

掺硼 p 型晶体硅太阳能电池 B-O 缺陷 致光衰及其抑制的研究进展*

艾斌^{1,2}, 邓幼俊²

(1. 中山大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510006;
2. 中山大学物理学院//广东省光伏技术重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 掺硼 p 型晶体硅太阳能电池一直牢牢占据着光伏市场的主导地位, 但硼-氧 (B-O) 缺陷引起的光衰 (LID; Light induced degradation) 极大地限制了它的发展。最新的对太阳能电池加热同时注入少数载流子的 B-O 缺陷“复原” (regeneration) 技术有望彻底解决掺硼 p 型晶体硅太阳能电池的 LID 问题。鉴于掺硼 p 型晶体硅太阳能电池 LID 及其抑制措施的研究对提高晶体硅太阳能电池性能表现的长期稳定性有重要作用, 回顾了近年在掺硼 p 型晶体硅太阳能电池 LID 及其抑制措施方面的研究进展, 并对最新发展出的 B-O 缺陷“复原”技术给予了重点介绍。

关键词: 晶体硅太阳能电池; 硼-氧缺陷; 光衰; 复原

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2017) 03-0001-07

Research progress on LID caused by B-O defects and its suppression for B-doped p-type crystalline silicon solar cells

AI Bin^{1,2}, DENG Youjun²

(1. School of Materials Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Photovoltaic Technology, School of Physics,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Although boron-doped p-type crystalline silicon solar cells have been firmly occupying the dominant share in PV market, the light induced degradation (LID) caused by boron-oxygen (B-O) defects greatly limits their development. Newly-developed B-O defects regeneration technology combining minority carriers injection and heating has the potential to completely solve the LID problems of boron-doped p-type crystalline silicon solar cells. Considering that the research work on LID and its suppression measure is of a great importance to improve long term stability of today's mainstream crystalline silicon solar cells, the authors review the recent research progress on LID and its inhibition method of boron-doped p-type crystalline silicon solar cells, and emphatically introduce the newly-developed B-O defects regeneration technology.

Key words: crystalline silicon solar cells; B-O defects; light induced degradation (LID); regeneration

* 收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目 (2011A032304001); 广东省科技计划项目 (2013B010405011)

作者简介: 艾斌 (1973年生), 男; 研究方向: 太阳能材料与太阳能电池; E-mail: stsab@mail.sysu.edu.cn

目前, 晶体硅太阳能电池主要使用掺硼 p 型晶体硅片作为衬底。根据国际光伏技术路线图 (ITR-PV) 组织 2016 年 10 月发布的 2015 年国际光伏市场份额数据^[1], 由掺硼 p 型晶体硅片制备的常规铝背场 (Al-BSF) 电池占 88%, 由掺硼 p 型晶体硅片制备的高效 PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) 电池占 7%, 由 n 型硅片制备的高效 HIT (Hetero-junction with Intrinsic Thin-layer) 电池占 2%, 由 n 型硅片制备的高效 IBC (Interdigitated Back Contact) 电池占 3%^[1]。由于具有更高的性价比, 掺硼 p 型铸锭多晶硅 (mc-Si) 电池比掺硼 p 型直拉单晶硅 (Cz-Si) 电池占据更大的市场份额, p 型 mc-Si 电池约占 65%, p 型 Cz-Si 电池约占 30%^[1]。掺硼 p 型 Cz-Si 片和 mc-Si 片都是以高纯多晶硅为原料通过直拉法 (Czochralski) 或者铸锭法 (cast ingot) 形成晶体, 然后切片得来的^[2]。

虽然掺硼 p 型晶体硅太阳能电池凭借着低成本、高效率、长寿命以及成熟的工艺技术等竞争优势, 一直牢牢占据着光伏市场的统治地位, 但是掺硼 p 型晶体硅太阳能电池存在光衰 (LID: Light induced degradation) 的劣势。该现象最早是由 Fischer 和 Pschunder^[3]于 1973 年发现的, 即太阳电池的电性能参数 (效率、开路电压和短路电流等) 在光照的前几个小时内不断衰减, 最后达到饱和。在黑暗条件下 200 °C 低温退火几十分钟之后, 太阳电池的效率可以恢复。但是, 如果继续光照的话, 电池的效率又会衰减。

