

文章编号: 1672-8785(2013)08-0040-07

不同工作温度下 a-Si(n)/c-Si(p)/uc-Si(p+) 异质结太阳能电池微晶硅背场 的模拟计算与优化

杨大洋 刘淑平 张 棚 彭艳艳 李德利

(太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 采用 Afors-het 太阳能电池异质结模拟软件, 模拟了在不同工作温度下微晶硅背场对 a-Si(n)/c-Si(p) 异质结太阳能电池性能的影响。结果表明, 随着背场带隙的增加, 开路电压和转化效率都增大。随着背场掺杂浓度的增加, 开路电压、填充因子和转化效率都在不断地增加; 随着背场厚度的增加, 电池性能有所下降。随着电池工作温度的上升, 微晶硅背场所对应的最佳浓度掺杂值和最佳厚度值变化不大。但是随着温度的上升, 微晶硅背场所对应的最佳带隙值有明显的右移趋势。实验结果为电池的商业化生产提供了实验参数。

关键词: afors-het; 异质结太阳能电池; 温度; 微晶硅背场

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.08.09

Back-surface Field Simulation and Optimization of a-Si(n)/c-Si(p)/uc-Si(p+) Heterojunction Solar Cells at Different Working Temperatures

YANG Da-yang, LIU Shu-ping, ZHANG Peng, PENG Yan-yan, LI De-li

(Academy of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The influence of back surface field of microcrystalline silicon on the a-Si(n)/c-Si(p)/uc-Si(p+) heterojunction solar cell is simulated with the afors-het software at different operation temperatures. The results show that the open circuit voltage and conversion efficiency increase with the increasing of the band gap of microcrystalline silicon. The open circuit voltage, fill factor and conversion efficiency increase with the increasing of the doped concentration. The cell performance declines when the microcrystalline silicon become thicker. The corresponding best values of doping concentration and thickness change a little when the operation temperature of the cell rises. However, the corresponding best value of band gap tends to move right obviously when the operation temperature of the microcrystalline silicon back surface field increases. The experimental results provide the experimental parameters for the commercial production of solar cells.

Key words: afors-het; heterojunction solar cell; temperature; microcrystalline silicon back surface field

收稿日期: 2013-05-27

作者简介: 杨大洋 (1987-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要研究方向为光学器件与光电材料。

E-mail: 1559488578@qq.com

0 引言

太阳能是一种理想的能源, 利用太阳能可避免石化能源枯竭以及日益严重的环境污染。太阳能电池是太阳能转化为电能的核心器件。自 1954 年 6% 的单晶硅电池^[1] 问世以来, 晶体硅的转化效率已经达到了极限。1994 年日本 SANYO 公司发明了转化效率大于 20% 的硅异质结电池^[2]。与传统的电池相比, 硅异质结具有明显的优势^[3]。不仅电池的制备可在低温下完成 (200 度以下), 而且硅片可以进一步减薄。因此硅异质结电池成为了各个国家的研究重点。为了提高硅异质结电池的性能, 人们通常会加上背场, 因为背场既能够减少电池的表面复合, 又不起光吸收的作用。由实验可知, 最适合做背场的材料是微晶硅^[4]。微晶硅是一种混合相半导体^[5], 它具有高电导率、连续可调的带隙以及易于均匀掺杂的特性^[6-7]。以前对于硅异质结电池背场的研究主要有背场的带隙、厚度和掺杂浓度等^[8]。由于电池在各个地方的工作温度差别很大, 因此有必要研究在不同的工作温度下, 微晶硅背场的带隙、厚度和掺杂浓度对电池性能的影响。本文以非晶硅 / 晶体硅 / 微晶硅的电池结构为研究对象, 利用 afors-het 异质结电池模拟软件 (该软件具有很高的可靠性^[9]), 模拟在不同的工作温度下, 微晶硅背场对电池性能的影响, 为高效硅异质结电池的设计和生提供一定的理论依据。

