

· 光电器件与材料 ·

## N型背发射极晶体硅太阳能电池模拟研究

和江变<sup>1</sup>, 邹凯<sup>1</sup>, 马承鸿<sup>1</sup>, 李健<sup>2,3</sup>

(1. 内蒙古日月太阳能科技有限责任公司, 呼和浩特 010111; 2. 内蒙古大学物理科学与技术学院, 呼和浩特 010021;  
3. 内蒙古自治区半导体光伏技术重点实验室, 呼和浩特 010021)

**摘要:** N型晶体硅太阳能电池由于少子寿命高、光致衰减低、弱光响应好等优点, 近年来在高效低成本太阳能电池领域一直备受关注。利用PC1D模拟, 对N型背发射极晶体硅太阳能电池进行了分析。结果表明, 背发射极掺杂浓度、结深、背表面复合速率、前表面掺杂浓度及复合速率都对电池转换效率有较大影响, 尤其是电池前表面与背表面复合速率对电池性能的影响最为明显, 而电池前表面场掺杂深度则对电池性能影响较小。对于前表面复合来说, 当前表面复合速率小于 $1 \times 10^3$  cm/s时, 电池性能受表面复合速率变化的影响很小; 但复合速率超过 $1 \times 10^3$  cm/s后, 电池转换效率快速下降。背表面复合对电池效率影响则更明显, 当背表面复合速率超过 $1 \times 10^4$  cm/s后, 电池转换效率急剧下降, 在背表面复合速率增大到 $1 \times 10^6$  cm/s时, 电池效率下降到不足5%, 而在电池背表面复合速度较小时( $10 \sim 10^3$  cm/s)则可获得较高的转换效率。

**关键词:** N型晶体硅; 太阳能电池; 背发射极; PC1D模拟

中图分类号: TM914.4; O482.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-02-0027-06

## Simulation of Back Emitter N-type Crystalline Silicon Solar Cells

HE Jiang-bian<sup>1</sup>, ZOU Kai<sup>1</sup>, MA Cheng-hong<sup>1</sup>, LI Jian<sup>2,3</sup>

(1. Inner Mongolia Bright Energy Technology Co., Ltd., Hohhot 010111, China; 2. School of Physical Science and Technology, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 3. Key Laboratory of Semiconductor Photovoltaic Technology of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010021, China)

**Abstract:** In recent years, N-type crystalline silicon solar cells have attracted much attention in the field of high efficiency and low cost solar cell due to its great advantages, such as long minority carrier lifetime, low light-induced degradation and good low-light response. PC1D simulation is used to analyze the back emitter N-type crystalline silicon solar cells. The results show that back emitter doping concentration, junction depth, back surface recombination velocity, front surface field doping concentration and front surface recombination velocity have a greater impact on the cell conversion efficiency, and especially the front and back surface recombination velocity are the most. But the front surface field doping depth has less affect on the performance of the cell. For the front surface recombination, when the surface recombination velocity is less than  $1 \times 10^3$  cm/s, there is a small affect on the performance of the cell, but when the surface recombination velocity is greater than  $1 \times 10^3$  cm/s, the conversion efficiency of the cell decreases rapidly. The effects of back surface recombination on cell efficiency is even more obvious when the back surface recombination velocity is greater than  $1 \times 10^4$  cm/s, the conversion efficiency of the cell arises a sharp decline. As the back surface recombination velocity increases to  $1 \times 10^6$  cm/s, the efficiency of the cell drops to less than 5%. In a low back surface recombination velocity range ( $10 \sim 10^3$  cm/s), the cell can obtain high conversion efficiency.

