

文章编号 1004-924X(2008)07-1163-08

用电学参数表征晶体硅太阳能电池特性

周春兰, 王文静, 李海玲, 赵 雷, 刁宏伟
(中国科学院 电工研究所, 北京 100080)

摘要: 为了分析 3 种不同类型的商业太阳能电池片, 即 P 型铸造多晶硅太阳能电池、定边喂膜生长硅 (EFG) 太阳能电池和单晶硅太阳能电池中存在的影 响电池效率的可能性缺陷, 对太阳能电池的电性能参数如光谱响应曲线、短路电流的二维分布、串联电阻、并联电阻、二极管理想因子、反向饱和电流等进行了表征和分析。对比分析了对太阳能电池增加偏置白光前后的光谱响应 (外量子效率 EQE) 曲线, 然后采用光束诱导电流 (LBIC) 法和电流-电压 ($I-V$) (暗, 光照) 法分别测试了太阳能电池中形成漏电缺陷的面分布和太阳能电池的电性能参数并借助于太阳能电池的二极管等效模型拟合了 $I-V$ 曲线。结合这 3 种分析测试方法, 得出在铸造多晶硅、EFG 太阳能电池中影响电池参数的主要缺陷是晶界、位错以及材料中的杂质, 而影响单晶硅太阳能电池的却是存在于体内的金属杂质等。由于原材料中存在不同的少子复合中心, 使最终多晶硅、EFG 和单晶硅太阳能电池的转换效率分别为 10.5%, 11.7% 和 15.7%。

关键词: 晶体硅; 太阳能电池; 转换效率; 电学参数; 晶体缺陷

中图分类号: TM914.41 **文献标识码:** A

Characterization of crystalline silicon solar cells by electrical parameters

ZHOU Chun-lan, WANG Wen-jing, LI Hai-ling, ZHAO Lei, DIAO Hong-wei

(*Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: In order to analyze the possible defects effecting on efficiency of three types of industrial silicon solar cells: P-type of cast-multicrystalline silicon, Edge-defined Film-fed Growth (EFG) and single silicon solar cells, several important cell parameters, such as the curve of spectral response (External Quantum Efficiency, EQE), mapping of short-circuit current, ideality factors of diodes, saturation currents I_0 and the parasitic resistances R_s and R_{sh} , were characterized and analyzed. After analyzing EQE curve with and without bias white light during EQE measurement, the mapping of defect induced shunt current in solar cells and electrical parameters of solar cells were respectively measured by Light Beam Induced Current (LBIC) and dark and illuminated current-voltage ($I-V$) measurements. Then, based on diode equivalent model of solar cell, the simulation of measured $I-V$ curve was used to obtain some important parameters of solar cells. From these results, it shows that the main defects effecting on solar cell parameters are the grain boundaries, dislocation and impurity in bulk silicon for cast-multicrystalline silicon and EFG solar cells, but born-oxygen defect pairs for single silicon solar cell. Because of the variable type of minor carrier recombination centers in raw material, the final conversion efficiencies of cast-multicrystalline silicon, EFG and single silicon solar cells are 10.5%,

收稿日期: 2007-11-13; 修订日期: 2008-01-09.

基金项目: 国家 863 研究发展计划资助项目 (No. 2006AA05Z405; No. 2006AA04Z345)

11.7% and 15.7%, respectively.

Key words: crystalline silicon; solar cell; conversion efficiency; electrical parameter; crystal defect

1 引言

在硅基太阳能电池中,如果正确选择器件和工艺参数,原材料的品质和适当的工艺技术即可在某种程度上决定太阳能电池最终的效率,而优化这些选择则需要对这些参数进行真实的器件表征。本文从 3 种不同晶体硅基太阳能电池出发,讨论其各自存在的对太阳能电池器件参数产生较大影响的缺陷类型和形态。选择的 3 类工业生产的太阳能电池分别为铸造多晶硅太阳能电池,定边喂膜生长硅(EFG)太阳能电池和单晶硅太阳能电池,器件的主要特征包括前发射极,pp⁺背场,前表面 SiN_x:H 减反射层,丝印前后金属接触,其中铸造多晶硅和 EFG 太阳能电池没有织构化,单晶硅太阳能电池采用碱织构化。

