

# Cs<sub>2</sub>AgBi<sub>0.75</sub>Sb<sub>0.25</sub>Br<sub>6</sub> 钙钛矿太阳能电池的优化设计

王月荣<sup>1)</sup> 田汉民<sup>1)2)†</sup> 张登琪<sup>1)</sup> 刘维龙<sup>1)</sup> 马旭蕾<sup>1)</sup>

1) (河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401)

2) (天津电子材料与器件实验室, 天津 300401)

(2023年8月9日收到; 2023年10月1日收到修改稿)

双钙钛矿太阳能电池以其低成本、高性能、环境友好、稳定性强而备受关注. 本研究使用 Silvaco TCAD 分析了 Cs<sub>2</sub>AgBi<sub>0.75</sub>Sb<sub>0.25</sub>Br<sub>6</sub> 太阳能电池的钙钛矿层厚度、能带偏移、金属电极功函数、传输层厚度及掺杂浓度与器件效率的关系, 以提升器件性能. 基于空穴传输层为 Spiro-OMeTAD, 电子传输层为 ZnO 的器件进行初始研究, 其显示出 12.66% 的光电转换效率. 结果表明, 当钙钛矿层厚度大于 500 nm 时, 效率趋于饱和. 最佳导带偏移量为 0—+0.5 eV, 最佳价带偏移量为 -0.1—+0.2 eV. 在改变器件的电子传输层为 ZnOS, 空穴传输层分别为 MoO<sub>3</sub>, Cu<sub>2</sub>O 和 CuSCN 的情况下, 优化其厚度和掺杂浓度, 最终空穴传输层为 Cu<sub>2</sub>O 的双钙钛矿太阳能电池理论光电转换效率达 22.85%, 比目前报道的理论效率值相对提升了 25.6%. 此外, 当金属电极功函数小于 -4.9 eV 时易实现最佳效率. 本工作为开发高性能无铅钙钛矿太阳能电池提供了理论指导.

**关键词:** 双钙钛矿太阳能电池, 光电转换效率, 能带偏移, 电极功函数**PACS:** 88.40.hj, 88.40.H-, 88.40.fc**DOI:** 10.7498/aps.73.20231299

## 1 引言

钙钛矿太阳能电池由于其非凡的性质, 如吸收系数高、电子和空穴扩散长度长、可调带隙、高效的电荷分离和溶液加工制造技术等<sup>[1-4]</sup>, 成为近年来光电领域的研究热点. 其中有机-无机钙钛矿太阳能电池的光电转换效率已提高到 25.7%<sup>[5]</sup>, 成为光伏技术领域强有力的竞争者. 然而, 有机基团的存在导致材料的长期不稳定性, 所含有毒元素 (Pb) 对环境不友好, 阻碍其商业化. 因此, 有望解决上述问题的全无机、无铅的双钙钛矿 Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> 及 Cs<sub>2</sub>AgBi<sub>0.75</sub>Sb<sub>0.25</sub>Br<sub>6</sub> 获得了广泛关注<sup>[6]</sup>.

实验表明, Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> 在 55% 相对湿度的黑暗中储存, 或在 50 °C 下用广谱卤素灯在干燥 N<sub>2</sub> 下照射 30 天, 或在 100 °C 下在空气中加热 72 h, 以及在高达 430 °C 的温度下, 均保持了结构完整性,

无材料分解, 证明其良好的环境稳定性<sup>[7]</sup>. 由于 Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> 带隙为 2.2 eV, 只能吸收部分可见光波段, Hutter 等<sup>[8]</sup> 通过掺杂一定比例的三价阳离子 Sb<sup>3+</sup>, 其带隙降低到太阳能电池吸收层合适的 ~1.6 eV. Du 等<sup>[9]</sup> 使用真空密封法合成 Cs<sub>2</sub>AgSb<sub>x</sub>Bi<sub>1-x</sub>Br<sub>6</sub> ( $x = 0-0.375$ ), 实现带隙在 2.27—1.86 eV 之间调谐. 目前 Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> 基太阳能电池的实验效率仅为 5% 左右<sup>[10,11]</sup>, 于是研究人员尝试将 Sb<sup>3+</sup> 掺杂的 Cs<sub>2</sub>AgSb<sub>x</sub>Bi<sub>1-x</sub>Br<sub>6</sub> 作为吸光层以获得更高的器件效率. Liu 等<sup>[12]</sup> 使用简单溶液法合成 Cs<sub>2</sub>AgSb<sub>x</sub>Bi<sub>1-x</sub>Br<sub>6</sub> 薄膜 (Sb 取代高达 75%), 并应用于器件, 制备的 Cs<sub>2</sub>AgSb<sub>x</sub>Bi<sub>1-x</sub>Br<sub>6</sub> ( $x = 0.25$ ) 太阳能电池与 Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> 太阳能电池相比性能获得了明显的改善. Madan 等<sup>[13]</sup> 基于 NiO/Cs<sub>2</sub>AgBi<sub>0.75</sub>Sb<sub>0.25</sub>Br<sub>6</sub>/PCBM/SnO<sub>2</sub> 器件进行数值模拟, 效率达到 10.01%. 2021 年, Singh 等<sup>[14]</sup> 发现, 空穴传输层和电子传输层分别为 Cu<sub>2</sub>O 和 ZnOS 时,

† 通信作者. E-mail: tianhanmin@hebut.edu.cn

$\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池的理论效率可提升到 18.18%。然而目前此效率与有机-无机钙钛矿太阳能电池的实验及理论效率相比仍有一定差距。

考虑到各功能层材料的选择、尺度的匹配以及对器件性能影响的物理机制, 本文使用 Silvaco TCAD 软件研究了  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  钙钛矿太阳能电池的功能层材料选择和尺度优化, 以全面挖掘  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池的潜力。首先, 研究了钙钛矿的厚度, 找到其最佳值。进而分析了功能层能带偏移, 掺杂浓度, 金属电极功函数变化对电池器件性能的影响。同时, 分析了这些参数对器件性能影响的物理机制。然后尝试使用能级更匹配的电子传输层 (ZnO) 和空穴传输层 ( $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSCN}$ ) 材料代替 ZnO 和 Spiro-OMeTAD, 优化其厚度和掺杂浓度, 对比分析器件的性能, 最终光电转换效率提升至 22.85%, 比目前报道<sup>[14]</sup> 的该类电池的理论效率值相对提升了 25.6%。

## 2 器件结构和材料参数

本工作从基础的双钙钛矿太阳能电池器件结构开始研究, 选择 ZnO 作为电子传输层, Spiro-OMeTAD 作为空穴传输层, 器件结构如图 1 所示。利用二维器件模拟器 Silvaco ATLAS TCAD, 实现了基于  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  的双钙钛矿太阳能电池的数值模拟。

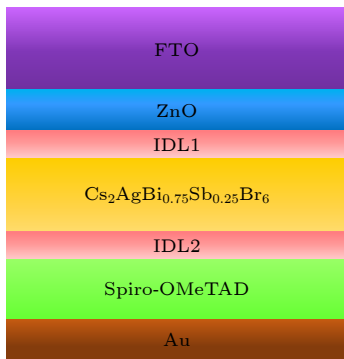


图 1 模拟双钙钛矿太阳能电池的二维结构图

Fig. 1. Two-dimensional structure diagram of simulated double perovskite solar cell.