**Key words:** N-type crystalline silicon; solar cells; back emitter; PC1D simulation

收稿日期: 2015-01-30

基金项目: 呼和浩特市太阳能电池产业化工程研究中心创新能力建设项目(2014150103000018); 呼和浩特市“十二五”重大科技专项(2012150103000167)

作者简介: 和江变(1986-), 女, 陕西渭南人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为半导体材料及高效晶体硅太阳能电池。

从理论上讲,不论是硼(B)掺杂的P型晶体硅还是磷(P)掺杂的N型晶体硅都可用于制备太阳能电池。然而,大部分晶体硅太阳能电池生产厂商目前都采用的是B掺杂的P型硅制作太阳能电池,这主要是由于以前人们用N型硅制备的太阳能电池填充因子FF和开路电压 $V_{oc}$ 比较低<sup>[1-2]</sup>;研究者还发现N型晶体硅太阳能电池在长期使用过程中会出现性能退化的现象<sup>[3]</sup>,并且大规模工业化生产时,在P型硅片上实现 $N^+$ 发射结要比在N型硅片上实现 $P^+$ 发射结更容易些。但是随着光伏技术的发展,一直困扰N型晶体硅太阳能电池的技术瓶颈被逐渐攻克,而且现在主流的P型单晶硅太阳能电池转换效率已经可以稳定在19%以上,要想在不增加成本的前提下进一步提高电池效率已经非常困难。因此人们开始关注少子寿命比P型晶体硅高得多的N型晶体硅太阳能电池,并取得了巨大的研究进展。

与B掺杂的P型晶体硅材料相比,P掺杂的N型晶体硅材料具有如下优势<sup>[4-6]</sup>:(1)N型硅材料中的杂质(比如一些常见的金属离子)对少子空穴的捕获能力要低于P型材料中的杂质对少子电子的捕获能力,因此相同电阻率的N型硅少子寿命普遍比P型硅高1~2个数量级;(2)N型硅片对金属杂质的容忍度要高于P型硅片;(3)用掺P的N型硅材料形成的电池几乎不存在光致衰减;(4)N型硅中少子空穴的表面复合速率低于P型硅中电子的表面复合速率;(5)某些N型硅电池的生产工艺可以在200℃以下实现,符合高效率、高产量、低成本的要求;(6)在弱光下,N型硅电池组件通常表现出比常规P型硅电池组件更优异的发电特性。上述六大优势是N型晶体硅电池获得高转化效率的前提。现阶段高效N型晶体硅太阳能电池有多种产业化技术方案,其中最著名的是美国Sunpower公司的IBC(Interdigitated back contact)结构电池<sup>[7]</sup>和日本松下公司的HIT(Hetero-junction with intrinsic thin-layer)结构电池<sup>[8]</sup>,目前两者的转换效率均已超过23%。中国英利公司自主研发的“PANDA”N-Si双面太阳能电池转换效率也已经达到20.7%,并实现规模化生产。IBC电池是一种特殊的背结背接触太阳能电池,它的最大特点是所有电极都位于电池背面,最大程度减少了由于前电极遮光而造成的电池效率损失。并且电池背表面由磷扩散 $N^+$ 区域和硼扩散 $P^+$ 区域呈十指交叉状排列,同时在表面制备 $SiO_2$ 钝化膜,N型和P型金

属电极则穿过 $SiO_2$ 膜上的接触孔与硅基体形成欧姆接触。Sunpower IBC电池成功地实现商品化,证明背发射极太阳能电池具有巨大的发展潜力。

## 1 实验模型与仿真

PC1D模拟软件利用完全耦合的非线性方程模拟半导体器件中空穴、电子的准一维传输过程,主要应用于光伏器件的模拟计算,在晶体硅太阳能电池研究方面起着重要作用,已逐渐成为模拟典型光伏器件的标准软件<sup>[9]</sup>。

对于N型背结太阳能电池来说,由于发射极位于电池背表面,可以避免紫外光照射而导致硼发射极出现光致衰减。此外,位于电池背表面的P型金属电极不会对电池形成遮光,可以通过增加电极宽度的方法来降低栅线的体电阻,甚至可以采用蒸镀铝形成电极,因此显示出极大的发展前景。文中采用如图1所示的N型晶体硅太阳能电池结构进行模拟。硅衬底为N型,发射极为P型,同时电池还具有 $SiO_2/SiN_x/SiN_x$ 叠层钝化减反射结构和 $N^+$ 前表面场。模拟中部分参数设置如表1所示。取电池正面表面反射系数为4.3%,基区掺杂浓度 $N_A=2.382 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ ,电池片面积为 $236.48 \text{ cm}^2$ 。光照条件采用地面标准太阳光谱(AM1.5,  $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ),工作温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,其他结构参数设定为软件系统默认参数。然后在不同条件下,主要模拟了电池前、后表面的复合速率、掺杂浓度及结深等对电池性能的影响。

