 。相比已报道的文献中 N-MoSe₂/P-Ge^[40]、P-WSe₂/N-Ge^[41] 等光电二极管, 本课题组所制备的 N-MoSe₂/P-Ge/N-Ge 光晶体管在响应波段、响应度、比探测率、响应时间上表现出更优越的整体性能。结果表明, 采用 2 维材料/Ge 范德华异质结构筑光晶体管可在低电压下在宽谱范围内获得高响应度, 未来有望替代雪崩光电探测器在高灵敏探测领域获得应用。

2.2 N-MoSe₂/P-GeSn/N-Ge 范德华异质结构光晶体管

受限于 Ge 的带隙, 制备的 N-MoSe₂/P-Ge/N-Ge 光晶体管的红外响应截止波长在 1600 nm 左右, 并不能完全覆盖短波红外范围。已有报道, 随着 Sn 组分的增加, GeSn 的禁带宽度能够从 Ge 的 0.67 eV 减小到 0 eV, 且当 Sn 组分大于 8% 时, GeSn 可以转变为直接带隙材料^[42]。因此, 采用 GeSn 替代 Ge 作为光吸收区有望进一步拓展红外响应波长, 乃至完全覆盖短波红外波段。然而, 目前的 GeSn 光电探测器的信噪比仍不能满足应用需求。理论模拟表明, 采用晶体管结构可以在低驱动电压下同时获得具有高光电流增益、高信噪比和高工作速度的 GeSn 光电探测器^[43]。WANG 等人^[44]通过制备 N + Ge/P-Ge_{0.935}Sn_{0.065}/N-Ge 光晶体管, 将探测截止波长扩展到了 2003 nm, 且响应度相比 PIN 光电二极管提高了 10 倍。由于 Ge 中的 N 型掺杂

浓度难以提高, HUANG 等人^[45]进一步制备出 P + Ge/N-Ge_{0.951}Sn_{0.049}/P-Ge 光晶体管, 其响应截止波长为 1940 nm。在 0.4 V 工作电压下器件响应度相比 PIN 光电二极管提高了 3 倍。但受限于 Ge/GeSn 之间较小的带隙差, 目前的 GeSn 光晶体管的光电流增益仍很低(小于 20)。为此, 本课题组基于 MoSe₂/GeSn 发射结设计制备了 N-MoSe₂/P-GeSn/N-Ge 异质结光晶体管结构^[46]。

采用本课题组开发的高温溅射外延技术^[47-48]在 N-Ge 衬底上生长厚度为 82 nm、Sn 组分为 17.1% 的 B 掺杂 GeSn 薄膜。GeSn 层应变弛豫度为 57.4%, 对应的直接带隙和间接带隙分别为 0.369 eV 和 0.466 eV, 响应截止波长大概在 3360 nm。采用机械剥离、湿法转移方式在 P-GeSn/N-Ge 表面转移厚度为 20 nm 左右的 2 维 MoSe₂ 薄片构筑 N-MoSe₂/P-GeSn/N-Ge 结构。采用 Ti/Au 和 TaN/Al 分别作 MoSe₂ 和 N-Ge 的电极, 在 Ar 氛围下经过 300 °C 退火 1 h 可形成欧姆接触。其中 GeSn 台面尺寸为 150 μm \times 150 μm , N-MoSe₂、P-GeSn 和 N-Ge 分别为光晶体管的发射区、基区和集电区。图 3a 和图 3d 中分别给出了器件在不同光功率的 1310 nm 和 1550 nm 光照下的 *I-V* 曲线。器件显示出较高的暗电流, 这是由于 GeSn 和 Ge 的界面由于应变弛豫产生了较多的失配位错所致。但在光照下, 光电流仍显著大于暗电流。图 3b 和图 3e 分别提取出了

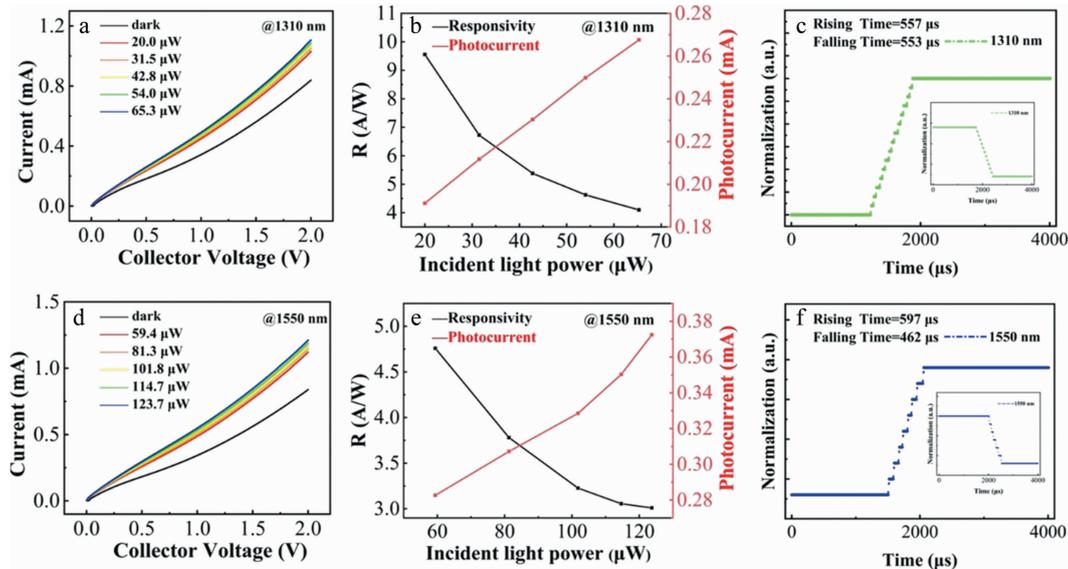


图3 N-MoSe₂/P-GeSn/N-Ge 光晶体管的光响应特性^[46]

