

高响应率石墨烯-CsPbBr₃量子点光电探测器

王婧¹, 石瑞英¹, 朱国栋²

(1. 四川大学物理学院, 成都 610065;

2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

摘要: 全无机金属卤化物钙钛矿材料 CsPbX₃ (X = Cl, Br, I) 不仅有优异光电特性, 还有比有机-无机杂化钙钛矿更好的热稳定性, 在光电探测器领域有很大应用前景. 但由于全无机钙钛矿材料自身迁移率较低, 直接用于光电探测器其光响应率也很低, 难以满足实际应用. 以热注入法合成高质量的 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点材料, 再将其与高迁移率的单层石墨烯薄膜相结合, 构建出石墨烯-CsPbBr₃ 量子点复合光电探测器, 光响应率高达 $3.5 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$. 研究表明引入石墨烯材料作为传输层后, CsPbBr₃ 量子点的光生电子空穴对得到有效分离并快速传输. 两种材料界面处存在陷阱态, 产生了光栅压效应, 延长了载流子寿命. 两种机制结合使复合光电探测器的光响应率大大提升.

关键词: CsPbBr₃ 量子点; 石墨烯; 光电探测器; 高响应率; 全无机钙钛矿

中图分类号: TN304.1

文献标识码: A

DOI: 10.19907/j.0490-6756.2021.025001

Graphene-CsPbBr₃ quantum dots photodetectors with high responsivity

WANG Jing¹, SHI Rui-Ying¹, ZHU Guo-Dong²

(1. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: All-inorganic perovskites, such as CsPbX₃ (X=Cl, Br, I), are gaining increasing attention due to their outstanding optoelectronic properties, especially their higher thermal stability comparing with organic-inorganic hybrid perovskites. However, CsPbX₃-based photodetector demonstrated a relatively low responsivity due to the low carrier mobility of perovskite films. In this work, we synthesize CsPbBr₃ quantum dots and construct a hybrid graphene-CsPbBr₃ quantum dots photodetector with a responsivity of $3.5 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, by introducing graphene as a transport layer. The unprecedented performance is attributed to the effective charge transfer and photogating effect, high mobility of graphene and prolonged carrier lifetime.

Keywords: CsPbBr₃ quantum dots; Graphene; Photodetector; High responsivity; All inorganic perovskite

1 引言

最近, 卤素钙钛矿材料由于其优异的光电特性得到越来越多的关注, 比如它们有很高的光吸收系

数, 显著的非线性光学效应, 很长的载流子扩散长度和可调的能带宽度, 这些特性使钙钛矿材料在光电器件领域有很大前景. 其中研究最多的杂化有机无机钙钛矿材料受其挥发性有机成分限制, 稳定

收稿日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(11374359); 国家高技术研究发展计划(2015AA034800)

作者简介: 王婧(1992—), 女, 四川南充人, 博士研究生, 主要研究方向为二维材料光电器件. E-mail: jingwang1001@163.com

性一直较低,实际应用受到很大影响. 新型的全无机金属钙钛矿材料 CsPbX_3 ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) 不仅有保留了有机无机钙钛矿材料的优点,还有更高的稳定性,因此有望替代有机无机钙钛矿材料在光电领域的应用. 其中全无机钙钛矿量子点 (CsPbX_3 QDs) 展现出了超高的量子产率 ($\geq 90\%$) 和可调的能带,可以应用在光伏、发光二极管(LED)和光电探测器等领域. 目前基于全无机钙钛矿量子点的光电探测器已有很多报道,比如 Parthiban 等人^[14]制备的 CsPbX_3 量子点光电探测器的光开关比达到 10^5 , Dong 等人也制备出取向优化的 CsPbBr_3 量子点光电探测器^[16]. 但是由于量子点薄膜的载流子迁移率较低,这些光电探测器的光响应率普遍较低 ($\sim \text{mA} \cdot \text{W}^{-1}$). 石墨烯有超宽的光吸收波段、超快的响应速度和高载流子迁移率,常常和其他光吸收材料复合,作为光电探测器的传输层,提高光电导,进而提升探测器的光响应率. 例如, Gerasimos 等人^[22]构建了石墨烯与 PbS 量子点复合的光电探测器,其光响应率高达 $10^7 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$. Lee^[21]提出的石墨烯与有机无机钙钛矿材料结合的光电探测器,光响应率也达到 $180 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$. 而石墨烯与 CsPbX_3 量子点复合的光电探测器鲜有研究.

