

硅片及其太阳能电池的光衰规律研究*

曾湘安 艾斌† 邓幼俊 沈辉

(中山大学物理科学与工程技术学院, 太阳能系统研究所, 广州 510275)

(2013年9月25日收到; 2013年10月22日收到修改稿)

采用氙灯模拟太阳光源, 将光强调至 1000 W/m^2 , 研究常规太阳能级单晶硅片、多晶硅片和物理提纯硅片的原片、去损减薄片、热氧化钝化片、双面镀氮化硅 ($\text{SiN}_x : \text{H}$) 膜钝化片、碘酒钝化片以及太阳能电池的光衰规律. 利用 WT-2000 少子寿命测试仪以及太阳能电池 I - V 特性测试仪分别对硅片的少子寿命和太阳能电池的 I - V 特性参数随光照时间的变化进行了测试. 结果表明: 所有硅片以及太阳能电池在光照的最初 60 min 内衰减很快随后衰减变慢, 180 min 之后光衰速率变得很小, 几乎趋于零.

关键词: 硅, 光致衰减, 少子寿命, 太阳能电池

PACS: 88.40.hj, 88.40.jj, 71.55.Cn, 73.50.Pz

DOI: 10.7498/aps.63.028803

1 引言

自从 1973 年 Fischer 和 Pschunder^[1] 第一次发现硼 (B) 掺杂硅片的光衰现象以来, 晶体硅材料及其太阳能电池的光衰问题就一直受到人们的关注. 1989 年 Kimerling 等^[2] 提出了施主-受主对 (如 FeB) 分解模型, 认为 FeB 对的光诱导分解使硅太阳能电池的性能受到 Fe 的污染而衰减, 但是这一模型不能完全解释光衰又能恢复的现象. 1997 年 Schmidt 等^[3] 提出光衰现象是由于替位硼 (B_s) 和间隙氧 (O_i) 在光照下生成了对少子具有较强复合能力的硼氧复合体 (B_sO_{2i}). 使得少子复合加强而寿命降低, 从而降低太阳能电池的效率, 至此引起光衰现象的主要因素 B_sO_{2i} 才被发现. 后来, Schmidt 和 Bothe^[4] 又通过研究不同温度下掺 B 单晶硅片的光衰规律发现 B_sO_{2i} 缺陷的产生和消除都是热激活过程, 并且计算出掺 B 单晶硅片 B_sO_{2i} 缺陷的产生和消除激活能分别为 0.4 eV 和 1.32 eV 左右, 光衰现象的本质进一步被了解. 近几年, 物理提纯硅等纯度较低的硅片及其太阳能电池性能的光衰现象又成为新的研究热点^[5-9]. 研究发现, FeB 对也是引起掺 B 物理提纯硅片及其太阳能电池光衰的一个

重要因素, 即光衰为 B_sO_{2i} 和 FeB 对共同作用的结果^[5-7]. 最近, 文献^[8, 9] 的研究表明, 除了 B_sO_{2i} 和 FeB 对以外, Cu 相关的缺陷也是引起掺 B 物理提纯硅片光衰的因素之一.

虽然文献中有不少关于晶体硅片及其太阳能电池光衰规律研究的报道, 但是尚未见到对常规太阳能级单晶硅片、多晶硅片、物理提纯硅片的各种工艺处理片以及太阳能电池的光衰规律进行系统的比较研究. 本文对常规太阳能级掺 B 单晶硅片、多晶硅片以及物理提纯硅片的原片、去损减薄片、热氧化钝化片、双面镀氮化硅 ($\text{SiN}_x : \text{H}$) 膜钝化片^[10-12]、碘酒钝化片以及太阳能电池进行了系统的光衰实验, 结果表明, 所用硅片和太阳能电池具有相似的总体光衰趋势. 该实验和结论对生产和理论研究均具有较强的指导作用.

