

doi: 10.3788/gzxb20184706.0623001

石墨烯/二氧化钛异质结场效应探测器光电特性

周全^{1,2}, 张恩亮², 白向兴², 申钧², 魏大鹏², 汪岳峰^{1,2}

(1 中国人民解放军陆军工程大学 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

(2 中科院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

摘 要: 利用二氧化钛薄膜光吸收及表面钝化特性, 在硅晶圆基底表面制备石墨烯/二氧化钛异质结场效应管光电探测器, 并研究其光电响应特性。结果表明, 二氧化钛钝化后的探测器可以有效抑制沟道表面的气体小分子吸附, 降低器件的暗电流漂移; 同时, 探测器利用石墨烯的电荷敏感和复合薄膜的光谱吸收特性, 显著提高了石墨烯场效应管的响应度。紫外波段, 顶层二氧化钛吸光产生的光生电子将注入到石墨烯沟道中, 对石墨烯沟道产生 n 型掺杂, 器件最大响应度可达 3.5×10^5 A/W。在可见光波段, 因为二氧化钛层与石墨烯薄膜间存在杂质能级, 界面间的电荷转移使沟道载流子寿命显著提高, 相对于传统的二氧化钛阵列探测器, 该探测器在响应波段与响应度性能上都具有明显优势。

关键词: 石墨烯; 异质结; 场效应管; 光电探测器; 背栅调制; 耦合; 载流子寿命

中图分类号: TN324.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)06-0623001-9

Photoelectric Characteristics for Graphene/TiO₂ Heterojunction Field Effect Photodetectors

ZHOU Quan^{1,2}, ZHANG En-liang², BAI Xiang-xing²,
SHEN Jun², WEI Da-peng², WANG Yue-feng^{1,2}

(1 The Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

(2 Chongqing Insitute of Green and Intelligent Technology, Chongqing 400714, China)

Abstract: The photodetector based on Graphene/TiO₂ heterostructure is fabricated on the substrate of Si wafer, which takes advantage of the light absorption and surface passivation of TiO₂ film. The intrinsic photo-response of the photodetector is investigated in a wide range of wavelength. The result indicates that the graphene field-effect transistor photodetectors passivated with TiO₂ film deposited on graphene can efficiently prevent the surface channel absorbing the gas molecules, which reduces the dark current drift of graphene field-effect transistor devices. Meanwhile, the graphene channel is sensitive to the changes in charge, and wide spectral absorption characteristics of the composite film can increase the responsivity of graphene field-effect transistor detector significantly. At the ultraviolet band, the photon-generated carries produced by TiO₂ layer are mostly injected into the graphene channel, which leads to obvious n-type doping and the highest responsibility of 3.5×10^5 A/W. On the other side, at the visible band the impurity level between graphene and TiO₂ can improve the carrier lifetime of channel compared with the intrinsic graphene. In contrast with the traditional TiO₂ arrays photodetectors, the Graphene/TiO₂ heterostructure devices have obvious advantage on the performance of response waveband and

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.11404329, 61504148, 51402291, 61705229), 重庆市自然科学基金(No.CSTC2014jcyjqq50004), 重庆市基础科学与前沿技术研究专项基金(No. cstc2015jcyjA50018), 重庆市基础与前沿研究项目(No. cstc2015jcyjBX0046)资助

第一作者: 周全(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为石墨烯材料及器件。Email: zhouquan@cigit.ac.cn

导师: 汪岳峰(1967—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电检测及激光技术。Email: yfw@cigit.ac.cn

通讯作者: 申钧(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为石墨烯光电探测器、射频电子器件以及忆阻器件。Email: shenjun@cigit.ac.cn

收稿日期: 2017-12-06; **录用日期:** 2018-03-26

<http://www.photon.ac.cn>

responsibility.

Key words: Graphene; Heterostructure; Field-effect transistor; Photodetector; Back-gate modulation; Coupling; Carrier lifetime

OCIS Codes: 230.5160; 160.4236; 040.5160; 310.6845

0 引言

光电探测器作为核心光电子器件,广泛应用于成像、光谱分析、通信、红外夜视等领域^[1-4],其中光谱带宽和响应时间是衡量探测器的重要指标.目前,光电探测器材料主要有 Si^[5]、InGaAs^[6-8]、InSb、HgCdTe 等,其光谱响应范围取决于半导体的带隙宽度.石墨烯因为特殊的零带隙能带结构,理论上不存在截止波长,在紫外、可见光以及近红外波段都有明显的光电响应^[3,9-11],是制备宽光谱探测器的理想材料.同时,石墨烯还具有较高的载流子迁移率($2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)^[12-13],光生载流子可以在界面处有效分离和转移,相对于传统的半导体器件具有更高的响应速度.

石墨烯场效应管(Graphene Field-Effect Transistor, GFET)是直接利用石墨烯作为光电响应材料的典型器件.2009年, MUELLER T 等^[2]首先利用扫描光电成像技术对 GFET 器件的光电响应机理进行了探讨.研究表明, GFET 器件的光电流主要由温差电产生的热载流子电流和内建电场分离的光生电流组成,最大响应带宽可达 40 GHz^[14-15].但器件的光电响应区域主要集中在电极附近 300 nm 以内,石墨烯沟道内的光生载流子由于寿命很短(皮秒量级^[13]),对光电流基本不产生贡献,从而限制了 GFET 器件的响应度(6.1 mA/W).同时,当测试环境在空气气氛下时,光照引起的石墨烯表面小分子(如 O₂、H₂O)脱附也会导致 GFET 器件产生明显的暗电流漂移^[16-17].此时,光诱导吸附(photo-induced molecular)引起的沟道内阻变化是非均一的.因此,需要在提高石墨烯器件响应度的基础上,避免气体小分子吸附带来的暗电流漂移.