对这些太阳能电池的表征不仅要求考虑光谱响应和短路电流 I_{sc} ,同时还要考虑反向暗饱和电流 I_0 和开路电压,其中反向暗饱和电流与少数载流子在器件中的扩散和复合相关。通过测试电池的 p-n 结特性(暗 $I-V$ 曲线),可以对太阳能电池的 I_0 进行分析,而光照 $I-V$ 曲线是太阳能电池的最主要参数^[1],它直接反映出电池输出功率的情况。因此,通过测试暗 $I-V$ 曲线和测试电池在光照状态下的负载特性(光照 $I-V$ 曲线)可以较全面地分析太阳能电池的伏安特性。

另外,在测试过程中,考虑到在太阳能电池中存在的复合中心会使测试的光谱响应(外量子效率 EQE)与实际使用时不一致,因此,采用了加偏置光的方法^[2]测试光谱响应,比较增加偏置光前后的曲线变化来获得真实的光谱响应分布;还通过光束诱导电流(LBIC)方法^[3]观察在某个波长下太阳能电池中的短路电流分布,通过反射修正之后,得到内量子效率分布,从而对太阳能电池中的收集电流损失进行讨论。在测试的暗电流-电压($I-V$)和光照 $I-V$ 曲线中,观察这 3 种不同种类的太阳能电池的暗 $I-V$ 特征,并通过使用由两个二极管,串联电阻,并联电阻组成的等效模型^[4]来描述太阳能电池的电学性能,同时对光照 $I-V$ 曲线进行分析,

得出太阳能电池的一些重要电学参数,从而对太阳能电池中的各种材料性能参数以及效率影响因素进行讨论。通过这些分析,确定在不同形态的晶体硅材料中制约太阳能电池效率的一些缺陷类型和形态,从而为怎样在工艺过程中减少或者避免这些制约因素提供参考。

2 实验和数据处理

光谱响应在中国科学院太阳光伏发电系统和风力发电系统质量检测中心进行,测试波长为 300~1 200 nm,步进长度为 10 nm。一个电池在太阳光照射下,接受了阳光中各个波长的能量,对任何一个波长的光束来说,它在半导体内产生的电子空穴对都不是在空白的环境内唯一存在的,而是存在于除它之外的其它全部波长产生的电子空穴对的“海洋”里,特别是在强光注入的情况下更是如此。当 PN 结区存在复合中心时,在有海洋的情况下,这些复合中心很快被填满,对附近的单色光所产生的电子空穴对并不起作用;但是当没有海洋的作用时,它产生的部分电子空穴对将被复合掉,导致收集效率的下降。为了准确地测试太阳能电池片的光谱响应,可以采用加白光偏置的方式来消除这种复合中心的影响,偏置光的强度为 1 个太阳。为了便于比较加偏置光前后光谱响应的变化,在测得绝对外量子效率数值之后,对每个样品的数据进行归一化处理使其变成相对量子效率。

太阳能电池的 LBIC 测试在 Semilab 公司的 WT-2000 设备上进行,LBIC 可以测试太阳能电池片的短路电流和反射强度的二维分布,束斑大小为 100 μm ,在样品中间选择 25 mm×25 mm 大小的区域进行分析。为了测试太阳能电池的电流,电池正面上必须具有合适的电极,背面与金属测试样品台接触。在测试之前,光强以及反射强度都经过校准,从而可以得到与某个波长对应的绝对外量子效率。反射强度的测量分为直接反射测量和散射反射测量,前者直接使用硅探测器测量,