表1 模拟中所用的太阳能电池主要结构参数

结构参数	数值
制绒角度	$54.74^\circ$
宽带反射	4.3%
电池面积	$236.48 \text{ cm}^2$
前表面制绒深度	$3.7 \text{ }\mu\text{m}$
基区接触电阻	$2.537 \times 10^{-3} \text{ }\Omega$
并联电导	0.059 1 S
暗电流	$2.368 \times 10^{-7} \text{ A}$
硅片厚度	$200 \text{ }\mu\text{m}$
基区掺杂浓度	$2.382 \times 10^{15} / \text{cm}^3$
基区电阻率	$2 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$
体少子寿命	$800 \text{ }\mu\text{s}$

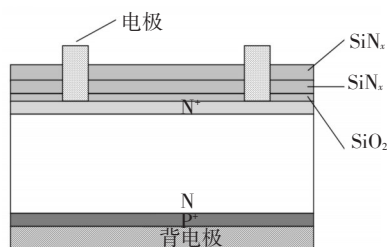


图1 电池模拟结构示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 前表面场掺杂浓度

对于背结太阳能电池来说,前表面场(FSF)的存在可以有效抑制少数载流子向电池前表面输运,增强其向背面发射结的输运,从而提高电池的开路电压和短路电流。因此,FSF的掺杂情况对于电池的性能具有很大影响。在PC1D模拟中对FSF掺杂情况进行了调整,首先对于FSF的掺杂浓度进行仿真模拟,并假定FSF为余误差(Erfc)掺杂,掺杂深度固定为 $0.3\ \mu\text{m}$ 。需要说明的是,对于不同的FSF掺杂浓度,通过设定峰值掺杂浓度和Erfc分布深度因子保持掺杂深度不变,模拟结果如图2所示。从图2中可以看出,起初随着FSF掺杂浓度的增加,电池的效率显著提升,在掺杂浓度为 $2\times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 时可以达到19.66%。但是当掺杂浓度超过 $2\times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 的时候,电池效率随着FSF掺杂浓度的增加反而下降,主要原因在于高掺杂的FSF中本身复合就很大,从而降低了少数载流子的数目;其次由于N型电池前表面场表面存在电介质膜的化学钝化,掺杂浓度越高,导致电介质膜的表面钝化效果就越差<sup>[10]</sup>,因此N型电池前表面场的最佳掺杂浓度和其表面钝化效果相关,只有在合适的掺杂浓度范围内才能达到最佳的前场钝化效果。从图2中还可看出,随着掺杂浓度的增加,电池开路电压 $V_{oc}$ 与电池效率的变化趋势基本一致,短路电流 $I_{sc}$ 则逐渐变小,但变化不大,而电池填充因子FF则随着掺杂浓度的增加呈现先减小后增大的趋势。

### 2.2 前表面场掺杂深度

之后,固定掺杂浓度为优化值 $2\times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ ,对FSF的掺杂深度进行了仿真模拟,掺杂深度变化范围为 $0.1\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 。模拟结果如图3所示。从图3中

可以看出,电池开路电压、短路电流、转换效率均随掺杂深度的降低而上升,但变化不大,转换效率也只增加了0.1%左右,而电池填充因子则随掺杂深度的降低而减小。这样的模拟结果说明,在优化FSF时,需重点考虑FSF的掺杂浓度,而对于掺杂深度则需控制在 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下即可。

