

多晶硅太阳能电池转换效率和晶体缺陷相关性

张映斌^{1,2}, 熊震², 陈奕峰², 冯志强², 杨平雄^{1*}, 褚君浩¹

(1. 华东师范大学信息科学与技术学院极化材料与器件教育部重点实验室, 上海 200241;

2. 常州天合光能有限公司光伏科学与技术国家重点实验室, 江苏常州 213031)

摘要:多晶硅太阳能电池组件以它显著的综合成本优势被广泛应用. 铸锭多晶硅的晶体缺陷特征与其电池转换效率有着强烈的关联性. 晶体的底部和顶部缺陷密度高, 对应的电池转换效率低(14.5~15.5%); 晶体中部因为较低的缺陷密度, 对应着较高的电池转换效率(16.5~17.5%). 不同种类的晶体缺陷对电池效率的影响又不尽相同, 比如位错等顽固性缺陷会保留至终, 而间隙态金属杂质等可去除的缺陷则会在电池制备过程中得以消除.

关键词:多晶硅; 缺陷; 少子寿命; 电池转换效率

中图分类号: O77 **文献标识码:** A

Correlation between polycrystalline based solar cell conversion efficiency and crystallization defects

ZHANG Ying-Bin^{1,2}, XIONG Zhen², CHEN Yi-Feng², FENG Zhi-Qiang²,
YANG Ping-Xiong^{1*}, CHU Jun-Hao¹

(1. Key Laboratory of Polar Materials and Devices, Ministry of Education, Department of Electronics,
East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. State Key Laboratory of PV Science and Technology, Changzhou Trina Solar Energy Co., Ltd. Changzhou 213031)

Abstract: With remarkable advantage of comprehensive cost, multicrystalline based photovoltaic module products become the most competitive and widely used PV products. A strong correlation was found between crystal defects of multicrystalline silicon and the cell efficiency thereby. The defect density at the bottom and top brick is very high, as a result, the corresponding cell efficiency is low (14.5~15.5%). The cell efficiency of the wafers from the middle position of brick is high (16.5~17.5%) due to the low defect density. However, different kinds of defects exert different influence on the cell performance. For instance, some stable defects (such as dislocation) will survive at the final cell, and some other defects (such as interstitial metal impurities) are removed during the cell process.

Key words: multicrystalline, defects, minority carrier lifetime, cell conversion efficiency

PACS: 88.40.fh, 88.40.jj

引言

随着传统化石能源耗量的持续增加, 全球出现变暖趋势, 加之“雾霾”等各种极端天气频繁发生, 环境压力不断加重. 作为清洁能源中最具应用前景之一的晶体硅太阳能电池组件以家用屋顶系统, 或以分布式发电系统、大型电站等形式正在迅速地被推广. 然而与传统高污染的火力发电相比, 目前太阳

能发电的成本仍相对偏高, 持续降低太阳光伏产品成本是光伏界追求的目标. 多晶硅太阳能电池组件产品以它显著的综合成本优势不断攻占市场, 成为最有竞争力的光伏产品而被广泛应用. 据 ITRPV (International Technology Roadmap for Photovoltaic) 2014 年路线图预测 (如图 1 所示), 2013 年多晶硅光伏产品的市场份额大约在 62% 左右, 在未来 10 年也还会有相当大的市场份额.

收稿日期: 2014-08-23, 修回日期: 2015-01-27

Received date: 2014-08-23, revised date: 2015-01-27

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20140272); 江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20140273)

Foundation items: Support by Natural Science Foundation of Jiangsu Province under the Project Number of BK20140272 and BK20140273

作者简介 (Biography): 张映斌 (1973-), 男, 四川省巴中市人, 博士研究生在读, 主要研究领域为面向产业化的高效晶体硅太阳能电池及组件产品.
E-mail: address: 52121213002@ecnu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: address: pxyang@ee.ecnu.edu.cn