后者通过积分球和硅探测器测量,二者同时进行,最终得到的反射强度是二者之和。知道了光源的绝对强度 Φ 以及总的反射强度 R ,通过测试短路电流 I_{sc} ,经过以下转换可以得到某个波长下的内量子效率 IQE:

$$IQE = \frac{I_{sc}}{\Phi_q} \frac{1}{1-R} \quad (1)$$

光源使用波长为 979 nm 的聚焦激光二极管,相应于在硅中的吸收长度为 80 μm ,这就意味着只测试与体复合相关的信息,而没有发射极膜层的贡献,同时测量的 IQE 也没有受到背面的光反射的影响。由于经过校正的 LBIC 中的 IQE < 100%,因此它能够确定均匀分布的缺陷而不是单个缺陷。除此之外,它也可以定量地比较不同类型的太阳能电池。

暗 $I-V$ 测试和光照 $I-V$ 测试分别在江苏新能源股份有限公司和中国科学院太阳光伏发电系统和风力发电系统质量检测中心进行。暗 $I-V$ 曲线的描述由在空间电荷区的复合效应,并联电阻和几个界面态的损失等部分组成,使用双二极管模型进行描述^[4]如下:

$$I = I_{01} \exp\left[\frac{q(V-IR_s)}{n_{01}kT} - 1\right] + I_{02} \exp\left[\frac{q(V-IR_s)}{n_{02}kT} - 1\right] - \frac{V-IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

$I_{01/2}$ 为饱和电流, $n_{01/2}$ 为二极管第一和第二理想因子, q 为单个电子的电荷量, R_s 为串联电阻, R_{sh} 为并联电阻。 R_s 包括金属栅线、发射极和体电阻以及金属/硅接触的电阻。 R_{sh} 代表了任何通过太阳能电池或者在电池边缘的高电导的路径,例如结中的晶体损伤或者在金属化过程中金属穿透到结区等。 I_{01} 是由于扩散引起的反向饱和电流, n_{01} 的理想值为 1,其理论上来源于在基极和发射极中的复合电流。 I_{02} 是由于复合引起的反向饱和电流, n_{02} 的理想值为 2,它来源于在能隙中局域俘获而引起的空间电荷区复合电流。暗 $I-V$ 曲线(半对数曲线)一般包括 4 部分^[5]: 第一个区域位于 $V < 0.15$ V,在这个区域中的暗电流主要决定于并联电阻 R_{sh} ; 第二个区域位于 0.15~0.45 V,暗电流主要决定于不同复合机制决定的复合电流(式 2 中的第二项); 第三部分位于 0.45~0.6 V,主要决定于扩散过程引起的电流(式(2)中的第一项);

$V \geq 0.6$ V 时为串联电阻决定的第四部分。

在光照情况下, $I-V$ 曲线可以描述为^[4]:

$$I = I_L - I_{01} \exp\left\{\frac{q(V+IR_s)}{n_{01}kT} - 1\right\} - I_{02} \exp\left\{\frac{q(V+IR_s)}{n_{02}kT} - 1\right\} - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

式中: I_L 为光生电流。通过这个模型,对测量的光照 $I-V$ 半指数曲线进行最小二乘法的拟合。对于晶体硅类的太阳能电池,采用双二极管模型不能正确地描述其性能,因此一般在光照 $I-V$ 曲线中都采用单二极管模型,并常将第一项略掉^[6]。这时式(3)变为:

$$I = I_L - I_0 \exp\left\{\frac{q(V+IR_s)}{n_0kT} - 1\right\} - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

其中二极管理想因子 n_0 的值一般在 1 和 2 之间,当以少子在准中性区域发生复合为主时, $n_0 \approx 1$; 而主要在耗尽区发生复合时,则 $n_0 \rightarrow 2$ 。

