

## 激光与光电子学进展

界面工程调控石墨烯/氮化镓紫外光电探测  
性能研究(特邀)高芳亮<sup>1</sup>, 陈坤<sup>1</sup>, 刘青<sup>1</sup>, 王幸福<sup>1</sup>, 杨纪锐<sup>1</sup>, 徐明俊<sup>1</sup>, 贺宇浩<sup>1</sup>, 石宇豪<sup>1</sup>, 许腾文<sup>1</sup>, 阳志超<sup>2\*</sup>, 李述体<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup>华南师范大学半导体科学与技术学院, 广东 广州 510631;<sup>2</sup>东莞南方半导体科技有限公司, 广东 东莞 523781

**摘要** 界面工程是提高光电探测器性能的有效方法之一。报道了基于界面工程调控的石墨烯(Gr, 2D)/GaN(3D)范德瓦耳斯异质结紫外光电探测器。GaN吸收光子产生电子空穴对,并在内建电场作用下发生分离。其中,光生空穴利用隧穿效应向Gr一侧迁移,而光生电子向GaN一侧迁移。在较高的电场驱动下,载流子将发生碰撞,造成光电流倍增,使得器件的光吸收效率与光电转化效率有明显提升。因此,器件在-2 V偏压条件和 $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 紫外光照射下,展示出较高的响应度(395.2 A/W)和较大的探测率( $4.425 \times 10^{15}$  Jones)值。该研究丰富了界面工程技术在Gr基紫外光电探测器的应用,为制备高性能紫外探测器提供了可能。

**关键词** 氮化镓; 二维/三维; 金属有机化学气相沉积; 紫外探测器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232089

Study on the Performance of Graphene/GaN Ultraviolet Photodetectors  
Regulated Through Interface Engineering (Invited)Gao Fangliang<sup>1</sup>, Chen Kun<sup>1</sup>, Liu Qing<sup>1</sup>, Wang Xingfu<sup>1</sup>, Yang Jirui<sup>1</sup>, Xu Mingjun<sup>1</sup>,  
He Yuhao<sup>1</sup>, Shi Yuhao<sup>1</sup>, Xu Tengwen<sup>1</sup>, Yang Zhichao<sup>2\*</sup>, Li Shutu<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup>School of Semiconductor Science and Technology, South China Normal University,  
Guangzhou 510631, Guangdong, China;<sup>2</sup>Dongguan South Semiconductor Technology Co., Ltd., Dongguan 523781, Guangdong, China

**Abstract** Interface engineering stands out as an effective method for enhancing the performance of photodetectors. This study presents ultraviolet (UV) photodetectors featuring a Gr (2D)/GaN (3D) van der Waals heterojunction, skillfully regulated through interface engineering control. The GaN film efficiently absorbs photons, generating electron-hole pairs promptly separated by the built-in electric field. Photogenerated holes traverse to the Gr side through the tunneling effect, while photogenerated electrons move towards the GaN side. At elevated built-in field levels, high-speed photogenerated carriers undergo impact ionization, leading to a multiplication of the photocurrent. The outcomes highlight the significant influence of lead sulfide quantum dots (PbS QDs) on the light absorption efficiency and photoelectric conversion efficiency of the device. Consequently, the device achieves a remarkable responsivity value of 395.2 A/W and a substantial detectivity value of  $4.425 \times 10^{15}$  Jones under  $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  light at -2 V. This research contributes to the application of interface engineering technology in Gr-based UV photodetectors, opening possibilities for the preparation of high-performance UV detectors.

**Key words** gallium nitride; two-dimensional/three-dimensional; metal organic chemical vapor deposition; ultraviolet photodetector

## 1 引言

紫外线是太阳辐射中的一种电磁辐射,其波长范

围为10~400 nm。在大气层的保护下,只有少量的紫外线到达地球表面。相对于其他波段的电磁辐射,紫外线具有处理难度低、抗干扰性强等特点,在军民领域

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2023-10-04; 录用日期: 2023-11-27; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(62375090, 62374062, 12374072)

