

基于石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管的光电探测器

郑加金 王雅如 余柯涵 徐翔星 盛雪曦 胡二涛 韦玮

Field effect transistor photodetector based on graphene and perovskite quantum dots

Zheng Jia-Jin Wang Ya-Ru Yu Ke-Han Xu Xiang-Xing Sheng Xue-Xi Hu Er-Tao Wei Wei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 118502 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180129

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180129>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[石墨烯射频器件研究进展](#)

Research progress of graphene radio frequency devices

物理学报.2017, 66(21): 218502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.218502>

[隧道场效应晶体管静电放电冲击特性研究](#)

Research on electrostatic discharge characteristics of tunnel field effect transistors

物理学报.2014, 63(17): 178501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.178501>

[基于栅绝缘层表面修饰的有机场效应晶体管迁移率的研究进展](#)

Progress of the improved mobilities of organic field-effect transistors based on dielectric surface modification

物理学报.2012, 61(22): 228502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.228502>

[V₂O₅ 电极修饰对 C₆₀/Pentacene 双层异质结场效应晶体管性能的影响](#)

The influence of modified electrodes by V₂O₅ film on the performance of ambipolar organic field-effect transistors based on C₆₀/Pentacene

物理学报.2012, 61(21): 218502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.218502>

[高功率微波作用下热载流子引起n型金属-氧化物-半导体场效应晶体管特性退化研究](#)

Research on characteristics degradation of n-metal-oxide-semiconductor field-effect transistor induced by hot carrier effect due to high power microwave

物理学报.2012, 61(10): 108501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.108501>

基于石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管的光电探测器*

郑加金¹⁾³⁾ 王雅如¹⁾ 余柯涵^{1)†} 徐翔星^{2)‡} 盛雪曦²⁾ 胡二涛¹⁾ 韦玮¹⁾

1) (南京邮电大学电子与光学工程学院, 南京 210023)

2) (南京师范大学化学与材料科学学院, 南京 210023)

3) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2018年1月18日收到; 2018年3月20日收到修改稿)

以等离子增强化学气相沉积法制备的石墨烯作为导电沟道材料, 将其与无机CsPbI₃钙钛矿量子点结合, 设计并制备了石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管光电探测器。研究和分析了石墨烯作为场效应晶体管的电学特性及其与钙钛矿量子点结合作为光电探测器的光电特性。结果表明, 石墨烯在场效应晶体管中表现出良好的电学性质, 其与钙钛矿量子点的结合对波长为400 nm的光辐射具有明显的光响应, 在光强为12 μW时器件光电流最大为64 μA, 响应率达6.4 A·W⁻¹, 对应的光电导增益和探测率分别为 3.7×10^4 , 6×10^7 Jones (1 Jones = 1 cm·Hz^{1/2}·W⁻¹)。

关键词: 场效应晶体管, 石墨烯, 钙钛矿量子点, 光电探测器

PACS: 85.60.Gz, 85.30.Tv, 81.07.Ta

DOI: 10.7498/aps.67.20180129

1 引言

近年来, 石墨烯由于其优良的光电性能在光电子器件中得到了广泛的应用。特别是在光电探测方面, 利用石墨烯高载流子迁移率、宽波长光吸收等优异特性和晶体管的场效应结合的光电探测器是目前相关领域的研究热点^[1,2]。基于石墨烯场效应晶体管的光电探测器已经有很多报道^[3,4], 但是由于石墨烯光吸收较弱, 通常仅有2.3%, 且其电子-空穴复合速率较快, 缺乏产生多倍载荷子的增益机制, 导致单一石墨烯光电探测器存在激子湮灭较快、器件光增益较小等缺点, 从而进一步限制了器件的光响应率(10^{-2} A·W⁻¹)^[5]。为了提高这类石墨烯光电探测器件的性能, 研究人员利用微腔集

成和等离子体耦合等方法来提高石墨烯的光吸收率, 但是这类器件因缺乏增益机制而无法实现优异的探测^[6,7]。因此, 为了获得较高增益, 有研究人员将石墨烯与B掺杂的Si量子点等增益材料复合^[8], 亦有研究人员将石墨烯与二硫化钼等材料形成异质结或者与其衍生物形成范德瓦尔斯异质结^[9,10], 均获得极高的增益和优异的探测性能。但相对而言, 上述器件一般制备工艺较复杂、成本较高, 无法大面积集成化。

卤化物钙钛矿材料(ABX_3 , $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$)因其在太阳能电池领域具有极高的光电转换效率而备受关注, 且其还具有成本低、载流子扩散距离长、光吸收系数大等优点, 将其集成到石墨烯光电探测器之中, 能有效弥补石墨烯光电探测器存在的不

* 国家自然科学基金(批准号: 61504064, 51572120)、中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(批准号: SKLST201606)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20150847)和南京邮电大学国自基金孵化基金(批准号: NY215143)资助的课题。