针对上述 GFET 器件问题,研究者们利用等离子体增强吸收、波导耦合、表面钝化、异质结复合等^[18-21]方式以提高石墨烯光探测器的性能.其中,基于异质结的 GFET 器件结构不仅具有较高的响应度,同时可以通过控制栅电压实现石墨烯沟道内的电荷快速释放. CHEN Z 等^[22]基于 GFET 器件对石墨烯/硅肖特基结的宽光谱光电特性进行分析,发现器件在可见光至红外波段都有明显的响应.利用石墨烯超快载流子迁移率和电荷敏感性可以为异质结光生载流子提供快速输运通道.沟道内的光生载流子主要来源于石墨烯的带间跃迁、肖特基结耗尽区以及硅基底. FRANK 等^[23]则通过将胶体 PbS 量子点与 GFET 器件复合,增加了近红外波段(800~1 600 nm)界面光生载流子的量子效率,实现了最大 10^5 A/W 的响应度,并通过顶部 ITO 电极栅调控将探测器带宽提高到 1.5 kHz.本文在此基础上提出一种表面钝化石墨烯/二氧化钛(Gr/TiO₂)异质结探测器结构,这种石墨烯异质结的主要优势是利用 TiO₂层隔绝空气接触,抑制光开关过程中的暗电流漂移;同时 TiO₂与石墨烯界面的电荷耦合作用降低了光生载流子复合率,提高宽波段 GFET 器件的响应度.

1 器件结构及实验方法

图 1(a)为制备石墨烯/二氧化钛薄膜异质结探测器的主要过程.实验所用基底为高掺 $0.001 \Omega \cdot \text{cm}$ p 型硅,表面热氧化层 SiO₂厚度为 88 nm.采用化学气相沉积法(Chemical Vapor Deposition, CVD)在铜基底表面制备得到单层石墨烯,并利用 HCl/H₂O₂湿法刻蚀^[24]铜基底将石墨烯转移到 Si/SiO₂基底表面. GFET 器件的表面电极采用光学曝光和正胶剥离(lift-off)工艺制备,源漏金属电极均为 5 nm/50 nm 的 Cr/Au,对称电极结构可以有效降低噪声干扰.为防止背栅调制时,栅源漏电流对沟道电流的影响,利用微波氧等离子体刻蚀对源漏电极间的石墨烯进行条带化.值得注意的是,在制备过程发现氧等离子体直接刻蚀会导致石墨烯表面光刻胶(AZ3100)变性而无法剥离.为解决此问题,采用双层胶刻蚀方法,即先旋涂缓冲层聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA),防止光刻胶和石墨烯直接接触.由于氧等离子体刻蚀 AZ3100 和 PMMA 的速率不同,因此可以在一定范围内控制刻蚀时间,并通过浸泡正胶去胶液带走表面双层胶得到干净的石墨烯条带.最后利用真空电子束蒸镀在石墨烯条带表面蒸镀一层 10 nm 厚的 TiO₂连续薄膜,扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)表征结果显示复合薄膜实际厚度为 12.7 nm.图 1(b)为去除光刻胶后的石墨烯条带器件实物图,其中方形区域内为 Gr/TiO₂复合区域,圆形区域中的絮状物为剥离后漂浮在 Si/SiO₂基底的变性光刻胶薄膜.

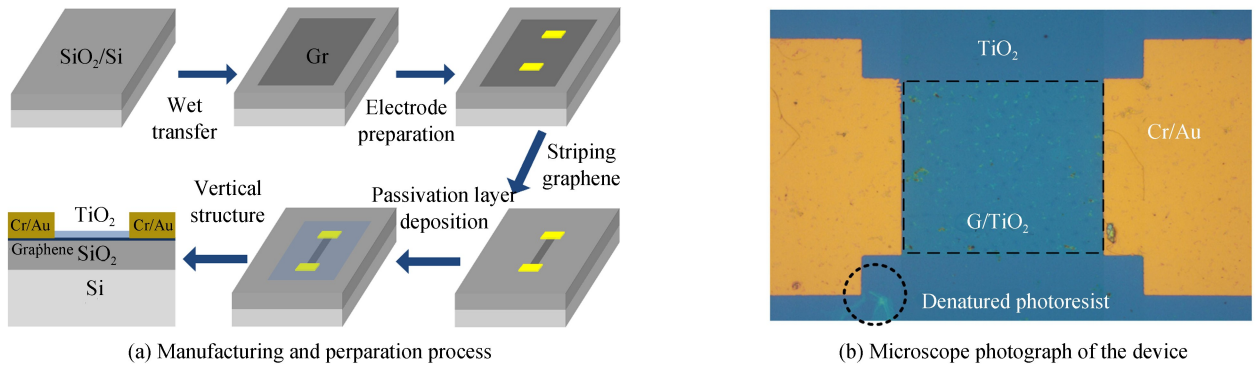


图 1 Gr/TiO₂ 异质结探测器制备流程图和实物图

Fig.1 Fabrication process of Gr/TiO₂ heterojunction photodetector and the microscope photograph of the device

图 2(a)为最终制备的石墨烯/二氧化钛薄膜异质结截面结构图.将复合薄膜 400℃ 退火并进行喇曼表征,如图 2(b),可见底层石墨烯产生的缺陷在 D 峰的强度略有升高, $I_G/I_{2D} < 1$,说明石墨烯为单层.图 2(c)为石墨烯/二氧化钛薄膜异质结的 X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)图,退火后无定型的二氧化钛薄膜重结晶而产生锐钛矿相和金红石相.排除基底 Si-100(69.1°)和无定型 SiO₂(20°)干扰,通过对比 TiO₂ 标准 XRD 图谱可知锐钛矿相占主导,其中 Anatase-101(25.3°)峰比较明显^[25-26].图 2(d)分别为单层石墨烯(Gr)、TiO₂及复合薄膜(Gr/TiO₂)紫外-可见光透过率曲线.由于存在杂质及缺陷,单层石墨烯的宽波段平均吸收率为 3.5%,仅在 260 nm 附近存在 8%的 π 键等离子体吸收峰^[27].TiO₂属于宽带隙半导体($E_g = 3.2$ eV),对可见光波段光吸收很弱,光子能量大于带隙 E_g 时才有较强的吸收,复合薄膜同时体现了两种薄膜的吸收特性.