2 实验

实验采用 $200 \mu\text{m}$ 厚电阻率为 $0.5\text{--}3 \Omega\cdot\text{cm}$ 的 Czochralski 法制备的掺 B 太阳能级单晶硅片, $200 \mu\text{m}$ 厚、电阻率为 $0.8\text{--}3 \Omega\cdot\text{cm}$ 的掺 B 太阳能级多晶硅片, $200 \mu\text{m}$ 厚、电阻率为 $1\text{--}3 \Omega\cdot\text{cm}$ 的掺 B 物理提纯硅片, 以上样品尺寸均为 $156 \text{ mm} \times$

* 国家自然科学基金 (批准号: 50802118)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目 (批准号: 2011A032304001) 和中央高校基本研究经费青年教师培育项目 (批准号: 111gpy40) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: stsab@mail.sysu.edu.cn

156 mm. 实验中, 原片是指未做任何处理的硅片. 去损减薄片是指用如下工艺处理的硅片: 去离子水清洗2—3 min; 20 wt% KOH 80 °C 下反应4 min, 去离子水清洗3—5 min; 15 vol% HCl 常温下浸泡10 min, 去离子水清洗3—5 min; 10 vol% HF 常温下浸泡2 min, 去离子水清洗3—5 min; 甩干机甩干15 min. 热氧化钝化片是指去损减薄片后在热氧化炉中900 °C 干氧热氧化38 min的硅片. 双面镀 SiN_x: H 膜钝化片是指去损减薄片后用等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 设备在450 °C 双面各镀80 nm SiN_x: H 膜的硅片. 碘酒钝化片是指去损减薄片后用0.08 mol/L^[13,14] 的碘酒溶液涂覆钝化表面的硅片. 太阳能电池采用常规工艺制备.

将样品放入宇清电气科技公司的以氙灯作为太阳光模拟器的 YQ-GF-SC 型太阳能电池光衰箱

进行光衰实验, 将光强调至1000 W/m², 每光照一段时间拿出样品, 用 Semilab 公司的 WT-2000 少子寿命测试仪测量并记录硅片的少子寿命, 用 Optosolar 公司的 SOL-120 型太阳能电池 I-V 特性测试仪测量并记录太阳能电池的 I-V 特性参数譬如效率 (E_{ff}), 开路电压 (V_{oc}), 短路电流 (I_{sc}) 和填充因子 (FF) 等.

3 结果与讨论

本文按照硅片的三种类型和五种处理工艺将实验结果分为不同类型同种处理工艺、同种类型不同处理工艺、同种类型同种处理工艺三个方面, 并分别对其进行了分析和讨论. 图 1 给出了不同类型同种处理工艺的硅片的光衰实验曲线.

