

# 减小边缘复合助力 28% 效率的四端 钙钛矿/硅叠层太阳能电池\*

方正<sup>1)2)3)</sup> 张飞<sup>3)</sup> 秦校军<sup>1)†</sup> 杨柳<sup>2)</sup> 靳永斌<sup>2)</sup> 周养盈<sup>1)</sup>  
王兴涛<sup>1)</sup> 刘云<sup>1)</sup> 谢立强<sup>2)‡</sup> 魏展画<sup>2)‡‡</sup>

1) (中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

2) (华侨大学发光材料与信息显示研究院, 厦门 361021)

3) (华侨大学制造工程研究院, 厦门 361021)

(2022 年 11 月 19 日收到; 2022 年 12 月 17 日收到修改稿)

钙钛矿/硅叠层太阳能电池由于能突破单结太阳能电池的效率极限而吸引了广泛的研究兴趣. 然而, 在将商业化的大面积硅电池切割为实验室所需的平方厘米级的小面积电池时, 会造成显著的效率下降, 限制了叠层电池的性能. 为了消除传统的激光切割法造成的热损伤和热传导, 减少切割后的异质结硅电池的非辐射复合, 本工作采用砂轮划片这一冷加工方法, 对异质结硅电池进行切割. 与采用激光切割法得到的器件相比, 冷加工法得到的异质结硅电池的截面损伤小, 非辐射复合得到显著抑制, 器件的开路电压和填充因子均得到提高, 平均光电转换效率提高了 1%. 将得到的硅电池与正式半透明钙钛矿太阳能电池进行机械堆叠, 获得了效率超过 28% 的四端钙钛矿/硅叠层太阳能电池.

**关键词:** 硅电池切割, 边缘复合, 异质结电池, 钙钛矿/硅叠层太阳能电池

**PACS:** 73.50.Pz, 84.60.Jt, 88.40.H-

**DOI:** 10.7498/aps.72.20222209

## 1 引言

硅太阳能电池经过 70 多年的发展, 其实验室效率已经达到 26.7%, 逐渐趋近肖克利-奎伊瑟 (SQ) 效率极限 29.4%, 未来的提升空间有限<sup>[1-3]</sup>. 钙钛矿太阳能电池 (PSCs) 由于成本低、吸光系数高、载流子迁移率高、带隙可调等优势, 近 10 多年来得到了广泛的关注, 其最高认证效率已经达到 25.7%<sup>[4-8]</sup>. 将 PSCs 与硅电池组合成双结叠层电池, 可以更有效地利用太阳光, 减小热弛豫损失, 从而突破单结电池的 SQ 效率极限, 进一步降低光伏

的度电成本<sup>[9,10]</sup>. 通常钙钛矿/硅叠层太阳能电池 (TSCs) 的结构有两种: 两端 (2T) TSCs 和四端 (4T) TSCs<sup>[11,12]</sup>. 2T-TSCs 需要考虑光学耦合和电学耦合<sup>[13,14]</sup>, 而 4T-TSCs 只需要考虑光学耦合<sup>[15,16]</sup>.

理论模拟研究表明, 4T-TSCs 的 SQ 效率极限高达 45%<sup>[17,18]</sup>. 为了在实验室实现高效率的 4T-TSCs 的研究, 既需要开发高效率的钙钛矿顶电池, 也需要制备与顶电池面积匹配的小面积的高效率硅底电池. 目前针对 4T-TSCs 的研究主要集中在顶层半透明钙钛矿太阳能电池 (ST-PSCs). Chen 等<sup>[19]</sup>研究了宽带隙 PSCs 的离子迁移, 并通过苯胺盐表面钝化减少了顶电池的开路电压 ( $V_{OC}$ ) 损

\* 区域创新发展联合基金重点项目 (批准号: U21A2078) 和国家自然科学基金 (批准号: 22179042) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xj\_qin@qny.chng.com.cn

‡ 通信作者. E-mail: lqxie@hqu.edu.cn

‡‡ 通信作者. E-mail: weizhanhua@hqu.edu.cn

失,抑制了相分离. Wang等<sup>[20]</sup>通过在空穴传输层一侧诱导形成超薄的准二维钙钛矿,有效地抑制了由于离子缺陷导致的非辐射复合损失,实现了 $V_{OC}$ 损失仅0.43 V和光电转换效率(PCE)为17.84%的ST-PSCs. Chen等<sup>[21]</sup>通过添加路易斯碱降低了缺陷态浓度,同时将载流子扩散长度增至2  $\mu\text{m}$ ,从而使得1.63 eV带隙的ST-PSCs的PCE超过19%. Ying等<sup>[22]</sup>通过将2,9-二甲基-4,7-二苯基-1,10-菲咯啉(BCP)与银(Ag)结合,降低了电子的提取壁垒,有效保护了富勒烯(C60)和钙钛矿层免受溅射破坏,将反式ST-PSCs的FF提高到80.1%,器件的PCE达到18.19%. Wang等<sup>[23]</sup>通过真空热蒸发沉积薄膜的方法,以三氧化钼( $\text{MoO}_3$ )/金纳米网/ $\text{MoO}_3$ “三明治结构”作为透明电极,制备的ST-PSCs具有18.3%的PCE,得到了PCE超过27.0%的4T-TSCs. 经过前人的努力,通过抑制宽带隙钙钛矿的相分离、减少 $V_{OC}$ 损失、提升窗口层的透光性与能级匹配等策略,使4T-TSCs的器件效率得到大幅提升<sup>[24–27]</sup>. 相较而言,硅底电池受到的关注较少.

为了进一步提升4-T-TSCs的性能,本工作从减少异质结硅电池(HIT电池)的切割损失出发,研究了激光切割与砂轮划片切割对硅电池性能的影响. 发现纳秒激光切割法的热损伤和热传导较为严重,造成严重的边缘非辐射复合,切割后电池的 $V_{OC}$ 和填充因子(FF)显著下降,PCE损失高达3%以上. 而采用砂轮划片冷加工的方法无热损伤,避免了边缘烧蚀,得到的器件截面较为平整,非辐射复合得到显著抑制. 基于冷加工切割法得到的器件的 $V_{OC}$ 和FF得到显著提高. 将得到的HIT电池与正式ST-PSCs进行机械堆叠,获得了效率超过28%的4-T-TSCs.

