

文章编号: 1672-8785(2017)11-0020-07

用溶液法制备钙钛矿纳米线 光电探测器

李宏策 李文芳

(湖南机电职业技术学院, 湖南长沙 410151)

摘要: 作为一种优秀的光吸收半导体材料, 有机-无机杂化钙钛矿被广泛应用于光电领域。为了制备高性能光电探测器件, 采用溶液法制备了高度有序、超长的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线, 并将其应用于 $\text{Au}/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Au}$ 平面型光电探测器。该器件具有宽的工作波段, 在紫外-可见光-近红外 (365 ~ 808 nm) 光谱范围内均有响应。其最大光响应度达到 $3.81 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 比探测率为 3.7×10^{11} Jones, 开关比为 4.9×10^3 , 光响应时间约为 7 ms。由于具有优异的光探测能力, 该器件拥有广阔的应用前景。

关键词: 溶液法; 钙钛矿; 纳米线; 光电探测器; 光响应度

中图分类号: O472+.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.11.005

Fabrication of Perovskite Nanowire Photodetectors by Solution Process

LI Hong-ce, Li Wen-fang

(Hunan Mechanical & Electrical Polytechnic, Changsha 410151, China)

Abstract: As an excellent light absorption semiconductor material, organic-inorganic hybrid halide perovskite has been widely used in the field of optoelectronics. To fabricate high performance photoelectric detection devices, a highly ordered ultra-long $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ nanowire is prepared by solution process and is used to fabricate an $\text{Au}/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Au}$ planar photoelectric detector. The device has a wide operation waveband. It has light response in the spectral range from ultraviolet to near-infrared (365-808 nm). Its maximum light responsibility (R), detectivity (D^*), light-dark ratio and light response time are up to $3.81 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 3.7×10^{11} Jones, 4.9×10^3 and 7 ms respectively. Because of excellent light detection ability, the device has a wide application prospect.

Key words: solution process; perovskite; nanowire; photodetector; responsivity

0 引言

作为一种可将光信号转换成电信号的光电器件, 光电探测器能够直接探测入射光信号、测量光辐射水平以及将时间相关的光信号转换成电信号, 现已被广泛应用于生物传感、光学成像、光通信、环境监测和国防军工等领域^[1-5]。

目前, 传统的光电探测器主要采用无机材料制备, 比如硅、二硫化钨和铟镓砷等^[6-9]。

有机-无机杂化钙钛矿材料 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbA}_3$ 或 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbA}_{3-x}\text{B}_x$, A, B=I, Cl, Br) 具有优异的半导体性质, 如合适的直接带隙宽度 (约 1.6 eV)、小的激发结合能 (约 20 MeV)、宽的吸收带宽 (300

收稿日期: 2017-08-01

作者简介: 李宏策 (1982-), 湖南桂阳人, 副教授, 工学硕士, 主要研究领域为机械设计与制造。

E-mail: lihongce123@163.com

~ 900 nm)、长的激子扩散长度 (100 ~ 1000 nm) 和长的载流子寿命, 因此在太阳能电池领域受到了广泛研究^[10-11]。钙钛矿材料在 36 年前被首次发现。在最近的几年时间里, 钙钛矿太阳能电池的光电转换效率由 3.8% 迅速提升至 20%, 表明钙钛矿作为太阳能电池的光吸收材料具有非常大的潜力^[12-15]。相关研究表明, 钙钛矿薄膜的形貌是影响太阳能电池光电转换效率的关键因素。钙钛矿薄膜的制备通常采用一步法和两步法^[16-17]。在用一步法制备钙钛矿薄膜时, 可通过反溶剂处理或气体淬火工艺来进一步提升薄膜质量, 从而得到高效的钙钛矿太阳能电池; 而两步法则是通过用后处理方式促进钙钛矿的进一步反应, 进而提高薄膜质量的。作为一种光吸收材料, 钙钛矿在太阳能电池、光电探测器、发光二极管和激光器件方面均有所应用^[18-22]。由于钙钛矿晶体在结晶过程中具有择优生长的特性, 人们已成功制备了钙钛矿纳米线并将其应用于太阳能电池。比如, Horváth E 等人在气氛保护中使用刮涂法成功制备了钙钛矿纳米线, 得到了光响应度为 $5 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 的光电探测器。与目前最高水平的 MoS_2 光电探测器相比, 该性能有了极大的提高^[23]。Im J H 等人采用两步旋涂法制备了 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线, 成功