通信作者: \*272692047@qq.com; \*\*lishuti@scnu.edu.cn

具有重要应用<sup>[1-3]</sup>。因而,作为探测紫外光的核心器件,高性能紫外光电探测器的研究和发展具有重要的意义。

当前,商用的紫外光探测器主要是紫外光电倍增管和 Si 基紫外探测器。由于结构复杂与材料自身的限制等因素,其在许多领域的应用受到了限制<sup>[4]</sup>。为满足未来科技发展的需求,实现高性能、低成本、低能耗光电探测器的制备,广大研究人员在探寻新材料与新结构等方面做出巨大努力。二维(2D)材料由于其独特的原子结构与异乎寻常的光电特性,得到了广泛研究<sup>[5-7]</sup>。二维材料光电探测器表现出高响应度和检测性、快速响应时间等性能优势<sup>[8]</sup>。作为 2D 材料家族的重要成员,石墨烯(Gr)具有较高的光吸收和较快的响应速度,被认为是制备高性能光电探测器的杰出代表<sup>[9-12]</sup>。同时,Gr 具备良好的光电特性,具有高载流子迁移率,可以拓宽探测器的探测波长范围,提升器件性能<sup>[13]</sup>。然而,单层 Gr 光吸收效率较低,仅为 2.3%,并且具有较大的载流子密度,其制备的光电器件存在较大的暗电流从而影响了器件性能<sup>[14]</sup>。此外,较大的表面态诱导产生较大的漏电流以及较强的界面复合作用,不利于 Gr 基光电探测器的发展<sup>[15]</sup>。

超浅范德瓦耳斯异质结的构造是解决上述问题合适的方式之一<sup>[16]</sup>。2D 材料由于其独特的原子结构,其表面不存在悬挂键,在制备器件时无需考虑晶格失配的问题,可实现高质量范德瓦耳斯异质结的构造<sup>[17-18]</sup>。同时,基于界面工程技术(插入绝缘隧穿层或表面沉积量子点)的范德瓦耳斯异质结结构器件,可进一步改善上述问题。例如:Wu 等<sup>[15]</sup>使用 2D AsP 和 InSe 构造了范德瓦耳斯隧穿异质结晶体管,该器件具有较高的反向整流率和光灵敏度。Zhang 等<sup>[19]</sup>通过在 Gr 与 GaN 间插入一个  $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$  层,有效地减小了氧空位的缺陷密度,并且提高了势垒高度。He 等<sup>[20]</sup>通过界面工程技术,在初始器件中插入  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  绝缘隧穿层,所制备的紫外光电探测器具有较高的探测率,然而高质量  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和  $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$  的制备需要复杂的工艺流程。

本文报道了采用界面工程技术制备出的 Gr(2D)/GaN(3D)范德瓦耳斯异质结紫外光电探测器,并研究硫化铅量子点(PbS QDs)调控对 Gr/GaN 紫外光电探测器的影响与作用机制。半导体材料量子点应用在探测器中,在保留一定可见光波段探测能力的同时,拓展了紫外波段的探测灵敏度<sup>[21]</sup>。研究结果表明:由于 Gr 的半金属性,在 GaN 表面形成超浅范德瓦耳斯异质结,耗尽区位于 GaN 表面,入射的紫外光被器件完全吸收,器件展示出较高的光吸收效率;在 PbS QDs 修饰下,器件的光吸收效率与光电转化效率明显上升。本工作证实界面工程技术能有效提高器件性能,这为高性能、低成本的紫外光电探测器的制备提供了一条有效的途径。

## 2 实验与器件制备

### 2.1 材料制备

使用金属有机化学气相沉积(MOCVD)系统在蓝宝石衬底上制备 GaN(4~5  $\mu\text{m}$ ,掺杂浓度  $3.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )衬底。将表面涂有 PMMA 的铜基底单层石墨烯(合肥科晶科技股份有限公司),保存在真空干燥箱中。

### 2.2 Gr/GaN 器件的制备

使用实验剪刀剪取合适大小旋涂有 PMMA 的 Cu 基底单层石墨烯,将其放置在浓度为 1 mol/L 的氯化铁溶液中,并浸泡 45 min,去除底部 Cu 基底。使用干净的衬底捞取已去除 Cu 基底的单层石墨烯,转移至去离子水中进行清洗,去除表面残留的  $\text{FeCl}_3$  溶液,整个过程重复 3 次,每次泡洗 10 min,完成单层石墨烯的制备。使用清洗干净的 GaN 衬底进行单层石墨烯的捞取,实现 Gr/GaN 范德瓦耳斯异质结的制备。捞取之后自然晾干 1 h,再转移到 90°C 烘箱烘烤 3 h。之后将其放置在盛有丙酮的烧杯中,将烧杯放置在水浴锅中恒温加热 1 h,温度约 28 °C。将样品取出、晾干,使用无水乙醇、去离子水清洗样品。最后将样品放置在热台上加热,沉积 In 片在相应的位置,实现电极的制备。