1 物理模型

1.1 模拟电池结构及 afors-het 数值模拟的物理模型

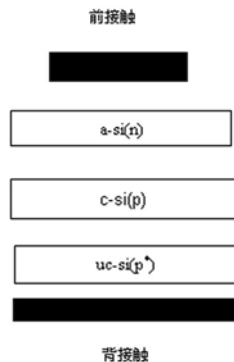


图 1 模拟太阳能电池的结构示意图

电池结构如图 1 所示。发射层为 n 型非晶硅, 吸收层为 p 型晶体硅, 薄膜硅背场为重掺杂的 P 型微晶硅。

Afors-het 模拟主要对上述电池结构求解以下四个半导体稳态方程:

$$\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{q} \frac{\partial^2 \varphi(x, t)}{\partial x^2} = p(x_1, t) - n(x_1, t) + N_D + \sum_{\text{defects}} p_t(x_1, t) \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{q} \frac{\partial^2 \varphi(x, t)}{\partial x^2} = p(x_2, t) - n(x_2, t) - N_A + \sum_{\text{defects}} p_t(x_2, t) \quad (2)$$

$$-\frac{1}{q} \frac{\partial j_n(x, t)}{\partial x} = G_n(x_1, t) - R_n(x_1, t) - \frac{\partial}{\partial t} n(x_1, t) \quad (3)$$

$$\frac{1}{q} \frac{\partial j_p(x, t)}{\partial x} = G_p(x_2, t) - R_p(x_2, t) - \frac{\partial}{\partial t} p(x_2, t) \quad (4)$$

模拟时复合模型采用带间复合、俄歇复合和 Shockley-Read-Hall 复合, 并且采用经典的玻尔兹曼统计来计算载流子的浓度。在求解半导体金属接触模型时选用电压控制边界条件, 将前接触 ($x=0$) 的电势设定为 0, 边界条件如下:

$$\varphi(0) = 0 \quad (5)$$

$$j_n(0) = q s_n^{\text{front}} (n(0) - n_{eq}(0)) \quad (6)$$

$$j_p(0) = -q s_p^{\text{front}} (p(0) - p_{eq}(0)) \quad (7)$$

背接触 ($x=L$) 的电势等于外部所加的电压 V , 其边界条件如下:

$$\varphi(L) = \phi_{\text{front}} - \phi_{\text{back}} + V \quad (8)$$

$$j_n(L) = -q s_n^{\text{back}} (n(L) - n_{eq}(L)) \quad (9)$$

$$j_p(L) = q s_p^{\text{back}} (p(L) - p_{eq}(L)) \quad (10)$$

在以上的边界条件下, 利用 afors-het 软件可以对电池的多个参数进行模拟。

1.2 模拟电池参数

模拟时各层所采用的参数见表 1。这些参数除可变参数外, 均来自 afors-het 软件的默认值。对于缺陷态参数的设置, 可参见赵雷等报道^[4]。模拟时光照条件为 AM1.5、100 mW/cm²、无反射、陷光结构和具有微晶硅背场。

表 1 电池模拟中的各层参数

参数	a-Si(n)	c-Si(p)	uc-Si(p)
层厚 /nm	5	300000	可变
介电常数	11.9	11.9	11.9
电子亲和势 /eV	3.9	4.05	4
带隙 /eV	1.74	1.12	可变
光学带隙 /eV	1.74	1.12	1.6
有效导带密度 / cm^{-3}	1×10^{20}	2.86×10^{19}	1×10^{20}
有效价带密度 / cm^{-3}	1×10^{20}	1.04×10^{19}	1×10^{20}
电子迁移率 / $\text{cm}^{-2}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	5	1106.5	10
空穴迁移率 / $\text{cm}^{-2}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	1	424.6	3
受主掺杂浓度 / cm^{-3}	0	1×10^{16}	可变
施主掺杂浓度 / cm^{-3}	2.5×10^{19}	0	0
电子热速度 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	10^7	10^7	10^7
空穴热速度 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	10^7	10^7	10^7
层密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.328	2.328	2.328
电子俄歇复合系数 / cm^6s^{-1}	0	2.2×10^{-31}	0
空穴俄歇复合系数 / cm^6s^{-1}	0	9.9×10^{-31}	0
带间复合系数 / cm^3s^{-1}	0	0	0

