

梯度带隙钙钛矿太阳能电池的设计

汪涛, 肖贵将, 易茂祥
(合肥工业大学, 微电子学院, 合肥, 230009)

5

10

15

摘要: 本文采用 TCAD Atlas 对 CuSCN/perovskite/ZnO 结构的三种钙钛矿带隙分布进行仿真研究, 即均匀带隙 (UB), 前梯度带隙 (FGB) 和双梯度带隙 (DGB)。结果表明, FGB 在 CuSCN/perovskite 界面形成额外的辅助电子电场, 改善了开路电压, 并提高电池对界面复合速率的缺陷容忍性。在 $E_{gf}=1.6\text{ eV}$, $L_f=50\text{ nm}$ 时, FGB 获得最大效率 23.93%。同时, DGB 可拓宽光谱吸收范围, 降低 perovskite/ZnO 界面的能带偏移, 提高了短路电流和填充因子。在 $E_{gb}=1.4\text{ eV}$, $L_b=400\text{ nm}$ 时, DGB 获得最佳效率 25.47%。相比于 UB (22.63%), DGB 的效率增大了 2.84%。此外, 当界面复合速率从 100 cm/s 增加到 100000 cm/s 时, 与 UB 相比, DGB 降低 83% 的缺陷灵敏度。

关键词: 梯度带隙; 钙钛矿太阳能电池; TCAD Atlas; CuSCN/perovskite/ZnO。

中图分类号: TM914

Design of gradient band gap perovskite solar cell

Wang Tao, Xiao Guijiang, Yi Maoxiang

(Hefei University of Technology, School of Microelectronics, Hefei, 230009)

20

25

30

Abstract: In this paper, the distribution of three perovskite band gaps of CuSCN/perovskite/ZnO structure is simulated by TCAD Atlas, i.e. uniform band gap (UB), front gradient band gap (FGB) and double gradient band gap (DGB). The results show that FGB forms an auxiliary electronic electric field at the CuSCN/perovskite interface, which improves the open circuit voltage and enhances the robustness of the cell to the interface recombination rate. When $E_{gf}=1.6\text{ eV}$ and $L_f=50\text{ nm}$, FGB achieves a maximum efficiency of 23.93%. At the same time, DGB can broaden the spectral absorption range, reduce the energy band shift of the perovskite/ZnO interface, and enhance the short-circuit current and fill factor. DGB obtains an efficiency of 25.47% when $E_{gb}=1.4\text{ eV}$ and $L_b=400\text{ nm}$, an increase of 1.98%. Compared with UB (22.63%), DGB increased the efficiency by 2.84%. In addition, DGB reduces defect sensitivity by 83% compared with UB when the interfacial recombination rate increases from 100 cm/s to 100000 cm/s .

Key words: Gradient band gap; perovskite solar cell; TCAD Atlas; CuSCN/perovskite/ZnO

0 引言

35

40

从液态电解质结构发展到高效全固态多孔和平面异质结结构, 有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池 (PSC) 的能量转换效率 (PCE) 已从 3.8% 跨越到 24.2%, 取得了举世瞩目的成就 [1-3]。平面 PSC 主要由三部分组成: 钙钛矿吸收材料, 电子传输材料 (ETM) 和空穴传输材料 (HTM)。CH₃NH₃PbI₃ 是 PSC 最常用的吸收材料。然而, CH₃NH₃PbI₃ 与常用 ETM 和 HTM 都存在明显的能带失配, 影响光生载流子在异质结界面的有效分离和提取, 增加电子-空穴对的复合损耗和电压损耗 [3,4]。例如: CH₃NH₃PbI₃ 和 TiO₂, ZnO, SnO₂ 分别存在 0.1 eV, 0.2 eV, 0.2 eV 的导带偏移。CH₃NH₃PbI₃ 和 Spiro-OMETAD, CuSCN, NiO, CuI, PEDOT:PSS 分别存在 0.05 eV, 0.15 eV, 0.19 eV, 0.25 eV, 0.35 eV 的价带偏移 [3-5]。同时, CH₃NH₃PbI₃

基金项目: 中国博士后科学基金 (JD2020JGPY0010)

