

激光辅助烧结 n 型 TOPCon 电池的制备与研究

刘自龙^{1,2}

1. 南昌大学, 中国·江西 南昌 330000

2. 浙江晶科能源有限公司, 中国·浙江 海宁 314000

摘要: 论文深入探讨了激光辅助烧结 (LECO) 技术在 n 型 TOPCon 太阳能电池制备中的应用, 分析了 LECO 技术提升电池效率的内在原理和机制, 并研究了 LECO 参数对电池性能的影响, 能够在不损害硅片钝化层和无需额外掺杂步骤的情况下, 改变电池材料的微观结构和界面特性旨在为光伏企业提供技术支持, 减少制造步骤和成本, 推动 LECO 技术在 TOPCon 太阳能电池中的大规模商业化应用。

关键词: 激光辅助烧结; n 型 TOPCon 电池; 光电转换效率; 接触电阻

Preparation and Research of Laser Assisted Sintering of n-type TOPCon Battery

Zilong Liu^{1,2}

1. Nanchang University, Nanchang, Jiangxi, 330000, China

2. Zhejiang Jinko Solar Co., Ltd., Haining, Zhejiang, 314000, China

Abstract: This paper deeply explores the application of Laser Assisted Sintering (LECO) technology in the preparation of n-type TOPCon solar cells, analyzes the inherent principles and mechanisms of LECO technology to improve cell efficiency, and studies the influence of LECO parameters on cell performance. The aim is to provide technical support for photovoltaic enterprises, reduce manufacturing steps and costs, and promote the large-scale commercial application of LECO technology in TOPCon solar cells by changing the microstructure and interface characteristics of cell materials without damaging the passivation layer of silicon wafers and without additional doping steps.

Keywords: laser assisted sintering; n-type TOPCon battery; photoelectric conversion efficiency; contact resistance

0 前言

随着全球能源需求的不断增长和对环境保护的日益重视, 太阳能作为一种清洁、可再生的能源, 受到了广泛关注。TOPCon 太阳能电池作为一种新型的高效太阳能电池, 具有较高的光电转换效率和良好的发展前景。然而, 传统的 TOPCon 太阳能电池制造工艺中, 选择性发射区 (SE) 技术虽然能够提升电池效率, 但存在操作复杂、制造成本高、可能对硅片造成热损伤等问题。激光辅助烧结 (LECO) 技术作为一种新兴的制造工艺, 能够在不损害硅片钝化层和无需额外掺杂步骤的情况下, 改变电池材料的微观结构和界面特性, 降低接触电阻, 减少制造步骤和成本, 提高生产效率和电池性能。

1 TOPCon 太阳能电池的制备

实验采用 $183.1 \times 183.1 \text{ mm}^2$ 、厚度 $120 \mu\text{m}$ 的 n 型单晶硅片, 电阻率 $0.3 \sim 2.1 \Omega \cdot \text{cm}$, 主要制备步骤如下:

①清洗制绒: 低浓度 NaOH 溶液 ($75^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$) 形成金字塔绒面结构, 反射率降至 10% 以下。

②硼扩散制备 pn 结: 管式炉三氯化硼 (BCl_3) 扩散, 温度 $840^\circ\text{C} \sim 880^\circ\text{C}$, 方阻 $147 \Omega/\text{sq}$; 高温推进后表面硼浓度降至 $1.63 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

③去 BSG 与碱抛: HF 和 NaOH 去除边缘绕扩及硼硅玻璃 (BSG), 提升背面平整度。

④背面超薄 SiO_x 与 poly 硅制备: 热氧化法沉积 $1.5 \sim 2 \text{ nm}$ SiO_x , LPCVD 法沉积 150 nm poly 硅。

⑤磷扩散掺杂: POCl_3 磷源扩散, 形成 n^+ 层, 方阻 $40 \Omega/\text{sq}$ 。

⑥去 PSG 与 RCA 清洗: 去除磷硅玻璃 (PSG) 及表面污染物。

⑦正面沉积氧化铝: ALD 法沉积 6 nm AlO_x , 增强钝化效果。

⑧正背面减反射膜: PECVD 法沉积 78 nm SiN_x , 反射率降至 5%。

⑨丝网印刷电极: Ag 浆印刷正背面栅线, 烧结形成欧姆接触。

2 激光辅助烧结 TOPCon 太阳能电池

2.1 激光辅助烧结的引入

LECO 技术作为一种新兴的烧结工艺, 能够降低烧结温度, 减少浆料对钝化层的腐蚀效果, 同时通过激光的能量密度高度集中和可控特性, 改变电池材料的微观结构和界面特性, 降低接触电阻, 提升电池性能。LECO 设备参数信息如表 1 所示。