## 2 实验

### 2.1 实验材料

使用的实验材料信息如下:单晶硅片购自西安隆基硅材料有限公司,氧化锡胶体溶液( $\text{SnO}_2$ , 15%, Alfa Aesar),碘化铅( $\text{PbI}_2$ , 99.99%, TCI),溴化铅( $\text{PbBr}_2$ , 99.99%, 西安宝莱特光电科技有限公司),碘化铯( $\text{CsI}$ , 99.999%, Sigma-Aldrich)甲脒氢碘酸盐(FAI, 99.99%, GreatcellSolar),甲胺氢碘酸盐(MAI, 98%, TCI),甲胺氢氯酸盐

(MACl, 98%, TCI),双三氟甲基磺酰亚胺锂(Li-TFSI, 99.95%, Sigma-Aldrich),4-叔丁基吡啶(4-TBP),Spiro-OMeTAD(99.5%, 飞鸣科技有限公司),乙腈(99.8%, Sigma-Aldrich),二甲基亚砜(DMSO, 99.9%, Sigma-Aldrich),N,N-二甲基甲酰胺(DMF, 99.8%, Sigma-Aldrich),异丙醇(IPA, 99.8%, Sigma-Aldrich),氯苯(CB, 99.8%, Sigma-Aldrich),三氧化钼( $\text{MoO}_3$ , 99.5%, Lumtec),氧化铟锡(ITO)靶材( $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2 = 90:10$ , 北京中诺新材科技有限公司).

### 2.2 半透明钙钛矿太阳能电池的制备

将 $\text{SnO}_2$ 胶体溶液用去离子水(体积比为1:2)稀释得到 $\text{SnO}_2$ 纳米晶溶液. 钙钛矿采用两步法制备,将437 mg的 $\text{PbI}_2$ 、348.7 mg的 $\text{PbBr}_2$ 和24.7 mg的 $\text{CsI}$ 溶于1 mL DMF和DMSO混合溶剂(体积比为9:1)获得 $\text{PbI}_2$ 前驱体溶液. 将67.4 mg FAI、25.8 mg MAI和28.5 mg MACl溶于1 mL IPA中制备有机盐溶液. 将72.3 mg Spiro-OMeTAD溶于1 mL CB中,加入29.0  $\mu\text{L}$  4-TBP和17.5  $\mu\text{L}$  Li-TFSI(520 mg/mL的乙腈溶于)得到空穴传输层溶液.

首先分别用蒸馏水、丙酮、异丙醇和乙醇在超声作用下清洗氧化铟锡(ITO)衬底20 min,然后对基底进行等离子体处理5 min. 将稀释的 $\text{SnO}_2$ 纳米晶溶液在ITO衬底上以4000 rad/min的速度旋涂20 s,然后在空气中150  $^{\circ}\text{C}$ 的热台上退火15 min得到电子传输层. 在 $\text{N}_2$ 手套箱内,采用两步顺序沉积法制备钙钛矿薄膜,在第1步中, $\text{PbI}_2$ 前驱体溶液在 $\text{SnO}_2$ 衬底上以2000 rad/min旋涂30 s,然后在 $\text{N}_2$ 气氛中70  $^{\circ}\text{C}$ 退火1 min;第2步,将有机盐溶液滴加到 $\text{PbI}_2$ 基底上先浸泡20 s,然后以1700 rad/min的转速旋涂30 s,在空气中(相对湿度为10%–20%)150  $^{\circ}\text{C}$ 退火15 min,得到均匀光滑的钙钛矿薄膜. 在此基础上将Spiro-OMeTAD溶液在钙钛矿膜上以3000 rad/min的转速旋涂30 s得到空穴传输层. 对于窗口层的制备,在高真空( $5 \times 10^{-4}$  Pa)下热蒸镀20 nm厚的 $\text{MoO}_3$ 缓冲层,沉积速率为0.5  $\text{\AA}/\text{s}$ (1  $\text{\AA} = 0.1$  nm);然后采用射频磁控溅射技术,在70  $^{\circ}\text{C}$ 下沉积200 nm的ITO形成透明电极,其中射频功率为50 W,沉积速率为0.5  $\text{\AA}/\text{s}$ ,腔压维持在0.18–0.22 Pa. 最后,通过热蒸镀在器件边缘沉积厚度为70 nm的银电极.

### 2.3 小面积 HIT 电池的制备

采用电阻率为 1—5  $\Omega$ 、厚度为 150  $\mu\text{m}$  的 n 型单晶硅片作为衬底. 经过碱性抛光去损伤层和碱性 (KOH) 制绒得到均匀的小金字塔织构, 按照标准的 RCA 标准清洗法进行清洗. 制绒工艺完成后, 在高频等离子体增强化学气相沉积 (VHF-PECVD) 系统中, 将非晶硅本征层 a-Si:H(i) 和硼掺杂氢化非晶硅层 a-Si:H(p) 沉积在硅片背面, 转移翻面后将非晶硅本征层 a-Si:H(i) 和磷掺杂氢化非晶硅层 a-Si:H(n) 沉积在硅片正面. 随后通过磁控溅射在正反面分别制备 90 nm 的 ITO 透明导电电极, 最后采用低温丝网印刷法制备银栅电极, 上述整片 HIT 电池的制备由福建钧石能源有限公司完成. 激光切割使用镭杰明激光科技有限公司的纳秒红外 (1064 nm) 光纤激光器, 频率为 850 kHz, 脉宽为 2 ns, 速度 400 mm/s, 功率为 8—18 W. 砂轮划片机的型号为和研科技有限公司 DS616 精密砂轮划片机, 采用的转速为 30000 rad/min, 切割步进速度为 2 mm/s, 所采用的砂轮为厦门石之锐材料科技有限公司的电镀镍砂轮 (nickel plating)、铜锡砂轮 (Cu-Sn) 和树脂砂轮 (resin).

### 2.4 器件表征

利用场发射扫描电子显微镜 (JEOL JSM-7610F) 拍摄切割后 HIT 电池截面的形貌. 通过三

维光学轮廓仪 (ZYGO NewView 9000) 观察 HIT 电池截面的三维轮廓和表面粗糙度. 使用 CHI660E 电化学工作站采集器件的电化学阻抗谱 (EIS). 使用 Keithley 2400 在黑暗 (环境) 中采集暗态电流密度-电压 ( $J$ - $V$ ) 曲线. 瞬态光电压和瞬态光电流由 Zahner 电化学工作站配合瞬态电化学测试装置得到. 使用 EnliTech 太阳光模拟器在 AM 1.5G 条件下, 配合数字源表 (Keithley 2400) 测量  $J$ - $V$  特性, 扫描速率为 250 mV/s (电压阶跃为 10 mV, 延时时间为 40 ms). 单个 ST-PSCs 子电池的活性面积为 0.20  $\text{cm}^2$ , 采用有效面积为 0.12  $\text{cm}^2$  的黑色掩模版来标定有效面积. 使用外量子效率 (EQE) 测试系统 (EnliTech, QER666) 测试器件的 EQE.