获得了光电转换效率高达 14.71% 的太阳能电池^[24]。以上研究结果表明, 与钙钛矿薄膜相比, 纳米线内的光生载流子具有更短的传输路径和更少的缺陷。减小光生载流子在钙钛矿内的复合率更有利于制备高性能光电探测器。

在空气条件下, 本文采用一步刮涂法成功制备了高度有序、超长的钙钛矿纳米线阵列, 并在其基础上获得了光响应度为 $3.81 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 、比探测率为 3.7×10^{11} Jones、开关比为 4.9×10^3 、光响应时间约为 7 ms 的高性能光电探测器。与上述制备的钙钛矿光电探测器相比, 该探测器的光响应度和光响应时间均有明显提高。测试结果表明, 该器件对紫外-可见光-近红外波段均具有较好的光响应性能, 因此拥有广阔的应用前景。

1 器件制备与表征

1.1 器件制备

图 1 所示为钙钛矿纳米线光电探测器的制备过程和结构。具体的制备方法如下: 首先将玻璃基底充分洗涤干净, 即在去离子水、丙酮和无水乙醇中分别超声清洗 15 min, 然后使用高纯氮气将其吹干备用; 在湿度约为 40% 的室温条件下, 将钙钛矿先驱体滴至上述玻璃基底上, 如

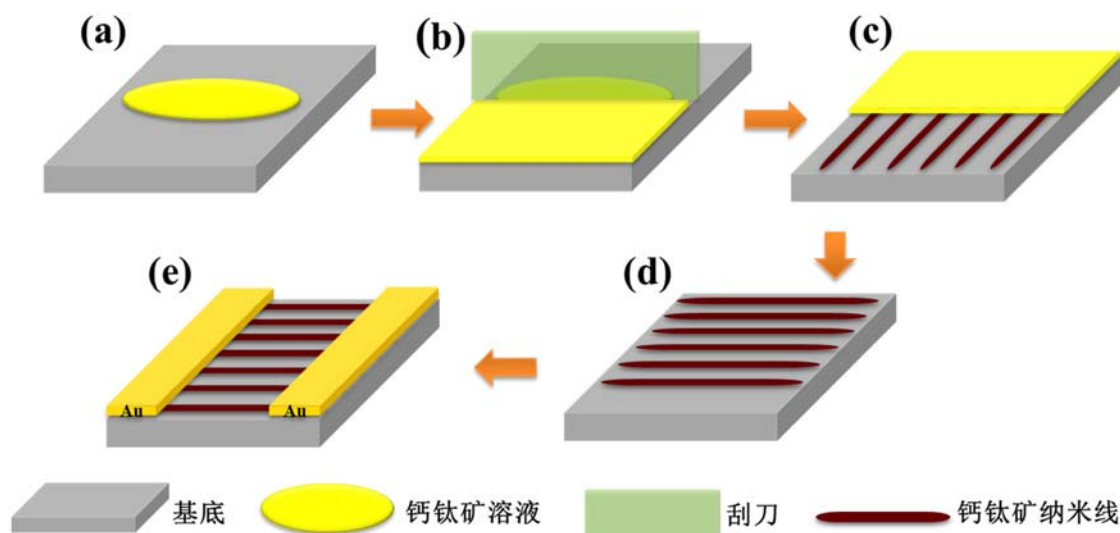


图 1 钙钛矿纳米线光电探测器的制备过程及结构的示意图: (a) 将钙钛矿先驱体滴到洁净的玻璃基底表面上; (b) 将刮刀匀速地通过基底表面, 形成钙钛矿溶液膜; (c) 在室温条件下, 通过自然生长形成钙钛矿纳米线; (d) 退火处理后, 得到高度有序、超长的钙钛矿纳米线阵列; (e) 钙钛矿纳米线光电探测器的结构示意图