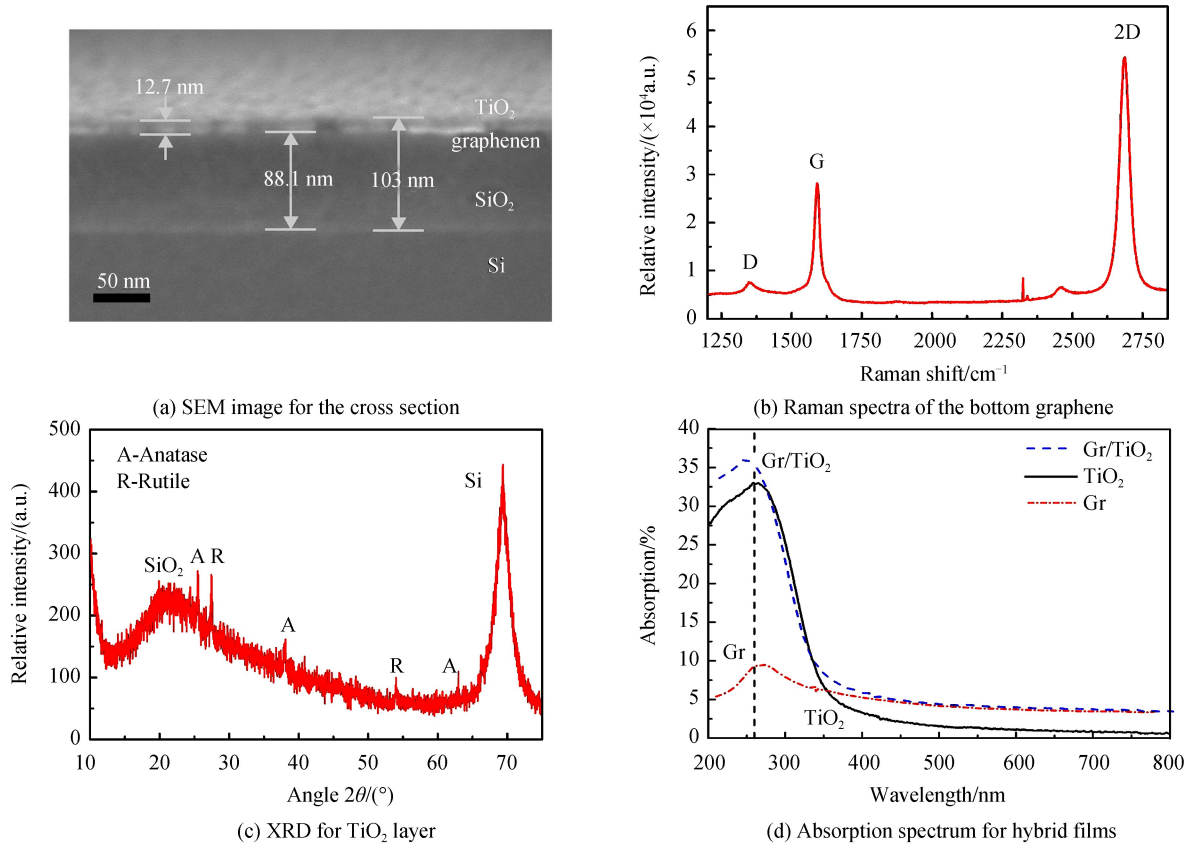


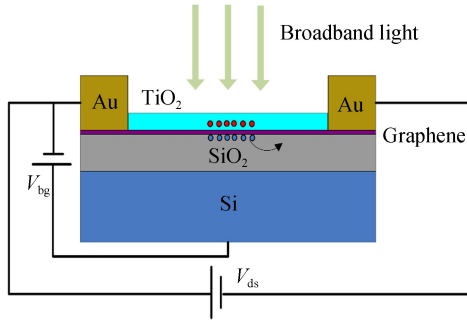
图 2 石墨烯/二氧化钛复合薄膜性能表征

Fig.2 Performance characterization of graphene/TiO₂ hybrid film

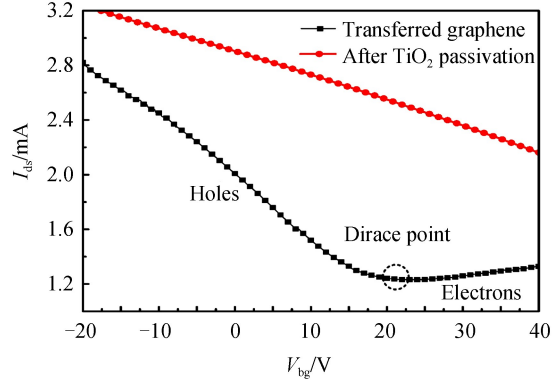
2 实验结果及讨论

2.1 TiO₂钝化 GFET 器件的暗电流响应

图 3(a)为 Gr/TiO₂异质结探测器的工作示意图,其背栅电压 V_{bg} 及源漏电压 V_{ds} 由 Tektronix 4200 参数分析仪控制.由于源漏电极为对称金属电极,沟道内的载流子输运需添加 1 V 的固定偏压.



