



碱金属碘化物和氢碘酸共添加低温制备高稳定的CsPbI₃薄膜

闫雅婷 张景研 李斌旗 朱志立 谷锦华

Alkali metal iodides and hydroiodic acid additives for phase-stability CsPbI₃ films prepared at low temperature

Yan Ya-Ting Zhang Jing-Yan Li Bin-Qi Zhu Zhi-Li Gu Jin-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 118401 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201950

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201950>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

过渡金属硼碳化物 TM_3B_3C 和 $TM_4B_3C_2$ 稳定性和性能的理论计算

Theoretical calculations of stabilities and properties of transition metal borocarbides TM_3B_3C and $TM_4B_3C_2$ compound

物理学报. 2019, 68(9): 096201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190158>

氢化二维过渡金属硫化物的稳定性和电子特性: 第一性原理研究

Stability and electronic structure of hydrogenated two-dimensional transition metal dichalcogenides: First-principles study

物理学报. 2019, 68(3): 037102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181597>

三元Nb系和Ta系硼碳化物稳定性和物理性能的第一性原理研究

First-principles calculations of stabilities and physical properties of ternary niobium borocarbides and tantalum borocarbides

物理学报. 2020, 69(11): 116201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200234>

中性和阳离子丁酮团簇的结构及稳定性的理论研究

Theoretical study on the structure and stability of neutral and cationic butanone clusters

物理学报. 2018, 67(3): 033601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171862>

发光铅卤钙钛矿纳米晶稳定性的研究进展

Research progress of stability of luminous lead halide perovskite nanocrystals

物理学报. 2020, 69(11): 118501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191767>

硅和钇双掺杂对 γ -TiAl 基金属稳定性和抗氧化性的影响

Effects of Si and Y co-doping on stability and oxidation resistance of γ -TiAl based alloys

物理学报. 2019, 68(19): 196101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190490>

碱金属碘化物和氢碘酸共添加低温制备高稳定的 CsPbI₃ 薄膜*

闫雅婷 张景研 李斌旗 朱志立 谷锦华†

(郑州大学物理学院 (微电子学院), 材料物理教育部重点实验室, 郑州 450052)

(2020 年 11 月 19 日收到; 2021 年 1 月 5 日收到修改稿)

无机钙钛矿 CsPbI₃ 由于好的热稳定性和合适的光学带隙具有很好的发展前景, 作为太阳电池的吸收层, CsPbI₃ 必须形成黑色相 (α -CsPbI₃). 为了低温制备出空气中稳定的优质 α -CsPbI₃, 本文在前驱液中同时添加碱金属碘化物 (NaI, KI) 和氢碘酸 (HI). 研究发现: 与仅有 HI 添加剂相比, 添加碱金属碘化物后低温制备的 α -CsPbI₃ 薄膜的质量和稳定性均有提高, 即薄膜致密度提高、晶粒增大、内部缺陷减少、光吸收增强. 因此, 碱金属碘化物和 HI 共添加是进一步提高 CsPbI₃ 无机钙钛矿太阳电池效率和稳定性的有效方法.

关键词: CsPbI₃ 薄膜, 碱金属碘化物, 氢碘酸, 稳定性

PACS: 88.40.H-, 68.55.-a, 81.15.-z

DOI: 10.7498/aps.70.20201950

1 引言

有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池由于兼有高效和低成本的优点, 成为目前太阳能电池领域的研究热点^[1-5]. 自 2009 年首次报道以来, 光电转换效率从 3.8%^[6] 快速提升至目前的 25.5%^[7]. 然而有机-无机杂化钙钛矿薄膜中的有机部分 (如甲胺、甲脒) 容易与空气中的氧和水反应, 从而导致钙钛矿薄膜分解^[8-11]. 以铯离子取代有机阳离子形成的无机钙钛矿薄膜, 能够很好地解决钙钛矿薄膜的结构稳定性^[12]. 然而最适合光伏用的无机钙钛矿 CsPbI₃ 黑相 (α -CsPbI₃) 在空气中会自发地变成黄相 (δ -CsPbI₃). 为了解决 CsPbI₃ 薄膜的相不稳定性问题, 2015 年 Eperon 等^[13] 首次通过在前驱液中添加氢碘酸 (HI) 低温制备了 α -CsPbI₃ 薄膜, 薄膜的稳定性得到提高, 制备的太阳能电池的效率 (PCE) 为 2.9%. 后来不同的研究组^[14-18] 相继通过添加 HI 低温制备了 α -CsPbI₃ 薄膜, 并且将 PCE 提高到 6.44%. 然而, 通过添加 HI 制备的 α -CsPbI₃