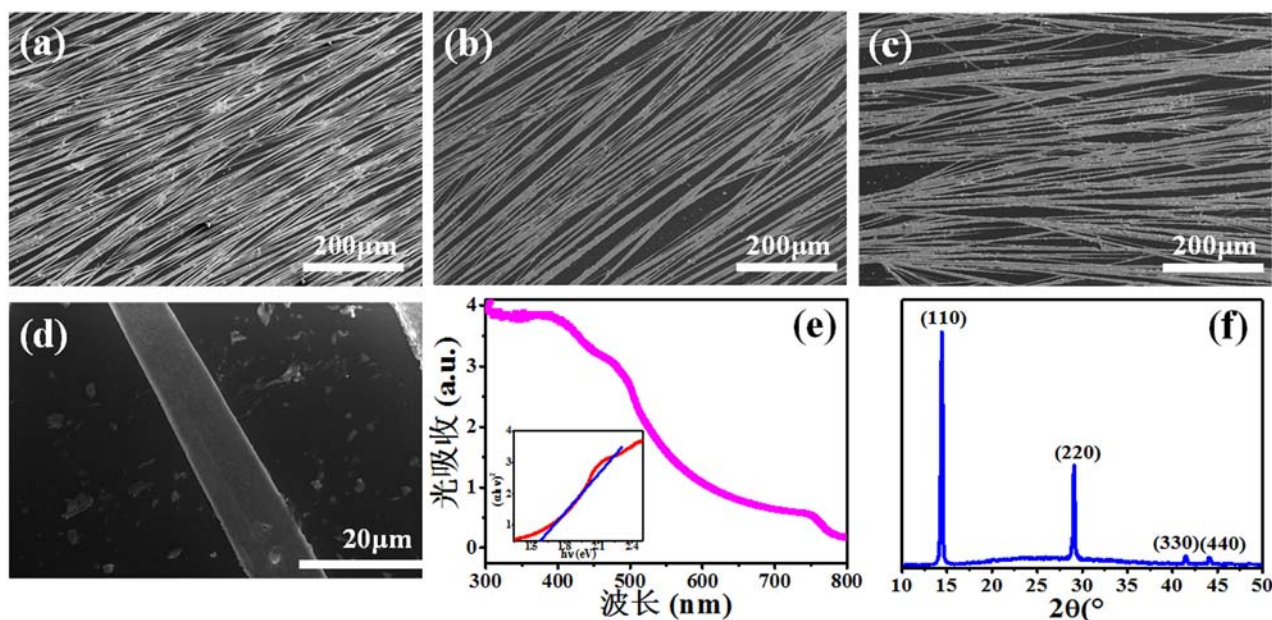


图 2 (a) ~ (c) 浓度分别为 150 mg/ml、100 mg/ml 和 50 mg/ml 时形成的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线的 SEM 图; (d) 单根 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线的放大版 SEM 图; (e) $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线薄膜的紫外 - 可见光吸收谱; (f) $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线薄膜的 X 射线衍射谱

图 1(a) 所示; 控制刮刀与基底的距离为 $100\ \mu\text{m}$, 并将其匀速通过基底, 使钙钛矿溶液均匀地涂覆在玻璃基底表面上, 如图 1(b) 所示; 在室温条件下, 钙钛矿溶液中的溶剂挥发, 在三相接触线处析出生成纳米线, 并沿三相接触线的收缩方向生长, 如图 1(c) 所示; 先驱体中的溶剂最终全部挥发后, 将其放置于 $100\ ^\circ\text{C}$ 的热台上退火处理 10 min, 接着在玻璃基底表面上形成高度有序、超长的钙钛矿纳米线, 如图 1(d) 所示; 然后将上述含有钙钛矿纳米线的玻璃基底放入真空室内, 并将通过掩膜版蒸镀的 $400\ \text{nm}$ Au 电极作为源极和漏极, 其中沟道宽度为 $80\ \mu\text{m}$, 沟道长度为 $1000\ \mu\text{m}$, 如图 1(e) 所示。实验所用的钙钛矿溶液是在氮气气氛的手套箱中配制而成的。具体说来, 就是将碘甲烷 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$, 99%, 晶格, 武汉) 和碘化铅 (PbI_2 , 99%, 振品, 上海) 按摩尔比 1 : 1 称取后, 溶于 N-N 二甲基甲酰胺 (DMF, 国药, 上海) 中, 形成不同浓度的钙钛矿溶液, 并在 $60\ ^\circ\text{C}$ 下加热搅拌 12 h。