a—1310 nm 激光照射下的输出特性曲线 b—1310 nm 激光照射下的响应度(黑色)和光生电流(红色) c—1310 nm 激光照射下的瞬态光响应
d—1550 nm 激光照射下的输出特性曲线 e—1550 nm 激光照射下的响应度(黑色)和光生电流(红色) f—1550 nm 激光照射下的瞬态光响应

Fig. 3 Photoreponse properties of N-MoSe₂/P-GeSn/N-Ge phototransistor^[46]

a—output characteristics under 1310 nm laser illumination b—responsivity (black) and photocurrent (red) under 1310 nm laser illumination c—transient photoreponse under 1310 nm laser illumination d—output characteristics under 1550 nm laser illumination e—responsivity (black) and photocurrent (red) under 1550 nm laser illumination f—transient photoreponse under 1550 nm laser illumination

$V_{c,e} = 2.0 \text{ V}$ 时,器件在 1310 nm 和 1550 nm 光照下响应度(黑色曲线)、光生电流(红色曲线)随入射光功率的变化关系。可以看到,器件在 1310 nm 和 1550 nm 下的最大响应度分别为 9.55 A/W 和 4.75 A/W。图 3c 和图 3f 中分别为器件在 1310 nm 和 1550 nm 光脉冲下的瞬态光响应。在 1310 nm 光照下,从上升沿和下降沿提取的响应时间分别为 557 μs 和 553 μs ;在 1550 nm 光照下,从上升沿和下降沿提取的响应时间分别为 597 μs 和 462 μs 。

图 4a 为器件在 $V_{c,e} = 1.0 \text{ V}$ 下的光响应谱(黑色曲线)和对应的比探测率谱(红色曲线)。可以看到,器件在 800 nm ~ 2400 nm 具有明显的光响应。在 2250 nm 处,器件的响应度为 12.75 A/W,光电流增益约为 25.7,比探测率高达 1.74×10^{10} Jones。器件在 900 nm、1600 nm 和 2400 nm 附近出现了 3 个吸收边。900 nm 和 1600 nm 附近的吸收边分别对应于 MoSe₂ 和 N-Ge 衬底的带隙,而 2400 nm 吸收边的产生是由于卤钨灯的发光波长截止所致。由 GeSn 的带隙计算,器件实际响应截止波长大于 2400 nm。根据 N-MoSe₂、P-GeSn 和 N-Ge 的能带结构,图 4b 中是 N-MoSe₂/

P-GeSn/N-Ge 光晶体管工作在放大模式下($V_{c,e} > 0 \text{ V}$)的能带排布。N-MoSe₂ 与 P-GeSn 的导带带阶和价带带阶分别为 0.36 eV 和 0.67 eV。根据式(3),N-MoSe₂ 与 P-GeSn 异质结可产生高达 10^{17} 的电子/空穴注入比,可引入巨大的光电流增益。在放大模式下,N-MoSe₂/P-GeSn 结和 P-GeSn/N-Ge 结分别处于正向偏置和反向偏置。MoSe₂ 吸收部分波长小于 900 nm 的光引起发射极电流的增大。但 MoSe₂ 较薄,光吸收主要发生在 GeSn 和 Ge 中。当波长超过 1600 nm 后,光仅在 GeSn 层中被吸收。在 P-GeSn/N-Ge 结内建电场的帮助下,光生电子-空穴对被分离。光生电子向 N-Ge 运动,而光生空穴由于 GeSn/MoSe₂ 高达 0.67 eV 的价带带阶累积在 GeSn/MoSe₂ 界面靠 GeSn 一侧,从而引入大光电流增益。大部分已知的 GeSn 光电探测器^[49-51]在室温下的峰值响应度低于 1 A/W、峰值比探测率低于 10^{10} Jones,而本课题组制备的 N-MoSe₂/P-GeSn/N-Ge 光晶体管结构在 2000 nm 之后具有更高的响应度和更高的室温比探测率,且几乎可以覆盖所有的短波红外波段,为高性能短波红外探测器的研发提供新方法,在红外成像领域有非常广阔的应用前景。

3 以肖特基结为集电结的 2 维材料/IV 族体材料混合维光晶体管

第 2 节中所设计制备的 NPN 型异质结光晶体管虽然具有较大的光响应度和较高的光电流增益系数,但器件暗电也较高。由式(1)可知,在无光照下,发射极的暗电流 I_e 为集电结反向饱和电流 I_{CBO} 的 $\beta + 1$ 倍。采用带隙差大的异质结作为发射结在引入光电流增益的同时也将放大暗电流。因此,降低集电结反向饱和电流 I_{CBO} 对于抑制光晶体管暗电流至关重要。选用带隙差大的异质结作为集电结可以抑制 I_{CBO} 。但 IV 族体材料间(如 Si、Ge、GeSn 等)晶格失配大,异质外延易引入失配位错,且当选用带隙较大的 IV 族材料时将限制器件在长波段的响应。金属/半导体肖特基结有类似 P-N 结的整流特性,在电学上可等效为单边突变 P-N 结,且反向饱和电流随势垒高度的增加显著降低。此外,还具有制备工艺简单的优势。2008 年,ZHU 等人^[52]利用金属 Si 化物与 Si 的肖特基结作为集电结制备出了波导结构的 Si 光晶体管,其暗电流小于 20 pA,光电流增益大于 20。然而,具有肖特基势垒结构的 Ge 光晶体管仍未有报道。为此,进一步提出采用金属/IV 族体材料的肖特基结作为集电结、2 维材料/IV 族体材料范德华异质结作为发射结以制备低暗电流、高光电流增益的光晶体管。由于费米能级被钉扎在价带顶附近,金属和 N-Ge 接触可以天然地形成