### 2.3 PbS QDs/Gr/GaN 器件制备

将去除 PMMA 的 Gr/GaN 样品放置于实验台上,使用移液枪吸取适量的 PbS QDs 溶液(上海阿拉丁生化科技股份有限公司)均匀地滴涂在样品上。在滴涂 PbS QDs 之后,让样品干燥 10 s;接着滴涂体积分数 2% EDT(乙腈中加入 50 mmol 硫氰酸铵)溶液(使用异丙醇作为溶剂进行溶解),等待 30 s 使得配体交换充分完成;再使用乙腈溶液清洗两次,去除多余的 EDT 溶液;最后在热台上使用 100 °C 退火 10 min,完成器件的制备。为了对比 PbS QDs 对器件性能的影响,本实验使用相同的工艺制备 PbS-glass 器件(注意:所有实验必须在通风橱中进行)。

### 2.4 表征与测试

使用扫描隧道显微镜(SEM)表征器件的形貌。使用 X 射线衍射分析 GaN 的晶体质量。使用拉曼光谱测试单层 Gr 的本征信息。光电性能测试设备是自行搭建的一套测试系统,主要包括:探针台, B2902A 高精度源表, 325 nm He-Cd 激光器, 斩波器, 光功率机, 以及衰减片。输出的紫外光功率密度通过调节衰减片进行调控。所有的测试都是在大气环境下进行。

## 3 分析与讨论

本文研究 PbS QDs 对 Gr/GaN 范德瓦耳斯异质结的影响,其器件结构如图 1(a)所示。单层 Gr 覆盖在 GaN 表面形成范德瓦耳斯异质结;In 金属分别沉积在 Gr 与 GaN 一侧作为电极,并且在 Gr 与 GaN 之间沉积 30 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  绝缘层,阻止两者接触造成短路;PbS QDs 被沉积在 Gr 表面。由于包裹 QDs 的长油酸配体

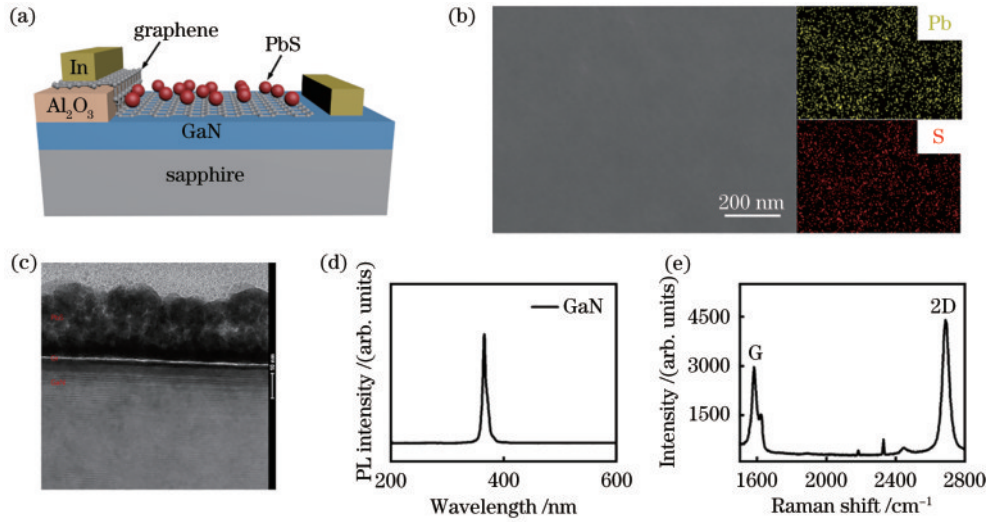


图 1 实验结果。(a) PbS QDs/Gr/GaN 结构示意图; (b) PbS QDs/Gr/GaN 器件表面 SEM 图; (c) PbS QDs/Gr/GaN 器件 TEM 图; (d) GaN 薄膜 PL 光谱图; (e) 单层石墨烯的 Raman 图  
 Fig. 1 Experimental results. (a) Schematic diagram of the PbS QDs/Gr/GaN device; (b) SEM image of PbS QDs/Gr/GaN surface; (c) TEM image of PbS QDs/Gr/GaN; (d) photoluminescence spectra of GaN; (e) Raman spectra of the single-layer Gr