本文首先用一种温和的热注入法合成了高质量的全无机钙钛矿材料— CsPbBr_3 量子点,作为光吸收层,然后引入单层石墨烯作为载流子传输层,构建出石墨烯- CsPbBr_3 量子点复合光电探测器,其光响应率达到 $3.5 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$. 石墨烯与 CsPbBr_3 量子点重叠部分的荧光淬灭表明量子点的电子空穴对得到有效分离及传输,瞬态光响应表明探测器存在光栅压效应并延长了载流子寿命,两种因素叠加,提高了光响应率. 本文研究结果表明石墨烯- CsPbBr_3 量子点复合光电探测器在光电探测领域有很大的应用前景.

2 实验

2.1 CsPbBr_3 量子点的合成

全无机钙钛矿 CsPbBr_3 量子点是通过热注入的方式合成. 首先将 $8.15 \text{ mg Cs}_2\text{CO}_3$ 、 0.5 mL 正己基癸酸(DA)和 4 mL 十八烯(ODE)的混合物放入三颈烧瓶,用氮气作为保护气氛在 150°C 下脱气处理 1 h ,直到所有 Cs_2CO_3 与 DA 反应完毕,得到的溶液即为癸酸铯前驱体溶液. 与此同时,将 5 mL ODE 和 0.36 mmol PbBr_2 放入三颈烧瓶,以氮气作为保护气氛在 150°C 下保温 1 h . 然后迅速往

PbBr_2 粗溶液中加入 0.5 mL 油胺(OLA)与 0.5 mL 油酸(OA), 150°C 保持几分钟,直至 PbBr_2 完全溶解. 再取 0.4 mL 制备好的癸酸铯前驱体溶液快速注入 PbBr_2 溶液,反应 10 s 后立刻将三颈烧瓶冰浴冷却,以保证 CsPbBr_3 量子点结晶. 最后将量子点溶入甲苯后离心提纯,就得到分散好的 CsPbBr_3 量子点溶液.

2.2 石墨烯- CsPbBr_3 量子点光电探测器制备

石墨烯- CsPbBr_3 量子点光电探测器的制备过程如下,首先用化学沉积法在铜箔上生长出单层石墨烯^[24],再利用湿法转移将石墨烯转移到重掺杂且氧化层厚度为 300 nm 的硅片上. 然后在此样品上微光刻出电极图形,依次蒸镀上 5 nm 厚的铬和 80 nm 金,在丙酮溶液中剥离光刻胶得到源漏电极. 之后在电极上套刻出沟道图案,用等离子体蚀刻机将石墨烯条带化,去掉光刻胶后得到石墨烯场效应管(FET). 最后将 CsPbBr_3 量子点分散液旋涂在石墨烯 FET 表面, 70°C 退火 10 min 就得到最终的石墨烯- CsPbBr_3 量子点光电探测器.

2.3 材料与器件表征

实验中,分别使用 X 射线衍射仪(XRD-6100, Shimadzu)、透射电镜(TEM, Libra 200 FE, Zeiss)、紫外-可见分光光度计(UV-2100, Shimadzu)、荧光光谱仪(Cary Eclipse, Agilent)及绝对量子产率测试系统(Quantaaurus-QY, HAMAMAT-SU)分别表征 CsPbBr_3 量子点的晶向、形貌、吸收光谱、荧光光谱及荧光量子产率. 用半导体测试仪(4200-SCS, Keithley)测试石墨烯- CsPbBr_3 量子点光电探测器的光电响应.

3 分析与讨论

CsPbBr_3 量子点的 XRD 谱图如图 1(a)所示,结果表明量子点为立方体结构. 根据布拉格公式: $n\lambda = 2d\sin\theta$, 可算出在 (200) 晶向上晶格距离为 0.58 nm , 这与高分辨率透射电子显微镜(HR-TEM)照片的结果也相吻合,如图 1(c)所示. 从 HRTEM 图像还可以看出,量子点有很高的结晶度. 图 1(b)是量子点的透射电子显微镜照片,可以看出量子点具有良好的单分散性,平均边长为 15 nm . 电子能谱(EDS)表明量子点只有 Cs、Pb、Br 三种组分,没有检测到其他杂质,如图 1(d)所示.

