

·光电器件与材料·

PC1D方法对铝背场钝化技术的分析

闫丽, 高华

(上海超日太阳能科技股份有限公司, 上海 201406)

摘要:降低单晶硅原材料成本,采用更薄的硅片作为太阳电池的原料是晶体硅太阳电池产业发展的趋势之一。对薄片化的太阳电池,铝背场的背表面钝化工艺显得愈加重要。采用PC1D太阳电池软件模拟的方法,对以商业用p型硅为衬底的单晶硅125×125太阳电池的铝背场的背表面钝化技术进行了模拟,分析得出,对一定厚度的电池片来说,尤其是当少数载流子的扩散长度大于硅片厚度时,背表面的复合速率对太阳电池效率的影响尤为明显。电池的效率随着铝背场结深的增加、背表面复合速率的降低、少数载流子寿命的提高而提高。铝背场能够改善背表面的钝化质量,降低背表面的复合速率,进而提高太阳电池的光电转换效率,是目前商业化的晶体硅太阳电池普遍采用的背表面钝化技术。

关键词:铝背场;背表面钝化;内量子效率;复合速率;少子寿命

中图分类号:TM914.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)04-0049-04

Analysis of Aluminum Back-Surface Field Passivation Technique by PC1D

YAN Li, GAO Hua

(Shanghai Chaori Solar Energy Science & Technology Co., Ltd, Shanghai 201406, China)

Abstract: In order to reduce the cost of silicon raw materials, thinner silicon wafers are used for crystalline silicon solar cells. Aluminum back-surface field passivation technique is more important for thinner solar cells. PC1D method is used to model the aluminum back-surface field passivation technique of p-type monocrystalline silicon substrate 125×125 solar cells. The model results are analyzed. For a certain thickness solar cells, especially when the minority carrier diffusion length is greater than the thickness of silicon wafers, the back-surface recombination velocity is particularly important for efficiency. The efficiency will be increased with the increase of aluminum back-surface field junction depth, the decrease of back-surface recombination velocity and the increase of minority carrier lifetime. Aluminum back-surface field can improve the quality of the back-surface passivation, reduce the back-surface recombination velocity thus improve the efficiency of solar cells, which is commonly used for the commercial crystalline silicon solar cells.

Key words: aluminum back-surface field; back surface passivation; internal quantum efficiency (IQE); recombination velocity; minority carrier lifetime

太阳电池是利用半导体的光生伏特效应而直接将太阳转换成电能的物理器件。随着世界经济的飞速发展所带来的能源和环境问题,尤其是在日本福岛核泄漏危机发生以后,光伏发电作为绿色环保可再生能源将越发受到各国政府的重视。目前,提高太阳电池的光电转换效率及降低其发电成本

是业界的两大研究热点。硅材料因其在自然界中的储量丰富及适合的半导体禁带宽度,是目前研究最多,技术最为成熟的材料。尤其是单晶硅电池的实验室最高光电转换效率已达到25%,该世界纪录由澳大利亚新南威尔士大学研究者所保持^[1]。

随着光伏产业竞争的日益激烈,进一步降低硅

收稿日期:2011-06-22

作者简介:闫丽(1982-),女,硕士研究生,辽宁抚顺人,研究方向为半导体光电材料与器件;高华(1982-),男,四川资阳人,硕士,工程师,研究方向为硅太阳电池技术。

材料成本大势所趋,硅片将向更薄的方向发展。目前硅片厚度已由原来的300多微米而降低到200微米左右,而且随着线切割技术的发展及电极制备技术的提高,硅片厚度将进一步降低。而降低硅片的厚度是否会影响电池的效率?在线切割制作硅片过程造成硅片表面存在一定厚度的损伤层,在此硅片表面载流子的复合速率很高,通常将表面作为一个巨大的复合中心。为了进一步提高太阳能电池的少数载流子的收集效率,进而提高电池的光电转换效率,如何降低表面复合速率一直是研究人员所关注的问题。表面复合对电池片少子寿命的影响主要取决于2个因素:硅片厚度与表面复合速率。其中厚度影响少子寿命的机理是^[2]:硅片越薄,在硅片体内产生的少数载流子通过扩散、漂移运动达到硅片表面的几率就越高。而当少数载流子的扩散长度大于硅片厚度时,电池片背表面复合速率对效率的影响就显得尤为重要。改善钝化的质量、降低表面复合率已经成为提高电池效率的主要手段之一^[3]。铝背场能够有效降低电池背表面的复合速率,提高转换效率,是商业化晶体硅太阳能电池普遍采用的主要背表面钝化技术^[4]。