作者简介: 汪涛, 男, 副教授, 硕导, 太阳能电池设计. E-mail: taowang@hfut.edu.cn

材料的光谱吸收仅限于可见光，减少光生载流子的产生。

通过调控 Cs/FA/MA、Pb/Sn 或 I/Br/Cl 的原子比例，钙钛矿(ABX_3)的带隙可被调节在 1.17-4.09eV 范围内^[6-8]。为降低能带偏移和增强光谱吸收，梯度带隙 PSC 被提出。2017 年，Fu 等人采用离子交换法制备梯度带隙钙钛矿($MAPb(I_{1-x}Br_x)_3$)，通过 Br 和 I 离子交换不仅降低能带偏移，而且加速载流子漂移和扩散，减少传输过程的复合损耗，获得 16.8% 的 PCE^[9]。同时，Ergen 等人采用旋涂法制备梯度带隙钙钛矿($MASnI_3$ 和 $MAPbI_{3-x}Br_x$)，低带隙 $MASnI_3$ 拓宽近红外光的吸收，PCE 增加到 18.4%^[10]，但效率仍然远低于单结 PSC 校准效率 24.2%。迄今为止，在平面 PSC 中，关于梯度带隙钙钛矿的带隙分布，结深和界面复合速率的研究极少报道。因此，本文对 PSC 的钙钛矿吸收层提出三种带隙分布：均匀带隙、前梯度带隙和双梯度带隙。其中，CuSCN 和 ZnO 分别作为 HTM 和 ETM。因为 Azri 等人证明了具备良好能带结构和低成本的 CuSCN 是取代 Spiro-OMETAD, PEDOT:PSS, CuI 的理想 HTM^[11]。同时，Azri 也证明了具备高迁移率和低温制备的 ZnO 是取代 TiO_2 , SnO_2 和 PCBM 的最佳 ETM^[11,12]。

因此，本文采用 TCAD atlas 软件对均匀带隙和梯度带隙 PSC 进行数值模拟。首先，改变 Sn 和 Br 在 $MAPb_{1-x}Sn_xI_3$ 和 $MAPb(I_{1-x}Br_x)_3$ 中的比例，均匀带隙对 PSC 的影响被研究。其次，梯度带隙钙钛矿被讨论，包括前梯度带隙和双梯度带隙。最后，深入分析界面复合速率对三种带隙分布 PSC 的影响。

1 结构和模型

CuSCN/perovskite/ZnO PSC 的器件结构如图 1 所示。Perovskite 位于 CuSCN 和 ZnO 之间。ITO 和 Al 分别作为前电极和背电极。钙钛矿三种带隙分布分别为：均匀带隙 (UB)，前梯度带隙 (FGB) 和双梯度带隙 (DGB)。E_g 为带隙宽度；L 为梯度深度。本文，带隙梯度的变化采用线性渐变型。

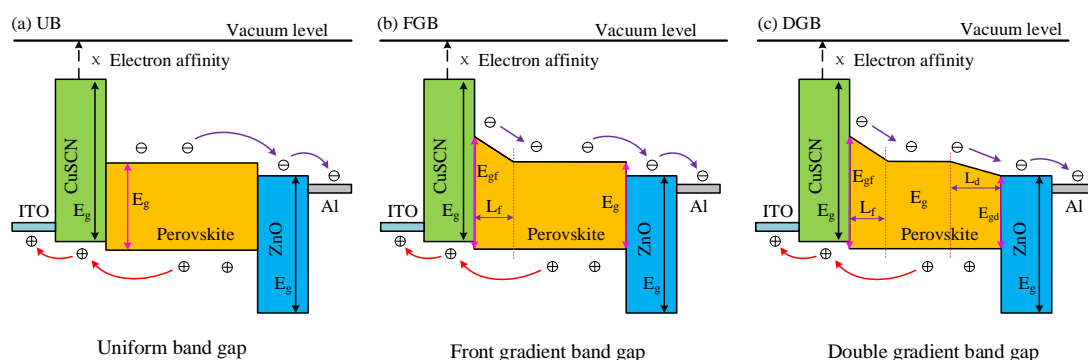


图 1 不同带隙分布下，CuSCN/perovskite/ZnO 的器件结构。(a) UB，(b) FGB，(c) DGB。

表 1 汇总了材料的半导体参数^[5,11,13]。Perovskite 的可变能带由宽带隙渐变 $CH_3NH_3Pb_{1-x}Sn_xI_3$ 和窄带隙渐变 $CH_3NH_3Pb(Br_{1-x}I_x)_3$ 组成。Perovskite 的 E_g 是由导带中的自旋轨道耦合所确定，并通过密度函数理论计算得出^[14]。Perovskite 的电子亲和能取决于 Pb-5d 轨道的位

70 置。根据文献^[6,7], $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{I}_3$ 在 $x=0$ ($x=0.5$) 处的 E_g 和电子亲和能分别是 1.55eV (1.17eV) 和 3.9eV (4.44eV)。 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ 在 $x=1$ 处的 E_g 和电子亲和能分别是 2.3 eV 和 3.1 eV^[14]。在模拟中, Perovskite 的能带参数与 Br 或 Sn 的离子比例假设为线性变化, 函数关系见表 2 和表 3。Shockley-Read-Hall (SRH) 复合, 辐射复合和俄歇复合模型均被采用。界面缺陷对电池性能的影响由界面复合速率代替, 初始为 1000 cm/s。射线追踪模型被用以计算入射光子的反射, 吸收和透射。光照条件 AM 1.5G, 总入射功率密度为 100 mW/cm²。温度为 300 K。