薄膜在空气中的稳定性仍然很差. 最近有研究表明通过少量的碱金属离子掺杂^[19-22] 也可以提高 α -CsPbI₃ 钙钛矿薄膜的稳定性. 然而, 有关碱金属离子和 HI 同时添加到前驱液中对 CsPbI₃ 钙钛矿薄膜影响的研究未见报道.

本文, 在前驱液中同时添加碱金属碘化物 (NaI, KI) 和 HI 制备 CsPbI₃ 钙钛矿薄膜. 发现低温制备的 α -CsPbI₃ 钙钛矿薄膜, 通过合适浓度的碱金属碘化物添加 (NaI, KI) 均能提高钙钛矿薄膜的致密度和结晶度、减少薄膜内部缺陷, 使得 α -CsPbI₃ 钙钛矿薄膜的光吸收增加且稳定性提高, 这些有利于制备高性能的钙钛矿电池.

2 实验

2.1 CsPbI₃ 钙钛矿薄膜的制备

首先将掺杂氟的氧化锡 (FTO) 导电玻璃经去污剂清洗后, 然后依次采用去离子水、丙酮、异丙醇、酒精分别超声清洗 15 min, 最后将清洗好的 FTO 玻璃放入紫外臭氧等离子体机处理 10 min.

* 河南省自然科学基金 (批准号: 162300410254) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gujinh@zzu.edu.cn

采用一步旋涂法制备 CsPbI₃ 钙钛矿薄膜, 即将碘化铯 CsI、碱金属碘化物 (NaI, KI) 与碘化铅 PbI₂ 按照 (1 + x):1 的摩尔比共溶解于 1 mL 甲基甲酰胺 (DMF) 和二甲基亚砜 (DMSO) 的混合溶剂 (体积比 $V(\text{DMF}):V(\text{DMSO}) = 1:1$) 中, 加入 66 μL 的氢碘酸溶液, 搅拌至澄清形成 0.8 mol/L 钙钛矿前驱液, 将前驱液旋涂在 FTO 衬底上 (先以低速 500 r/min 旋转 5 s, 然后再加速到 2500 r/min 旋转 25 s) 形成薄膜. 先将旋涂的薄膜在 100 $^{\circ}\text{C}$ 退火 10 min, 然后放入异丙醇溶液中处理 10 min, 最后在 100 $^{\circ}\text{C}$ 下退火 5 min.

2.2 测试

实验中制备的钙钛矿薄膜的厚度为 280 nm, 采用 BRUKER 台阶仪 (型号 Dektak-XT) 测量; 扫描电镜 (SEM) 照片采用 JSM-6700F 型号场发射扫描电镜测量; 紫外-可见光吸收谱采用 Shimadzu UV-3150 型号光谱仪测量; 钙钛矿薄膜的结构通过 X 射线衍射 (XRD) 谱 (型号 Rigaku D/Max-2400) 表征; 稳态光致发光 (PL) 谱采用 Flouromax-4 光谱仪测量, 激发波长为 467 nm.

3 结果与讨论

3.1 钾离子掺杂对 CsPbI₃ 薄膜性能的影响

图 1 比较了不同 KI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 SEM 图像, 从图中看出, 未掺杂的 CsPbI₃ 薄膜孔洞较多, 薄膜不致密, 而 2.5% KI 掺杂浓度的 CsPbI₃ 薄膜致密度提高, 表面无明显孔洞. 随着 KI 掺杂

浓度增加, 薄膜表面孔洞开始增多, 致密度下降. 这表明低浓度的 KI 掺杂 (2.5%) 能够减少 CsPbI₃ 钙钛矿薄膜内的空洞, 提高致密度, 有利于制备高性能的钙钛矿薄膜太阳能电池.

