

钙钛矿太阳能电池中S形伏安特性研究

石将建 卫会云 朱立峰 许信 徐余颢 吕松涛 吴会觉 罗艳红 李冬梅 孟庆波

S-shaped current-voltage characteristics in perovskite solar cell

Shi Jiang-Jian Wei Hui-Yun Zhu Li-Feng Xu Xin Xu Yu-Zhuan Lü Song-Tao Wu Hui-Jue
Luo Yan-Hong Li Dong-Mei Meng Qing-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 038402 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.038402

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.038402>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机无机杂化固态太阳能电池的研究进展

Recent progress in research on solid organic/inorganic hybrid solar cells

物理学报.2015, 64(3): 038405 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.038405>

溶剂对钙钛矿薄膜形貌和结晶性的影响研究

Effect of solvent on the perovskite thin film morphology and crystallinity

物理学报.2015, 64(3): 038403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.038403>

平面异质结有机-无机杂化钙钛矿太阳电池研究进展

Recent advances in planar heterojunction organic-inorganic hybrid perovskite solar cells

物理学报.2015, 64(3): 038401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.038401>

胆甾液晶掺杂活性层对有机太阳能电池性能的影响

Efficiency improvement in organic solar cells by doping cholesteric liquid crystal

物理学报.2014, 63(24): 248403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248403>

光伏电池组件隐式、显式单二极管模型准确性对比研究

Accuracy comparison between implicit and explicit single-diode models of photovoltaic cells and modules

物理学报.2014, 63(17): 178401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.178401>

专题: 新型太阳能电池专题

钙钛矿太阳能电池中S形伏安特性研究*

石将建 卫会云 朱立峰 许信 徐余颢 吕松涛 吴会觉
罗艳红 李冬梅 孟庆波†(中国科学院物理研究所, 中科院清洁能源重点实验室, 北京市新能源材料与器件重点实验室,
北京凝聚态国家实验室, 北京 100190)

(2014年10月23日收到; 2014年11月24日收到修改稿)

本文从理论模拟和实验角度研究了钙钛矿太阳能电池的伏安特性, 并着重探讨了由于界面电荷输运受限而产生的S形特征. 理论模拟表明, 当电池界面电荷输运速度逐渐降低时, 出现界面电荷积累, 影响电池输出性能. 实验研究表明, 当电池的背接触, 光阳极等界面电荷输运速度受限时, 即出现S形伏安特性, 降低电池效率. 然而, 由于电子和空穴在界面输运性质方面的差异, 以及电池中可能存在的独特的界面能带结构, 不同界面电荷输运受限而产生的S形伏安曲线又各具特征, 与电池内部实际的电荷分布以及输运方向有关. 本文的研究结果有助于阐明钙钛矿太阳能电池中存在的界面因素, 进而为界面设计和界面优化提供理论依据.

关键词: 钙钛矿太阳能电池, 界面电荷输运, S形伏安特性

PACS: 84.60.Jt, 79.60.Jv, 84.60.Bk, 82.45.Yz

DOI: 10.7498/aps.64.038402

1 引言

对于半导体器件, 电荷产生, 存储以及输运是其基本电学特性, 反映了材料和器件的电荷注入, 扩散, 漂移以及复合等基本性质^[1]. 目前半导体器件的应用主要包括光电转换, 比如太阳能电池、LED 和半导体激光器, 电信号转换, 比如晶体管, 以及光信号转换, 比如光致发光器件. 这些均涉及器件电荷输运的基本特性. 在对其输运充分认识的基础上进行调控是获得高的器件性能的关键, 目前已成功应用于太阳能电池、晶体管以及发光等器件^[1-3]. 因此对器件电荷输运过程的认识和调控具有重要的意义. 为实现该目的, 目前研究中发展出光学和电学等多种测量手段, 能探测器件电荷的瞬态过程, 以及宏观输运等性质. 直流伏安测量就是一种可以有效探测半导体器件输运性质的重要手

段, 在器件电荷输运机制及复合性质等研究中有重要应用^[4].