2 模拟结果分析与讨论

2.1 晶体硅背场、微晶硅背场对电池性能影响的比较

图 2 模拟了晶体硅背场、微晶硅背场对电池性能的影响。

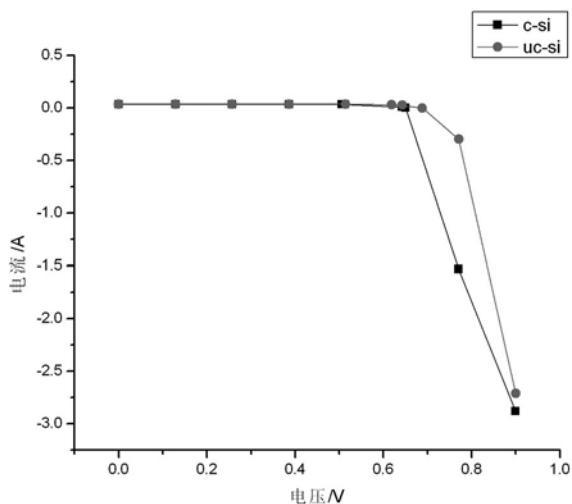


图 2 晶体硅、微晶硅对电池性能的影响

由图可知, 微晶硅背场的伏安特性曲线比晶体硅背场更接近矩形。微晶硅背场的开路电

压为 688.1 mV、短路电流为 36.22 mA/ cm^2 、填充因子为 83.21%、转化效率为 20.74%。晶体硅背场的开路电压为 649.9 mV、短路电流为 35.5 mA/、填充因子为 77.57%、转化效率为 17.9%。由数据可知, 微晶硅背场的各项性能均优于晶体硅背场, 所以有必要对微晶硅背场做进一步研究。