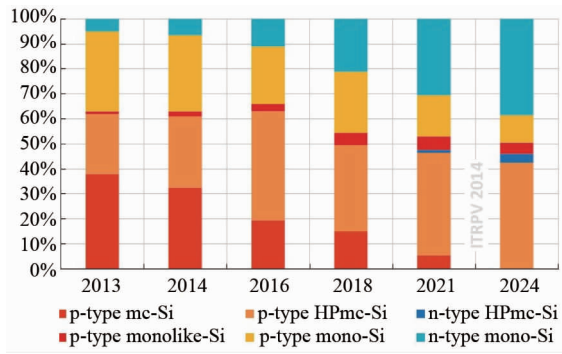


图1 单多晶市场份额路线图

Figure 1 The predicted market share of mono-Si and multi-Si

以定向凝固形式来生长多晶硅的铸锭法,因为工艺简单、成本低廉等特点,一直都是多晶硅生产的主流方法.铸锭多晶硅长晶过程中,由于晶粒大小不一、应力的集中、坍塌的杂质扩散等原因,晶体内存在大量位错^[1]、晶界^[2]以及相对较高的杂质浓度^[3],导致其少子寿命远低于单晶硅,相应地多晶硅电池转换效率也低于单晶硅1%以上.大批量生产数据表明,即使在电池制备工艺条件、工艺设备、操作人员相对一致的情况下,多晶硅太阳能电池转换效率还是有非常广泛的分布范围(15.5~17.2%),如图2所示.麻省理工学院的 Tonio Buonassisi 教授团队^[1,4-6]多年来致力于缺陷的形态、复合能力及控制方面的研究.日本九州大学的 Koichi Kakimoto 教授团队^[7-8]研究了杂质、生长工艺与缺陷形成间的关系. Bernhard Mitchell 等^[9]研究了尝试通过晶体锭块体寿命来预测太阳电池转换效率,然而他们的研究工作仅停留在一般原理性的定性器件模拟、推测上,并未结合实验数据进行实际深入的综合研究.澳大利亚国立大学的 Daniel Macdonald 教授多年来一直致力于硅晶体中缺陷的系统研究^[3,10-11],深入地分析了晶体中各种缺陷在不同工艺条件下的表现形态,及其在不同注入浓度下的复合能力,但该工作并没有拓展到电池的范围.在电池制备工艺中,因为制备发射结所进行的磷扩散,被广泛地认为是有效去除间隙态金属杂质的关键步骤^[12-13],但已有报道中,均没有系统地对晶体中间隙态金属杂质的分布规律及磷吸杂后的微结构特征进行系统研究.

本工作以铸锭多晶硅晶锭的中心位置晶棒和角落位置晶棒为实验样本,线切割成薄硅片后对其按晶体生长顺序进行从底部到顶部的排序,对硅片的少子寿命、电阻率、间隙铁浓度等进行测试分析表

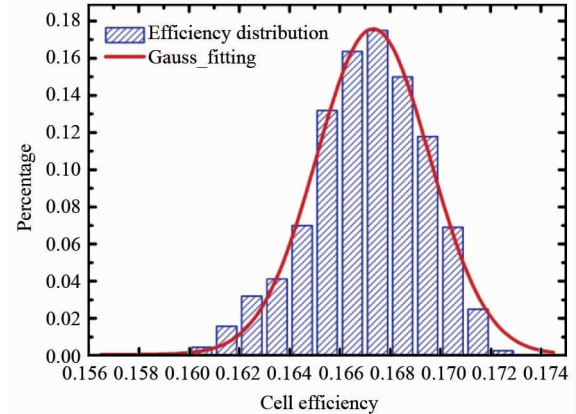


图2 多晶硅太阳能电池转换效率分布

Fig. 2 The efficiency distribution of multicrystalline solar cells

征,并对各部位硅片微结构特征进行了系统对比分析,研究各种晶体缺陷与电池转换效率的相关性,找出其相互作用规律.通过表征晶体少子寿命等参数可以初步预判电池转换效率分布,同时对多晶硅中杂质、缺陷在电池工艺过程中的行为表现研究也为多晶硅晶体生长工艺的优化、晶体质量改善、有针对性的实施电池工艺吸杂优化提供参考,对提升多晶硅电池转换效率具有重要的指导意义.

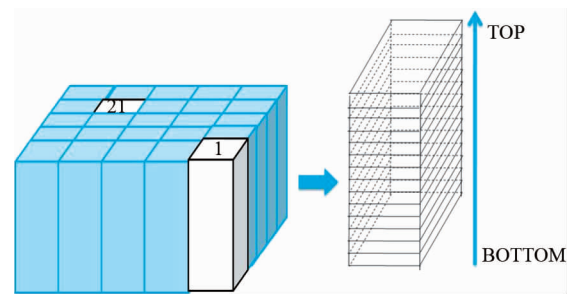


图3 实验锭号选择以及取片方法

Fig. 3 The selection of sampling bricks and wafers

1 实验设计及测试手段

1.1 选用掺硼的P型铸锭多晶作为研究对象,采用产业化的GT DSS 450铸锭炉为实验炉,选取具有代表性的晶锭中心位置21#晶棒以及晶锭角落位置1#晶棒(如图3所示)进行试验,完成切片后硅片尺寸为156 mm × 156 mm,厚度为200 ± 20 μm,并将硅片进行从底部到顶部排序.按姊妹片的取片方法,从底部到顶部每3片中抽取一片分别进行电阻率、少子寿命测试,一片进行间隙铁含量测试,另一片制备成电池.

1.2 为了减少表面复合对测试少子寿命的影响,我们对样品进行表面钝化处理. 样品准备流程包括:将硅片表面进行酸清洗(HF: HNO₃ = 1: 3),去除表面损伤层. 然后将硅片置于 PECVD 镀膜设备里在正反面均镀上一层厚约 70 ~ 80 nm 的 Si₃N₄ 膜,在 700 ~ 800℃ 进行烧结,完将硅片在 Semilab 公司生产的 WT-2000 型微波光电导衰减仪(μ -PCD)上进行少子寿命的面扫描测试.

