



# 多晶硅背钝化太阳能电池的光致衰减研究

浙江正泰太阳能科技有限公司 ■ 刘石勇\* 何胜 单伟

**摘 要:** 背钝化技术可以显著提升太阳电池的效率,但会使电池存在较大的光致衰减。该文系统研究了硅片种类和氢钝化技术对量产多晶硅背钝化太阳电池的光致衰减特性的影响,结果显示,掺 Ga 和 B-Ga 共掺硅片可以显著抑制多晶硅背钝化太阳电池的光致衰减,通过电注入诱导氢钝化技术可进一步改善电池的光稳定性。因此,在量产中实现 B-Ga 共掺硅片或掺 B 硅片与电注入处理技术相结合的方式都可以较好地解决多晶硅背钝化太阳电池光致衰减过大的问题。

**关键词:** 太阳电池;背钝化;光致衰减(LID)

## 0 引言

在目前所有的高效晶体硅太阳电池技术中,背钝化(Passivated Emitter and Rear Contact, PERC)技术与常规工艺的电池生产线兼容性高,生产线改造成本低,效率提升效果明显,是近年来最具性价比、被工业化大规模推广的技术。但是,背钝化太阳电池面临一个较大的技术难题——光致衰减(LID)较大。由于背钝化太阳电池采用双面钝化结构,大幅降低了表面复合速率,使电池效率得到了提升,但电池效率受体寿命降低的影响将增大,因此,LID导致的体寿命降低将会对电池效率产生致命的影响。此前,LID作为影响晶体硅太阳电池稳定发电的最重要因素,一直未得到良好地解决,如今,背钝化太阳电池相比常规工艺的晶体硅太阳电池的LID更加严重。因此,改善LID情况已成为背钝化太阳电池能否实现产业化推广的关键。寻找可有效抑制背钝化太阳电池LID的措施,仍是研究人员和产业

界都非常关心的一个热点问题。

影响晶体硅太阳电池LID的因素很多。对于掺B的p型多晶硅太阳电池而言,其最主要的影响因素是,光照后会在硅体内形成B-O复合体的亚稳态缺陷<sup>[1]</sup>。实验发现,B-O缺陷的有效浓度正比于B浓度<sup>[2]</sup>,并与间隙O浓度的平方成正比<sup>[3]</sup>。此外,过渡金属和金属也会引起杂质缺陷,比如,铁硼对<sup>[4]</sup>、铜杂质导致的缺陷<sup>[5]</sup>,在光照或少子注入后,这些缺陷都会捕获少数载流子,从而降低体寿命,导致电池效率衰减。对于B-O复合体的亚稳态缺陷,通常采用降低硅材料中B或O的含量,如用其他掺杂元素来替代B的方法来处理。对于铁硼对和与铜杂质相关的缺陷,可通过提高材料的纯度来减弱或抑制LID;在杂质含量不高的情况下,则可在电池工艺过程中通过吸杂和钝化来减弱LID。本文对量产中的多晶硅背钝化太阳电池的LID特性进行了系列研究,分析了硅片种类和氢钝化技术对此类太阳电