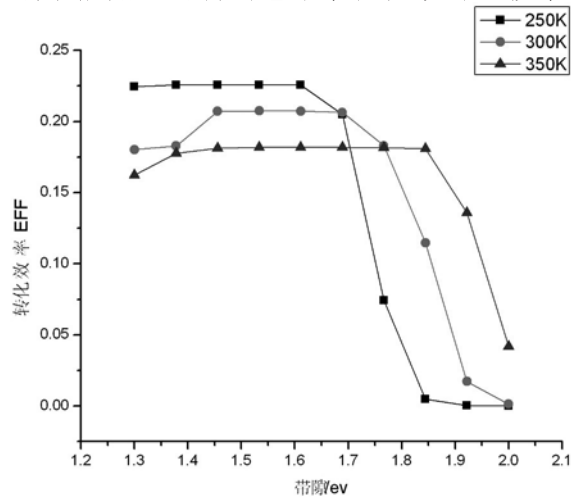
2.2 不同温度下背场的模拟分析

2.2.1 不同温度下背场隙变化对电池性能的影响

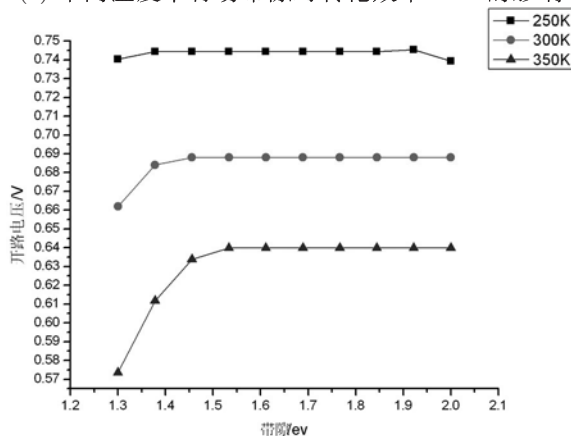
图 3 模拟了在其他参数不变时, 不同温度下背场隙对电池性能的影响。

由图 3a、3b 可知, 随着温度的升高, 开路电压和转化效率整体上呈下降的趋势。这是因为随着电池工作温度的提高, 辐射复合、暗电流都在增加。所以电池的开路电压和转化效率不断地降低。随着背场带隙的增加, 开路电压不断上升, 达到一定值后趋于稳定, 转化效率先上升后下降。这是因为背场带隙的增加会使导带失配不断增大, 而导带失配的增加有利于少子背场的形成, 但在导带失配增加的同时价带失配也在增加。价

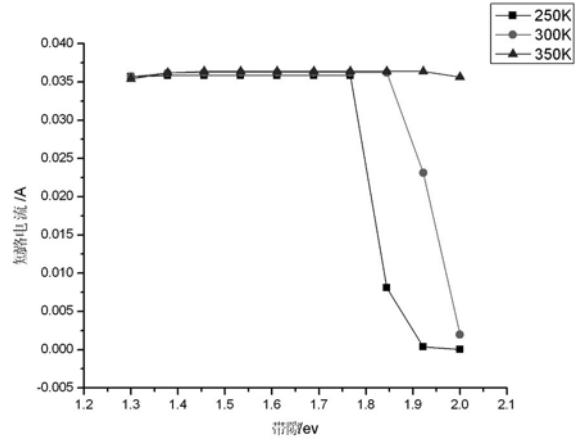
带失配会阻碍多子的输运, 所以当价带失配增大到一定值后负面作用会很明显, 从而又导致了电池性能的下降。在较高的温度下, 开路电压随带隙的变化比较明显。250 K 时, 开路电压对应的背场最佳带隙为 1.46 eV。300 K 时, 最佳带隙为 1.54 eV; 350 K 时, 最佳带隙为 1.58 eV。可以看出, 在不同的温度下, 开路电压对应的背场最佳带隙有明显的右移趋势。由图 3c、3d 可知, 随着温度的升高, 短路电流略有增加, 填充因子略有下降。这是因为温度的增加可以激发更多的电子, 产生更多的声子, 增加光子的二次吸收^[10], 从而使短路电流增加。随着带隙的增加, 短路电流和填充因子在不断降低。但是在不同的温度下, 它们所对应的背场最佳带隙变化不大。这是因为背场的带隙增加使微晶硅的晶化率下降, 影响了微晶硅背场的电导率和粒子的迁移率。