在 Origin 7.0 中的非线性曲线拟合界面中对光照的 $I-V$ 曲线进行非线性最小二乘法(Levenberg-marquardt 算法)拟合,拟合的参数包含 n_0 , 饱和电流 I_0 以及并联电阻 R_{sh} , 而串联电阻 R_s 则是使用测试的结果。拟合结果的判定使用拟合方差 χ^2 , 其值越小表示拟合结果越好。在拟合过程中,根据 $I-V$ 曲线中的 4 部分特征,首先在 0~0.15 V 范围内确定 R_{sh} 的值,然后在以后的模拟过程中将这个值固定,以确定其它参数。为了减少独立的拟合参数的个数, R_s 固定为从光照 $I-V$ 曲线中测得的值,因此拟合的参数变为 4 个: I_L , I_0 , n_0 , R_{sh} 。

3 结果与讨论

3.1 光谱响应(QE)

铸造多晶硅, EFG, 以及晶体硅太阳能电池在加偏置光和未加偏置光情况下的相对量子效率测试结果如图 1 所示。

结果显示在进行归一化之后的相对光谱响应中,单晶硅在加偏置光和未加偏置光之间的结果没有差别,而对于多晶和 EFG 样品,在测试光谱响应加偏置光之后,长波波段的光谱响应增加。这说明在体内和背电场区域,也就是背结区域存

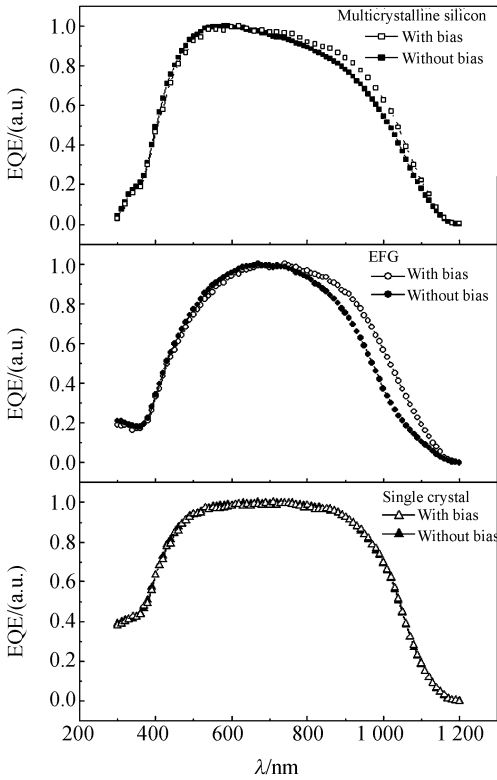


图 1 多晶, EFG, 单晶太阳能电池在有偏置光和未加偏置光情况下的相对 EQE 测试结果

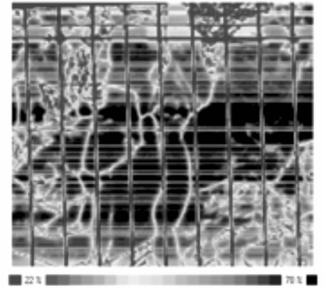
Fig. 1 Measured EQEs of cast-multicrystalline silicon, EFG and single silicon solar cells with and without bias white light

在束缚中心, 这些中心在只有单色光照射的情况下, 光生载流子在此发生复合, 从而降低了收集效率, 但是在加偏置光的情况下, 这些复合中心已经被其它波长产生的载流子所填满, 因此对交流单色光产生的光生载流子没有影响。为了直观地表现这些复合中心的分布和形态, 采用长波 979 nm 的激光观察太阳能电池的短路电流分布, 通过 LBIC 测试, 得出在此波长下的内量子效率, 从而分析载流子收集的损失机制。

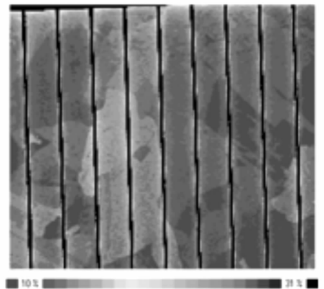
3.2 光束诱导电流 (LBIC) 测试

图 2、图 3 分别显示了铸造多晶硅、EFG 多晶硅的 LBIC 测试结果, 在这两种多晶硅太阳能电池的 EQE 分布图中, 纵向的接触栅线清晰可见, 在反射谱中存在大面积之间的细小差异, 这种差异来源于各向异性的晶粒对光的发射不同, 而晶粒类粒边界处存在着大量的复合中心, 形成漏电, 使短路电流减少, 因此光谱响应较差。在经过反射率修正的 IQE 分布图中, 除了短路电流较低的缺

