

文章编号: 1672-8785(2017)01-0031-05

梯度掺杂对 β -FeSi₂(n)/c-Si(p) 太阳能电池转化效率的影响

刘振芳 刘淑平 聂慧军

(太原科技大学应用科学学院, 山西太原 030024)

摘要: 用AFORS-HET软件对 β -FeSi₂(n)/c-Si(p)太阳能电池的发射层进行了梯度掺杂模拟, 并研究了发射区掺杂总量相同时梯度掺杂和均匀掺杂对电池转化效率的影响。分别讨论了梯度掺杂时发射区的能带、发射区的浓度差、发射区的层数对电池转化效率的影响。实验结果表明, 发射区梯度掺杂可以明显提高电池转化的效率。随着发射区各层浓度比的增大, 电池转化效率先增大后保持不变; 随着发射区层数的增加, 电池转化效率先增大后保持不变; 随着发射区厚度的增加, 电池转化效率逐渐降低。梯度掺杂电池转化效率的提高总量远大于因梯度发射区过厚造成的电池转化效率的降低总量。

关键词: AFORS-HET; 梯度掺杂; 浓度差; 层数; 转化效率

中图分类号: TM914.4 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.01.006

Effect of Gradient-doping on Conversion Efficiency of β -FeSi₂(n)/c-Si(p) Solar Cell

LIU Zhen-fang, LIU Shu-ping, NIE Hui-jun

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

Abstract: The emission layer of β -FeSi₂(n)/c-Si(p) solar cell was simulated by AFORS-HET software in gradient-doping and the influence of gradient doping and uniform doping on the conversion efficiency of cells for the same total amount of doping in emission areas was studied. For gradient doping, the influences of emission energy band, emission concentration difference and layer number in emission areas on the conversion efficiency of cells were discussed respectively. The experimental results showed that the use of gradient doping in emission areas could significantly improve the conversion efficiency of cells. With the increase of concentration ratio of each layer in emission areas, the conversion efficiency of cells increased first and then remained unchanged; with the increase of layer number in emission areas, the conversion efficiency increased first and then remained unchanged too; and with the increase of thickness of emission areas, the conversion efficiency decreased gradually. The total increase amount of conversion efficiency of gradient-doped cells was far greater than the total decrease amount of conversion efficiency caused by over thick emission areas.

Key words: AFORS-HET; gradient doping; concentration difference; layer number; conversion efficiency

收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(61275099; 61102131); 信号与信息处理重庆市市级重点实验室建设项目

作者简介: 刘振芳(1989-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事光学器件与光电材料研究。

E-mail: 245867718@qq.com

0 引言

太阳能电池的转化效率和制造成本一直是影响太阳能电池发展的两个关键因素。日本研发的 HIT 型太阳能电池由于在发射区和基区之间插入一层非晶硅本征层，太阳能电池转化效率高达 20%^[1]。之后日本 sanyo 公司在太阳能电池加入了背场结构，背场对光生少子的势垒作用使得太阳能电池转化效率达到 22.8%。因此本征层和背场成为提高 HIT 太阳能电池转化效率的重要组成结构^[2]。目前对异质结太阳能薄膜电池的研究也都是在 PN 结基础上加入本征层和背场结构，通过改变各层材料、各层的厚度、各层的掺杂浓度等方式尽可能增大光生少子浓度，减小光生少子的复合速率，提高光生少子在界面传输的性能，最终提高太阳能电池的转化效率^[3]。由于传统薄膜太阳能电池的各层掺杂工艺均采用均匀掺杂方式，afors-het 默认为均匀掺杂，因此基于 afors-het 软件模拟优化薄膜太阳能电池的研究也都为均匀掺杂模式^[4]。本文的梯度掺杂与传统均匀掺杂方式完全不同，梯度掺杂是人为控制太阳能电池发射区的浓度变化范围，使发射区的掺杂质粒子呈梯度形式分布。由于掺杂浓度的变化会影响材料的物理化学性质，从而影响光生载流子浓度、传输质量和复合速率。而光生载流子浓度和复合速率直接决定太阳能电池的转化效率，因此梯度掺杂工艺的研究具有非常重要的意义^[5]。