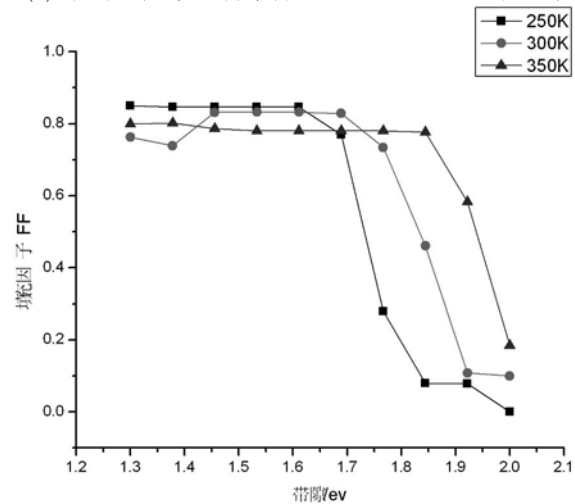
(a) 不同温度下背场带隙对转化效率 EFF 的影响



(b) 不同温度下背场带隙对开路电压 Voc 的影响



(c) 不同温度下背场带隙对短路电流 J_{SC} 的影响

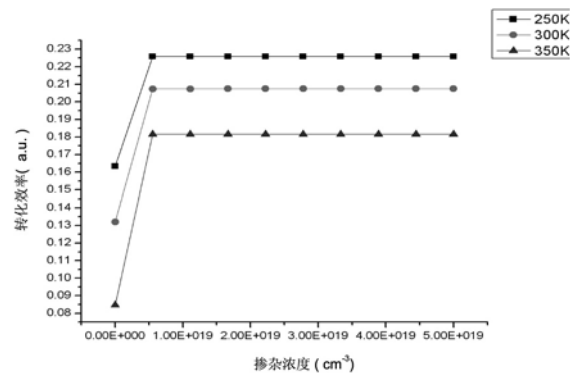


(d) 不同温度下背场带隙对填充因子 FF 的影响

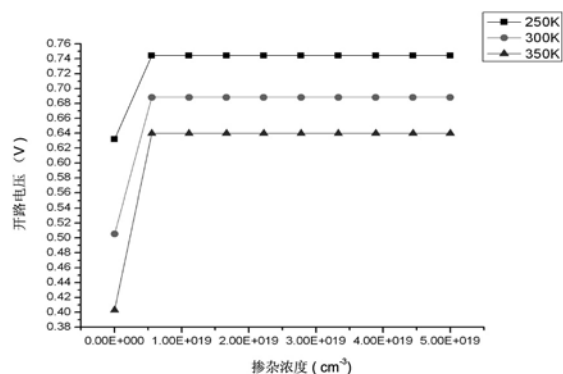
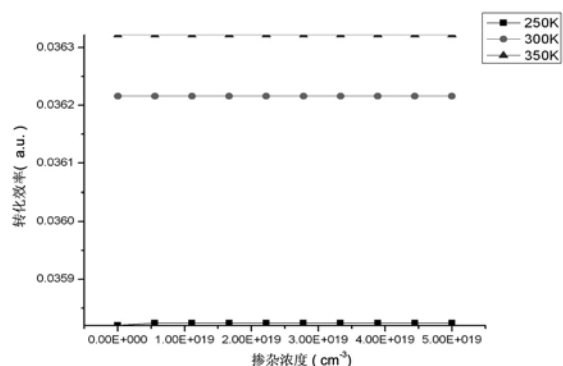
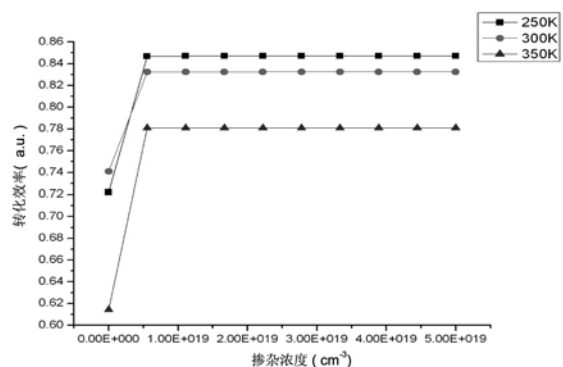
图 3 不同温度下背场带隙对电池性能的影响