钙钛矿太阳能电池是近几年发展迅速的光伏器件, 以钙钛矿有机卤化金属(比如 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) 作为吸光材料^[5,6]. 通过在器件结构, 薄膜沉积, 新材料以及界面调控等方面的研究, 目前该电池的光电转换效率已经突破 15%^[7-11], 且能在较低温度下实现柔性器件的制备^[12-15], 因此具备较好的商业应用前景和研究价值. 除了基于空穴传输材料的 p-i-n 电池, 为进一步降低成本和提高器件稳定性, 无空穴传输材料的 pn 型电池^[16,17], 以及廉价的碳材料均被发展并应用于该电池^[18,19], 并获得了较高的光电转换效率. 虽然该电池已经获得了较高的效率, 但实验研究主要集中在改善薄膜沉积条件和开发新材料, 对该器件更本质的电荷输运性质以及影响因素还没有十分清晰的认识和阐述. 而且常用于半导体器件和薄膜太阳能电池研究的伏安

* 北京市科委项目 (批准号: Z131100006013003)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB932903) 和国家自然科学基金 (批准号: 51372270, 51372272, 11474333, 21173260, 91233202, 91433205, 51421002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qbmeng@iphy.ac.cn

分析方法也没有在该电池的研究中发挥应有的作用. 对电池复合的电学研究依然停留在依赖于交流阻抗谱的定性角度. 在半导体异质结中描述电荷运输的关键物理量, 比如本征载流子浓度, 掺杂浓度, 耗尽势垒等还没有得到系统可靠的研究. 这对进一步从理论角度出发, 研究器件工作机理, 改善器件电荷运输, 是不利的. 因此有必要从理论和实验的角度对该电池的电荷运输性质进行更系统的研究.

本文, 我们将探讨影响钙钛矿太阳能电池电荷运输的因素, 并从理论和实验的角度研究电荷运输受限而导致的S形伏安特性. 通过理论模拟发现, 当界面电荷运输速度降低时, 电池的实际输出电流将逐渐下降, 并出现S形的伏安特性, 电池的短路电流以及填充因子等也会明显降低. 在理论上, 我们从实验角度构造受限的界面电荷运输, 器件均出现了S形的伏安特性曲线. 该研究的意义在于阐述影响电池电荷运输和器件性能的物理和器件参数, 为从实验角度设计合理的器件结构, 改善器件性能提供理论指导. 同时本文也进一步凸显了伏安分析对于研究器件电荷运输的重要性和普适性.

2 理论模型与实验

为研究电荷运输对电池伏安特性和性能的影响, 结合钙钛矿太阳能电池的实际结构, 本文构建了光照条件下多界面电荷运输的物理模型, 如图1所示. 该模型主要包括恒定的光生电流 I_L , 以及分别表征电荷复合和界面电荷运输的二极管 D_1 和 D_2 , 且二极管的电荷运输均可用 Shockley 方程描述, 即 $I = I_0[\exp(eV/kT) - 1]$ [1]. 对该模型的模拟可以得到其光照下的伏安特性, 并能得到电荷运输对器件伏安特性及其性能的影响.

实验方面, 我们通过引入界面势垒层分别改变光生电荷分离界面, 光生电荷收集界面, 背接触界面的电荷运输, 进而研究其伏安特性, 并获得了不同参量对器件性能的影响. 钙钛矿太阳能电池的制备过程主要包括: 1) 利用旋涂方法, 在 F: SnO₂ (FTO) 导电玻璃上分别沉积 TiO₂ 致密和多孔层; 2) 利用两步沉积法, 在多孔层上沉积钙钛矿 CH₃NH₃PbI₃ 光吸收层; 3) 利用旋涂方法, 在吸收层上沉积有机空穴传输层 (HTM); 4) 在空穴传输

层上热蒸镀 Au 电极. TiO₂ 致密层, 多孔层厚度均可调, 以改变界面电荷运输性能.

3 结果与讨论

3.1 S形伏安特性的理论模拟和分析

图1(a)给出了钙钛矿太阳能电池的基本结构, 其中带隙为 1.6 eV 的钙钛矿 CH₃NH₃PbI₃ 用于产生光生载流子, 光生电子在 TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ 界面被抽取, 经多孔 TiO₂, 最后被 FTO 收集, 流经外电路, 最终到达金属背电极. 光生空穴在 CH₃NH₃PbI₃/HTM 界面被抽取, 经由 HTM 与电子复合, 构成电池回路. 在该过程中, 电荷运输主要发生在各薄层以及界面. FTO, 多孔 TiO₂, CH₃NH₃PbI₃, HTM 均被证明具备较好的电荷传输能力 [20], 因此在该电池中可能影响电荷运输的因素主要集中在界面处. 为研究界面电荷运输对电池性能的影响, 我们拓展了传统的理想单异质结模型, 将界面处的电荷运输量化为等效电路中的二极管, 如图1(b)所示, 以模拟电池工作状态. 因此, 其电荷运输方程可以写为