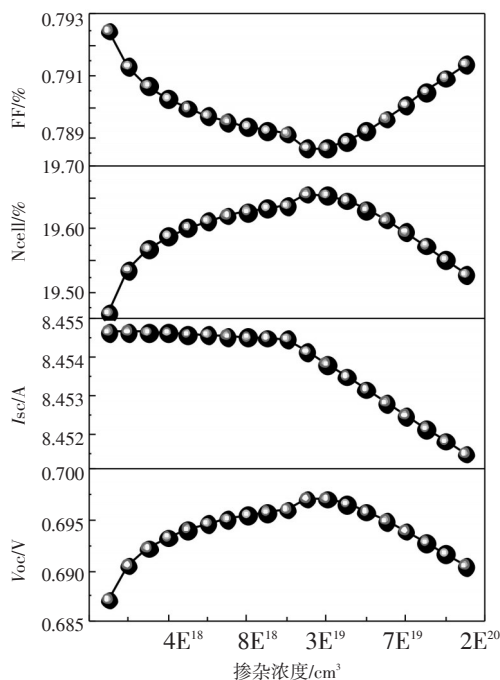


图2 前表面场掺杂浓度对电池性能的影响

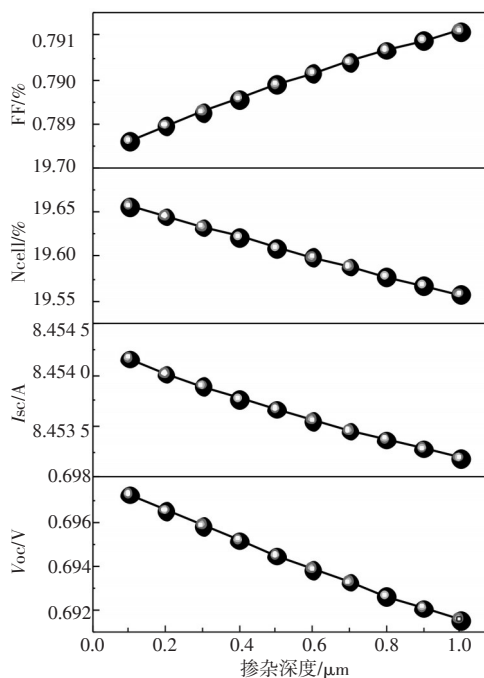


图3 前表面场掺杂深度对电池性能的影响

### 2.3 前表面复合速率

图4为前表面复合速率对电池性能的影响。由图4可知,电池前表面复合速率对电池效率影响显著,当前表面复合速率小于 $1 \times 10^3$  cm/s时,随着复合速率的增大,电池效率缓慢降低,电池性能受表面复合速率变化的影响很小;但是当前表面复合速率超过 $1 \times 10^3$  cm/s后,电池转换效率将随复合速率的增大而快速下降。电池前表面复合速率从 $1 \times 10^3$  cm/s增加到 $1 \times 10^6$  cm/s,使电池效率降低3%左右。电池开路电压与短路电流也均呈现出相同的趋势,但短路电流的变化较小。电池的填充因子则随着前表面复合速率的增大呈现先增大而后振荡减小的趋势。实际上,前表面复合速率主要与电池前表面的钝化有关<sup>[11]</sup>。因此如何提高电池前表面钝化效果将是进一步提高电池转换效率必须解决的问题。

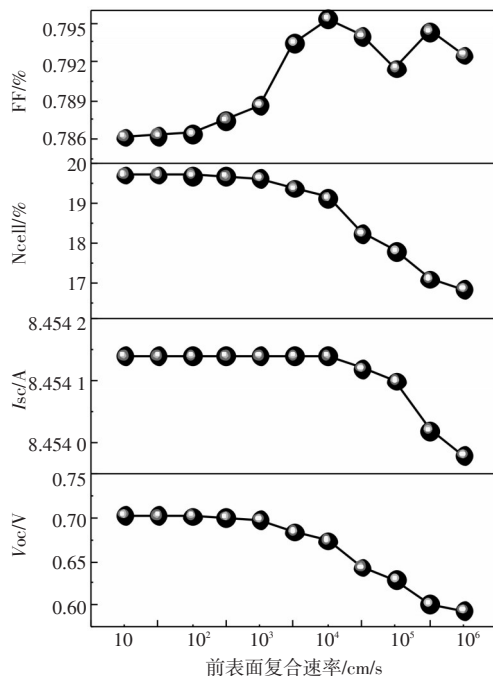


图4 前表面复合速率对电池性能的影响

### 2.4 背发射极掺杂浓度

对于N型背结晶体硅太阳能电池来说,背发射极参数的优化主要涉及背表面复合速率、方块电阻(掺杂浓度)、结深等参数。同样的,对于不同掺杂浓度,通过设定峰值掺杂浓度和掺杂浓度的余误差(Erfc)分布深度因子使结深保持不变。然后,在PC1D模型中调整背发射极参数,首先对发射极掺杂浓度进行模拟,掺杂深度固定为 $0.3 \mu\text{m}$ ,模拟结果

