材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.012

掺镓单晶硅太阳电池和组件的光致衰减性能研究

连维飞[1,2]，沈鸿烈[1*]，张树德[2]

（1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院，江苏省能量转换材料与技术重点实验室，南京 211106；
2. 苏州腾晖光伏技术有限公司 研发部，江苏 常熟 215542）

摘　要： 分别使用掺镓和常规掺硼单晶硅片制备了太阳电池与组件，对电池进行了光照和空焊处理，再采用Halm电池电性能测试仪测试了两种单晶硅太阳电池和组件在光照和空焊实验前后的光电性能。实验结果表明，在相同光照条件下，采用掺镓单晶硅片所制太阳电池的光衰率比用掺硼单晶硅片的低0.91%。空焊后的掺镓单晶硅太阳电池各项光电性能参数的一致性没有出现明显变化，这有利于减少太阳电池之间的失配损失。还发现掺镓单晶硅太阳电池组件的CTM(cell to module)值高于掺硼单晶硅太阳电池组件的CTM值。总之，掺镓单晶硅太阳电池能更好地抑制光致衰减效应，并减小串焊工艺对太阳电池光电性能的影响，获得更高的太阳电池组件功率。

关键词： 掺镓单晶硅；太阳电池；太阳电池组件；光致衰减；空焊；CTM值

中图分类号： TM914.4　**文章编号：** 1001－5868(2021)04－0511－04

Investigation on Light-Induced Degradation Effect in Gallium Doped Monocrystalline Silicon Solar Cell and Module

LIAN Weifei[1,2], SHEN Honglie[1], ZHANG Shude[2]

(1. Jiangsu Key Laboratory of Materials and Technology for Energy Conversion, College of Materials Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, CHN; 2. Research and Development Department, Suzhou Talesun Technologies Co. Ltd., Changshu 215542, CHN)

Abstract: The solar cells and modules were fabricated with gallium doped and boron-doped monocrystalline silicon wafers respectively. Light-induced degradation (LID) treatment and soldering without welding rod were conducted on the two kinds of solar cells. The photovoltaic performance changes of the solar cell and modules induced by LID and soldering without welding rod were tested with Halm *I-V* tester. Test results indicate that, the LID ratio of the Ga-doped silicon solar cells was 0.91% lower than that of the B-doped samples. Moreover, after the soldering without welding rod, the consistency of the optoelectronic performance of the Ga-doped silicon wafer has little change, and its cell-to-module (CTM) ratio is higher than that of the B-doped monocrystalline silicon solar cell module. In conclusion, Ga-doped monocrystalline silicon solar cells can better suppress the photo-attenuation effect, reduce the influence of the series welding process on the photoelectric performance of solar cells, and obtain higher power of solar cell component.

Key words: Ga-doped monocrystalline silicon; solar cell; solar cell module; light-induced degradation; soldering without welding rod; CTM ratio

收稿日期：2021－01－05.
基金项目：国家自然科学基金项目(61774084).
* **通信作者：**沈鸿烈

0 引言

硅片作为太阳电池的基底，其特性对于电池的转换效率与可靠性有直接影响。硅片一般分为单晶硅片和多晶硅片两种，其中单晶硅电池具有转换效率高、弱光响应强和系统成本低等优点，已成为全球光伏市场的主流产品。

光伏产品需要在户外环境使用，因此可靠性是产品的重要性能指标。光致衰减[1]（Light-Induced Degradation，LID）是指在光照条件下太阳电池和组件功率出现衰减的现象，光致衰减率是可靠性指标中的重要一项。