$$\begin{aligned} J_{ph} &= J_1 - J_2 \left[\exp\left(\frac{e(V + \eta)}{kT}\right) - 1 \right], \\ J_{D_2} &= J_0 \left[\exp\left(\frac{e\eta}{kT}\right) - 1 \right], \\ J_{ph} &= J_{D_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 J_{ph} 表示光阳极电流密度, J_{D_2} 表示某界面电流密度, J_1 为光生电流密度, J_2 和 J_0 分别为二极管

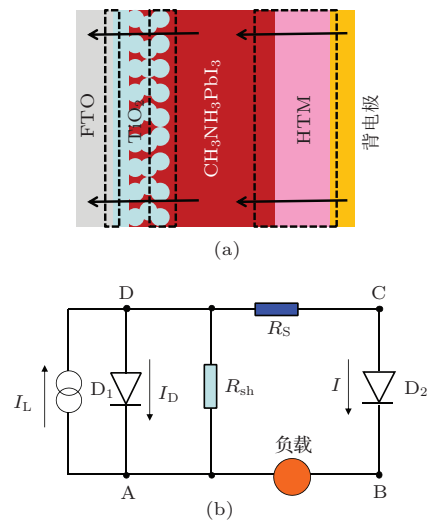


图1 钙钛矿太阳能电池结构(a)和简化的等效电路(b)示意图

D_1 和 D_2 的饱和电流密度, V 为电池输出电压, η 为界面分压. 为保证电荷守恒, $J_{ph} = J_{D_2}$. 求解该方程, 可得到电池输出光电流与光电压的关系, 即

$$J = J_0 \left\{ \frac{J_0 + J_1 + J_2}{J_0 + J_2 \exp[eV/(k_B T)]} - 1 \right\}. \quad (2)$$

由(2)式可知, 除了传统的单异质结参数, 表征界面传输速度的参量 J_0 也会显著影响电池的输出性能. 为清晰看出 J_0 的影响, 图 2(a) 和 (b) 分别给出了不同 J_0 时电池的伏安特性曲线, 和电池短路电流 (J_{SC}) 以及填充因子 (FF) 对 J_0 的依赖关系. 如图 2(a) 所示, 当 J_0 较大时, 电池的伏安曲线为典型的高效太阳能电池的输出曲线. 当 J_0 逐渐减小, 电池伏安曲线在高电压区出现下降现象, 并开始出现 S 形曲线, 电池的输出性能明显降低. 由图 2(b)