## 3 结果与讨论

HIT 电池的结构如图 1(a) 所示, 商业化的 HIT 电池的尺寸通常为 G1 (158.75 mm  $\times$  158.75 mm). 目前实验室通常用规格为 20 mm  $\times$  20 mm 的玻璃衬底制备 PSCs, 因此在制备 4T-TSCs 时, 需要将 HIT 电池切割成与 PSCs 面积相匹配的小尺寸硅电池 (如 (19 mm  $\times$  19 mm)), 如图 1(b) 所示. 常用的方法是激光切割法, 即利用高能激光束照射在器件表面, 使被照射区域局部气化, 从而达到划片的目的 [28,29]. 研究了激光功率对切割后 HIT 电

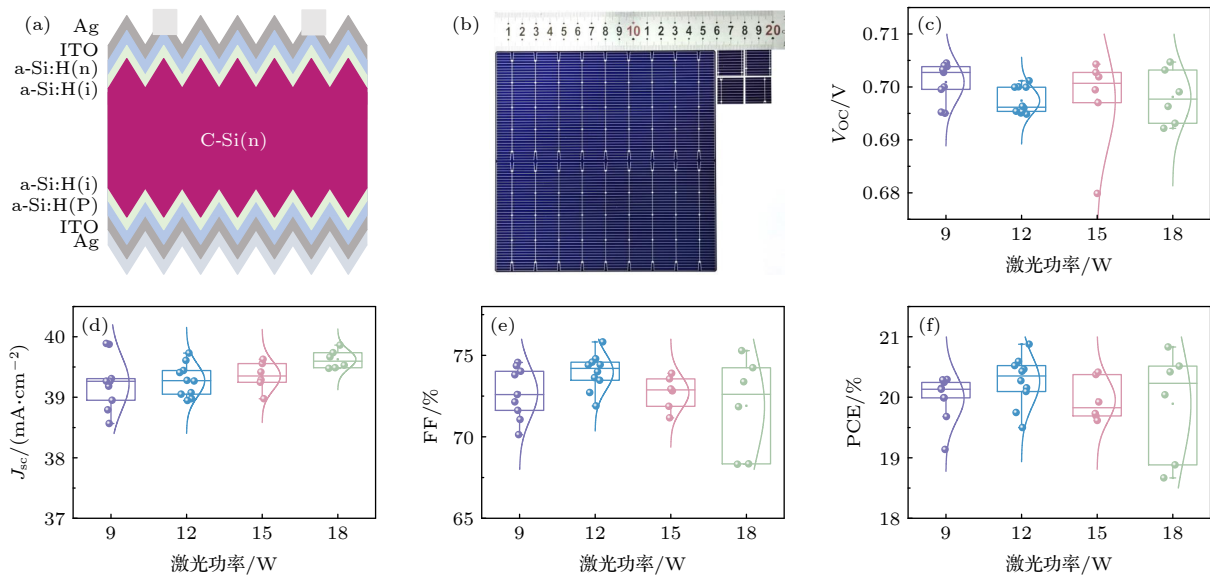


图 1 (a) HIT 电池的结构示意图; (b) HIT 电池切割前后示意图; (c)—(f) 激光切割优化后的器件性能 (c)  $V_{oc}$ , (d)  $J_{sc}$ , (e) FF, (f) PCE

Fig. 1. (a) The structure of HIT silicon solar cell; (b) optical image of HIT silicon solar cell before and after cutting; (c)–(f) device performance after laser cutting: (c)  $V_{oc}$ , (d)  $J_{sc}$ , (e) FF, (f) PCE.

池性能的影响, 切割后器件性能的参数统计图如图 1(c)—(f) 所示. 表 1 列出了 HIT 电池切割前和不同激光功率切割后的性能, 可以看到切割前器件效率为 23.83%,  $V_{OC}$  为 0.731 V, 短路电流密度 ( $J_{SC}$ ) 为 39.46 mA/cm<sup>2</sup>, FF 为 82.61%; 而经过优化后在激光功率 12 W 时获得了切割后的最高效率为 20.88%,  $V_{OC}$  为 0.701 V,  $J_{SC}$  为 39.27 mA/cm<sup>2</sup>, FF 为 75.83%. 与切割前相比,  $V_{OC}$  和 FF 均明显下降, PCE 损失超过 3%. 由于激光划片时要达到约 2355 °C 时才能使硅材料气化, 激光中心区域的热量沿着硅衬底和金属电极传导, 从而使烧蚀区域扩大. 而 HIT 电池表面的非晶硅层在超过 250 °C

会被破坏 [30], 所以消除热效应的影响从而减少  $V_{OC}$  和 FF 的下降是急需解决的问题.

由于激光切割的热损伤和热传导比较严重, 所以尝试使用砂轮划片冷加工的方法对 HIT 电池进行切割. 砂轮划片机砂轮切割工艺是以强力磨削为手段, 通过空气静压支承的电主轴带动超薄金刚石刀片高速旋转, 用刀片上的微细磨粒与被加工物进行接触, 使划切处的材料产生碎裂, 配合水的冲洗作用将切屑带出 [31]. 分别尝试利用电镀镍砂轮、Cu-Sn 砂轮和树脂砂轮 3 种不同黏合剂的超薄砂轮对 HIT 电池进行切割, 切割后的性能参数统计如图 2(a)—(d) 所示, 最优器件的具体性能参数如表 2 所列. 电镀镍砂轮硬度过大, 排屑能力差, 磨粒容易产生脱落, 不适合脆性材料的切割, 切割后器件的  $V_{OC}$  和 FF 损失较大, 导致最终 PCE 低至 19% 左右. Cu-Sn 砂轮切割后器件的  $V_{OC}$  达到 0.715 V 左右, 同时 FF 也达到 75% 以上, 使最终的 PCE 达到 21% 以上. 树脂砂轮质地太软, 出刃快, 孔隙率高, 同时银栅线会影响其锋利性, 使切割后器件的  $V_{OC}$  和 FF 相比 Cu-Sn 砂轮的器件均有所下降, 导致最终器件的 PCE 仅有 20.8% 左右. 综上所述, Cu-Sn 砂轮由于强度适中, 较适合脆性材料的切割, Cu-Sn 砂轮切割后的 HIT 电池可以得到较优的性能.

表 1 切割前与不同激光功率切割后对应 HIT 电池的最优性能

Table 1. Optimal performance of HIT silicon solar cell before and after cutting with different laser power.