† 通信作者。E-mail: kehanyu@njupt.edu.cn

‡ 通信作者。E-mail: xuxx@njnu.edu.cn

足^[11,12]. 2015年, Lee等^[13]首先将石墨烯与钙钛矿薄膜结合, 制备了场效应晶体管光电探测器获得了较高的性能. 之后 Wang 等^[14]利用钙钛矿纳米颗粒代替钙钛矿薄膜与石墨烯结合制备的光电探测器, 性能得到明显的提高. 上述石墨烯-钙钛矿场效应晶体管光电探测器虽然性能均有较大提高, 但仍然存在器件的增益较小以及光电流较弱的不足. 其主要原因一方面在于薄膜或纳米颗粒钙钛矿的光生载流子复合速率较高, 且纳米颗粒还存在颗粒尺度分散不均匀的问题; 另一方面, 目前石墨烯-钙钛矿场效应晶体管光电探测器中的石墨烯绝大部分是通过湿法转移到目标衬底, 过程复杂, 重复率低, 且转移过程也可能对石墨烯造成污染和缺陷.

鉴于此, 本文使用低温、无需金属催化的等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法直接在目标衬底上一步生长石墨烯, 以石墨烯场效应晶体管为基础, 结合钙钛矿量子点(CsPbI_3), 设计并制备了石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管光电探测器. 钙钛矿量子点具有带隙可调、荧光量子效率高达90%等优异的光学性能, 制备过程简单, 而且可以通过制备不同尺寸的量子点实现不同波长范围的吸收. 同时, 量子点分散的纳米颗粒具有很好的限制电荷的作用, 可以降低光生载流子的体复合速率, 能够实现更高的增益^[15]. 因此, 本文设计并制备的石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管光电探测器成功实现了对波长为400 nm、光强为12 μW 信号激光的探测. 器件的光响应率达到 $6.4 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$, 光电导增益和探测率分别为 3.7×10^4 , 6×10^7 Jones (1 Jones = $1 \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$). 本文研究结果表明石墨烯-钙钛矿(CsPbI_3)量子点复合光电探测器在光信号探测与光电信号转换方面极具应用前景.

2 实验

石墨烯-钙钛矿量子点(CsPbI_3)场效应晶体管光电探测器的结构示意如图1所示, 其中重掺杂P型Si为基底并作为背栅电极, 热氧化生长的 SiO_2 (300 nm)作为绝缘介质层, 石墨烯层采用PECVD法直接生长于 SiO_2 层之上. 通过掩膜版在石墨烯层两端利用磁控溅射法制作铜电极(厚度为200 nm)分别作为源、漏电极, 所形成的石墨烯沟道长为50 μm . 最后, 根据已报道的溶液合成的方法制备钙钛矿量子点(CsPbI_3)^[16]. 在石墨烯沟道层

滴加钙钛矿量子点, 空气中干燥后即可进行相应光电性能测试.

实验中, 使用拉曼光谱(EZM-785-A2)对石墨烯薄膜进行表征, 使用透射电子显微镜(Hitachi HT7700), X射线能谱仪(X-max20), X射线衍射仪(D/MAX-2500, XRD)及紫外可见分光光度计(PerkinElmer Lambda 950)对钙钛矿量子点形貌、结构、成分和光学性能进行表征. 器件的电学和光电测试均使用数字源表(Keithley 2636B)和探针台, 测试中使用的信号激光光源波长为400 nm, 光强为12 μW , 所有测试均在室温条件下进行.

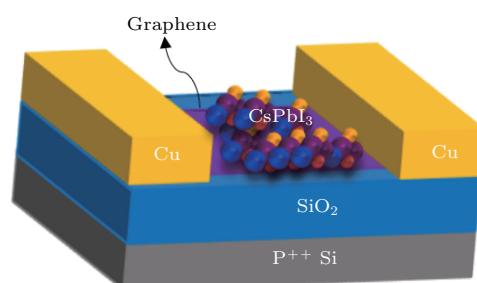


图1 石墨烯- CsPbI_3 量子点复合光电探测器的结构示意图

Fig. 1. Schematics of a graphene- CsPbI_3 quantum dots hybrid photodetector.

