

文章编号: 1672-8785(2016)05-0038-05

β -FeSi₂(n)/a-Si(i)/c-Si(p)/ μ_c -Si(p⁺) 异质结太阳能电池的模拟与优化

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: 运用 AFORS-HET 软件对 β -FeSi₂(n)/a-Si(i)/c-Si(p)/ μ_c -Si(p⁺) HIT 型异质结太阳能电池的性能进行了模拟, 并对各层参数进行了优化。模拟结果表明, 在 FeSi₂(n)/c-Si(p) 结构上加上本征层和背场, 能显著地提高电池的性能。加入缺陷并优化各项参数后, 电池的最后参数为 $V_{OC}=647.7$ mV, $J_{SC}=42.29$ mA·cm⁻², $FF=75.32\%$, $EFF=20.63\%$, β -FeSi₂(n)/c-Si(p) 太阳能电池的效率提高了 2.3%。

关键词: afors-het; β -FeSi₂; 少数载流子; 本征层; 背场

中图分类号: TM914.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.05.008

Simulation and Optimization of β -FeSi₂(n)/a-Si(i)/c-Si(p)/ μ_c -Si(p⁺) Heterojunction Solar Cells

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

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

Abstract: The performance of β -FeSi₂(n)/a-Si(i)/c-Si(p)/ μ_c -Si(p⁺) HIT heterojunction solar cell is simulated and the parameters of each layer of the solar cell are optimized. The simulation results show that the performance of the solar cell can be improved remarkably by adding an intrinsic thin-layer and BSF to the FeSi₂(n)/c-Si(p) solar cell structure. When defects are introduced and the parameters are optimized, the ultimate parameters of the solar cell are: $V_{OC}=647.7$ mV, $J_{SC}=42.29$ mA·cm⁻², $FF=75.32\%$, $EFF=20.63\%$. The efficiency of the FeSi₂(n)/c-Si(p) solar cell is improved by 2.3%.

Key words: AFORS-HET; β -FeSi₂; minority carrier; intrinsic layer; BSF

0 引言

随着经济的发展, 人们对能源的需求越来越大, 能源储备量已不能满足人类的需求。太阳能由于具有储量大、便于采集、长久和绿色环保等特点很快成为一种理想的新型能源。1994 年, 日本三洋公司通过在发射层和衬底上加入一层本征层, 利用本征非晶硅对晶体硅表面的钝化作用降低了发射区和基区之间界面态密度, 使

异质结太阳能电池的效率达到了 20%。后来, 该公司又采用重掺杂 N 型非晶硅作为背场, 通过用背场光生少子的势垒效果减少光生少子在电池背部的表面复合, 再一次提高了太阳能电池的转化效率。日本三洋公司的发射层 / 本征层 / 衬底 / 背场结构太阳能电池很快成为研究热点。由于非晶硅的光学带隙比较高和还不能彻底解决发射层非晶硅的光致衰退问题, 该太

收稿日期: 2016-03-21

作者简介: 刘振芳 (1989-), 男, 山西省吕梁市人, 硕士研究生, 主要研究方向为光学器件与光电材料。

E-mail: 245867718@qq.com

太阳能电池光谱的利用率只有 48%，因此需要用另一种材料来替代非晶硅。

β -FeSi₂ 是一种直接带隙材料，低带隙宽度使得其光谱利用率高达 90%^[1]。在制造工艺上， β -FeSi₂ 薄膜可以在硅表面外延，因而可以集电池和组件于一体。另外，在制造和废弃 β -FeSi₂ 的过程中都不会产生有毒物质，因此， β -FeSi₂ 是一种环境友好材料^[2]。国内外对 β -FeSi₂ 的研究大多集中于制造工艺研究，很少涉及数值模拟，因此 β -FeSi₂/ 本征层 / 衬底 / 背场结构太阳能电池具有较大的研究意义和发展前景。背场材料方面，由于背场需要重掺杂才能提高转化效率，在非晶硅中掺杂高浓度的硼并不容易，而在微晶硅中则可以掺杂更高浓度的硼。因此，本文采用 β -FeSi₂(n)/a-Si(i)/c-Si(p)/ μ c-Si(p⁺) 结构进行模拟与分析^[3]。

1 电池结构及参数

β -FeSi₂(n)/a-Si(i)/c-Si(p)/ μ c-Si(p⁺) 太阳能电池的结构如图 1 所示。太阳光通过 β -FeSi₂(n) 发

射层和非晶硅本征层到达晶体硅基区，然后被吸收，同时产生光生载流子；光生载流子在结区空间电场的作用下向发射层和基区漂移。通过改变发射层和背场的厚度以及掺杂浓度，用 AFORS-HET 模拟计算出太阳能电池的最佳优化参数。模拟光照条件为 AM1.5、100 mW/cm² 无陷光和反射等结构，初始参数见表 1。