表 1 用于模拟的材料参数

材料	CuSCN	perovskite	ZnO
厚度/nm	50	500	50
介电常数	10.0	6.5	9.0
电子亲和能/eV	1.7	3.1~4.44 (可变)	4.1
禁带宽度/eV	3.6	1.17~2.3 (可变)	3.3
导带状态密度/cm ⁻³	2.2×10^{19}	4.42×10^{17}	4.0×10^{18}
价带状态密度/cm ⁻³	1.8×10^{18}	8.47×10^{18}	1.0×10^{19}
电子迁移率/(cm ² v ⁻¹ s ⁻¹)	100	2.0	100
空穴迁移率/(cm ² v ⁻¹ s ⁻¹)	25	2.0	25
受主浓度/cm ⁻³	1.0×10^{18}	0.0	0.0
施主浓度/cm ⁻³	0.0	1.0×10^{13}	1.0×10^{18}
电子寿命/s	1.0×10^{-5}	2.88×10^{-7}	1.0×10^{-5}
空穴寿命/s	1.0×10^{-6}	2.88×10^{-7}	1.0×10^{-6}

表 2 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{I}_{1-x}\text{Br}_x)_3$ 的能带参数

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{I}_{1-x}\text{Br}_x)_3$	E_g/eV	1.55	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3
	Br/(Br+I)	0	1/15	1/5	1/3	7/15	3/5	11/15	13/15	1
	电子亲和能/eV	3.9	3.85	3.74	3.63	3.53	3.42	3.31	3.2	3.1

表 3 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{I}_3$ 的能带参数

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{I}_3$	E_g/eV	1.55	1.5	1.4	1.3	1.2	1.17
	Sn/(Pb+Sn)	0	0.07	0.2	0.33	0.46	0.5
	电子亲和能/eV	3.9	3.97	4.11	4.26	4.4	4.44

80 2 结果讨论

2.1 均匀带隙钙钛矿

85 电池的光学吸收和光生载流子的电学提取主要由吸收层带隙宽度 E_g 决定。在这部分, UB 对 CuSCN/perovskite/ZnO PSC 的影响被研究, 见图 2 (a)。钙钛矿 E_g 从 1.17 eV 增大到 2.0 eV, 对应于 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{I}_3$ 中 Sn/(Sn+Pb) 从 0.5 降低到 0, 且 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ 中 Br/(Br+I) 从 0 增大到 3/5。随着 E_g 的增加, 开路电压 (V_{oc}) 逐渐增大, 而短路电流 (J_{sc}) 却

线性减小。因为 E_g 的增加会增大电子和空穴准费米能级的偏移，增大异质结内建电场，导致 V_{oc} 增大。然而， E_g 的增加也会减少电池对低能量光子的吸收，降低光生载流子数目，因此 J_{sc} 减少。填充因子 (FF) 主要由器件的串/并联电阻所决定。异质结界面的能带偏移(尖峰或凹口)越大，则产生的接触电阻也越大^[15]。随 E_g 的增加，perovskite/ZnO 界面的导带偏移

90 从-0.3 eV 增大到 0.68 eV，导致 FF 先增大后减小。最后，PCE 在 E_g 为 1.5 eV 时，达到极大值 22.63%。

图 2 (b) 展示外量子效率 (EQE) 随 E_g 的变化趋势。在 E_g 增大时，光谱吸收范围不断蓝移，且蓝移速度逐渐降低。此外，在波长小于 350 nm 时，PSC 展示较小的 EQE。因为宽带隙的 CuSCN (3.6 eV) 捕获了高能光子，引起寄生吸收。尽管 $UB=1.5$ eV 时，PCE 获得

95 22.63%，但光谱吸收范围仅限于可见光。同时，CuSCN/perovskite 界面和 perovskite/ZnO 界面依然有 0.17 eV 和 0.13 eV 的能带失配，影响了光生载流子的提取速率。因此，UB 并不是钙钛矿理想的带隙结构。接下来，在 $UB=1.5$ eV 的基础上，FGB 结构被设计。