1.3 将相邻三片中的一片,进行类似 1.2 的方法进行表面清洗、钝化和烧结后,在 Semilab 公司出售的 PV2000 设备上进行间隙铁浓度的测试,其原理是根据 Fe-B(铁硼对)和 Fei(间隙铁)两种铁不同形态的复合中心,在不同光注入浓度下具有差异较大的少子复合能力来间接推断出 Fei 浓度的.

1.4 将相邻三片中的另一片进行电池的制作,工艺流程包括传统的酸制绒、POCl₃ 扩散制备发射结、边缘刻蚀及磷硅玻璃去除、PECVD SiN_x:H 镀膜钝化、丝网印刷金属化、烧结、测试等工艺流程,在制备过程中固定操作人员,固定设备机台一次性完成,减少其他工艺因素波动导致的影响.

1.5 从剩余的样品中从底部、中部、顶部各抽取 1 片进行 PL(Photoluminescence 光致发光)测量,同时对 1.1 中的电池片进行 EL(Electroluminescence 电致发光)测量和电池效率测试. PL 和 EL 是采用澳大利亚 BTImaging 公司生产的 R1-100 设备来测量的,PL 的激光光源为 808 nm,通过 Si 基 CCD 制冷相机来接受荧光信号. PL 测试的曝光时间为 10 s. EL 测试时输入的激发电流为 6 A,曝光时间为 0.5 s. EL 的电极是采用与电池主栅相匹配的电极,共 3 排探针排,每排 12 根探针,其中 1 根电压针,其他均为电流针. 付少永等^[14]研究表明,PL 值是一种综合表征晶体质量的手段,能更加准确的直观显示晶体杂质和缺陷. 为了研究晶体中缺陷在电池工艺过程中的演变,在电池工艺前以及每个工艺步骤进行了 PL 跟踪测试研究看缺陷的行为变化,同时也观察杂质及缺陷对电池转换效率的影响. 电池效率的测试是在 Halm IV 测试上进行,光源是氙灯,分别在 1000 W/m² 和 500 W/m² 各曝光 15 ms,利用双光强法来计算电池特性参数. 电池效率测试的探针为 3 排,每排 16 根,其中 8 根电压针,8 根电流针,电池效率测试的相对误差小于 2%.

2 结果与讨论

2.1 间隙铁杂质分布特征

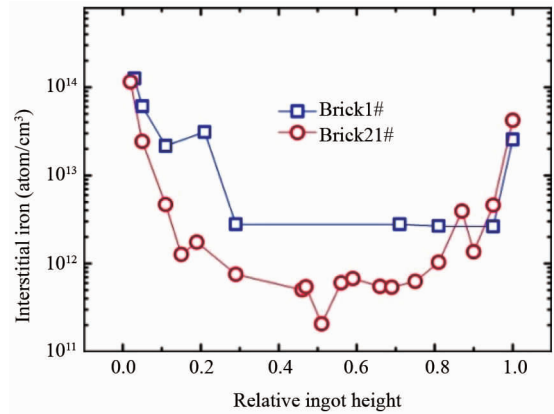


图4 铸锭多晶硅沿晶体生长方向间隙铁分布
Fig. 4 The interstitial iron trend along the crystal growth direction of casting multicrystalline silicon

铸锭多晶硅中的金属杂质种类较多,比如铁、铜、铝等,其中铁是一种最具有代表性的金属杂质. 在铸锭过程中的高温段,铁在硅晶体中的溶解度较高,首先是以间隙态(Fei)或铁硼对(Fe-B)的形式存在. 由于温度的降低,或者局部出现饱和的情况,铁就会以硅铁化合物、氧化铁^[15]的颗粒形式沉淀下来,称之为沉淀铁. 通过测试晶棒 1#和 21#间隙铁杂质浓度(如图 4 所示)沿铸锭多晶生长方向分布可以看出,间隙铁杂质浓度分别在底部和头部约 10% 以内的区域最高,在中部的浓度最低. 硅晶体中铁杂质主要来源于纯度较低(>99.85%)的石英坩埚及喷涂氮化硅粉(>99.50%)的溶解及扩散. 在硅熔体中虽然溶有大量的铁杂质,但铁在硅中的分凝系数很小(理论分凝系数 $k_0 = (5-7) \times 10^{-6}$ ^[16],实际的有效分凝系数 $k_{eff} < 0.05$ ^[17]),在凝固过程中,非常有利于金属杂质向顶部的迁移. 因此,在晶锭的底部,较高的间隙铁浓度主要来自于坩埚中铁杂质向已凝固硅晶体中的高温固相扩散,在晶锭的中部,因为分凝系数小,金属杂质排杂充分,间隙铁浓度非常低,而在晶锭顶部,大量的铁杂质被分凝至最后结晶部位,间隙铁浓度就开始升高. 位于坩埚角落的 1#晶棒因为与坩埚的接触面积大,所以整体的间隙铁浓度相对位于中间的 21#晶棒要高.