自掺硼 p 型晶体硅太阳能电池的 LID 现象被发现以来, 它就一直受到人们的关注。1997 年, Schmidt 等^[4]提出掺硼 p 型晶体硅太阳能电池的 LID 现象是由光照下生成的对少数载流子具有较强复合能力的硼氧对 (B_iO_i) 引起的。2003 年, Schmidt 等^[5]又将具有复合活性的硼-氧 (B-O) 缺陷修正为硼氧复合体 (B_sO_{2i})。自硼氧对 (B_iO_i) 模型被提出以来, 全世界范围掀起了对掺硼 p 型晶体硅太阳能电池 LID 机理和抑制措施的研究热潮。经过近 20 年来的大量研究, 人们对掺硼 p 型晶体硅太阳能电池 LID 机理及抑制措施的认识有了长足的进步。尽管如此, 目前大规模工业化生产的掺硼 p 型晶体硅太阳能电池仍然遭受着不同程度的 LID。就 B-O 缺陷引起的 LID (BO-LID) 而言, 硼、氧含量越高, BO-LID 引起的电池效率损失越严重。因 Cz-Si 具有比 mc-Si 更高的氧含量 (前者约 15 ~ 18 ppma, 后者 < 10 ppma)^[6], p 型 Cz-Si 太阳能电池因 BO-LID 造成

的效率损失通常比 p 型 mc-Si 电池的严重, 前者可达 10% (相对值)^[7], 而后者大约为 2% ~ 4% (相对值)^[6-7]。

在 BO-LID 的抑制研究方面, 特别值得一提的是, Herguth 等^[8]于 2006 年发现掺硼 Cz-Si 太阳能电池在光照的同时给予加热, BO-LID 会发生“复原” (regeneration), 更重要的是 B-O 缺陷的“复原态”在太阳能电池工作条件下是稳定的。“复原”反应一经报道, 就在光伏学界和产业界内引起了很大的轰动, 因为这项技术极有可能从根本上解决长期以来困扰掺硼 p 型晶体硅太阳能电池发展的瓶颈问题。

鉴于掺硼 p 型晶体硅太阳能电池是当今光伏发电市场的绝对主力, 对掺硼 p 型晶体硅电池 LID 及其抑制措施的研究无疑具有重要的研究价值和意义。本文将回顾近年来在此领域的研究进展, 并对 BO-LID 复原技术予以重点介绍。在此基础上, 对掺硼 p 型晶体硅太阳能电池 LID 及其抑制措施下一步的研究趋势做一个展望。

1 光衰机理的研究

为了找到抑制或完全消除掺硼 p 型晶体硅太阳能电池 LID 的方法, 揭示 p 型晶体硅片及其太阳能电池的 LID 机理至关重要。关于掺硼 Cz-Si 的 LID 机制, 目前大家比较公认的是 Schmidt 提出的 B_sO_{2i} 模型^[7,9-11], 其模型示意图如图 1 所示。该模型认为光照 (光注入) 或外加正向偏压 (电注入) 在 p 型晶体硅片中产生的少数载流子 (电子) 会增强两个间隙氧原子组成的氧原子对 (O_{2i}) 的扩散; 快速扩散的 O_{2i} 被 B_s 束缚就会形成对少子具有很强复合活性的 B_sO_{2i} 缺陷; 光照引起晶体硅少子寿命的衰减, 进而导致了太阳电池性能的衰减。200 °C 的低温退火则促进了 B_sO_{2i} 缺陷的分解, B_sO_{2i} 变成了没有复合活性的 B_s 和 O_{2i} , 从而使晶体硅的少子寿命和太阳电池的性能参数得以完全恢复^[7,9-11]。

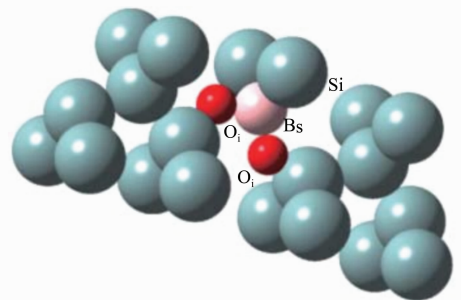


图 1 B_sO_{2i} 缺陷的结构示意图^[7]