引起的空间分离诱导会降低 QDs 与器件的电荷传输<sup>[22]</sup>。因此,本实验采用配体交换技术(将长配体交换成短配体,提高 PbS QDs 的传导率)制备 PbS QDs 薄膜层,详细过程呈现在实验部分。图 1(b)展示的是沉积了 PbS QDs 的器件表面 SEM 与元素分布光谱(EDS)图。SEM 图表面十分光滑,表明器件表面较平整。EDS 图表明 Pb 和 S 元素基本完全覆盖整个平面,并且元素分布均匀。表明 PbS QDs 成功沉积在 Gr/GaN 样品表面,并且均匀分布。图 1(c)展示了沉积了 PbS QDs 的器件结构的透射电镜(TEM)图,通过 TEM 图可以清晰地看出器件所制备出的结构,表明器件的可行性。光致发光(PL)是一种重要的手段去检测材料的光学特性,图 1(d)展示的是 GaN 的 PL 谱图。很明显,在 365 nm 左右有一个锐利的发光峰,这和 GaN 禁带宽度是一致的。除此之外,光谱中没有其他杂乱峰存在,表明制备的 GaN 薄膜质量很好<sup>[23]</sup>。此外,为验证所使用的石墨烯是单层的,图 1(e)展示了 Raman 测试结果。从图中可以观察到,在 1582 cm<sup>-1</sup> 和 2689 cm<sup>-1</sup> 位置有明显的 G 和 2D 峰,并且 2D/G 峰强度之比接近 2:1,这与之前的工作报道是一致的,表明使用的 Gr 是单层结构<sup>[5]</sup>。

为验证 PbS QDs 对器件性能提升的作用,分别制备了 PbS QDs/Gr/GaN 和 PbS QDs-glass 光电探测器,并对其进行相应的光电性能测试,图 2 展示了相应的结果。在黑暗与 325 nm 光照条件下,PbS QDs-glass 光电探测器有明显的光响应,表明 QDs 对紫外光有响应,制备的薄膜是有效的,如图 2(a)和(b)所示。当 QDs 覆盖在 Gr/GaN 表面时,器件的暗电流没有明显变化,而光电流明显提高(大约 3 倍),如图 2(c)和(d)所示,表明 PbS QDs 能有效改善器件性能。图 2(e)

和(f)分别展示了 PbS QDs/Gr/GaN 光电探测器在 325 nm 不同光功率密度光照射下的电流-电压(*I-V*)与电流-时间(*I-T*)曲线。很明显,随着光功率密度上升,器件光电流依次增大。而器件 *I-T* 曲线显示非常显著的尖峰,这与之前观察到的现象是一致的。此外在器件表面配比了三组体积分数不同的 PbS QDs 沉积,并测量其 *I-V* 曲线。从图 2(g)可以看出,体积分数为 6% 时,光电流最大,体积分数为 9% 时,光电流最小。因此当 PbS QDs 浓度增加时光电流增大,在超过 6% 时光电流减小。这是由于一方面 QDs 的表面等离子体共振(SPR)效应产生的热电子会注入 GaN 中,提高器件的光电流<sup>[24]</sup>,另一方面,Pbs QDs 也会引入新的缺陷,器件的 *I-T* 曲线显示非常显著的尖峰<sup>[25]</sup>,表明 Pbs QDs 的沉积会造成表面较多的缺陷,当 Pbs QDs 的浓度过大时,缺陷就会更多更明显从而影响器件性能。

区别于太阳能电池器件,光电探测器具有很好的光功率-光电流输出线性度关系。这种关系可以用幂指数<sup>[26]</sup>进行很好的拟合,表示为

$$I_{ph} = AP^\theta, \quad (1)$$

式中:*A* 是与波长有关的常数;幂指数  $\theta$  反映了器件光功率密度与光电流关系,相应曲线见图 3(a)。通过线性拟合可知,器件的  $\theta$  值为 0.453。这个值是很低的,表明在 GaN 的表面存在相对较高的表面态,这将造成表面费米能级钉扎效应,增加电子与空穴的复合,进一步验证了之前的结论。为进一步评估探测器性能,测试了器件的响应度 *R*、探测率 *D\**、灵敏度 *S* 及光敏电阻(LDR),图 3(b)和(c)展示了相应结果。*R*、*D\** 是典型的品质因素,用于评估光电探测器的性能。*R* 和 *D\**<sup>[27]</sup> 被定义为