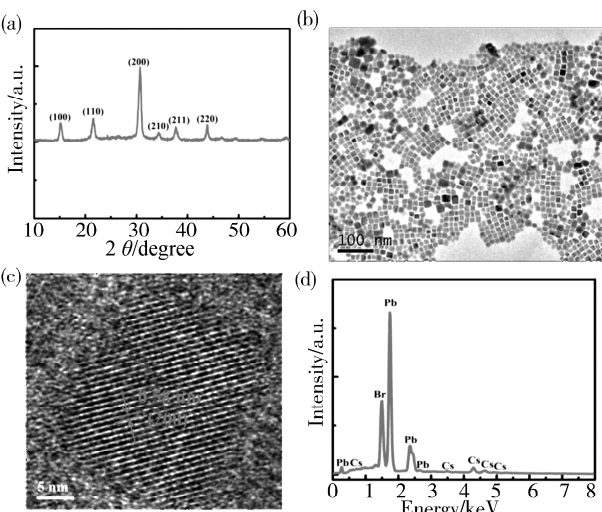


图 1 CsPbBr₃量子点的(a)XRD 图谱;(b)透射电子显微镜图像;(c)高分辨透射电子显微镜图像;(d)电子能谱图

Fig. 1 (a) TEM image, (b) HRTEM image, (c) XRD spectrum and (d) EDS spectrum of CsPbBr₃ QDs

图 2(a)给出了量子点的吸收光谱(深色曲线)及 365 nm 紫外光激发的荧光光谱(浅色曲线)。量子点吸收峰在 515 nm, 荧光峰在 520 nm, 且荧光光谱呈高斯分布, 半宽峰仅为 20 nm。另外量子点荧光光谱与吸收光谱还有一部分重叠区域。右边的插图是量子点在甲苯中的分散溶液在紫外光照射下呈现的荧光效果, 可以看出分散液发出强烈的绿色荧光, 亮度均匀。量子产率测试系统(Quantaurus-QY, HAMAMATSU)测出 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的荧光量子产率(PLQY)约为 96%。量子点的荧光寿命如图 2(b)所示。

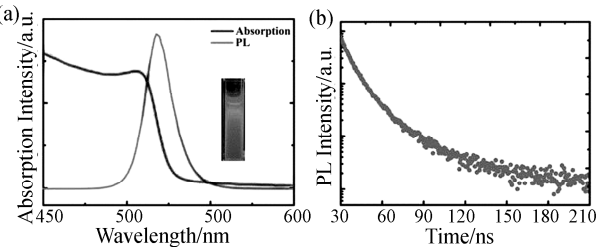


图 2 CsPbBr₃量子点的光谱表征:(a)CsPbBr₃量子点的吸收谱(深色曲线)与荧光光谱(浅色曲线), 插图为量子点溶液在 365 nm 紫外光照射下发出荧光的实拍图;(b)量子点的荧光寿命曲线

Fig. 2 (a) Absorption and PL intensity spectra of theCsPbBr₃ QDs, and the insert is the fluorescence photograph of the CsPbBr₃ QDs under 365 nm light excitation; (b) PL decay traces of CsPbBr₃ QDs

量子点的荧光寿命可用一个二阶指数函数

拟合:

$$I(t) = A_1 \exp(-t / \tau_1) + A_2 \exp(-t / \tau_2) \tag{1}$$

$I(t)$ 是荧光强度随时间 t 的衰减函数, 包括了两种辐射衰减模式, τ_1 和 τ_2 分别代表较短的衰减时间和较长的衰减时间, A_1 、 A_2 是各自的振幅, 各参数的数值如表 1。根据此式, 平均寿命 τ_{ave} 可以表示为:

$$\tau_{ave} = (A_1 \tau_1^2 + A_2 \tau_2^2) / (A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2) \tag{2}$$

根据拟合出的参数及上述公式, 可以算出量子点的平均寿命为 12.39 ns。据文献报导, τ_1 越小荧光量子产率越高^[25]。本文中, CsPbBr₃ 量子点的 τ_1 比 τ_2 小 8 倍, 因此得到了高达 96% 的量子产率。