Fig. 1 The diagram of structure of B_sO_{2i} complex

除了 B_sO_2 模型以外, Voronkov 于 2010 年提出了由一个间隙硼 (B_i) 和两个间隙氧 (O_i) 组成的 B_iO_2 模型。Voronkov 的模型是基于 B 和 P 共掺杂的 p 型补偿硅片光衰与空穴浓度有关的实验结果提出来的。该模型认为光照前材料中存在由一个间隙硼 (B_i) 和两个间隙氧 (O_i) 组成的潜在 B_iO_2 缺陷。光照产生的非平衡少数载流子 (电子) 诱发了潜在的 B_iO_2 缺陷的重构 (reconstruction), 形成了有复合活性的 B_iO_2 缺陷^[12]。图 2 给出了该模型从降级 (degradation)、恢复 (recovery)、到潜在 B_iO_2 缺陷重新生成 (recreation) 的全过程示意图。潜在的 B_iO_2 缺陷的重构形成了有复合活性的 B_iO_2 缺陷代表降级的过程; 有复合活性的 B_iO_2 缺陷的分解和间隙硼原子 (B_i) 的聚集形成了硼团簇 (B_i -cluster) 代表长时间光照后的恢复; 硼团簇释放间隙硼原子和接下来氧原子对对间隙硼原子的束缚代表了黑暗条件下潜在 B_iO_2 缺陷重新生成的过程^[12]。

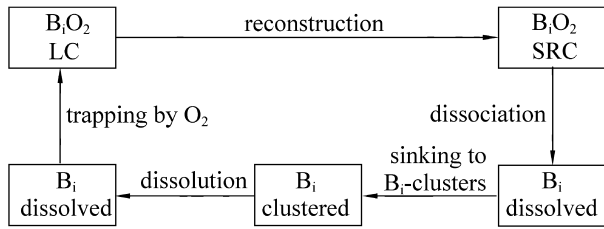


图 2 B_iO_2 模型给出的降级、复原、潜在 B_iO_2 缺陷重新生成的过程示意图^[12]

Fig. 2 A flow chart for degradation, recovery and recreation of the latent B_iO_2 defects

2014 年, Voronkov 修改了模型, 提出快速光衰阶段主要的复合中心 FRC (fast-formed recombination center) 开始于潜在的 B_sO_2 复合体, 而慢速光衰阶段主要的复合中心 SRC (slow-formed recombination center) 开始于潜在的 B_iB_sO ^[13]。在该模型中, B_iB_sO 被认为在低温条件下由 B_iO 分解产生的快速扩散杂质 B_i 与 B_sO 反应生成。因此, 潜在的 B_iB_sO 的冻结 (frozen-in) 浓度被认为与 p_0 和 $[O_i]^2$ 成正比, 尽管复合体中只包含一个氧原子。在光照过程中, B_iB_sO 被认为发生了少数载流子引起的重构, 其荷电态从 0 变为 -1, 形成了 SRC 缺陷^[13]。该模型的另一个基本特征是包含了快速扩散杂质 B_i 原子, 因此可通过将其转变为硼纳米沉淀而消除潜在的 B_iB_sO 复合体。

尽管国际上许多单位譬如德国 ISFH 研究所^[7, 9-10]、英国 Exeter 大学^[11]、意大利 MEMC 公司^[12-13]、澳大利亚 UNSW 大学^[14] 包括我国的浙江大学硅材料国家重点实验室^[15-18] 都对硼-氧缺陷的本质属性以及硼-氧缺陷引起的光衰 (BO-LID) 的内在机制进行了大量的研究, 但是在理论上具体的有复合活性的缺陷至今仍不清楚^[19]。