如图5所示。从图5中可以看出,背发射极掺杂浓度对电池的影响与前表面场掺杂对电池的影响情况相似。开始时,随着掺杂浓度的提高,电池的效率提升明显,并在掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 时达到最大值19.7%左右。但是当掺杂浓度超过 $2 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 后,电池效率则随着掺杂浓度的提高而降低。这是因为,发射极掺杂浓度的增加一方面有利于形成欧姆接触,降低串联电阻,提高电池效率;但另一方面掺杂浓度的增加将引起重掺杂效应,并导致电池背面复合增加,从而使电池效率降低。从图5中还可看出,随着掺杂浓度的增加,电池开路电压 $V_{oc}$ 、短路电流 $I_{sc}$ 的变化与电池效率的变化趋势基本一致,而电池填充因子FF则随着掺杂浓度的增加呈现先减小后增大的趋势,这与电池转换效率的变化正好相反。

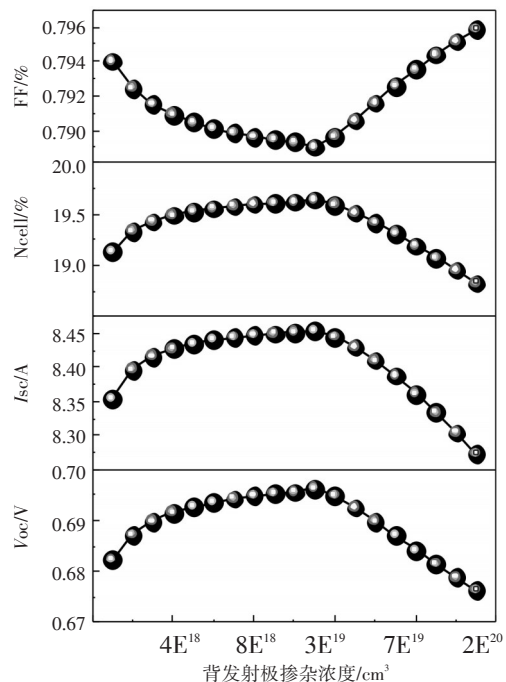


图5 背发射极掺杂浓度对电池性能的影响

### 2.5 背发射结掺杂深度

同样的,固定发射极掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ,对背结的掺杂深度进行了仿真模拟,掺杂深度变化范围为 $0.1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ ,模拟结果如图6所示。从图6中可以看出,电池开路电压、短路电流、转换效率均随掺杂深度的降低而上升,并且变化明显,转换效率可提升2%左右,而电池填充因子则随掺杂深度的降低而呈现先增大然后缓慢减小的趋势。这样的模拟

结果说明,在优化电池背结掺杂时,除了要考虑掺杂浓度外,还需关注背结掺杂深度对电池性能的影响。对于发射极来说,目前一些高效电池技术如浅结密栅技术、选择性发射极技术等已经应用于电池的制备工艺中,并获得了良好效果。