该软件基于热平衡下半导体内载流子迁移所满足的泊松方程、连续性方程和漂移扩散方程<sup>[15]</sup>, 通过把太阳能电池器件划分数目众多的微网格, 求解各离散位置的电流密度、载流子浓度、复合率等物理量, 进而获得整个钙钛矿电池的开路电压、电

流密度、填充因子等性能指标, 其计算公式如下。

泊松方程:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\sigma x^2} = \frac{q}{\varepsilon} (n - p), \quad (1)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G - R \quad \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + G - R, \quad (2)$$

漂移扩散方程:

$$J_n = qD_n \frac{\partial n}{\partial x} - q\mu_n n \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad J_p = -qD_p \frac{\partial p}{\partial x} - q\mu_p p \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad (3)$$

其中,  $J_n$  为电子电流密度,  $J_p$  为空穴电流密度,  $D_n$  为电子扩散系数,  $D_p$  为空穴扩散系数,  $\mu_n$  为电子迁移率,  $\mu_p$  为空穴迁移率,  $\varepsilon$  为介电常数,  $q$  为电子电荷,  $n$  为电子浓度,  $p$  为空穴浓度,  $G$  为载流子产生率,  $R$  为载流子复合率。

采用的参数来源于文献<sup>[13, 16–21]</sup>, 如表 1 所示。此外, 根据文献<sup>[22]</sup> 中的模型, 在存在界面层的基础上开展研究, 设定在传输层和钙钛矿层中间存在厚度为 10 nm 的界面缺陷层。这是由于实际器件中存在的界面问题, 界面复合受吸收层和 ETL/HTL 之间的能带偏移影响, 并且在不合适的能带偏移下, 钙钛矿太阳能电池的性能恶化<sup>[23–25]</sup>。因为界面缺陷会导致电荷捕获或复合, 以及电荷收集效率低下, 这将导致光伏参数降低, 因此, 本文在考虑存在界面缺陷层的基础上开展能带偏移的研究。

透明导电氧化物 (TCO) 如掺氟氧化锡 (FTO) 和掺锡氧化铟 (ITO) 在钙钛矿太阳能电池 (PSC) 顶电极中均有大量应用<sup>[26]</sup>。但是铟比氟和锡更昂贵, 使得 ITO 相对昂贵<sup>[27]</sup>。此外, 可调带隙、良好的导电性和化学稳定性突出的 FTO 是 PSC 的绝佳选择, 也是 ITO 的合适替代品<sup>[26,28]</sup>。因此, 本模型采用了 FTO 为顶电极。

## 3 结果与讨论

### 3.1 钙钛矿吸光层 $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$ 厚度对器件性能的影响

双钙钛矿层的厚度对太阳能电池光伏性能起着至关重要的作用<sup>[47]</sup>。因此, 本文首先研究了  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  厚度对钙钛矿太阳能电池 (PSC) 性能的影响。如图 2 所示, 当钙钛矿  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  的厚度增大时, 开路电压 ( $V_{OC}$ )

表 1  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池各层材料的参数  
 Table 1. Parameters of each layer material of  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  solar cell.

Parameter	ZnO	ZnOS	$\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$	Spiro-OMeTAD	$\text{MoO}_3$	$\text{Cu}_2\text{O}$	CuSCN
Permittivity, $\epsilon_r$	9 <sup>[29]</sup>	9 <sup>[18]</sup>	6.5 <sup>[30,31]</sup>	3 <sup>[32]</sup>	12.5 <sup>[33]</sup>	7.1 <sup>[34]</sup>	10 <sup>[35]</sup>
Band gap/eV	3.3 <sup>[36]</sup>	2.83 <sup>[37]</sup>	1.8 <sup>[8]</sup>	3 <sup>[38]</sup>	3 <sup>[39]</sup>	2.17 <sup>[40]</sup>	3.4 <sup>[41]</sup>
Affinity/eV	4 <sup>[42]</sup>	3.6 <sup>[37]</sup>	3.58 <sup>[43]</sup>	2.45 <sup>[32]</sup>	2.5 <sup>[44]</sup>	3.2 <sup>[45]</sup>	1.9 <sup>[46]</sup>
$N_C/\text{cm}^{-3}$	$3.7 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.02 \times 10^{17}$	$2.2 \times 10^{18}$
$N_V/\text{cm}^{-3}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.1 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$
$N_D/\text{cm}^{-3}$	$1 \times 10^{17}$	$1 \times 10^{17}$	$1.0 \times 10^{13}$	0	0	0	0
$N_A/\text{cm}^{-3}$	0	0	$1.0 \times 10^{17}$	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{19}$
$\mu_n/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	100	100	2	$2 \times 10^{-4}$	25	200	100
$\mu_p/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	25	25	2	$2 \times 10^{-4}$	100	80	25

增加, 填充因子 (FF) 先增大后减小, 短路电流密度 ( $J_{SC}$ ) 增大, 这是因为在钙钛矿中更多的光吸收和更大的电荷载流子产生, 从而导致器件效率提高. 光电转换效率 (PCE) 显著增大直到钙钛矿层厚度达到 500 nm 时, 几乎达到饱和. 因此, 选择钙钛矿层的厚度为 500 nm, 其器件输出参数为:  $V_{OC} = 0.97$  V,  $J_{SC} = 15.76$  mA/cm<sup>2</sup>, FF = 83.19%, PCE = 12.66%.

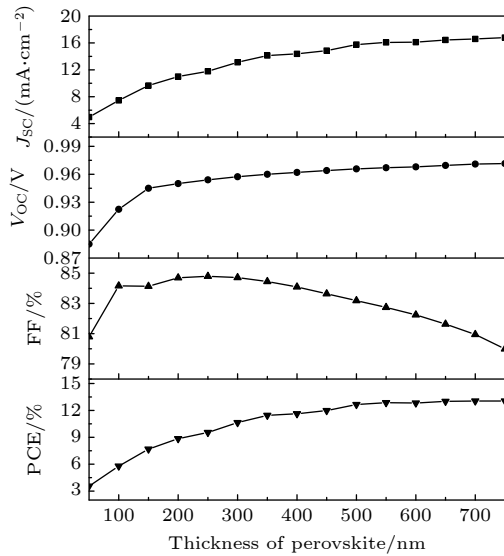


图 2 器件性能随  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  厚度的变化  
 Fig. 2. Variation of device performance with different thickness of  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$ .

### 3.2 能带偏移对器件性能的影响

传输层/钙钛矿界面处的界面工程对于实现高效太阳能电池至关重要. 其中跨界面的复合损耗以及能带匹配程度, 被认为是造成器件电压损失的主要原因<sup>[48]</sup>. 将界面缺陷层 (IDL) 的电荷载流子寿命设置为  $10^{-9}$  s<sup>[49,50]</sup>, 体现了跨界面的复合损耗, IDL 其他参数设置为与钙钛矿层的参数相同.

本文设定在电子传输层 (ETL) 和钙钛矿吸收层中间插入界面缺陷层 1 (IDL1), 在钙钛矿吸收层和空穴传输层 (HTL) 中间插入界面缺陷层 2 (IDL2), 厚度均设置为 10 nm. 当钙钛矿的导带底 ( $E_C$ ) 高于 ETL 导带底时, 定义导带偏移量为负值, 当钙钛矿的导带底低于 ETL 导带底时, 定义导带偏移量为正值, 如图 3(a), (b) 所示. 同理, 当钙钛矿的价带顶低于 HTL 价带顶时, 定义价带偏移量为负值, 反之, 定义价带偏移量为正值, 如图 3(c), (d) 所示.