2 光衰抑制措施的研究

在掺硼 p 型晶体硅片及其太阳能电池的 LID 及其抑制措施的实验研究方面, 特别值得一提的是: 国际上的一些主要研究机构曾在 1999 年对该问题进行了联合研究^[20]。研究所用的硅片包括不同掺杂浓度的掺硼直拉单晶硅 (B-Cz-Si)、掺磷直拉单晶硅 (P-Cz-Si)、掺镓直拉单晶硅 (Ga-Cz-Si)、掺硼区熔单晶硅 (B-FZ-Si)、掺硼磁控直拉单晶硅 (B-MCz-Si) 等。这些不同掺杂类型和种类的硅片由日本 Shin-Etsu Handotai 公司提供。该研究致力于寻找 LID 与硅片种类、掺杂类型、掺杂浓度 (特别是替位硼 (B_s) 和间隙氧 (O_i) 的浓度) 之间的关系。研究得到的主要结论有^[20-23]: ① 氧含量较高 (约 10 ~ 18 ppma) 的 B-Cz-Si 存在 LID 现象; ② 氧含量极低 (<0.1 ppma) 的 B-FZ-Si 无 LID 现象; ③ 氧含量很低 (<几个 ppma) 的 B-MCz-Si 几乎没有 LID 现象; ④ B-Cz-Si 的 LID 与硼和氧的浓度密切相关, 暗示了存在 B-O 缺陷; ⑤ 高温过程有助于减小 B-Cz-Si 的 LID; ⑥ 掺磷直拉单晶硅 (P-Cz-Si) 或掺磷区熔单晶硅 (P-FZ-Si) 均无 LID 现象; ⑦ 掺镓直拉单晶硅 (Ga-Cz-Si) 无 LID 现象。由以上结论, 可以总结出抑制掺硼 Cz-Si 及其太阳能电池的 LID 现象的措施。但, 这些措施却因为种种原因至今也没有在工业界获得大面积的推广应用。例如, 使用 MCz-Si 虽然可以把硅单晶棒中的氧含量降低到可接受的水平。但是, 由于该方法需要在常规单晶炉上加装磁体装置。这不仅增加了设备投资, 而且使得生长过程比常规 Cz-Si 过程复杂, 需要消耗更多的能量。因此, MCz-Si 的生产成本较高^[2]; FZ-Si 片质量虽高, 但价格昂贵, 且硅棒直径的大小受到限制。FZ-Si 片目前仅用于半导体工业中, 不符合太阳能电池低成本的要求^[2]; 使用高阻 p 型硅片来降低掺硼浓度, 虽然可以抑制光衰, 但是电池效率也会随之降低^[2]; 若使用 Ga 替代 B 作为 p 型掺杂剂, Ga 掺杂的均匀性问题则无法解决, 造成单晶硅棒的头尾电阻率变化很大,

使得硅棒的利用率降低^[2]；若使用掺磷 n 型硅片制作电池，太阳电池的制程需要做相应的改变。此外，掺磷 n 型硅片存在 BBr_3 热扩散形成的 p^+ 发射结均匀性较差、扩硼制结需要更长的时间和更高的温度以及硼发射结电极接触的问题等^[2,24]。

近来，在掺硼 p 型 Cz-Si 及其太阳电池 LID 抑制措施研究方面取得了一些突破性的进展。Herguth 等^[8]于 2006 年发现掺硼 Cz-Si 太阳电池在载流子注入（譬如使用光强大于 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 的光照射）的同时给予加热（ $50 \sim 210\ ^\circ\text{C}$ ），B-O 缺陷引起的衰减（BO-LID）会发生“复原”反应，即 B-O 缺陷会由具有复合活性的“降级态”转变为丧失复合活性的“复原态”。因而，B-O 缺陷造成的少子寿命的衰减基本能完全恢复，更重要的是——B-O 缺陷的“复原态”在太阳电池工作条件下是稳定的。但是，若在 $200\ ^\circ\text{C}$ 退火 1 h 就可完全打破 B-O 缺陷的“复原态”。一旦光照继续，又会发生完全的光衰^[25-29]。为了揭示这一实验现象的机理，2008 年 Herguth 等^[26-27]提出了 B-O 缺陷的“三态模型”并不断对此模型进行了修正。图 3 给出了最新的“三态模型”的示意图^[25]。如图所示，B-O 缺陷有“退火态”（高少子寿命）、“降级态”（低少子寿命）和“复原态”（高少子寿命）3 个状态。退火（annealing）和去稳定（destabilization）发生在黑暗条件下，而降级（degradation）和复原（regeneration）仅在载流子注入时发生^[25]。在 $T > 100\ ^\circ\text{C}$ 的黑暗条件下，“退火”起主导作用；在 $T < 100\ ^\circ\text{C}$ 的光照条件下，“降级”起主导作用；在 $100\ ^\circ\text{C} < T < 230\ ^\circ\text{C}$ 、光照以及样品获得良好氢钝化的条件下，“复原”起主导作用；在 $T > 230\ ^\circ\text{C}$ 时，“去稳定”起主导作用^[25]。所有 4 个反应都是热激活反应，且退火、去稳定、降级和复原所对应的激活能分别为 1.3、1.25、0.4 和 $1.0\ \text{eV}$ ^[28]。到目前为止，BO-LID 的复原反应已被大量实验所证实。