1.2 试验表征

实验中的所有测试均在空气中完成。通过扫描电子显微镜 (SEM, FEI Helios Nanolab 600i, 美国)、X 射线衍射谱仪 (XRD, Rigaku D, Max

2500, 日本) 和紫外 - 可见光吸收谱仪 (UV-Vis, 普析, T9, 中国) 分别对钙钛矿纳米线薄膜的表面形貌、晶体结构和吸收特性进行表征。在光电性能测试中, 采用不同波长的单色激光作为光源。用衰减片对光源出射光束的光辐射强度进行调节, 然后将其照射到钙钛矿器件上。将探针电流传输给半导体特性分析系统 (4200 SCS, 吉时利, 美国) 进行数量采集。

2 结果与讨论

2.1 钙钛矿纳米线的表征

图 2(a) ~ 图 2(c) 所示为用不同浓度的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 溶液制备的纳米线。可以看出, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线排列有序, 并且随着溶液浓度的下降, 纳米线的密度减小。当 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 溶液的浓度为 150 mg/ml 或 50 mg/ml 时, 形成的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线存在较多分支以及不平整区域。由此造成的体内缺陷会导致光生载流子在纳米线内的传输损失, 从而不利于制备高性能光电器件。图 2(d) 为溶液浓度为 100 mg/ml 时制备的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线的 SEM 图。单根 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线的表面平滑, 表明纳米线内

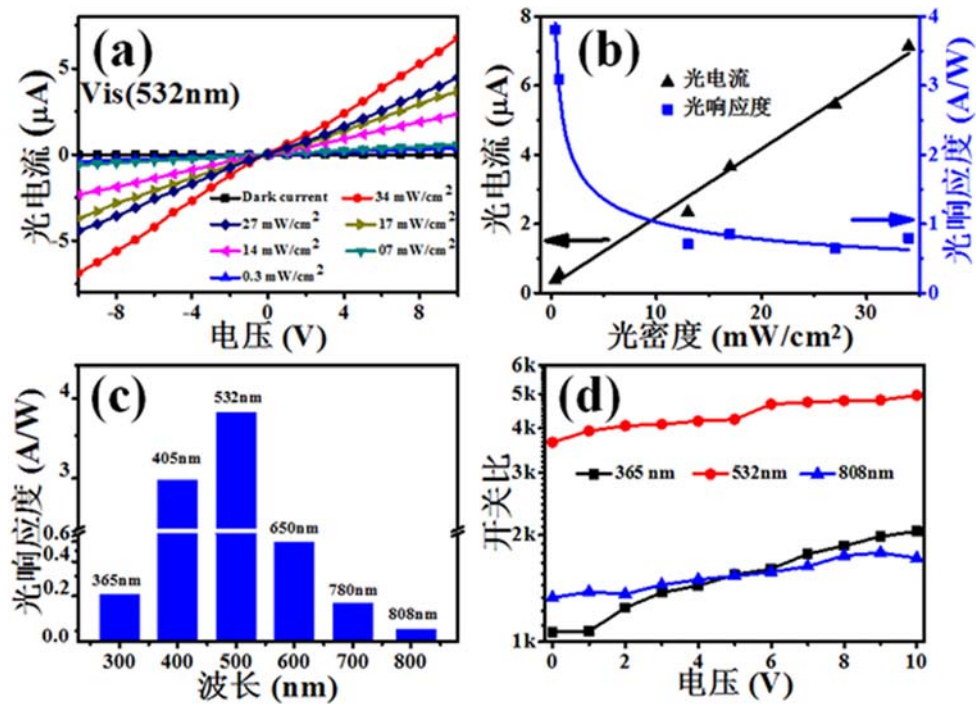


图 3 CH₃NH₃PbI₃ 纳米线光电探测器的性能: (a) 在 532 nm 光照下, 不同光功率密度的 I-V 曲线; (b) 在 532 nm 光照下, 光电流和光响应度与入射光密度的关系图; (c) 不同波段的光响应度图; (d) 不同波段的开关比曲线