在太阳能电池材料选择方面，传统的晶体硅太阳能电池的转化效率高，但制造成本高且受高温扩散制结工艺限制，因此不适于太阳能电池模拟^[6]。非晶硅太阳能电池的转化效率高，但光致衰退效应至今没有解决，同样不适于太阳能电池模拟。 β -FeSi₂ 是一种直接带隙半导体高光吸收材料，制造工艺成熟，制造成本低。本文采用 β -FeSi₂ 作为太阳能电池的发射层^[7]。为研究梯度掺杂和均匀掺杂对太阳能电池转化效率的影响，本文采用 β -FeSi₂(n) /c-Si(p) 结构比较了当发射区的掺杂总量相同时发射区的梯度掺杂与均匀掺杂时太阳能电池的转化效率，并讨论

发射区的浓度比和层数对太阳能电池转化效率的影响^[8]。

1 发射层掺杂的原理及电池参数

发射层梯度掺杂就是把太阳能电池的发射层分割为 n 层，分别为 D_1 、 $D_2 \dots$ ，每一层的掺杂浓度逐渐升高或降低，浓度比为 Q 。本文发射层为 n 型 β -FeSi₂，因此掺杂浓度逐层递减。如图 1 所示，将发射层分层，施主的掺杂浓度 $D_1 > D_2$ ，发射层的多子为电子，即发射层的电子浓度 $D_1 > D_2$ ，多子电子由 D_1 层向 D_2 层扩

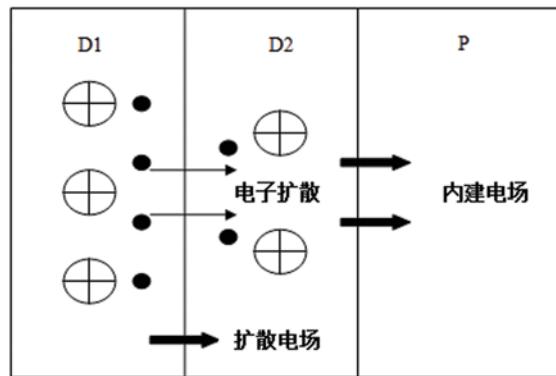


图 1 梯度掺杂时发射区电场的示意图

表 1 电池模拟的初始参数

结构参数	β -FeSi ₂ (n)	c-Si(p)
厚度 /nm	可调	3×10^5
介电常数	31	11.9
电子亲和势 /eV	4.71	4.05
带隙 /eV	0.87	1.12
光学带隙 /eV	1.12	1.12
有效导带密度 /cm ⁻³	1.7×10^{18}	2.86×10^{19}
有效价带密度 /cm ⁻³	1.7×10^{18}	1.04×10^{19}
电子迁移率 /cm ⁻² V ⁻¹ s ⁻¹	206	1141
空穴迁移率 /cm ⁻² V ⁻¹ s ⁻¹	168	420
受主掺杂浓度 /cm ⁻³	0	1.5×10^{16}
施主掺杂浓度 /cm ⁻³	可调	0
电子热速度 /cm · s ⁻¹	1.0×10^7	1.0×10^7
空穴热速度 /cm · s ⁻¹	1.0×10^7	1.0×10^7
层密度 /g · cm ⁻³	2.328	2.238
电子俄歇复合系数 cm ⁶ s ⁻¹	0	2.2×10^{-31}
空穴俄歇复合系数 cm ⁶ s ⁻¹	0	9.9×10^{-32}
带间复合系数 cm ³ s ⁻¹	0	9.5×10^{-15}

散, 最终形成了由 D_1 层指向 D_2 层的扩散电场。此时扩散电场方向与内建电场方向保持一致, 增强了 PN 结内建电场强度, 因此扩散形成的外加电场有利于光生载流子的输运和积累, 有利于提高太阳能电池的转化效率^[9]。

模拟过程中, 除发射区的掺杂模式与均匀掺杂不同外, 发射区的总厚度、发射区的总掺杂量等均相同。模拟光照条件为 AM1.5, 0.1 W/cm², 无背场、陷光和反射等结构^[10]。

2 模拟结果分析

2.1 发射区的厚度对太阳能电池性能的影响

发射区是太阳能电池的重要结构。在发射区和基区之间形成内建电场, 光照产生的光生少子在内建电场作用下向 PN 结两端漂移, 最终在结区两端积累, 形成光生电场, 而发射层的厚度与掺杂浓度会直接影响光生少子的传输质量, 从而影响光生少子的积累。如图 2 所示, 随着发射区厚度的增加, 开路电压基本保持不变, 短路电流、填充因子和转化效率逐渐减小。这是因为随着发射区厚度的增加, 发射区吸收的光子数量增加, 光照产生的电子—空穴对的数目增加, 但光生少子不在 PN 结空间电荷区, 所以增加的光生少子不会在内建电场作用下分离从而产生光电流。并且随着发射区厚度的增加, 材料本身和制造工艺的缺陷浓度和电池串联电阻也在增加, 发射区光生少子被复合的概率增加, 因此随着发射区厚度的增加, 太阳能电池的性能会下降^[11]。