大量实验现象证明：硅体区有氢存在、升高温度和少子注入是 BO-LID 复原反应发生的 3 大必要条件。基于这 3 大必要条件，Wilking 等^[25,28-29]提出了 BO-LID 复原反应的氢钝化模型。该模型认为：少子注入可以显著降低晶体硅中其它杂质原子（譬如硼）对氢原子的束缚势垒；其次，少子注入可以使相当多的氢变为电中性的 H^0 ，而 H^0 比 H^+ 更易在硅晶体中扩散；再次，在 p 型晶体硅中 B-O 缺陷通常带正电，少子注入会改变其自身带电状

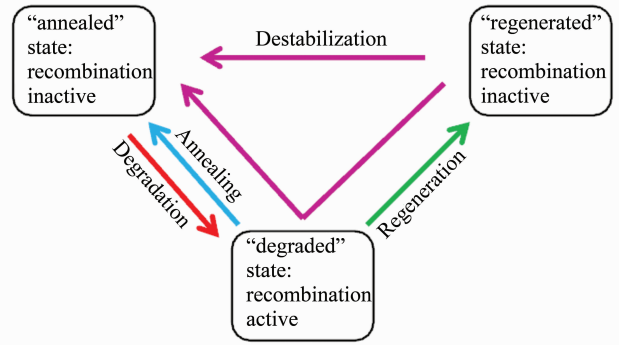


图 3 B-O 亚稳缺陷的 3 种状态及其相互转变的路径^[25]

Fig. 3 Transition reactions between the three B-O related metastable defect states

态，使 H^0 可以更容易地与它们结合。一旦氢变为易移动的原子态的 H^0 ，升高温度可以增强 H^0 的扩散，使得 H^0 对 B-O 缺陷的钝化能更加有效和快速地进行。因此，BO-LID 复原反应实质上就是 B-O 缺陷被 H^0 原子钝化的反应。Wilking 等声称 BO-LID 复活反应的氢钝化模型可以解释所有已知的实验结果^[25, 28-29]。

除了 Wilking 等提出的氢钝化模型以外，Voronkov 还提出了一个用来解释 BO-LID 复原反应的硼纳米沉淀沉降模型。该模型认为，BO-LID 的复原是因为在复原条件（升高的温度和少数载流子注入）下含 B_i 缺陷（包括 $\text{B}_i\text{B}_s\text{O}$ ）分解，产生了自由 B_i 原子， B_i 原子被硼纳米沉淀吸收，造成了所有含 B_i 缺陷（包括 $\text{B}_i\text{B}_s\text{O}$ ）的消失，因此，接下来在室温下光照不会导致新的光衰。值得注意的是，在 Voronkov 给出的 BO-LID 复原模型中，没有氢的参与。该模型认为， $\text{B}_i\text{B}_s\text{O}$ 缺陷的分解和 B_i 沉降为硼纳米沉淀是 BO-LID 复原的关键。因为硼纳米沉淀的成核温度在 $600\ ^\circ\text{C}$ 附近，所以复原的速率应正比于硼纳米沉淀的沉降速率，因此正比于 $600\ ^\circ\text{C}$ 附近的冷却速率^[13,30]。

然而，Hallam 等于 2015 年报道的实验结果对氢钝化模型更为有利，他们的研究表明^[31]，只有表面覆盖有 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 膜并且经过链式烧结炉快速热处理的样品才显示了复原反应，此外，完全的寿命恢复可以在峰值温度大于 $500\ ^\circ\text{C}$ 的烧结过程实现，该温度低于硼纳米沉淀沉降模型给出的临界温度（ $600\ ^\circ\text{C}$ ）。通过在链式烧结炉热处理之后引入一个历时 8 s 的“快速形成并同时氢钝化 B-O 缺陷”的激光氢钝化过程，在约为 $360\ ^\circ\text{C}$ 的峰值温度下寿命样品中超过 95% 的 B-O 缺陷被氢化了，而将同样