2.2.2 不同温度下背场掺杂浓度变化对电池性能的影响

在其他参数不变的情况下, 不同温度下背场掺杂浓度与电池性能的关系如图 4 所示。



(a) 不同温度下背场掺杂浓度对转化效率 EFF 的影响

(b) 不同温度下背场掺杂浓度对开路电压 V_{OC} 的影响(c) 不同温度下背场掺杂浓度对短路电流 J_{SC} 的影响

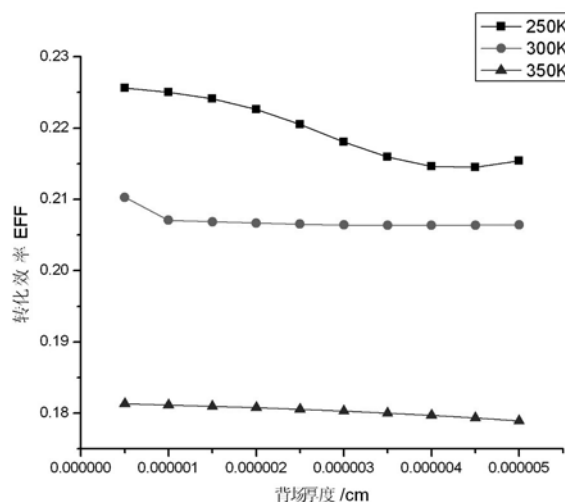
(d) 不同温度下背场掺杂浓度对填充因子 FF 的影响

图 4 不同温度下背场掺杂浓度对电池性能的影响

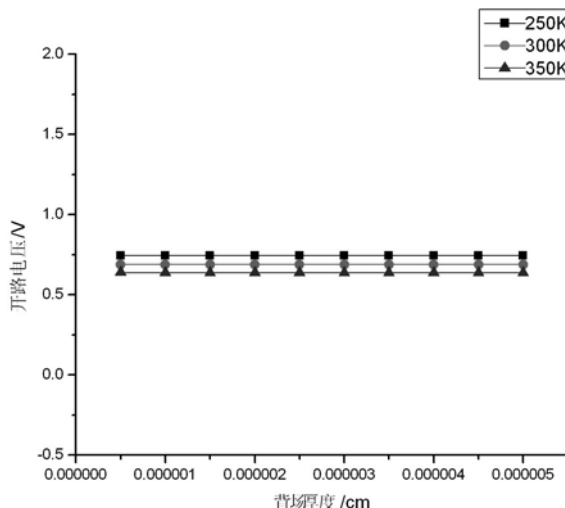
由图 4a、4b 可知, 随着微晶硅背场掺杂浓度的提高, 开路电压和转化效率都在不断提高, 达到最大值后不再变化。这是因为在掺杂浓度较低时, 价带失配对多子输运的阻碍比较明显, 但是这种负面影响可以通过提高微晶硅背场的掺杂浓度来抵消。所以当掺杂浓度增加时, 开路电压和转化效率会不断增加。而当掺杂浓度继续提高时, 开路电压和转化效率却变化不大。过

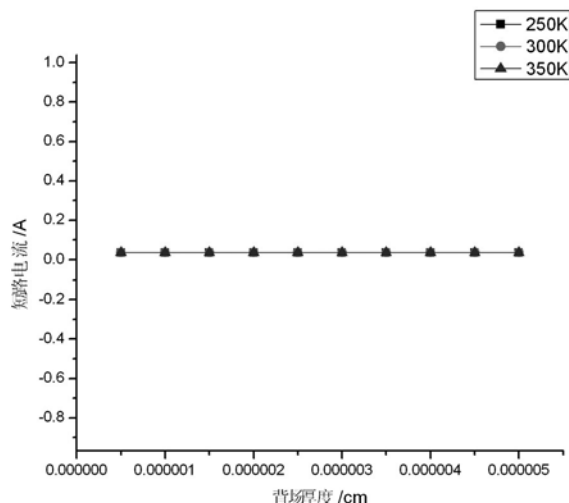
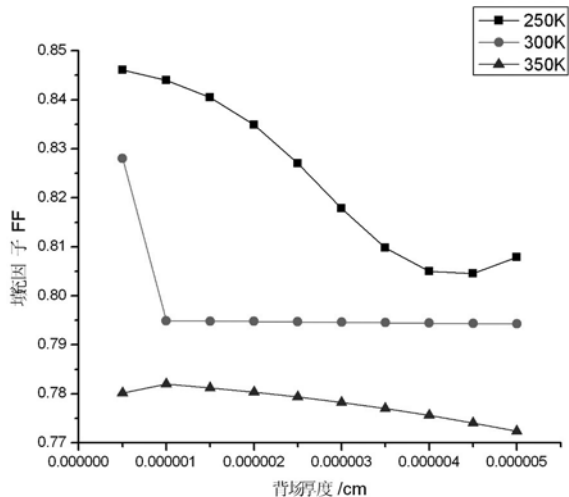
高的掺杂浓度会抑制微晶硅的晶化率, 从而影响微晶硅背场的电学特性。在不同的温度下, 开路电压和转化效率对应的最佳微晶硅背场掺杂浓度变化不大, 都在 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上。由图 4c 可知, 随着温度的升高, 短路电流在不断下降。这是因为在对微晶硅背场进行掺杂时会引入大量缺陷, 而且过高的掺杂会使微晶硅背场的带隙增大。因此在温度升高时这些缺陷会增加复合电流, 使短路电流下降。因此在温度较高的工作环境下应相应地降低微晶硅背场的掺杂浓度。由图 4d 可知, 不同温度下填充因子所对应的最佳微晶硅背场的掺杂浓度变化不大。