Laser power	$V_{OC}/V$	$J_{SC}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	FF/%	PCE/%
Before cutting	0.731	39.46	82.61	23.83
9 W	0.703	38.79	74.36	20.29
12 W	0.701	39.27	75.83	20.88
15 W	0.697	39.62	73.90	20.41
18 W	0.699	39.53	74.24	20.52

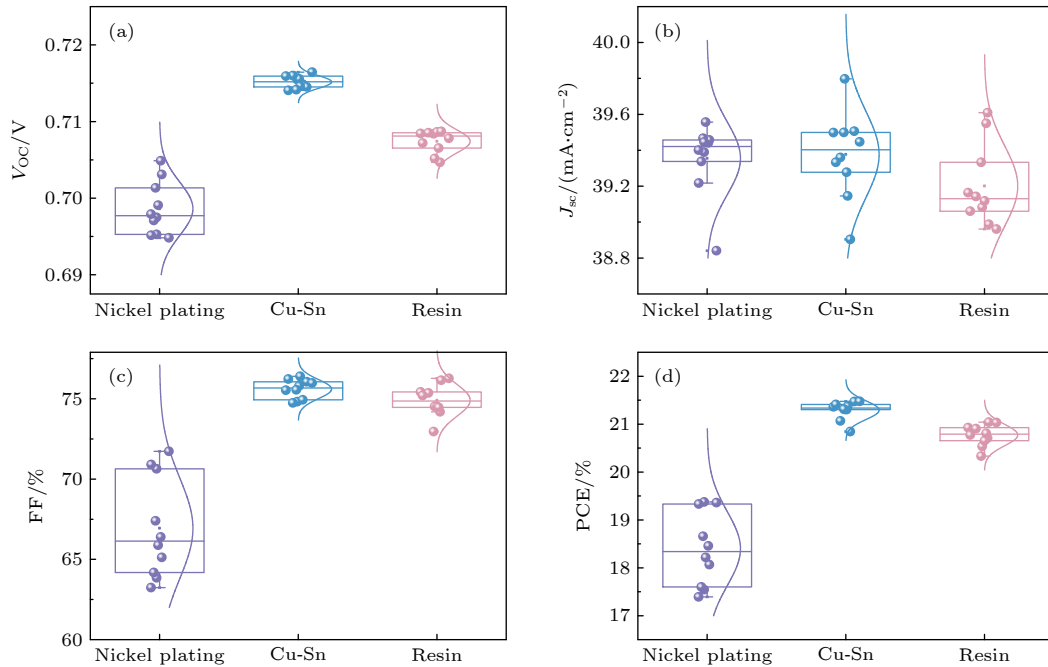


图 2 砂轮黏合剂的种类对切割后 HIT 电池性能的影响 (a)  $V_{OC}$ ; (b)  $J_{SC}$ ; (c) FF; (d) PCE

Fig. 2. The influence of different grinding wheel adhesives on the performance of HIT silicon cells after cutting: (a)  $V_{OC}$ ; (b)  $J_{SC}$ ; (c) FF; (d) PCE.



表 2 不同砂轮黏合剂所对应切割后 HIT 电池最优器件的性能

Table 2. Optimal performance of HIT silicon solar cell after cutting with different grinding wheel adhesives.

Adhesives	$J_{SC}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	$V_{OC}/\text{V}$	FF/%	PCE/%
Nickel plating	39.45	0.695	70.64	19.37
Cu-Sn	39.47	0.716	75.98	21.47
resin	38.98	0.709	76.15	21.04

进一步优化 Cu-Sn 砂轮中金刚石粒度的尺寸来减少切割损伤. 砂轮名称的尾号越大, 代表金刚石粒度越小. 如图 3(a)—(d) 所示, Cu-Sn #400 的金刚石粒度最大, 其切割后的崩边比较厉害, 且截面较为粗糙, 导致  $V_{OC}$  和 FF 均大幅下降. 随着砂轮金刚石粒度的减小, 器件的  $V_{OC}$  呈现大幅提升后又开始下降,  $J_{SC}$  基本保持不变, FF 也呈现先大幅提升后又微弱下降的趋势, 综合了  $V_{OC}$  和 FF 的变化影响, 最终器件的 PCE 也呈现先上升后下降的趋势, Cu-Sn #2000 获得了最高的 PCE. 这主要是由于金刚石磨粒越小, 硅片正背面的崩边越小, 切割面越平整, 损伤区域越小. 当磨粒达到 #3000 时, 磨粒太小导致强度过低. 表 3 展示了 Cu-Sn 砂轮不同金刚石粒度对应切割后 HIT 电池的最优性能, Cu-Sn #2000 对应的器件获得最高的 PCE 为

21.81%,  $V_{OC}$  达到 0.704 V,  $J_{SC}$  为  $39.52 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , FF 达到了 78.37%. 与激光切割后的器件性能相比较, 砂轮划片机优化后器件的  $V_{OC}$  有小幅度的提高, FF 大幅提升, 导致最终的平均 PCE 提高了 1% 左右, 有效降低了切割效率损失.

表 3 Cu-Sn 刀具中金刚石磨粒的粒度对应切割后 HIT 电池最优器件的性能

Table 3. The influence of the size of diamond abrasive in Cu-Sn cutter on the performance of HIT silicon solar cells after cutting.

Particle size	$V_{OC}/\text{V}$	$J_{SC}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	FF/%	PCE/%
#400	0.703	39.23	73.48	20.28
#800	0.716	39.45	75.98	21.47
#2000	0.704	39.52	78.37	21.81
#3000	0.712	39.35	76.21	21.34

为了探究砂轮划片机切割和激光切割引起性能差异的原因, 对切割后的器件截面形貌进行分析, 结果如图 4 所示. 图 4(a),(b) 分别为砂轮划片机和激光切割后的器件截面形貌, 可以看出砂轮划片机切割后 HIT 电池截面只有进刀侧和出刀侧有略微的崩边 (箭头方向为砂轮进刀方向), 中间区域较为平整, 而激光切割后的截面上半部分激光烧蚀的区域极其粗糙, 下半部分机械断裂区域较为平整 (箭头方向为激光进光方向). 图 4(c),(d) 分别为