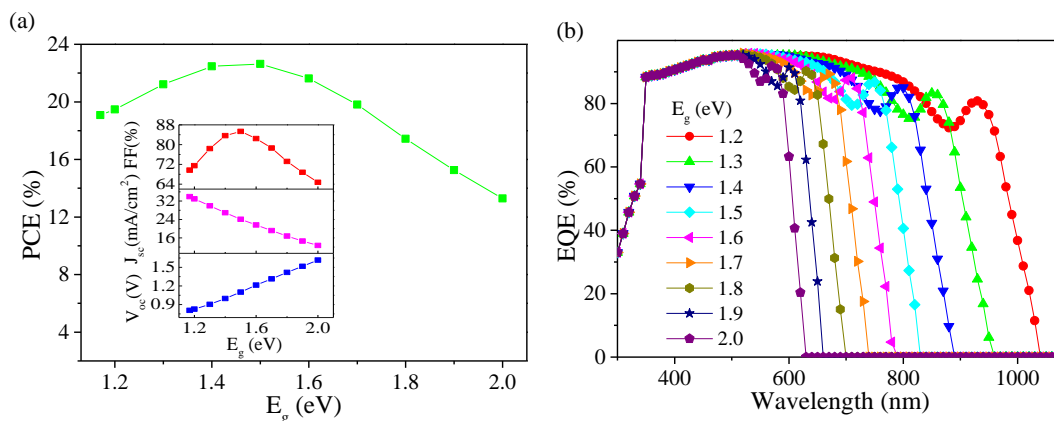


图 2 (a) 均匀 E_g 对 PSC 性能的影响； (b) EQE。

100 2.2 前梯度带隙钙钛矿

2.2.1 前梯度带隙分布

FGB 被定义为带隙沿钙钛矿前表面线性增大，能带分布见图 1 (b)。 E_{gf} 为钙钛矿前表面的带隙宽度， L_f 为梯度深度。图 3 展示当 E_{gf} 为 1.5eV 和 2.3eV 时，PSC 的能带图。 $E_{gf}=1.5$ eV 等效于钙钛矿为 UB。相比于 UB，FGB 的导带能级在钙钛矿前表面上弯，增大了电子准费米能级 (E_m) 和空穴准费米能级 (E_p) 位移差，形成额外的辅助电子电场，局部电压增大。

105 同时，能带向上弯曲也增大了光生电子在导带的电势能，加快扩散速率。

FGB 能带分布对 PSC 性能的影响，如图 4。当 E_{gf} 从 1.5eV 增大到 1.6eV 时， V_{oc} 迅速增大，一旦超过 1.6eV 后， V_{oc} 缓慢增加并趋向饱和。 J_{sc} 和 FF 随 E_{gf} 的增加都明显减小。图 5 (a) 展示在 $L_f=50$ nm， E_{gf} 从 1.5 eV 增大到 2.3 eV 时，PSC 的电场分布和 EQE。显然，随

110 E_{gf} 的增大，钙钛矿顶部的内建电场显著增强，这能加快电子-空穴对在 CuSCN/perovskite 界面的分离和漂移，减少光生载流子的非辐射复合，导致 V_{oc} 增大。此外， $CH_3NH_3Pb(Br_{1-x}I_x)_3$ 的带隙宽度越大，则吸收系数越低^[3]。因此，前梯度带隙的吸收系数降低，捕获光生数目减

115 少。同时， E_{gf} 的增加降低了钙钛矿底部的电场强度，减少长波光子的分离， J_{sc} 减小。图 5 (a) 的 EQE 也证明 PSC 在波长为 650-750 nm 之间的 EQE 随梯度带隙的递增明显降低。波长在 500-750 nm 之间的辐射强度是光谱图中最强的，对光生电流的贡献最大。因此，总 J_{sc} 随 E_{gf} 的增加而减小。

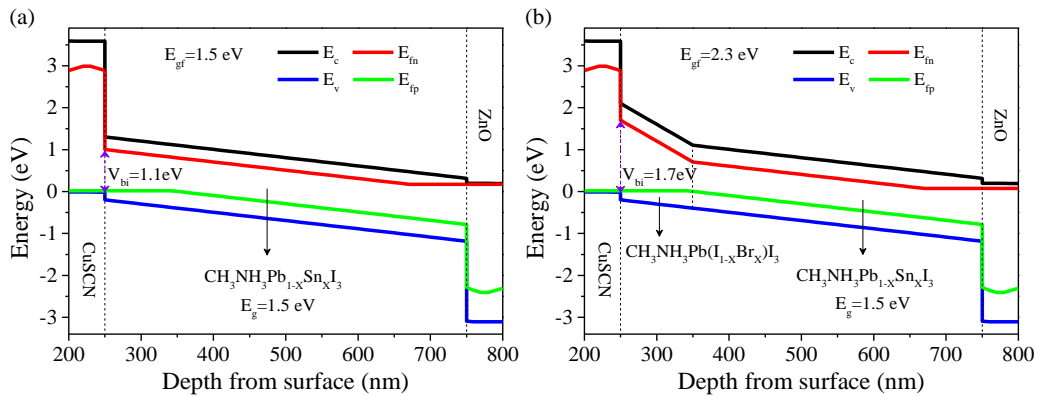


图 3 CuSCN/perovskite/ZnO 的能带图。(a) $E_{gf}=1.5$ eV, (b) $E_{gf}=2.3$ eV。

120 图 5 (b) 展示不同 L_f 时，PSC 的电场分布和 EQE。 L_f 的增大增强了梯度带隙的结深，使更多载流子获得辅助电子电场， V_{oc} 增强。同时，梯度带隙的吸收系数降低也减弱 J_{sc} 。实验表明 FGB 可有效的改善 V_{oc} 和 PCE。在 $E_{gf}=1.6$ eV, $L_f=50$ nm 时，效率达到最大值 23.93%。