(a) The working principle of hybrid devices



(b) The typical dark current response for GFET devices

图 3 异质结探测器工作原理及典型暗电流响应

Fig.3 Working principle and typical dark current response for heterojunction photodetectors

图 3(b)为沉积钝化层前后石墨烯源漏电流 I_{ds} 随背栅电压 V_{bg} 变化的响应曲线,为防止背栅击穿, V_{bg} 的调节范围为 $-20 \sim 40$ V.从 V 型曲线可以看出,场效应管中石墨烯沟道的掺杂浓度和掺杂类型可以由背栅调控,表现出明显的双极性^[28].曲线在石墨烯的狄拉克点两边导电类型不同,以左为空穴导电,以右为电子导电.由于空气分子掺杂、基底耦合、光刻胶残留等因素影响,下层石墨烯为 p 型掺杂^[29].当 V_{bg} 为 20 V 时,石墨烯费米能级与狄拉克点平齐,此时载流子浓度最低.圆形点线为蒸镀 TiO₂ 后的 V_{bg}/I_{ds} 曲线,相比方形点线其狄拉克点明显右移,同时迁移率一定程度降低.此结果证明退火后的 TiO₂ 对石墨烯条带的界面耦合作用很明显,导致电子从石墨烯向 TiO₂ 转移,石墨烯条带内富集大量空穴,从而产生稳定的 p 型掺杂.石墨烯沟道的载流子迁移率 μ 可利用电导率 σ 公式对实验结果(图 3(b))拟合得出.石墨烯载流子迁移率表达式^[30]为

$$\mu = \frac{\sigma}{ne} = \frac{g_m t L}{\epsilon \epsilon_0 (V_{bg} - V_{Dirac}) W} \quad (1)$$

式中, n 为电掺杂沟道载流子浓度, $n = \epsilon \epsilon_0 (V_{bg} - V_{Dirac}) / (et)$, ϵ 为背栅氧化物介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, V_{bg} 为栅源电压, V_{Dirac} 为狄拉克点电压, t 为背栅氧化层厚度, e 为电子电量, g_m 为跨导, L 、 W 分别为石墨烯条带长度与宽度.实际测量沟道单位电容为 1.1×10^4 pF/cm², 通过计算,图 3(b)中钝化前石墨烯的空穴迁移率为 $1430 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 电子迁移率为 $749 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 退火后空穴迁移率降低至 $968 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$.

2.2 TiO₂钝化 GFET 器件双波段光电响应

将光纤激光器光斑聚焦照射石墨烯条带中心,光斑直径为 $50 \mu\text{m}$.当使用 254 nm 光源照射器件时,图 4(a)中石墨烯的转移曲线随光照强度增大明显向负偏压方向偏移,沟道内电子注入使得狄拉克点最终恢复到 8 V 的位置.背栅偏压 V_{bg} 为零时的光电流逐渐由 3 mA 降低到 1.25 mA,通过式(2)计算响应度可以达到 $3.5 \times 10^5 \text{ A/W}$.图 4(b)为 635 nm 光源照射时的石墨烯转移曲线.不同于紫外波段,其转移曲线随光功率增大而向正偏压方向移动,这意味着注入到沟道内的载流子为光生空穴.零背栅偏压下的光电流随光照强度的增加逐渐升高到 3.3 mA.与单纯的 GFET 器件相比,其响应度由 6.1 mA/W 增长到 0.4 A/W .为避免由于背栅漏电导致的测量误差,分别对器件在 254 nm 和 635 nm 光照下的 V_{ds}/I_{ds} 曲线进行测试,发现对应波长的光电流曲线分别位于暗电流的两侧,与图 4(b)、(c)的 V_{ds}/I_{ds} 曲线相吻合.通过改变背栅电压,可以同时探测器的双波段响应度进行调控,图 4(d)为响应度 R 随背栅电压变化的响应曲线.由于载流子掺杂类型不同,双波段的响应度调制方向正好相反,其调制范围分别为 68.5% 和 33.3%.在测试 254 nm 波段净光电流时发现 ΔI 与零点不对称,间接反映了界面耦合带来的迟滞效应.图 4(c)内插图净光电流随偏压变化曲线,在反偏时双波段响应都表现出良好的线性特性.