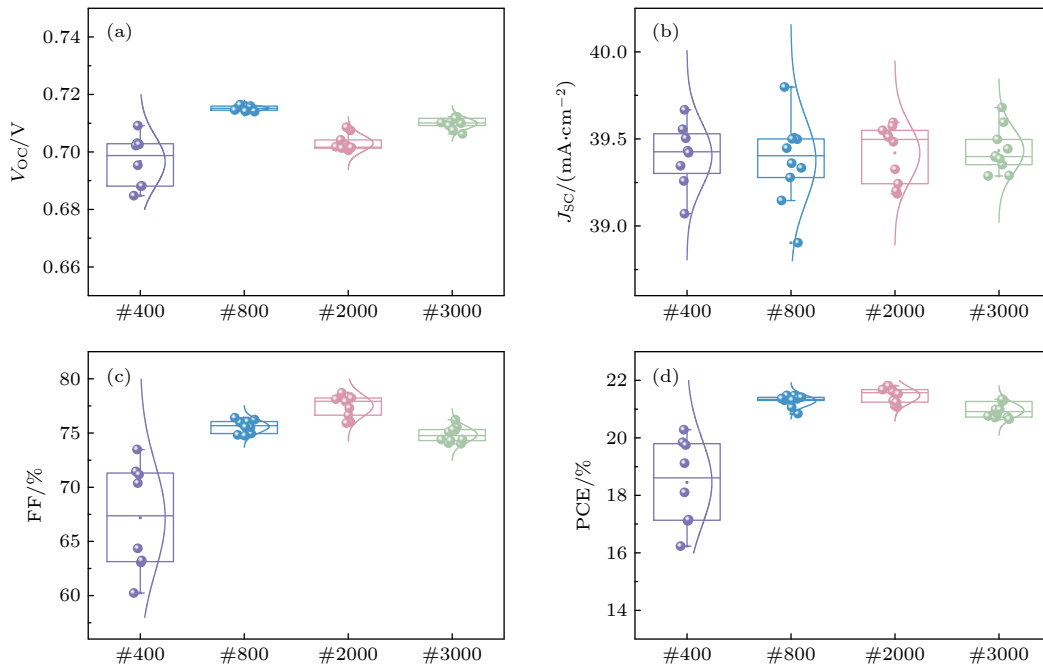


图 3 Cu-Sn 刀具中金刚石磨粒的粒度对切割后 HIT 电池性能的影响 (a)  $V_{OC}$ ; (b)  $J_{SC}$ ; (c) FF; (d) PCE

Fig. 3. Influence of diamond particle size in Cu-Sn cutter on the performance of HIT silicon solar cell after cutting: (a)  $V_{OC}$ ; (b)  $J_{SC}$ ; (c) FF; (d) PCE.

砂轮划片机和激光切割后的截面形貌的局部放大图, 可以观察到砂轮划片机切割后的截面有横向金刚石颗粒造成的密集刮痕, 而激光切割后能看到杂乱无章的烧蚀区域和未及时排除的硅屑凝结<sup>[32]</sup>. 图 4(e),(f) 分别为砂轮划片机切割和激光切割后器件截面的三维轮廓图 ( $70\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ ), 可以看出砂轮划片机切割的表面粗糙度 ( $S_a$ ) 为  $21\ \text{nm}$ ; 而激光切割的  $S_a$  为  $624\ \text{nm}$ . 说明砂轮划片机对 HIT 电池的影响区域更小, 器件的损伤更小. 同时也采用万用表测试了切割后 HIT 电池两端的电阻, 结果显示砂轮划片机切割后的器件电阻为  $3\ \text{M}\Omega$  左右, 而激光切割后的器件电阻只有  $1.2\ \text{M}\Omega$  左右. 器件两端电阻的减小可能是由于激光切割过程 ITO、非晶硅和银颗粒会与侧面的硅衬底进行粘结, 导致绝缘性下降. 而砂轮划片机切割过程中由于冷加工的方式只会产生粉末, 且在水的冲洗下直接被带走, 减少了杂质的引入.

为了研究切割后器件内部载流子的复合情况, 首先通过暗态下的电化学阻抗谱 (EIS) 测量不同器件复合电阻 (施加偏压为  $0.05\ \text{V}$ ), 可以明显看出砂轮划片机切割的器件具有更大的复合电阻 (图 5(a)), 表明这种冷加工的方式确实可以减少器件边缘的载流子复合. 同时也测试了不同器件的暗态  $J$ - $V$  曲线, 如图 5(b) 所示, 暗态下砂轮划片机切割的器件电流密度更小, 这说明此工艺获得的太阳能电池复合路径更少, 表现出更理想的二极管行为. 在光照条件下, 分析了两种切割方式获得的器件的瞬态光电压 (TPV) 和瞬态光电流 (TPC) 曲

线. 如图 5(c),(d) 所示, 砂轮划片机切割的器件具有更大的光电压寿命和更小的光电流寿命, 表明器件的非辐射复合得到抑制, 载流子提取更高效. 同时也研究了短路  $J_{\text{SC}}$  和  $V_{\text{OC}}$  对入射光强度的依赖关系, 如图 5(e),(f) 所示. 其中  $J_{\text{SC}}$  随光强的变化可以表示为

$$J_{\text{SC}} \propto I^\alpha, \quad (1)$$

(1) 式中  $\alpha$  为指数因子,  $I$  为光照强度. 根据砂轮划片机切割后器件的  $J_{\text{SC}}$  与光强的关系拟合得到  $\alpha$  为  $0.961$ , 而激光切割的拟合得到  $\alpha$  为  $0.902$ , 砂轮划片机切割得到的  $\alpha$  更接近  $1$ , 表明其边缘复合得到一定的抑制<sup>[33]</sup>. 为了进一步研究器件内部载流子复合的情况, 测试了不同光强下的  $V_{\text{OC}}$ , 可表示为

$$V_{\text{OC}} \propto n \frac{kT}{q} \ln I, \quad (2)$$

(2) 式中  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为开尔文温度,  $q$  为基元电荷,  $n$  为理想因子. 拟合后可得砂轮划片机切割后的理想因子为  $1.544$ , 激光切割后的理想因子为  $1.860$ , 相比之下砂轮划片机切割后的  $n$  值更接近于理想值  $1$ , 表明砂轮划片机切割这种冷加工的方法会更有利于减少边缘缺陷的产生<sup>[34]</sup>. 综上所述, 利用砂轮划片机切割 HIT 电池可以有效降低器件边缘的非辐射复合.

将 HIT 电池作为底电池与顶部的 ST-PSCs 进行机械堆叠, 制备成 4T-TSCs, 其结构如图 6(a) 所示, 其中 PDMS 为聚二甲基硅氧烷通过复刻工

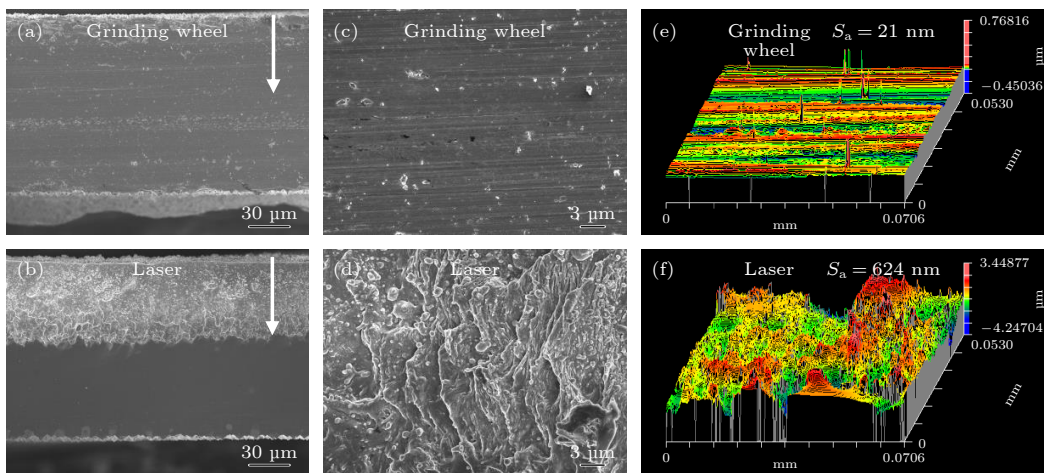


图 4 砂轮划片机切割与激光切割后 HIT 电池截面形貌和粗糙度对比 (a), (b) 截面形貌; (c), (d) 截面局部放大图; (e), (f) 三维轮廓图

Fig. 4. Comparison of cross-sectional SEM images and roughness of HIT silicon solar cell after grinding wheel and laser cutting: (a), (b) Cross-sectional morphology; (c), (d) partial magnification of cross-section morphology; (e), (f) 3 D outline of the cross-section.