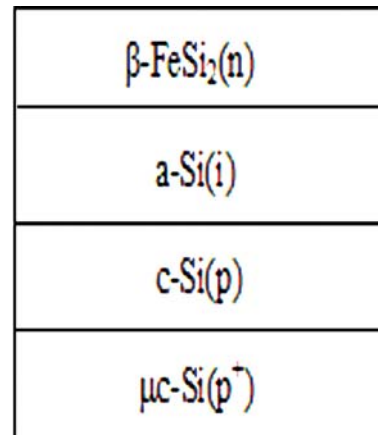


图 1 β -FeSi₂(n)/a-Si(i)/c-Si(p)/ μ c-Si(p⁺) 太阳能电池结构的示意图

表 1 电池模拟的初始参数

结构参数	β -FeSi ₂ (n)	a-Si(i)	c-Si(p)	μ c-Si(p ⁺)
厚度 /nm	可调	可调	3×10^5	可调
介电常数	31	11.9	11.9	11.9
电子亲和势 /eV	4.71	3.9	4.05	可变
带隙 /eV	0.87	1.72	1.12	可调
光学带隙 /eV	1.12	1.72	1.12	1.6
有效导带密度 /cm ⁻³	1.7×10^{18}	1.0×10^{20}	2.86×10^{19}	1.0×10^{19}
有效价带密度 /cm ⁻³	1.7×10^{18}	1.0×10^{20}	1.04×10^{19}	1.0×10^{19}
电子迁移率 /cm ⁻² v ⁻¹ s ⁻¹	206	5	1141	50
空穴迁移率 /cm ⁻² v ⁻¹ s ⁻¹	168	1	420	5
受主掺杂浓度 /cm ⁻³	0	0	1.5×10^{16}	可调
施主掺杂浓度 /cm ⁻³	可调	0	0	0
电子热速度 /cm·s ⁻¹	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7
空穴热速度 /cm·s ⁻¹	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7
层密度 /g·cm ⁻³	2.328	2.238	2.238	2.238
电子俄歇复合系数 cm ⁶ s ⁻¹	0	0	2.2×10^{-31}	0
空穴俄歇复合系数 cm ⁶ s ⁻¹	0	0	9.9×10^{-32}	0
带间复合系数 cm ³ s ⁻¹	0	0	9.5×10^{-15}	0

2 模拟结果分析与电池性能参数优化

2.1 N 区少数载流子浓度变化分析

当光照射 PN 结时, PN 结的 P 区、N 区和结区都会产生光生少子。P 区的光生空穴和 N 区的光生电子属于多子, 不能通过势垒。而 P 区的光生电子、N 区的光生空穴和结区光生电子-空穴对能在内建电场的作用下漂移, 并在结区两端积累, 形成光生电场^[4]。因此, 光生少子的浓度越高, 通过内建电场漂移在结区两端积累的光生少子就越多, 电池性能也就越好。本文分别对 $\beta\text{-FeSi}_2(\text{n})/\text{c-Si}(\text{p})$ 异质结太阳能电池的加本征层、背场前后和 N 区少数载流子(光生空穴)的浓度变化进行比较, 并通过分析 N 区少数载流子的浓度变化来说明本征层和背场对 $\beta\text{-FeSi}_2(\text{n})/\text{c-Si}(\text{p})$ 异质结太阳能电池性能的影响。用 AFORS-HET 软件模拟 N 区少数载流子的浓度变化时, 为了避免本征层和背场以外的因素对电池性能的影响, 除加本征层和背场以外, 保持 $\beta\text{-FeSi}_2(\text{n})/\text{c-Si}(\text{p})$ 异质结太阳能电池发射层和衬底的参数不变^[5]。

从图 2 中可以看出, 在 PN 结之间加入本征层, N 区的少数载流子浓度有显著增加。这是因为当 PN 结两端轻掺杂时, 两端的费米能级移动较小, 电池开路电压受到的影响不大。当 PN 结两端的掺杂浓度增加时, 材料的缺陷态密度会增加, 少子被复合的速率增大, 少子寿命降低, 因而电池性能下降。加入本征层可以有效地解决 $\beta\text{-FeSi}_2(\text{n})/\text{c-Si}(\text{p})$ 的结构问题。太阳光通过发射层照到未经掺杂的非晶硅时会产生更多自由光生电子和空穴, N 区被重掺杂缺陷复合的少数载流子就会相对减少; 随着光生少子复合速度的降低, N 区的少数载流子增加, 通过内建电场漂移的少子数目增加, 结区两端积累的少数载流子也会变多^[6]。因此在 $\beta\text{-FeSi}_2(\text{n})/\text{c-Si}(\text{p})$ 之间加一层本征层, 可以有效地降低少子的复合速度, 从而优化异质结电池的性能。