图 2 为不同 KI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 XRD 图谱. 从图中看出, 对应 CsPbI₃ 钙钛矿相的主要衍射峰 14.2 $^{\circ}$ 和 28.6 $^{\circ}$ 在 5 个样品中都出现, 这说明都形成了较好的钙钛矿薄膜, 并且均沿 (100) 面择优生长. 随着 KI 掺杂浓度的增加, (100) 峰强度先增加后减小, 掺杂浓度为 5% 时达到最大值. 图 2(b) 为 (100) 峰半高宽值 (FWHM), 随着掺杂浓度的增加, 半高宽先减小后增加, 掺杂浓度为 5% KI 时半高宽最小. 这说明掺杂浓度为 5% 时晶粒尺寸最大. 因此低浓度的 KI 掺杂有利于薄膜结晶, 增大晶粒尺寸, 而高浓度的 KI 掺杂 (10%) 使 CsPbI₃ 薄膜结晶下降.

图 3 为不同 KI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 PL 谱和吸收谱. 从图 3(a) 可以看出, KI 掺杂浓度为 2.5% 的样品 PL 峰强最强, 这说明较少的非辐射复合发生, 暗示薄膜内部缺陷较少, 而较少的缺陷有利于制备高性能的器件. 但随着 KI 掺杂浓度的增加, PL 峰强均有所减弱, 说明薄膜内缺陷增加, 薄膜质量下降. 所以 KI 最佳掺杂浓度为 2.5%. 图 3(b) 为不同 KI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的吸收谱, 从图中可以看出 KI 掺杂对 CsPbI₃ 薄膜的带隙影响不大, 其中 2.5% KI 掺杂和未掺杂样品的带隙几乎一致, 而高浓度 (5.0%, 7.5%, 10.0%) 掺杂后 CsPbI₃ 薄膜的带隙略微减小. 总之 2.5% KI 掺杂对 CsPbI₃ 带隙的影响很小, 且 PL 峰强较强, 有利于制备高质量的 CsPbI₃ 薄膜.

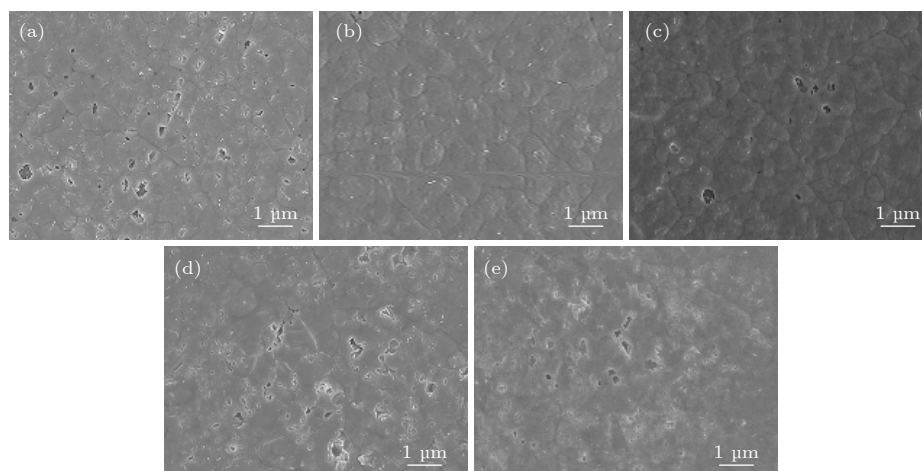


图 1 不同 KI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 SEM 图像 (a) $x = 0\%$; (b) $x = 2.5\%$; (c) $x = 5.0\%$; (d) $x = 7.5\%$; (e) $x = 10.0\%$

Fig. 1. SEM surface images of CsPbI₃ perovskite films doped with different KI content: (a) $x = 0\%$; (b) $x = 2.5\%$; (c) $x = 5.0\%$; (d) $x = 7.5\%$; (e) $x = 10.0\%$.