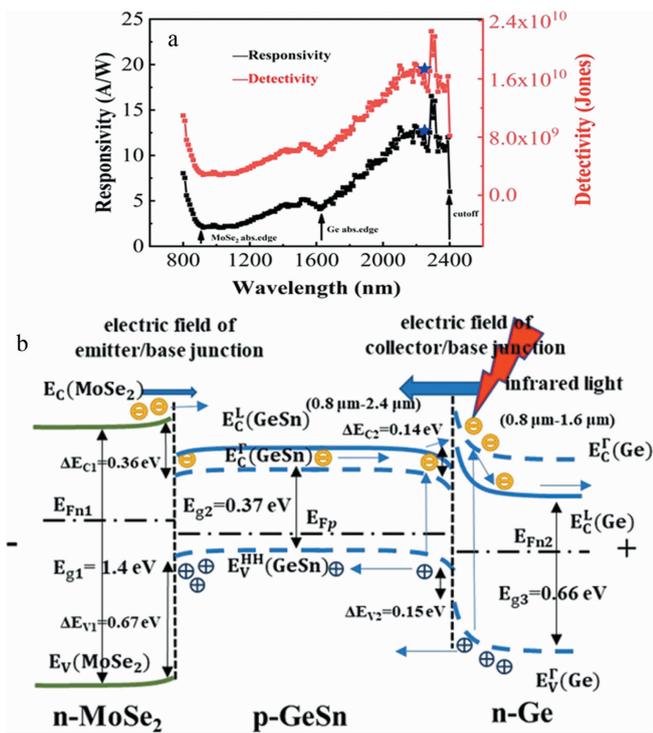


图 4 N-MoSe₂/P-GeSn/N-Ge 光晶体管的宽谱性能分析^[46]
 a— $V_{c,e} = 1.0 \text{ V}$ 偏压下的光响应谱(黑色曲线)和比探测率谱(红色曲线) b—能带示意图
 Fig. 4 Broadband photoresponse analysis of N-MoSe₂/P-GeSn/N-Ge photo-transistor^[46]
 a—responsespectrum and detectivity spectrum under $V_{c,e} = 1.0 \text{ V}$
 b—bandgap alignment

很好的肖特基结。为此,基于金属和 N-Ge 的肖特基结构筑了 P-WSe₂/N-Ge 范德华异质结光晶体管^[53]。

选用多层 2 维 WSe₂ 薄片与 N-Ge 衬底构筑晶体管的发射结。多层 WSe₂ 的带隙约为 1.37 eV,与 Ge 衬底之间具有高达 0.70 eV 的带隙差,同时可扩展器件在可见光波段的响应。选用 N 型掺杂浓度为 10¹⁷ cm⁻³ 的 N-Ge 衬底进行实验。利用机械剥离和湿法转移方式在 N-Ge 上转移厚约 80 nm 的 2 维 WSe₂ 薄片。图 5a 中对比了 Ge、2 维 WSe₂ 薄片以及 WSe₂/Ge 异质结的 Raman 光谱。WSe₂/Ge 异质结的 Raman 峰和 Ge、WSe₂ 薄片的 Raman 峰位很好地吻合,说明形成了良好的范德华异质结。选用 Pt/Au 和 Ti/Au 分别作为 P-WSe₂ 和 N-Ge 的接触电极,通过激光直接光刻、湿法腐蚀、磁控溅射金属、剥离等工艺制备出如图 5b 所示的光晶体管。图 5c 中的黑色和红色曲线分别为 WSe₂ 上两 Pt 和 Au 电极之间的 *I-V* 曲线。可以看到,经过退火后 Pt 和 Au 与 WSe₂ 形成了良好的欧姆

接触。图 5d 为 N-Ge 与 Ti 和 Au 接触的 *I-V* 曲线,插图为其半对数坐标下的曲线。N-Ge 与 Ti 和 Au 之间的整流比高达 10³,说明 Ti 和 Au 与 N-Ge 形成了肖特基结,对 *I-V* 曲线进行拟合得到其势垒高度为 0.54 eV。制备的 P-WSe₂/N-Ge/Ti&Au 光晶体管中 P-WSe₂ 和 N-Ge 分别为发射区和基区,肖特基结为集电结。测试 P-WSe₂/N-Ge/Ti&Au 光晶体管在发射极与集电极间电压 $V_{e,c} > 0$ V 下的光响应谱,如图 5e 所示。器件在 400 nm ~ 1700 nm 具有明显的光响应,验证了宽谱探测能力。图 5f 是器件工作在放大模式下 ($V_{e,c} > 0$ V) 的能带排布图。P-WSe₂ 与 N-Ge 之间的导带带阶几乎为 0 eV,价带带阶约为 0.70 eV。由于 P-WSe₂ 较薄,可见光在 P-WSe₂ 和 N-Ge 都有被吸收,而近红外光主要在 N-Ge 中被吸收。在 N-Ge/Ti&Au 肖特基结内建电场的帮助下,光生电子向 P-WSe₂ 一侧输运并累计在基区,引起 P-WSe₂ 发射区向 N-Ge 基区注入大量的空穴,从而产生光电流增益。