从机理上看，晶体硅太阳电池和组件的光致衰减效应一般分为硼氧缺陷光致衰减（BO-LID）和热诱导光致衰减（LeTID，Light and Elevated Temperature Induced Degradation）两种[2]。在2020年之前，用于生产太阳电池的单晶硅片绝大部分为掺硼单晶硅片，而掺硼晶硅太阳电池会因硼氧缺陷引起严重的光致衰减现象[3]，极大地限制了其发展。在工业化量产时，通常采用光注入[4]或电注入[5-6]的方法对硼氧缺陷进行钝化，抑制光致衰减，这种方法能抑制部分 BO-LID 影响，但无法消除。根据 BO-LID 机理，也可以通过减少硅片中的硼和氧含量来减小光致衰减率。1997 年，Schmid 等就发现采用镓作为硅片的掺杂剂可解决 BO-LID 问题[7]，2016 年，张三洋等的研究再次证明采用镓替代硼作为掺杂剂，可很好地消除 BO-LID，抑制太阳电池的光致衰减[8]，而且掺镓单晶硅太阳电池能获得与掺硼单晶硅太阳电池相同的光电转换效率[9]。

本文采用掺硼和掺镓两种单晶硅片分别制作了单晶硅太阳电池与组件，通过光致衰减测试平台、电池与组件 I-V 电性能测试仪，分别对两种电池和组件的光电性能及稳定性进行了表征。发现在相同条件下生产的掺镓单晶硅太阳电池比掺硼单晶硅太阳电池的光致衰减值更低；通过电池串焊机空焊处理后，掺镓单晶硅太阳电池空焊前后的各项光电性能参数的一致性更好，且没有显著变化，因此电池到组件（CTM，cell to module）的功率 CTM 值更高。

1 实验

1.1 太阳电池与组件的制备工艺

（1）单晶硅太阳电池的制备。采用尺寸为 158.75 mm×158.75 mm 的 p 型直拉法单晶硅片，厚度为 175 μm，电阻率为 0.6～1.0 Ω·cm。根据掺杂元素的不同，分为掺硼单晶硅片和掺镓单晶硅片两组。太阳电池采用常规 PERC 电池的制备工艺，具体流程包括：碱制绒→磷扩散形成 pn 结→背面刻蚀及去除表面磷硅玻璃→高温热氧化→背面 ALD 沉积氧化铝钝化膜层→背面 PECVD 沉积氮化硅膜→正面 PECVD 沉积氮化硅减反膜→背面激光开槽→印刷金属浆料并烧结制备正负电极→电注入（掺硼单晶硅太阳电池做电注入，掺镓单晶硅太阳电池不做电注入）→光电性能测试。

（2）光致衰减实验。将 100 片太阳电池平铺于光致衰减测试平台上，太阳电池正面朝上，采用卤素灯作为模拟光源，光照强度为 400 W/m^2，累计辐照度达到 5 kW·h 后，测试这 100 片太阳电池的光电性能。

（3）太阳电池空焊实验。使用已测试光电性能的两组相同数量的太阳电池，一组为掺硼太阳电池，一组为掺镓太阳电池，在串焊机上进行空焊工艺处理（工艺采用红外灯管加热，温度 205 ℃，恒温时间 200 ms，冷却时间 1 800 ms，宁夏小牛 CN40-M 串焊机），但不实际焊接焊带，测试空焊处理后的太阳电池的光电性能数据。

（4）单晶硅太阳能组件的制备。采用测试分选好的同档位电池，一组为掺硼太阳电池，一组为掺镓太阳电池，分别制备 72 版型的太阳电池组件，具体制备工艺为：切片（切为半片）→串焊→排版→层叠→层压→削边→装框→装接线盒→固化→清洗→光电性能和电致发光（EL）测试。

1.2 表征

采用 PV measurement QEX10 仪器表征太阳电池在 300～1 100 nm 波长区间的量子效率，通过 Halm 太阳电池和组件 I-V 测试仪分别表征太阳电池和组件的开路电压 V_{oc}、短路电流 I_{sc}、填充因子 F_F、转换效率 E 等光电性能参数，采用沛德 EL 测试仪表征太阳电池组件的电致发光特性。

2 结果与讨论

2.1 太阳电池的光电性能分析

图 1 所示为主流档位（22.5%效率档）掺镓和掺硼两种单晶硅太阳电池的量子效率曲线，从图中可见，两种电池的量子效率基本一致，说明将硼元素替换为镓元素并没有对太阳电池的量子效率 η_{exe} 带来负面影响。