部存在较少缺陷^[1]。值得注意的是, 纳米线的长度超过了 1 μm, 说明经过优化后, 该方法能够成功制备高度有序、超长的 CH₃NH₃PbI₃ 纳米线。

图 2(e) 所示为 CH₃NH₃PbI₃ 纳米线薄膜的紫外-可见光吸收谱。其插图表明, 薄膜的直接带隙宽度为 1.55 eV。这与文献报道一致, 并且接近于理想的光吸收波段^[25]。从紫外-可见光吸收谱中可以看出, CH₃NH₃PbI₃ 纳米线在从紫外到近红外的光谱范围内均具有优秀的光吸收特性, 从而为其在宽波段光电探测器件中的应用奠定了基础。在波长小于 520 nm 的区域内, CH₃NH₃PbI₃ 纳米线薄膜的吸收强度有明显提高, 而且其光吸收带宽可扩展至 780 nm。然而由于不可避免地存在晶格失配和缺陷, 在 CH₃NH₃PbI₃ 纳米线薄膜中引入了缺陷态能级, 导致光吸收谱中超过 780 nm 的区域内存在带尾态。图 2(f) 所示为 CH₃NH₃PbI₃ 纳米线薄膜的 X 射线衍射谱。其中, 14.08°、28.41°、43.19° 和 58.79° 的特征衍射峰分别代表了 CH₃NH₃PbI₃ 晶体的 (110)、(220)、

(330) 和 (440) 晶面。而在 X 射线衍射谱中, 没有出现 12.78° 的 PbI₂ 的特征峰, 表明 CH₃NH₃PbI₃ 纳米线薄膜中不存在 PbI₂ 物质。这意味着 MAI 和 PbI₂ 在纳米线的生长过程中得到了充分反应^[20]。由于具有优异的光吸收特性和结晶质量, CH₃NH₃PbI₃ 纳米线薄膜拥有良好的光电应用前景。

2.2 光电探测器的性能测试

进一步将 CH₃NH₃PbI₃ 纳米线作为光电探测器的活性材料, 并对该器件的光电探测性能进行表征 (见图 3)。在光辐射条件下, 能量大于材料直接带隙宽度的光子将会被吸收, 导致价带电子跃迁进入导体, 从而形成光生载流子; 载流子会迅速扩散至薄膜内部的缺陷、杂质和表面态处, 且在电场的作用下形成电子空穴对, 并向电极端移动形成光电流。从图 3(a) 中可以看出, 与无光条件下相比, 在 532 nm 光照下的器件光电流明显增加。当光照射的功率密度由 0.3 mW/cm² 增至 34 mW/cm² 时, 器件的光电流由 0.0013 μA 升至 7.1 μA。类似结果在紫外和近红

外波段均可获得。以上结果表明, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线均可吸收紫外-可见光-近红外光, 并对入射光具有很好的响应性能。

对于光电探测器来说, 光响应度 R 、比探测率 D^* 和开关比 ($I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$) 是几项非常重要的评价指标。其中, 光响应度 R 可表述为

$$R = (I_{\text{light}} - I_{\text{dark}})/PS \quad (1)$$

式中, I_{light} 为光电流; I_{dark} 为暗电流; P 为入射光密度; S 为有效活性面积。

比探测率 D^* 可表述为

$$D^* = R/(2qI_{\text{dark}}/S)^{1/2} \quad (2)$$

式中, R 为光响应度; q 为电荷电量; I_{dark} 为暗电流; S 为有效活性面积。

在开关比 ($I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$) 中, I_{light} 为光电流, I_{dark} 为暗电流。

在 532 nm 光照下, 光电流和光响应度与入射光密度的关系如图 3(b) 所示。随着入射光密度的增加, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器的光电流线性增大。然而其 R 值却随着入射光密度的增加而呈现出指数下降的趋势, 表明 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器对弱光敏感, 同时具有更高的光响应能力。图 3(c) 所示为不同波段的光响应度。可以看出, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器对于波长在 365 ~ 808 nm 之间的光都有较好的响应度, 并在 400 ~ 650 nm 波段具有最强的光响应度。当入射光的波长为 532 nm 时, R 值为 $3.8 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 。与 365 nm 光照下的 $0.21 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 808 nm 光照下的 $0.11 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 相比, 该值增加了一个数量级。结果表明, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器具有宽波段响应能力, 并对可见光具有最强的响应能力。在 532 nm 入射光的照射下, 其比探测率 D^* 为 3.7×10^{11} Jones, 表明 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器在可见光波段具有优异的光探测能力。图 3(d) 所示为不同波段的开关比曲线。在 532 nm 光照下, 最高的 $I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$ 值达到 4.9×10^3 , 远远大于 365 nm 光照下的 1.7×10^3 和 808 nm 光照下的 2.1×10^3 。 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器具有高的光响应度、大的比探测率