表 1 CsPbBr₃量子点荧光衰减拟合参数

Tab. 1 The lifetime of CsPbBr₃ QDs shape functions

Sample	τ_1 /ns	A_1	τ_2 /ns	A_2	τ_{avg} /ns
CsPbBr ₃ QDs	6.8	86.2%	22.8	13.8%	12.39

图 3 描述了石墨烯-CsPbBr₃量子点薄膜的荧光特性。该样品的制备如下: 首先在硅片上转移一片单层石墨烯, 然后将量子点分散液旋涂于石墨烯之上即得到石墨烯-CsPbBr₃量子点薄膜成品。样品在白光下的图片如图 3(a)所示, 虚线框内为石墨烯-CsPbBr₃量子点薄膜区, 虚线框外为量子点薄膜区。在 450 nm 紫外光下, 此样品的荧光效果图如图 3(b)所示, 虚线框内外的石墨烯-CsPbBr₃量子点区域与量子点区荧光光谱如图 3(c)所示。

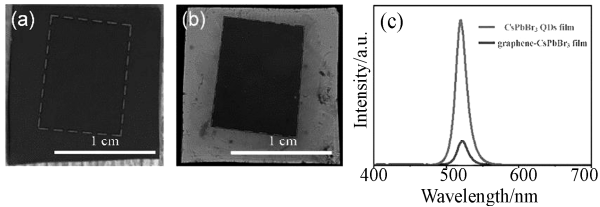


图 3 石墨烯-CsPbBr₃量子点薄膜荧光特性:。(a)样品在白光下照片;(b)样品在 450nm 紫外光下荧光照片;(c)CsPbBr₃量子点薄膜与石墨烯-CsPbBr₃量子点薄膜在紫外光下的荧光光谱

Fig. 3 Photographs of graphene-CsPbBr₃ film under: (a) white light; (b) 450 nm UV light; (c) the rectangle with dotted line is a slice of graphene, PL intensity spectra of the CsPbBr₃ QDs film and graphene-CsPbBr₃ QDs film under UV light

可以看出, 石墨烯-CsPbBr₃量子点内的荧光强度远弱于量子点薄膜, 表明在石墨烯的作用下量子点发生了荧光淬灭。CsPbBr₃量子点吸光后产生电子空穴对, 在石墨烯的作用下分离, 相当一部分光

生载流子传输到石墨烯层,使量子点的辐射复合率大大降低,导致荧光淬灭。由此可以推断,石墨烯的引入有利于 CsPbBr₃ 量子点的电荷传输。

石墨烯-CsPbBr₃ 量子点光电探测器的制备流程如图 4(a)所示,在完成石墨烯转移、微光刻石墨烯沟道和源漏电极、旋涂 CsPbBr₃ 量子点后,得到最终的复合光电探测器。光照时,量子点吸收绝大部分光,产生的光生载流子传递给石墨烯并经由它传输至源漏电极,形成光电流。图 4(b)中,左图是完成后的光电探测器光学显微镜图片,其中黑色虚线框内是石墨烯沟道,沟道长宽各为 10 μm,上下两个浅色区域为探测器的金电极。右图给出了石墨烯-CsPbBr₃ 量子点区的扫描电镜图片,可看到薄膜表面平整致密,局部放大照片显示量子点晶粒小而致密,有利于石墨烯与量子点之间的电荷传输。

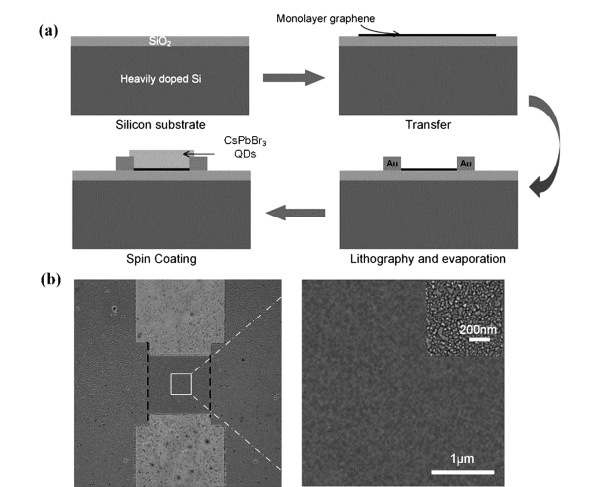


图 4 (a) 石墨烯-CsPbBr₃ 量子点光电探测器的制备过程.; (b) 探测器光学显微镜图像(左图)及两种放大倍数下的石墨烯-CsPbBr₃ 量子点区域的扫描电镜图像(右图)黑色虚线框内为石墨烯沟道,白色方框为 SEM 放大区域。