Green M A 等^[18]研究表明,各种金属杂质由于其不同的少子捕获界面会对电池转换效率产生不同程度的影响. 金属杂质、位错、碳氧沉淀、晶界等^[19]都是影响少子寿命的主要因素,在多晶硅铸锭过程中需要尽量避免.

2.2 少子寿命分布特征

少子寿命是目前业内公认的能比较有效地综合

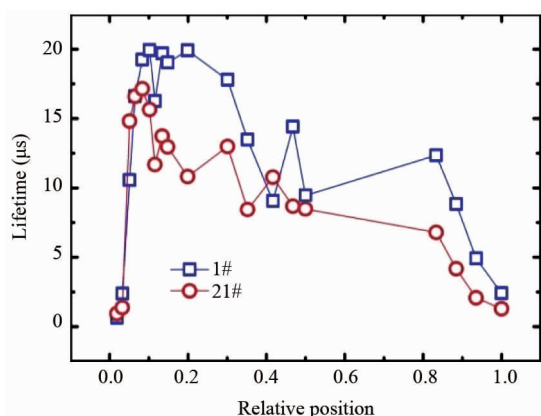


图5 铸锭多晶硅少子寿命沿晶体生长高度的分布图
Fig. 5 The lifetime trend along the crystal growth direction of casting multicrystalline silicon

评价硅晶体质量的有效参数^[2],它是硅晶体内部各种微缺陷少子复合强弱的综合反映.按1.2所述流程双面钝化后测试少子寿命沿晶体生长方向分布如图5所示.可以看出在晶锭底部及顶部相对晶锭中间来说少子寿命较低.该分布规律产生的原因主要来自晶体中各种缺陷的共同作用.以间隙铁为例,浓度分布是首尾高、中间低,是作用于少子寿命的一个关键因素.硅片电阻率随着晶锭生长方向的变化趋势图如图6所示,从晶锭底部到顶部电阻率呈逐渐降低趋势.这主要由于P型掺杂剂硼的分凝系数小于1(k_{eff} 约为0.65^[17])的缘故.分别对1#晶棒和21#晶棒进行了线性拟合,发现21#晶棒的斜率相对较大,即相同高度下,1#晶棒的电阻率要高于21#晶棒.推测原因为坩埚壁有散热作用,在靠近坩埚的角落处,硅液优先结晶,电阻率相对较高.

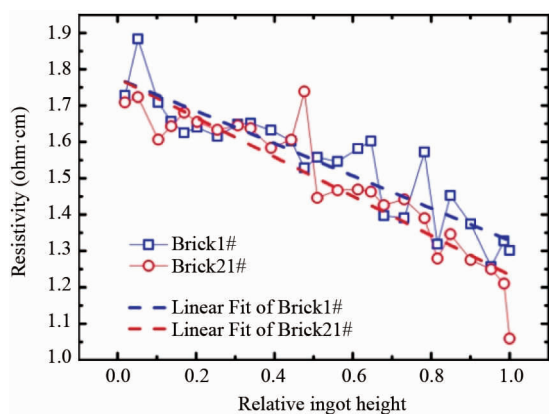


图6 电阻率沿着铸锭多晶生长方向的趋势图
Fig. 6 The resistivity trend along the crystal growth direction of casting multicrystalline silicon

2.3 电池转换效率分布特征

对多晶硅太阳电池而言,其体少子寿命受到诸

如晶界、位错等缺陷的SRH(Schockley-Read-Hall)复合中心密度的强烈影响.多晶硅体内的SRH复合影响到开路电压 V_{oc} 和少子的扩散长度,从而降低太阳电池的短路电流密度 J_{sc} 和填充因子FF.通过理想的二极管模型推导,可以得到体少子的 $J_{0,bulk}$ 遵循以下等式

$$J_{0,bulk} = \frac{qWn_i^2}{(N_A + \Delta n)\tau_{bulk}}, \quad (1)$$

其中 q 代表电子电量, n_i 代表本征载流子浓度, N_A 代表掺杂浓度, Δn 代表注入浓度, τ_{bulk} 代表体少子寿命.