3 结果与讨论

3.1 石墨烯功能层及 CsPbI_3 量子点材料性质测试与表征

石墨烯薄膜的拉曼光谱如图2所示, 从图中可以看出, 石墨烯位于1348, 1584 和 2695 cm^{-1} 处有3个明显的特征峰, 分别对应于D, G, 2D峰. 其中G峰和2D峰是石墨烯材料的两个特征峰^[17], 表明

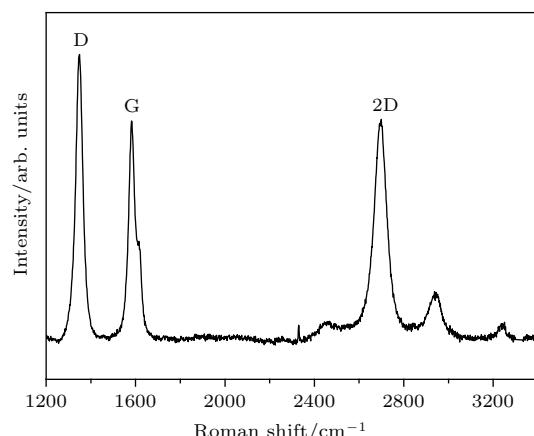


图2 石墨烯的拉曼光谱

Fig. 2. Raman spectrum of as-deposited graphene.

用PECVD法成功制备了石墨烯薄膜。D峰是晶体结构无序程度的反映,图中D峰较强,表明石墨烯中的晶格缺陷较多。本文所制备的石墨烯薄膜在石英片上的透过率为90%,约为4层。

CsPbI_3 钙钛矿量子点性能表征结果如图3所示。其中图3(a)是量子点的XRD图谱,对比衍射图谱的峰位,发现其与文献[16]报道的 CsPbI_3 量子点峰位相一致,表明本文所用的量子点的结晶性较好;其插图为量子点的X射线能量色散谱图(EDS),由插图可知 $\text{Cs} : \text{Pb} : \text{I}$ 的原子比约为1:1:3,与理论 CsPbI_3 的化学计量比一致。图3(b)为量子点

的透射电镜(TEM)图像,从图中可以看出,量子点之间相互分离,且排列均匀、紧凑,量子点尺度大小约为10 nm。表明本文采用的钙钛矿量子点具有优异的单分散性,这有利于减小光生电子-空穴复合的速率。图3(c)为量子点的高分辨率透射电镜(HRTEM)图,从图中可知钙钛矿量子点(CsPbI_3)晶格条纹几乎没有缺陷,且晶面间距约为0.59 nm,因此对应钙钛矿量子点的100晶面[16]。图3(d)为钙钛矿量子点溶液的吸收光谱,从该图可以看出,所用量子点对350—650 nm波长范围内的光都具有较强的吸收。

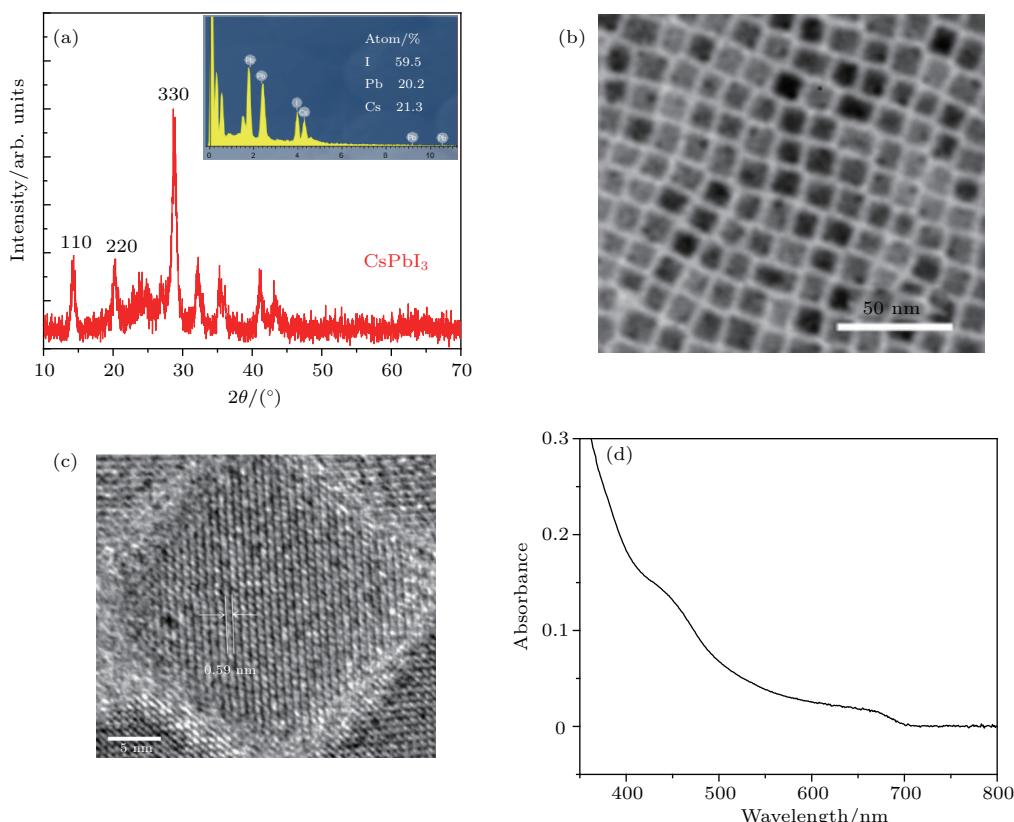


图3 钙钛矿量子点(CsPbI_3)材料表征 (a) XRD 图(插图为EDS); (b) TEM 图; (c) HRTEM 图; (d) 吸收光谱

Fig. 3. Characterization of perovskite quantum dots (CsPbI_3 QDs): (a) XRD patterns (inset: EDS); (b) TEM image; (c) HRTEM image; (d) absorption spectra.