为研究梯度掺杂能否提高太阳能电池的转化效率, 我们将发射区分层, 然后分别对每层的掺杂浓度进行人为控制, 最终达到浓度梯度效果。由于受制造工艺技术水平限制, 每层的厚度至少为 2 nm。发射区层数越多, 发射区的厚度就越大, 这样反而对太阳能电池的转化效率不利。由图 2 可知, 发射层的厚度从 1~10 nm 变化时, 转化效率仅下降了 0.08%。为了减小分层梯度掺杂带来的不利因素, 发射区的整体厚度应控制在 10 nm 以内。

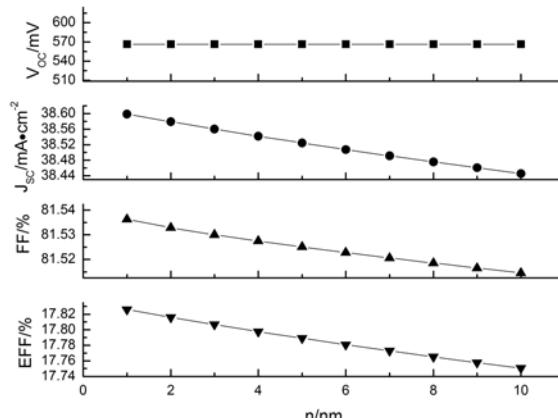


图 2 电池参数随发射区厚度的变化

2.2 发射区各层的浓度差对太阳能电池性能的影响

如图 3 和 4 所示, 发射区分层梯度掺杂时, 发射区第二层的能带明显向上弯曲。根据能带匹配的定义, $\Delta E_C = \Delta \chi$, $\Delta E_V = \Delta E_g - \Delta \chi$ (式中, ΔE_C 和 ΔE_V 分别是本征层 a-Si 和衬底 c-Si 的导带和价带能量差, $\Delta \chi$ 是本征层 a-Si 和衬底 c-Si 的电子亲和势差, ΔE_g 是本征层 a-Si 和衬底 c-Si 的带隙差, 这里 ΔE_g 、 $\Delta \chi$ 取绝对值)。当能带向上弯曲时, 发射区与基区的界面导带失配减小, 光生少子通过界面时受到导带失配所产生势垒的阻碍减小, 载流子在界面处的传输性能得到提高。因此, 利用扩散引进的外加界面电场可以提高太阳能电池的转化效率。由于受扩散制结工艺的限制, 制作单层浓度梯度变化的 β -FeSi₂ 工艺复杂, 成品率低, 而 afors-het 软件默认每层为均匀掺杂。为实现发射区施主掺杂浓度的梯度化, 我们先将发射区分为 n 层, 然后分别为每层 β -FeSi₂ 掺杂。

对于发射区层数确定为 n 的太阳能电池, 每层掺杂浓度之比 Q 的大小会直接影响扩散电场强度。 Q 值越大, 层与层的浓度差越大, 扩散就越明显, 扩散电场强度就越大。但这并不意味着 Q 值越大转化效率就越高。本文主要研究掺杂总量一定时均匀掺杂与梯度掺杂的转化效率。 Q 值越大, 第一层的浓度越大, 发射区其他层的掺杂浓度越低, 由第一层扩散的电子浓度逐渐增大, 最终达到饱和。若总掺杂量不变,

无限制增大第一层的浓度会导致最后一层(即与c-Si相邻的界面层)的掺杂浓度趋于0,最终使掺杂出现断层。断层会使少子的扩散长度大幅度上升,从而使光生少子的复合概率增大。