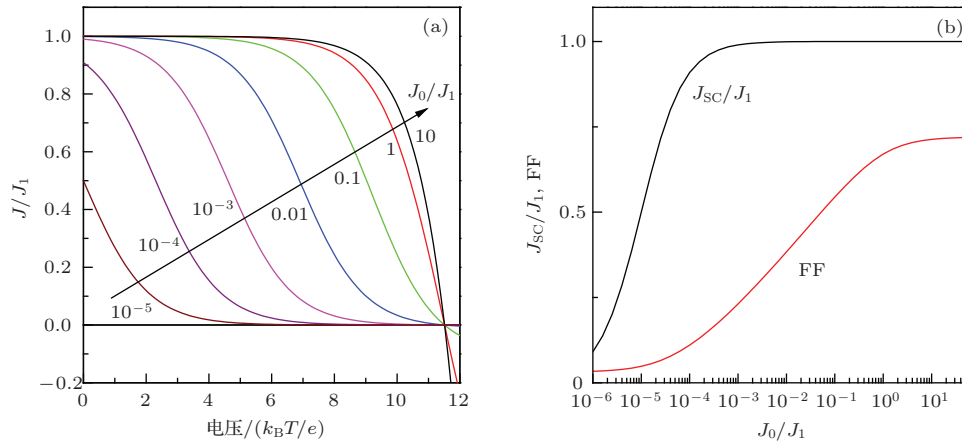


图 2 (a) 太阳能电池中 S 形曲线模拟结果和 (b) 界面电荷传输对电池短路电流和填充因子的影响

3.2 pn 型钙钛矿太阳能电池中的 S 形伏安特性

图 3 给出了无空穴传输材料 pn 型钙钛矿电池中由于背接触区的电荷传输受限而出现的 S 形伏安曲线. 实验中我们发现, 在无空穴传输材料钙钛矿电池中经常会出现如图 3(a) 中黑色曲线所示的伏安曲线. 该曲线在 400 到 800 mV 间出现弯曲的 S 形特征, 但电压进一步升高以致电流反向时, 该 S 形特征又消失了. 在同样实验条件下, 如果增加 HTM 层, 这样的 S 形特征则会消失, 表现为正常的电池输出曲线. 结合薄膜形貌和瞬态荧光测量, 该 S 形特征曲线的出现主要归因于该电池工作时较慢的背表面空穴抽取, 使得背表面出现电荷积累. 但不同于图 2(a), 该电池在电流反向后并未出现传输受限特征. 因此该电池出现的 S 形特征, 主要是光

可知, 电池的 J_{SC} 和 FF 均会随着 J_0 的减小呈现单调下降趋势, 进而降低电池输出性能. 综上, 电池伏安特性可以反映电池的电荷输运状态, S 形曲线的出现反映了电池中存在受限的界面电荷输运.

J_0 影响电池伏安特性的本质原因在于, 受限的界面输运使得部分自由电荷出现积累, 而积累的电荷将产生电场, 进一步阻止光生电荷的抽取和收集, 因而降低电池的输出性能 [21,22]. 这样的电荷积累可能会增强界面复合, 以致进一步降低电池性能 [2]. 所以保证电池界面电荷的顺利传输是保证电池性能的关键. 需要指出的是, 图 1(a) 给出的是简化的界面电荷输运模型. 在实际器件中, 这样的界面电荷输运受限可能只是单向的. 比如由于能带失配, 电子和空穴传输的受限程度则显著不同.

生载流子在低的界面输运速度下出现的积累. 而电流反向后, 该积累将消失, 其完整特性可通过对电池载流子分布的计算进行描述 [21]. 值得指出的, 该 S 形曲线特征即反映了界面对电子和空穴输运限制的不同.

图 3(b) 给出了无空穴传输材料钙钛矿电池中出现的另一种 S 形伏安特性. 该 S 形特征的出现主要由于在光吸收层与背电极间沉积了一定厚度的绝缘层. 实验发现, 当该绝缘层厚度很薄时, 电池的性能得到显著提升. 但当该绝缘层厚度进一步增加时, 出现了显著的 S 形特征. 当电流反向后, 该电池依然体现出电荷输运受限特征, 与图 2(a) 的模拟结果一致. 因此该绝缘层同等程度地阻止了背接触界面的电子和空穴输运, 降低了电池的整体输运性能. 该结论也得到了电池电荷输运阻抗测量结果的确认.