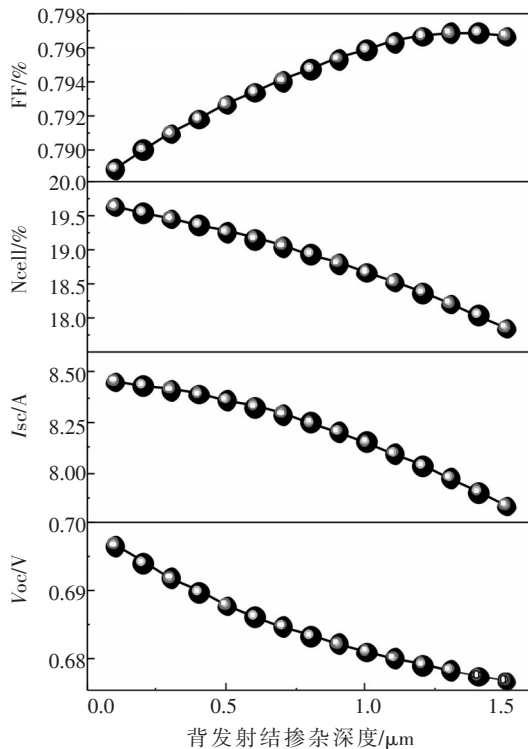


图6 背发射结掺杂深度对电池性能的影响

## 2.6 背表面复合速率

最后,固定发射极掺杂浓度和结深,模拟了背表面复合速率对电池性能的影响,结果如图7所示。由图7可知,背表面复合速率对电池效率影响非常明显,起初随着背表面复合速率增大,电池效率缓慢降低,但是当表面复合速率超过 $1 \times 10^4$  cm/s后,电池转换效率急剧下降,当电池背表面复合速率达到 $1 \times 10^6$  cm/s时,电池效率已下降到不足5%,而在电池背表面复合速度较小时( $10 \sim 1 \times 10^3$  cm/s),则可获得较高的转换效率。电池开路电压与短路电流也均呈现出相同的趋势,但开路电压的变化较小,因此电池效率的降低主要是由于短路电流的减小而导致的。电池的填充因子则随着背表面复合速率的增大呈现先缓慢增大而后再振荡增大的趋势。

由于电池背表面存在大面积金属-半导体的接触界面,这种界面的表面复合速率非常大,导致电

池的短路电流急剧减小,造成电池效率损失。因此需要在电池背表面沉积钝化介质膜,以减小金属-半导体的接触面积,从而降低电池因背表面复合而造成的效率损失,由于N型单晶硅已被证明具有极高的体少数子寿命, $\text{SiO}_2$ 、Si等钝化膜也被证实对重掺杂N型硅表面具有良好钝化效果。所以,目前的研究主要集中于电池背表面P型硅的钝化上,并且前期研究发现,常用的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}_x$ 等介质膜在重掺杂P型硅表面的钝化效果并不理想,但采用原子层沉积(ALD) $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[12]</sup>和等离子体化学气相沉积(PECVD) $\alpha$ -Si<sup>[13]</sup>则显示出良好的表面钝化性能。

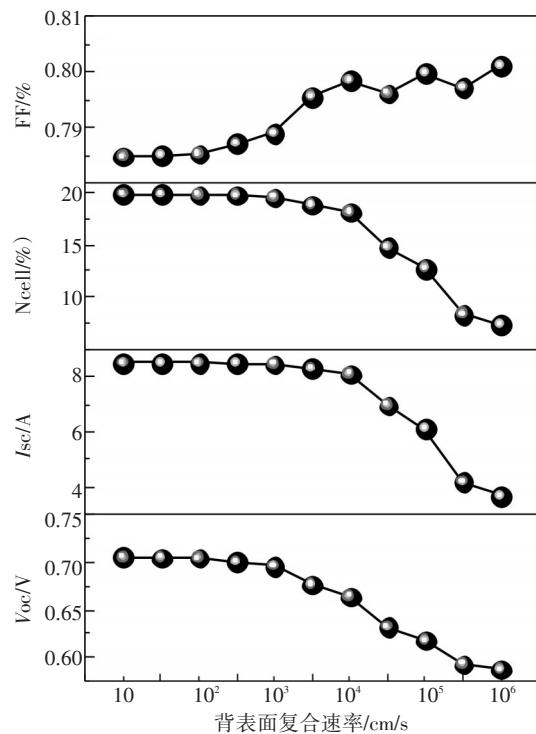


图7 背表面复合速率对电池性能的影响

## 3 结论

N型高效晶体硅电池已经成为光伏电池产业化发展的趋势。文中利用PC1D太阳能电池模拟软件对N型背发射极晶体硅电池进行了模拟。从模拟结果可以看出,对于N型背结晶体硅太阳能电池,背结掺杂浓度、结深、背表面复合速率、前表面掺杂浓度及表面复合速率都对电池转换效率影响较大,特别是电池前表面与背表面复合速率对电池性能的影响非常明显,而前表面场结深则对电池转换效率影响较小。因此对于高效N型晶体硅太阳能电池的发展来