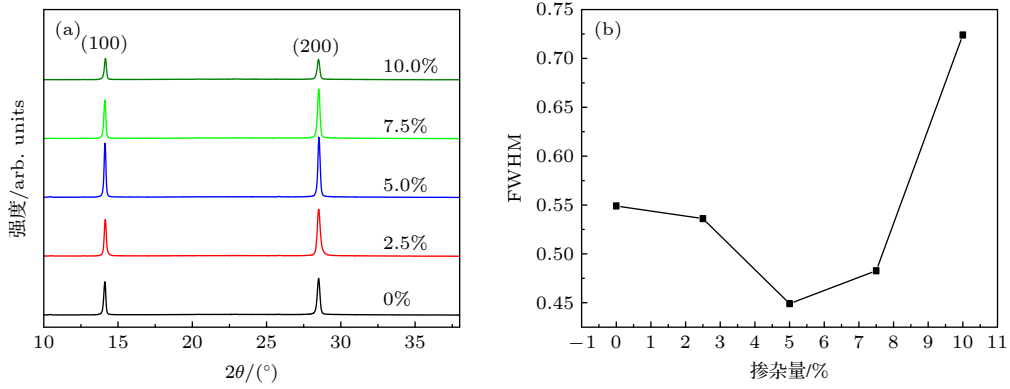


图 2 不同 KI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 (a) XRD 图谱与 (b)(100) 衍射峰半高宽

Fig. 2. (a) (XRD) patterns of CsPbI₃ perovskite films doped with different KI content and (b) full width of half maximum at (100) peak.

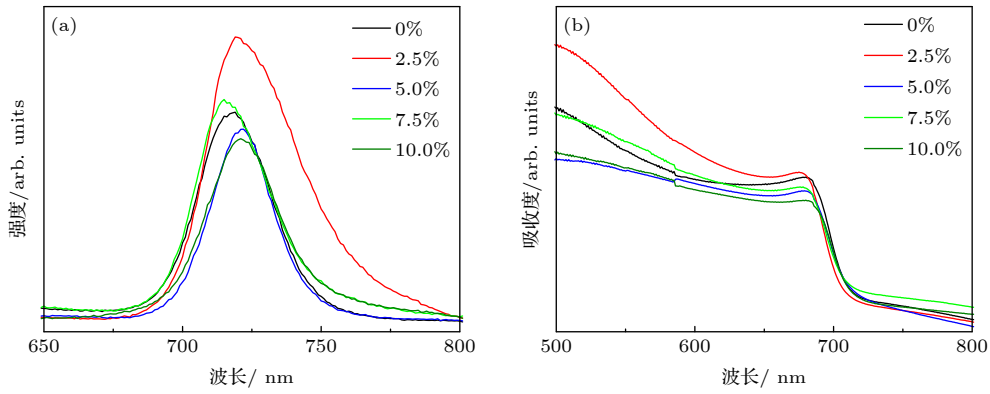


图 3 不同 KI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 (a) PL 谱和 (b) 吸收谱

Fig. 3. (a) PL spectra and (b) UV-vis absorption spectra of CsPbI₃ films doped with different KI content.