1 铝背场的形成机理

铝背场可以通过表面蒸镀、溅射和丝网印刷等工艺实现。而丝网印刷技术凭借操作简便、成本低廉的特点而被广泛应用于晶体硅太阳能电池行业。其制备过程一般分为以下4个步骤^[5]:

- (1) 在硅片的背表面丝网印刷铝浆并烘干;
- (2) 在共晶温度577℃以上烧结;
- (3) 冷却并生长出一层富含铝的硅层,即P+层,通常称其为铝背场;
- (4) 最后在共晶温度577℃下凝固。

太阳能电池用铝浆料的成分主要包含铝粉(粒径通常为1~10 μm)、玻璃粉、有机粘结剂和有机溶剂。电池片烧结时,红外烧结炉能够迅速加热至共晶温度,铝开始逐渐融化,随着链式烧结炉中温度继续上升,硅在熔融铝中的溶解度不断加大,越来越多的硅溶解在液态的铝中;冷却时,硅在熔融铝中的溶解度降低,逐渐析出再结晶,在硅片表面形成一层富含铝的硅,该层结构即为铝背场。铝背场中铝的浓度较高,通常为 1.018 cm^{-3} 数量级,相对于

B掺杂浓度小于 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的p型硅衬底来说为重掺杂,因此,铝背场与p型硅之间形成高低结P+P,该高低结将阻止少数载流子向背表面运动,降低其在背表面的复合,进而提高电池片的开路电压及填充因子,同时,铝背场还能作为背反射器,将穿过电池片入射到背表面的光再次反射回电池内部,提高电池片长波段光谱响应,进而增加电池片的光电转换效率。所以铝背场是利用场钝化原理来完成背表面钝化^[5,6]。

根据铝-硅二元相图可知,铝背场的结深主要取决于铝层的厚度以及烧结温度,铝层厚度越大,烧结温度越高,最后得到的铝背场的结深也越深,具体结深关系式为^[7]

$$W_{BSF} = \frac{t \times \rho_{Al}}{\rho_{Si}} \left\{ \frac{F(T)}{1-F(T)} - \frac{F(T_0)}{1-F(T_0)} \right\} \quad (1)$$

其中, t 为沉积在硅片上铝浆的厚度; ρ_{Al} 、 ρ_{Si} 分别是铝和硅的密度; $F(T)$ 为峰值温度时,铝硅熔融态中硅原子的质量百分比; $F(T_0)$ 为共晶温度(577℃)时,硅原子的质量百分比约为12.2%。

2 PC1D模拟及结果分析

PC1D利用完全耦合的非线性方程模拟半导体器件中电子和空穴的准一维输运过程,并着重于光伏器件的模拟^[8]。文中采用太阳入射光谱为AM1.5(100 mW/cm^2),电池正面表面反射系数固定为4.5%,PN结结深为 $0.5 \mu\text{m}$,表面方块电阻为 $55 \Omega/\square$,基区掺杂浓度 $N_A=1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,整个电池片面积为 154.8 cm^2 。在此前提下,文中讨论了以下3种情况:(1)模拟了铝背场不同结深(1~10 μm)对电池片光电转换效率 η 的影响;(2)固定背场结深为 $10 \mu\text{m}$,模拟了不同少子寿命对对电池片光电转换效率 η 的影响;(3)优化背场结深、背表面复合速率及少子寿命,给出了电池转换效率为18.2%的电性能曲线及其内量子效率(IQE)曲线。

2.1 铝背场结深对转换效率的影响

铝背场的结深对转换效率的关系如图1所示。由图1可知,随着铝背场结深的增加,无论是低背表面复合速率 $1.0 \times 10^2 \text{ cm/s}$ 或是高背表面复合速率 $1.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$,转换效率均单调递增。尤其是当背表面复合速率为 $1.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$,表面质量很差时,铝背场的

结深对转换效率的影响尤为明显。转换效率随着铝背场结深的增加而增加主要原因有以下几点:(1)铝掺杂浓度较高,通常为 10^{18} 数量级,与B掺杂的P型硅衬底形成高低结P+P结构,铝背场结深越大,则在该区产生的光生载流子的积累越多,在P+端和P端产生光电压越大,进而增加电池的开路电压;(2)随着铝背场结深增大,P+P结构更有利于P区多子空穴向电极方向运动,降低了该区多子空穴与少子电子的复合几率,从而增加了填充因子;(3)加大的铝背场结深可以加强进一步铝背场的背反射器作用,进而增加电池的短路电流。