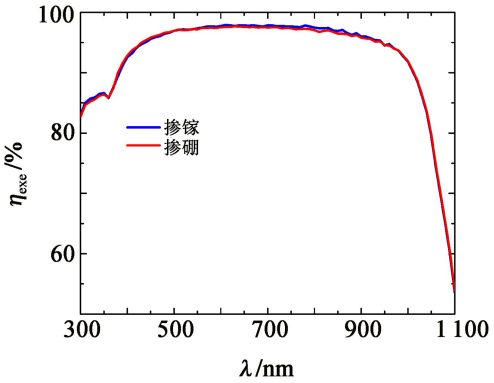
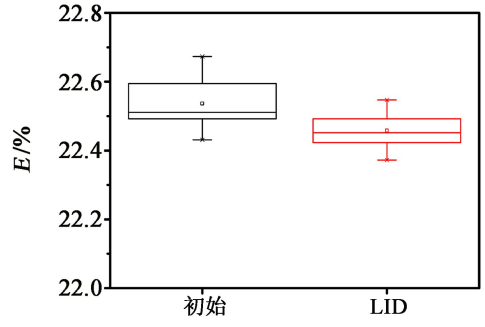
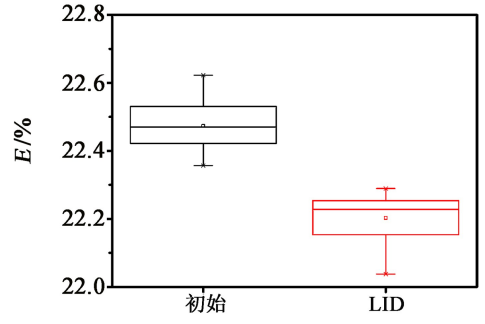


图 1　掺镓和掺硼两种单晶硅太阳电池的量子效率曲线

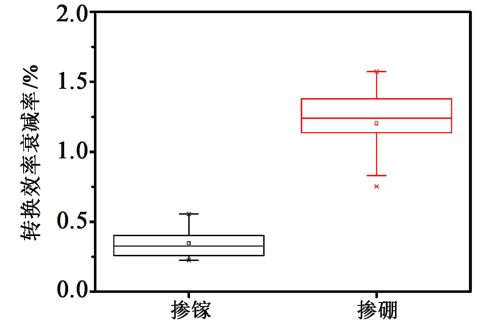
图 2 所示为掺镓和掺硼两种单晶硅太阳电池的光致衰减数据箱线图。从结果可以看出，在光照 5 kW·h 后，掺镓单晶硅太阳电池的光电转换效率衰减情况明显优于掺硼单晶硅太阳电池，其中掺镓单晶硅太阳电池效率降低约 0.08%（绝对值），衰减率为 0.33%；掺硼单晶硅太阳电池效率降低约 0.27%（绝对值），衰减率为 1.24%，比前者高 0.91%。说明用镓元素替换硼元素，能够显著降低光致衰减率。