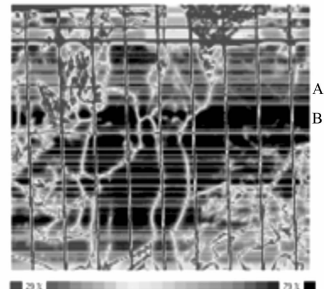
陷区域和栅线之外, 还存在电流分布较高但是相对有差异的两部分区域, 如在铸造多晶硅的结果中(图 3), B 部分 IQE 较高, 而 A 部分则存在相对低的区域, 将片子经过抛光和刻蚀, 结合光学成像观察发现, 引起 A 区电流降低的主要原因是分布着的位错或者杂质修饰的位错 [7]。



(a)EQE 分布图
(a)EQE



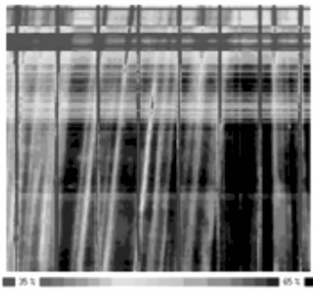
(b)反射分布图
(b)Reflection



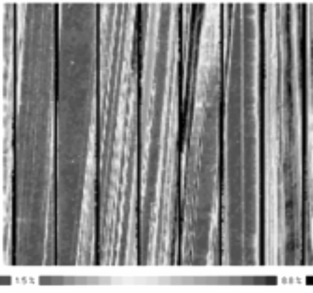
(c)IQE 分布图
(c)IQE

图 2 部分铸造多晶硅太阳能电池的 LBIC 结果
Fig. 2 Results of LBIC of a section of cast-multicrystalline silicon solar cell

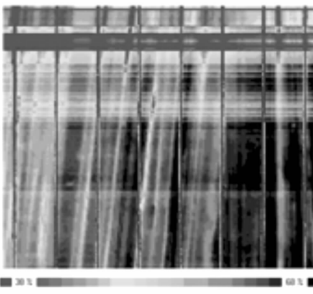
图 4 显示了单晶硅的 LBIC 结果。在单晶硅的 EQE 图中, 除了垂直方向上栅线的电流较低外, 在其它区域存在较高的大致相同的电流值, 在



(a)EQE 分布图
(a)EQE



(b)反射分布图
(b)Reflection

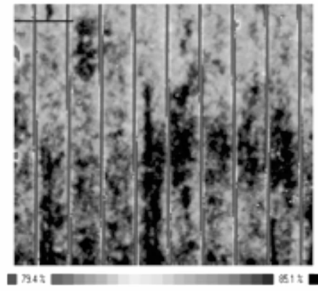


(c)IQE 分布图
(c)IQE

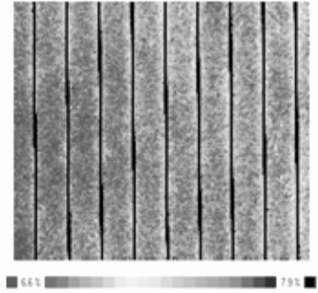
图 3 部分 EFG 太阳能电池的 LBIC 图

Fig. 3 Results of LBIC of a section of EFG solar cell

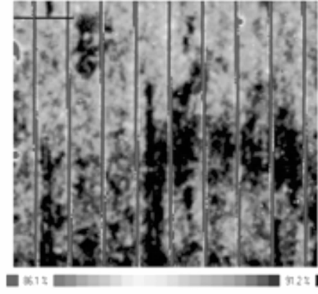
反射谱中也可以看出在测试的整个面积中,分为明显的两个反射不同的区域,一是具有较高光反射的在垂直方向上的栅线,另外就是栅线之间的晶面部分,在这部分区域光反射较低并且分布均匀。由 EQE 计算出的 IQE 也呈现相同的响应分布。从 IQE 分布图中可以看出,内量子效率的分布比较均匀,整个区域中的电流分布差别较小,没有出现现在铸造多晶硅太阳能电池中存在的晶界和位错型复合中心,因此影响单晶硅太阳能电池效率的主要原因来源于在晶体硅中存在的金属杂质引起