以及高的开关比, 说明其光电探测性能非常优异。

对于 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器来说, 光响应速度是一项重要的性能指标。图 4(a) 为光电探测器件在有光照射 (开态) 与无光照射 (关态) 下电流随时间的变化图。可以看出, 光电探测器重复多次开关转换过程后, 光电流未出现明显衰减, 并维持在 $10 \mu\text{A}$ 左右, 表明 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器具有较好的稳定性。这里, 将上升时间 τ_1 定义为最小电流升至 90% 的最大光电流所需的时间, 将下降时间 τ_2 定义为 90% 的最大光电流降至最小电流所需的时间 [26]。图 4(b) 所示为单次 532 nm 光照下 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器的电流随时间的变化曲线。在光照后, 器件的光电流迅速升至 $6 \mu\text{A}$ 左右, 然后缓慢上升, 并最终达到稳定状态。造成以上现象的原因是在制备纳米线的过程中, 不可避免地存在缺陷态; 光生载流子需要先将能级中的缺陷态填充, 然而再进入导带形成光电流。因此, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器的光电流会出现缓慢上升的过程, 这与钙钛矿太阳能电池中的“光浸泡”现象一致 [27]。在图 4(b) 所示的光响应过程中, 上升过程与下降过程的放大图分别如图 4(c) 和图 4(d) 所示。 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器具有短的光响应时间, 其上升时间为 6.16 ms, 下降时间为 8.16 ms。结果表明, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线的缺陷态密度较小, 有利于光生载流子快速分离, 并在偏压作用下传输至电流, 从而实现快的光响应速度。

3 结束语

基于用溶液法制备的高度有序、超长的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线阵列, 本文成功制作了 $\text{Au}/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Au}$ 平面型光电探测器。通过对制备工艺进行优化, 器件的光响应度达到 $3.81 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 比探测率为 3.7×10^{11} Jones, 开关比为 4.9×10^3 , 光响应时间约为 7 ms。该器件具有宽的工作波段, 在紫外-可见光-近红外 (365 ~ 808 nm) 光谱范围内均有响应。结果表明, 采用溶液法制备的平面型 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探

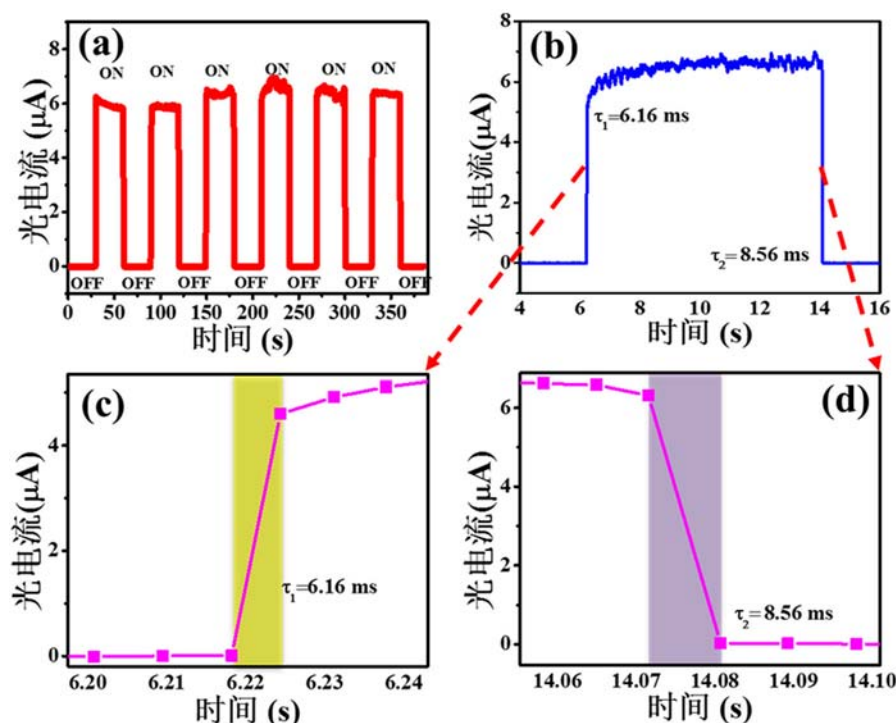


图 4 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 纳米线光电探测器的“开”“关”特性测试: (a) 在 532 nm 入射光下, 光电探测器的“开”“关”重复性测试; (b) 光响应时间测试; (c) 光响应上升时间的放大图; (d) 光响应下降时间的放大图