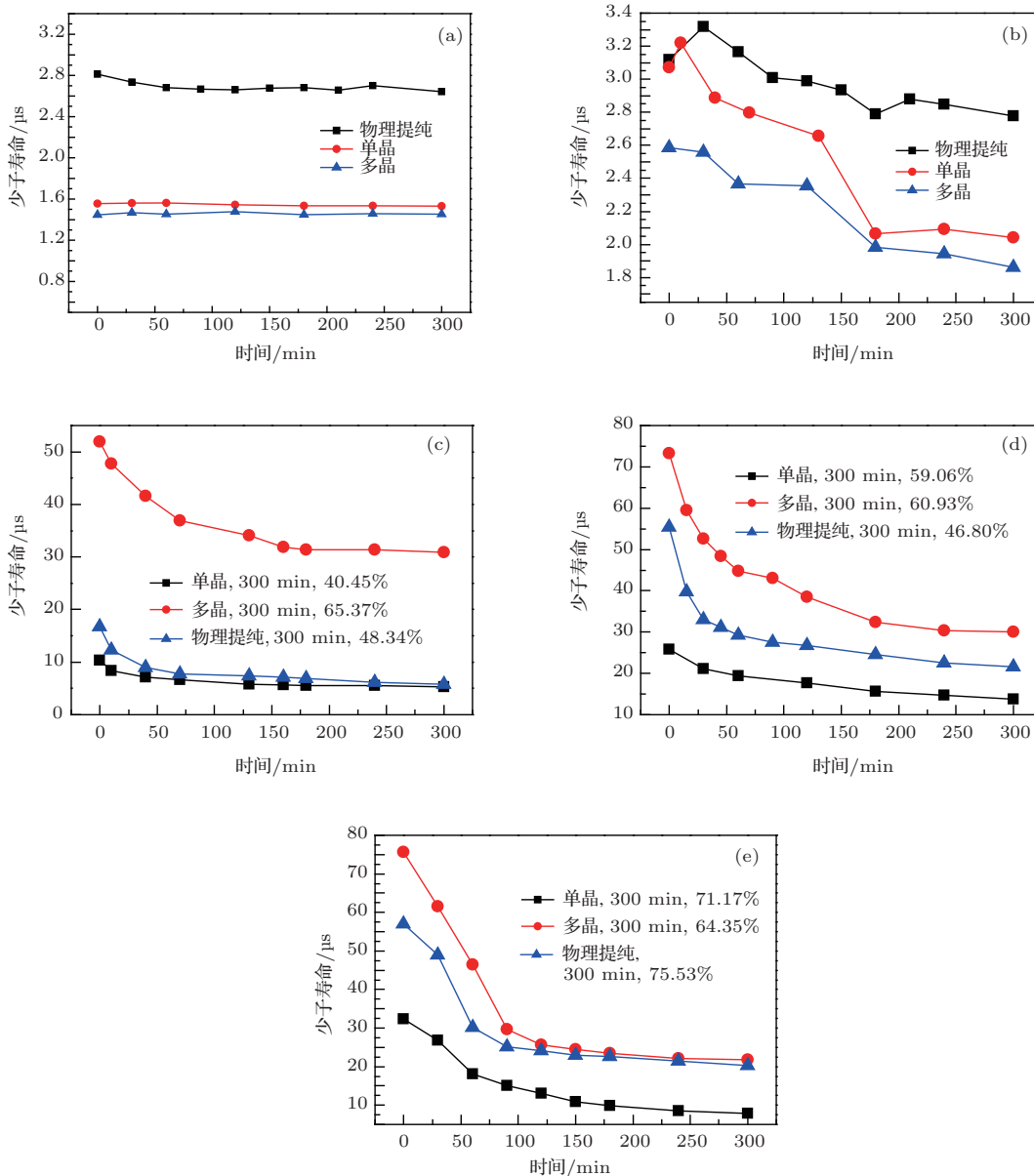


图 1 不同类型同种处理工艺硅片的少子寿命随光照时间的变化关系 (a) 原片; (b) 去损减薄片; (c) 热氧化钝化片; (d) 双面镀 SiN_x: H 膜钝化片; (e) 碘酒钝化片

图 1(a) 给出了单晶硅原片、多晶硅原片以及物理提纯硅原片的少子寿命与光照时间的关系. 由图可知, 所有原片的少子寿命随光照时间均无明显的衰减趋势, 这表明未经清洗和钝化的原硅片的表面复合速率很大, WT-2000 少子寿命仪测出的有效少子寿命几乎只是表面少子寿命, 不能真实反映原硅片的体少子寿命, 因此原硅片的实测少子寿命没有呈现出明显的光衰趋势.

经过去损减薄处理的单晶硅片、多晶硅片以及物理提纯硅片的少子寿命与光照时间的关系如图 1(b) 所示. 从图可以看出, 所有去损减薄片的少子寿命随光照时间的增加呈现出微弱的下降趋势, 这说明去损减薄片虽然没有钝化, 但是除去了表面损伤层使得体少子寿命对有效少子寿命的贡献能够部分显现, 因此实验结果能在一定程度上体现光照对去损减薄硅片体少子寿命的影响.