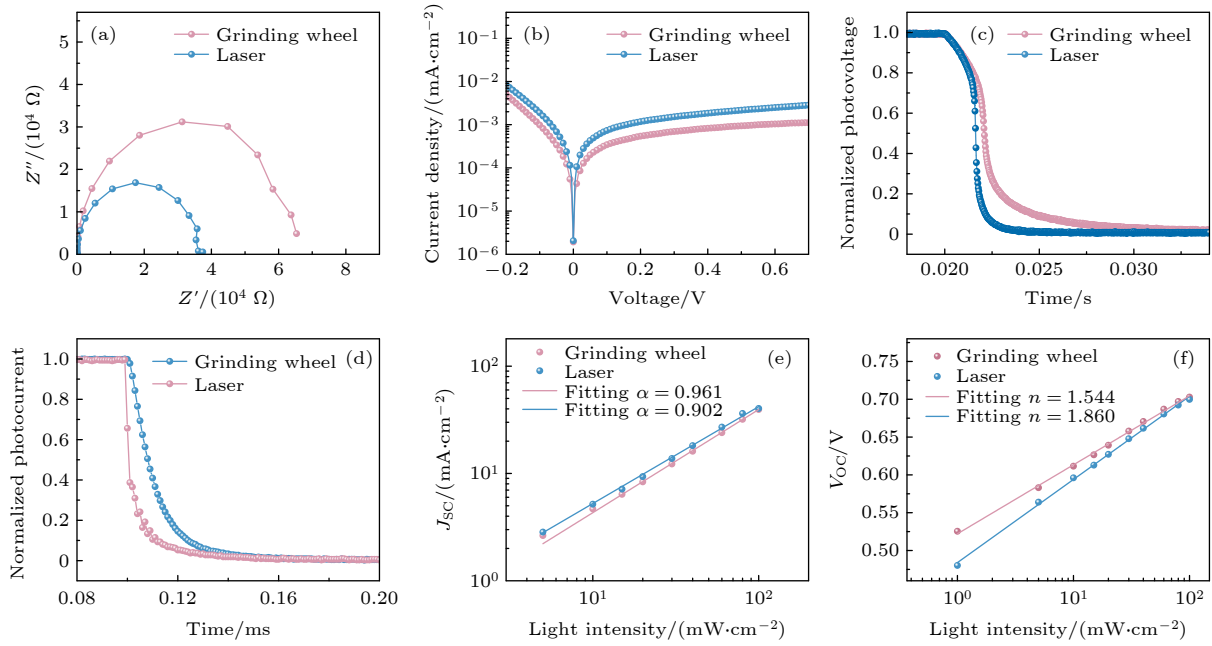


图 5 切割后 HIT 电池的载流子复合动力学 (a) 在 0.05 V 偏压和黑暗条件下测得器件 EIS; (b) 器件的暗态  $J$ - $V$  曲线; (c) 瞬态光电压; (d) 瞬态光电流; (e) 短路电流密度与光强的关系; (f) 开路电压与光强的关系

Fig. 5. Charge recombination kinetics of silicon solar cells after cutting: (a) Electrochemical impedance spectra of devices measured in the dark at 0.05 V bias; (b) dark  $J$ - $V$  curves of the devices; (c) TPV; (d) TPC; (e) relationship between  $J_{SC}$  and light intensity; (f) relationship between  $V_{OC}$  and light intensity.

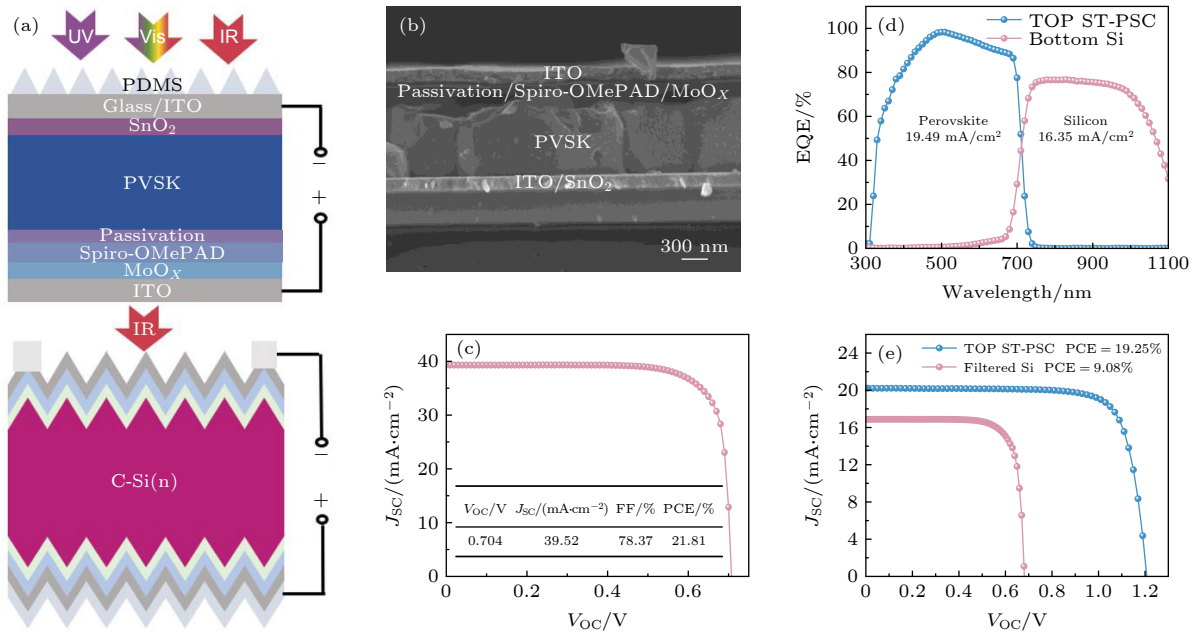


图 6 (a) 4T-TSCs 结构示意图; (b) ST-PSCs 的截面 SEM 形貌; (c) 切割后 HIT 硅电池的  $J$ - $V$  曲线; (d) 4T-TSCs 的 EQE 曲线; (e) 4T-TSCs 的  $J$ - $V$  曲线

Fig. 6. (a) Schematic diagram of the structure of 4T-TSCs; (b) cross-sectional SEM image of ST-PSC; (c)  $J$ - $V$  curve of HIT silicon solar cell after cutting; (d) EQE curves of 4T-TSCs; (e)  $J$ - $V$  curves of 4T-TSCs.