Fig. 4 (a) Schematic of fabrication process of graphene-CsPbBr₃ QDs photodetectors; (b) optical microscopy image (left photograph) and SEM images (right photograph) of the measured graphene-CsPbBr₃ photodetector
The rectangle with black dotted line in the left photograph is a slice of graphene. The right photograph is the SEM image of graphene-CsPbBr₃ region with the white solid line in the left image, and the inset on the top right is a partial enlarged SEM image.

图 5 是石墨烯-CsPbBr₃ 量子点光电探测器的光电响应,考虑到量子点的吸收光谱,这里采用的激光波长为 450 nm。该器件在暗态和不同光照强度下的 I - V 曲线如图 5(a)所示,照射在器件上的有效光功率从低到高依次 1.06、1.6、2.13 和 5.33

pW。图中线性的 I - V 特性证明沟道与电极的接触方式为欧姆接触。另外,随光照强度的增大,电流逐渐增大,这来源于光电流 I_{ph} 的增大。扣除暗态电流后可得到不同光照强度下的 I_{ph} - V_D 曲线,如插图所示,可以看出光电流 I_{ph} 与源漏电压 V_D 也基本呈线性关系,符合光

$$I_{ph} = \Gamma \cdot \eta \cdot e \cdot \tau_{photocarriers} \cdot \mu \cdot V_D / L^2 \quad (3)$$

其中, Γ 是器件吸收的光通量,且正比于光照强度, $\tau_{photocarriers}$ 是光生载流子寿命, μ 是迁移率, L 是沟道长度。

从插图中可以看出,在 $V_D = 1$ V 时,光照强度从 1.06 ~ 5.33 pW,其光电流依次为 0.87、4.3、10.2 及 11.7 μA。根据光响应率公式:

$$R = I_{ph} / P \quad (4)$$

探测器在各个光强下的光响应率,分别为 8.18×10^3 、 2.7×10^4 、 4.8×10^4 和 2.2×10^4 A · W⁻¹,相比文献报道的全无机钙钛矿光电探测器提高了 7 个数量级^[14]。根据光电导公式^[26]:

$$G = \tau_{photocarriers} \cdot \mu \cdot V_D / L^2 \quad (5)$$

光电导增益 G 正比于载流子寿命、石墨烯迁移率,在这里说明增益主要来源于载流子寿命的提升。图 5(b)是在入射光功率固定为 2.13 pW 的情况下,器件在不同偏压下的瞬态光响应。从瞬态响应中可以看出,在不同偏压下,光响应重复性良好。此外源漏电压 $V_D = 0.1$ V 时,光电流较平稳,噪声电流小,当源漏电压逐渐增大时,不仅光电流会增大,噪声电流也会随之增大。这是由于电压增大时,石墨烯的热效应逐渐增强,表面吸附物(水、氧气、有机物)也随之增加,这些不稳定的吸附物会对 CsPbBr₃ 量子点与石墨烯之间的电荷传输造成影响,使噪声电流增大。不同偏压下器件的光响应率如图 5(c)所示,光响应率与源漏电压成正比,与式(3)相符, $V_D = 1$ V 时瞬态光响应率为 3.5×10^4 A · W⁻¹。图 5(d)展示了一个光开关周期内的瞬态光响应,上升时间 $\tau_1 = 0.93$ s,下降时间 $\tau_2 = 12.1$ s,光响应的下降时间远高于上升时间。这是由于 CsPbBr₃ 量子点带有的配体使其与石墨烯之间引入陷阱态,光照下量子点的光生电子流向石墨烯,光生空穴被陷阱态捕获形成光栅压,同时延长了电路中光生电子寿命,提高了光电导增益放大了光电流,这就是光栅压效应。另外量子点中的光生电子注入石墨烯的过程较快,而在光照停止后,量子点中的陷阱释放光生空穴的弛豫时间却非常长,在增大光电流的同时,也导致了较慢的响应速度。结合