（a）　掺镓太阳电池转换效率



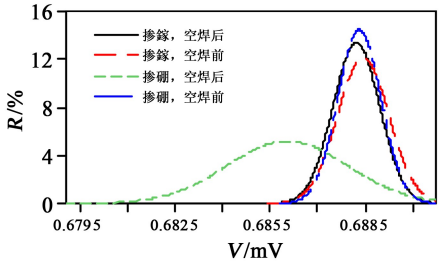
（b）　掺硼太阳电池转换效率



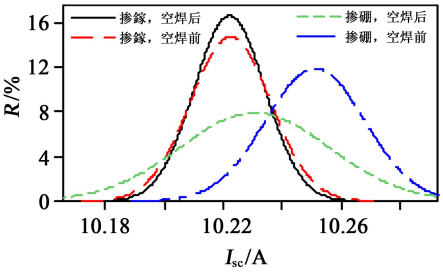
（c）　转换效率衰减率

图 2　掺镓和掺硼两种单晶硅太阳电池的光致衰减数据箱线图

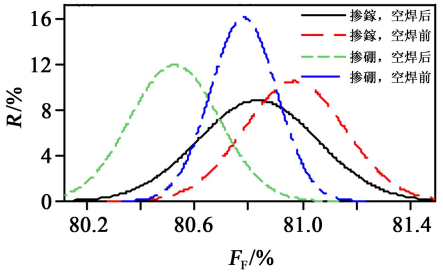
晶体硅太阳电池在封装成太阳电池组件时，需要采用串焊的方法将电池进行串联。目前，串焊机普遍采用红外灯管进行加热，但红外加热带来的高光强和高温环境，会引起太阳电池的光衰问题（LID 和 LeTID），因此为表征串焊对太阳电池光电性能参数的影响，进行了空焊实验。图 3 所示为掺镓和掺硼两种单晶硅太阳电池经空焊前后光电性能参数的分布图。从图中可见，掺镓单晶硅太阳电池经空焊后的各项光电学参数分布更窄，一致性更好，其中掺镓单晶硅太阳电池转换效率平均值略有降低（从 22.57%降至 22.52%），标准偏差从 0.034 增加到 0.046，而掺硼单晶硅太阳电池转换效率平均值衰减程度较大（从 22.57%降至 22.38%），标准偏差从 0.046 增加到 0.130。这些结果说明掺镓单晶硅太阳电池可以有效抑制红外加热串焊工序对太阳电



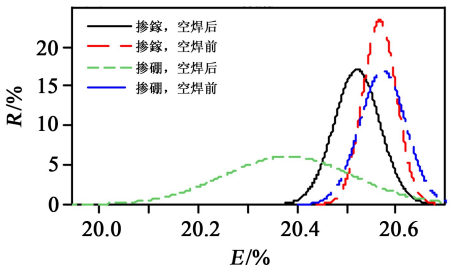
（a）　开路电压



（b）　短路电流



（c）　填充因子



(d) 转换效率

图 3 掺镓和掺硼两种单晶硅太阳电池空焊前后的光电性能参数分布图

池光电性能的影响，不仅能够减小各项参数的衰减程度，而且能够实现更好的一致性。

2.2 太阳电池组件的光电性能与 CTM 值分析

表 1 为相同效率档位(22.5%档)的掺镓和掺硼两种单晶硅太阳电池的各项光电性能参数平均值，将这两组太阳电池分别制备成掺镓和掺硼太阳电池组件。表 2 和表 3 分别为掺镓和掺硼两种单晶硅太阳电池组件的光电性能参数和 CTM 值。从表中可见，由于掺镓单晶硅太阳电池串焊后光电性能衰减较小，一致性更好，封装成组件后太阳电池之间失配损失小(I_{sc} 和 F_F 的封装损失小)。这是因为太阳电池组件是由多片太阳电池串联而成，组串内太阳电池的光电性能参数分布越集中，该组串的综合光电性能参数也就越好，因此掺镓单晶硅太阳电池组件各项电学参数 CTM 值相比掺硼太阳电池组件的值更高，其中功率 CTM 值高 0.32%，能够实现更高的组件功率。

表 1 用于制作组件的两种单晶硅电池的光电性能参数

参数	I_{sc}/A	V_{oc}/V	F_F/%	E/%
掺镓太阳电池	10.23	0.685 9	81.1	22.58
掺硼太阳电池	10.247	0.685 2	80.87	22.53

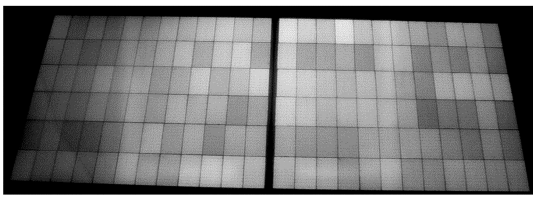
表 2 两种太阳电池组件的光电性能参数

参数	I_{sc}/A	V_{oc}/V	F_F/%	P_{mpp}/W
掺镓太阳电池组件	10.405	49.42	81.03	416.7
掺硼太阳电池组件	10.41	49.36	80.67	414.5