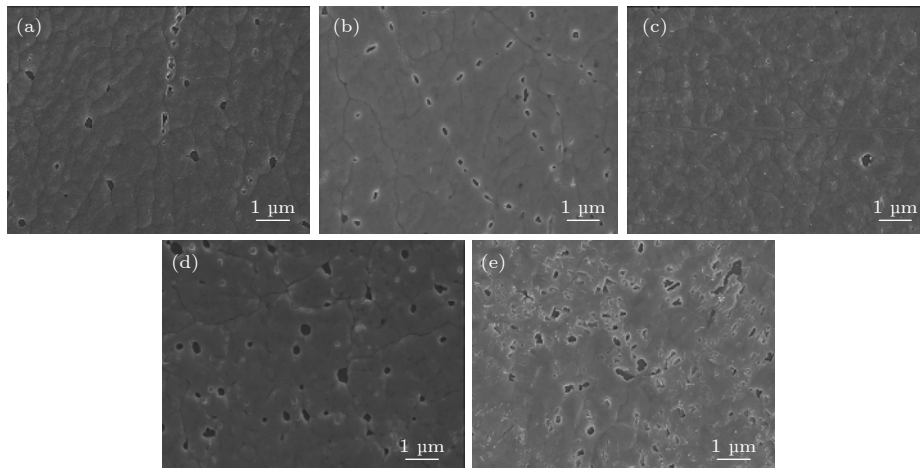


图 4 不同 NaI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 SEM 图像 (a) $x = 0\%$; (b) $x = 2.5\%$; (c) $x = 5.0\%$; (d) $x = 7.5\%$; (e) $x = 10.0\%$

Fig. 4. SEM surface images of CsPbI₃ perovskite films doped with different NaI content: (a) $x = 0\%$; (b) $x = 2.5\%$; (c) $x = 5.0\%$; (d) $x = 7.5\%$; (e) $x = 10.0\%$.

3.2 钠离子掺杂对 CsPbI₃ 薄膜性能的影响

图 4 比较了不同 NaI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 SEM 图像, 从图中可以看出, 未掺杂的 CsPbI₃ 薄膜孔洞较多, 薄膜不致密, 低浓度 NaI 掺杂能够明显改善薄膜的致密度, 薄膜表面孔洞明显减少,

掺杂浓度为 5.0% 时薄膜表面无明显空洞, 薄膜致密. 随着掺杂浓度的进一步增加, 薄膜的孔洞又明显增多. 这说明钠离子掺杂也是一种提高 CsPbI₃ 薄膜致密性, 减少钙钛矿薄膜的缺陷的有效方法, NaI 掺杂浓度为 5.0% 时薄膜致密性较好.

图 5 为不同 NaI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 XRD 图谱. 从图中看出, 对应 CsPbI₃ 钙钛矿相的主要衍射峰 14.2° 和 28.6° 在 5 个样品中都出现, 这说明都形成了较好钙钛矿薄膜, 并且均沿 (100) 面择优生长. 随着 NaI 掺杂浓度的增加, (100) 峰强度增加, CsPbI₃ 薄膜结晶度提高. 这表明 NaI 掺杂有利于薄膜结晶.

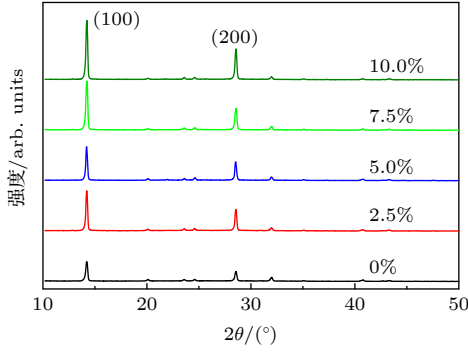


图 5 不同 NaI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 XRD 图谱
Fig. 5. XRD patterns of CsPbI₃ films with different NaI content.

图 6 为不同 NaI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 PL 和吸收谱. 从图 6(a) 可以看出, 5.0% NaI 掺杂的样品 PL 峰最强, 说明发生非辐射复合较少, 暗示薄膜内部缺陷较少, 而较少的缺陷有利于制备高性能的器件. 与未掺杂样品相比, NaI 掺杂浓度低于或高于 5.0% 的薄膜 PL 峰强均有所减弱, 说明薄膜中含有较多缺陷. 所以 NaI 的最佳掺杂浓度为 5.0%. 图 6(b) 为不同 NaI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的吸收谱. 从图中可以看出 NaI 掺杂对 CsPbI₃ 薄膜的带隙影响不大, 且 NaI 掺杂浓度为 5.0% 和 7.5% 时吸收明显增加, 有利于增加光的吸收, 提高太阳能电池的效率. 总之 5.0% NaI 掺杂对 CsPbI₃ 带隙的影响很小, 且 PL 峰强较强, 光吸收增加, 有利于制备高质量的 CsPbI₃ 薄膜.