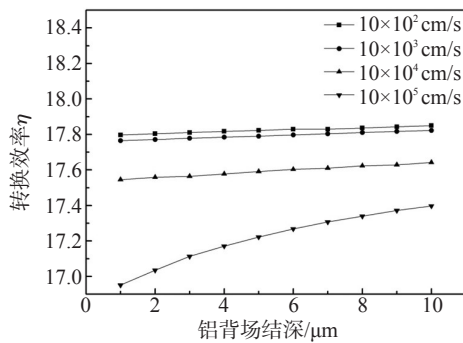


图1 铝背场的结深与转换效率的关系

2.2 少子寿命对转换效率的影响

文中还模拟了不同少子寿命对电池转换效率的影响。由图2可以看出,当少子寿命从 $1\ \mu\text{s}$ 增加到 $20\ \mu\text{s}$ 时,电池片的转换效率将单调递增。尤其是当背复合速率为最低 $1.0\times 10^2\ \text{cm/s}$ 时,其转换效率随着少子寿命的增加而增加的现象最为明显,从少子寿命 $1\ \mu\text{s}$ 时14.45%的转换效率增加到 $20\ \mu\text{s}$ 时18.44%。由此得知,电池的少子寿命对其转换效率起着至关重要的作用。背表面复合速率达到 $1.0\times 10^3\ \text{cm/s}$ 以下时,其表面缺陷态较少,在相同少子寿命的情况下,背表面复合速率越趋近 $1.0\times 10^2\ \text{cm/s}$,则它与背复合速率 $1.0\times 10^2\ \text{cm/s}$ 的电池效率越相近。

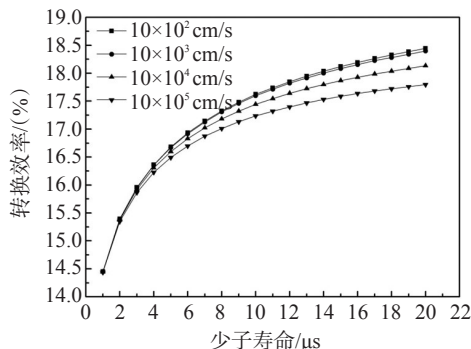


图2 少子寿命与转换效率的关系

2.3 18.2%的电池I-V及IQE曲线

目前,商业化单晶硅电池的平均转换效率为17.5%,国际单晶硅电池常规工艺最高平均做到18.2%(非常规工艺如:SE、赛秀、冥王星技术等除外)。优化铝背场结深为 $10\ \mu\text{m}$,背表面复合速率为 $200\ \text{cm/s}$,少子寿命为 $16\ \mu\text{s}$,模拟得出电池片的开路电压为 $625\ \text{mV}$,短路电流为 $5.8\ \text{A}$,填充因子77.7%,电池片的转换效率为18.2%,具体I-U曲线由图3所示,其内量子效率由图4所示。由图4可知,该电池片在波长为 $1\ 000\ \text{nm}$ 时仍具有较高的光谱响应,此时内量子效率为78%左右。由此可见,性能优异的铝背场对电池片的长波响应的提高起着举足轻重的作用。

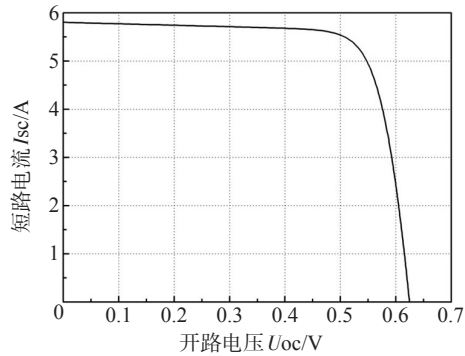


图3 转换效率为18.2%的电池I-U曲线

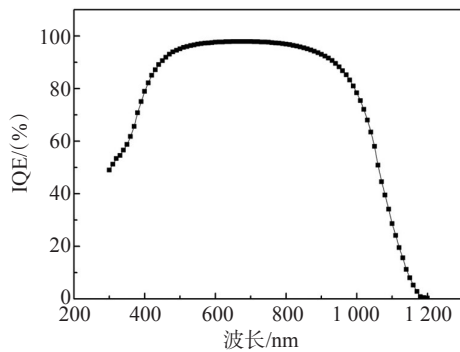


图4 转换效率为18.2%时电池的IQE曲线

3 结论

通过PC1D模拟的方法,分别计算了铝背场结深、少子寿命对电池转换效率的影响。从模拟结果得出,随着铝背场结深加大、背表面复合速率降低及少子寿命的提高,电池效率将随之提高。最后,固定了优化后的各项参数,模拟给出商业化单晶硅电池效率为18.2%时的各项电性能参数、I-U曲线及