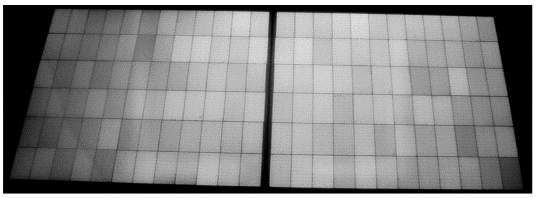
表 3 两种太阳电池组件的光电性能参数 CTM 值

参数	I_{sc}	V_{oc}	F_F	P_{mpp}
掺镓组件 CTM/%	101.72	100.07	99.92	101.71
掺硼组件 CTM/%	101.59	100.06	99.75	101.39
掺镓组件 CTM−掺硼组件 CTM/%	0.13	0.01	0.17	0.32

图 4 为两组实验组件的 EL 图，可见掺硼单晶硅太阳电池组件由于串焊后太阳电池的光电性能参数离散性大，出现较大明暗差异，而掺镓单晶硅太阳电池组件由于串焊后一致性更好，明暗差异小。EL 结果进一步证明掺镓单晶硅太阳电池能够有效抑制由红外加热串焊工序引起的光电性能衰减。



(a) 掺硼



(b) 掺镓

图 4 掺硼与掺镓晶体硅太阳电池组件的 EL 图

3 结论

本文采用掺镓和掺硼单晶硅片制作了太阳电池，同效率档的两种电池量子效率基本一致。掺镓和掺硼单晶硅太阳电池经光照 5 kW·h 后光电转换效率的衰减率分别为 0.33%和 1.24%，说明掺镓单晶硅片由于没有硼氧复合缺陷，能够有效抑制光致衰减效应。空焊衰减测试结果表明，掺镓单晶硅太阳电池的各项光电性能参数衰减较小，其转换效率平均值从 22.57%降至 22.52%，标准偏差从 0.034 增加到 0.046，而掺硼太阳电池效率平均值从 22.57%降至 22.38%，标准偏差从 0.046 增加到 0.130，说明掺镓太阳电池的光电性能变化与分布受红外加热串焊工艺的影响小于掺硼太阳电池，这得益于掺镓太阳电池更优异的光电性能稳定性和较高的一致性。掺镓太阳电池还能减少组件内电池之间性能失配带来的光电性能损失，组件 EL 明暗差异小，其各项光电性能参数的 CTM 值比掺硼太阳电池组件更高，其中功率 CTM 值高 0.32%，可有效保障组件的总功率。

参考文献：

[1] Lindroos J, Savin H. Review of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2016, 147: 115-126.

[2] Deceglie M G, Silverman T J, Johnston S W, et al. Light and elevated temperature induced degradation (LeTID) in a utility-scale photovoltaic system[J]. IEEE J. of Photovoltaics, 2020, 10(4): 1084-1092.

(下转第 520 页)

[5] Wu Y R, Singh J. Metal piezoelectric semiconductor field effect transistors for piezoelectric strain sensors[J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 85 (7): 1223-1225.

[6] Wu W Z, Wang L, Li Y L, et al. Piezoelectricity of single-atomic-layer MoS_2 for energy conversion and piezotronics[J]. Nature, 2014(514): 470-474.

[7] Wen X N, Wu W Z, Pan C F, et al. Development and progress in piezotronics[J]. Nano Energy, 2015, 14: 276-295.

[8] Liu Y, Zhang Y, Yang Q, et al. Fundamental theories of piezotronics and piezo-phototronics[J]. Nano Energy, 2015, 14: 257-275.

[9] Wu W, Wang Z L. Piezotronics and piezo-phototronics for adaptive electronics and optoelectronics[J]. Nat. Rev. Mater., 2016, 24(34): 23-24.

[10] Qin Y, Wang X, Wang Z L. Microfibre-nanowire hybrid structure for energy scavenging[J]. Nature, 2008, 451 (7180): 809-813.

[11] Wang Z L, Song J. Piezoelectric nanogenerators based on Zinc Oxide nanowire arrays[J]. Science, 2006, 312(5771): 242-246.

[12] Gaska R, Shur M S, Bykhovski A D. Pyroelectric and piezoelectric properties of GaN-based materials[J]. MRS Int. J. Nitride Semicond. Res., 1999, 4: 57-68.