收稿日期:2018-06-19

通信作者:刘石勇(1981—),男,博士、高级工程师,主要从事晶体硅光伏组件技术方面的研究。shiyong.liu@astronergy.com

池 *LID* 情况的影响, 最终使多晶硅背钝化太阳电池的 *LID* 程度与常规工艺的太阳能电池的程度相同。

## 1 实验

本次实验所使用的多晶硅片有掺 B、掺 Ga、B-Ga 共掺 3 种类型, 硅片厚度约为 180  $\mu\text{m}$ , 电阻率范围为 0.5~3  $\Omega\cdot\text{cm}$ , 规格为 156.75 mm×156.75 mm。多晶硅背钝化太阳电池的制备流程为: 1) 硅片在  $\text{HNO}_3/\text{HF}$  制绒、 $\text{POCl}_3$  热扩散制备 p-n 结、去磷硅玻璃工序之后, 采用原子层沉积设备 (ALD) 在背表面沉积  $\text{AlO}_x$  薄膜; 2) 采用等离子体增强化学的气相沉积法 (PECVD) 在硅片前表面和背面的  $\text{AlO}_x$  薄膜上再沉积  $\text{SiN}_x$  薄膜; 3) 背面激光开窗并印刷、烧结正电极和背电极。电池制备完成后, 对电池进行暴晒, 暴晒样品选择效率集中的几个档位的电池片, 采用 3B 级太阳光模拟器, 辐照度约为 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ , 温度约为 60  $^\circ\text{C}$ 。然后, 通过 *I-V* 测试仪在标准条件 AM1.5 下对实验前、后的电池性能进行测试对比。

## 2 结果与讨论

对采用不同掺杂类型的多晶硅片制备的背钝化太阳电池进行暴晒测试, 其 *LID* 结果如图 1 所示。

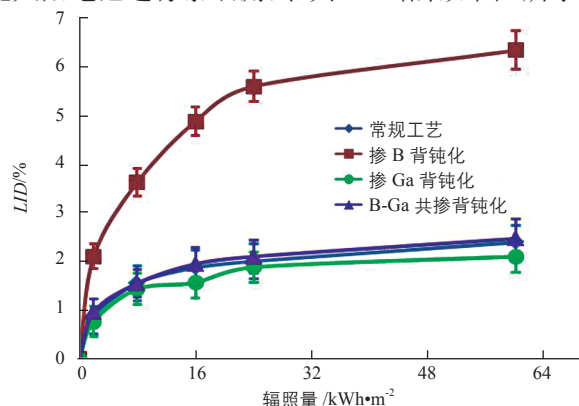


图 1 不同掺杂类型的多晶硅片制备的背钝化太阳电池的 *LID* 情况

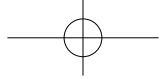
从图 1 可以看出, 不同掺杂类型的多晶硅片制备的背钝化太阳电池的 *LID* 情况差别较大。经过 2  $\text{kWh}/\text{m}^2$  暴晒后, 掺 Ga 和 B-Ga 共掺的多晶

硅背钝化太阳电池的 *LID* 都较小, 分别为 0.76% 和 0.96%; 而掺 B 的多晶硅背钝化太阳电池的 *LID* 已达到 2.10%。随着暴晒时间加长, *LID* 逐渐增加, 3 种不同掺杂类型的多晶硅背钝化太阳电池的 *LID* 差别也随之增大。经过 60  $\text{kWh}/\text{m}^2$  的暴晒后, 掺 Ga 的多晶硅背钝化太阳电池的 *LID* 最小, 为 2.10%; 其次是 B-Ga 共掺的多晶硅背钝化太阳电池, 其 *LID* 为 2.47%, 而掺 B 的多晶硅背钝化太阳电池的功率衰减最大, *LID* 达到 6%。

掺 B 的多晶硅背钝化太阳电池的 *LID* 最严重, 主要原因是光照会使掺 B 硅片中的 B 和间隙 O 形成 B-O 复合体, 从而捕获少数载流子, 降低了体寿命。硅片中 B 和 O 的含量越高, 电池的 *LID* 越严重。为了降低硅片中 B 的含量, 提出了 Ga 掺杂技术, 使用 Ga 元素替代 B 元素。Ga 在晶体硅中的共价原子半径为 126 pm, 比 B(82 pm) 和 Si(118 pm) 都大, 其较大的原子半径阻碍了 Ga 和 O 在晶格中的复合, 不能形成亚稳态 Ga-O 复合体<sup>[6]</sup>, 从而可以抑制晶体硅太阳电池的 *LID*。因此, 由图 1 可以看出, 掺 Ga 的多晶硅背钝化太阳电池的 *LID* 最小。