测器具有良好的光电探测性能, 而且还可应用于紫外-红外光电探测器的制备, 因此拥有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Deng W, Zhang X, Huang L, et al. Aligned Single-crystalline Perovskite Microwire Arrays for High-Performance Flexible Image Sensors with Long-term Stability [J]. *Adv Mater*, 2016, **28**: 2201–2208.
- [2] Liu F, Shimotani H, Shang H, et al. High-sensitivity Photodetectors Based on Multilayer GaTe Flakes [J]. *ACS Nano*, 2014, **8**(1): 752–760.
- [3] Hatch S M, Briscoe J, Dunn S. A Self-powered ZnO Nanorod/CuSCN UV Photodetector Exhibiting Rapid Response [J]. *Adv Mater*, 2013, **25**(6): 867–871.
- [4] Wu Y, Yin Z, Xiao J, et al. Crystal Structure and Phototransistor Behavior of N-substituted Heptacene [J]. *ACS Appl Mater Inter*, 2012, **4**(4): 1883–1886.
- [5] 周立, 朱俊, 徐亚峰, 等. 绝缘氧化物包覆对钙钛矿太阳能电池性能及界面电荷复合动力学的影响 [J]. *物理化学学报*, 2016, **32**(5): 1207–1213.
- [6] Basu P K, Das N R, Mukhopadhyay B, et al. Ge/Si Photodetectors and Group IV Alloy Based Photodetector Materials [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2009, **41**(7): 567–581.
- [7] Hsiao Y J, Fand T H, Ji L W, et al. Red-shift Effect and Sensitive Responsivity of MoS_2/ZnO Flexible Photodetectors [J]. *Nanoscale Res Lett*, 2015, **10**(1): 443.
- [8] Miao J, Hu W, Guo N, et al. High-responsivity Graphene/InAs Nanowire Heterojunction Near-infrared Photodetectors with Distinct Photocurrent On/Off Ratios [J]. *Small*, 2015, **11**(8): 936–942.
- [9] 杨波, 邵秀梅, 唐恒敬, 等. 可见增强的 32×32 元平面型 InGaAs/InP 面阵探测器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2015, **34**(3): 386–390.
- [10] Liang Z Q, Liu Z J, Jiang Y D, et al. High Responsivity of Terahertz Detector Based on Ultrathin LiTaO_3 Crystal Material [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2016, **35**(5): 521–524.
- [11] 王艳青, 李龙, 聂林辉, 等. 两步沉积法制备 Br 或 Cl 掺杂的有机-机杂化钙钛矿太阳能电池 [J]. *物理化学学报*, 2016, **32**(11): 2724–2730.
- [12] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, et al. Organometal Halide Perovskites as Visible-light Sensitizers for Photovoltaic Cells [J]. *J Am Chem Soc*, 2009, **131**(17): 6050–6051.