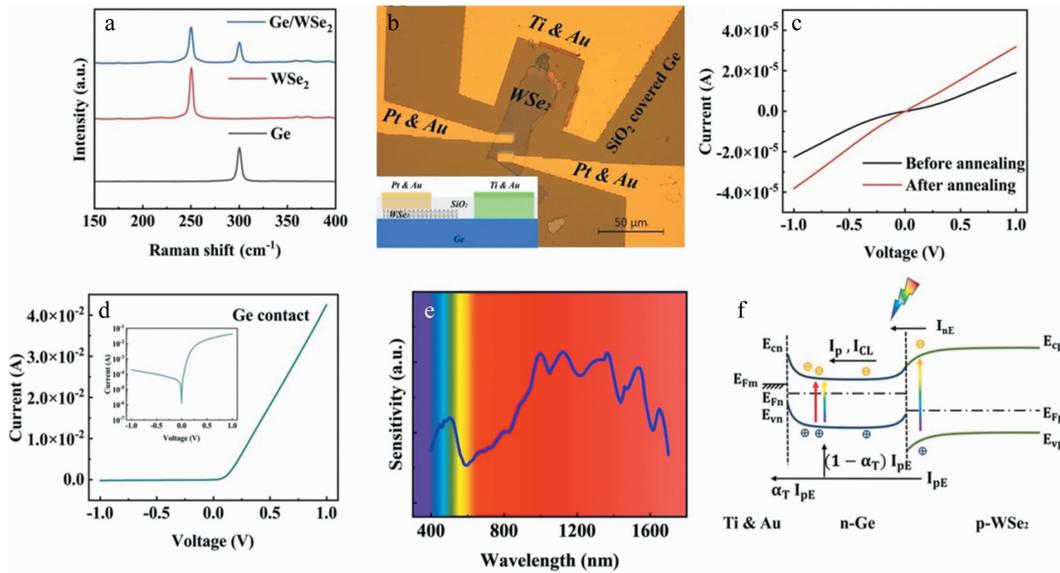


图 5 以肖特基结为集电极的 P-WSe₂/N-Ge/Ti&Au 光晶体管^[53]

a—Raman 光谱 b—光学显微镜图 c—WSe₂ 上 Pt 和 Au 电极之间退火前后的 *I-V* 曲线 d—N-Ge/Ti&Au 肖特基结的 *I-V* 曲线 e— $V_{e,c} > 0$ V 下的响应谱 f—能带排布图

Fig. 5 P-WSe₂/N-Ge/Ti&Au phototransistor with a Schottky junction collector.^[53]

a—Raman spectra b—optical image c—*I-V* curves of two Pt and Au electrodes on WSe₂ before and after annealing d—*I-V* curve of N-Ge/Ti&Au Schottky junction e—response spectrum under $V_{e,c} > 0$ V f—bandgap alignment

图 6a 和图 6b 分别为器件不同光功率时 405 nm 和 1550 nm 光照射下的输出特性曲线。在 $V_{e,c} = 1.0$ V 下,器件的暗电流约为 140 μ A。图 6b 和图 6e 中分别是当 $V_{e,c} = 1.0$ V 时,在 405 nm 和 1550 nm 光照下集电极光生电流 I_p 随初始光生电流 I_{p0} 的变化关系。对其做线性拟合提取得到斜率分别为 146 和 80,说明光电流增益系数分别为 145 和 79。在 405 nm 波长下,最大响应度为 55 A/W,比探测率为 4.7 \times

10¹⁰ Jones;在 1550 nm 波长下,最大响应度为 120 A/W,比探测率为 1.0 \times 10¹¹ Jones。图 6c 和图 6f 中给出了器件在 405 nm 和 1550 nm 光脉冲下的瞬态光响应。在 405 nm 和 1550 nm 光照下,响应时间分别约为 90 μ s 和 300 μ s,优于上一部分制备的 NPN 型范德华异质结光晶体管。器件在 405 nm 波长下具有更快的响应速度是由于短波在 Ge 的穿透深度小,而器件在表面电场分布更强所致。