的过程应用于标准的丝网印刷铝背场电池, 电池的效率在接下来的光衰测试中是稳定的, 而没有进行激光氢钝化处理的电池遭受了 0.7% (绝对值) 的效率降级。作者认为 B-O 缺陷的快速氢钝化 (8 s) 得益于 B-O 缺陷的快速形成 (4 s), 因为该过程使用了 160 Suns 的高光强来加速 B-O 缺陷和氢原子 (H^0) 的形成。然而, 与 Voronkov 持相同观点的 Walter 等^[32]于 2016 年发表的论文, 仍坚持他们原来的观点, 认为 BO-LID 的复原不需要氢的参与; 影响复原反应的关键参数是冷却速率而不是氢含量, 冷却速率越快, 复原速率越快; 高温烧结时从含氢钝化层释放的氢对 BO-LID 的复原反应没有贡献。然而, 为了获得大于 1ms 的少子寿命, 富氢钝化层和快速退火这两个条件缺一不可, 作者认为这是氢钝化了硅片中的其他本底缺陷所致。总之, 人们有关 BO-LID 复原反应的机理仍存在争论。

3 展望

自 B-O 缺陷“复原”反应被发现以来, 人们已对 BO-LID 复原反应与复原条件 (如温度、光强和氢含量) 的关系做了大量研究, 并基本弄清了它们之间的关系和反应机理。但到目前为止, BO-LID 复原技术还没有在产业界获得大规模推广应用, 主要原因是与产业化密切相关的问题还没有获得很好地解答^[33]。譬如, BO-LID 复原反应的长期稳定性如何? BO-LID 复原过程的处理时间能否满足生产流水线对过程时间的要求? 为了避免不可控因素的干扰, 已发表的绝大部分有关 BO-LID 复原反应的研究都是在“寿命样品”上获得的。这些研究结果在多大程度上对实际生产的太阳能电池有效, 以及太阳能电池生产工艺应做哪些调整和改进, 仍是一个未知数^[33]。此外, 就目前的研究结果来看, BO-LID 复原反应并不能完全钝化晶体硅内部的 B-O 缺陷。因为 B-O 缺陷只能终止于一个由退火态、降级态和复原态组成的混合态。有研究表明, 在理想的工艺条件下, $(97 \pm 2)\%$ 的 B-O 缺陷可被钝化^[25]。

BO-LID 复原技术的发展有可能彻底解决掺硼 p 型晶体硅太阳能电池的 LID 问题, 所以我们认为它将是掺硼 p 型晶体硅太阳能电池的光衰及其抑制研究下一步工作的重点。而, 对 BO-LID 复原技术的研究将主要围绕与其产业化应用密切相关的问题展开, 特别是产业化最关心的问题——“BO-LID 复原反应的长期稳定性”无疑将是未来研究的重点方

向。目前, 有关 BO-LID 复原反应的长期稳定性的报道严重偏少。已有的少量报道, 也是利用理想样品在较短时间内获得的结果。譬如, Wilking 等对已复原的“寿命样品”在 60 °C 下用一个太阳光强进行了长时间 (60 d) 光照以模拟太阳能电池实际的运行条件, 发现已复原的 B-O 缺陷出现了降级, 但却并不显著; 而占比更大的寿命降级则是由 B-O 缺陷以外的其它缺陷引起的 (例如表面钝化的降级)^[25]。因已有的关于 BO-LID 复原反应的长期稳定性的研究存在数量严重偏少和实验条件过于理想化等缺点, 以致于并不能打消人们对 BO-LID 复原反应的长期稳定性的疑虑。我们认为: 只有对经复原技术处理的“寿命样品”、“掺硼 p 型晶体硅太阳能电池”以及“晶体硅太阳能电池组件”的少子寿命和转换效率等参数在“实验室环境”、“户外环境”条件下进行系统长期 (至少 1 年) 的 LID 测试, 才能对“BO-LID 复原效果的长期稳定性”的问题给出令人满意的解答和令人信服的证据。值得一提的是, 晋能公司在 2016 年 6 月召开的 32 届欧盟光伏会议 (32nd EUPSEC) 上报道了 PERC 电池复原稳定性的研究成果^[34]。他们对 PERC 电池进行了“电注入 + 加热”复原处理, 然后将它们封装为组件进行了户外测试, 结果表明, 经过复原处理的 PERC 电池组件在 75 d 的户外测试中性能保持稳定, 因光衰造成的功率损失小于 1.5%, 该结果优于常规多晶硅电池, 展现了较高的稳定性。