根据太阳电池的开路电压 $V_{oc} \approx \frac{kT}{q} \ln$

$\frac{J_{sc}}{J_{0,bulk,front,rec}}$,以及电池转换效率 $\eta = \frac{V_{oc}I_{sc}}{P_{in}}FF$,可以得到当体复合在整体复合中占主导地位($J_{0,bulk} \gg J_{0,front}, J_{0,real}$)时,太阳能电池转换效率与多晶体少子寿命之间的近似关系:

$$\eta \propto \ln(\tau_{bulk}) \quad (2)$$

即随着少子寿命 τ_{bulk} 的上升, I_{sc} 、 V_{oc} 、 FF 均相应增加,从而太阳电池转换效率提升.为了进一步研究多晶体少子寿命和电池转换效率的这种近似的关系.我们对多晶硅太阳电池转换效率随体少子寿命进行了模拟:我们假设晶体硅太阳电池的厚度为180 μm ,太阳电池前表面是传统的发射极,正面反射率固定为5%,扩散方阻50 ohm/sq ,背面是全铝背场结构,设定正面反向饱和漏电流 $J_{0,front} = 200 \text{ fA}/\text{cm}^2$,背面 $J_{0,rear} = 1000 \text{ fA}/\text{cm}^2$,模拟光强为0.1 W/cm^2 ,光谱为AM1.5标准光谱.如图8所示,当体复合占主导地位时,太阳电池转换效率和开路电压随着体少子寿命从0.01到10 μs 有非常明显的增加趋势,这与式(2)描述的近似关系相符.当体少子寿命达到100 μs 时,电池的开路电压上升到630 mV左右,这是目前大规模产业化晶体硅电池的平均水平.进一步提升体少子寿命到1 ms,电池开路电压以及电池转换效率提升并不明显.这主要的原因是当体少子寿命达到ms级时,体复合的影响相对减少,而来自背面铝背场以及正面发射极的复合成为复合的主要因素,从而限制了电池转换效率.因此,为了进一步提升多晶硅电池转换效率到20%以上,我们需要优化正面发射极并减少背面的复合,如采用背面钝化及局部开孔技术^[20].

对1#晶棒和21#晶棒的实验数据进行了归纳整理,电池转换效率沿铸锭多晶生长方向的趋势图如

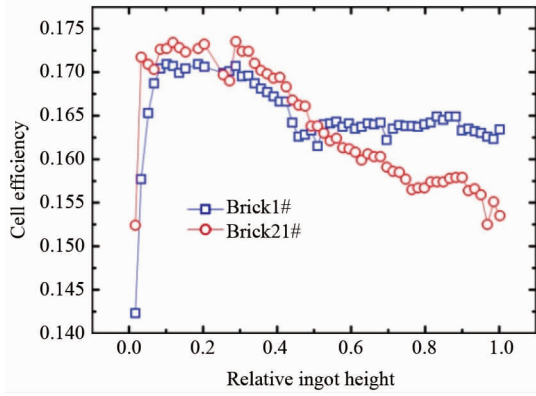


图7 电池转换效率沿着铸锭多晶生长方向的趋势图 (效率测试误差小于2%)

Fig.7 The cell efficiency trend along the crystal growth direction of casting multicrystalline silicon (The efficiency measurement relative error is smaller than 2%)

图7所示,底部效率很低,随着晶锭高度的增加,效率快速升高至最高值,然后再缓慢下降,这和少数寿命沿着晶体生长高度的分布趋势图5非常类似.也发现实际电池转换效率随少数寿命增长的趋势与图8所示的模拟结果非常吻合(如图9所示):电池转换效率随着少数寿命的增大而升高.但在本实验中,也有个别样片少数寿命虽然较低,但电池转换效率偏离趋势的样片,以21-3和1-3为例,其少数寿命值并不能真正反映在电池端的表现.

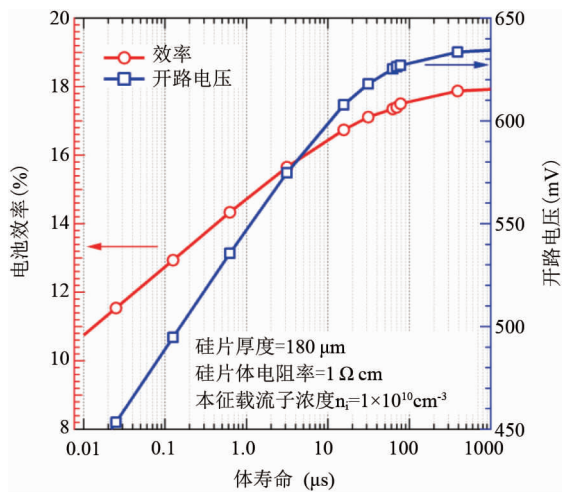


图8 模拟的太阳电池转换效率(红色,左轴)以及开路电压(蓝色,右轴)随多晶硅体少数寿命变化的趋势
Fig.8 The simulated cell efficiency (red color, left) and open voltage (blue color, right) dependence of lifetime for the casting multicrystalline silicon