首先研究导带偏移量 (CBO) 对器件性能的影响. 如图 4(a) 所示, 当 CBO 从  $-0.7$  eV 增至  $-0.1$  eV 时, FF 略有提升,  $V_{OC}$  显著提升,  $J_{SC}$  几乎保持不变. 当 CBO 从 0 eV 增至 0.5 eV 时, 器件性能几乎不变. 当 CBO 大于 0.5 eV 时, 严重影响器件的  $J_{SC}$  以及 FF, 光电转换效率几乎为零. 为了探究这一现象产生的原因, 研究了不同 CBO 下的器件能带图, 如图 5(a), (b) 所示, 当 CBO 为负值时, 在 IDL1 与钙钛矿层之间导带产生了断崖, 然而, 断崖并不阻碍电子从钙钛矿到 ETL 的转移, 因此,  $J_{SC}$  几乎保持不变. 但是, 当负的 CBO 减小时, 断崖高度增高, 界面处的带隙减小, 界面复合增强<sup>[51]</sup>, 如图 5(c) 所示, 从而导致了器件  $V_{OC}$  和 FF 降低. 当 CBO 为正值时, IDL1 与 ETL 界面处导带出现了尖峰状的势垒, 其可充当光生电子流的屏障并防止电子到达 ETL/钙钛矿层界面. 当 CBO 为  $0-0.5$  eV 时, 出现较小的尖峰势垒, 当 CBO 高于 0.5 eV 时势垒显著增大, 界面处复合增加, 一部分载流子无法进行隧穿或转移, 严重阻碍了载流子从吸光层输运到 ETL, 导致了器件  $J_{SC}$  下降. 总之, 当导带偏移量为  $0-0.5$  eV 时器件可以获得最优光电转换效率.

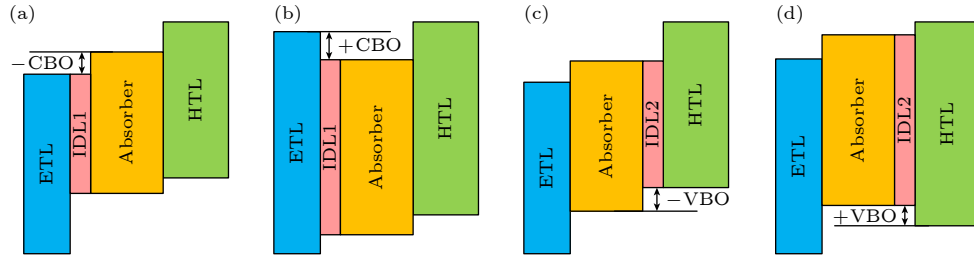


图 3 导带偏移量为 (a) 负值与 (b) 正值时的能带排列图; 价带偏移量为 (c) 负值与 (d) 正值时的能带排列图

Fig. 3. Energy band alignment diagram with (a) negative and (b) positive CBO; energy band alignment diagram with (c) negative and (d) positive VBO.

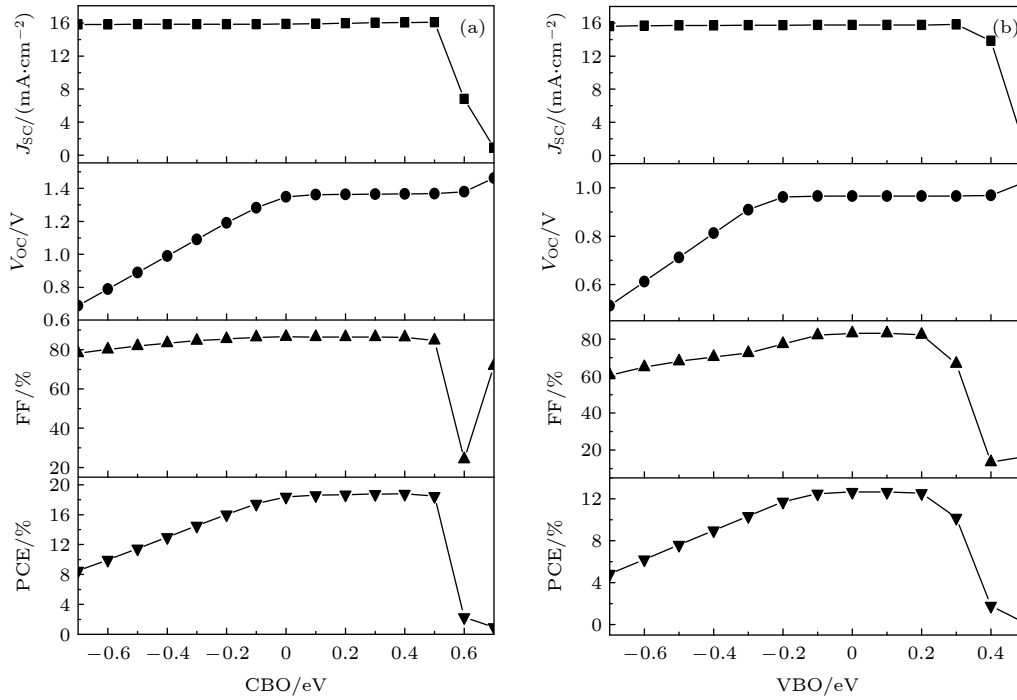

 图 4 不同 (a) 导带偏移量和 (b) 价带偏移量下  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池器件性能变化

 Fig. 4. Variation of device performance of  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  solar cells with different (a) CBOs and (b) VBOs.

除导带偏移外, 研究价带偏移量 (VBO) 对器件性能的影响也十分必要. 如图 4(b) 所示, 当价 VBO 从  $-0.7$  eV 增至  $-0.1$  eV 时,  $V_{OC}$  明显增大, FF 略有增大,  $J_{SC}$  几乎保持不变; 从  $-0.1$  增至  $0.2$  eV 时, 器件性能几乎不变; 大于  $0.2$  eV 时, 光电转换效率几乎为零. 研究不同 VBO 下的器件能带图, 如图 5(d), (e) 所示, 当 VBO 为负值时, 在 IDL2 与钙钛矿层之间价带产生的断崖并不阻碍光生空穴转移,  $J_{SC}$  几乎不变. 但当负的 VBO 减小时, 界面复合增强<sup>[51]</sup>, 如图 5(f) 所示, 导致  $V_{OC}$  和 FF 降低. 当 VBO 为正值时, IDL2 与 HTL 界面处价带产生了尖峰势垒, 当 VBO 大于  $0.2$  eV 时势垒显著增大, 阻碍了载流子运输,  $J_{SC}$  和 FF 下降. 综上, 当价带偏移量为  $-0.1$ — $0.2$  eV 时器件可以获得最

优光电转换效率.

### 3.3 传输层材料对器件性能的影响

在 3.2 节, 讨论了钙钛矿与 ETL 和 HTL 的能带对准, 以促进载流子传输<sup>[52,53]</sup>. CBO 为  $-0.02$  eV 的 ZnOS 比  $-0.42$  eV 的 ZnO 更适合作为 ETL. ZnOS 与钙钛矿  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  的能带更匹配. 另外, 发现 Spiro-OMeTAD 似乎不是最合适的 HTL, 并且有机 HTL 通常价格昂贵且空穴迁移率相对较低, 为了获得高效的光伏电池, 在选择 ZnOS 作为 ETL 之后, 研究 3 种不同空穴传输层材料 ( $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  和  $\text{CuSCN}$ ) 对电池性能的影响, 其 VBO 分别为  $+0.12$ ,  $-0.01$ ,  $-0.08$  eV.