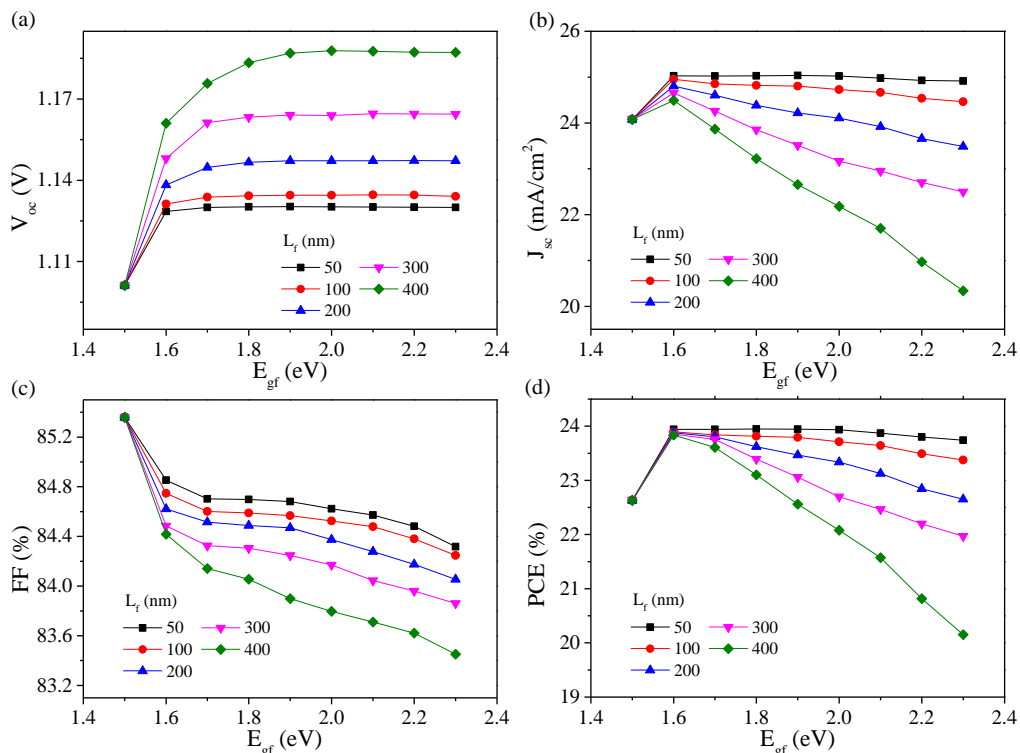
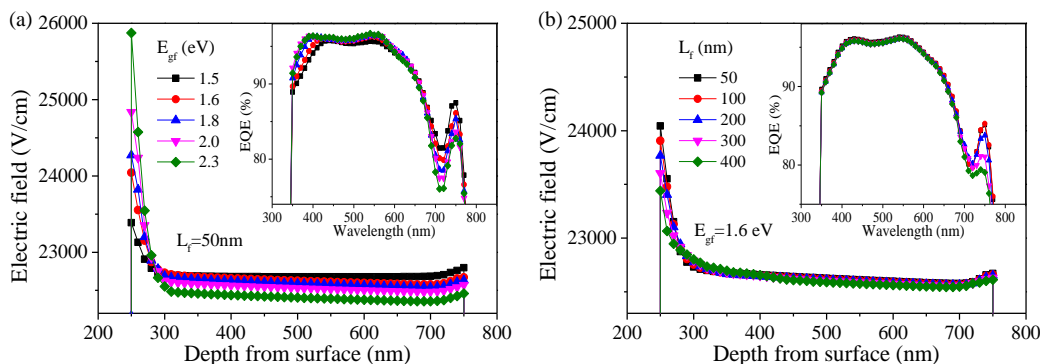


图 4 FGB 对 PSC 的影响，(a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF, (d) PCE。