- [13] Ye L, Xiong Y, Yao H, et al. High Performance Organic Solar Cells Processed by Blade Coating in Air from a Benign Food Additive Solution [J]. *Chem Mater*, 2016, **28**(20): 7451–7458.
- [14] Docampo P, Ball J M, Darwich H M, et al. Efficient Organometal Trihalide Perovskite Planar-heterojunction Solar Cells on Flexible Polymer Substrates [J]. *Nature Commun*, 2013, **4**: 2761.
- [15] 檀满林, 马东超, 符冬菊, 等. 银纳米相吸收增强型钙钛矿太阳能电池薄膜的制备及性能研究 [J]. *无机材料学报*, 2016, **31**(9): 908–914.
- [16] Lee M M, Teuscher R J, Miyasaka T, et al. Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-structured Organometal Halide Perovskites [J]. *Science*, 2012, **338**(6107): 643–647.
- [17] Mei A, Li X, Liu L, et al. A Hole-conductor-free, Fully Printable Mesoscopic Perovskite Solar Cell with High Stability [J]. *Science*, 2014, **345**(6194): 295–298.
- [18] Im J H, Lee C R, Lee J W, et al. 6.5% Efficient Perovskite Quantum-dot-sensitized Solar Cell [J]. *Nanoscale*, 2011, **3**(10): 4088–4093.
- [19] Kim H M, Kim S T, Seo M H, et al. Alkylated Fullerene Derivatives for Solution-processable Organic Thin-film Transistors and Bulk Heterojunction Solar Cells [J]. *J Nanosci Nanotech*, 2014, **14**(3): 2515–2519.
- [20] Lu H, Tian W, Cao F, et al. A Self-powered and Stable All-perovskite Photodetector-solar Cell Nanosystem [J]. *Adv Funct Mater*, 2016, **26**: 1296–1302.
- [21] Fu Y, Zhu H, Schrader R A W, et al. Nanowire Lasers of Formamidinium Lead Halide Perovskites and Their Stabilized Alloys with Improved Stability [J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(2): 1000–1008.
- [22] 王艳香, 罗俊, 郭平春, 等. 杂化钙钛矿材料在太阳能电池中的应用与发展 [J]. *无机材料学报*, 2015, **30**(7): 673–682.
- [23] Horváth E, Spina M, Szekrenyes Z, et al. Nanowires of Methylammonium Lead Iodide ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) Prepared by Low Temperature Solution-mediated Crystallization [J]. *Nano Lett*, 2014, **14**(12): 6761–6766.
- [24] Im J H, Luo J, Franckevicius M, et al. Nanowire Perovskite Solar Cell [J]. *Nano Lett*, 2015, **15**(3): 2120–2126.
- [25] De W S, Holovsky J, Moon S J, et al. Organometallic Halide Perovskites: Sharp Optical Absorption Edge and Its Relation to Photovoltaic Performance [J]. *J Phys Chem Lett*, 2014, **5**(6): 1035–1039.
- [26] Ma C, Shi Y, Hu W, et al. Heterostructured $\text{WS}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Photoconductors with Suppressed Dark Current and Enhanced Photodetectivity [J]. *Adv Mater*, 2016, **28**(19): 3683–3689.
- [27] Zhao C, Chen B, Qiao X, et al. Revealing Underlying Processes Involved in Light Soaking Effects and Hysteresis Phenomena in Perovskite Solar Cells [J]. *Adv Ene Mater*, 2015, **5**(14): 1500279.

(上接第 19 页)

更平整, 崩裂较少, 表面损伤也明显小于内圆切割晶片; (2) 线切割 InSb 晶片损伤层的厚度约为 $14\ \mu\text{m}$, 较常规内圆切割晶片的小。针对线切割 InSb 晶片的损伤研究能够为大尺寸、大批量 InSb 晶片的生产及后续加工提供科学指导, 同时为大尺寸、多像元、小线宽红外探测器的器件研究提供材料方面的理论基础。

参考文献

- [1] Hamidreza S. Optimisation of Cooled InSb Detectors [J]. *III - V s Review*, 2004, **17**(7): 27–31.

- [2] 陆春明, 李喆深, 董国胜. 化学腐蚀和硫处理对 InSb(111) 表面的影响 [J]. *物理学报*, 1992, **41**(4): 675–682.
- [3] 付安英, 马睿, 薛三旺. 高灵敏度室温铋化铟红外探测器研制 [J]. *现代电子技术*, 2007, **30**(2): 182–183.
- [4] 柏伟, 赵超, 龚志红. InSb 晶片的机械加工损伤层研究 [J]. *红外*, 2017, **38**(1): 6–11.
- [5] 樊瑞新, 卢焕明. 线切割单晶硅表面损伤的研究 [J]. *材料科学与工程*, 1999, **17**(2): 55–57.
- [6] 许顺生, 冯端. X 射线衍射衬底相学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987, 275–276.
- [7] Hoareau A. Study of the Crystallization of Antimony Thin Films by Transmission Electron Microscopy Observations and Electrical Measurements [J]. *Thin Solid Films*, 1992, **209**(2): 161–164.