3.2 石墨烯- CsPbI_3 量子点复合光电探测器性能

图4为石墨烯场效应晶体管的电学性能测试结果。其中图4(a)为晶体管输出特性曲线,可以看出其输出特性曲线呈现出对称的线性特征,说明石墨烯与金属电极形成了良好的欧姆接触。当栅压 V_{gs} 从-30 V变化到30 V,间隔为10 V,所有输

出特性曲线均不重合,表明栅压对石墨烯中载流子起到了明显的调控作用。图4(b)为石墨烯场效应晶体管的转移特性曲线图,源、漏极电压 V_{DS} 为100 mV,栅压 V_{BG} 从-40 V扫描到40 V时,源、漏极电流 I_{D} 随着栅压先单调递减到最小值然后递增,可知对应电流最小值,即所谓狄拉克点位于34 V处,狄拉克点左边为空穴导电,右边为电子导电,结合图中结果可以看出所制备的石墨烯主要以空穴

(P型)导电为主^[18].造成石墨烯以P型导电为主的原因可能是石墨烯的表面吸附了空气中的氧气和水蒸气.

场效应迁移率 μ 是石墨烯场效应晶体管的一个重要的性能参数,可由(1)式计算^[19]:

$$\mu = \frac{\partial I_D}{\partial V_g} \frac{L}{W C_g V_{DS}}, \quad (1)$$

式中 L 为沟道长度, W 为沟道宽度, C_g 为栅氧化介质电容(300 nm SiO_2 , $C_g = 1.15 \times 10^{-8}\text{ F}\cdot\text{cm}^{-2}$), V_g 为栅压, V_{DS} 为源、漏极电压.由此得到石墨烯的空穴迁移率约为 $30.9\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.空穴迁移率较低的原因可能是所制备出的石墨烯的晶格缺陷比较多(D峰较强),若能够减小缺陷可进一步提高石墨烯的场效应迁移率^[20].此外,衬底和界面处的杂质也可能对石墨烯的载流子输运造成一定程度的

散射^[21],这也会降低石墨烯的迁移率.尽管如此,本文所制备的石墨烯场效应晶体管仍然反映了与其他方法制备的石墨烯相似的电学特性,且性能稳定可靠.

为了研究引入钙钛矿量子点对器件性能的影响,图5(a)给出了石墨烯-CsPbI₃量子点复合光电探测器在无光照及有光照情况下的转移特性曲线,测试采用的信号波长为400 nm,光强为12 μW.从图中可看出,有光照和无光照条件下的转移曲线均随背栅电压的增大先单调递减到电流最小值(狄拉克点),然后增加.无光照时,石墨烯-CsPbI₃量子点复合光电探测器的狄拉克点位于29 V处,相对于未负载量子点的石墨烯场效应晶体管的狄拉克点位置向负电压方向偏移了约5 V,说明石墨烯

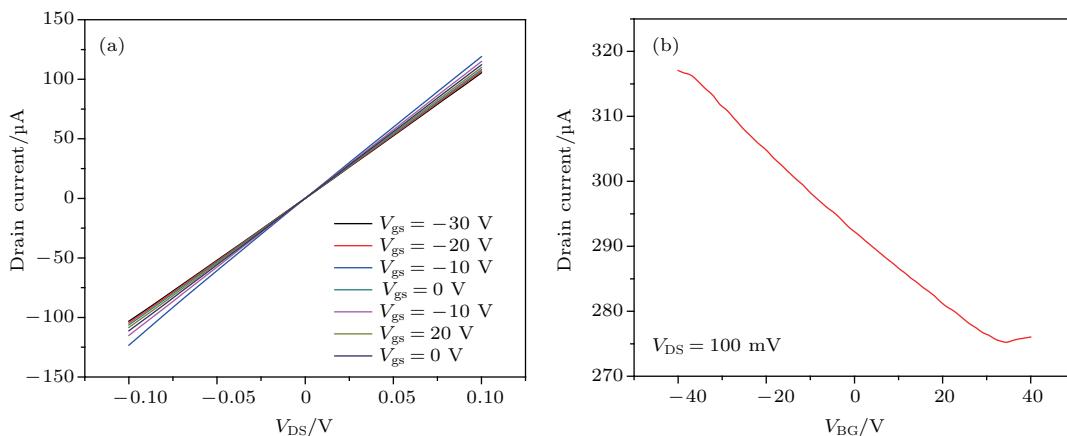


图4 石墨烯场效应晶体管 (a) 输出特性曲线; (b) 转移特性曲线

Fig. 4. Graphene field-effect transistor: (a) Output characteristics; (b) transfer characteristics.