$$R = I_{light} / (P_{in} s), \quad (2)$$

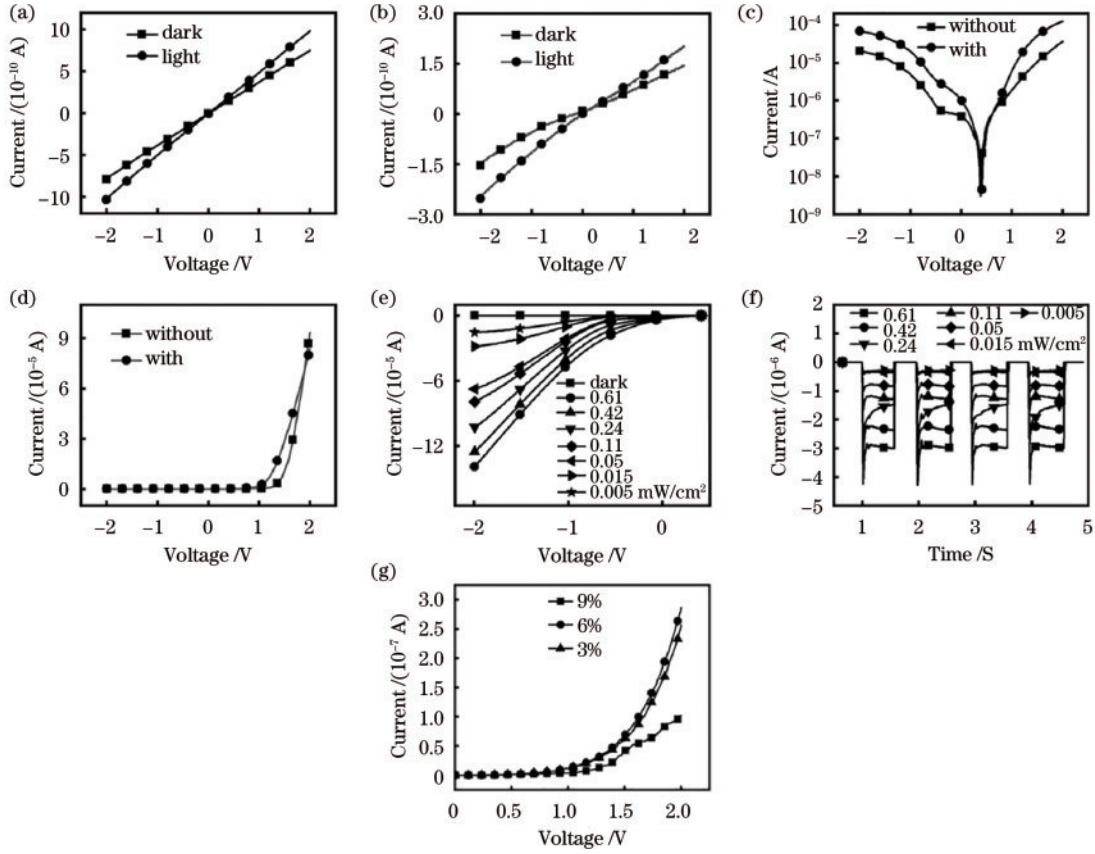


图 2 光电性能测试结果。(a)(b) Gr-glass 的  $I$ - $V$  曲线; (c)(d) 有无 PbS QDs 的 Gr/GaN 光电流与暗电流; 器件在 325 nm 不同光功率密度照射下的 (e)  $I$ - $V$  曲线和 (f)  $I$ - $T$  曲线; (g) 不同浓度 PbS QDs 的器件  $I$ - $V$  图

Fig. 2 Optoelectronic performance test results. (a)(b)  $I$ - $V$  characteristics of the Gr/glass; (c)(d) PbS QDs/Gr/GaN photodetector with/without PbS QDs under dark and light illumination; (e)  $I$ - $V$  and (f)  $I$ - $T$  curves at different light power densities under 325 nm light illumination; (g)  $I$ - $V$  diagram of devices with different concentrations of PbS QDs

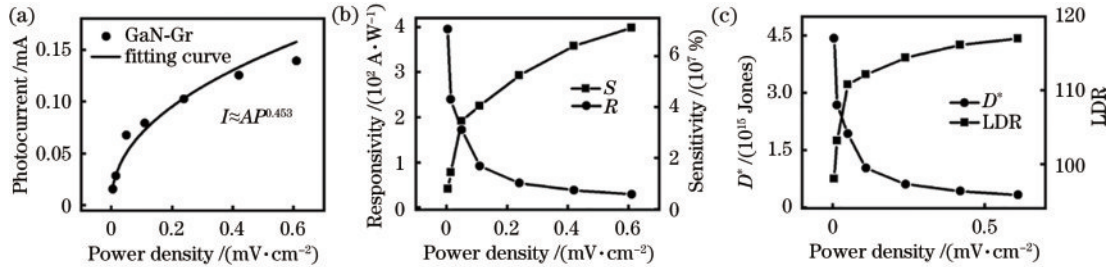


图 3 拟合结果。(a) PbS QDs/Gr/GaN 光电流与光功率密度关系曲线, 及相应拟合曲线; 在  $-2$  V 偏压下, 器件的 (b)  $R$ 、 $S$  和 (c)  $D^*$ 、 $LDR$  随光功率密度变化曲线