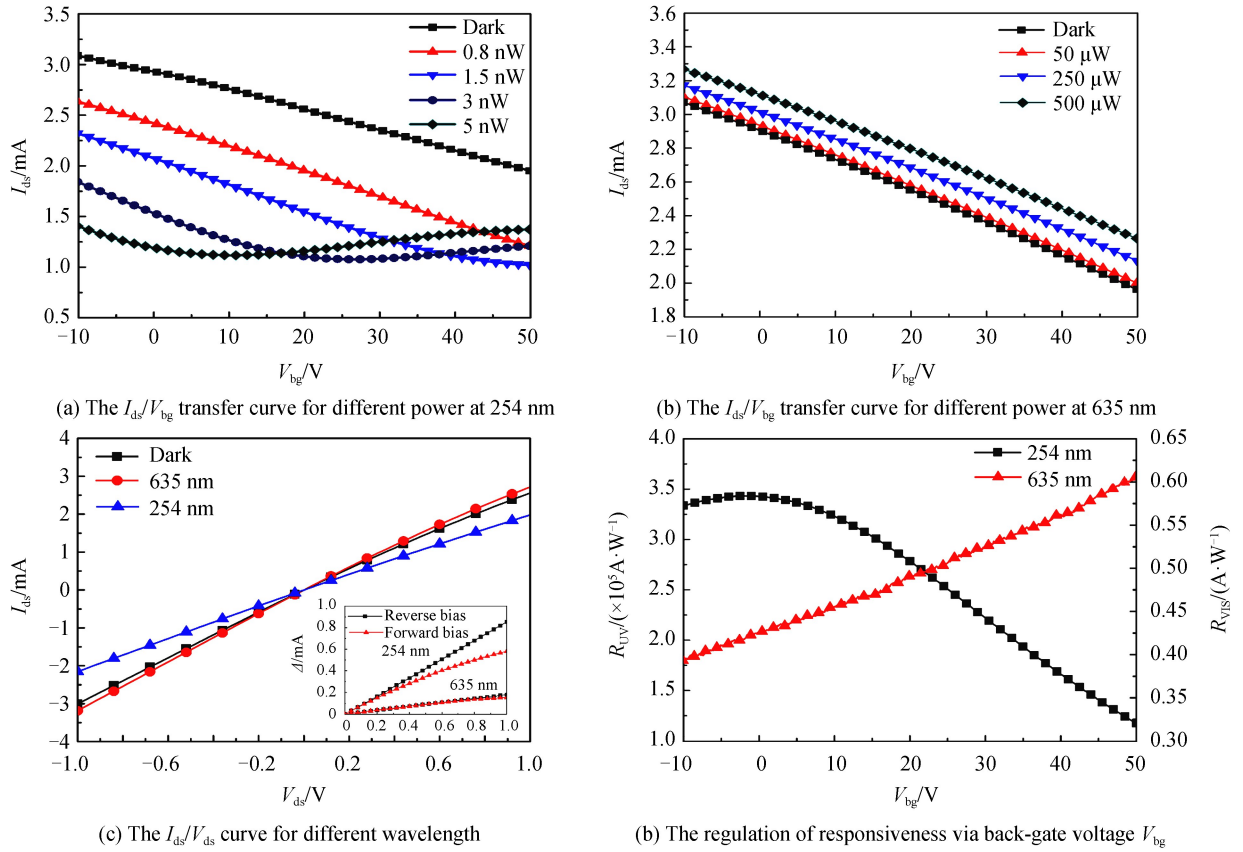


图4 石墨烯/二氧化钛异质结界效应探测器双波段光电响应特性
Fig.4 Dual-band photoelectric response of the graphene/TiO₂ heterojunction device

$$R = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{P_{\text{abs}}} = \frac{\Delta I}{P_{\text{abs}}} \quad (2)$$

对于异质结 GFET 器件,光照后光生载流子在内建电场的作用下分离,并进入石墨烯沟道对其产生掺杂作用,从而改变石墨烯费米能级和器件狄拉克点位置.注入的光生载流子浓度 Δn_{ph} 与净光电流 ΔI 的关系为

$$R_{\text{dark}} = R_c + \frac{L/W}{e\mu \sqrt{n_0^2 + n^2}} \quad (3)$$

$$R_{\text{light}}(\Delta n_{\text{ph}}) = R_c + \frac{L/W}{e\mu \sqrt{n_0^2 + C_g^2 (V_{\text{bg}} - V'_{\text{Dirac}})^2}} \quad (4)$$

$$n_{\text{ph}} = C_g V'_{\text{Dirac}} = n_0 + \Delta n_{\text{ph}} \quad (5)$$

$$\Delta I = I_{\text{light}} - I_{\text{dark}} = \frac{V_{\text{ds}}}{R_{\text{light}}(\Delta n_{\text{ph}})} - \frac{V_{\text{ds}}}{R_{\text{dark}}} = \frac{V_{\text{ds}}}{R_c + \frac{L/W}{e\mu \sqrt{n_0^2 + C_g^2 \left(V_{\text{bg}} - \frac{n_0 + \Delta n_{\text{ph}}}{C_g} \right)^2}}} - \frac{V_{\text{ds}}}{R_{\text{dark}}} \quad (6)$$

在背栅和光照共同调制作用下,沟道内的载流子来自于三部分:本征石墨烯的剩余载流子 n_0 ,电掺杂注入载流子 n 以及光注入载流子 Δn_{ph} .根据式(3)~(6)可以计算得到不同沟道光生载流子浓度掺杂下 GFET 器件的典型光电调制响应曲线,如图 5 所示. Δn_{ph} 的正负分别表示光生空穴和电子掺杂,器件狄拉克点(图 5 (a)源漏电流最低点)随光生电子掺杂浓度的提高逐渐向负偏压方向偏移,在背栅偏压 40 V 时,石墨烯沟道内的载流子类型由空穴($-1.9 \times 10^{13} \sim 0$)逐渐转化为电子($-2.5 \times 10^{13} \sim -1.9 \times 10^{13}$).图 5(b)中器件净光电流的最大位置出现在 10 V 的背栅偏压附近,当器件处于高增益时($\Delta n_{\text{ph}} < -20 \times 10^{12}$),不需要添加过高的背栅电压,就可以实现较大的光电流响应.而在低增益条件下(虚线附近),背栅对器件的调制作用就不明显,这一点也从图 4(d)中得到验证.

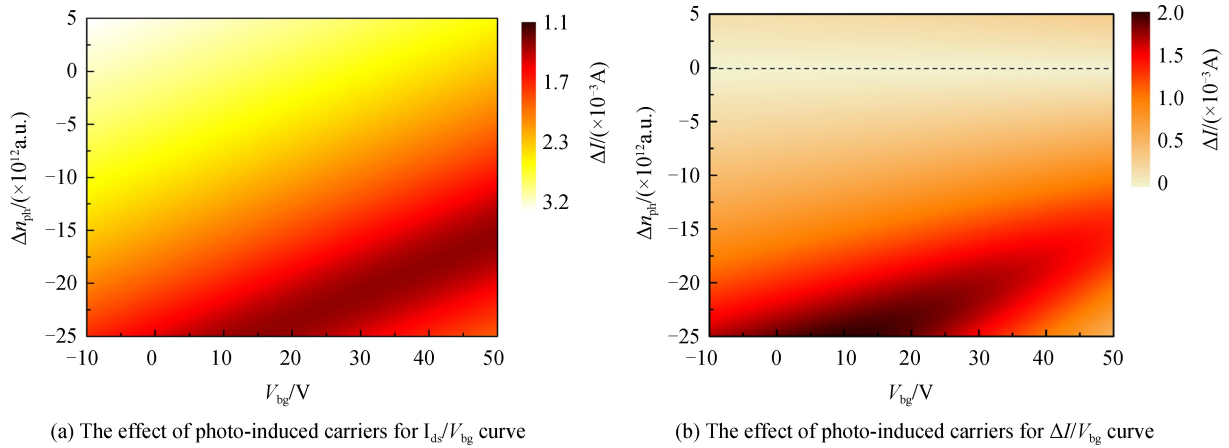


图5 沟道光生载流子掺杂对器件源漏电流 I_{ds} 与净光电流 ΔI 的影响
Fig.5 Effect of channel photo-induced carriers doping on the I_{ds} and the net photocurrent ΔI