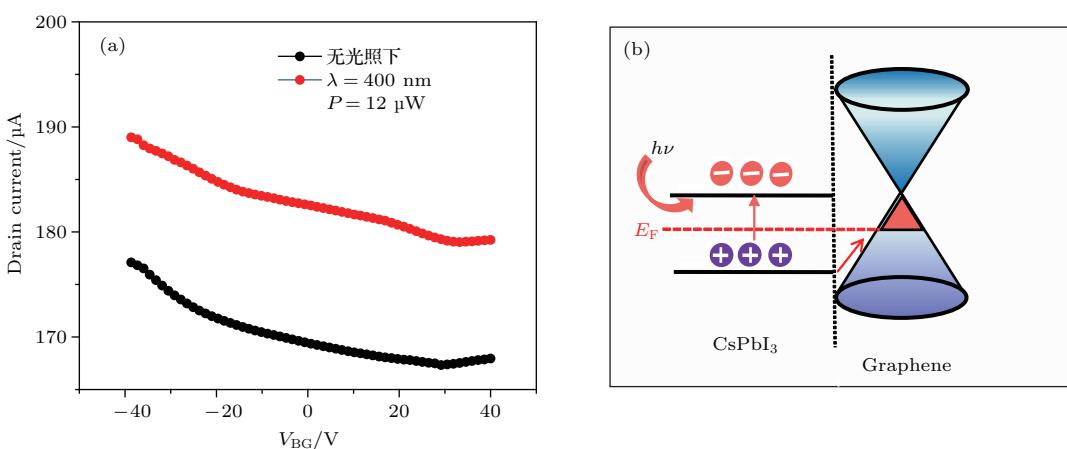


图5 石墨烯-CsPbI₃量子点复合光电探测器 (a) 光照前和光照后的转移特性曲线 $V_{DS} = 0.1\text{ V}$; (b) 光照下石墨烯和CsPbI₃量子点之间电荷转移能带结构示意图

Fig. 5. Graphene-CsPbI₃ quantum dots photodetector: (a) Transfer curve under dark and illumination; (b) charge transfer energy-band structure diagram of graphene and CsPbI₃ under illumination.

的P型导电减弱^[22]. 这主要是因为未负载量子点时石墨烯费米能级处于价带(狄拉克点下方), 石墨烯中的多子为空穴. 当在石墨烯沟道层上负载量子点后, 由于两者的费米能级不一致, 为达到热平衡状态, 量子点中的电子会扩散进入石墨烯, 使石墨烯的费米能级升高, 因此对应石墨烯的狄拉克点发生负向偏移.

如图5(a)所示, 光照后石墨烯-CsPbI₃量子点复合电探测器的转移曲线中源、漏极电流 I_D 增大, 且狄拉克点由29 V向正电压方向偏移至33 V. 对应的石墨烯-CsPbI₃量子点电荷转移能带结构示意图如图5(b)所示. 从图中看出光照时, 钙钛矿量子点吸收光能受激产生电子-空穴对, 空穴转移至石墨烯中, 而电子则被束缚在独立分散的钙钛矿量子点^[14]. 被限制在钙钛矿量子点中的电子由于电容耦合的作用调制石墨烯沟道的电导, 使转移曲线发生偏移, 因此对应石墨烯的狄拉克点向正向移动^[23]. 而由于在光激发下额外的空穴产生在石墨烯沟道中, 源、漏极间的载流子浓度增大, 因此源、漏极电流 I_D 也增大.

为了衡量光电探测器的工作性能, 在波长为400 nm、光强为12 μW 条件下, 对纯石墨烯光电探测器进行了光响应测试, 结果并无光响应. 对石墨烯-钙钛矿量子点复合光电探测器进行光响应特性测试, 结果如图6(a)所示. 从图中可以看出, 控制源、漏极电压 $V_{DS} = 1 \text{ V}$ 的情况下, $t = 0$ (开始记录)至 $t = 20 \text{ s}$ (开始光照)前, 光生电流($I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}$)从约36 μA 一直下降至约6 μA , 开

始光照($t = 20 \text{ s}$)之后光生电流($I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}$)迅速上升, 至 $t = 35 \text{ s}$ 时持续稳定在约64 μA , 表明在光照情况下量子点和石墨烯之间发生了明显的电荷转移, 器件已有效地将光照信号转换为电信号, 从而实现对照射光的探测. 在 $t = 69 \text{ s}$ 时撤除被探测光, 之后的光生电流逐渐衰减, 表明量子点和石墨烯之间电荷转移终止.