Fig. 3 Fitting results. (a) Photocurrent (absolute value) dependence on light power intensity and corresponding fitting curve by the power law PbS QDs/Gr/GaN; light-power-dependent (b)  $R$  and  $S$ , and (c)  $D^*$  and  $LDR$  of the PbS QDs/Gr/GaN photodetector at  $-2$  V bias

$$D^* = R [s / (2eI_{\text{dark}})]^{1/2}, \quad (3)$$

式中:  $I_{\text{light}}$  是器件的光电流;  $P_{\text{in}}$  是入射光功率密度;  $s$  是器件有效光吸收面积;  $e$  是电子电荷量;  $h$  是布朗克常数。从公式可以发现,  $R$  与  $D^*$  都与光电流有关, 要想获得高  $R$ , 器件需要在较弱的光功率密度下产生较高的光电流, 而  $D$  还需要较低的暗电流。从曲线图中可以得知,  $R$  和  $D^*$  随着光功率密度的增加而减小。在  $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  光功率密度照射下, 器件获得最高的  $R$  和  $D^*$ , 分别为  $400 \text{ A}/\text{W}$  和  $4.5 \times 10^{15} \text{ Jones}$ 。而在高光功

率密度下, 器件的光电流趋于饱和, 并且光生电子和空穴复合的几率极大上升, 很明显这是一个普遍现象。 $S$  和线性动态范围  $LDR$  是另外两个评估光电探测器的重要参数, 分别可以反映光电探测器探测弱光的能力和线性反应区间范围, 这可以被定义为

$$S = (I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}) / I_{\text{dark}} \times 100\%, \quad (4)$$

$$L_{\text{LDR}} = 20 \log(I_{\text{light}} / I_{\text{dark}})_{\circ} \quad (5)$$

很明显, 在相同的暗电流下,  $S$  和  $LDR$  都主要取决于器件的光电流。这与图 3 中曲线所展示的结果是

一致的。因此, PbS QDs 在一定程度上能够提高器件的光吸收率与光电转化效率(3 倍左右光电流提升)。

此外, 图 3 展示了 PbS QDs/Gr/GaN 光电探测器在  $-2\text{ V}$  偏压下的  $R$ 、 $S$ 、 $D^*$  和 LDR。与前面的分析相似, 随着光功率密度的上升,  $R$  和  $D^*$  依次下降, 并在  $5\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$  光功率密度光照射下器件获得最大值, 分别为  $R=395.2\ \text{A}/\text{W}$ ,  $D^*=4.425\times 10^{15}$  Jones。而器件的  $S$  和 LDR 随着光功率密度上升依次上升, 最大值分别为  $7.1\times 10^7\%$  和  $117.04\ \text{dB}$ , 表明器件具有一个相对大的光/暗电流比。综上所述, Pb QDs/Gr/GaN 结构器件可以显著地提高 Gr/GaN 光电探测器的性能。

图 4 为 PbS QDs/Gr/GaN 器件能带结构图( $325\ \text{nm}$  光照射)。从能带结构图可以发现, 通过湿法转移的单层石墨烯呈现出 P 型特性, 这可能是 H—O 键和大气中的气体进行了空穴的有效掺杂<sup>[28-29]</sup>。在 Gr 与 GaN 结合之后, 异质结在界面处出现一个锐利的能带弯曲, 并且由于 Gr 和 GaN 之间存在较大的功函数差异, 一个强的超浅范德瓦耳斯浅结在界面处形成。当紫外光照射在器件表面时, 石墨烯在布里渊区的 M 点和 K 点吸收热量产生热载流子。由于 Gr 中温度梯度不同, 产生的热载流子在石墨烯中将经受不同的热弛豫过程<sup>[30-32]</sup>。此外, 当 Gr 与 GaN 结合后, 两者形成的空间电荷区位于 GaN 表面, 入射光能够最大程度被吸收转化, 产生更多的光生电子-空穴对。由于 Gr 十分薄, Gr 与 GaN 形成的耗尽区大部分在 GaN 一侧, 从而大部分的热载流子能够达到 GaN 一侧的耗尽区被收集, 并且光生电子-空穴对也能够在此耗尽区被有效分离, 为总电流贡献部分电流。同时, 在较高的掺杂浓度下, 光生电子-空穴对的分离效率是更高的, 这是因为相对于耗尽区宽度, 光入射深度随着掺杂浓度的增高下降得更快。另一方面, 紫外光穿透 Gr 层照射到 GaN 表面, GaN 薄膜吸收大部分的光子产生光生电子-空穴对, 在内建电场作用下, 光生电子-空穴对迅速分离<sup>[33]</sup>。其中, 光生空穴利用隧穿效应向 Gr 一侧迁移, 而光生电子向 GaN 一侧迁移。在较高的电场驱动下, 载流子将发生碰撞, 造成光电流倍增<sup>[34]</sup>。当 PbS QDs 沉积在 Gr/GaN 时, 由于费米能级的不同, 能带发生弯曲, PbS QDs 与 Gr 之间形成内建电场。在  $325\ \text{nm}$  光照射下, GaN 薄膜吸