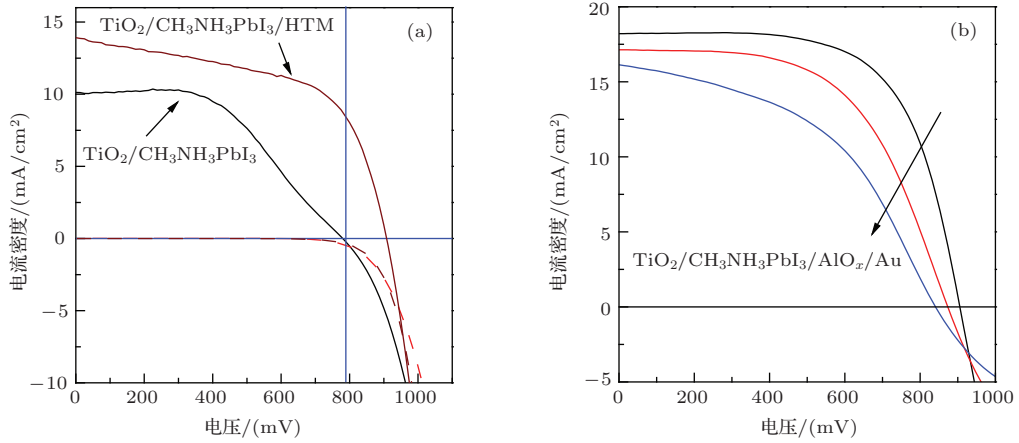


图3 无空穴传输材料pn型钙钛矿电池中出现的S形状安曲线, 由于(a)较慢的背表面多子复合速度和(b)受限的背接触电子运输速度

对于钙钛矿太阳能电池, 吸光材料的半导体性质尚未得到系统的研究. 当其载流子浓度很高时, 其费米能级将可能低于Au的费米能级^[23], 因此在背接触区域可能会出现影响电荷运输的势垒, 以致在光照条件下出现电荷的积累. 对于液相沉积的钙钛矿 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜, 其形貌依然存在一定的不可控性, 可能导致与Au较差的接触, 由此也会出现电荷传输的受限^[24]. 故, 对于无空穴传输材料钙钛矿太阳能电池, 背接触的设计和优化是保证电荷运输, 提高电池性能的关键.

3.3 p-i-n型钙钛矿太阳能电池中的S形状伏安特性

在保证背接触区域电荷运输时, 该电池依然可能存在电荷运输受限因素, 进而出现S形状伏安特性. 图4给出了基于HTM的p-i-n型钙钛矿电池中出现的S形状伏安特性曲线. 如图4(a)所示, 当 TiO_2 致密层厚度从5 nm增加到15 nm, 电池性能显著

提高, 归因于一定厚度的致密层抑制了电池前表面的空穴复合^[3]. 然而, TiO_2 致密层厚度的进一步增加将导致S形状伏安特征的出现. 且与图2(a)类似, 该特征在电流反向后依然保持, 较好地满足图1(b)所示的电荷运输模型. 故, 虽然电池前表面的空穴复合可以通过增加 TiO_2 致密层的厚度而得到有效抑制, 但该界面的电荷运输和收集速率也会被显著降低, 从而导致界面电荷积累.

瞬态吸收光谱的研究发现, TiO_2 与 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{-PbI}_3$ 界面存在的二相 PbI_2 会降低光生电子的抽取速率^[25]. 而目前常用的吸收层沉积方法很可能在多孔结构中产生界面 PbI_2 层. 因而, 在光照工作情况下, 该电池也可能在多孔 $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 界面产生电荷积累. 由于吸收层材料沉积的实验条件, 多孔膜较厚时, 界面二相 PbI_2 存在的概率更大. 实验中, 当 TiO_2 多孔膜厚度为200 nm时, 电池则表现出完美的二极管曲线, 正扫效率达到15.5%. 而

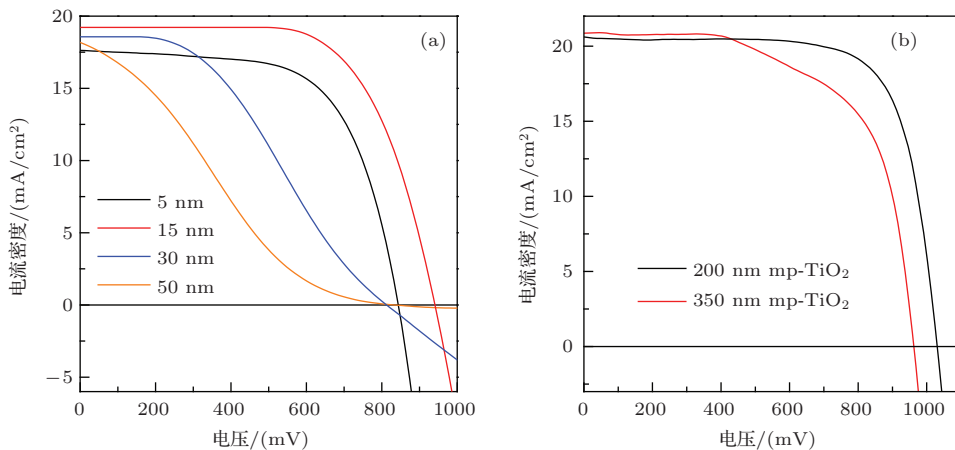


图4 p-i-n钙钛矿电池中出现的S形状伏安曲线, 由于(a)受限的 TiO_2/FTO 界面和(b) $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$ 界面电荷运输

多孔膜厚度为 350 nm 时, 电池出现了 S 形伏安特性, 如图 4(b) 所示. 然而该 S 形特征却不同于以上讨论的各种情形, 只出现在了较小的电压范围内, 可能与 $\text{TiO}_2/\text{PbI}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 界面独特的能带结构有关. 因此, 对于钙钛矿太阳能电池, 光阳极结构中的电荷输运也会显著影响电池性能. 精确控制界面层厚度, 消除界面势垒及二相, 对于提高电池效率具有重要意义.