B-Ga 共掺是使用 Ga 元素替代部分 B 元素, 降低硅片中 B 含量, 也可以减少 B-O 复合体的形成几率。从图 1 可以看出, 相比掺 B 的多晶硅背钝化太阳电池, B-Ga 共掺的多晶硅背钝化太阳电池的 *LID* 得到明显改善, 只是略高于掺 Ga 的多晶硅背钝化太阳电池。虽然 Ga 掺杂技术可明显降低电池的 *LID*, 但由于 Ga 的分凝系数低, 会导致硅片电阻率分布不均匀, 影响电池性能。尤其在产业化情况下, 纯掺 Ga 的硅片的质量不均匀性会严重影响电池在量产中的质量管控。因此, 产业化中采用 B-Ga 共掺硅片来改善多晶硅背钝化太阳电池的 *LID* 情况是更为可行的方案。

掺 Ga 硅片中无 B 原子, 不会形成 B-O 复合体, 但掺 Ga 的多晶硅背钝化太阳电池仍存在 *LID* 现象。因此, 在多晶硅背钝化太阳电池中, 除了 B-O 复合体外, 还有硅片中的其他杂质,

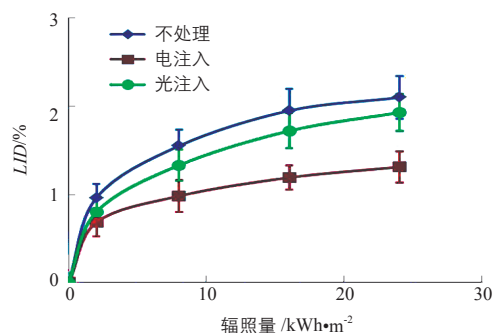


如 Fe 等过渡金属离子,也会导致电池的  $LID$ 。Fe 等过渡金属杂质的离子带正电荷,将向带负电荷的  $AlO_x$  钝化层方向的表面电荷区聚集,逐渐使背面钝化效果部分失效,导致背钝化太阳电池的  $LID$  比常规工艺的电池更大。因此,还需要通过其他技术,如吸杂预处理减少金属杂质或钝化体缺陷等方法,来进一步改善背钝化太阳电池的  $LID$  性能。

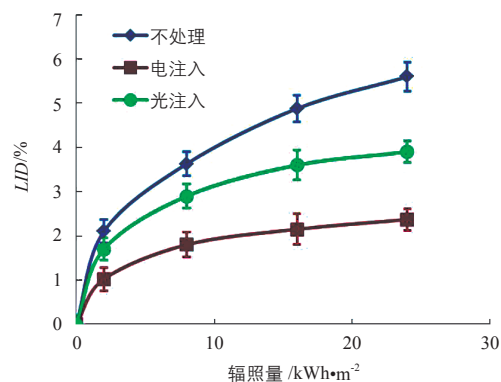
在太阳电池中,氢钝化是一种常用的钝化技术。硅片前表面  $SiN_x$  薄膜中含有浓度很高的 H 原子,这些 H 原子能够有效地钝化晶体硅表面的悬挂键,降低表面复合速率,但是这些 H 原子却很难扩散进入硅片基体中来钝化体缺陷。由于太阳电池的发射结区域有大量的磷正离子 ( $P^+$ ),从  $SiN_x$  层中扩散过来的 H 原子大部分会被 P 原子束缚住形成 P-H 复合体,即使有部分自由的 H 原子继续向体内扩散,其必须穿越具有势垒高度的空间电荷区。因此,在  $SiN_x$  层中,真正能扩散进入硅基体内部的 H 原子浓度非常低,需要通过外界因素来诱导 H 原子钝化体缺陷。