公式(3)可得出结论,石墨烯-CsPbBr₃量子点光电探测器的光响应增强不仅来自于石墨烯的高迁移率,还来源于石墨烯与量子点界面的光栅压效应。

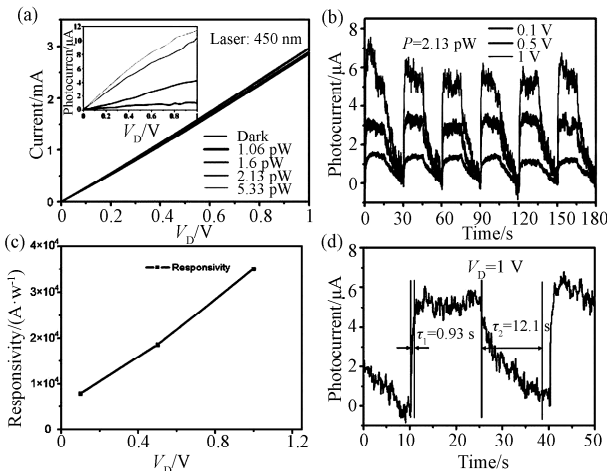


图 5 (a)石墨烯-CsPbBr₃量子点光电探测器在不同光照强度下的 I - V 特性曲线,插图是由此计算出的光电流 I_{photo} 随源漏电压 V_D 的变化; (b)探测器在不同源漏偏压下的瞬态光响应,此时的有效光功率为 2.13 pW; (c)石墨烯-CsPbBr₃量子点光电探测器光响应率与源漏电压 V_D 关系图; (d)器件一个光开关周期内的瞬态响应

Fig. 5 (a) I - V behavior of the graphene-CsPbBr₃ QDs photodetector under different incident light intensities, the inset is the calculated photocurrent (I_{ph}) as a function of V_D (drain-source voltage); (b) photocurrent-time ($I_{\text{ph}}-t$) response with various applied bias at a fixed light intensity ($P = 2.13 \text{ pW}$); (c) responsivity as a function of V_D ; (d) schematic profiles of a single photocurrent response at bias of 1 V

4 结 论

本文用一种温和的热注入方法制备了全无机 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点,表征了量子点的晶体结构与光谱特性,表明量子点有超高的量子产率. 进一步设计并制作了石墨烯-CsPbBr₃量子点光电探测器,其中 CsPbBr₃量子点为吸光层,石墨烯为传输层,重复测量的瞬态光响应高达 $3.5 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$. 根据石墨烯-CsPbBr₃量子点的荧光淬灭及光电探测器的瞬态响应可以得出,探测器的高光响应率有两个原因,一是石墨烯使量子点的光生电子空穴对有效分离和传输,二是陷阱态的光栅压效应延长了载流子寿命. 研究结果给提升全无机钙钛矿光电探测器光响应率提供了新的思路.

参考文献:

[1] Samuel D S, Giles E E, Giulia G, *et al.* Electron-

hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber[J]. Science, 2013, 342: 341.

[2] Dong Q, Fang Y, Shao Y, *et al.* Electron-hole diffusion lengths $> 175 \mu\text{m}$ in solution-grown $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ single crystals [J]. Solar cells, 2015, 347: 967.

[3] Jang D M, Park K, Kim D H, *et al.* Reversible halide exchange reaction of organometal trihalide perovskite colloidal nanocrystals for full-range band gap tuning [J]. Nano Lett, 2015, 15: 5191.

[4] Green M A, Ho-Baillie A, Snaith H J, *et al.* The emergence of perovskite solar cells [J]. Nat Photonics, 2014, 8: 506.

[5] Huang Y, Sun Q D, Xu W, *et al.* Halide perovskite materials for solar cells: a theoretical review [J]. J Mater Chem A, 2017, 3: 8926.

[6] Veldhuis S A, Boix P P, Yantara N, *et al.* Perovskite materials for light-emitting diodes and lasers [J]. Adv Mater, 2016, 28: 6804.

[7] Tang X, Zu Z, Shao H, *et al.* All-inorganic perovskite CsPb(Br/I)₃ nanorods for optoelectronic application [J]. Nanoscale, 2016, 8: 15158.