为了分析上述实验室和模拟值之间的差异,从晶锭底部、中部、头部分别选择有代表性的片源进行PL(Photoluminescence 光致发光)测试,并在工艺完

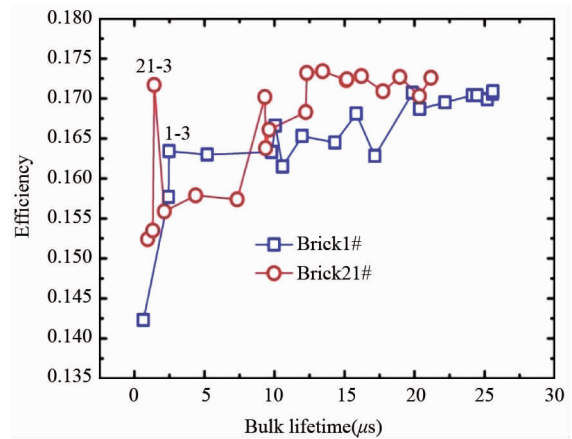


图9 晶体少数寿命和电池转换效率关系图
Fig.9 The cell efficiency dependence of lifetime for the casting multicrystalline silicon

成之后进行EL(Electroluminescence 电致发光)测试,对比其各个工序之间的晶体微缺陷图,如图10所示.系统对比发现,在PL图片中呈连续云状的缺陷经证实为高浓度间隙铁杂质的富聚区,在电池制备完毕后,可以通过吸杂等手段被去除掉.而丝状的缺陷则为高密度稳定的位错或沉淀金属杂质的富聚区.间隙铁虽然会严重地降低硅片少数寿命,但经电池制备中的高温扩散工艺的吸杂去除,并不会显著影响到电池转换效率,这是图9中21-3、1-3等硅片出现“低寿命、高效率”的原因所在.同时,当间隙铁浓度高到一定程度时,电池工艺的吸杂能力有限,这时又会出现“高寿命、低效率”的特征,如1#晶棒在少数寿命高于10 μs时的表现.本实验中,少数寿命测试采用的是μPCD的微波光电导法,双面钝化电介质为带正电荷的氮化硅,针对间隙铁较多的角棒,并不是一种最佳的钝化方法和测试条件.

通常位于晶锭顶部或底部局部区域的高密度位错、沉淀态金属杂质等缺陷的吸杂效果不理想,在电池工艺后EL图上仍然清晰可辨(如图10 top所示).因而通常情况下在大生产过程中为了减少高缺陷片源对电池转换效率造成影响,对晶锭底部,顶部少数寿命小于1.5 μs的所谓“红区”进行截除处理,并作为一项晶体质量的管控标准.

2.4 内量子效率 (Internal Quantum Efficiency, 简称 IQE) 测试分析

选取晶锭底部及中间的硅片进行IQE表征,从图11可以看出,在中长波段(780 nm ~ 1 080 nm)晶锭中间的硅片较晶锭底部的硅片具有2% ~ 5%更高的内量子效率,说明晶锭中部硅片的体缺陷密度