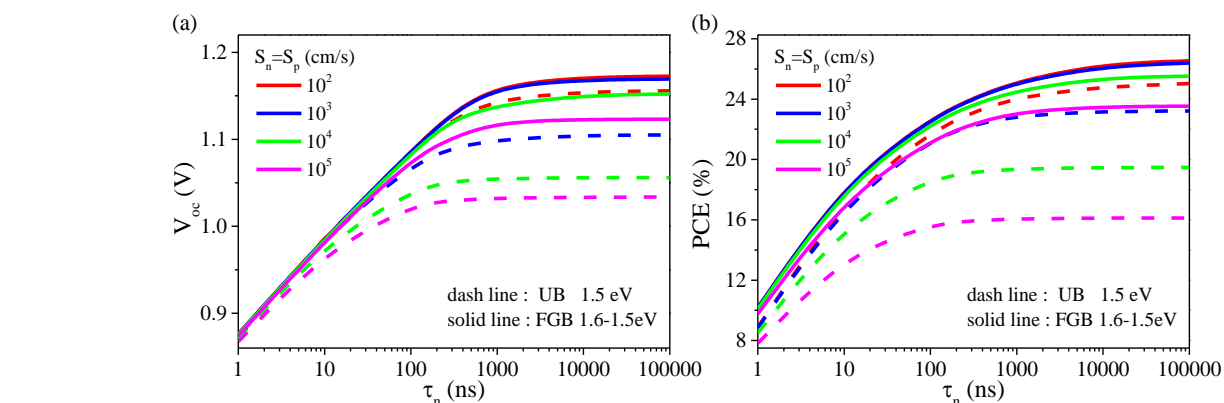


125 图 5 PSC 的电场分布和 EQE。(a) 不同 E_{gf} , (b) 不同 L_f 。

2.2.2 界面复合速率对 FGB 的影响

钙钛矿吸收层、HTM 和 ETM 的旋涂或沉积工艺都将诱导缺陷态的形成。钙钛矿体缺陷可用载流子寿命表示, 即 τ_n 和 τ_p (电子和空穴寿命)。界面缺陷也是影响电池性能的重要机制, 例如材料间的晶格失配, 位错缺陷和晶粒边界的悬挂键。界面缺陷可用载流子复合速率表示, 即 $S_n = S_p$ (电子和空穴复合速率)。模拟时, 假设 $\tau_n = \tau_p$ 和 $S_n = S_p$ 。图 6 展示载流子寿命和界面复合速率对 UB 和 FGB PSC 的影响。

130 结果展示, τ_n 只要超过 300 ns, PSC 的 V_{oc} 和 PCE 都趋向饱和。此外, 相比于 1.5 eV 的 UB, 1.6-1.5 eV 的 FGB 展现了对界面缺陷更强的缺陷容忍性。随 S_n 从 10^2 cm/s 增加到 10^5 cm/s, FGB 的 V_{oc} 仅减少 0.05V, PCE 仅减小 3%, 而 UB 的 V_{oc} 减小 0.13 V, PCE 减小 9%。这归因于 FGB 在 CuSCN/perovskite 界面形成额外的辅助电子电场, 加快了载流子的分离和漂移, 降低缺陷态密度的影响。这类似于界面工程的钝化工艺, 减少异质结界面的晶格缺陷, 降低界面缺陷对载流子的复合损耗。



135 图 6 界面复合速率对 FGB 的影响; (a) V_{oc} , (b) PCE

2.3 双梯度带隙钙钛矿

2.3.1 双梯度带隙分布

为进一步增强 FGB 的 PCE, 调控钙钛矿底部 $CH_3NH_3Pb_{1-x}Sn_xI_3$ 中 Sn/(Sn+Pb)的比例,

145

DGB 结构被设计，能带分布如图 1 (c)。E_{gb} 为钙钛矿后表面的带隙宽度，L_b 为梯度深度。图 7 展示当 E_{gb}=1.17 eV 时，CuSCN/perovskite/ZnO 的能带图。后梯度带隙的导带能级越陡峭，越有利于光生电子在导带传输。然而，1.17eV 的 CH₃NH₃Pb_{1-x}Sn_xI₃ 在 perovskite/ZnO 界面形成导带势垒，阻碍光生载流子的传输。

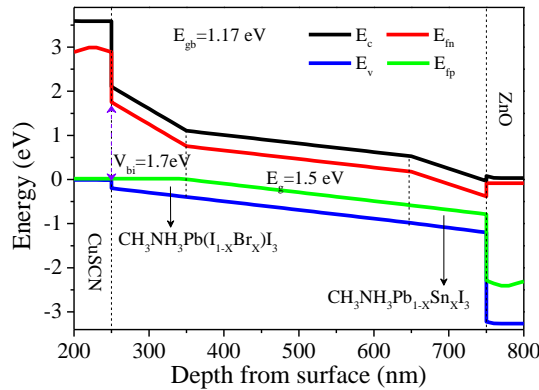


图 7 双梯度带隙时，CuSCN/perovskite/ZnO 的能带图

150

在 FGB 的基础上，DGB 对电池性能的影响被讨论，如图 8。当 E_{gb} 从 1.5 eV 减小到 1.17 eV 时，V_{oc} 逐渐降低，而 J_{sc} 显著增大。因为窄带隙 CH₃NH₃Pb_{1-x}Sn_xI₃ 降低 perovskite/ZnO 界面的内建电场 V_{bi}，因此 V_{oc} 减小，能带图可以证明。同时，带隙宽度变窄可拓宽光谱吸收范围，增加近红外光的吸收，J_{sc} 增大。FF 随 E_{gb} 的变化先增大后减小，这归因于 perovskite/ZnO 界面的 ΔE_c 从 0.13 eV 降低到 -0.34 eV，寄生电阻先减小后增大。PCE 在 E_{gb}=1.4 eV，L_b=400 nm 时达到极大值 25.47%。相比于 FGB，DGB 进一步捕获低能光子，同时降低 perovskite/ZnO 界面能带失配，增大光伏效率。因此，双梯度带隙是更合适的带隙结构。