响应速度是光电探测器件关键的参数之一. 从图6(a)中容易得到石墨烯-钙钛矿量子点复合光电探测器的响应速度, 可知其响应上升时间(光生电流上升至最大电流的70%)为8 s, 下降时间(光生电流下降至最大电流的30%)为11 s. 相较于其他石墨烯复合的光栅型增益光电探测器^[23-25], 本文的石墨烯-钙钛矿量子点复合光电探测器的响应速度相对较慢. 而这种复合光电探测器的响应速度一般认为主要与量子点和石墨烯之间的电荷转移速度有关^[15,24,26]. 一方面, 对于石墨烯而言, 高载流子迁移率意味着更快的电荷转移速率, 而由拉曼光谱可知, 本文所制备的石墨烯质量不高, 存在较多缺陷, 从而导致其传输速度较慢; 另一方面, 对于量子点而言, 量子点表面长支链的有机配体会对两者之间的电荷转移有一定的阻碍作用, 而短支链的有机配体则能提高量子点和石墨烯之间的电荷转移速度, 从而获得较快的器件响应速度^[23,24]. 本文的钙钛矿量子点由于表面长支链的有机配体和溶液可能残留大分子有机物, 从而导致量子点和石墨烯之间的电荷转移速度降低.

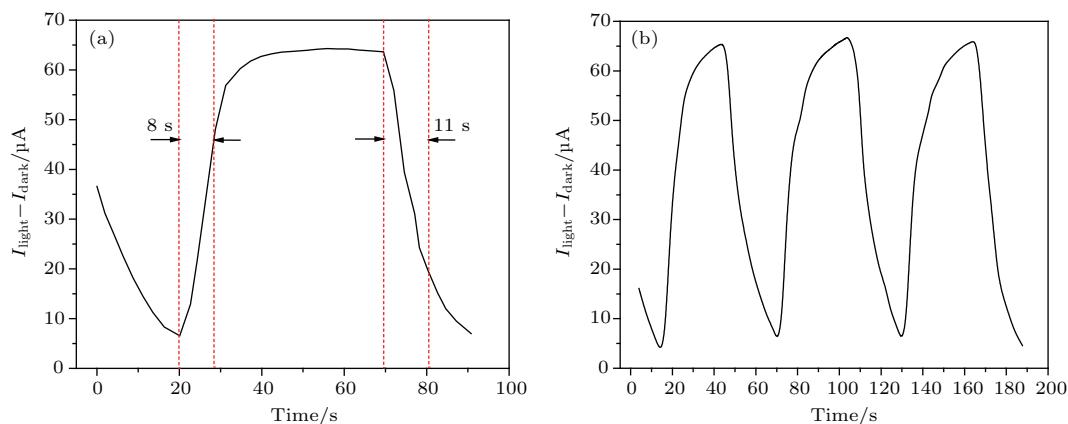


图6 石墨烯-CsPbI₃量子点复合光电探测器($V_{DS} = 1 \text{ V}$, 信号光波长为400 nm、光强为12 μW) (a)瞬态光生电流响应曲线; (b)周期性光照下的光生电流响应曲线

Fig. 6. Graphene-CsPbI₃ quantum dots hybrid photodetector ($V_{DS} = 1 \text{ V}$, under the illumination of 400 nm laser with light intensity of 12 μW): (a) Temporal photocurrent response curve; (b) time-dependent photocurrent response curve over a 3-period on-off operation.

虽然器件的响应速度较慢,但是石墨烯-钙钛矿量子点复合光电探测器可以对信号光实现连续、稳定的探测,结果如图6(b)所示。从图中可以看出,随着信号激光周期性的开和关,光生电流呈现周期性上升和下降,说明信号光可以稳定和重复地被探测,并转换为光生电流。

器件光电响应率 R 可由公式 $R = (I_{\text{light}} - I_{\text{dark}})/P$ 计算得出^[14],其中 P 为入射到器件有效面积的光功率。通过计算可得当信号光波长为400 nm,光强为12 μW,源、漏极电压 $V_{\text{DS}} = 1$ V时,器件的光电响应率为 $6.4 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 。该数值比一般单一石墨烯光电探测器的响应率($10^{-2} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$)高了两个数量级,也比钙钛矿基光电探测器的响应率($0.4 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$)要高^[27]。

光电导增益和探测率是光电探测器两个重要的性能指标。其中光电导增益 G 的计算公式为^[8]

$$G = \tau/t_L, \quad (2)$$

式中 τ 为光生载流子的寿命, t_L 为渡越时间(载流子穿越两个电极所用的时间)。光生载流子的寿命 τ 可以通过拟合瞬态光电流的下降时间获得^[25],拟合得出 τ 为2.4 s。而渡越时间 t_L 为^[8]

$$t_L = \frac{L}{\nu_n} = \frac{L^2}{V\mu}, \quad (3)$$

式中 L 为器件的沟道长度, μ 为空穴载流子迁移率, ν_n 为载流子穿越两个电极的速度。通过拟合石墨烯-钙钛矿量子点的转移曲线,得出 $\mu = 3.7 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, V 为施加的偏压,计算得渡越时间 $t_L = 6.5 \times 10^{-5}$ s。从而由(2)式计算得该复合探测器对波长为400 nm、光强为12 μW信号激光的光电导增益最高可达 3.7×10^4 ,说明器件对弱光有非常高的响应。