图 1(c), (d), (e) 分别为热氧化钝化、双面镀 SiN_x : H 膜钝化、碘酒钝化的单晶硅片、多晶硅片以及物理提纯硅片的少子寿命与光照时间的关系, 图中数据表示光照一段时间硅片少子寿命衰减的百分比. 由图可知, 热氧化钝化片^[1]、双面镀 SiN_x : H 膜钝化片^[10,11]、碘酒钝化片^[15] 的少子寿命相比原片都有大幅度提高. 而且, 三种钝化片的光衰都非常明显, 且有比较统一的衰减趋势: 即在光照最初 60 min 内, 所有钝化片的少子寿命衰减得都较快, 随后衰减减慢, 180 min 后, 光衰趋向于饱和. 此外, 对于每一种钝化工艺, 三种硅片的光衰曲线又有一定的差异. 具体而言, 虽然总体的光衰趋势是一致的, 但是衰减幅度和衰减速率有很大差异, 这说明同种钝化工艺不同类型的硅片含有引起光衰的 B_sO_{2i} , FeB 对等的浓度以及形式存在一定的差异, 导致这些硅片的光衰幅度和光衰速率有所不同, 但是 B_sO_{2i} , FeB 对等光致变化的激活能, 无论在何种类型的硅片中都是一样的, 以致又都呈现出相似的总体光衰趋势.

不同处理工艺下同种硅片的光衰曲线如图 2 所示. 图 2(a) 为不同工艺处理的单晶硅片的光衰曲线, 图 2(b) 为不同工艺处理的多晶硅片的光衰曲线, 图 2(c) 为不同工艺处理的物理提纯硅片的光衰曲线. 图中数据表示光照一段时间硅片少子寿命衰减的百分比.

由图 2 可知, 不同处理工艺后的同种硅片基本都在光照最初 60 min 内衰减得很快, 随后衰减速率减慢, 180 min 之后硅片的少子寿命几乎不再变化. 此外, 对不同工艺处理的同种硅片来说, 虽然总体的光衰趋势大体一致, 但其光衰幅度和光衰速率稍有不同, 这说明同一种硅片经过不同工艺处理后其

内部引起光衰的杂质缺陷的形式以及缺陷的浓度等都有所变化.

图 3 和图 4 给出了相同处理工艺下同种硅片的少子寿命随光照时间的衰减曲线. 图 3 为两组热氧化钝化片的光衰曲线, 其中图 3(a) 为单晶硅片, 图 3(b) 为多晶硅片, 图 3(c) 为物理提纯硅片. 图 4 是两组双面镀 SiN_x : H 膜钝化片的少子寿命随光照时间的变化曲线.