4 结论

掺硼 p 型晶体硅太阳能电池凭借其掺杂的均匀性和工艺技术的成熟性长期牢固占据着光伏市场的主导地位, 但其自身存在的 LID 问题也限制了它的进一步发展。自掺硼 p 型晶体硅太阳能电池的 B-O 缺陷被发现以来, 人们对掺硼 p 型晶体硅太阳能电池的 LID 及其抑制进行了大量的研究, 基本上明确了 B-O 缺陷是引起掺硼 p 型 Cz-Si 太阳能电池 LID 的主要原因, 揭示了 BO-LID 的机理, 并提出了一些抑制 BO-LID 的有效措施。特别地, 最新发展出的 BO-LID 复原技术有可能彻底解决掺硼 p 型晶体硅太阳能电池的 LID 问题。目前, BO-LID 复原技术之所以还没有实现大规模产业化应用, 是因为与产业化密切相关的问题还没有获得很好地解答。随着研究的深入, 相信阻碍 BO-LID 复原技术实现大规模产业化应用的问题会逐一被解决, 而掺硼 p 型晶体硅太阳能电池的 LID 也将会在极大程度上被抑制。

参考文献:

- [1] ITRPV. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2015 Results including maturity reports [R]. Edition 7th 2016; 29 – 32.
- [2] GOODRICH A, HACKE P, WANG Q, et al. A wafer-based mono-Si photovoltaics road map: Utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2013, 114: 110 – 135.
- [3] FISCHER H, PSCHUNDER W. Investigation of photon and thermal induced changes in silicon solar cells [C]// The 10th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 1973: 404 – 407.
- [4] SCHMIDT J, ABERLE A G, HEZEL R. Investigation of carrier lifetime instabilities in Cz-grown silicon [C]// The 26th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Anaheim, 1997: 13 – 18.
- [5] SCHMIDT J, BOTHE K, HEZEL R. Structure and transformation of the metastable centre in Cz-silicon solar cells [C]// The 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), 2003: 2887 – 2892.
- [6] 王珽玉, 孙佳凉, 林景熙, 等. 浅谈晶硅太阳能电池之光衰现象 [J]. *工业材料杂志*, 2010, 286: 149 – 154.
WANG T Y, SUN J L, LIN J X, et al. An introduction of light-induced degradation on silicon solar cell [J]. *Industrial Technology Research Institute*, 2010, 286: 149 – 154.
- [7] SCHMIDT J, BOTHE K, MACDONALD D, et al. Electronically stimulated degradation of silicon solar cells [J]. *Journal of Materials Research*, 2006, 21(1): 5 – 12.
- [8] HERGUTH A, SCHUBERT G, KAES M, et al. A new approach to prevent the negative impact of the meta-stable defect in Boron doped Cz silicon solar cells [C]// The 32nd IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2006: 940 – 943.
- [9] SCHMIDT J, BOTHE K. Structure and transformation of the metastable boron-and oxygen-related defect center in crystalline silicon [J]. *Physical Review B*, 2004, 69: 024107.
- [10] SCHMIDT J. Light-induced degradation in crystalline silicon solar cells [J]. *Solid State Phenomena*, 2004, 95/96: 187 – 196.
- [11] PALMER D W, BOTHE K, SCHMIDT J. Kinetics of the electronically stimulated formation of a boron-oxygen complex in crystalline silicon [J]. *Physical Review B*, 2007, 76: 035210.
- [12] VORONKOV V V, FALSTER R. Latent complexes of interstitial Boron and oxygen dimers as a reason for degradation of silicon-based solar cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107: 053509.
- [13] VORONKOV V V, FALSTER R. Light-induced boron-oxygen recombination centers in silicon: understanding their formation and elimination [J]. *Solid State Phenomena*, 2014, 205/206: 3 – 14.
- [14] HALLAM B, ABBOTT M, NÆRLAND T, et al. Fast and slow lifetime degradation in boron-doped Czochralski silicon described by a single defect [J]. *Physica Status Solidi (RRL)*, 2016, 10(7): 520 – 524.
- [15] YU X, CHEN P, CHEN X, et al. Ab-initio calculation study on the formation mechanism of boron-oxygen complexes in c-Si [J]. *AIP Advances*, 2015, 5: 077154.
- [16] CHEN X, YU X, ZHU X, et al. First-principles study of interstitial boron and oxygen dimer complex in silicon [J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6: 041301.
- [17] CHEN P, YU X, LIU X, et al. Experimental evidence of staggered oxygen dimers as a component of B-O complexes in silicon [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102: 082107.
- [18] WU Y, YU X, CHEN P, et al. Generation kinetics of boron-oxygen complexes in p-type compensated c-Si [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 102108.
- [19] LINDROOS J, SAVIN H. Review of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2016, 147: 115 – 126.
- [20] SAITOH T, WANG X, HASHIGAMI H. Light degradation and control of low-resistivity CZ-Si solar cells — international joint research [C]// The 11th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC), 1999: 553 – 556.
- [21] GLUNZ S, REIN S, WARTA W, et al. Degradation of carrier lifetime in Cz silicon solar cells [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2001, 65: 219 – 299.
- [22] SAITOH T, WANG X, HASHIGAMI H, et al. Suppression of light degradation of carrier lifetimes in low-resistivity CZ-Si solar cells [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2001, 65: 277 – 285.
- [23] SAITOH T, HASHIGAMI H, REIN S, et al. Overview of light degradation research on crystalline silicon solar