2.3 器件探测机理及时域响应分析

为了进一步说明异质结探测器不同波段探测机理,图6(a)分别给出不同光照条件下器件的能带分析.当入射光能量大于 TiO_2 带隙(3.2 eV)时, TiO_2 层首先产生电子空穴对,在内建电场的作用下电子自发地进入石墨烯沟道,空穴被 TiO_2 中的缺陷态束缚.随着光生载流子增多, TiO_2 内的缺陷态逐渐被空穴占据,此时界面两端费米能级逐渐达到平衡.由于石墨烯电子迁移速率快,进入沟道内的光生电子可以快速到达电极两侧,以此减少探测器的响应时间.图6(b)为 254 nm 光照下探测器时间响应特性,上升时间与下降时间(最大光响应的 90% 与 10%)分别为 1.5 s、5.2 s.其上升时间与传统的 II/VI 族纳米带探测器(ZnSe、ZnS、CdSe)^[27] 类似,但响应度接近量子点探测器.停止光照后,石墨烯沟道内的电子由于要翻过界面势垒进入 TiO_2 才能完成复合,因此复合时间相对要长.为进一步提高器件响应速度,可以在 off 状态时给背栅施加正偏压实现 p 型

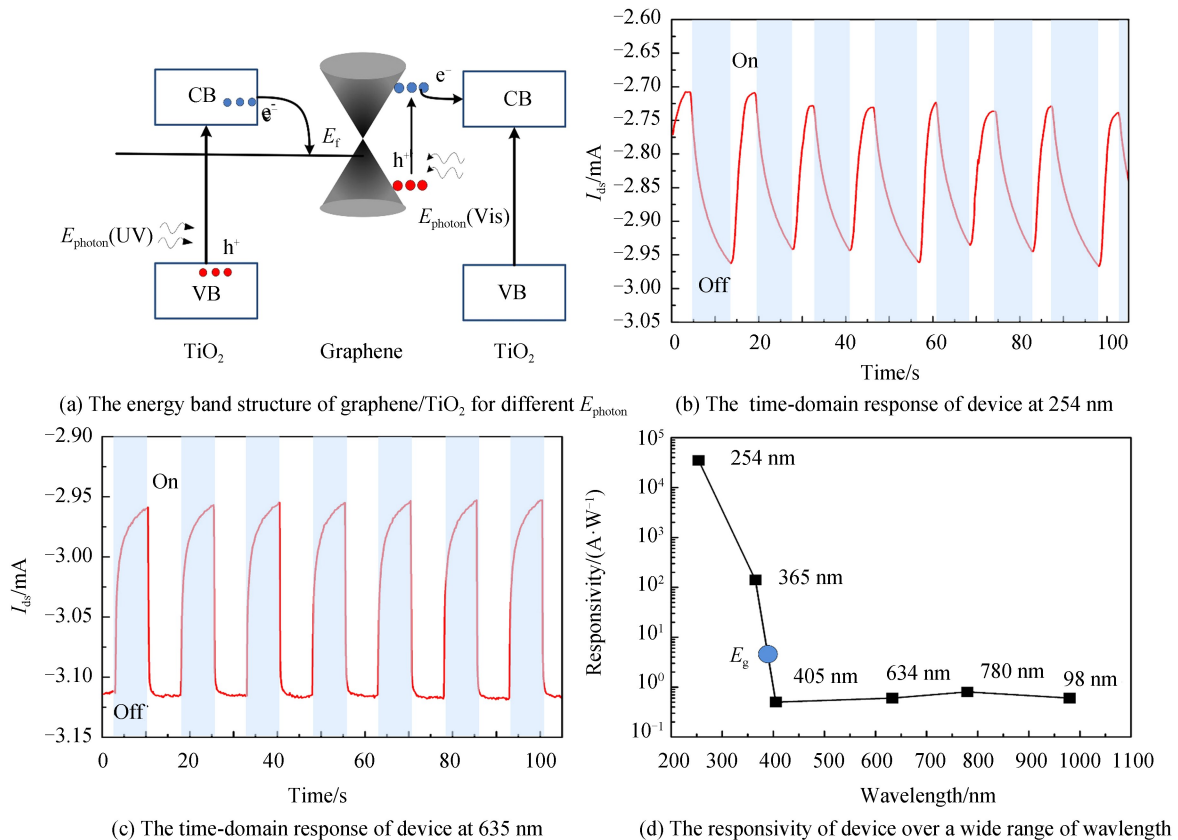


图6 石墨烯/二氧化钛异质结光电探测器能带结构及时域响应特性
Fig.6 Energy band structure and time response characteristics of the graphene/ TiO_2 heterojunction devices

电掺杂,从而使沟道石墨烯内的光生电子快速释放,降低其电子弛豫时间.钝化后,由于没有气体小分子脱附导致沟道内阻变化,暗电流漂移效应被有效抑制,反复光照下器件暗电流始终保持在 2.97 mA 附近.

在可见光波段,探测器光响应转移曲线的偏移方向发生明显改变.图 6(c)中 635 nm 有无光照下电流变化方向与图 6(b)刚好相反,其上升时间与下降时间分别为 25 ms、42 ms.通过对锐钛矿型 TiO₂(101)与石墨烯复合体系的界面电荷转移做第一性原理计算^[31],发现杂化能级使复合体系的光响应区域由紫外向可见光区红移.光照下石墨烯中价电子由 C-2p 轨道向 Ti-3d 轨道迁移,这种有选择的迁移过程降低了沟道内载流子复合.以 τ 表示石墨烯沟道内的空穴寿命, $\tau_{\text{trans}} = L^2 / (\mu_0 V_{\text{ds}})$ 表示沟道内的载流子迁移时间,则探测器的光电增益 $G = \tau / \tau_{\text{trans}}$ ^[32-33].实际器件的沟道长度 L 为 10 μm ,空穴迁移率 μ_0 为 968 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,漏源偏压 V_{ds} 为 1 V.通常计算光电增益 $G = M(I_{\text{ph}}/P_{\text{abs}})(h\nu/q)$,可以得到器件光电增益为 0.78,以此估算石墨烯沟道内空穴寿命将达到 0.78 ns,比普通 GFET 器件提高近 10³ 倍.紫外光照射时顶层 TiO₂ 层光吸收率远大于底层石墨烯层,宏观表现为 TiO₂ 层的电子注入,而实际上,也存在石墨烯向 TiO₂ 的电荷转移,这也对器件时间响应产生一定影响.缩短器件沟道长度,提高石墨烯迁移率等方法对改善器件增益有积极作用.在双波段基础上,分别对 980 nm、780 nm、405 nm、365 nm 波段的器件光响应进行测试,如图 6(d)所示响应曲线与吸收光谱相匹配.探测器在可见光波段的响应度基本在 0.5 A/W 附近,随着向紫外波段靠近,响应度显著提高.器件的光谱响应极限应与复合材料界面杂化能级构成的带隙有关.表 1 中将 TiO₂/GFET 异质结器件与传统 TiO₂ 纳米线阵列器件进行对比,可见异质结器件在紫外波段的响应度具有显著优势,仅下降时间较慢;而在可见光/近红外波段,快速的响应时间使异质结器件可以应用于成像领域.