(a)EQE 分布图
(a)EQE



(b)反射分布图
(b)Reflection



(c)IQE 分布图
(c)IQE

图 4 部分单晶硅太阳能电池的 LBIC 结果

Fig. 4 Results of LBIC of a section of single silicon solar cell

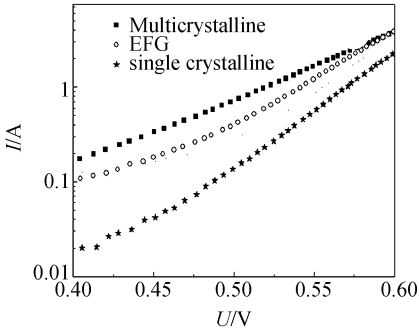
的原子级缺陷^[8]。

3.3 电流-电压(I-V)测试

图 5(a)中的半对数 I-V 曲线表征了暗状态下的晶体硅太阳能电池的特性,包含了在耗尽区的复合效应。复合部分主要体现在低电流部分,而扩散部分则主要体现在高电流部分^[9]。在暗 I-V 曲线中,在 0.4~0.6 V 的暗电流主要由双二极管中的扩散部分决定,这部分饱和电流决定了开路电压的值^[10],为了说明在这 3 种太阳能电池中扩散

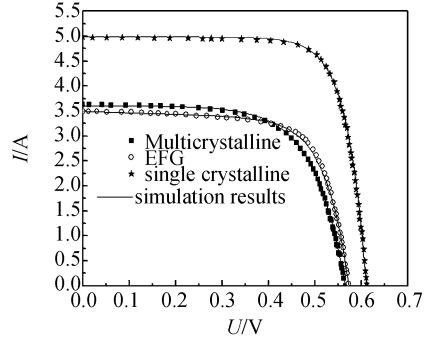
电流对开路电压的影响,暗 $I-V$ 曲线只显示了 0.4 ~ 0.6 V 之间的信息。从结果中可以看出,在这 3 种太阳能电池中,铸造多晶硅的反向饱和电流最高, EFG 太阳能电池次之,这说明这两种太阳能电池中的基极或者发射极中有较多的载流子发生复合。在

LBIC 测试的结果中显示,铸造多晶硅和 EFG 体内片中存在位错,晶界等复合中心,而 QE 测试显示在背结中同样存在复合中心,因此这些中心存在于发射极,基体内和背结中,从而产生较大的反向饱和电流。



(a) 半对数暗电流-电压曲线(0.4~0.6 V)

(a) Semilogarithmic plot of dark $I-V$ characteristics of silicon solar cells in 0.4~0.6 V



(b) 光照电流-电压曲线

(b) Plot of illuminated $I-V$ characteristics of silicon solar cells

图 5 铸造多晶硅、EFG、单晶太阳能电池的电学性能测试结果

Fig. 5 Dark and illuminated $I-V$ characteristics of cast-multicrystalline, EFG and single silicon solar cells

表 1 3 类太阳能电池的参数

Tab. 1 Parameters of three types of solar cells

电池类型	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	FF	η	n_0	I_0 (A)	R_s (Ω)	χ^2
多晶硅	3.629 4	0.565 7	0.653 3	10.5%	2.637 52	7.5×10^{-4}	0.02	0.000 51
EFG	3.495 8	0.574	0.707 3	11.7%	2.426 94	2×10^{-5}	0.006	0.001 26
单晶硅	4.971 8	0.611 6	0.796 1	15.7%	1.673 37	3.92×10^{-6}	0.02	0.002 55