此外,探测率 D^* 亦是石墨烯-钙钛矿量子点复合光电探测器的关键参数之一,其可由(4)式进行计算^[14],

$$D^* = (RA^{1/2})(2qI_d)^{1/2}, \quad (4)$$

式中 A 为光照的有效面积, q 为电荷, I_d 为器件暗电流,且假设噪声的主要来源是器件的暗电流。通过计算得石墨烯-钙钛矿量子点复合光电探测器的探测率为 6×10^7 Jones。

相对而言,本文设计并制备的石墨烯-钙钛矿量子点复合光电探测器存在光响应率、探测率相对

较低的不足,若能采用更高质量的石墨烯或通过改变钙钛矿量子点表面的有机配体并减少大分子有机物的残留,使光生载流子在钙钛矿量子点和石墨烯之间能够实现更快的转移,那么完全有望能够获得更优异的性能。

4 结 论

本文以PECVD法制备了P型石墨烯,研究了石墨烯场效应晶体管的电学特性,结果表明石墨烯显示了良好的电学性质,并且与电极有良好的接触。进一步设计并制备了基于石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管的光电探测器,实现了对波长为400 nm的信号激光的稳定和重复的探测,其响应率达到 $6.4 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,光电导增益和探测率分别为 3.7×10^4 , 6×10^7 Jones。其性能优于传统的单一石墨烯基光电探测器和钙钛矿光电探测器。

参考文献

- [1] Yin W H, Han Q, Yang X H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 218502 (in Chinese) [尹伟红, 韩勤, 杨晓红 2012 物理学报 **61** 218502]
- [2] Pisana S, Lazzeri M, Casiraghi C, Novoselov K S, Geim A K, Ferrari A C, Mauri F 2007 *Nat. Mater.* **6** 198
- [3] Xia F, Mueller T, Golizadeh-Mojarad R, Freitag M, Lin Y M, Tsang J, Perebeinos V, Avouris P 2009 *Nano Lett.* **9** 1039
- [4] Mueller T, Xia F, Avouris P 2010 *Nat. Photon.* **4** 297
- [5] Xia F, Avouris P, Mueller T, Lin Y 2009 *Nat. Nanotechnol.* **4** 839
- [6] Echtermeyer T J, Britnell L, Jasnos P K, Lombardo A, Gorbachev R V, Grigorenko A N, Geim A K, Ferrari A C, Novoselov K S 2011 *Nat. Commun.* **2** 458
- [7] Gan X, Shiue R J, Gao Y, Meric I, Heinz T F, Shepard K, Hone J, Assefa S, Englund D 2013 *Nat. Photon.* **7** 883
- [8] Ni Z Y, Ma L L, Du S C, Xu Y, Yuan M, Fang H H, Wang Z, Xu M S, Li D S, Yang J Y, Hu W D, Pi X D, Yang D R 2017 *ACS Nano* **11** 9854
- [9] 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 2014 *Sci. Rep.* **4** 3826
- [10] Du S C, Lu W, Ali A, Zhao P, Shehzad K, Guo H W, Ma L L, Liu X M, Pi X D, Wang P, Fang H H, Xu Z, Gao C, Dan Y P, Tan P H, Wang H T, Lin C T, Yang J Y, Dong S R, Cheng Z Y, Li E P, Yin W Y, Luo J K, Yu B, Hasan T, Xu Y, Hu W D, Duan X F 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700463
- [11] Hu X, Zhang X, Liang L, Bao J, Li S, Yang W, Xie Y 2015 *Adv. Func. Mater.* **24** 7373