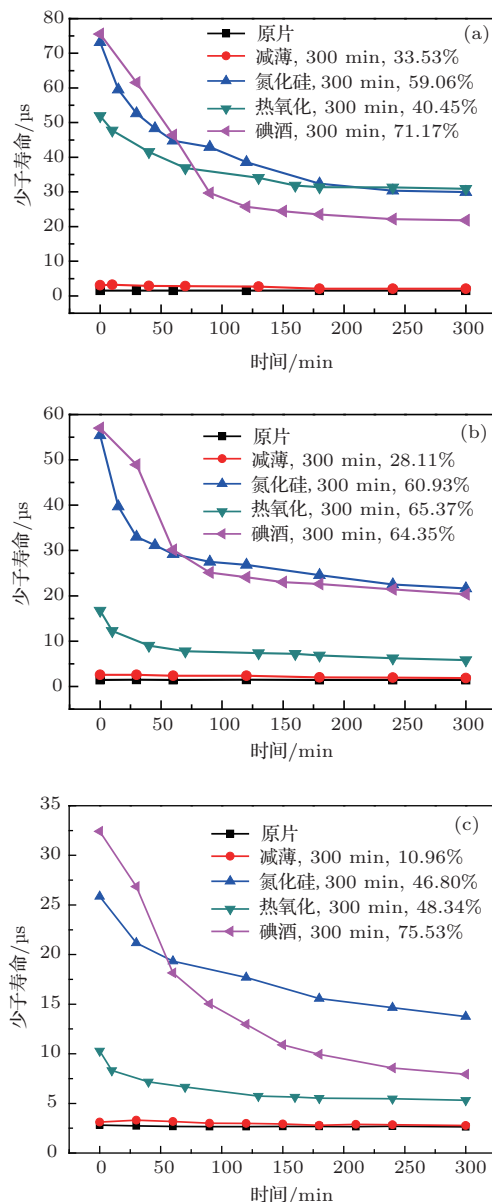


图 2 不同处理工艺下同种硅片的少子寿命随光照时间的变化关系 (a) 单晶硅片; (b) 多晶硅片; (c) 物理提纯硅片 (图中曲线分别为减薄-去损减薄片; 氮化硅-双面镀 SiN_x : H 膜钝化片; 热氧化热氧化钝化片; 碘酒碘酒钝化片)

由图 3 和图 4 可以看出, 无论是单晶硅片、多晶硅片还是物理提纯硅片, 两组热氧化钝化片和两组双面镀 SiN_x : H 膜钝化片均呈现出基本一致的光衰趋势、光衰幅度和光衰速率. 这表明无论是热氧

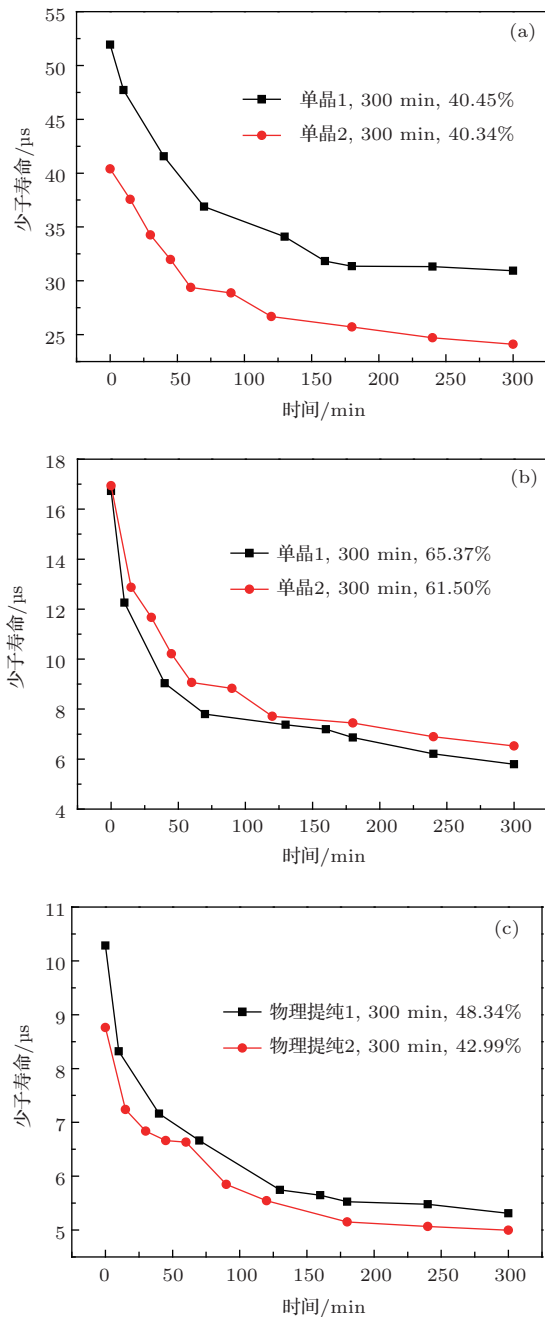


图3 两组热氧化钝化的硅片的少子寿命随光照时间的变化关系 (a) 单晶硅片; (b) 多晶硅片; (c) 物理提纯硅片

化钝化还是双面镀 $\text{SiN}_x : \text{H}$ 膜钝化同种硅片内引起光衰的杂质缺陷的浓度以及形式等都几乎相同, 这也表明热氧化钝化工艺和双面镀 $\text{SiN}_x : \text{H}$ 膜钝化工艺的重复性较好而且同种硅片片间的差异性较小, 基本上能够满足本实验的要求。