光注入与电注入都可改善多晶硅背钝化太阳电池的  $LID$  情况。注入处理需在加热环境下进行,在一定的温度下, H 元素以自由的  $H^+$  形式存在,温度增加可提高自由  $H^+$  的浓度和扩散速率,这样  $H^+$  能以更快的速度扩散到硅基体。但温度过高会对电池表面的电极性能造成一定的恶化,优化后的温度范围为  $200 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,电注入处理时需对电池施加正向直流偏压,以降低空间电荷区中的势垒高度,光注入处理是对电池的受光面进行强光照射,二者的目的都是使正面  $SiN_x$  薄膜中 H 原子更容易穿越空间电荷区进入基体中来钝化体缺陷。本实验中电注入处理时采用  $10 \sim 20\text{ A}$  的电流,处理  $30 \sim 60\text{ min}$ ;光注入处理是在  $20 \sim 30$  个太阳光强度下,照射约  $1\text{ min}$ 。图 2 为光注入和电注入处理对 B-Ga 共掺和掺 B 的多晶硅背钝化太阳电池  $LID$  的影响。由图 2 可知,电注入处理效果更佳。

由图 2 可知,经过  $24\text{ kWh/m}^2$  暴晒后,电



a. 对 B-Ga 共掺的多晶硅背钝化太阳电池  $LID$  的影响



b. 对掺 B 的多晶硅背钝化太阳电池的  $LID$  的影响

图 2 光注入和电注入处理对 B-Ga 共掺和掺 B 的多晶硅背钝化太阳电池  $LID$  的影响

注入处理后的 B-Ga 共掺的多晶硅背钝化太阳电池的  $LID$  降低到  $1.31\%$ , 光注入处理后的  $LID$  降低到  $1.93\%$ , 都已经优于常规工艺太阳电池的  $LID$ (图 1 中, 经过  $24\text{ kWh/m}^2$  暴晒后, 常规工艺太阳电池的  $LID$  约为  $2.00\%$ )。同样, 经过  $24\text{ kWh/m}^2$  暴晒后, 未经处理的掺 B 的多晶硅背钝化太阳电池的  $LID$  为  $5.60\%$ , 电注入处理后  $LID$  降至  $2.37\%$ , 基本与常规工艺太阳电池的  $LID$  情况相当。光注入处理虽能改善  $LID$  情况, 但其值还是偏大, 为  $3.90\%$ 。这是由于掺 B 的多晶硅太阳电池中含有较多的 B-O 复合体、晶界位错和过渡金属杂质等缺陷, 目前的光注入工艺诱导的 H 原子数量可能不足以钝化这些缺陷; 而电注入工艺通过调节不同的电流和注入时间更易于实现钝化缺陷, 因此, 电注入工艺对降低  $LID$  的效果更好。

将采用不同工艺制备的电池分别制成组件, 再进行长时间的户外暴晒, 然后跟踪对比组件  $LID$  的变化趋势, 如图 3 所示。

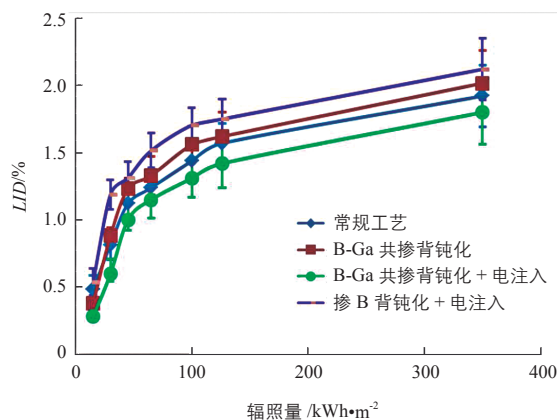
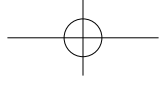