表 1 LECO 设备信息

厂家	波长 (nm)	频率 (KHz)	精度 (μm)	电流范围 (A)
奥特维	绿光激光 532	36	0~20	0~5 (实际小于 1)
激光区域	扫描方式	功率范围 (W)		偏压范围 (V)
正面细栅	线扫	0~100 (实际小于 50)		10~31 (实际小于 20)

2.2 烧结炉温度的调整

烧结工艺中峰值温度对金属栅线的影响最大，当峰值温度过高时，会导致沉积过量的不导电熔融玻璃进入硅发射极导致电流传输受阻，峰值温度过高还会导致 Ag 扩散进 pn 结中，形成杂质缺陷降低载流子寿命；当峰值温度过低时，烧结驱动力明显不足，银和硅不能形成良好的欧姆接触，会形成典型的“欠烧”现象。

根据 LECO 技术可以恢复欠烧和接触不良的特性，降低 TOPCon 太阳能电池上温区的烧结温度来减少浆料对钝化层的腐蚀效果，同时，我们将正面细栅线的常规 Ag-Al 浆料（含 Al 量约）更换为专用 Ag 浆料（不含 Al）来减少 Al 对玻璃粉腐蚀钝化层的影响。如表 2 所示，在引入 LECO 技术后，我们将烧结炉的第 15、16 上温区设定值分别下调至 725℃和 820℃，然后通过炉温仪对电池片正面的炉温进行测试，得到实际炉温曲线如图 1 所示，LECO 技术引入前和引入后的正面实际烧结峰值温度分别为 735.38℃和 709.13℃。

表 2 引入前后不同温区的温度对比

组别	温区	1~14 温区 (°C)	15 温区 (°C)	16 温区 (°C)
引入前	上温区	230~685	740	850
	下温区	230~650	680	745
引入后	上温区	230~685	725	820
	下温区	230~650	680	745

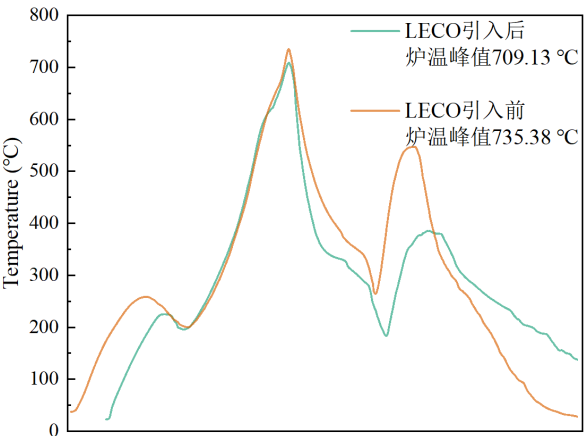


图 1 引入 LECO 技术前后烧结炉温度对比

3 激光辅助烧结的研究与分析

3.1 性能对比

3.1.1 电性能对比

LECO 引入后，TOPCon 电池的开路电压 (V_{oc}) 为 0.740V、

短路电流 (I_{sc}) 为 13.894A、填充因子 (FF) 为 85.14%、转换效率 (η) 为 26.12%，均高于 LECO 引入前的 0.737V、13.695A、84.71% 和 25.91%。相关技术参数参见表 3 和图 2。

表 3 LECO 引入前后的电性能对比

组别	η (%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	FF (%)	良率 (%)
引入前	25.91	0.737	13.695	84.71	99.92
引入后	26.12	0.740	13.894	85.14	99.83