表 1 不同电池条件下拟合得到的 J_0/J_1 参数值

电池条件	pn 结背表面	AlO_x 界面层	50 nm 底层
J_0/J_1	3×10^{-3}	7.5×10^{-3}	4×10^{-5}

表 1 给出了不同电池条件下拟合得到的 J_0/J_1 参数值. 可见, 当电池界面电荷输运受限时, 会出现较为明显的 S 形伏安特性, 且其特征随着 J_0/J_1 的减小而增强, 与上述的理论和实验讨论一致.

4 结 论

本文从理论模拟和实验角度研究了钙钛矿太阳能电池的伏安特性, 并着重探讨了由于界面电荷输运受限而产生的 S 形特征. 理论模拟表明, 当电池界面电荷输运速度逐渐降低时, 出现界面电荷积累, 影响电池输出性能. 实验研究表明, 当电池的后接触, 光阳极等界面电荷输运速度受限时, 即出现 S 形伏安特性, 降低电池效率. 然而, 由于电子和空穴在界面输运性质方面的差异, 以及电池中可能存在的独特的界面能带结构, 不同界面电荷输运受限而产生的 S 形伏安曲线又各具特征, 与电池内部实际的电荷分布以及输运方向有关. 文本的研究结果有助于阐明钙钛矿太阳能电池中存在的电荷输运的界面因素, 进而为界面设计和界面优化提供理论依据.

参考文献

[1] Sze S M, Kwok K Ng 2006 *Physics of Semiconductor Devices* (New York: John Wiley & Sons, Ltd)

- [2] Jiang J P, Sun C C 2010 *Heterojunction Principles and Devices* (Beijing: Publishing house of electronics industry) (in Chinese) [江剑平孙成城 2010 异质结原理与器件 (北京: 电子工业出版社)]
- [3] Luque A, Hegedus S 2011 *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (UK: John Wiley & Sons, Ltd)
- [4] Steven H, Shafarman W N 2004 *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **12** 155
- [5] Kojima A, Toshima K, Shirai Y, Miyasaka T 2009 *J. Am. Chem. Soc.* **131** 6050
- [6] Kim H S, Lee C R, Im J H, Lee K B, Moehl T, Marchioro A, Moon S J, Baker R H, Yum J H, Moser J E, Grätzel M, Park N G 2012 *Sci. Rep.* **2** 591
- [7] Burschka J, Pellet N, Moon S J, Baker R H, Gao P, Nazeeruddin M K, Grätzel M 2013 *Nature* **499** 316
- [8] Liu M, Johnston B, Snaith H J 2013 *Nature* **501** 395
- [9] Zhou H, Chen Q, Li G, Luo S, Song T, Duan H S, Hong Z, You J, Liu Y, Yang Y 2014 *Science* **345** 542
- [10] Xiao Z, Bi C, Shao Y, Dong Q, Wang Q, Yuan Y, Wang C, Gao Y, Huang J 2014 *Energy Environ. Sci.* **7** 2619
- [11] Im J H, Jang I H, Pellet N, Grätzel M, Park N G 2014 *Nat. Nanotech.* **9** 927
- [12] Jeon N J, Noh J H, Kim Y C, Yang W S, Ryu S, Seok S I 2014 *Nat. Mater.* **13** 897
- [13] You J, Hong Z, Yang Y, Chen Q, Cai M, Song T, Chen C, Lu S, Liu Y, Zhou H, Yang Y 2014 *ACS Nano* **8** 1674
- [14] Docampo P, Ball J M, Daewich M, Eperon G E, Snaith H J 2013 *Nat. Commun.* **4** 2761
- [15] Liu D, Kelly T L 2014 *Nat. Photon.* **8** 133
- [16] Laban W A, Etgar L 2013 *Energy Environ. Sci.* **6** 3249
- [17] Shi J, Dong J, Lv S, Xu Y, Zhu L, Xiao J, Xu X, Wu H, Li D, Luo Y, Meng Q 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 063901
- [18] Mei A, Li X, Liu L, Ku Z, Liu T, Rong Y, Xu M, Hu M, Chen J, Yang Y, Grätzel M, Han H 2014 *Science* **345** 295
- [19] Wei Z, Chen H, Yan K, Yang S H 2014 *Angew. Chem. Int. Ed.* DOI: 10.1002/anie.201408638
- [20] Stranks S D, Eperon G E, Grancini G, Menelaou C, Alcocer M J P, Leijtens T, Herz L M, Petrozza A, Snaith H J 2013 *Science* **342** 341
- [21] Wagenpfahl A, Rauh D, Binder M, Deibel C, Dyakonov V 2010 *Phys. Rev. B* **82** 115306
- [22] Gupta D, Bag M, Narayan K S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 093301
- [23] Shi J, Luo Y, Wei H, Luo J, Dong J, Lv S, Xiao J, Xu Y, Zhu L, Xu X, Wu H, Li D, Meng Q 2014 *ACS Appl. Mater. Interf.* **6** 9711
- [24] Gupta D, Mukhopadhyay S, Narayan K S 2010 *Solar Energy Mater. Solar Cells* **94** 1309
- [25] Wang L, McCleese C, Kovalsky A, Zhao Y, Burda C 2014 *J. Am. Chem. Soc.* **136** 12205