[13] Gao Y F, Wang Z L. Electrostatic potential in a bent piezoelectric nanowire: The fundamental theory of nanogenerator and nanopiezotronics[J]. Nano Lett., 2007, 7: 2499-2505.

[14] Dai X Y, Zhu F, Qian Z H, et al. Electric potential and carrier distribution in a piezoelectric semiconductor nanowire in time-harmonic bending vibration[J]. Nano Energy, 2018, 43: 22-28.

[15] Cheng R R, Zhang C L, Yang J S. Thermally induced carrier distribution in a piezoelectric semiconductor fiber[J]. J. Electron. Mater., 2019, 48: 4939-4946.

[16] Holzapfel G A. Nonlinear solid mechanics: A continuum approach for engineering science[J]. Meccanica, 2002, 37: 489-490.

[17] Sze S M, Ng K K. Physics of Semiconductor Devices[M]. New York: Wiley, 2006.

[18] Wachutka G K. Rigorous thermodynamic treatment of heat generation and conduction in semiconductor device modeling [J]. IEEE T. Comput. AID. D., 1990, 9: 1141-1149.

[19] Qin G S, Ma S J, Lu C S. Influence of electric field and current on the strength of depoled GaN piezoelectric semiconductive ceramics[J]. Ceram. Int., 2018, 44: 4169-4175.

[20] Sladek J, Sladek V, Pan E, et al. Fracture analysis in piezoelectric semiconductors under a thermal load[J]. Eng. Fract. Mech., 2014, 126: 27-39.

作者简介：

王 蕾(1990—)，女，硕士，工程师，主要从事半导体电学测试与电磁技术研究；

秦国帅(1986—)，男，博士，副教授，硕士研究生导师，主要研究方向为智能材料与结构的多场性能调控与分析。

(上接第 514 页)

[3] Ai B, Deng Y. Research progress on LID caused by B-O defects and its suppression for B-doped p-type crystalline silicon solar cells[J]. Acta Entiarum Natralium Universitatis Sunyatseni, 2017, 56(3): 1-7.

[4] Derricks C, Herguth A, Hahn G, et al. Industrially applicable mitigation of BO-LID in Cz-Si PERC-type solar cells within a coupled fast firing and halogen lamp based belt-line regenerator—A parameter study[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 195: 358-366.

[5] Xie M, Ren C, Liming F U, et al. An industrial solution to light-induced degradation of crystalline silicon solar cells[J]. Frontiers in Energy, 2017, 11(1): 67-71.

[6] Wang Z, Shen H, Hu D, et al. Influence of double current injection annealing on anti-LID effect in mono-like cast silicon PERC solar cells[J]. J. of Materials ENCE: Materials in Electronics, 2020(1): 3221-3227.

[7] Schmidt J, Aberle A G, Hezel R. Investigation of carrier lifetime instabilities in Cz-grown silicon[C]// Proc. of IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1997: 13-18.

[8] 张三洋，沈鸿烈，魏青竹，等. 晶硅掺镓抑制太阳电池光致衰减效应的研究[J]. 人工晶体学报，2016，45(4)：1100-1105.
Zhang Sanyang, Shen Honglie, Wei Qingzhu, et al. Investigation on supression of light induced degradation effect in crystalline silicon solar cells with gallium doping[J]. J. of Synthetic Crystals, 2016, 45(4): 1100-1105.

[9] 任 丽，李 宁，杨淑云，等. 掺 Ga 高效单晶硅太阳电池抑制光衰研究[J]. 太阳能学报，2013，34(3)：449-452.
Ren Li, Li Ning, Yang Shuyun, et al. Study on suppressing light degradation in Ga-doped high-efficiency single crystal silicon solar cell[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34 (3): 449-452.

作者简介：

连维飞(1983—)，男，浙江乐清人，在职研究生，研究方向为先进光电/电光转换材料与器件、新能源材料与应用技术等；

沈鸿烈(1958—)，男，江西靖安人，博士，教授，博导，研究方向为先进光电/电光转换材料与器件、新能源材料与应用技术等。