本文通过测量太阳能电池的 $I-V$ 特性参数随光照时间的变化研究了太阳能电池性能的光衰规律。图5给出了不同类型太阳能电池的效率、开路电压、短路电流、填充因子等 $I-V$ 特性参数随光照时间的变化曲线。

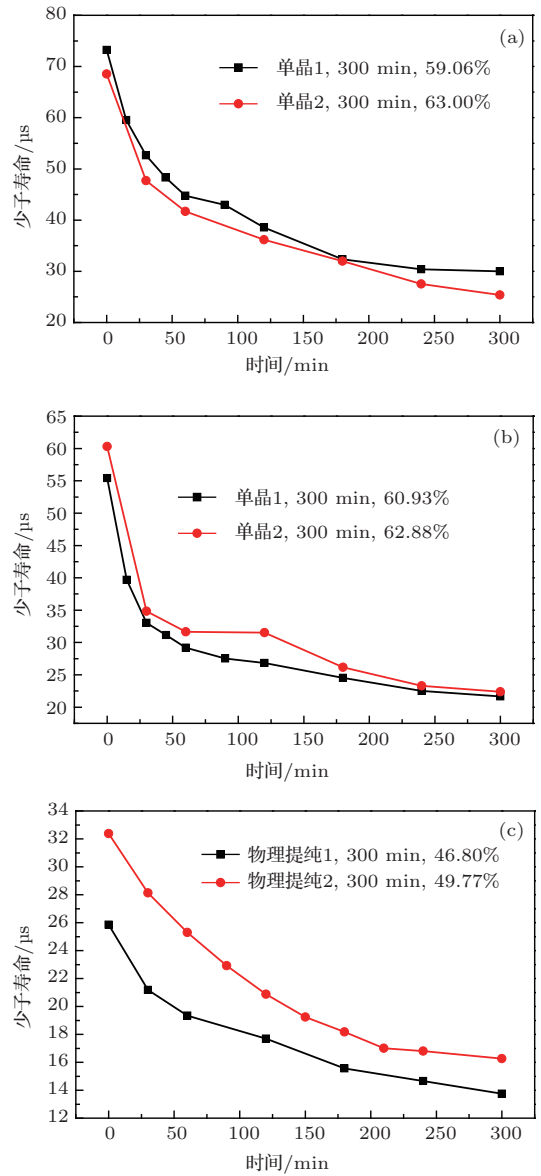


图4 两组双面镀 $\text{SiN}_x : \text{H}$ 膜钝化片的少子寿命随光照时间的变化关系 (a) 单晶硅片; (b) 多晶硅片; (c) 物理提纯硅片

图5(a)–(d)分别为单晶硅、多晶硅以及物理提纯硅太阳能电池效率、开路电压、短路电流和填充因子随光照时间变化的曲线。由图可知, 三种太阳能电池的开路电压都呈现出与硅片少子寿命一致的光衰趋势, 即在光照前60 min衰减很快, 随后衰减变慢, 光照180 min后, 光衰趋于饱和。该实验结果可以从电池的开路电压主要受电池内暗饱和电流(复合电流)的影响得到解释, 光照引起硅片少子寿命衰减, 意味着电池体区复合电流增加继而开路电压减小, 因此晶体硅太阳能电池的开路电压具有与硅片少子寿命一致的光衰趋势。单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池的短路电流随光照变化不明显。作为比较, 物理提纯硅太阳能电池的短路电流在光照前60 min衰减很快, 这说明物理提

纯硅太阳能电池的体复合远比单晶硅和多晶硅太阳能电池严重. 有趣的是, 三种太阳能电池的填充因子均随光照时间的延长持续减小. 开路电压、短路电流和填充因子随光照时间的变化趋势最终导致电池效率具有与硅片少子寿命大致相仿的光衰趋

势. 此外, 不同类型的太阳能电池的 $I-V$ 特性参数虽然总体光衰趋势基本一致, 但是其光衰幅度和光衰速率都有所差异, 这表明不同类型的太阳能电池中引起光衰的杂质缺陷的浓度以及形式等不尽相同.