表 1 TiO₂/GFET 异质结探测器与同类 TiO₂ 探测器性能比较

Table 1 Comparison of the characteristic parameters between graphene/ TiO₂ film hybrid photodetector and other TiO₂ based photodetectors

Photodetectors	Dark current	Photocurrent	R_{λ}	Rise time	Decay time	Reference
TiO ₂ nanotube arrays	10 ⁻⁹ A(2.5 V)	10 ⁻⁵ A	13 A/W (250~350 nm)	0.5 s	0.7 s	[34]
Annealed TiO ₂ nanowires	5.75×10 ⁻⁹ A(5 V)	6.33×10 ⁻⁸ A	—	0.16 s	0.31 s	[35]
TiO ₂ (MSM)	1.9×10 ⁻⁹ A(5 V)	2.5×10 ⁻⁶ A	199 A/W (250~350 nm)	6 s	15 s	[36]
TiO ₂ /PANI heterostructured arrays	1.5×10 ⁻⁹ A(0 V)	4.7×10 ⁻⁶ A	0.59 $\mu\text{A}/\text{W}$ (200~400 nm)	1 s	2 s	[37]
ZnS nanobelts	0.8×10 ⁻¹¹ A (5 V)	0.5×10 ⁻¹² A	0.12 A/W (365 nm)	<1 s	<1 s	[38]
ZnSe nanowires	2.9×10 ⁻⁸ A (0.1V)	2.7×10 ⁻⁶ A (1V)	—	<1 s	<1 s	[39]
TiO ₂ /graphene FET	2.97×10 ⁻³ A(1 V)	3.12×10 ⁻³ A(V) 2.70×10 ⁻³ A(U)	0.4 A/W 5.4×10 ⁴ A/W	0.025 1.5 s	0.042 5.4 s	This work

3 结论

本文通过表面钝化石墨烯/二氧化钛异质结构有效改善了 GFET 器件的光电响应特性,利用 TiO₂ 钝化层可以使气体小分子脱附现象得到抑制,将器件暗电流控制在 2.97 mA 附近;同时通过控制石墨烯沟道内载流子寿命,可以提高器件宽波段响应度.在紫外波段,石墨烯沟道内以 TiO₂ 持续注入的光生电子为主,通过背栅调控帮助载流子释放,有望改善 off 状态时的载流子弛豫时间.在可见光波段,石墨烯作为吸光层保证了器件宽光谱响应特性,器件光谱响应极限与复合薄膜杂化能级带隙有关.相比普通 GFET 器件,沟道内载流子复合寿命相对提高了 10³ 倍.研究结果可为今后基于 GFET 器件的复合薄膜宽波段探测提供新的思路.