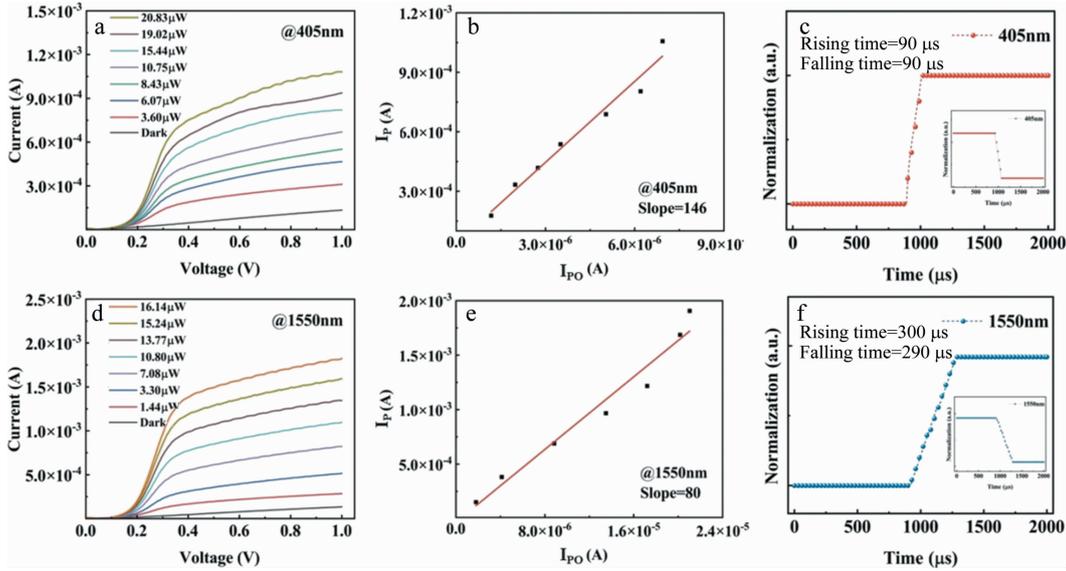


图 6 P-WSe₂/N-Ge/Ti&Au 光晶体管的光响应特性^[53]

a—405 nm 激光照射下的 I - V 曲线 b—405 nm 激光照射下的光增益系数拟合 c—405 nm 激光照射下的瞬态光响应 d—1550 nm 激光照射下的 I - V 曲线 e—1550 nm 激光照射下的光增益系数拟合 f—1550 nm 激光照射下的瞬态光响应

Fig. 6 Photoreponse properties of P-WSe₂/N-Ge/Ti&Au phototransistor^[53]

a— I - V characteristics under 405 nm laser illumination b—fitting of gain value at 405 nm c—transient photoreponse under 405 nm laser illumination d— I - V characteristics under 1550 nm laser illumination e—fitting of gain value at 1550 nm f—transient photoreponse under 1550 nm laser illumination

上述 P-WSe₂/N-Ge/Ti&Au 光晶体管虽取得了优越的光电性能,但器件结构未优化,仍有很大的改进空间。首先,P-WSe₂ 上方的 Pt/Au 电极不透光,使得器件的有效光敏面积减小,降低了比探测率;其次,从图 5e 可知,器件在 600 nm 附近可见光波段响应度弱,这是由于表面光反射调制所致;最后,器件在红外波段的响应速度较慢,这是由于红外光在 Ge 中穿透深度大,而 Ge 内部电场较弱所致。基于上述问题,对器件结构做了如下改进^[54]:(a)采用 3 nm Pt 和 110 nm 氧化铟锡(indium tin oxide,ITO)作为 P-WSe₂ 的透明接触电极,提高有效光敏面积;(b)在 P-WSe₂/N-Ge 表面沉积 90 nm 厚的 SiO₂ 作为 600 nm 附近可见光的抗反射膜,提高可见光响应;(c)将 N-Ge/Ti&Au 肖特基结做成环形浅槽结构,提高 N-Ge 体内电场强度。

图 7a 是优化后的器件结构示意图及其工作在放大模式下的电场分布模拟图。为降低器件成本,选用 1.2 μm 厚的 Al 替代 Ti 和 Au 作为 N-Ge 接触金属形成肖特基结。可以看到,N-Ge 体内的电场强度得到了很大的提高。但器件中心仍有少部分区域电场分布较弱,未来可以通过缩小器件尺寸提高整个区域电场。图 7b 中给出了优化后器件在放大模式下的响应谱。可以看到,器件在 600 nm 附近可见光波段的响应度得到了很大的提高,器件在 405 nm 和 1550 nm 波长下的光电流增益系数分别提高到 164 和 84,响应度分别为 66 A/W 和 124 A/W,对应比探测率分别为 8.7 ×

10¹⁰ Jones 和 1.6 × 10¹¹ Jones。图 7c 和图 7d 分别给出了优化后器件在 405 nm 和 1550 nm 脉冲光照下的瞬态光电流。经过优化后,405 nm 波长下的响应时间略微减小到 80 μs,而 1550 nm 波长下的响应时间大大降

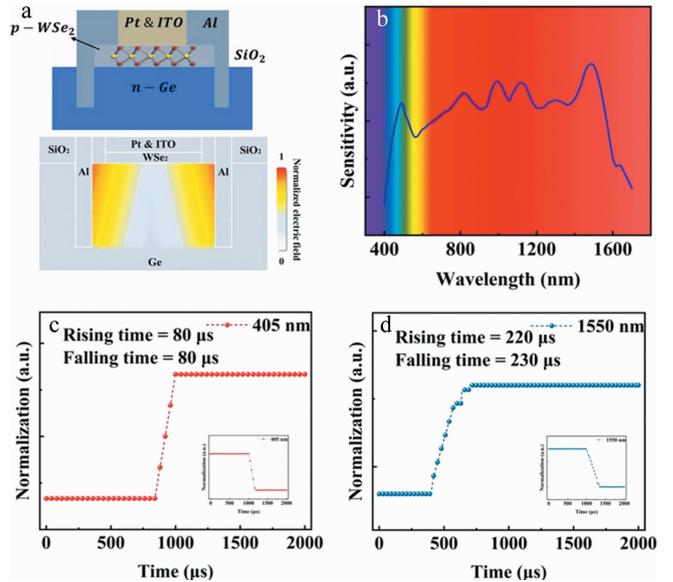


图 7 具有环形浅槽 Al/N-Ge 肖特基结的 P-WSe₂/N-Ge/Al 光晶体管^[54]
a—结构示意图电场分布模拟图 b—光响应谱 c—405 nm 光照下的瞬态光响应 d—1550 nm 光照下的瞬态光响应