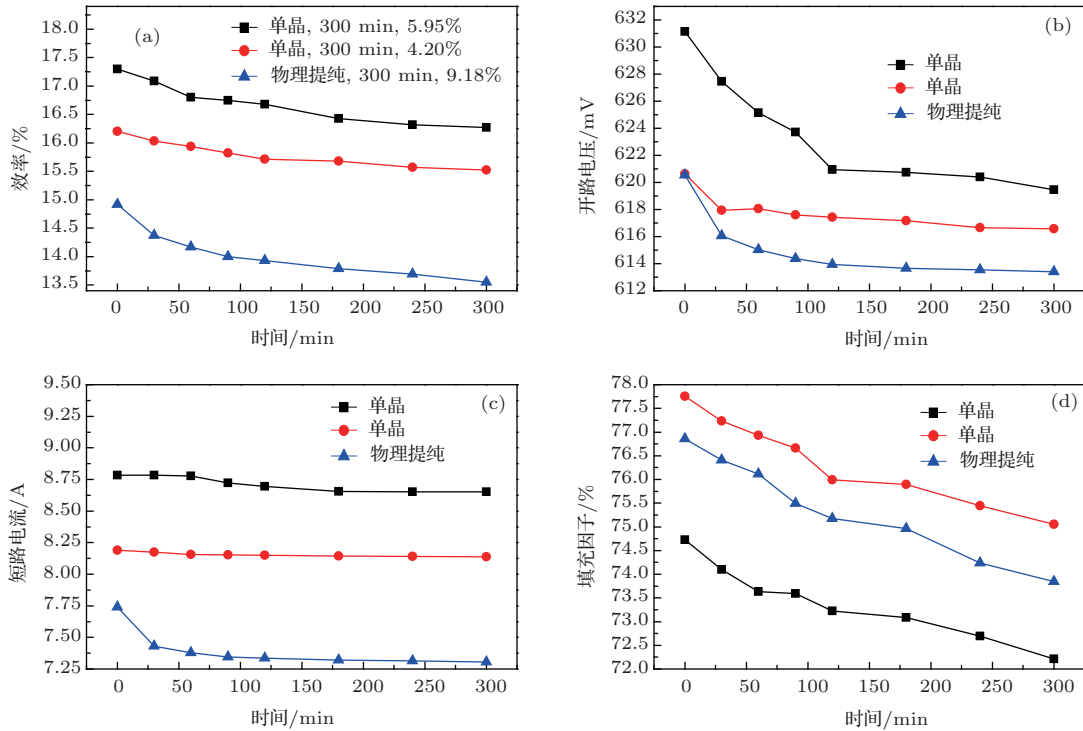


图5 不同类型太阳能电池的 $I-V$ 特性参数随光照时间的变化关系 (a) 效率; (b) 开路电压; (c) 短路电流; (d) 填充因子

4 结 论

本文研究了常规太阳能级单晶硅片、多晶硅片和物理提纯硅片的原片、去损减薄片、热氧化钝化片、双面镀 SiN_x : H 膜钝化片、碘酒钝化片以及太阳能电池的光衰规律. 结果表明: 这些硅片以及太阳能电池均呈现出相似的总体光衰趋势, 即在光照最初 60 min 内其特征参数衰减得非常快, 随后衰减变慢, 180 min 之后, 光衰很小趋于饱和. 对同种处理工艺同种类型的硅片, 其总体光衰趋势基本一致, 而且其光衰速率和光衰幅度都相差不多. 对同种处理工艺不同类型的硅片, 不同处理工艺同种类型的硅片以及不同类型的太阳能电池而言, 虽然总体光衰趋势基本一致, 但是其光衰速率和光衰幅度存在一定的差异.