- cells [J]. *Progress in Photovoltaics*, 2000, 8: 537 – 547.
- [24] KOMATSUA Y, MIHAILETCHIA V D, GEERLIGS L J, et al. Homogeneous p + emitter diffused using Boron tribromide for record 16.4% screen-printed large area n-type mc-Si solar cell [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, 93: 750 – 752.
- [25] WILKING S, BECKH C, EBERT S, et al. Influence of bound hydrogen states on B-O-regeneration kinetics and consequences for high-speed regeneration processes [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2014, 131:2 – 8.
- [26] HERGUTH A, SCHUBERT G, KAES M, et al. Investigations on the long time behavior of the metastable boron-oxygen complex in crystalline silicon [J]. *Progress in Photovoltaics*, 2008, 16:135 – 140.
- [27] WILKING S, ENGELHARDT J, EBERT S, et al. High speed regeneration of B-O-defects: Improving long-term solar cell performance within Seconds [C] // The 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC), 2014:366 – 372.
- [28] WILKING S, FORSTER M, HERGUTH A. From simulation to experiment: understanding B-O-regeneration kinetics [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2015, 142:87 – 91.
- [29] WILKING S, HERGUTH A, HAHN G. Influence of hydrogen on the regeneration of Boron-oxygen related defects in crystalline silicon [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113:194503.
- [30] WALTER D C, LIM B, BOTHE K, et al. Effect of rapid thermal annealing on recombination centres in boron-doped Czochralski-grown silicon [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(4):42111.
- [31] HALLAM B J, HAMER P G, WANG S, et al. Advanced hydrogenation of dislocation clusters and boron-oxygen defects in silicon solar cells [J]. *Energy Procedia*, 2015, 77:799 – 809.
- [32] WALTER D C, SCHMIDT J. Impact of hydrogen on the permanent deactivation of the boron-oxygen-related recombination center in crystalline silicon [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2016, 158:91 – 97.
- [33] HERGUTH A, WILKING S, HORBELT R, et al. Accelerating boron-oxygen related regeneration: lessons learned from the BORNEO project [C] // The 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC), 2015:804 – 807.
- [34] LI G, WANG J, HUANG J, et al. A rigorous testing on regenerated PERC solar cell [C] // The 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC), 2016: 904 – 906.