155

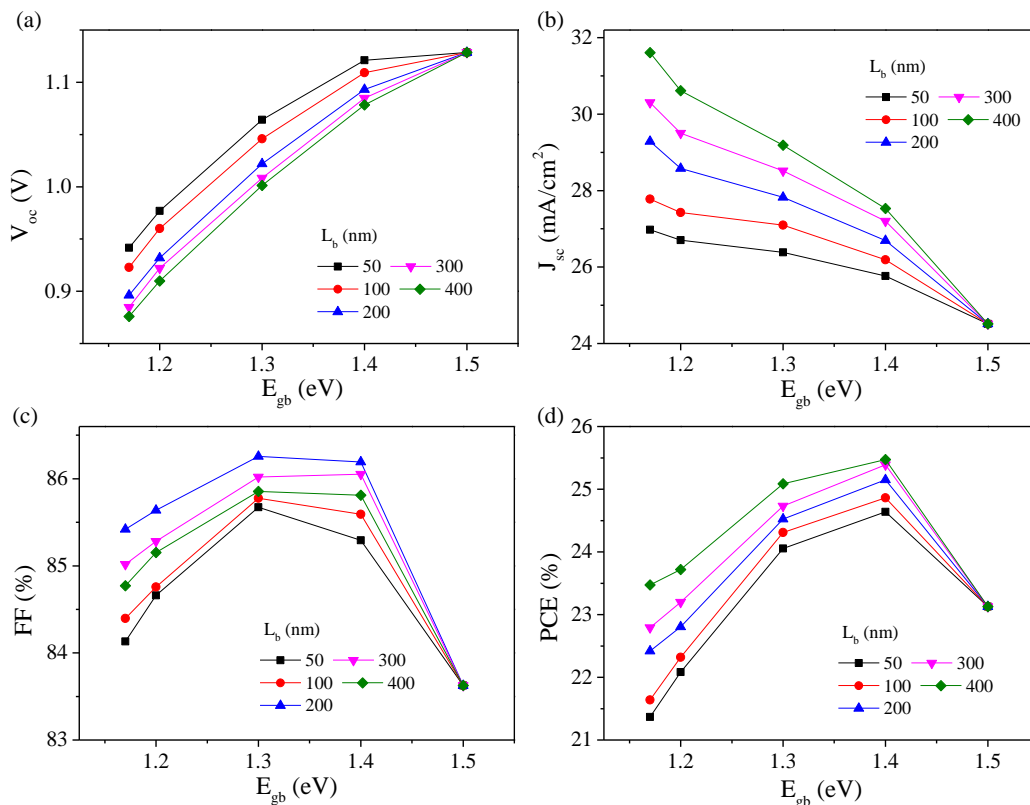
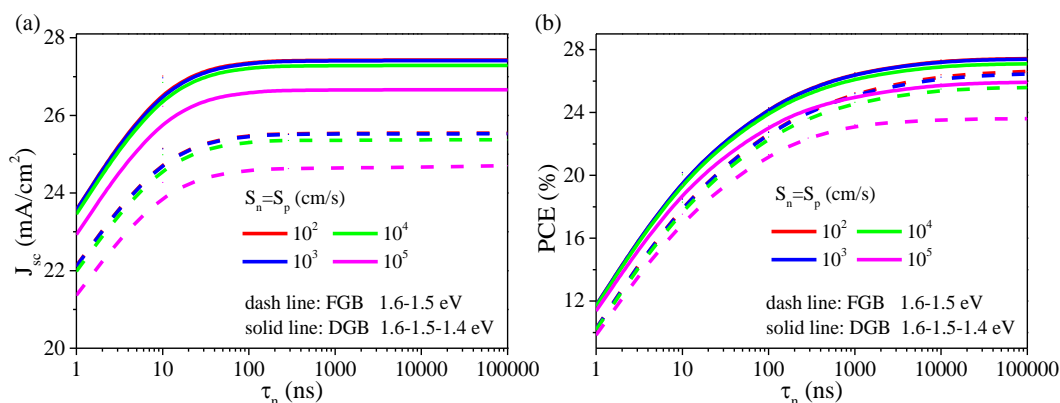


图 8. E_{gb} 和 L_b 对双梯度带隙 PSC 的影响, (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF, (d) PCE。

2.3.2 界面复合速率对 DGB 的影响

载流子寿命和界面复合速率对 DGB 的影响如图 9。相比于 PCE, J_{sc} 对载流子寿命展示更小的灵敏度。载流子寿命一旦超过 30 ns, J_{sc} 则达到饱和。此外, 相比于 UB 和 FGB, DGB 的 PCE 对界面缺陷展示更高的缺陷容忍性。随界面复合速率从 10^2 cm/s 增加到 10^5 cm/s, UB 的 PCE 减小 9%, FGB 的 PCE 减小 3%, 而 DGB 的 PCE 仅减小 1.5%。相比于 UB, DGB 降低 83% 的缺陷灵敏度。这归因于双梯度带隙减少 CuSCN/perovskite 和 perovskite/ZnO 界面的能带失配, 增加电子电势能, 加快载流子的传输。