艺制备的减反射薄膜, Passivation 为钝化层。通过对器件横截面进行 SEM 表征 (见图 6(b)) 来证明其结构。图 6(c) 所示为切割成小面积后的 HIT 电池的  $J$ - $V$  曲线和详细参数, 其最优效率为 21.81%。

通过外量子效率 (EQE) 来表征相应 4T-TSCs 的光谱响应, 如图 6(d) 所示, 顶层 ST-PSCs 在 300—400 nm 波长的光谱响应较低, 而在 500—700 nm 波长范围的光谱响应均达到 80% 以上, 积分电流

密度为 19.49 mA/cm<sup>2</sup>,  $J$ - $V$ 曲线测得  $J_{SC}$  误差仅为 3.6%; 并且由于紫外和可见光波段的光 (300—700 nm) 基本被顶层 ST-PSCs 吸收, 所以底层 HIT 硅电池仅在 750—1000 nm 波长范围内有较强的光谱效应, HIT 硅电池的积分电流密度为 16.35 mA/cm<sup>2</sup>. 图 6(e) 为 4T-TSCs 的  $J$ - $V$  曲线, 详细参数如表 4 所示, HIT 电池经过顶层 ST-PSCs 滤光后, 其  $V_{OC}$  下降到 0.681 V,  $J_{SC}$  降低到 16.87 mA/cm<sup>2</sup>, FF 为 79.04%, PCE 下降到 9.08%; ST-PSCs 顶电池的 PCE 高达 19.25%,  $V_{OC}$  为 1.207 V,  $J_{SC}$  为 20.22 mA/cm<sup>2</sup>, FF 也达到 78.81%. 因此获得了 PCE 为 28.33% 的四端钙钛矿/硅叠层太阳能电池.

表 4 4 T-TSCs 的详细  $J$ - $V$  参数  
Table 4. Detailed  $J$ - $V$  parameters of 4 T-TSCs.

Device	$V_{OC}/V$	$J_{SC}/$ (mA·cm <sup>-2</sup> )	FF/%	PCE/%
Silicon cell (filtered by ST-PSC)	0.680	16.87	79.04	9.08
ST-PSCs	1.207	20.22	78.81	19.25
4 T-TSCs				28.33

## 4 结 论

本文采用砂轮划片机对 HIT 电池进行切割可以减少器件的边缘复合, 提升了四端钙钛矿/硅叠层太阳能电池的效率. 与激光切割相比, 砂轮划片机切割这种冷加工的方法可以有效避免 HIT 电池边缘的热损伤, 得到的器件截面较为平整, 损伤区域较小. 因此, 砂轮划片机切割后的 HIT 电池的非辐射复合得到抑制, 器件的  $V_{OC}$  和 FF 得到提高, 平均 PCE 提高了 1% 左右. 将切割后的 HIT 电池与正式 ST-PSCs 进行机械堆叠, 获得了效率超过 28% 的 4T-TSCs.

## 参考文献

[1] Binetti S, Acciarri M, Le Donne A, Morgano M, Jestin Y 2013 *Int. J. Photoenergy* **2013** 249502  
 [2] Yoshikawa K, Kawasaki H, Yoshida W, Irie T, Konishi K, Nakano K, Uto T, Adachi D, Kanematsu M, Uzu H, Yamamoto K 2017 *Nat. Energy* **2** 17032  
 [3] Andreani L C, Bozzola A, Kowalczewski P, Liscidini M, Redorici L 2019 *Adv. Phys. X* **4** 1548305  
 [4] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T 2009 *J. Am. Chem. Soc.* **131** 6050  
 [5] Lee M M, Teuscher J, Miyasaka T, Murakami T N, Snaith H J 2012 *Science* **338** 643

[6] Yang W S, Noh J H, Jeon N J, Kim Y C, Ryu S, Seo J, Seok S I 2015 *Science* **348** 1234  
 [7] Jiang Q, Zhao Y, Zhang X, Yang X, Chen Y, Chu Z, Ye Q, Li X, Yin Z, You J 2019 *Nat. Photonics* **13** 460  
 [8] National Renewable Energy Laboratory 2022 *Research Cell Efficiency Records* <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed December, 2022)  
 [9] Wang R, Huang T, Xue J, Tong J, Zhu K, Yang Y 2021 *Nat. Photonics* **15** 411  
 [10] Polman A, Knight M, Garnett E C, Ehrler B, Sinke W C 2016 *Science* **352** aad4424  
 [11] Jošt M, Kegelmann L, Korte L, Albrecht S 2020 *Adv. Energy Mater.* **10** 1904102  
 [12] Liu N, Wang L, Xu F, Wu J, Song T, Chen Q 2020 *Front. Chem.* **8** 603375  
 [13] Aydin E, Allen T G, De Bastiani M, Xu L, Ávila J, Salvador M, Van Kerschaver E, De Wolf S 2020 *Nat. Energy* **5** 851  
 [14] Fu F, Li J, Yang T C-J, Liang H, Faes A, Jeangros Q, Ballif C, Hou Y 2022 *Adv. Mater.* **34** 2106540  
 [15] Coletti G, Luxembourg S L, Geerligs L J, et al. 2020 *ACS Energy Lett.* **5** 1676  
 [16] Kothandaraman R K, Jiang Y, Feurer T, Tiwari A N, Fu F 2020 *Small Methods* **4** 2000395  
 [17] Leijtens T, Bush K A, Prasanna R, McGehee M D 2018 *Nat. Energy* **3** 828  
 [18] Kim C U, Jung E D, Noh Y W, Seo S K, Choi Y, Park H, Song M H, Choi K J 2021 *EcoMat* **3** e12084  
 [19] Chen C, Song Z, Xiao C, Awni R A, Yao C, Shrestha N, Li C, Bista S S, Zhang Y, Chen L, Ellingson R J, Jiang C-S, Al-Jassim M, Fang G, Yan Y 2020 *ACS Energy Lett.* **5** 2560  
 [20] Wang D, Guo H, Wu X, Deng X, Li F, Li Z, Lin F, Zhu Z, Zhang Y, Xu B, Jen A K-Y 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2107359  
 [21] Chen B, Baek S-W, Hou Y, Aydin E, et al. 2020 *Nat. Commun.* **11** 1257  
 [22] Ying Z, Yang X, Zheng J, Zhu Y, Xiu J, Chen W, Shou C, Sheng J, Zeng Y, Yan B, Pan H, Ye J, He Z 2021 *J. Mater. Chem. A* **9** 12009  
 [23] Wang Z, Zhu X, Zuo S, Chen M, Zhang C, Wang C, Ren X, Yang Z, Liu Z, Xu X, Chang Q, Yang S, Meng F, Liu Z, Yuan N, Ding J, Liu S, Yang D 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 1908298  
 [24] Tong J, Jiang Q, Zhang F, Kang S B, Kim D H, Zhu K 2020 *ACS Energy Lett.* **6** 232  
 [25] Anaya M, Lozano G, Calvo M E, Míguez H 2017 *Joule* **1** 769  
 [26] Chen B, Ren N, Li Y, Yan L, Mazumdar S, Zhao Y, Zhang X 2021 *Adv. Energy Mater.* **11** 2100856  
 [27] Wang Q, Yan L L, Chen B B, Li R J, Wang S L, Wang P Y, Hang Q, Xu S Z, Hou G F, Chen X L, Li Y L, Ding Y, Zhang D K, Wang G C, Zhao Y, Zhang X D 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 057802 (in Chinese) [王其, 延玲玲, 陈兵兵, 李仁杰, 王三龙, 王鹏阳, 黄茜, 许盛之, 侯国付, 陈新亮, 李跃龙, 丁毅, 张德坤, 王广才, 赵颖, 张晓丹 2021 物理学报 **70** 057802]  
 [28] Chen K C, Su Y K, Lin C L, Hsu H C 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 1907  
 [29] Rauscher P, Hauptmann J, Beyer E 2013 *Phys. Procedia* **41** 312  
 [30] Park J, Dao V A, Kim S, Pham D P, Kim S, Le A H T, Kang J, Yi J 2018 *Sci. Rep.* **8** 15386  
 [31] Li M, Chen J, Lin Q, Wu Y, Mu D 2019 *Diam. Relat. Mater.* **97** 107440  
 [32] Gurevich E L, Gurevich S V 2014 *Appl. Surf. Sci.* **302** 118  
 [33] He Z, Xiong J, Dai Q, Yang B, Zhang J, Xiao S 2020 *Nanoscale* **12** 6767  
 [34] Lian X, Chen J, Shan S, Wu G, Chen H 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 46340