说,良好的表面钝化是必不可少的。

### 参考文献

- [1] Zhao J H, Wang A, Altermatt P P, et al. High efficiency PERT cells on high quality N-Type CZ silicon substrates [C]//12<sup>th</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conf., 2001:19-22.
- [2] Zhao J H, Wang A, Altermatt P P, et al. High efficiency PERT cells on N-Type silicon substrates[C]// 29<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conf., 2002:218-22.
- [3] Zhao J H, Schmidt J, Wang A, et al. Performance instability in N-Type PERT silicon solar cells[C]// 3<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003: 923-926.
- [4] Macdonald D, Geerligs L, Azzizi A. Iron detection in crystalline silicon by carrier lifetime measurements for arbitrary injection and doping[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(2):1021-1028.
- [5] 宋登元,熊景峰.高效率N型硅太阳能电池技术现状及发展趋势[J]. 半导体光电, 2013, 34(3): 351-354.
- [6] 杨灼坚,沈辉. N型晶体硅太阳能电池最新研究进展的分析与评估[J]. 材料导报, 2010, 24(8):126-130.
- [7] Cousins P J, Smith D D, Luan H C, et al. Gen III: improved performance at lower cost [C]//35<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conf., 2010:823-826.
- [8] Kinoshita T, Fujishima D, Yano A, et al. The approaches for high efficiency HIT solar cell with very thin (< 100 nm) silicon wafer over 23% [C]// 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conf., 2011:871-874.
- [9] 闫丽,高华. PC1D方法对铝背场钝化技术的分析[J]. 光电技术应用, 2011, 26(4): 49-52.
- [10] Book F, Weidenmann T, Gloger S, et al. Analysis of processing steps for industrial large area n-type solar cells with screen printed aluminum-alloyed rear emitter and selective FSF [R]. 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2011:1160.
- [11] 陈伟,贾锐,张希清,等. 晶体硅太阳能电池表面钝化技术[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(2):118-127.
- [12] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, et al. Solar cell efficiency tables (version 39) [J]. Progress in Photovoltaics, 2009, 20(1):12-20.
- [13] Mishima T, Taguchi M, Sakata H, et al. Development status of high-efficiency HIT solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(1):18-21.
- [5] 王虎,李永倩,李欢,等. 光纤温度传感器在电力电缆监测中的应用[J]. 电力系统通信, 2012, 33(3):56-60.
- [6] 祁耀斌,吴敢锋,王月明. 电力电缆光纤光栅实时在线测温传感器优化设计[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2011, 42(11):3415-3420.
- [7] 张燕君,苏玉玲,韦波,等. 基于光电缆的分布式温度传感网络的实验研究[J]. 光电工程, 2011, 38(1): 49-54.
- [8] 张燕君,娄俊波,康瑞雪,等. 新型分布式布喇格光纤光栅传感系统的研究[J]. 光电工程, 2010, 37(1): 88-94.
- [9] Yong-chang F, Tao C, Wen-bin Z, et al. Experimental study on temperature measurement of underground cable by fiber Bragg grating[J]. Power System Technology, 2010, 34(5):212-215.
- [10] Reddy P. A novel method for high temperature measurements using fiber Bragg grating sensor[J]. Optica Applicata, 2010, 40(3):685-692.
- [11] 张燕君,康瑞雪,娄俊波,等. 一种分布式光纤光栅电缆温度传感器[J]. 激光与红外, 2010, 40:405-409.
- [12] 张剑驰,谢光斌. 电力系统测温中光纤光栅的应用研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2013, 35(3):106-110.
- [13] 谭江平,郭金学,秦琴. 光纤温度监测系统的技术分析及其在发电厂中的应用[J]. 企业技术开发:学术版, 2010, 29:6-8.
- [14] 刘继权. 光纤光栅在开关柜温度监测中的应用研究[J]. 电工技术, 2013(4):45-46.
- [15] 甘维兵,王立新,张翠. 分布式光纤光栅测温技术在线监测电缆温度[J]. 激光与红外, 2011, 41:577-581.
- [16] B D. Simultaneous strain and temperature measurement using a compact photonic crystal fiber inter-modal interferometer and a fiber Bragg grating[J]. Appl Opt, 2010, 49(32):6232-6235.

(上接第16页)