图3 户外暴晒时不同类型组件  $LID$  随辐照量的变化关系

由图3可知,随着暴晒时间增加,前期组件  $LID$  快速增加;当暴晒辐照量达到  $100 \text{ kWh/m}^2$  时,组件的  $LID$  增加幅度明显减慢,功率逐渐趋于稳定;当暴晒辐照量增加到  $350 \text{ kWh/m}^2$  后,电注入处理的 B-Ga 共掺的多晶硅背钝化组件的  $LID$  最小,为 1.81%,未处理的 B-Ga 共掺的多晶硅背钝化组件和电注入处理的掺 B 的多晶硅背钝化组件的  $LID$  都稍高于常规工艺组件,分别为 2.02% 和 2.12%,但都属于组件的  $LID$  的正常范围。简而言之,通过采用 B-Ga 共掺的硅片或电注入处理的掺 B 硅片,都可以较好的解决多晶硅背钝化组件户外暴晒时  $LID$  过大的问题,而采用电注入处理的 B-Ga 共掺的硅片可以制备出光稳定性更高的组件。

### 3 结论

本文研究了不同掺杂类型的硅片和氢钝化技术对量产多晶背钝化太阳能电池  $LID$  特性的影响,得到结论如下:

(接第40页)

#### 参考文献

- [1] 陈江恩. 农光互补应用技术与解决方案[J]. 上海节能, 2017, (3): 154 - 157.
- [2] 陈江恩, 孙杰, 冯博, 等. 光伏建筑一体化项目不同安装方式的案例分析[J]. 建筑节能, 2014, 42(4): 35 - 38.
- [3] 孙杰. 水上光伏电站应用技术与解决方案[J]. 太阳能, 2017, (6): 32 - 35.

1) 掺 Ga 或 B-Ga 共掺的多晶硅片都可显著抑制背钝化太阳能电池的  $LID$ , 但掺 Ga 电池的  $LID$  更小。然而由于掺 Ga 的硅片质量不均匀, 因此, 量产中更多是采用 B-Ga 共掺硅片。

2) 通过电注入或光注入诱导氢钝化技术可进一步改善多晶硅背钝化太阳能电池的  $LID$ , 其中, 电注入处理对多晶硅背钝化太阳能电池的改善效果更佳。

3) 采用 B-Ga 共掺的硅片或电注入处理的掺 B 硅片都能较好解决  $LID$  过大的问题。当采用电注入处理的 B-Ga 共掺电池技术路线时, 甚至可制备出光稳定性优于常规工艺的组件, 户外暴晒  $350 \text{ kWh/m}^2$  后, 制备出的组件的  $LID$  仅为 1.81%。

#### 参考文献

- [1] Fischer H, Pschunder W. Investigation of photon and thermal induced changes in silicon solar cells [A]. Proceedings of 10th IEEE Photovoltaic Specialists Conference[C]. Palo Alto, USA, 1973.
- [2] Glunz S W, Rein S, Lee J Y, et al. Minority carrier lifetime degradation in boron-doped czoehrsalski silicon[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90(5): 2397 - 2404.
- [3] Schmidt J. Structure and transformation of the metastable boron-and oxygen-related defect center in crystalline silicon[J]. Physical Review B, 2004, 69(2): 1129 - 1133.
- [4] Schmidt J. Effect of dissociation of iron-boron pairs in crystalline silicon on solar cells properties[J]. Progress in photovoltaics research and applications, 2005, 13: 325 - 329.
- [5] Savin H, Yli-Koski M, Haarahiltunen A. Role of copper in light induced minority-carrier lifetime degradation of silicon[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95: 152111.
- [6] Du M H, Branz H, Crandall R, et al. Bistability-mediated carrier recombination at light-induced boron-oxygen complexes in silicon[J]. Physical Review Letters, 2006, (97): 256602. 太阳能

- [4] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2017 [EB/OL]. <https://itrvp.vdma.org/en/ueber-uns>, 2018-06.
- [5] 孙杰. 大同光伏领跑者项目 PERC 单晶组件应用分析[J]. 上海节能, 2017, (11): 671 - 675.
- [6] 陈荣荣, 孙韵琳, 陈思铭, 等. 并网光伏发电项目的 LCOE 分析[J]. 可再生能源, 2015, 33(5): 731 - 735. 太阳能