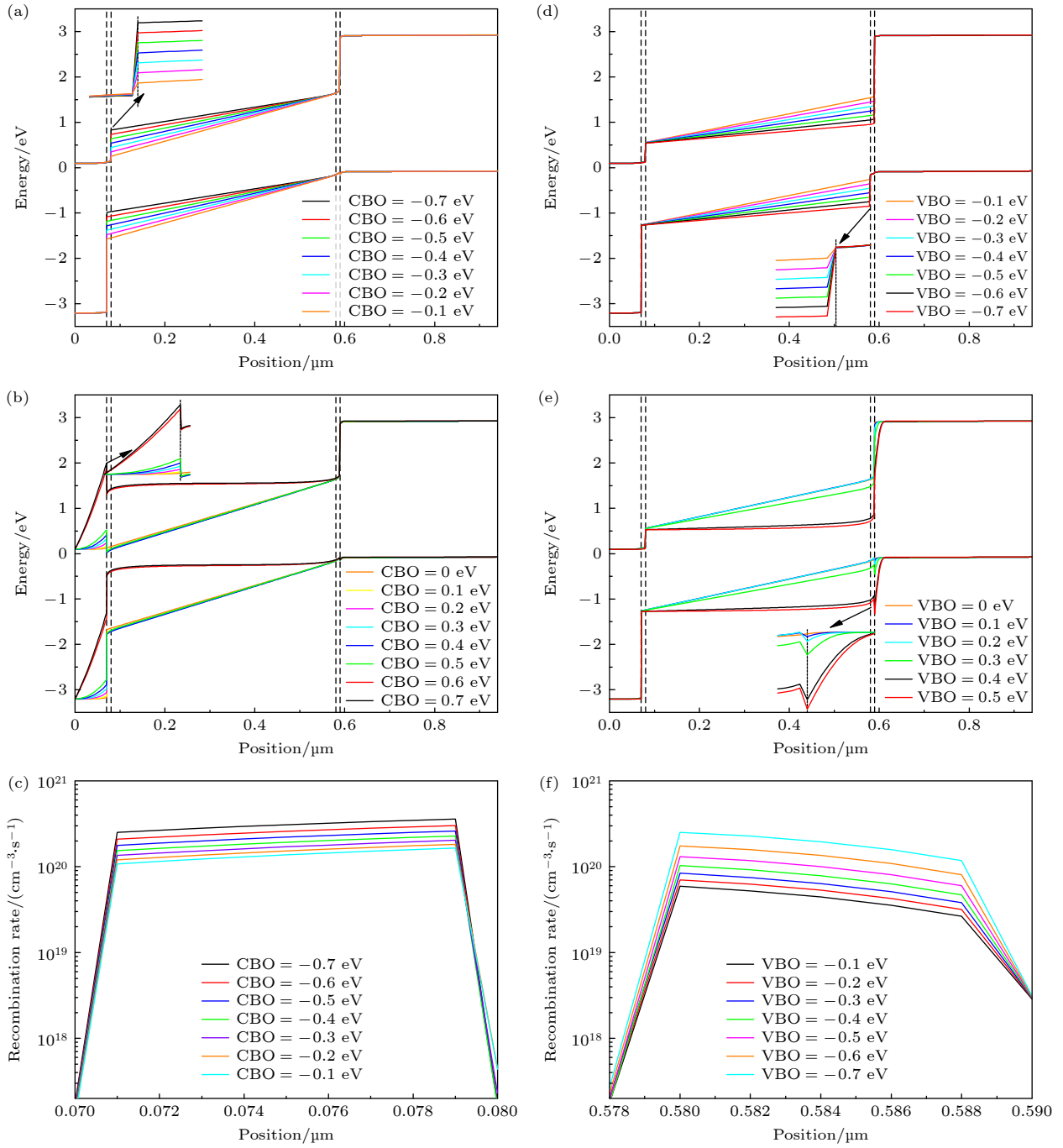


图 5  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池的不同 (a) 负值导带偏移量, (b) 正值导带偏移量, (d) 负值价带偏移量, (e) 正值价带偏移量的能带图; 不同 (c) 负值导带偏移量和 (f) 负值价带偏移量下界面缺陷层的载流子复合速率

Fig. 5. Energy band diagrams of  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  solar cells with different (a) negative CBOs, (b) positive CBOs, (d) negative VBOs, (e) positive VBOs; carrier recombination rate in interfacial defect layers with different (c) negative CBOs and (f) negative VBOs.

过厚的传输层会有较大的寄生吸收, 过薄的传输层对于光生载流子的提取能力较弱且制备过程中容易产生缺陷, 因此需要对传输层厚度进行优化. 首先, 讨论 ZnOS 电子传输层厚度对器件性能的影响. 如图 6(a) 所示, 当 ZnOS 厚度增大, 电池的效率逐渐下降. 在实际工艺中, 钙钛矿电池的传输

层厚度一般为 30—100 nm<sup>[54]</sup>. 所以将 ZnOS 厚度确定为 30 nm 以获得较高的效率. 然后, 研究 3 种空穴传输层厚度 ( $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  和  $\text{CuSCN}$ ) 对器件性能的影响. 随着 HTL 的厚度增加, 器件效率先增大后减小, 如图 6(b) 所示, HTL 为  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  和  $\text{CuSCN}$  时, 其最佳厚度分别为 300, 280, 340 nm.