3.3 NaI 和 KI 掺杂对 CsPbI₃ 薄膜稳定性的影响

图 7(a) 为未掺杂、2.5% KI 和 5.0% NaI 掺杂的 CsPbI₃ 薄膜在湿度为 30% 的空气中放置 24 h

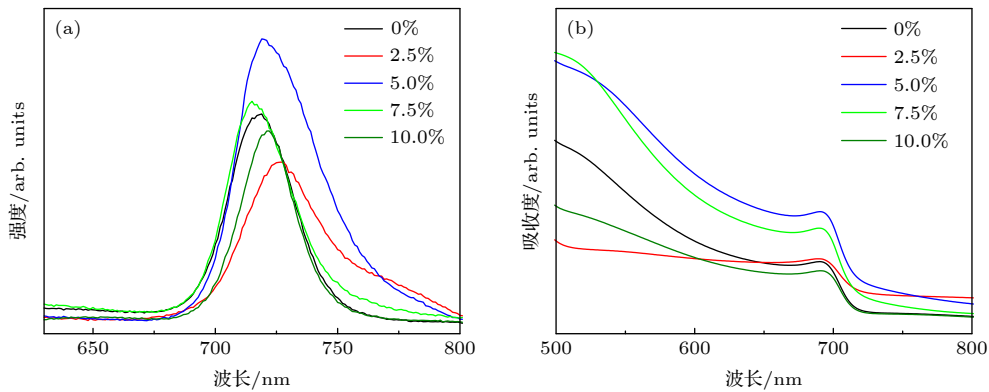


图 6 不同 NaI 掺杂浓度 CsPbI₃ 薄膜的 (a) PL 谱和 (b) 吸收谱
Fig. 6. (a) PL spectra, (b) UV-vis absorption spectra of CsPbI₃ films doped with different NaI content.

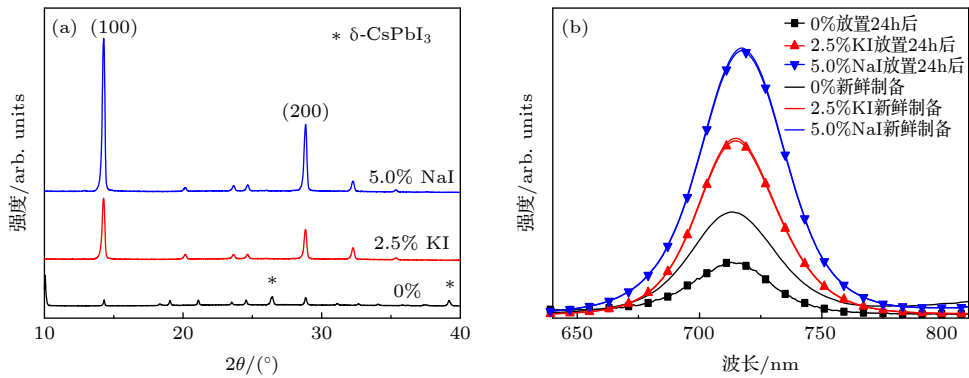


图 7 未掺杂 (0%)、2.5% KI 和 5.0% NaI 掺杂 CsPbI₃ 薄膜 (a) 在空气中放置 24 h 后的 XRD 图谱和 (b) 新鲜制备及空气中放置 24 h 后的 PL 图谱

Fig. 7. (a) XRD patterns of undoped, 2.5% KI and 5.0% NaI doped CsPbI₃ films exposed for 24 h in ambient air, and (b) PL patterns of the above as-deposited films and films exposed for 24 h in ambient air.

后的 XRD 图谱. 从图中可以看出, 未掺杂样品放置 24 h 后 α -CsPbI₃ 衍射峰强变弱, δ -CsPbI₃ 衍射峰出现, 说明其黑相部分变成了黄相. 而 KI 和 NaI 掺杂的样品, 衍射峰位不变, 仍保持黑相. 图 7(b) 为未掺杂、2.5% KI 和 5.0% NaI 掺杂的 CsPbI₃ 薄膜在湿度为 30% 的空气中放 24 h 后的 PL 图谱. 从图中可以看出: 未掺杂的样品放置 24 h 后对应黑相的 PL 峰强减弱, 说明部分已经发生了相变; 由于激发波为 467 nm, 因此对应黄相的 PL 峰 (420 nm) 无法测量; 而 KI 和 NaI 掺杂的样品, PL 峰强无明显变化, 基本重合, 仍保持黑相. 上面结果说明了 KI 和 NaI 掺杂能够明显提高 CsPbI₃ 薄膜的稳定性.