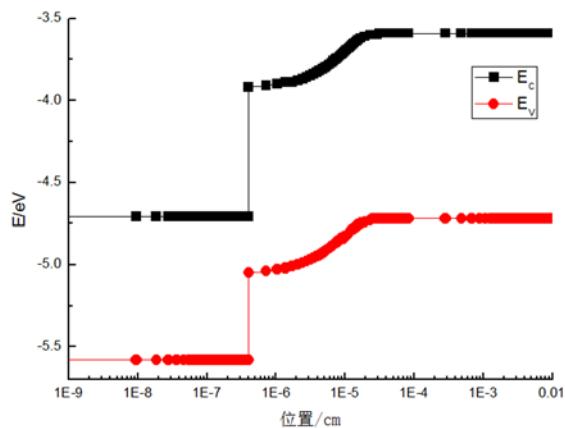


图3 发射区均匀掺杂时的能带图

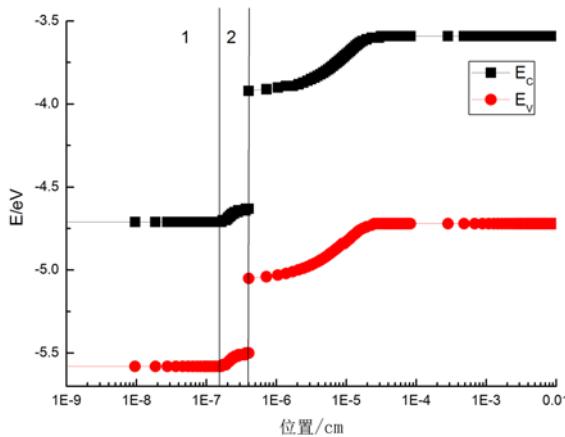


图4 发射区梯度掺杂时的能带图

以 $n=2$ 为例,如图5所示,随着浓度比 Q 值的增大,太阳能电池的转化效率先增大后保持不变。当浓度比 $1.5 \leq Q < 3.7$ 时,随着 Q 值的增大,第一层与第二层之间的浓度差逐渐增大,由第一层向第二层扩散的电子浓度逐渐增大,界面扩散电场也逐渐增大,电池转化效率大幅度提高。当 $Q \geq 3.7$ 时,第一层与第二层的浓度差更大,由于受发射区总掺杂量的限制,扩散电子的浓度趋于饱和,扩散形成的界面电场也趋于稳定,太阳能电池的转化效率保持不变。

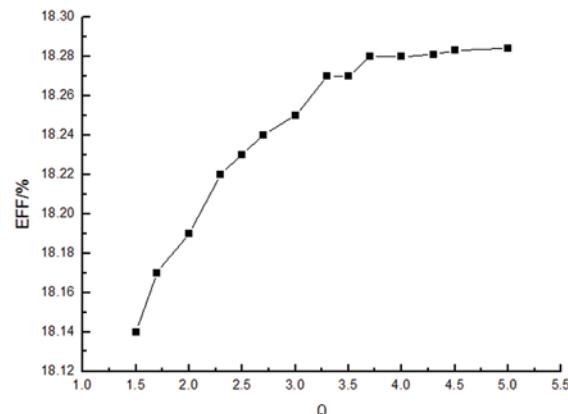


图5 电池转化效率随浓度比的变化

2.3 发射区层数对太阳能电池性能的影响

把发射区分为 n 层时,由于层与层之间存在浓度差,电子在层与层之间逐层扩散,最终使每层之间形成一个外加界面电场。所有外加界面电场与内建电场的方向一致,因此理论上掺杂总量一定时,发射区的层数越多越好。但由于受制造工艺的限制,太阳能电池 β -FeSi₂薄膜厚度的最小值为2 nm,发射区的层数越多,发射区的整体厚度就越大。由上文可知,太阳能电池的转化效率随发射层厚度的增加而减小。

如图6所示,如果掺杂总量一定,梯度掺杂时发射区的层数越多,太阳能电池的转化效率先增加后保持不变。而均匀掺杂时,随着发射区厚度的增加,太阳能电池的转化效率逐渐降低。由图6可知,梯度掺杂时太阳能电池转化效率的提高总量远远大于均匀掺杂时厚度造成的电池转