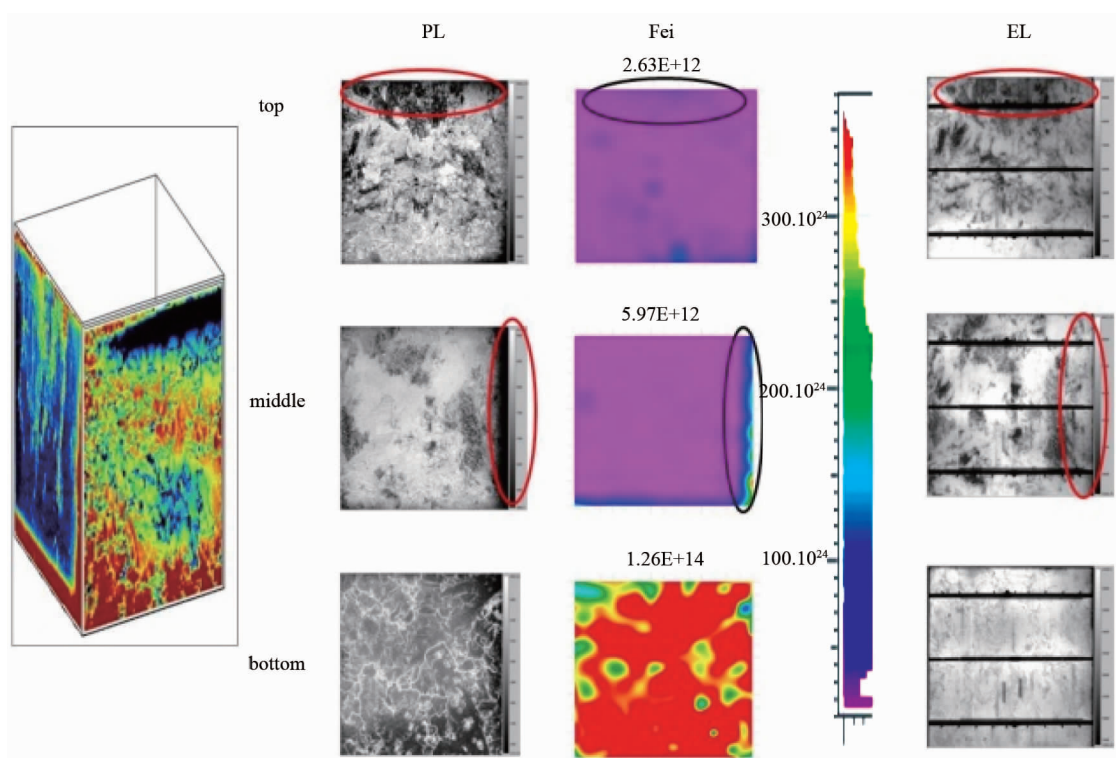


图 10 间隙铁等杂质或缺陷在电池制备过程中的行为表现

Fig. 10 The performance of interstitial iron and some other defects during the cell process

更低,光生载流子被正背面电极捕获的能力更强.这也和晶锭底部相对晶锭中间来说少子寿命较低、硅片质量较差的结论相吻合.

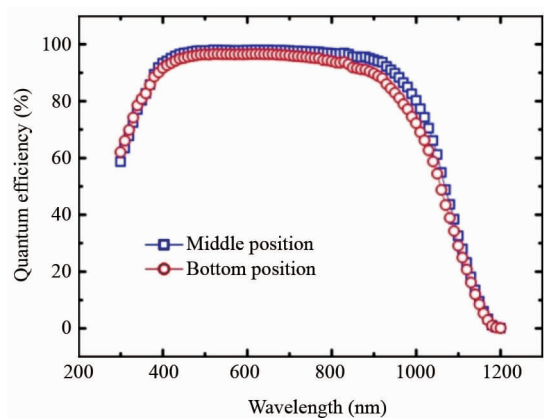


图 11 不同晶锭位置 IQE 表现

Fig. 11 The internal quantum efficiency (IQE) of cells fabricated on the wafers from different position of the brick

3 结语

通过研究发现铸锭多晶沿晶体生长方向少子寿命和电池转换效率表现在底部和头部较低,中部较高.晶体少子寿命和电池转换成正相关性,即少子寿命越长电池转换效率越高.在电池生产中,可以根据

硅片的晶体缺陷特征来投产不同的硅片达到预期的电池转换效率的目的.

底部硅片所含的缺陷主要为高浓度可移除的间隙铁杂质,顶部硅片所含的缺陷主要为不可移除的高密度位错或沉淀态金属杂质.不同的缺陷种类显著影响着少子寿命和电池转换效率关系图.对影响少子寿命的间隙铁通过扩散高温工艺后能较好的去除,而对于其他的位错及晶界却不能通过吸杂被去除,成为永久的复合中心.为了进一步改善晶体质量提升电池转换效率,在晶体工艺中必须将重点放在杂质和位错的改善上.有针对性的实施电池工艺吸杂优化提供参考,为提高多晶硅电池转换效率具有重要的指导意义.

References

- [1] BERTONI M, COLIN C, BUONASSISI T. Dislocation Engineering in Multicrystalline Silicon [J], *Solid State Phenomena*, 2010, 156-158:11-18.
- [2] YANG De-Ren. Characterization and analysis of semiconductor materials [M], Beijing: Science Press, 2010.
- [3] MACDONALD D, GEERLIGS L J. Recombination activity of interstitial iron and other transition metal point defects in *p*- and *n*-type crystalline silicon [J], *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(18): 4061-4063.

(下转第 563 页)

- Particle Beams*(李瀚宇,董志伟,周海京等. 太赫兹电磁波大气吸收衰减逐线积分计算[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(6): 1445-1449.
- [2] Foltynowicz R J, Michael C Wanke, Michael A Mangan, Atmospheric Propagation of THz Radiation [R]. United States: N. p., 2005. Web. doi:10.2172/923074.
- [3] Pardo J R, Serabyn E R, Cernicharo J. Submillimeter atmospheric transmission measurements on Mauna Kea during extremely dry El Niño conditions: implications for broadband opacity contributions [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2001, **68**(4): 419-433.
- [4] Danylov A. THz laboratory measurements of atmospheric absorption between 6% and 52% relative humidity [J]. *Submillimeter-Wave Technology Laboratory University of Massachusetts Lowell*, 2006, 175.
- [5] Wohnsiedler S, Theuer M, Herrmann M, et al. Simulation and experiment of terahertz stand-off detection [C]//SPIE OPTO: Integrated Optoelectronic Devices. International Society for Optics and Photonics, 2009: 72150H-72150H-8.
- [6] David M Slocum, Elizabeth J Slingerland, Robert H Giles, et al. Atmospheric absorption of terahertz radiation and water vapor continuum effects [J], *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, 127: 49-63.
- [7] YANG Yi-Hong, Mandehgar M and Grischkowsky D. Determination of the water vapor continuum absorption by THz-TDS and Molecular Response Theory [J], *Optics Express*, 2014, **22**(4): 4388-4403.
- [8] LIU Sheng-Gan, ZHANG Ping, LIU Wei-Hao, et al. Surface Polariton Cherenkov Light Radiation Source [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2012, **109**:153902.
- [9] R Wang, J Q Yao, D G Xu, et al. The physical theory and transmission model of THz atmospheric transmission [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, **276**(1): 012223.
- [10] Leforestier C, Tipping R H, Ma Q. Temperature dependences of mechanisms responsible for the water-vapor continuum absorption. II. Dimers and collision-induced absorption [J]. *The Journal of chemical physics*, 2010, **132**(16): 164302.
- [11] Van Vleck J H, Weisskopf V F. On the shape of collision-broadened lines [J]. *Reviews of Modern Physics*. 1945, **17**(2-3): 227-236.
- [12] Pickett H M, Poynter R L, Cohen E A, et al. Submillimeter, millimeter, and microwave spectral line catalog [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1998, **60**(5): 883-890. [Online]. Available: <http://spec.jpl.nasa.gov/>.
- [13] Burch D E, Gryvnak D A. Continuum absorption by water vapor in the infrared and millimeter regions [J]. *Atmospheric water vapor*, 1980: 47-76.