Fig. 7 P-WSe₂/N-Ge phototransistor with an annular shallow-trench Al/N-Ge Schottky junction^[54]

a—schematic structure and simulated electric field distribution b—response spectrum c—transient photoreponse at 405 nm d—transient photoreponse at 1550 nm

低至 220 μs 左右。表 1 中对比了本课题组制备的 $\text{WSe}_2/\text{Ge}/\text{Al}$ 光晶体管、 MoSe_2/Ge 光晶体管与文献报道的 Ge 范德华异质结光电探测器的性能。可以看出,相比文献报道的 Ge 范德华异质结光电探测器,制备的光晶体管在响应波长、响应度、响应时间和比探测率上具有更优异的综合性能。此外,受益于 Ge/Al 肖特基势垒的引入, $\text{WSe}_2/\text{Ge}/\text{Al}$ 光晶体管相比 MoSe_2/Ge 光晶体管具有更高的响应度、更快的响应时间和更大的比探测率。

表 1 Ge 基混合维光晶体管与 Ge 基范德华异质结探测器性能比较

Table 1 Performance comparison of Ge-based mix-dimensional photo transistors and Ge-based VDW heterojunction photodetector

器件结构	响应波长/nm	响应度/ $(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	响应时间/ms	比探测率/Jones	参考文献
$\text{WSe}_2/\text{Ge}/\text{Al}$ HPT	400 ~ 1700	124@ 1550 nm	0.22	1.6×10^{11}	本课题组
MoSe_2/Ge HPT	450 ~ 1600	18.35@ 1550 nm	0.575	8.34×10^{10}	本课题组
MoTe_2/Ge	915	12460@ 915 nm	5	3.3×10^{12}	[55]
WSe_2/Ge	520 ~ 1550	6.4@ 1550 nm	0.03	2.5×10^{10}	[41]
MoS_2/Ge	106 ~ 1550	3@ 1550 nm	10	—	[40]
MoSe_2/Ge	400 ~ 1800	35@ 1550 nm	0.0135	1.0×10^{11}	[56]

以肖特基结为集电极的光晶体管具有结构和工艺简单的优势,但此前仍未有基于 Ge 肖特基结的光晶体管的报道。本课题组的研究表明,具有肖特基势垒集电极的 Ge 范德华异质结光晶体管在抑制暗电流、提高比探测率和响应速度上具有很大的潜在优势,可为高性能 Ge 基宽谱探测器的开发提供新策略。

4 结束语

2 维 TMDs/IV 族体材料范德华异质结结合了 Si CMOS 成熟的加工工艺和 2 维材料集成的灵活性,在低成本、规模化宽谱探测器的应用上具有巨大的优势。本文中简要介绍了本课题组在 2 维 TMDs/IV 族体材料范德华异质结光晶体管取得的一些进展。采用 N- $\text{MoSe}_2/\text{P-Ge}$ 和 N- $\text{MoSe}_2/\text{P-GeSn}$ 范德华异质结作为发射结,分别构筑了 N- $\text{MoSe}_2/\text{P-Ge}/\text{N-Ge}$ 和 N- $\text{MoSe}_2/\text{P-GeSn}/\text{N-Ge}$ 范德华异质结光晶体管。利用范德华异质结的大带隙差,引入巨大的载流子注入比,从而产生大的光生电流增益系数。同时,2 维 N- MoSe_2 作为光吸收区,拓展了器件在短波的响应。N- $\text{MoSe}_2/\text{P-Ge}/\text{N-Ge}$ 光晶体管响应波段为 600 nm ~ 1600 nm,在 1550 nm 波长下光电流增益系数为 8,响应度为 18.53 A/W,比探测率达 6.64×10^9 Jones,响应时间为 600 μs 左右;N- $\text{MoSe}_2/\text{P-GeSn}/\text{N-Ge}$ 光晶体管响应波段为 800 nm ~ 2400 nm,在 2250 nm 波长下响应度高达

12.75 A/W,比探测率达 1.74×10^{10} Jones,为文献报道最好水平。在此基础上,本课题组采用 N-Ge 与金属接触的肖特基结替代传统晶体管的集电结,制备了 P- $\text{WSe}_2/\text{N-Ge}$ 光晶体管以降低器件的暗电流,其响应波段覆盖 400 nm ~ 1700 nm,暗电流低至 10^{-4} A。经过结构优化后,在 405 nm 和 1550 nm 波长下光生电流增益系数分别高达 164 和 84,响应度分别为 66 A/W 和 124 A/W,比探测率分别为 8.7×10^{10} Jones 和 1.6×10^{11} Jones,响应时间分别低至 80 μs 和 220 μs 。上述结果为高性能宽谱探测器的开发提供了新策略。