收大部分的光子, 同时 PbS QDs 也会吸收光子产生光生电子-空穴对, 在内建电场作用下分离, 产生光生电子-空穴对分离, 能产生高的光电流, 并且光生电子先流向 Gr, 再流向 GaN, 而光生空穴流向 Gr。此外, PbS/Gr 界面处的异质结诱导电荷分离效应能够显著的抑制光生载流子的复合, 延长载流子寿命。另一方面, QDs 的 SPR 效应产生的热电子将注入 GaN 中, 提高器件的光电流<sup>[24, 35]</sup>。同时, 由于材料的折射率不同会引起光的折射现象, 在 QDs 表面将发生光的折射, 改变光路的方向, 从而使反射多余的光被 GaN 重新吸收, 增强器件的光吸收, 提高器件的光电性能。

## 4 结 论

本文通过将 Gr 与 GaN 结合, 一方面实现高性能超浅范德瓦耳斯异质结紫外光电探测器的制备, 另一方面深入研究界面工程技术 PbS QDs 对器件性能影响与作用机制。研究表明, 超浅结的形成使器件具有较高的光吸收效率。此外, 在界面工程技术作用下, 显著影响了器件的光电响应特性。例如, PbS QDs 对器件的光吸收效率与光电转化效率有明显影响, 这是 QDs 的 SPR 效应与内建电场共同作用的结果。因此, 在  $-2\ \text{V}$ 、 $5\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$  光照射下, 器件展示了超高的  $R=395.2\ \text{A}/\text{W}$  和  $D^*=4.425\times 10^{15}$  Jones, 超越了目前很多商用的紫外探测器。该研究证实界面工程对器件性能的提升具有显著作用, 扩展了 2D 与 3D 载流子的传输机制, 为利用界面工程技术制备高性能光电器件提供了一条新思路。

## 参 考 文 献

- [1] Pearton S J, Yang J C, Cary P H IV, et al. A review of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  materials, processing, and devices[J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5(1): 011301.
- [2] Zhang Z X, Zeng L H, Tong X W, et al. Ultrafast, self-driven, and air-stable photodetectors based on multilayer  $\text{PtSe}_2/\text{perovskite}$  heterojunctions[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2018, 9(6): 1185-1194.
- [3] Tsai D S, Liu K K, Lien D H, et al. Few-layer  $\text{MoS}_2$  with high broadband Photogain and fast optical switching for use in harsh environments[J]. ACS Nano, 2013, 7(5): 3905-3911.
- [4] David J. The staircase photodiode[J]. Nature Photonics, 2016, 10(6): 364-366.
- [5] Li H N, Li Y, Aljarb A, et al. Epitaxial growth of two-dimensional layered transition-metal dichalcogenides: growth mechanism, controllability, and scalability[J]. Chemical Reviews, 2018, 118(13): 6134-6150.
- [6] Wu D, Guo J W, Wang C Q, et al. Ultrabroadband and high-detectivity photodetector based on  $\text{WS}_2/\text{Ge}$  heterojunction through defect engineering and interface passivation[J]. ACS Nano, 2021, 15(6): 10119-10129.
- [7] Yoo T J, Kim S Y, Kwon M G, et al. A facile method for improving detectivity of graphene/p-type silicon