SPECIAL ISSUE—New generation solar cell

S-shaped current-voltage characteristics in perovskite solar cell*

Shi Jiang-Jian Wei Hui-Yun Zhu Li-Feng Xu Xin Xu Yu-Zhuan Lü Song-Tao
Wu Hui-Jue Luo Yan-Hong Li Dong-Mei Meng Qing-Bo[†]

(Key Laboratory for Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences; Beijing Key Laboratory for New Energy Materials and Devices; Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 23 October 2014; revised manuscript received 24 November 2014)

Abstract

Analysis of the DC current-voltage (I - V) characteristics is an effective approach to investigate the charge transport properties in a solar cell. The perovskite solar cell attracted wide research interest in the past two years due to their outstanding photovoltaic capacity. However, the charge transport characteristics and working principles of this kind of cells have not been clearly clarified. In this work, the I - V characteristics of the perovskite solar cell have been investigated from the experimental and theoretical perspective views. Moreover, the S-shaped I - V feature coming from the limitation of interfacial charge transport was focused on. With a series connected diode model, the I - V characteristics of the solar cell are investigated and simulated. It is found that the charge accumulation appears gradually when the interfacial charge transport velocity is decreased, lowering the output of the cell. When the interfacial charge transport decreases gradually, the short-circuit current density and the fill factor of the cell also decrease obviously. In experiments, limitations of charge transport at the front and back contacts of the cell have been designed, successfully producing varied S-shaped I - V features. It is found that both in the hole transport material-free and in the p-i-n perovskite solar cells, the S-shaped I - V characteristics can appear. Moreover, the origins of these features in various experimental conditions have also been discussed, which can be the energy barriers or large charge transport resistances in the cell. These energy barriers and resistances will lower the charge transport velocity and may cause charge accumulation, thus leading to the appearance of the S-shaped features. Meanwhile, the emerging S-shaped I - V curves all have their own features, which may be due to the specific interfacial energy band structures. Thus, to promote the cell performance, the charge transport and interface energy barrier should be attached importance to and carefully designed. This work directly shows the interface factors that can significantly affect the cell performance, and gives a theoretical guide in cell design. By considering these limiting factors, the cell fabrication has been carefully designed with the control on the thickness of the mesoporous layer and the perovskite absorber film deposition, and a forward-swept efficiency of 15.5% can be achieved without any modification of the cell.

Keywords: perovskite solar cell, interfacial charge transport, S-shaped current-voltage characteristics

PACS: 84.60.Jt, 79.60.Jv, 84.60.Bk, 82.45.Yz

DOI: 10.7498/aps.64.038402

* Project supported by the Beijing Science and Technology Committee (Grant No. Z131100006013003), the National Key Basic Research Program (Grant No. 2012CB932903), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51372270, 51372272, 11474333, 21173260, 91233202, 91433205, 51421002).

[†] Corresponding author. E-mail: qbmeng@iphy.ac.cn