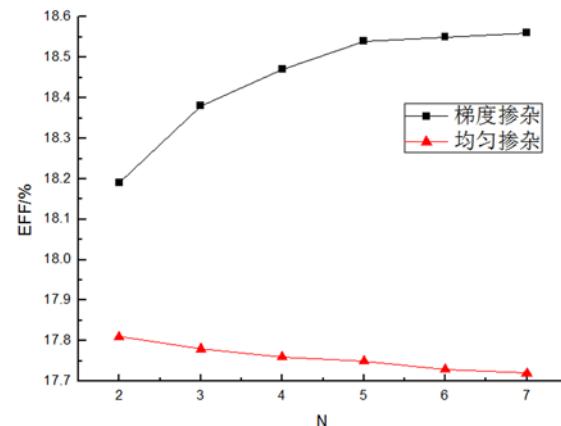


图6 电池转化效率随发射区层数的变化

化效率的降低总量。同时,随着发射区层数的增加,太阳能电池的转化效率先增加后保持不变,因此梯度掺杂时,发射区的层数最多取 5 层。

3 结论

运用 AFORS-HET 软件进行模拟时,当发射区的掺杂总量一定,梯度掺杂使发射区的能带向上弯曲,发射区与基区之间的导带失配减小,光生少子受到导带失配的势垒作用减小,光生少子在界面的传输效率得到提高,因此梯度掺杂时的电池转化效率明显比均匀掺杂的高;当发射区的层数一定,随着发射区的梯度掺杂浓度比增大,电池的转化效率先增大后基本保持不变。当浓度比 Q 取 3.7 时,电池的转化效率达到峰值;随着发射区层数的增加,太阳能电池的转化效率先增大后保持不变。为保持太阳能电池的转化效率,发射区的层数应保持在五层以内。梯度掺杂时太阳能电池转化效率的提高总量远远大于均匀掺杂时厚度造成的电池转化效率的降低总量。

参考文献

- [1] 王敏花, 刘晓平, 李彦林, 等. AFORS-HET 软件模拟 N 型非晶硅/p 型晶体硅异质结太阳电池 [J]. 太阳能学报, 2008, 24(2): 125–129.

(上接第 30 页)

参考文献

- [1] Cao Y, Yang M Y, Tisse C L. Effective Strip Noise Removal for Low-textured Infrared Images Based on 1D Guided Filtering [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, 26(12): 2176–2188.
- [2] Ma L, Zhang X H. Color Image Segmentation Based on Clustering Adjustment and Kernel Density Estimation [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2015, 33(Z2): 171–173.
- [3] Bae T W. Spatial and Temporal Bilateral Filter for Infrared Small Target Enhancement [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 63(12): 42–53.
- [4] Bae T W, Kim B I, Kim Y C, et al. Jamming Effect Analysis of Infrared Reticle Seeker for Directed

- [2] 郁操, 侯国付, 刘芳, 等. 退火温度和 β -FeSi₂ 薄膜厚度对 n- β -FeSi₂/p-Si 异质结太阳电池的影响 [J]. *人工晶体学报*, 2009, 38(3): 662–665.
- [3] 许文英, 陈凤翔, 王嘉赋. n- β -FeSi₂/p-Si 异质结太阳电池的计算机模拟 [J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 35(9): 21–24.
- [4] 崔冬萌, 贾锐, 丁武昌, 等. 梯度掺杂对 n 型异质结太阳能电池性能的影响 [J]. *发光学报*, 2013, 34(11): 1505–1510.
- [5] 聂慧军, 刘淑平, 吕雁文, 等. β -FeSi₂(n)/c-Si(p) HIT 型太阳能电池的模拟与优化 [J]. *电子元件与材料*, 2015, 30(6): 23–27.
- [6] 靳瑞敏. 太阳能电池原理与应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [7] 赵雷, 周春兰, 李海玲, 等. a-Si(n)/c-Si(p) 异质结太阳电池薄膜硅背场的模拟优化 [J]. *物理学报*, 2008, 57(5): 3212–3218.
- [8] 王东. 光伏电池原理及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [9] 吴国盛, 王振文, 闻腾, 等. a-Si(n)/c-Si(p) 异质结电池非晶层的模拟优化 [J]. *科技创新与生产力*, 2012, 10: 87–90.
- [10] Wakisaka K, Taguchi M, Sawada T, et al. More Than 16% Solar Cells with a New HIT (Doped a-Si/ non-doped a-Si/ crystalline Si) Structure [C]. Las Vegas: 22th IEEE PVSC, 1991.
- [11] Dwivedi N, Kumar S, Bisht A, et al. Simulation Approach for Optimization of Device Structure and Thickness of HIT Solar Cells to Achieve 27% Efficiency [J]. *Solar Energy*, 2013, 88: 31–41.

Infrared Counter Measures [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 64(5): 431–441.

- [5] Bae T W, Sohng K I. Small Target Detection Using Bilateral Filter Based on Edge Component[J]. *International Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2015, 31(6): 735–743.
- [6] 崔金玲. 红外热像技术在电气装备故障检测中的应用 [J]. *城市建设理论研究 (电子版)*, 2013, 22(10): 2095–2104.
- [7] Jin H, Wang Y. A Fusion Method for Visible and Infrared Images Based on Contrast Pyramid with Teaching Learning Based Optimization [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 64(2): 134–142.
- [8] Bulanon D M, Burks T F, Alchanatis V. Image Fusion of Visible and Thermal Images for Fruit Detection [J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(1): 12–22.