参 考 文 献

- [1] MARTYNIUK P, ROGALSKI A. Van der Waals two-color infrared detection[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 27.
- [2] WANG K, WANG H, CHEN C, *et al.* High-performance ultraviolet photodetector based on single-crystal integrated self-supporting 4H-SiC nanohole arrays[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(19): 23457-23469.
- [3] FENG S, LIU Z, FENG L, *et al.* High-performance self-powered ultraviolet photodetector based on $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ heterostructure for optical imaging[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 945: 169274.
- [4] HUANG S, WU Q, JIA Z, *et al.* Black silicon photodetector with excellent comprehensive properties by rapid thermal annealing and hydrogenated surface passivation[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(7): 1901808.
- [5] WANG L, ZHANG Y, WANG B, *et al.* High-performance infrared Ge-based plasmonic photodetector enhanced by dual absorption mechanism[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(9): 096104.
- [6] LIU H, WANG J, GUO D, *et al.* Design and fabrication of high performance InGaAs near infrared photodetector[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(21): 2895.
- [7] YIN X, ZHANG C, GUO Y, *et al.* PbS QD-based photodetectors: Future-oriented near-infrared detection technology[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2021, C9(2): 417-438.
- [8] GAWRON W, DAMI CKI A, KO NIEWSKI A, *et al.* Multiple long wavelength infrared MOCVD grown HgCdTe photodetectors for high temperature conditions[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 4509-4516.
- [9] SUN T, GUAN X N, ZHANG F, *et al.* Progress in simulation of type-II superlattice infrared detectors based on the $k \cdot p$ method[J]. *Laser Technology*, 2023, 47(4): 439-453 (in Chinese). 孙童, 关晓宁, 张凡, 等. 基于 $k \cdot p$ 方法的二类超晶格红外探测器仿真进展[J]. *激光技术*, 2023, 47(4): 439-453.
- [10] 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.
- [11] SUSARLA S, KUTANA A, HACHTEL J A, *et al.* Quaternary 2D transition metal dichalcogenides (TMDs) with tunable bandgap[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(35): 1702457.
- [12] WANG J, MA F, LIANG W, *et al.* Electrical properties and applications of graphene, hexagonal boron nitride (h-BN), and graphene/h-BN heterostructures[J]. *Materials Today Physics*, 2017, 2:6-34.
- [13] LI L, YU Y, YE G J, *et al.* Black phosphorus field-effect transistors[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(5): 372-377.