图 5(b)为测量的光照 $I-V$ 曲线和使用 Origin 中的非线性拟合得到的拟合曲线(图中直线所示)。在拟合过程中,只考虑了电压低于 V_{oc} 的区域,因为在高于 V_{oc} 范围的电流值不再使式(2)成立,因此在这个感兴趣的范围之内计算了 100 个点。最后观察的太阳能电池的所有参数示于表 1 中。从拟合的实际结果来看,二极管理想因子偏离理论值说明了一般都是非理想情况,从而说明载流子的传输机制主导了复合过程^[11],载流子的复合主要发生在扩散过程中通过复合中心的间接复合。在 QE 和 LBIC 测试结果中显示的体内的晶体缺陷(例如晶粒边界)和位错等在等效模型中都没有予以考虑,而这些缺陷就是少子在扩散过程中的复合中心,因此会造成实际值与理论值之

间的差异。从计算的结果来看,除了晶体硅太阳能电池的二极管理想因子 < 2 以外,另外两个样品都 > 2 ,说明在这两个样品中除了在空间耗尽区的载流子复合之外,还存在其它区域的复合贡献,例如,表面复合。尽管铸造多晶硅太阳能电池测试的 R_s 与单晶硅太阳能电池的一致,但是由于太阳能电池内存在的复合导致了并联电阻和反向饱和电流的增加。在光照 $I-V$ 曲线中,当二极管理想因子变差时, $I-V$ 曲线会出现明显的圆形的“膝盖”,降低了填充因子,从式(3)中可以看出: R_s 会影响 $I-V$ 曲线在与 x 轴交点附近的斜率^[12],也会对填充因子产生影响;太阳能电池中少子复合增加会使并联电阻减小,在电池中形成漏电,从而导致开路电压的下降,另外从开路电压的电流:

$$V_{oc} = \frac{n_0 k T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right), \quad (5)$$

可以看出反向饱和电流的增大同样会使开路电压降低,从而使铸造多晶硅的效率低于单晶硅太阳能电池的效率。而对于 EFG 太阳能电池,尽管在这 3 种太阳能电池中,测试的串联电阻 R_s 是最小的,但是同样由于其具有比单晶硅高的二极管理想因子和饱和电流,以及低的并联电阻,从而使填充因子和开路电压相对较小,导致了较低的太阳能电池转换效率。

4 结 论

结合 QE, LBIC 以及暗、光照情况下的 $I-V$ 测试,对铸造多晶硅, EFG 和单晶硅样品中存在的引起效率损失的缺陷类型和形态进行了分析。QE 测试显示在铸造多晶硅和 EFG 太阳能电池中,明显存在复合中心。LBIC 形貌测试技术适合于探测在铸造多晶硅太阳能电池中的效率损失来源,对于铸造多晶硅(包括 EFG)来说,效率的限制主要来源于载流子在晶界和位错缺陷处的复合,而

这些缺陷有可能是被金属所修饰的缺陷,而在晶体硅中则主要存在的是点缺陷,如体内的金属杂质等。

另外存在的问题是由于使用波长为 979 nm 的激光进行测试主要针对基底中少子的复合,而事实上,其它区域也存在减少效率的因素。例如,由载流子在通过 pn 结途中的位错和晶界引起的漏电,在发射极中的复合,以及 LBIC 没有探测到的在背接触上的光吸收等。另一方面,由复合引起的较低的短路电流也会引起开路电压的降低。

综上所述,由于铸造多晶硅和 EFG 较差的材料品质,相对于晶体硅来说,存在较低的并联电阻,体内存在大量的复合中心,从而产生较大的理想因子和反向饱和电流,使最终的太阳能电池效率相对较低。由于原材料中存在不同的少子复合中心,使最终多晶硅, EFG 和单晶硅太阳能电池的效率分别为 10.5%, 11.7% 和 15.7%。因此,要获得较高的转换效率,就要提高原材料的品质或者在生产工艺中采取提高原材料品质的步骤,如吸杂,氢钝化,以及对硅片厚度方面的处理等^[13]。