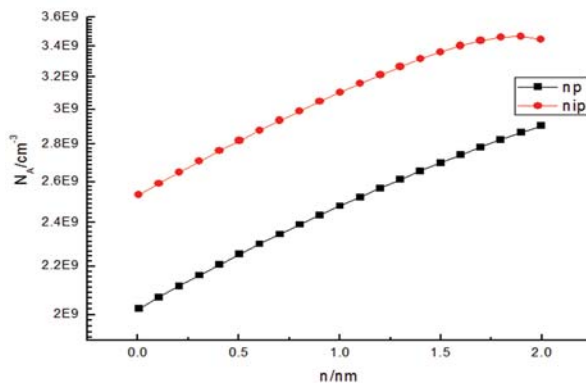


图 2 加本征层前后 N 区少子浓度的变化

从图 3 中可以看出, 给 $\beta\text{-FeSi}_2(\text{n})/\text{c-Si}(\text{p})$ 加背场后, N 区的少数载流子浓度增加。这是因为衬底与背场间存在能带失配, 能带失配中的导带失配可以对少子形成背场; 背场可对光生少子产生势垒作用, 从而减少光生少子在背表面的复合; 而基区的光生少子数目和发射区的少子数目基本一致, 因此 N 区少子浓度随之增加^[7]。

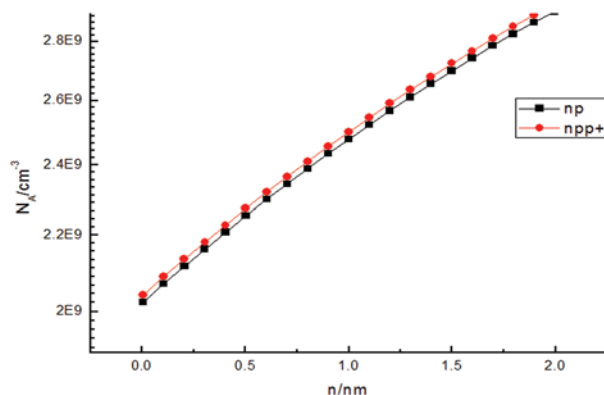


图 3 加背场前后 N 区少子浓度的变化

从图 4 中可以看出, 在 $\beta\text{-FeSi}_2(\text{n})/\text{c-Si}(\text{p})$ 上同时增加本征层和背场时, N 区少数载流子的浓度有了明显提高。这是因为在本征层和背场的共同作用下, 少数载流子的复合速率明显降低。随着少子寿命和浓度的明显增加, 可用于内建电场漂移的少数载流子数目随之增加, 电池性能也随之提高。通过分析 N 区少数载流子的浓度变化可知, $\beta\text{-FeSi}_2(\text{n})/\text{a-Si}(\text{i})/\text{c-Si}(\text{p})/\mu\text{c-Si}(\text{p}^+)$ 结构可以提高太阳能电池的性能。

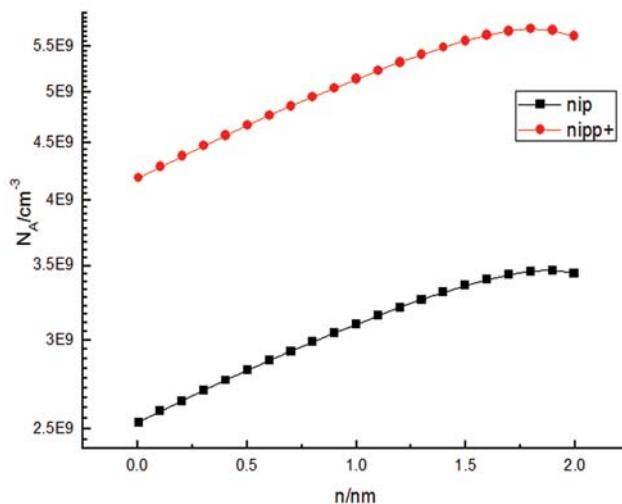


图 4 同时增加本征层、背场时 N 区少数浓度的变化

2.2 发射层性能参数优化

发射层 β -FeSi₂ 是太阳能电池的重要组成部分。发射层与基区形成内建电场, 光照产生的光生载流子在内建电场作用下漂移。光生电子被拉向 P 区, 光生空穴被拉向 N 区, 在结区两端积累光生少数, 从而形成光生电场。发射层设计时主要需考虑光生少子的复合, 影响表面复合的主要因素是发射层的厚度和掺杂浓度 [8]。