- [14] WEI Y, ZHANG P, SOOMRO R A, *et al.* Advances in the Synthesis of 2D MXenes [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33 (39): 2103148.
- [15] FENG W, WU J B, LI X, *et al.* Ultrahigh photo-responsivity and detectivity in multilayer InSe nanosheets phototransistors with broadband response[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2015, C3(27): 7022-7028.
- [16] ZHENG Z Q, YAO J D, YANG G W. Growth of centimeter-scale high-quality In₂Se₃ films for transparent, flexible and high performance photodetectors[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2016, C4(34): 8094-8103.
- [17] CHEN X, LU X, DENG B, *et al.* Widely tunable black phosphorus mid-infrared photodetector [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1672.
- [18] CHEN B T, DAI Q, XIE X M, *et al.* Research progress of single-photon detectors [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(5): 601-609 (in Chinese).
程碑彤, 代千, 谢修敏, 等. 单光子探测器的研究进展[J]. *激光技术*, 2022, 46(5): 601-609.
- [19] SHIN G H, PARK C, LEE K J, *et al.* Ultrasensitive phototransistor based on WSe₂-MoS₂ van der Waals heterojunction [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(8): 5741-5748.
- [20] LONG M, LIU E, WANG P, *et al.* Broadband photovoltaic detectors based on an atomically thin heterostructure [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2254-2259.
- [21] JIN H J, PARK C, LEE K J, *et al.* Ultrasensitive WSe₂/α-In₂Se₃ NIR photodetector based on ferroelectric gating effect [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(11): 2100494.
- [22] YAN W, SHRESHA V R, JEANGROS Q, *et al.* Spectrally selective mid-wave infrared detection using Fabry-Pérot cavity enhanced black phosphorus 2D photodiodes [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(10): 13645-13651.
- [23] MAO J, YU Y, WANG L, *et al.* Ultrafast, broadband photodetector based on MoSe₂/silicon heterojunction with vertically standing layered structure using graphene as transparent electrode [J]. *Advanced Science*, 2016, 3(11): 1600018.
- [24] WANG B, WANG L, ZHANG Y, *et al.* Mixed-dimensional MoS₂/Ge heterostructure junction field-effect transistors for logic operation and photodetection [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(10): 2110181.
- [25] SHU K, GAO W, WAN F, *et al.* High-performance broadband photodetectors based on N-MoS₂/P-Ge_{0.9}Sn_{0.1} heterojunctions [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(7): 3218-3225.
- [26] JAIN S K, LOW M X, TAYLOR P D, *et al.* 2D/3D hybrid of MoS₂/GaN for a high-performance broadband photodetector [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(5): 2407-2414.
- [27] JIA C, HUANG X, WU D, *et al.* An ultrasensitive self-driven broadband photodetector based on a 2D-WS₂/GaAs type-II Zener heterojunction [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(7): 4435-4444.
- [28] FANG C, WANG H, SHEN Z, *et al.* High-performance photodetectors based on lead-free 2D Ruddlesden-Popper perovskite/MoS₂ heterostructures [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(8): 8419-8427.
- [29] KROEMER H. Heterostructure bipolar transistors and integrated circuits [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1982, 70(1): 13-25.
- [30] MAO Y, XU P, WU Q, *et al.* Self-powered high-detectivity lateral MoS₂ Schottky photodetectors for near-infrared operation [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2021, 7(3): 2001138.
- [31] KROEMER H. Theory of a wide-gap emitter for transistors [J]. *Proceedings of the IRE*, 1957, 45(11): 1535-1537.
- [32] YAO J, YANG G. 2D material broadband photodetectors [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(2): 454-476.
- [33] ANG K W, YU M B, LO G Q, *et al.* Low-voltage and high-responsivity germanium bipolar phototransistor for optical detections in the near-infrared regime [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, 29(10): 1124-1127.
- [34] SORIANELLO V, de ANGELIS G, de IACOVO A, *et al.* High responsivity SiGe heterojunction phototransistor on silicon photonics platform [J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28163-28169.
- [35] FROUNCHI M, TZINTZAROV G N, ILDEFONSO A, *et al.* High responsivity Ge phototransistor in commercial CMOS Si-photonics platform for monolithic optoelectronic receivers [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(2): 196-199.
- [36] LI H, CAI X, WANG J, *et al.* Ultrahigh sensitive phototransistor based on MoSe₂/Ge mixed-dimensional heterojunction for visible to short-wave infrared broadband photodetection [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2023, 70(12): 6446-6451.
- [37] DUAN X, WANG C, PAN A, *et al.* Two-dimensional transition metal dichalcogenides as atomically thin semiconductors: Opportunities and challenges [J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(24): 8859-8876.
- [38] WU Z, WANG C, HUANG W, *et al.* Ohmic contact formation of sputtered TaN on n-type Ge with lower specific contact resistivity [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2012, 1(1): 30-33.
- [39] LIN G, LIANG D, YU C, *et al.* Broadband 400-2400 nm Ge heterostructure nanowire photodetector fabricated by three-dimensional Ge condensation technique [J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 32801-32809.
- [40] HWANG A, PARK M, PARK Y, *et al.* Visible and infrared dual-band imaging via Ge/MoS₂ van der Waals heterostructure [J]. *Science Advances*, 2021, 7(51): eabj2521.
- [41] LEE C H, PARK Y, YOUN S, *et al.* Design of P-WSe₂/N-Ge heterojunctions for high-speed broadband photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(4): 2107992.
- [42] STANGE D, WIRTHS S, VON DEN DRIESCH N, *et al.* Optical transitions in direct-bandgap Ge_{1-x}Sn_x alloys [J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(11): 1539-1545.
- [43] CHANG G E, BASU R, MUKHOPADHYAY B, *et al.* Design and modeling of GeSn-based heterojunction phototransistors for communication applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(6): 425-433.
- [44] WANG W, DONG Y, LEE S Y, *et al.* Floating-base germanium-tin heterojunction phototransistor for high-efficiency photodetection in short-wave infrared range [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 18502-18507.
- [45] HUNG W T, BARSHILIA D, BASU R, *et al.* Silicon-based high-responsivity GeSn short-wave infrared heterojunction phototransistors with a floating base [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1088-1091.
- [46] CAI X, LI S, QIAN J, *et al.* High-performance N-MoS₂/P-GeSn/N-Ge van der Waals heterojunction phototransistor for short-Wave infrared photodetection [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 12(5): 2301724.
- [47] LIN G, QIAN J, DING H, *et al.* Harvesting strong photoluminescence of physical vapor deposited GeSn with record high deposition temperature [J]. *Journal of Physics*, 2023, D56(35): 355104.
- [48] LIN G, QIAN K, DING H, *et al.* Effective strain relaxation of GeSn single crystal with Sn content of 16.5% on Ge grown by high-tem-

- perature sputtering [J]. *Applied Surface Science*, 2023, 623: 157086.
- [49] TRAN H, PHAM T, MARGETIS J, *et al.* Si-based GeSn photodetectors toward mid-infrared imaging applications [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(11): 2807-2815.
- [50] YANG T, DING H, CAI X, *et al.* Low-cost self-powered shortwave infrared photodetectors with GeSn/Ge multiple quantum wells grown by magnetron sputtering [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2023, 45(2): 156-159.
- [51] TRAN H, PHAM T, DU W, *et al.* High performance $\text{Ge}_{0.89}\text{Sn}_{0.11}$ photodiodes for low-cost shortwave infrared imaging [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(1): 013101.
- [52] ZHU S, LO G Q, YU M B, *et al.* Silicide Schottky-barrier phototransistor integrated in silicon channel waveguide for in-line power monitoring [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(3): 185-187.
- [53] LI S, WU Q, DING H, *et al.* High gain, broadband P-WSe₂/N-Ge van der Waals heterojunction phototransistor with a Schottky barrier collector [J]. *Nano Research*, 2023, 16(4): 5796-5802.
- [54] LI S, CAI X, DING H, *et al.* Visible to short-wave infrared broadband P-WSe₂/N-Ge heterojunction phototransistor with an annular shallow-trench Schottky barrier collector [J]. *Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters*, 2024, 18(1): 2300276.
- [55] CHEN W, LIANG R, ZHANG S, *et al.* Ultrahigh sensitive near-infrared photodetectors based on MoTe₂/germanium heterostructure [J]. *Nano Research*, 2020, 13(1): 127-132.
- [56] DHYANI V, DAS M, UDDIN W, *et al.* Self-powered room temperature broadband infrared photodetector based on MoSe₂/germanium heterojunction with 35 A/W responsivity at 1550 nm [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(12): 121101.