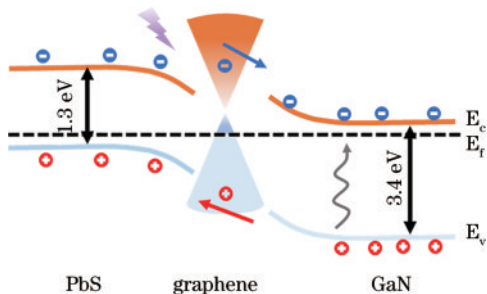


图 4 器件结构能带图

Fig. 4 Device structure band diagram

- heterojunction photodetector[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(8): 2000557.
- [8] 柯宇轩, 岑颖乾, 蔡殿禹, 等. 基于二维材料的光通信波段光电探测器[J]. *中国激光*, 2023, 50(1): 0113008.
- Ke Y X, Cen Y Q, Qi D Y, et al. Two-dimensional materials photodetectors for optical communications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(1): 0113008.
- [9] Novoselov K S, Fal'ko V I, Colombo L, et al. A roadmap for graphene[J]. *Nature*, 2012, 490(7419): 192-200.
- [10] Pospischil A, Humer M, Furchi M M, et al. CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 892-896.
- [11] 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.
- [12] Wang X M, Cheng Z Z, Xu K, et al. High-responsivity graphene/silicon-heterostructure waveguide photodetectors[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 888-891.
- [13] 李江霖, 孙科学. 基于纳米金属修饰的石墨烯光电探测器光吸收特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(21): 2124003
- Li J L, Sun K X. Light absorption characteristics of a graphene photodetector based on nano-metal modification[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(21): 2124003.
- [14] Ponomarenko L A, Schedin F, Katsnelson M I, et al. Chaotic Dirac billiard in graphene quantum dots[J]. *Science*, 2008, 320(5874): 356-358.
- [15] 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.
- [16] Wan X, Xu Y, Guo H W, et al. A self-powered high-performance graphene/silicon ultraviolet photodetector with ultra-shallow junction: breaking the limit of silicon? [J]. *NPJ 2D Materials and Applications*, 2017, 1: 4.
- [17] Jariwala D, Marks T J, Hersam M C. Mixed-dimensional van der Waals heterostructures[J]. *Nature Materials*, 2017, 16(2): 170-181.
- [18] Chen W J, Liang R R, Zhang S Q, et al. Ultrahigh sensitive near-infrared photodetectors based on MoTe<sub>2</sub>/germanium heterostructure[J]. *Nano Research*, 2020, 13(1): 127-132.
- [19] Zhang D, Lin W M, Liu S X, et al. Ultra-robust deep-UV photovoltaic detector based on graphene/(AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaN with high-performance in temperature fluctuations[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(51): 48071-48078.
- [20] He T, Zhang X D, Ding X Y, et al. Broadband ultraviolet photodetector based on vertical Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaN nanowire array with high responsivity[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(7): 1801563.
- [21] 周祥燕, 项文斌, 陈涌稷, 等. ZnCdS:Mn/ZnS 量子点在硅基紫外探测器中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(17): 1704001.
- Zhou X Y, Xiang W B, Chen Y J, et al. Application of ZnCdS: Mn/ZnS quantum dots in silicon-based ultraviolet detectors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(17): 1704001.
- [22] Wang Y J, Lu K Y, Han L, et al. In situ passivation for efficient PbS quantum dot solar cells by precursor engineering[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(16): 1704871.
- [23] Liu Q, Yang Y Q, Wang X F, et al. High-performance UV-visible photodetectors based on CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3-x</sub>Cl<sub>x</sub>/GaN microwire array heterostructures[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 864: 158710.
- [24] Liu Q, Shi J, Xu Z Z, et al. InGaN nanorods decorated with Au nanoparticles for enhanced water splitting based on surface plasmon resonance effects[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(5): 912.
- [25] Peter L M, Walker A B, Bein T, et al. Interpretation of photocurrent transients at semiconductor electrodes: effects of band-edge unpinning[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2020, 872: 114234.
- [26] Sun Y M, Song W D, Gao F L, et al. In situ conformal coating of polyaniline on GaN microwires for ultrafast, self-driven heterojunction ultraviolet photodetectors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(11): 13473-13480.
- [27] Lu X W, Sun L, Jiang P, et al. Progress of photodetectors based on the photothermoelectric effect[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(50): 1902044.
- [28] Chen X Q, Shehzad K, Gao L, et al. Graphene hybrid structures for integrated and flexible optoelectronics[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(27): 1902039.
- [29] Shen X, Wang D, Ning J, et al. MMA-enabled ultraclean graphene transfer for fast-response graphene/GaN ultraviolet photodetectors[J]. *Carbon*, 2020, 169: 92-98.
- [30] Tielrooij K J, Song J C W, Jensen S A, et al. Photoexcitation cascade and multiple hot-carrier generation in graphene[J]. *Nature Physics*, 2013, 9(4): 248-252.
- [31] Ma Q, Andersen T I, Nair N L, et al. Tuning ultrafast electron thermalization pathways in a van der Waals heterostructure[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 455-459.
- [32] Brongersma M L, Halas N J, Nordlander P. Plasmon-induced hot carrier science and technology[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(1): 25-34.
- [33] Liu Q, Song W D, Wang X F, et al. Fowler-Nordheim tunneling mechanism for performance improvement in graphene 2D/GaN 3D heterojunction ultraviolet photodetector[J]. *Carbon*, 2023, 201: 1061-1067.
- [34] Yin J, Liu L, Zang Y S, et al. Engineered tunneling layer with enhanced impact ionization for detection improvement in graphene/silicon heterojunction photodetectors[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 113.
- [35] Park J P, Heo J H, Im S H, et al. Highly efficient solid-state mesoscopic PbS with embedded CuS quantum dot-sensitized solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(3): 785-790.