参考文献:

- [1] 蔡建文,李萍萍,徐传明,等. 太阳能电池测试系统及其参数匹配优化研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 517-521. CAI J W, LI P P, XU C H M, *et al.*. Study on solar cell testing system and its parameter matching optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (4): 517-521. (in Chinese)
- [2] EMERY K. *Measurement and characterization of solar cells and modules*[M]//Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Antonio Luque, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2002.
- [3] HILTNER J F, SITES J R. High-resolution laser stepping measurements on polycrystalline solar cells[C]. *Proc. 16th European PV Solar Energy Conf.*, Glasgow, 2000: 630-633.
- [4] ARCIPIANI B. Generalization of the area method for the determination of the parameters of a non-ideal solar cell [J]. *Rev. Phys. Appl.*, 1985, 20(5): 269-272.
- [5] HUSSEIN D B R, GRABOSCH G, FAHRNER W R. Dark I-V-T measurements and characteristics of (n) a-Si/(p) c-Si heterojunction solar cells[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2001, 69(2): 123-129.
- [6] BASHAHU M, NKUNDABAKURA P. Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors[J]. *Solar Energy*, 2007, 81(7): 856-863.
- [7] RINIO M, MÖLLER H J, WEMER M. LBIC investigations of the lifetime degradation by extended defects in multicrystalline solar silicon[J]. *Solid State Phenomena*, 1998, 63-64(1): 115-122.
- [8] HASHIGAMI H, SAITOH T. Carrier-induced degradation phenomena of carrier lifetime and cell performance in boron-doped CZ-Si[C]. *3rd world conference on photovoltaic energy conversion, Osaka*, 2003: 2893-2898.
- [9] GREEN M A. *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*[M]. Englewood Cliffs:

NJ, Prentice-Hall, Inc. 1980.

- [10] STUTENBAEUMER U, MESFIN B. Equivalent model of monocrystalline polycrystalline and amorphous silicon solar cells[J]. *Renewable Energy*, 1999, 18(4):501-512.
- [11] MAZER J A. *Solar Cells: an Introduction to Crystalline Photovoltaic Technology*[M]. Boston: Springer, 1997.
- [12] ARAKI K, YAMAGUCHI M. Novel equivalent circuit model and statistical analysis in parameters identification [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2003, 75(3): 457- 466.
- [13] 崔建丰, 赵晶, 樊仲维, 等. 厚硅片的高速激光切片研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(5):829-834.
CUI J F, ZHAO J, FANG ZH W, *et al.*. Study on LD-pumped Nd:YAG laser cutter for silicon wafer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):829-834. (in Chinese)

作者简介:周春兰(1977—),女,贵州湄潭人,助理研究员,博士研究生,主要从事硅基太阳能电池的研究。E-mail: zhouchl@mail. iee. ac. cn

● 下期预告

双包层 Yb/Er 共掺光纤放大器的数值模拟

赵崇光^{1,2}, 宁永强¹, 刘 洋^{1,2,4}, 王 蓟^{1,2,3}, 王立军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022;

4. 武汉军械士官学校, 湖北 武汉 430075)

为优化结构,对 980 nm 抽运的双包层 Yb/Er 共掺光纤放大器进行了数值模拟,分析了不同功率下的信号光的增益情况,计算了稳态情况下光纤中的反转粒子数、抽运光功率、信号光功率沿光纤轴向的分布以及放大器的斜率效率。根据数值模拟的结果,采用 10 m 长的双包层 Yb/Er 共掺光纤建立了光纤放大器实验装置。最大的光纤抽运功率为 6 W,初始信号光功率为 0.5 W 时,获得了 1.9 W 的最大输出功率,斜率效率为 23.4%。