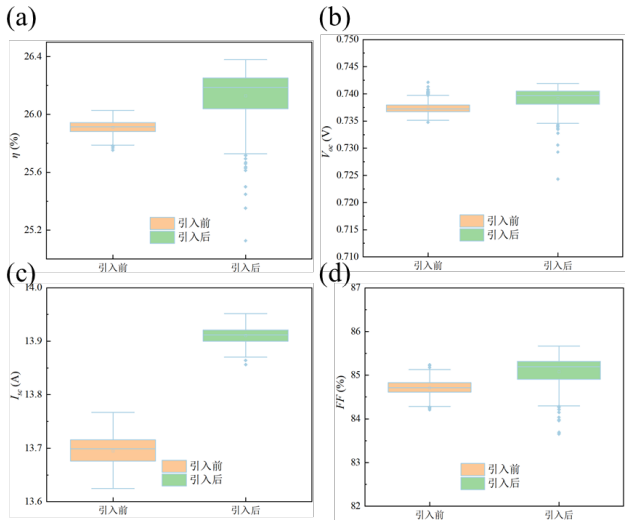


图 2 (a~d) 引入 LECO 技术前后电性能对比

3.1.2 外量子效率 (EQE) 对比

引入 LECO 前太阳能电池的 EQE 短波长响应明显低于引入后，而中长波段响应无明显差异，说明引入 LECO 前电池正面钝化结构未达到较好的结果，导致表面复合严重限制了开路电压和短路电流。相关技术参数参见图 3。

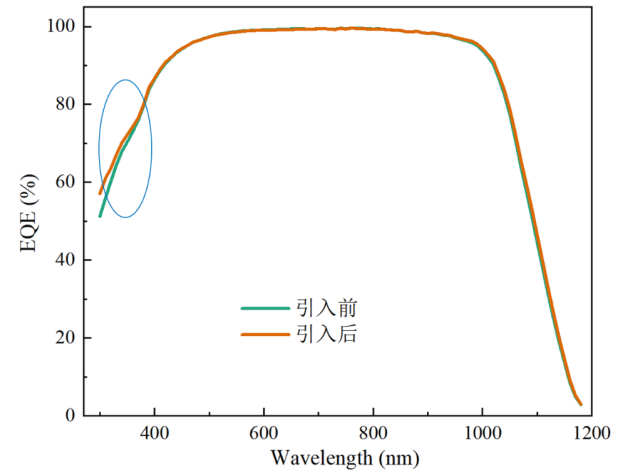


图 3 引入 LECO 前后电池外量子效率对比

3.1.3 栅线微观形貌和 Ag 浆的腐蚀状态

通过 SEM 和 EDS 测量 LECO 后的栅线微观形貌和 Ag 浆的腐蚀状态,发现正面细金属栅线粗细均匀,Ag 和 Si 形成接触结构,验证了 LECO 诱导了 Ag 和 Si 的相互扩散,形成良好的接触,提升了 TOPCon 电池的电性能。

电池正面细金属栅线粗细均匀,印刷质量较高,金属栅线先经过烘干炉进行有机溶剂的挥发,在有机溶剂的作用下相邻 Ag 颗粒会形成简单的连接,然后经过低温区烧结,Ag 颗粒表面的有机物已经完全除去,Ag 中的玻璃成分成为熔融状态,此时 Ag 颗粒被溶解成多边形球型颗粒,减小了 Ag 颗粒比表面积的同时,还消除了原始球型 Ag 粉表面的晶格缺陷,最后进行高温区烧结,熔融玻璃成分在高温下逐渐加速对 Ag 颗粒溶解,小颗粒逐渐被大颗粒吞噬,使得栅线表面 Ag 连接成一体。

3.1.4 少数载流子寿命和暗电流密度对比

LECO 引入后,太阳能电池的少数载流子寿命明显提升, J_{01} 和 J_{02} 均变小,说明经过 LECO 后的太阳能电池钝化效果更好。相关技术参数参见图 4。

单从微观结构不能完全说明 LECO 对 TOPCon 太阳能电池的影响,还需要结合相关表征参数。分别选取 5 张引入 LECO 前后的太阳能电池,采用 WCT-120 测试仪器对样品进行测试。

在对太阳能电池暗电流电压进行拟合时,单二极管模型已经无法满足要求,因此将基区、发射极和空间电荷区

的载流子复合电流分开,利用双二极管模型进行拟合研究。 J_{01} 是准中性基区和发射极区复合产生的饱和暗电流密度, J_{02} 是空间电荷区复合产生的饱和暗电流。从图 4 中可知,引入 LECO 技术后太阳能电池的 J_{01} 和 J_{02} 均变小,且少数载流子寿命有明显提升,这也侧面说明了经过 LECO 后的太阳能电池钝化效果更好。

3.1.5 电阻、接触电阻率和接触电阻对比

LECO 引入后,接触电阻率和接触电阻呈现明显下降趋势,平均接触电阻率从 $5.45\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 下降到 $3.44\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$,平均接触电阻从 2.88Ω 下降到 1.97Ω 。相关技术参数参见图 5。