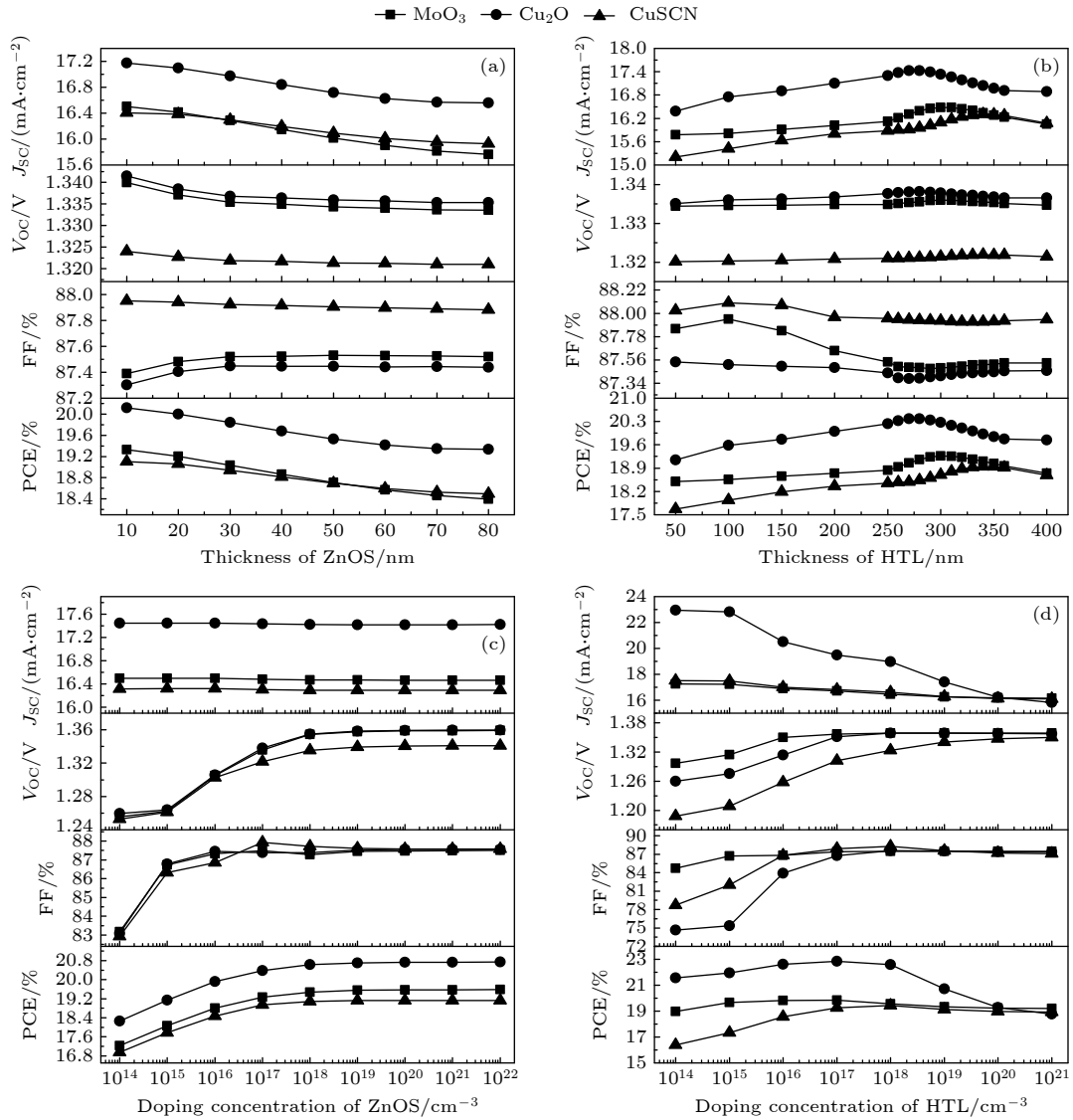


图6 不同 (a) ZnOS厚度, (b) HTL厚度, (c) ZnOS掺杂浓度, (d) HTL掺杂浓度下  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池的器件性能  
 Fig. 6. Device performance of  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  solar cell with different (a) thickness of ZnOS, (b) thickness of HTL, (c) doping concentration of ZnOS, (d) doping concentration of HTL.

许多报道表明对传输层进行掺杂可以提高传输层对载流子的提取能力, 改善器件性能<sup>[55,56]</sup>. 本文通过观察掺杂浓度对关键光伏参数的影响来优化光伏(PV)器件. 开路电压  $V_{oc}$  与掺杂浓度的关系如(4)式和(5)式所示<sup>[57]</sup>:

$$V_{oc} = \frac{K_b T}{q} \ln \left( \frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right), \quad (4)$$

$$J_0 = q n_i^2 \ln \left( \frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right), \quad (5)$$

其中  $N_d$  和  $N_a$  分别是施主和受主掺杂浓度,  $J_0$  是电流饱和密度,  $D_n$  和  $D_p$  为电子和空穴扩散系数,  $q$  为电子电荷,  $K_b$  为玻尔兹曼常数,  $L_n$  和  $L_p$  是电子和空穴扩散长度,  $n_i$  为本征载流子的浓度. 随着

$N_d$  和  $N_a$  掺杂的增加, 根据(5)式,  $J_0$  降低, 根据(4)式,  $V_{oc}$  增大.

图6(c), (d)为  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池在不同掺杂浓度的电子传输层(ZnOS)和空穴传输层( $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSCN}$ )条件下的器件性能. 随着 ZnOS 掺杂浓度增大, 器件的  $J_{sc}$  略微降低,  $V_{oc}$  和 FF 不断增大并趋于饱和, 当增至  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  时, 效率达到饱和. 所以选择 ZnOS 掺杂浓度为  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . 同理, 随着 HTL 掺杂浓度增加, 器件的  $J_{sc}$  下降,  $V_{oc}$  先增大后逐渐饱和, 此外, 电池效率在  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSCN}$  掺杂浓度分别为  $10^{17}$ ,  $10^{17}$ ,  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时达到最大值, 然后下降, 超过最优浓度后, 散射增加, 载流子不再被有效收集, 效率呈现

下降趋势. 所以选择  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSCN}$  最佳掺杂浓度分别为  $10^{17}$ ,  $10^{17}$ ,  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

对不同 HTL 的  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  器件进行优化, 得到的  $J-V$  曲线及输出参数如图 7(a) 所示. 可以看出, HTL 为  $\text{Cu}_2\text{O}$  时,  $J_{\text{SC}}$  提升到了  $19.49 \text{ mA/cm}^2$ , PSC 具有更高的效率. 主要是由于其价带顶与钙钛矿价带顶近乎完美对准. 图 7(b) 中显示, 相较于 VBO 为  $+0.12 \text{ eV}$  的  $\text{MoO}_3$  和  $-0.08 \text{ eV}$  的  $\text{CuSCN}$ , VBO 为  $-0.01 \text{ eV}$  的  $\text{Cu}_2\text{O}$  具有更加匹配的价带,  $\text{Cu}_2\text{O}$  作为空穴传输层的器件价带在钙钛矿吸光层、界面缺陷层与空穴传输层之间过渡十分平滑, 几乎不存在类似于  $\text{MoO}_3$  和  $\text{CuSCN}$  空穴传输层界面的尖峰势垒或者断崖.

为全面挖掘  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳电池的潜力, 本文采用如下优化路径分析器件性能. 如

表 2 所示, 采用文献 [14] 中 18.18% 的效率所对应的模型和参数值的情况下, 得到 16.87% 的效率, 显示出与该文献相符的结果, 优化各层厚度后, 效率达到 18.56%. 考虑到各层之间复杂的相互作用, 尝试对  $\text{ZnOS}$  的掺杂浓度进行调整, 发现器件效率略有提升, 在此基础上, 对  $\text{Cu}_2\text{O}$  的掺杂浓度优化, 发现器件效率显著提升. 如图 8 所示,  $\text{Cu}_2\text{O}$  掺杂浓度的增大拉高了能带位置, 导致钙钛矿层内的电场强度提升, 有利于载流子传输. 随着掺杂浓度的不断增大并超过一定浓度时, 影响界面处能带位置, 使断崖高度增大, 复合增加. 因此, 进一步增大掺杂浓度器件效率下降. 如表 2 所示, 最终优化后的  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池获得了 22.85% 的光电转换效率. 相比于目前报道的 18.18% 的理论效率值相对提升了 25.6% [14].

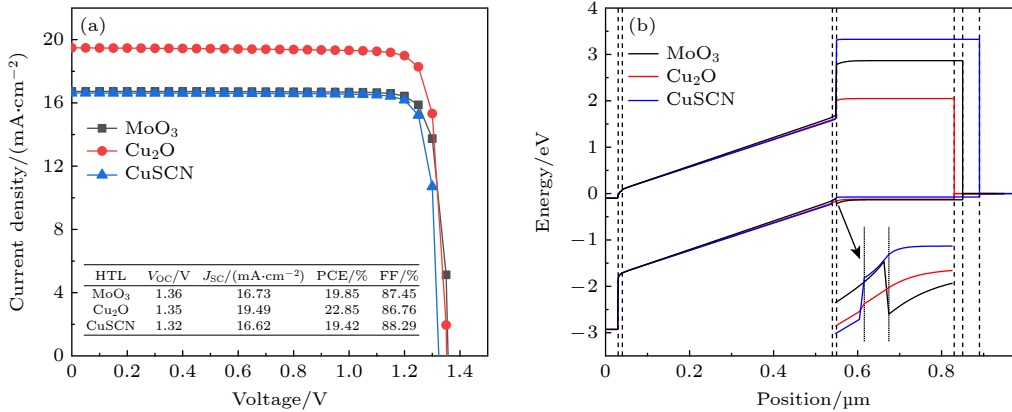


图 7 不同 HTL 的  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池的 (a)  $J-V$  曲线图和输出参数, (b) 能带图

Fig. 7. (a)  $J-V$  curves and output parameters, (b) energy band diagrams of  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  solar cells with different HTL.