[8] Zhang M, Tian Z Q, Zhu D L, *et al.* Stable CsPbBr₃ perovskite quantum dots with high fluorescence quantum yields [J]. New J Chem, 2018, 42: 9496.

[9] Lv L, Xu Y, Fang H, *et al.* Generalized colloidal synthesis of high-quality, two-dimensional cesium lead halide perovskite nanosheets and their applications in photodetectors [J]. Nanoscale, 2016, 8: 13589.

[10] Chen S, Shi G. Two-dimensional materials for halide perovskite-based optoelectronic devices [J]. Adv Mater, 2017, 29: 1605448.

[11] Wang Y, Li X, Song J, *et al.* All-inorganic colloidal perovskite quantum dots: a new class of lasing materials with favorable characteristics [J]. Adv Mater, 2015, 27: 7101.

[12] Song J, Li J, Li X, *et al.* Quantum dot light-emitting diodes based on inorganic perovskite cesium lead halides (CsPbX_3) [J]. Adv Mater, 2015, 27: 7162.

[13] Li X, Wu Y, Zhang S, *et al.* CsPbX₃ quantum dots for lighting and displays: room-temperature synthesis, photoluminescence superiorities, underlying origins and white light-emitting diodes [J]. Adv Funct Mater, 2016, 26: 2435.

[14] Ramasamy P, Lim D H, Kim b, *et al.* All-inorgan-

- ic cesium lead halide perovskite nanocrystals for photodetector applications [J]. Chem Commun, 2016, 52: 2067.
- [15] Kulbak M, Cahen D, Hodes G. How important is the organic part of lead halide perovskite photovoltaic pells? Efficient CsPbBr₃ cells[J]. J Phys Chem Lett, 2015, 6: 2452.
- [16] Dong Y, Gu Y, Zou Y, *et al.* Improving all-inorganic perovskite photodetectors by preferred orientation and plasmonic effect [J]. Small, 2016, 12: 5622.
- [17] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene [J]. Nat Mater, 2007, 6: 183.
- [18] Bao Q, Loh K P. Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices [J]. ACS Nano, 2012, 6: 3677.
- [19] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, *et al.* Graphene photonics and optoelectronics[J]. Nat Photonics, 2010, 4: 611.
- [20] Roy K, Padmanabhan M, Goswami S, *et al.* Graphene-MoS₂ hybrid structures for multifunctional photoresponsive memory devices [J]. Nat Nanotechnol, 2013, 8: 826.
- [21] Rui P, Li H, Wang J, *et al.* High-responsivity photodetectors based on formamidinium lead halide perovskite quantum dot-graphene hybrid[J]. Part Syst Char, 2018, 35: 1700304.
- [22] Konstantatos G, Badioli M, Gaudreau L, *et al.* Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain [J]. Nat Nanotechnol, 2012, 7: 363.
- [23] Ding J, Fang H, Lian Z, *et al.* High-performance stretchable photodetector based on CH₃NH₃PbI₃ microwires and graphene [J]. Nanoscale, 2018, 10: 10538.
- [24] Qi Z J, Hong S J, Kybert N J, *et al.* Electronic transport in heterostructures of chemical vapor deposited graphene and hexagonal boron nitride[J]. Small, 2014, 11: 14021408.
- [25] Dong Y, Gu Y, Zou Y, *et al.* Improving all-inorganic perovskite photodetectors by preferred orientation and plasmonic effect [J]. Small, 2016, 12: 5622.
- [26] Koppens FH, Mueller T, Avouris P, *et al.* Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems [J]. Nat Nanotechnol, 2014, 9: 780.
- [27] Ni Z, Ma L, Du S, *et al.* Plasmonic silicon quantum dots enabled high-sensitivity ultra-broadband photodetection of graphene-based hybrid phototransistors [J]. ACS Nano, 2017, 11: 9854.

引用本文格式:

中 文: 王婧, 石瑞英, 朱国栋. 高响应率石墨烯-CsPbBr₃ 量子点光电探测器[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 025001.

英 文: Wang J, Shi R Y, Zhu G D. Graphene-CsPbBr₃ quantum dots photodetectors with high responsivity [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 025001.