3.2 激光辅助烧结的参数优化

3.2.1 激光功率对 TOPCon 电池性能的影响

通过改变 LECO 的激光功率,设计了四组实验,控制功率在 25W、30W、35W、40W,偏压不变 (16V)。实验结果显示,当功率为 25W 时,太阳能电池的转换效率最高为 26.20%,且电性能整体离散度最小,性能最稳定。当功率为 40W 时,转换效率仅为 25.99%,相关技术参数参见表 4 和图 6。

从性能表征的结果来看,功率为 25W (16V) 实验组电性能最佳,功率为 40W 实验组电性能则最差,这也与实际效率分布明显对应,这也证明了高功率会对太阳能电池钝化层造成一定的破坏,造成接触电阻及接触电阻率偏高、少子寿命偏低、复合加重,导致电性能偏低。

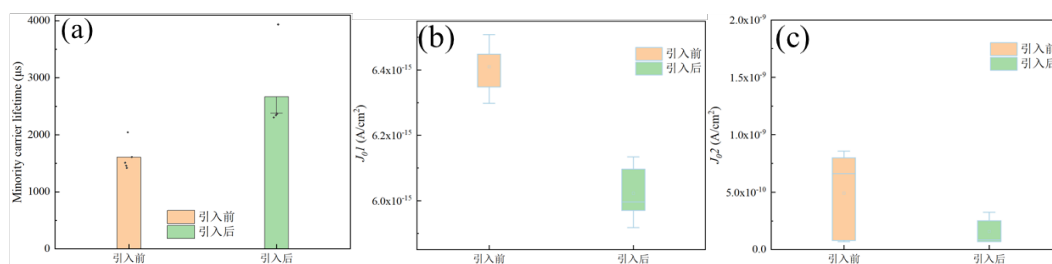


图 4 (a) 少数载流子寿命对比; (b) J_{01} 对比; (c) J_{02} 对比

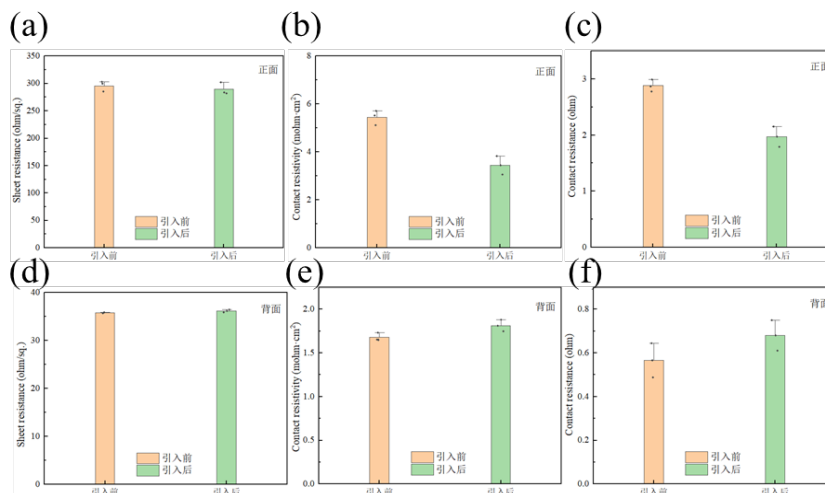


图 5 (a~f) 正面和背面方阻、接触电阻率和接触电阻的对比

表 4 不同功率下太阳能电池的电性能

组别	η (%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	FF (%)	良率 (%)
16V&25W	26.20	0.741	13.907	85.16	99.96
16V&30W	26.08	0.739	13.908	84.92	99.35
16V&35W	26.17	0.739	13.906	85.22	99.61
16V&40W	25.99	0.737	13.892	85.03	99.98