表 2 优化的器件光伏性能参数及参考

Table 2. Optimized device photovoltaic performance parameters and references.

	Thickness/nm	Doping concentration/ $\text{cm}^{-3}$	$V_{\text{OC}}/\text{V}$	$J_{\text{SC}}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	PCE/%	FF/%
This work	$\text{ZnOS}/\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6/\text{Cu}_2\text{O}$ : 70/400/350	ETL/HTL: $2\times 10^{18}/9\times 10^{21}$	1.36	14.12	16.87	88.04
After thickness optimization	$\text{ZnOS}/\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6/\text{Cu}_2\text{O}$ : 30/500/280	ETL/HTL: $2\times 10^{18}/9\times 10^{21}$	1.36	15.70	18.56	87.24
After $N_{\text{D}}(\text{ZnOS})$ optimization	$\text{ZnOS}/\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6/\text{Cu}_2\text{O}$ : 30/500/280	ETL/HTL: $1\times 10^{20}/9\times 10^{21}$	1.35	15.70	18.62	87.37
After $N_{\text{A}}(\text{Cu}_2\text{O})$ optimization	$\text{ZnOS}/\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6/\text{Cu}_2\text{O}$ : 30/500/280	ETL/HTL: $1\times 10^{20}/1\times 10^{17}$	1.35	19.49	22.85	86.76
Ref.[14]	$\text{ZnOS}/\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6/\text{Cu}_2\text{O}$ : 70/400/350	ETL/HTL: $2\times 10^{18}/9\times 10^{21}$	1.39	16.04	18.18	78.34
Other Ref.[58]	$\text{ZnO}/\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6/\text{NiO}$ : 70/400/350	ETL/HTL: $5\times 10^{17}/3\times 10^{18}$	1.23	15.57	17.13	89.39
Other Ref.[13]	$\text{NiO}/\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6/\text{PCBM}/\text{SnO}_2$ : 40/500/40/6	ETL/HTL: $1\times 10^{15}/5\times 10^{17}$	1.14	14.9	10.01	58.70

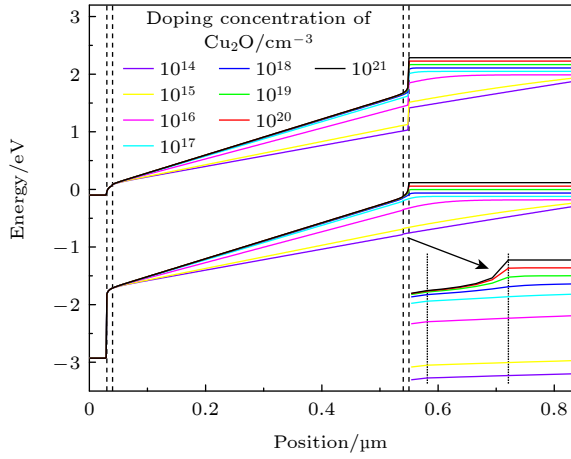


图 8  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池的能带图随  $\text{Cu}_2\text{O}$  掺杂浓度变化  
 Fig. 8. Variation of energy band diagrams of  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  solar cells with the doping concentration of  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

### 3.4 金属功函数对器件性能的影响

在该器件中, 金属电极功函数影响太阳能电池的能带图, 进而影响钙钛矿层载流子的提取. 因此, 研究了不同金属电极功函数对  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  器件性能的影响. 如图 9 所示, 当功函数从  $-4.2\text{ eV}$  减小到  $-5.4\text{ eV}$  时,  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  电池效率逐渐提高并达到饱和. 图 10(a) 为不同金属功函数值时的器件能带图, 当功函数从  $-4.2\text{ eV}$  减小到  $-5.4\text{ eV}$  时,  $\text{Cu}_2\text{O}$  能带被拉高, 使得  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}$

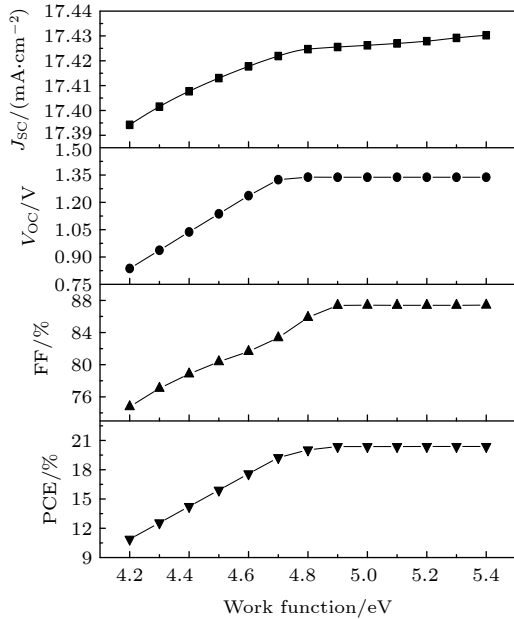


图 9 不同功函数对  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池性能的影响  
 Fig. 9. Effect of different work functions on the performance of  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  solar cells.

$\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  钙钛矿层能带斜率不断增大, 电场强度提升, 钙钛矿层中的电子浓度和空穴浓度降低, 说明载流子被更有效地提取, 如图 10(b), (c) 所示.

综上, 在金属电极功函数为  $-5.4\text{—}4.9\text{ eV}$  时, 可以获得最优光电转换效率. 本文器件选取金 (功函数值为  $-5.1\text{ eV}$ ) 作为金属电极有利于保证获得优异的性能.

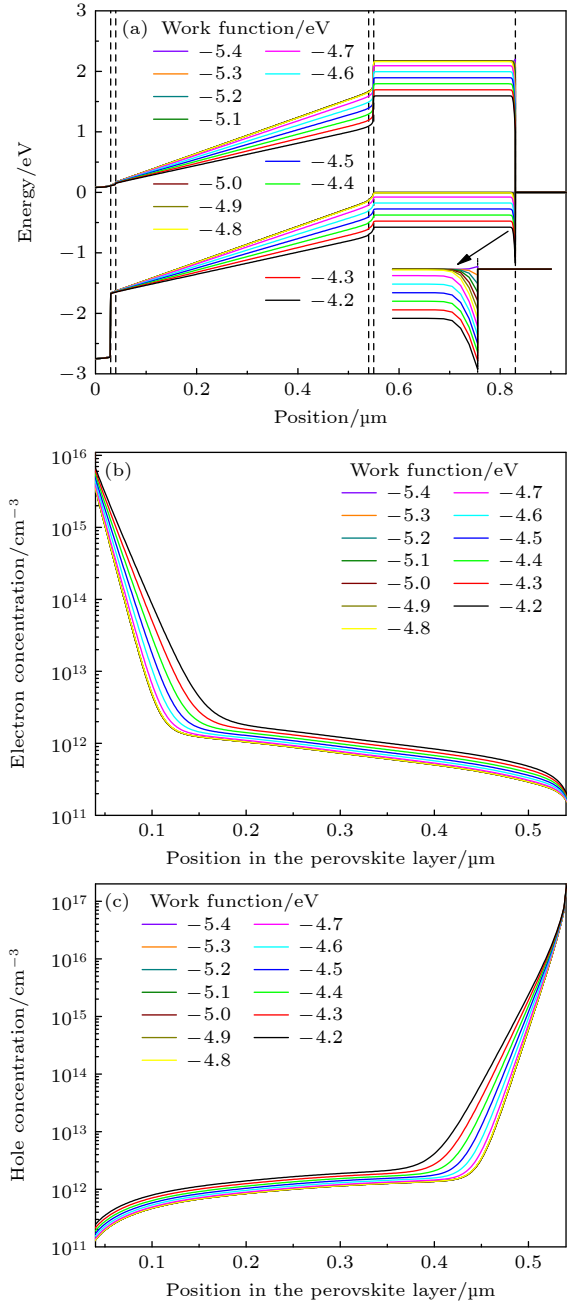


图 10 (a) 不同金属功函数下的器件能带图; 钙钛矿层的 (b) 电子浓度和 (c) 空穴浓度随不同金属功函数的变化  
 Fig. 10. (a) Device energy band diagrams with different metal work functions; variation of (b) electron concentration and (c) hole concentration in perovskite layer with different metal work functions.