- [12] Song J, Li J, Li X, Xu L, Dong Y, Zeng H 2015 *Adv. Mater.* **27** 7162
- [13] Lee Y, Kwon J, Hwang E, Ra C H, Yoo W J, Ahn J H, Park J H, Cho J H 2015 *Adv. Mater.* **27** 41
- [14] Wang Y S, Zhang Y P, Lu Y, Xu W D, Mu H R, Chen C, Qiao H, Song J C, Li S J, Sun B Q, Chen Y B, Bao Q L 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 1389
- [15] Kwak D H, Lim D H, Ra H S, Ramasamy P, Lee J S 2016 *RSC Adv.* **6** 65252
- [16] Sheng X X, Liu Y, Wang Y, Li Y F, Wang X, Wang X P, Dai Z H, Bao J C, Xu X X 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700150
- [17] Graf D, Molitor F, Ensslin K, Stampfer C, Jungen A, Hierold C, Wirtz L 2007 *Solid State Commun.* **143** 44
- [18] Zhang F, Fang X X, Cheng J, Tang F J, Jin Q H, Zhao J L 2013 *J. Funct. Mater.* **44** 344
- [19] Gun Oh J, Ki Hong S, Kim C K, Hoon Bong J, Shin J, Choi S Y, Cho B J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 666
- [20] Chen J H, Cullen W G, Jang C, Fuhrer M S, Williams E D 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 236805
- [21] Hu Z, Sinha D P, Ji U L, Liehr M 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 666
- [22] Nistor R A, Newns D M, Martyna G J 2011 *Acs. Nano.* **5** 3096
- [23] Konstantatos G, Badioli M, Gaudreau L, Osmand J, Bernechea M, de Arquer F P G, Gatti F, Koppens F H L 2011 *Nat. Nanotechnol.* **7** 363
- [24] Sun Z H, Liu Z K, Li J H, Tai G A, Lau S P, Yan F 2012 *Adv. Mater.* **24** 5878
- [25] Chang P H, Liu S Y, Lan Y B, Tsai Yi C, You X Q, Li C S, Huang K Y, Chou A S, Cheng T C, Wang J K, Wu C I 2017 *Sci. Rep.* **7** 46281
- [26] Spina M, Lehmann M, Náfrádi B, Gaál R, Magrez A, Forró L, Horváth E 2015 *Small* **11** 4824
- [27] Sutherland B R, Johnston A K, Ip A H, Xu J X, Adinolfi V, Kanjanaboos P, Sargent E H 2015 *ACS Photon.* **2** 1117

Field effect transistor photodetector based on graphene and perovskite quantum dots*

Zheng Jia-Jin^{1,3)} Wang Ya-Ru¹⁾ Yu Ke-Han^{1)†} Xu Xiang-Xing^{2)‡} Sheng Xue-Xi²⁾
Hu Er-Tao¹⁾ Wei Wei¹⁾

1) (College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

2) (College of Chemistry and Materials Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

3) (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 18 January 2018; revised manuscript received 20 March 2018)

Abstract

Graphene is an attractive optoelectronic material for various optoelectronic devices, especially in the field of photoelectric detection due to its high carrier mobility and fast response time. However, the relatively low light absorption cross-section and fast electron-hole recombination rate can lead to rapid exciton annihilation and small light gain, which restrict the commercial applications of pure graphene-based photodetector. The perovskite has attracted much attention because of its high photoelectric conversion efficiency in the field of solar cells. The perovskite has the advantages of long carrier diffusion distance and high optical absorption coefficient, which can effectively make up for the shortcomings of pure graphene-based field-effect transistor. In this work, a field-effect transistor photodetector is demonstrated with the combination of graphene and halide perovskite quantum dots (CsPbI_3) serving as conductive channel materials. The graphene is prepared by plasma enhanced chemical vapor deposition, and the quantum dots are CsPbI_3 perovskite. The electrical properties of graphene and pure graphene-based field-effect transistor are detected and analyzed by using the Raman spectrum. The results show that the graphene has good intrinsic electrical properties. Unlike previous report in which bulk perovskite was used, the perovskite quantum dot field-effect transistor photodetector has an obvious light response to 400 nm signal light, and shows the excellent photoelectrical performance. Under the illumination of 400 nm light, the signal light could be detected steadily and repeatedly by the graphene-perovskite quantum dot photodetector and converted into photocurrent. The photocurrent of the photodetector has a rapid rise, and the maximum value can reach $64 \mu\text{A}$ at a light power of $12 \mu\text{W}$. The corresponding responsivity is $6.4 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$, which is two orders of magnitude higher than that of the general single graphene photodetector ($10^{-2} \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$), and it is also higher than that of perovskite-based photodetector ($0.4 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$). In addition, the photoconductive gain and detectivity arrive at 3.7×10^4 and 6×10^7 Jones ($1 \text{ Jones} = 1 \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$), respectively. The results of this study demonstrate that the graphene-perovskite quantum dot photodetector can be a promising candidate for commercial UV light detectors.

Keywords: field effect transistor, graphene, perovskite quantum dots, photodetector

PACS: 85.60.Gz, 85.30.Tv, 81.07.Ta

DOI: [10.7498/aps.67.20180129](https://doi.org/10.7498/aps.67.20180129)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61504064, 51572120), the Fund of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences China (Grant No. SKLST201606), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20150847), and the Incubation Foundation of the National Natural Science Foundation of Nanjing University of Posts and Telecommunications, China (Grant No. NY215143).

† Corresponding author. E-mail: kehanyu@njupt.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: xuxx@njnu.edu.cn