参考文献

- [1] GAN X, SHIUE R J, GAO Y, *et al.* Chip-integrated ultrafast graphene photodetector with high responsivity[J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(11): 883-887.
- [2] MUELLER T, XIA F, AVOURIS P. Graphene photodetectors for high-speed optical communications[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(5): 297-301.
- [3] 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.
- [4] GUO N, HU W, JIANG T, *et al.* High-quality infrared imaging with graphene photodetectors at room temperature[J]. *Nanoscale*, 2016, **8**(35): 16065.
- [5] GHANBARZADEH S, ABBASZADEH S, ADACHI M, *et al.* Low dark current and high dynamic range a-Si:H MSM photodetector for large area medical imaging[C]. *SPIE*, **2013**: 86683U.
- [6] HERRSCHER M, GRUNDMANN M, DROGE E, *et al.* Epitaxial liftoff InGaAs/InP MSM photodetectors on Si[J]. *Electronics Letters*, 2002, **31**(16): 1383-1384.
- [7] CHYI J I, HONG J W, LIN W, *et al.* Low dark current and high linearity InGaAs MSM photodetectors[J]. *Electronics Letters*, 2010, **30**(4): 355-356.
- [8] BROUCKAERT J, ROELKENS G, THOURHOUT D V, *et al.* Thin film InGaAs MSM photodetectors integrated onto silicon-on-insulator waveguide circuits[J]. *Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter*, 2006: 117-120.
- [9] 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.
- [10] XIA F, MUELLER T, LIN Y M, *et al.* Ultrafast graphene photodetector[J]. *Nature Nanotechnology*, 2009, **4**(12): 1-2.
- [11] ZHANG B Y, LIU T, MENG B, *et al.* Broadband high photoresponse from pure monolayer graphene photodetector [J]. *Nature Communications*, 2013, **4**(6): 1811.
- [12] BOLOTIN K I, SIKES K J, JIANG Z, *et al.* Ultrahigh electron mobility in suspended graphene[J]. *Solid State Communications*, 2008, **146**(9-10): 351-355.
- [13] DAWLATY J M, SHIVARAMAN S, CHANDRASHEKHAR M, *et al.* Measurement of ultrafast carrier dynamics in epitaxial graphene[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(4): 042116.
- [14] XIA F, MUELLER T, LIN Y, *et al.* Ultrafast graphene photodetector[C]. *Lasers and Electro-Optics*, 2009: 1-2.
- [15] SUN D, AIVAZIAN G, JONES A M, *et al.* Ultrafast hot-carrier-dominated photocurrent in graphene[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, **7**(2): 114-118.
- [16] KANG C G, LEE S K, CHOE S, *et al.* Intrinsic photocurrent characteristics of graphene photodetectors passivated with Al₂O₃[J]. *Optical Express*, 2013, **21**(20): 23391-400.
- [17] SUN P, ZHU M, WANG K, *et al.* Photoinduced molecular desorption from graphene films[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(5): 053107.
- [18] WANG J, CHENG Z, CHEN Z, *et al.* Graphene photodetector integrated on silicon nitride waveguide[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, **117**(14): 144504.
- [19] GOO KANG C, KYUNG LEE S, YOO T J, *et al.* Highly sensitive wide bandwidth photodetectors using chemical vapor deposited graphene[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(16): 574.
- [20] FURCHI M, URICH A, POSPISCHIL A, *et al.* Microcavity-integrated Graphene photodetector[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(6): 2773.
- [21] MIAO J, HU W, GUO N, *et al.* Photodetectors: high - responsivity Graphene/InAs nanowire heterojunction near - infrared photodetectors with distinct photocurrent on/off ratios (small 8/2015)[J]. *Small*, 2015, **11**(8): 936.
- [22] CHEN Z, CHENG Z, WANG J, *et al.* High responsivity, broadband, and fast Graphene/silicon photodetector in photoconductor mode[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(9): 1207-1214.
- [23] KONSTANTATOS G, BADIOLI M, GAUDREAU L, *et al.* Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, **7**(6): 363-368.
- [24] GAO L, REN W, XU H, *et al.* Repeated growth and bubbling transfer of graphene with millimetre-size single-crystal grains using platinum[J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 699.
- [25] LI Tong-cai, GUO Bao-gang, LI Tong-hong, *et al.* Microstructure, phase composition and hydrophilic properties of nano TiO₂ film prepared by electron beam evaporation[J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, **46**(13): 13035-13039.
李同彩, 郭宝刚, 李同洪, 等. 电子束蒸镀纳米 TiO₂ 薄膜结构、相组成及亲水性研究[J]. *功能材料*, 2015, **46**(13): 13035-13039.
- [26] PENG Xiao-guang, WANG Yang, CAO Kai-bin, *et al.* Large-scale fabrication by vacuum evaporation and characterization of TiO₂ thin films[J]. *Journal of Functional Materials*, 2008, **39**(11): 1770-1773.
彭晓光, 汪洋, 曹开斌, 等. 大规模真空蒸镀二氧化钛薄膜及其表征[J]. *功能材料*, 2008, **39**(11): 1770-1773.
- [27] HUANG F, JIA F, CAI C, *et al.* High- and reproducible-performance Graphene/II-VI semiconductor film hybrid photodetectors[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 28943.
- [28] WEI Zi-jun, WANG Zhi-gang, LI Chen, *et al.* Studies on the photoresponse in Graphene-based field-effect transistors [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, **50**(4): 704-708.
魏子钧, 王志刚, 李晨, 等. 石墨烯场效应晶体管的光响应特性研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, **50**(4): 704-708.

- [29] JIA K, YANG J, SU Y, *et al.* Stability analysis of a back-gate graphene transistor in air environment[J]. *Journal of Semiconductors*, 2013, **34**(8): 084004.
- [30] LIAO Z M, HAN B H, ZHOU Y B, *et al.* Hysteresis reversion in graphene field-effect transistors[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2010, **133**(4): 044703.
- [31] FERRIGHI L, FAZIO G, VALENTIN C D. Charge carriers separation at the Graphene/(101) anatase TiO₂ Interface [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2016, **3**(6): 1500624.
- [32] LIU Y, WANG F, WANG X, *et al.* Planar carbon nanotube-graphene hybrid films for high-performance broadband photodetectors[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 8589.
- [33] KOPPENS F H, 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.
- [34] ZOU J, ZHANG Q, HUANG K, *et al.* Ultraviolet photodetectors based on anodic TiO₂ nanotube arrays[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2010, **114**(24): 10725-10729.
- [35] SHOUGAIJAM B, LENKA T R, NGANGBAM C. Fast response time photodetector based on annealed TiO₂ nanowires deposited by GLAD[C]. Region 10 Conference (TENCON), 2017: 2757-2760.
- [36] XUE H, KONG X, LIU Z, *et al.* TiO₂ based metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(20): 223505.
- [37] ZU X, WANG H, YI G, *et al.* Self-powered UV photodetector based on heterostructured TiO₂ nanowire arrays and polyaniline nanoflower arrays[J]. *Synthetic Metals*, 2015, **200**: 58-65.
- [38] FANG X, BANDO Y, LIAO M, *et al.* Single - crystalline ZnS nanobelts as ultraviolet - light sensors[J]. *Advanced Materials*, 2009, **21**(20): 2034-2039.
- [39] HSIAO C H, CHANG S J, WANG S B, *et al.* ZnSe nanowire photodetector prepared on oxidized silicon substrate by molecular-beam epitaxy[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2009, **156**(4): J73-J76.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 11404329, 61504148, 51402291, 61705229), Natural Science Foundation Project of CQ CSTC (No. CSTC2014jcyjqq50004), Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (No. cstc2015jcyjA50018) and the Fundamental and Advanced Research Project (Key Program) of ChongQing Municipality (No. cstc2015jcyjBX0046)

引用格式:ZHOU Quan, ZHANG En-liang, BAI Xiang-xing, *et al.* Photoelectric Characteristics for Graphene/TiO₂ Heterojunction Field Effect Photodetectors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0623001

周全,张恩亮,白向兴,等.石墨烯/二氧化钛异质结场效应探测器光电特性[J].*光子学报*,2018,**47**(6):0623001