从图 5 可以看出, 随着发射层厚度的增加, 电池的开路电压保持不变, 短路电流、填充因子和转化效率都在下降。由于太阳光照射到发射层时产生的光生载流子必须要扩散到空间电荷区才能被分离, 而且光生载流子在发射层时本身复合率就很高, 随着厚度的增加, 发射层光生载流子扩散到空间电荷区的长度增加, 因此过厚的发射层会加大光生少数在发射区被复合中心复合的概率, 减少到达结区边缘的光生载流子的数目, 从而降低了短路电流。同时, 随着发射层厚度的增加, 电池串联电阻也随之增大, 太阳能电池的填充因子和转化效率也会降低 [9]。结合制造工艺和电池性能, 发射层的厚度应该为 2 nm。

从图 6 可以看出, 随着发射层掺杂浓度的增加, 开路电压和转化效率先增加后保持不变, 短路电流和填充因子基本保持不变。当发射层

的掺杂浓度很小时, 适当地增加掺杂浓度可以提高内建电压; 在内建电场作用下通过结区的少数载流子数目随之增加, 结区两端积累的少数载流子也随之增加, 从而能提高电池性能。但掺杂浓度过高会引起发射区禁带宽度收缩, 同时重掺杂会增加发射区杂质缺陷的浓度, 缺陷形成的复合中心会俘获光生少数, 从而降低少数寿命。结合内建电压和缺陷复合两个因素, 适当的发射层掺杂浓度应该为 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 。

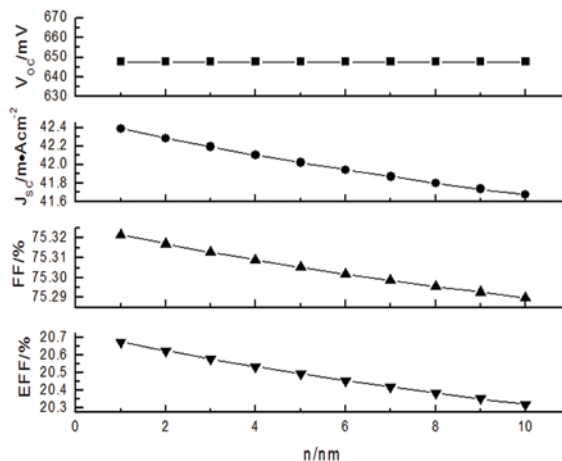


图 5 电池参数随发射层厚度的变化

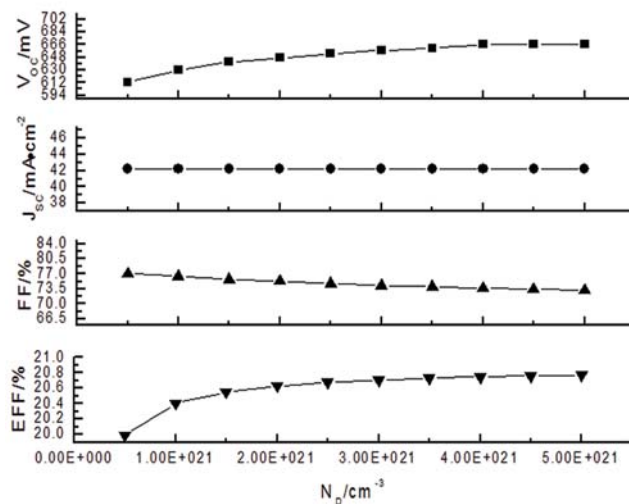


图 6 电池参数随发射层浓度的变化

2.3 本征层性能参数的优化

入射光在本征层被吸收, 产生光生载流子, 然后在内建电场作用下分离, 形成光电流。因为空间电荷区的压降几乎都落在本征层上, 因此需

要选择合适的本征层厚度,使其既能吸收更多的入射光,又能保证空间电荷区覆盖整个本征层,同时还能保持较小的串联电阻^[10]。

从图 7 可以看出,随着本征层厚度的增加,开路电压略微上升,短路电流、填充因子和转化效率都在下降。这是因为过厚的本征层超出了空间电荷区的覆盖范围,没有被覆盖的区域不能有效地分离光生载流子,成为“死层”,从而降低了太阳能电池的转化效率^[11]。另外,本征层过厚还会增加电池的串联电阻。结合光吸收和光生载流子分离的因素,本征层的厚度应该为 2 nm。