## 4 结 论

本工作使用 Silvaco TCAD 软件对提升  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  钙钛矿太阳能电池光伏性能进行了研究. 通过在基本结构中引入界面缺陷层研究导带偏移量和价带偏移量对器件的影响, 选择能带更匹配的材料作为传输层, 并对其厚度和掺杂浓度进行优化, 发现器件效率显著提升. 研究结果表明钙钛矿层能带位置拉高时, 导致电场强度提升, 促进载流子传输, 从而提高效率. 然而, 界面处能带产生大的断崖或尖峰势垒时, 导致复合增加, 从而器件效率降低. 并研究了金属功函数对器件性能的影响. 优化后  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  层厚度为 500 nm, 最佳导带偏移量为 0—+0.5 eV, 最佳价带偏移量为 -0.1—+0.2 eV. 使用 ZnOS 作为电子传输层,  $\text{Cu}_2\text{O}$  作为空穴传输层,  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  太阳能电池优化后的光电转换效率提高至 22.85%. 比目前报道的理论效率值相对提升了 25.6%. 并且当金属电极功函数小于 -4.9 eV 时有利于实现最佳效率. 这项工作促进了未来的器件优化和光伏性能增强, 为在实验上实现高效的无铅无机钙钛矿太阳能电池提供了参考.

## 参考文献

- [1] Stranks S D, Eperon G E, Grancini G, Menelaou C, Alcocer M J, Leijtens T, Herz L M, Petrozza A, Snaith H J 2013 *Science* **342** 341
- [2] Tong J, Song Z, Kim D H, Chen X, Chen C, Palmstrom A F, Ndione P F, Reese M O, Dunfield S P, Reid O G 2019 *Science* **364** 475
- [3] Alarousu E, El-Zohry A M, Yin J, Zhumekenov A A, Yang C, Alhabshi E, Gereige I, AlSaggaf A, Malko A V, Bakr O M, Mohammed O F 2017 *J. Phys. Chem. Lett.* **8** 4386
- [4] Dong Q F, Fang Y J, Shao Y C, Mulligan P, Qiu J, Cao L, Huang J S 2015 *Science* **347** 967
- [5] Park J, Kim J, Yum H S, Paik M J, Noh E, Mun H J, Kim M G, Shin T J, Seok S I 2023 *Nature* **616** 724
- [6] Zhang Z, Yang G, Zhou C, Chung C C, Hany I 2019 *RSC Adv.* **9** 23459
- [7] Slavney A H, Hu T, Lindenberg A M, Karunadasa H I 2016 *J. Am. Chem. Soc.* **138** 2138
- [8] Hutter E M, Gélvez-Rueda M C, Bartesaghi D, Grozema F C, Savenije T 2018 *ACS Omega* **3** 11655
- [9] Du K Z, Meng W, Wang X, Yan Y, Mitzi D B 2017 *Angew. Chem. Int. Ed.* **56** 8158
- [10] Pantaler M, Cho K T, Queloz V I E, Benito I G, Fettkenhauer C, Anusca I, Nazeeruddin M K, Lupascu D C, Grancini G 2018 *ACS Energy Lett.* **3** 1781
- [11] Gao W, Ran C, Xi J, Jiao B, Zhang W, Wu M, Hou X, Wu Z 2018 *Chemphyschemistry* **19** 1696
- [12] Liu Y, Zhang L, Wang M, Zhong Y J, Huang M R, Long Y, Zhu H W 2019 *Mater. Today* **28** 25
- [13] Madan J, Pandey R, Sharma R 2020 *Sol. Energy* **197** 212
- [14] Singh N, Agarwal A, Agarwal M 2021 *Opt. Mater.* **114** 110964
- [15] Zhao P, Liu Z, Lin Z, Chen D, Su J, Zhang C, Zhang J, Chang J, Hao Y 2018 *Sol. Energy* **169** 11
- [16] Kanoun A A, Kanoun M B, Merad A E, Goumri-Said S 2019 *Sol. Energy* **182** 237
- [17] Jalalian D, Ghadimi A, Kiani A 2019 *Eur. Phys. J.* **87** 10101
- [18] Rahman S I, Faisal S, Ahmed S, Dhruvo T I 2017 *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)* Bengaluru, India, 30 September–2 October, 2017 pp546–550
- [19] Gan Y J, Bi X G, Liu Y C, Qin B Y, Li Q L, Jiang Q B, Mo P 2020 *Energies* **13** 5907
- [20] Minemoto T, Murata M 2015 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **133** 8
- [21] Ahmed S, Jannat F, Alim M A 2020 *2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technology (ICAICT)* Dhaka, Bangladesh, November 21, 2020 pp297–301
- [22] Minemoto T, Julayhi J 2013 *Curr. Appl. Phys.* **13** 103
- [23] Ahmed A, Riaz K, Mehmood H, Tauqeer T, Ahmad Z 2020 *Opt. Mater.* **105** 109897
- [24] Haider S Z, Anwar H, Jamil Y, Shahid M 2020 *J. Phys. Chem. Solids* **136** 109147
- [25] Ding C, Zhang Y H, Liu F, Kitabatake Y, Hayase S, Toyoda T, Yoshino K, Minemoto T, Katayama K, Shen Q 2018 *Nano Energy* **53** 17
- [26] Aouaj M A, Diaz R, Belayachi A, Rueda F, Abd-Lefdil M 2009 *Mater. Res. Bull.* **44** 1458
- [27] Way A, Luke J, Evans A D, Li Z, Kim J-S, Durrant J R, Hin Lee H K, Tsoi W C 2019 *AIP Adv.* **9** 085220
- [28] Huang L J, Ren N F, Li B J, Zhou M 2014 *Mater. Lett.* **116** 405
- [29] Liu J, Cao W Q, Jin H B, Yuan J, Zhang D Q, Cao M S 2015 *J. Mater. Chem. C* **3** 4670
- [30] Pantaler M, Olthof S, Meerholz K, Lupascu D C 2019 *MRS Adv.* **4** 3545
- [31] Dai Z, Zheng D, Chen J, Yang B 2021 *Chem. Phys. Lett.* **770** 138440
- [32] Almosni S, Cojocar L, Li D, Uchida S, Kubo T, Segawa H 2017 *Energy Technol.* **5** 1767
- [33] Govindaraj G, Baskaran N, Shahi K, Monoravi P 1995 *Solid State Ion* **76** 47
- [34] Collaboration: Authors and editors of the volumes III/17E–17F–41C. *Non-Tetrahedrally Bonded Elements and Binary Compounds I* 1998 1
- [35] Jaffe J E, Kaspar T C, Droubay T C, Varga T, Bowden M E, Exarhos G 2010 *J. Phys. Chem. C* **114** 9111
- [36] Zhang Q, Dandeneau C S, Zhou X, Cao G 2009 *Adv. Mater.* **21** 4087
- [37] Gloeckler M 2005 *Ph. D. Dissertation* (Fort Collins, Colorado: Colorado State University)
- [38] Eom K, Kwon U, Kalanur S S, Park H J, Seo H 2017 *J. Mater. Chem. A* **5** 2563
- [39] Chang J H, Shen S Y, Dong C D, Shkir M, Kumar M 2022 *Chemosphere* **287** 131960
- [40] Wang Y, Lany S, Ghanbaja J, Fagot-Revurat Y, Chen Y, Soldera F, Horwat D, Mücklich F, Pierson J 2016 *Phys. Rev. B* **94** 245418
- [41] Wijeyasinghe N, Regoutz A, Eisner F, Du T, Tsetseris L, Lin Y H, Faber H, Pattanasattayavong P, Li J, Yan F 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1701818