4 结 论

本文调查了在前驱液中同时添加碱金属碘化物和 HI 对 CsPbI₃ 薄膜的影响. 研究发现: 与仅有 HI 添加剂相比, 添加碱金属碘化物 KI 和 NaI 后制备的 α -CsPbI₃ 薄膜的质量和稳定性均有提高. SEM, XRD, PL 和光吸收谱测量表明: 当 KI 为 2.5% 和 NaI 浓度为 5.0% 时, 薄膜表面致密度提高、晶粒增大、内部缺陷减少、光吸收增强. 空气中放置 24 h 后 XRD 图谱和 PL 图谱分别表明, KI 和 NaI 掺杂后的 CsPbI₃ 钙钛矿薄膜的稳定性明显改善. 因此, 碱金属碘化物 KI 和 NaI 掺杂能进一步提高 CsPbI₃ 钙钛矿薄膜的质量和稳定性, 是一个提高 CsPbI₃ 无机钙钛矿太阳能电池的效率和稳定性的有效方法.

参考文献

- [1] Yang S, Fu W, Zhang Z, Chen H, Li C Z 2017 *J. Mater. Chem. A* **5** 11462
- [2] Chen Y L, Tang Y W, Chen P R, Zhang L, Liu Q, Zhao Y, Huang Q, Zhang X D 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 138401 (in Chinese) [陈永亮, 唐亚文, 陈沛润, 张力, 刘琪, 赵颖, 黄茜, 张晓丹 2020 物理学报 **69** 138401]
- [3] Wang Z, Zeng L X, Zhang C L, Lu Y L, Qiu S D, Wang C, Liu C, Pan L J, Wu S H, Hu J L, Liang G X, Fan P, Egelhaaf H J, Brabec C J, Guo F, Mai Y H 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2001240
- [4] Li S H, Li H T, Jiang Y X, Tu L M, Li W B, Pan L, Yang S E, Chen Y S 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 158801 (in Chinese) [李少华, 李海涛, 江亚晓, 涂丽敏, 李文标, 潘玲, 杨仕娥, 陈永生 2018 物理学报 **67** 158801]
- [5] Chang R G, Yan Y T, Zhang J Y, Zhu Z L, Gu J H 2020 *Thin Solid Films* **712** 138279
- [6] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T 2009 *J. Am. Chem. Soc.* **131** 6050
- [7] Best research-cell efficiencies <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> [2020-11-1]
- [8] Wang F, Geng W, Zhou Y, Fang H H, Tong C J, Antonietta L M, Liu L M, Zhao N 2016 *Adv. Mater.* **28** 9986
- [9] Jiang J X, Wang Q, Jin Z W, Zhang X S, Lei J B, Hai J, Zhang Z G, Li Y f, L iu, S Z 2018 *Adv. Energy Mater.* **8** 1701757
- [10] Huang H, Yuan H F, Jansse K P F, Solís-Fernández G, Wang Y, Tan C Y X, Jonckheere D, Debroye E, Long J L, Hendrix J, Hofkens J, Steele J A, Roefsaers M B J 2018 *ACS Energy Lett.* **3** 755
- [11] Li Z Z, Zhou F G, Wang Q, Ding L M, Jin Z W 2020 *Nano Energy* **71** 104634
- [12] Brennan M C, Draguta S, Kamat P V, Kuno M 2017 *ACS Energy Lett.* **3** 204
- [13] Eperon G E, Paterno'Giuseppe M, Sutton R J, Zampetti A, Haghighirad A, Cacialli F, Snaith H 2015 *J. Mater. Chem. A* **3** 19688
- [14] Luo P, Xia W, Zhou S W, Sun L, Cheng J G, Xu C X, Lu Y W, 2016 *J. Phys. Chem. Lett.* **7** 3603
- [15] Ripolles T S, Nishinaka K, Ogomi Y, Miyata Y, Hayase S 2016 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **144** 532
- [16] Sutton R J, Eperon G E, Miranda L, Parrott E S, Patel J B, Hörantner M T, Johnston M B, Haghighirad A A, Moore D T, Snaith H J 2016 *Adv. Energy Mater.* **6** 1502458
- [17] Haque F, Wright M, Mahmud M A, Yi H M, Wang D, Duan L P, Xu C, Upama M B, Uddin A 2018 *ACS Omega* **3** 11937
- [18] Zhou Y Y, Game O S, Pang S P, Pature N P J 2015 *Phys. Chem. Lett.* **6** 4827
- [19] Liu F, Zhang Y, Ding C 2017 *ACS Nano* **11** 10373
- [20] Straus D B, Kagan C R 2018 *Phys. Chem. Lett.* **9** 1434
- [21] Miyata K, Atallah T L, Zhu X Y 2017 *Sci. Adv.* **3** e1701469
- [22] Li B, Zhang Y, Fu L, Yu T, Zhou S, Zhang L, Yin L 2018 *Nat. Commun.* **9** 1076