2.2.3 不同温度下背场厚度变化对电池性能的影响



(a) 不同温度下背场厚度对转化效率 EFF 的影响

(b) 不同温度下背场厚度对开路电压 V_{OC} 的影响

(c) 不同温度下背场厚度对短路电流 J_{SC} 的影响

(d) 不同温度下背场厚度对填充因子 FF 的影响

图 5 不同温度下背场厚度对电池性能的影响

在其他参数不变的情况下,不同温度下背场厚度与电池性能的关系如图 5 所示。

由图 5a、5b 可知,转化效率和填充因子随微晶硅背场厚度的增加而不断下降,而当微晶硅背场的厚度不断增大时,开路电压和短路电流变化不大。这是因为随着微晶硅背场厚度的增加,微晶硅材料结构的无序度和缺陷密度在不断增加。相应的微晶硅材料的带隙则会不断减小。微晶硅材料厚度的增加也会引起电池的体电阻增加,从而使串联电阻增加,所以填充因子会不断降低。填充因子的降低会降低转化效率。在不同温度下,转化效率和填充因子所对应的最佳微晶硅背场的厚度变化不大,所对应的最佳

厚度为 7 nm。由图 5b、5c 可知,微晶硅背场的厚度对开路电压和短路电流影响不大。

3 结论

用 Afors-het 异质结电池模拟软件分析模拟了在不同工作温度下 a-Si(n)/c-Si(p)/uc-Si(p+) 太阳能电池微晶硅背场的带隙、掺杂浓度和背场厚度对电池性能的影响。结果表明,微晶硅背场的厚度对电池性能的影响不大,最佳厚度随温度的变化不大。在不同的工作温度下所对应的最佳厚度都为 7 nm;随着掺杂浓度的增加,短路电流几乎没有变化,而短路电压和填充因子在不断增加,从而转化效率也不断地增加,微晶硅背场的最佳掺杂浓度随温度的变化不大。在不同的工作温度下,最佳掺杂浓度都为 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。随着带隙的不断增大,开路电压在不断增加,转化效率先增加后降低,短路电流和填充因子不断降低。在不同的工作温度下,微晶硅背场对应的最佳带隙发生变化。随着温度的升高,带隙会明显地右移。经过优化后,250 K 时的最佳参数是:带隙为 1.46 eV,厚度为 7 nm,掺杂浓度为 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。300 K 时的最佳参数是:带隙为 1.54 eV,厚度为 7 nm,掺杂浓度为 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。350 K 时的最佳参数是:带隙为 1.58 eV,厚度为 7 nm,掺杂浓度为 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

参考文献

- [1] 熊绍珍,朱美芳. 太阳能电池基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010:14.
- [2] Sawada T, Terada N, Tsuge S, et al. High Efficiency a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells[C]. *Proceedings of the First WCPEC Conference*. Hawaii, 1994, 1219-1226.
- [3] Maydell K V, Conrad E, Schmidt M. Characterization and Optimization of the Interface Quality in Amorphous/Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2006, **352**(9):1958-1961.
- [4] 赵雷, 周春兰, 李海玲等. a-si(n)/c-si(p) 异质结太阳能电池薄膜硅背场的模拟优化 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(5):3212-3218.
- [5] Rech B, Kluth O, Repmann T et al. New Materials and Deposition Techniques for Highly Efficient Silicon Thin Film Solar Cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2002, **74**(1):447-493.