参考文献

[1] Fischer H, Pschunder W 1973 *Proceedings of 10th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Palo Alto, Califor-

nia, November 13–15, 1973 p404
 [2] Kimerling L C, Asom M T, Benton J T, Drevinsky P J, Caefer C E 1989 *Mater. Sci. Forum.* **141** 38
 [3] Schmidt J, Aberle A G, Hezel R 1997 *Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Anaheim, California, September 29–October 3, 1997 p13
 [4] Schmidt J, Bothe K 2004 *Phys. Rev. B* **69** 024107
 [5] Reina S, Glunz S W 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 113711
 [6] Schmidt J 2005 *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **13** 325
 [7] Jiang L L, Lu Z L, Zhang F M, Lu X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 110101 (in Chinese)[姜丽丽, 路忠林, 张凤鸣, 鲁雄 2013 物理学报 **62** 110101]
 [8] Osinniy V, Bomholt P, Nylandsted Larsen A, Enebak E, Soiland A K, Tronstad R, Safir Y 2011 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95** 564
 [9] Savin H, Yli-Koski M, Haarahitunen A 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 152111
 [10] Schmidt J, Kerr M 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **65** 585
 [11] Rohatgi A, Yelundur V, Jeong J 2000 *Proceedings of 16th Euro Photovoltaic Solar Energy Conference* Glasgow, May1–5, 2000 p1120
 [12] Zhang X, Liu B W, Xia Y, Li C B, Liu J, Shen Z N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 187303 (in Chinese)[张祥, 刘邦武, 夏洋, 李超波, 刘杰, 沈泽南 2012 物理学报 **61** 187303]

[13] Schmidt J, Bothe K 2004 *Phys. Rev. B* **69** 024107

[15] Stephens A W, Green M A 1997 *Sol. Energy Mater. Sol.*

[14] Herguth A, Schubert G, Kaes M, Hahn G 2008 *Prog.*

Cells **45** 255

Photovolt: Res. Appl. **16** 135

Study on light-induced degradation of silicon wafers and solar cells*

Zeng Xiang-An Ai Bin[†] Deng You-Jun Shen Hui

(Institute for Solar Energy Systems, School of Physics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

(Received 25 September 2013; revised manuscript received 22 October 2013)

Abstract

In this paper, the laws of light-induced degradation (LID) in silicon wafers and solar cells are investigated by using xenon lamp as light source. There are tested 15 types of the silicon wafers contain the including primary wafer, chemical thinned wafer, thermal oxidation passivation wafer, passivation SiN_x : H wafer deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition, iodine passivation wafers of three different types of silicon: B-doped CZ-Silicon, B-doped Multicrystalline (MC) silicon, and B-doped Upgraded-Metallurgical-grade (UMG) silicon. There are tested 3 types of silicon solar cells: CZ solar cell, MC solar cell, and UMG solar cell. The light intensity is 1000 W/m^2 in test. By using WT-2000 tester and solar cells I - V tester, the variations of minority carrier lifetimes of silicon wafers and the I - V characteristic parameters of solar cells with time of light exposure are tested and recorded. Finally the law of LID is found. Under our light condition (light source is a xenon lamp with a light intensity of 1000 W/m^2), all kinds of silicon wafers and solar cells are degraded rapidly within the first 60 min, then slowly until the 180 min, finally the rate tends to 0. The LID becomes very slight after 180 min lighting.

Keywords: silicon, light-induced degradation, minority carrier lifetime, solar cells

PACS: 88.40.hj, 88.40.jj, 71.55.Cn, 73.50.Pz

DOI: 10.7498/aps.63.028803

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50802118), the Strategic Emerging Industries Core Technology Research Projects of Guangdong Province, China (Grant No. 2011A032304001), and the Central Universities Nurture Young Teachers of Basic Research Funding Projects, China (Grant No. 11lgpy40).

[†] Corresponding author. E-mail: stsab@mail.sysu.edu.cn