(上接 556 页)

- [4] BUONASSISI T, ISTRATOV A A, PICKETT M D, et al. Metal precipitation at grain boundaries in silicon: Dependence on grain boundary character and dislocation decoration [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(4): 042102.
- [5] BUONASSISI T, ISTRATOV A A, MARCUS M A, et al. Engineering metal-impurity nanodefects for low-cost solar cells [J], *Nature Materials*, 2005, **4**(9): 676-679.
- [6] HOFSTETTER J, FENNING D P, LELI? VRE J-F, et al. Engineering metal precipitate size distributions to enhance gettering in multicrystalline silicon [J], *Physica Status Solidi (a)*, 2012, **209**(10): 1861-1865.
- [7] GAO B, KAKIMOTO K. Dislocation-density-based modeling of the plastic behavior of 4H-SiC single crystals using the Alexander-Haasen model [J], *Journal of Crystal Growth*, 2014, **386**(0): 215-219.
- [8] GAO B, KAKIMOTO K. Relationship between the locations of activated dislocations and the cooling flux direction in monocrystalline-like silicon grown in the [001] and [111] directions [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2013, **46**(6): 1771-1780.
- [9] MITCHELL B. Predicting solar cell efficiencies from bulk lifetime image of multicrystalline silicon bricks, 3rd Silicon-PV, 2013 [C], Hamelin, 2000.
- [10] LIU A Y, MACDONALD D. Precipitation of iron in multicrystalline silicon during annealing [J], *Journal of Applied Physics*, 2014, **115**(11): 114901.
- [11] MACDONALD D H, GEERLIGS L J, AZZIZI A. Iron detection in crystalline silicon by carrier lifetime measurements for arbitrary injection and doping [J], *Journal of Applied Physics*, 2004, **95**(3): 1021-1028.
- [12] CHEN J, YANG D, WANG X, et al. Aluminum gettering in photovoltaic silicon [J], *The European Physical Journal - Applied Physics*, 2004, **27**(1-3): 119-122.
- [13] PLETZER T M, STEGEMANN E F R, WINDGASSEN H, et al. Gettering in multicrystalline silicon wafers with screen-printed emitters [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, **19**(8): 946-953.
- [14] FU Shao-Yong, XIONG Zhen, FENG Zhi-Qiang, et al. Cell Performance Prediction based on the Wafer Quality [J]. *Energy Procedia*, 2013, **38**(0): 43-48.
- [15] HUDELSON S, NEWMAN B K, BERNARDIS S, et al. Retrograde Melting and Internal Liquid Gettering in Silicon [J], *Advanced Materials*, 2010, **22**(35): 3948-3953.
- [16] DAVIS J R, ROHATGI A, HOPKINS R H, et al. Impurities in silicon solar cells [J], *IEEE Trans. Electron Devices*, 1980, **27**(4): 677-687.
- [17] MACDONALD D, CUEVAS A, KINOMURA A, et al. Transition-metal profiles in a multicrystalline silicon ingot [J], *Journal of Applied Physics*, 2005, **97**: 033523.
- [18] GREEN M A, *Silicon solar cells* [M], Sydney: Centre for Photovoltaic Devices and Systems, 1995: 191.
- [19] XIONG Zhen, ZHANG Chi, FU Shao-Yong, et al. Correlation of Micro-Defects and Cell Performance in Crystalline Silicon-Based Solar Cell; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2011 [C], Hamburg: 2011: 1191-1194.
- [20] SCHULTZ O, GLUNZ S W, WILLEKE G P. Multicrystalline silicon solar cells exceeding 20% efficiency [J], *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2004, **12**(7): 553-558.