# Four-terminal perovskite/silicon series solar cells with 28% efficiency achieved by suppressing edge recombination\*

Fang Zheng<sup>1)2)3)</sup> Zhang Fei<sup>3)</sup> Qin Xiao-Jun<sup>1)†</sup> Yang Liu<sup>2)</sup> Jin Yong-Bin<sup>2)</sup>

Zhou Yang-Ying<sup>1)</sup> Wang Xing-Tao<sup>1)</sup> Liu Yun<sup>1)</sup>

Xie Li-Qiang<sup>2)‡</sup> Wei Zhan-Hua<sup>2)††</sup>

1) (*China Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China*)

2) (*Institute of Luminescent Materials and Information Displays, Huaqiao University, Xiamen 361021, China*)

3) (*Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China*)

( Received 19 November 2022; revised manuscript received 17 December 2022 )

## Abstract

Although the commercial application of solar cells pursues scalable and large-area devices, small-area solar cells on a scale of several centimeters possess many advantages such as low fabrication cost and facile high-throughput screening in the research laboratory. Most emerging photovoltaic technology starts from the studying of small-area devices. Recently, perovskite/silicon tandem solar cells have aroused extensive research interest because they can break through the radiative efficiency limit of single-junction solar cells. However, when commercial large-area silicon cells are cut into small pieces with a few squared centimeters in area for laboratory use, there occurs a significant efficiency loss, limiting the performance of tandem cells. Herein, to eliminate the thermal damage caused by the traditional laser cutting method and also reduce the non-radiative recombination of heterojunction silicon cells after being cut, a cold-manufacturing method of grinding wheel dicing is used to cut heterojunction silicon cells. This method is realized by high-speed mechanical grinding accompanied by liquid washing, which avoids damaging the edge of solar cell caused by heat. Compared with the device cut by laser, the heterojunction silicon cells cut by the cold-manufacturing method exhibit less cross-sectional damage. The measurements by scanning electron microscopy (SEM) and three-dimensional optical profilometer reveal that the morphology of the device edge is smoother than the counterpart cut by laser. Device physics measurements including electrochemical impedance spectrum (EIS), dark current-voltage curves, transient photovoltage (TPV), transient photocurrent (TPC), and the dependence of short-circuit current density and open-circuit voltage on light intensity reveal that the cold-manufacturing method can significantly prevent the heterojunction silicon cells from non-radiatively recombining after being cut. These results indicate that the edge-recombination of the silicon solar cells cut by grinding wheels is reduced compared with that cut by laser. As a result, statistical analysis of the device performance reveals that both the open-circuit voltage and fill factor of the device are improved, and the average photoelectric conversion efficiency increases by an absolute efficiency of ~1%. Stacking the obtained silicon cells with the normal transparent perovskite solar cells, the obtained four-terminal perovskite/silicon tandem solar cells deliver an efficiency of over 28%. This work emphasizes the importance of reducing efficiency loss during manufacturing the heterojunction silicon solar cell in fabricating high-performance silicon-based tandem solar cells.

**Keywords:** silicon cell cutting, edge recombination, heterojunction silicon cell, perovskite/silicon tandem solar cells

**PACS:** 73.50.Pz, 84.60.Jt, 88.40.H-

**DOI:** 10.7498/aps.72.20222209

\* Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U21A2078) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 22179042).

† Corresponding author. E-mail: [xj\\_qin@qny.chng.com.cn](mailto:xj_qin@qny.chng.com.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [lqxie@hqu.edu.cn](mailto:lqxie@hqu.edu.cn)

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



## 减小边缘复合助力28%效率的四端钙钛矿/硅叠层太阳能电池

方正 张飞 秦校军 杨柳 靳永斌 周养盈 王兴涛 刘云 谢立强 魏展画

### Four-terminal perovskite/silicon series solar cells with 28% efficiency achieved by suppressing edge recombination

Fang Zheng Zhang Fei Qin Xiao-Jun Yang Liu Jin Yong-Bin Zhou Yang-Ying Wang Xing-Tao  
Liu Yun Xie Li-Qiang Wei Zhan-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 057302 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222209

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222209>

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/硅异质结叠层太阳能电池: 光学模拟的研究进展

Perovskite/silicon heterojunction tandem solar cells: Advances in optical simulation

物理学报. 2021, 70(5): 057802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201585>

钙钛矿/硅叠层太阳能电池中平面a-Si:H/c-Si异质结底电池的钝化优化及性能提高

Passivation optimization and performance improvement of planar a-Si:H/c-Si heterojunction cells in perovskite/silicon tandem solar cells

物理学报. 2019, 68(2): 028101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181759>

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>

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>

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>

高效无空穴传输层碳基钙钛矿太阳能电池的制备与性能研究

Preparation and performance of high-efficient hole-transport-material-free carbon based perovskite solar cells

物理学报. 2018, 67(22): 228801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181457>