Alkali metal iodides and hydroiodic acid additives for phase-stability CsPbI₃ films prepared at low temperature^{*}

Yan Ya-Ting Zhang Jing-Yan Li Bin-Qi Zhu Zhi-Li Gu Jin-Hua[†]

(Key Laboratory of Materials Physics of Ministry of Education, School of Physics and Microelectronics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

(Received 19 November 2020; revised manuscript received 5 January 2021)

Abstract

Inorganic cesium lead triiodide (CsPbI₃) perovskite films show great prospect due to their high thermal stability and ideal band gap energy. To be used as a photovoltaic absorber, the CsPbI₃ must form the black phase (α -CsPbI₃). To prepare high-quality CsPbI₃ films with phase stability in air at low temperatures, alkali metal iodides and hydroiodic acid (HI) additives are added into precursor solution. The results show that the quality and the phase stability of CsPbI₃ with alkali metal iodides and HI additives are obviously improved compared with those with only HI additive. The SEM images show that the CsPbI₃ film with 2.5% KI additive becomes more compact than that without KI additive and has no visible pinholes. As the KI additive increases, pinholes start to appear. From the XRD, it can be seen that the crystallinity of perovskite is improved when KI additive increases to 5.0%, while it starts to decrease with KI additive further increasing. The PL intensity of the CsPbI₃ film with 2.5% KI additive is higher than the others', implying a relatively low non-radiative recombination loss and low defect state in that film. And the CsPbI₃ film with 2.5% KI additive exhibits increased absorption in the visible region, which is beneficial to enhancing the efficiency of perovskite solar cells. Considering the SEM images, crystallinity, PL intensity and light absorption of perovskite, the optimized KI additive is 2.5% in our work. For the CsPbI₃ film with NaI additive, the SEM images show that the films become more compact and have no visible pinholes when NaI additive is 5%. As the NaI additive increases, pinholes appear. The crystallinity of perovskite increases with NaI additive increasing. The PL intensity of the CsPbI₃ film with 5% NaI additive is higher than the others', implying lower defect states in films. And the CsPbI₃ film with 5% NaI additive exhibits the improved absorption in the visible region. Considering the SEM images, crystallinity, PL intensity and light absorption of perovskite, the optimized NaI additive is 5%. Therefore, adding alkali metal iodides and HI is an effective method to further improve the stability and efficiency of CsPbI₃ perovskite solar cells.

Keywords: CsPbI₃ film, alkali metal iodide, HI, stability

PACS: 88.40.H-, 68.55.-a, 81.15.-z

DOI: 10.7498/aps.70.20201950

* Project supported by the Natural Science Foundation of Henan Province, China (Grant No. 162300410254).

† Corresponding author. E-mail: gujinh@zzu.edu.cn