图 9 界面复合速率对 DGB 的影响; (a) J_{sc} , (b) PCE。

3. 结论

本文利用 TCAD atlas 对 CuSCN/perovskite/ZnO 结构的三种钙钛矿带隙分布进行了仿真研究, 即均匀带隙, 前梯度带隙和双梯度带隙。结果表明, 前梯度带隙可在 CuSCN/perovskite 界面形成辅助电子电场, 改善了势垒区的电场分布, 促进电子-空穴对在 HTL/钙钛矿界面的分离和传输, 降低了电压损耗。双梯度带隙可降低 perovskite/ZnO 的能带偏移, 减少寄生电阻, 增强 FF。同时, 双梯度带隙结构可进一步吸收近红外光, 增加光生电流。

此外, 界面复合速率对三种钙钛矿带隙分布 PSC 的影响也被研究。相比于 UB, FGB 的 V_{oc} 对界面缺陷展示更强的缺陷容忍性, DGB 的 PCE 对界面复合速率展示更强的鲁棒性。随界面复合速率从 10^2 cm/s 增加到 10^5 cm/s, 双梯度带隙的 PCE 仅减小了 1.5%。相比于 UB, DGB 降低了 83% 的缺陷灵敏度, 效率增大了 2.84%。仿真研究可为制备梯度带隙 PSC 提供一定的指导。

[参考文献] (References)

- [1] Kojima A, Teshima K, Shirai Y and Miyasaka T. Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells [J]. J. AM. CHEM. SOC. 2009, 131(1): 6050-6051.
- [2] Green M A, Hishikawa Y, Dunlop E D and Levi D H. Solar cell efficiency tables (version 54)[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2019, 27 (2): 565-575.
- [3] Fu Q, Tang X, Huang B, Hu T, Tan L, Chen L, Chen Y. Recent Progress on the Long-Term Stability of Perovskite

- Solar Cells[J]. Adv Sci, 2018, 5(4):1700387.
- [4] Niu G, Li W, Li J and Wang L. Progress of interface engineering in perovskite solar cells[J]. Science China Materials, 2016, 59(42):728-742.
- 190 [5] Hossain M I, Alharbi F H and Tabet. Copper oxide as inorganic hole transport material for lead halide perovskite based solar cells[J]. Solar Energy, 2015, 120(4):370-380.
- [6] Jung H S and Park N G. Perovskite solar cells: from materials to devices[J]. Small, 2015, 11 (37):10-25.
- [7] Even J, Pedesseau L, Jancu J M and Katan C. Importance of Spin-Orbit Coupling in Hybrid Organic/Inorganic Perovskites for Photovoltaic Applications [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2013, 4 (3) 2999-3005.
- 195 [8] Wang G, Wang D and Shi X. Electronic structure and optical properties of Cs₂AX₂X₄ (A=Ge, Sn, Pb; X, X'=Cl, Br, I) [J]. AIP Advances, 2015, 5 (75):263-267.
- [9] Fu F, Pisoni S, Weiss T P, Feurer T, Wachlerlin A, Fuchs P, Nishiwaki S, Zortea L, Tiwari A N and Buecheler S. Compositionally Graded Absorber for Efficient and Stable Near-Infrared-Transparent Perovskite Solar Cells [J]. Adv Sci, 2018, 5 (18):170-175.
- 200 [10] Ergen O, Gilbert S M, Pham T, Turner S J, Tan M T Z and Worsley M A. Graded bandgap perovskite solar cells [J]. Nat Mater, 2017, 16 (34): 522-525.
- [11] Azri F, Meftah A, Sengouga N and Mefeah A. Electron and hole transport layers optimization by numerical simulation of a perovskite solar cell [J]. Solar Energy, 2019, 181 (19): 372-378.
- [12] Zhang A, Chen Y and Yan J. Optimal Design and Simulation of High-Performance Organic-Metal Halide Perovskite Solar Cells [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2016, 52 (16) 1-6.
- 205 [13] Alnuaimi A, Almansouri A and Nayfeh A. Effect of mobility and band structure of hole transport layer in planar heterojunction perovskite solar cells using 2D TCAD simulation [J]. Journal of Computational Electronics, 2016, 15 (4) 1110-1118.
- [14] Wadi M A A, Chowdhury T H, Bedia I M, Lee J J and Amin N. Evolution of Pb-Free and Partially Pb-Substituted Perovskite Absorbers for Efficient Perovskite Solar Cells [J]. Electronic Materials Letters, 2019, 15 (5) 525-546.
- 210 [15] Du H J, Wang W C and Gu Y F. Simulation design of P-I-N-type all-perovskite solar cells with high efficiency [J]. Chinese Physics B, 2017, 26 (2): 028803.