- [6] Meier J, Fluckiger R, Keppner H, Shah A. Towards High-efficiency Thin-Film Silicon Solar Cells with the "Micromorph" Concept[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1997, **49**(1): 35–44.
- [7] Vetterl O, Finger F, Carius R. Intrinsic Microcrystalline Silicon: a New Material for Photovoltaics [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, **62**(2): 97–108.
- [8] Meier J, Vallat-Souvain E, Dubail S, et al. Microcrystalline/micromorph Silicon Thin-film Solar Cells Prepared by VHF-GD Technique[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, **66**(1): 73–84.
- [9] Stangl R, Froitzheim A, Schmidt M, Fuhs W. Photovoltaic Energy Conversion[C]. *Proceedings of the 3th World Conference*, 2003: 2100–2105.
- [10] 马丁格林著, 李秀文等译. **太阳电池—工作原理、工艺和系统的应用**[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.

(上接第 10 页)

3 结束语

从响应的标准差、平均响应和超出率来看, 过采样系统具有明显优势。因此, 如果在常规采样系统的基础上进行过采样, 那么过采样系统的优势是显著的。

但是, 先增大瞬时视场(采样尺寸), 然后再通过过采样改进系统性能的方法能否达到或超出常规采样系统的性能水平? 我们对此还需作进一步研究。

参考文献

- [1] Lawrie D G, Lomheim T S. Advanced Electro-optical Space-based Systems for Missile Surveillance [R]. SMC-TR-02-15, 2001, 9.
- [2] 左月萍, 张建奇. 几种工作模式的微扫描成像系统的理论建模和仿真[J]. **红外与毫米波学报**, 2003, **22**(02): 145–148.
- [3] 周峰, 王世涛, 王怀义. 关于亚像元成像技术几个问题的探讨[J]. **航天返回与遥感**, 2002, **23**(4): 28–33.
- [4] 刘妍妍, 张新, 徐正平, 等. 利用异形像元探测器提高空间分辨率[J]. **光学精密工程**, 2009, **17**(10): 2620–2627.
- [5] 刘妍妍, 张新, 张建萍. 超分辨率重建技术及其研究进展[J]. **中国光学与应用光学**, 2009, **2**(2): 102–111.
- [6] Christophe L, Bernard R. SPOT5 THR Mode [C]. *SPIE*, 1998, **3439**: 480–491.
- [7] Christophe L, Bernard R. In-flight Commissioning of SPOT5 THR Quincunx Sampling Mode [C]. *SPIE*, 2003, **4881**: 189–198.
- [8] Wolfgang S, Eckhard L. HSRS-An Infrared Sensor for Hot-Spot-Detection [C]. *SPIE*, 1998, **3437**: 167–175.
- [9] Edward J C, Susan L K. Infrared Sensor Modeling for Improved System Design [C]. *SPIE*, 1996, **2743**: 23–34.
- [10] Stephen A C, Linda S K, Robert A K. Advanced Sensor Simulation Capability [C]. *SPIE*, 1990, **1310**: 134–149.

(上接第 15 页)

- [5] Celedon N, Redlich R, Figueroa M. FPGA-based Neural Network for Nonuniformity Correction on Infrared Focal Plane Arrays [C]. *15th Euromicro Conference on Digital System Design*, 2012: 193–200.
- [6] Orzanowski T, Sosnowski T, Madura H. Response Nonuniformity Correction Method for Infrared Focal Plane Arrays [J]. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2011, **57**(10): 1108–1111.
- [7] 程正兴, 李水根. **数值逼近与常微分方程数值解**[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [8] 殷世民, 刘上乾. 基于低次插值的红外焦平面器件非均匀性多点校正算法[J]. **光子学报**, 2002, **21**(6): 715–718.
- [9] Soltyakov V N, Zhegalov S I, Morozova V G. Nonlinear Correction of IR FPA Nonuniformity [J]. *Applied Physics*, 2010, **5**: 81.