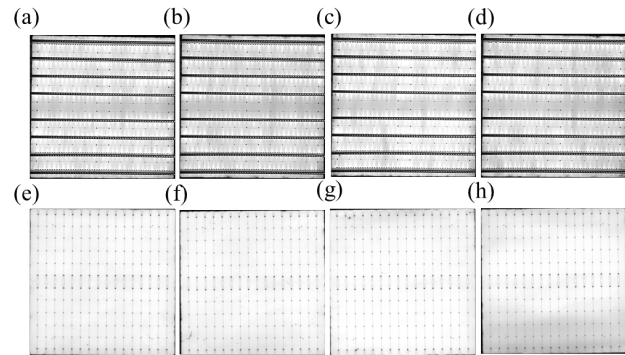


图 6 不同功率下太阳能电池的 EL、PL 测试结果，（a~d）和（e~f）分别对应 25W、30W、35W 和 40W

3.2.2 偏压对 TOPCon 电池性能的影响

在功率为 25W 的基础上，设计了四组实验，控制偏压在 12V、15V、18V、21V。实验结果显示，在中间波段和长波段范围的响应四组实验样品曲线基本完全重合，这表明适量偏压增加或减少对样品在体内和背面吸收能力无影响；当偏压为 15V 时，太阳能电池的转换效率最高为 26.21%，且电性能整体离散度最小，性能最稳定。当偏压为 21V 时，转换效率明显下降，可能是因为偏压过高引起了金属栅线与硅基接触面大幅度温度变化。相关技术参数参见表 5 和图 7。

为了探究 LECO 偏压对太阳能电池性能的影响机制，我们分别从四组实验中选取定量样品，对其进行 EL 和 PL 测试，所有的测试都是同一条件下进行且测试过程中轻拿轻放避免样品表面划伤，偏压为 12V、15V 的 EL 图像亮度高于偏压为 18V、21V，但是在电池样品中并无隐裂、局部脏污或者外在工艺损伤痕迹，这说明实验样品电性能差异极有可能来自电池内部。而且偏压为 12V、15V 的 PL 图像亮度以及实验良率也略优于偏压为 18V、21V，这可能与少子寿命有关或者接触电阻有关。

表 5 不同偏压下太阳能电池的电性能

组别	η (%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	FF (%)	良率 (%)
25W&12V	26.19	0.741	13.911	85.10	99.44
25W&15V	26.21	0.740	13.912	85.18	99.77
25W&18V	26.16	0.740	13.911	85.10	99.20
25W&21V	26.12	0.739	13.910	85.10	99.08

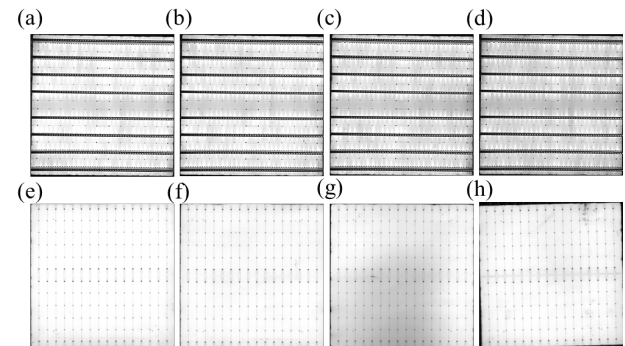


图 7 不同偏压下太阳能电池的 EL、PL 测试结果，（a~d）和（e~f）分别对应 12V、15V、18V 和 21V

4 结语

论文通过引入 LECO 技术，实现了低温烧结 TOPCon 太阳能电池，并提升了电池的转换效率。LECO 技术通过降低烧结温度减少了浆料对表面钝化层的破坏，提高了太阳能电池的钝化水平，同时利用激光的能量密度高度集中和可控特性，显著降低了 Ag 与 Si 之间的接触电阻，提升了太阳能电池的转换效率。通过优化 LECO 的参数，找到了合适的功率和偏压匹配条件，进一步提高了 TOPCon 太阳能电池的转换效率。

LECO 技术作为一种新兴的烧结工艺，具有广阔的应用前景。未来，随着 LECO 技术的不断发展和完善，有望在 TOPCon 太阳能电池的制备中发挥更大的作用，推动光伏产业的技术进步和产业升级。同时，进一步优化 LECO 技术的参数和工艺流程，有望实现更高的光电转换效率和更低的制造成本，为太阳能电池的大规模商业化应用提供有力支持。

参考文献：

[1] 吕欣.TOPCon型N-PERT双面太阳电池工艺技术的研究[D].2020.

[2] 温源远,蓝艳,于晓龙,等.可再生能源的发展现状及趋势[J].环境保护,2024,52(5):68-72.

[3] 王丽敏,王庆丰,刘晓慧.中国“十四五”时期可再生能源发展预测分析[J].科技管理研究,2024,44(5):209-215.

[4] 周颖.n型隧穿氧化层钝化接触太阳电池的量产关键问题研究[D].2021.

[5] 曾祥.硅异质结太阳电池接触电阻研究[D].2023.

[6] 张衡.n型晶硅太阳电池用无氧扩散技术研究[D].2021.

作者简介: 刘自龙(1987-),男,中国浙江嘉兴人,本科,从事电池事业部运营管理研究。