- [42] Takahashi R, Dazai T, Tsukahara Y, Borowiak A, Koinuma H 2022 *J. Appl. Phys.* **131** 175302
- [43] Meyer E, Mutukwa D, Zingwe N, Taziwa R 2018 *Metals* **8** 667
- [44] Rudnyi E B, Vovk O M, Kaibicheva E A, Sidorov L N 1989 *J. Chem. Thermodyn.* **21** 247
- [45] Brandt R E, Young M, Park H H, Dameron A, Chua D, Lee Y S, Teeter G, Gordon R G, Buonassisi T 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 26
- [46] Gavrilov S, Zheleznyakova A, Dronov A, Dittrich T 2009 *Physics, Chemistry And Application Of Nanostructures: Reviews and Short Notes* (World Scientific) pp577–580
- [47] Bag A, Radhakrishnan R, Nekovei R, Jeyakumar R 2020 *Sol. Energy* **196** 177
- [48] Zhou Y, Ren X G, Yan Y Q, Ren H, Du H M, Cai X Y, Huang Z X 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 208802 [周珺, 任信钢, 闫业强, 任昊, 杜红梅, 蔡雪原, 黄志祥 2022 物理学报 **71** 208802]
- [49] Zhao P, Lin Z H, Wang J P, Yue M, Su J, Zhang J C, Chang J J, Hao Y 2019 *ACS Appl. Energy Mater.* **2** 4504
- [50] Wang J P 2021 *M. S. Thesis* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [王家平 2021 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [51] Tanaka K, Minemoto T, Takakura H J S E 2009 *Sol. Energy* **83** 477
- [52] Saeed M A, Kim S H, Baek K, Hyun J K, Lee S Y, Shim J W 2021 *Appl. Surf. Sci.* **567** 150852
- [53] Kim S M, Saeed M A, Kim S H, Shim J W 2020 *Appl. Surf. Sci.* **527** 146840
- [54] Xu L Y F 2022 *M. S. Thesis* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [许李毅飞 2022 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [55] Halvani Anaraki E, Kermanpur A, Mayer M T, Steier L, Ahmed T, Turren-Cruz S-H, Seo J, Luo J, Zakeeruddin S M, Tress W R J A E L 2018 *ACS Energy Lett.* **3** 773
- [56] Huang X, Du J, Guo X, Lin Z, Ma J, Su J, Feng L, Zhang C, Zhang J, Chang J J S R 2020 *Sol. RRL* **4** 1900336
- [57] Parajuli D, Shah D K, KC D, Kumar S, Park M, Pant B J E 2022 *Electrochemistry* **3** 407
- [58] Islam M A, Abou Hashish M D, Hatta S M, Soin N B, Khan S, Amin N *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* p012005

# Optimal design of $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$ perovskite solar cells

Wang Yue-Rong<sup>1)</sup> Tian Han-Min<sup>1)2)†</sup> Zhang Deng-Qi<sup>1)</sup>

Liu Wei-Long<sup>1)</sup> Ma Xu-Lei<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

<sup>2)</sup> (Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Device, Tianjin 300401, China)

( Received 9 August 2023; revised manuscript received 1 October 2023 )

## Abstract

Double perovskite solar cells have attracted much attention due to their low cost, high performance, environmental friendliness, and strong stability. In this study, the effect of thickness of perovskite layer, band offset, metal electrode work function, the thickness and doping concentration of the transport layer on the efficiency of  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  solar cells are analyzed by using Silvaco TCAD to improve device performance. This preliminary study of device based on Spiro-OMeTAD as hole transport layer (HTL) and ZnO as electron transport layer (ETL) shows that the photovoltaic conversion efficiency (PCE) is 12.66%. The results show that the efficiency gradually saturates when the thickness of the perovskite layer is greater than 500 nm. The optimal conduction band offset (CBO) ranges from 0 eV to +0.5 eV and the optimal valence band offset (VBO) from -0.1 eV to +0.2 eV. After changing the device's ETL into ZnOS and HTLs into  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  and  $\text{CuSCN}$ , respectively, and optimizing their thickness values and doping concentrations, the final theoretical photovoltaic conversion efficiency of the double perovskite solar cell with an HTL of  $\text{Cu}_2\text{O}$  can reach 22.85%, which is increased by 25.6% compared with the currently reported theoretical efficiency value. Moreover, the optimal efficiency is achieved when the metal electrode work function is less than -4.9 eV. This work will help find suitable materials for the transport layer and provide guidance for developing the high-performance and lead-free perovskite solar cells.

**Keywords:** double perovskite solar cell, photoelectric conversion efficiency, band offset, electrode work function

**PACS:** 88.40.hj, 88.40.H-, 88.40.fc

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231299

† Corresponding author. E-mail: [tianhanmin@hebut.edu.cn](mailto:tianhanmin@hebut.edu.cn)



$\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  钙钛矿太阳能电池的优化设计

王月荣 田汉民 张登琪 刘维龙 马旭蕾

Optimal design of  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$  perovskite solar cells

Wang Yue-Rong Tian Han-Min Zhang Deng-Qi Liu Wei-Long Ma Xu-Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 028802 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231299

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231299>

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

钙钛矿太阳能电池研究进展: 空间电势与光电转换机制

Recent advances in perovskite solar cells: Space potential and optoelectronic conversion mechanism

物理学报. 2019, 68(15): 158401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190569>

基于双层电子传输层钙钛矿太阳能电池的物理机制

Physical mechanism of perovskite solar cell based on double electron transport layer

物理学报. 2022, 71(20): 208802 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220725>

溶液法制备全无机钙钛矿太阳能电池的研究进展

Research progress of solution processed all-inorganic perovskite solar cell

物理学报. 2019, 68(15): 158806 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190355>

锡基钙钛矿太阳能电池载流子传输层的探讨

Carrier transport layers of tin-based perovskite solar cells

物理学报. 2021, 70(3): 038801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201219>

喷墨打印钙钛矿太阳能电池研究进展与展望

Inkjet printed perovskite solar cells: progress and prospects

物理学报. 2019, 68(15): 158807 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190302>

背电极材料、结构以及厚度等影响钙钛矿太阳能电池性能的研究

Influence of back electrode material, structure and thickness on performance of perovskite solar cells

物理学报. 2021, 70(19): 198404 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211037>