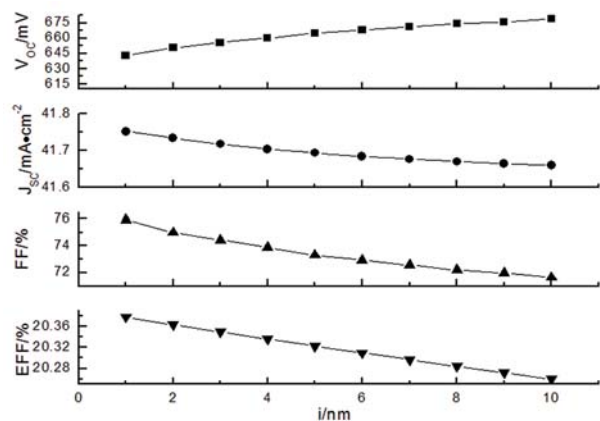


图 7 电池参数随本征层厚度的变化

2.4 背场性能参数的优化

背场一般用于基区。在衬底上加一层重掺杂 P^+ 层,使基区和背场间形成一个 P^+P 结,并产生一个势垒,可以有效地减少电子和空穴在电池背部的表面复合速率。

从图 8 可以看出,随着背场厚度的增加,开路电压、短路电流和填充因子基本保持不变,转化效率略微下降。这是因为随着微晶硅厚度的增加,微晶硅材料的无序度和缺陷不断增加,导致少数载流子的复合速率增加。另外,随着背场厚度的增加,电池的串联电阻和载流子的输运途径增大,从而影响电池性能。结合转化效率和制造工艺,背场的厚度应该在 5~10 nm。

从图 9 可以看出,电池性能先上升,在浓度达到 $3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 时保持不变。当掺杂浓度低时, P^+P 结两端浓度差较小,势垒的背反作用不明显。随着浓度的增加,浓度差增大,背反效

果明显增加。过高的掺杂浓度会抑制微晶硅的晶化率,从而影响背场的电学特性,使电池性能不再增加。因此,背场的掺杂浓度应该为 $3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 。

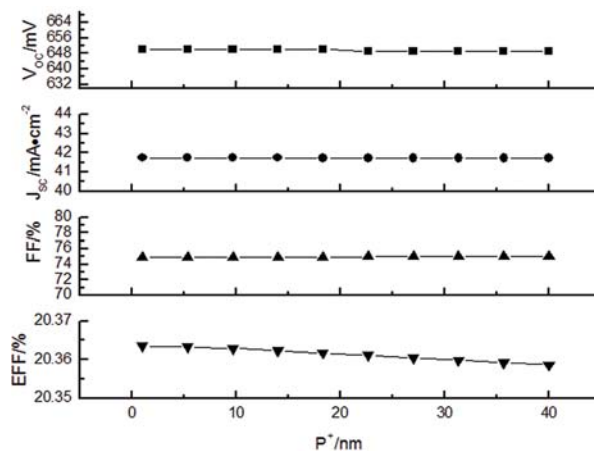


图 8 电池参数随背场厚度的变化

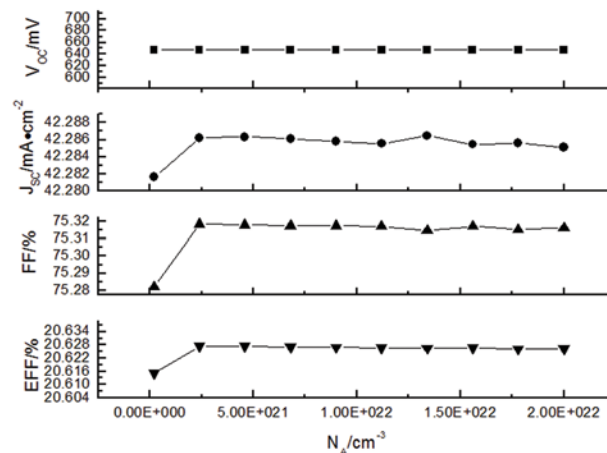


图 9 电池参数随背场浓度的变化

3 结论

运用 AFORS-HET 软件在 $\beta\text{-FeSi}_2(\text{n})/\text{c-Si}(\text{p})$ 结构上增加了本征层和背场。通过分析增加本征层和背场前后发射区少数载流子浓度的变化可知,在 PN 结上增加本征层和背场能降低少数载流子的复合速率,使结区两端积累的少数载流子数目增多,从而使太阳能电池的性能得到提高。通过分析发射层的厚度和掺杂浓度、本征层的厚度、背场的厚度和掺杂浓度对电池性能的影响,对电池性能进行了优化(加缺陷)。

(下转第 48 页)