IQE 曲线,对实际电池生产或研发具有一定指导意义。

参考文献

- [1] Jianhua Z, Aihua W, Green M A. 24.5% efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates[J]. Progress in Photov.: Research and Appl., 1999, 7: 471-474.
- [2] 阙端麟. 硅材料科学与技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1998.
- [3] 管绍茂, 王迅. 半导体表面钝化技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [4] Licht S, Maschhitz V, Lin B, et al. Chemical synthesis of battery grade super-iron barium and potassium Fe

(VI) ferrate compounds[J]. Power Source, 2001, 99: 7-14.

- [5] Vichai Meemongkolkiat, Kenta Nakayashiki, Dong Seop Kim. Factors limiting the formation of uniform and thick aluminum-back-surface field and its potential[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153 (1): G53-H58.
- [6] J L Murray, A J McAlister. Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 5.74(1984).
- [7] J D Alamo, J Eguren, A Luque. Operating limits of Al-alloyed high - low junctions for BSF solar cells[J]. Solid-State Electron., 1981, 24: 415-420.
- [8] Clugston D A, Basore P A. PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers[C]//26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim CA, 1997: 207-210.

(上接第13页)

除。(2)衰减片具有不均匀性,各点衰减倍率不可能完全一致,经过衰减后光斑能量分布会有所改变,由此引入的误差将影响参数测量精度。(3)影响光斑质心测量精度的因素还包括 CCD 探测器的不均匀性,主要包括 CCD 的单个像元对激光响应的不均匀性。(4)CCD 摄像机存在位置量化误差,对于光束截面尺寸的测量精度由 CCD 器件的像素大小及像素密度决定。(5)CCD 摄像机存在灰度量误差,光强大小的测量精度由 CCD 器件的动态范围及图像采集系统的量化误差决定。

5 结束语

近年来,激光技术在工农业生产、卫生医疗、通

讯产业等领域得到了广泛应用,对激光参数的检测也提出了越来越高的要求。针对测试需求,设计开发了基于 CCD 的远场激光光斑测量系统,实现了远场激光光斑的采集与参数分析,在外场测试时获得了良好的效果。

参考文献

- [1] 张红娜,王祁. 图像测量技术及其应用[J]. 电测与仪表, 2003(40): 19-22.
- [2] 胡林亭. CCD 测量激光光斑方法研究[J]. 激光技术, 2001, 25(2): 154-157.
- [3] 刘兆辉,严彦文,许路铁. 未制导炮弹远距激光光斑监视系统[J]. 激光与红外, 2006(2): 88-91.
- [4] 庞长富,刘榴娣. CCD 摄像机用于测量中存在的问题及解决方法[J]. 光学技术, 1996(2): 5-8.
- [2] 张小蒂. 应用回归分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991: 161-209.
- [3] 陈永胜. 多元线性回归建模以及 MATLAB 和 SPSS 求解[J]. 绥化学院学报, 2007, 27 (6): 166-168.
- [4] 王振友,陈莉娥. 多元线性回归统计预测模型的应用[J]. 统计与决策, 2008(5): 46-47.
- [5] 曾建军,李世航,王永国,等. MATLAB 语言与数学建模[M]. 合肥: 安徽大学出版社, 2005.
- [6] 曹义,才鸿年,程海峰,等. 林地型伪装网红外发射率取值分析[J]. 激光与红外, 2008(7): 671-675.
- [7] 王友军,胡江华,吕绪良,等. 林地型背景热红外伪装的温差阈值试验研究[J]. 红外技术, 2008(6): 361-364.
- [8] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

(上接第34页)

最大为 3.3°C。估算模型的计算结果还是可信的。同时模型的使用也是方便的,因为对于某特定地域的气温、湿度和照度可以由当地的气象部门获知,这样就很方便地估算出了当地植被的温度。但是必须经过长年累月的数据积累和处理才能得到相对精确的估算模型,以上分析只提供了一种建立估算模型的新思路。

参考文献

- [1] 刘昌蓉,何政伟,黄爽兵. 多元回归分析在地质灾害危险性评价中的应用[J]. 环保科技, 2008, 14(1): 31-33.