

# 非晶硅薄膜光伏电池结构参数分析

吴定允<sup>1,2</sup> 彭玉峰<sup>1\*</sup> 赵纪昌<sup>1</sup> 毕小群<sup>1</sup> 张毅<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>河南省光伏材料重点实验室(河南师范大学), 河南 新乡 453007; <sup>2</sup>周口师范学院物理与电子工程系, 河南 周口 466000)

**摘要** 考虑到 nip 型[ITO/a-Si(n)/a-Si(i)/a-Si(p)/Al]非晶硅光伏电池的各膜层厚度、掺杂浓度等因素,对非晶硅光伏电池的转换效率、填充因子、开路电压等性能参数进行了数值分析与讨论。结果表明,随 p 型层厚度的增加,光伏电池的短路电流密度、转换效率、开路电压值都有所增加。当本征层的厚度增加时,短波段内的光谱响应变差、内量子效率下降。当 n 型层厚度为 5 nm,本征层厚度为 5 nm,p 型层厚度为 10  $\mu\text{m}$ ,受主掺杂浓度为  $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,施主掺杂浓度为  $1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时,转换效率可达 9.728%。

**关键词** 光电子学;光伏电池;非晶硅;纳米薄膜;nip 型;转换效率

**中图分类号** TK511.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.093102

## Analyses of Structure Parameters of Amorphous Silicon Film Photovoltaic Cells

Wu Dingyun<sup>1,2</sup> Peng Yufeng<sup>1</sup> Zhao Jichang<sup>1</sup> Bi Xiaoqun<sup>1</sup> Zhang Yi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Henan Key Laboratory of Photovoltaic Materials (Henan Normal University), Xinxiang, Henan 453007, China)  
(<sup>2</sup>Department of Physics and Electronic Engineering, Zhoukou Normal College, Zhoukou, Henan 466000, China)

**Abstract** Taking into account the film layer thickness and silicon impurities of amorphous silicon solar cells with the nip-type[ITO/a-Si (n)/a-Si (i)/ a-Si (p)/Al] structure, the conversion efficiency, fill factor, and open circuit voltage of the nip-type amorphous silicon solar cell are numerically analyzed and discussed. The results show that the short circuit voltage, conversion efficiency, and open circuit voltage increase as the thickness of p-type layer increases. With the increase in the thickness of intrinsic layer, the spectrum characteristics for the short wavelength range becomes worse and the quantum efficiency degrades. When the thickness of n-type, intrinsic, and p-type layers are 5 nm, 5 nm, 10  $\mu\text{m}$ , respectively, the conversion efficiency gets to 9.728% for the donor impurity concentration of  $1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and the acceptor impurities of  $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

**Key words** optoelectronics; photovoltaic cell; amorphous silicon; nano-thin film; nip-type; conversion efficiency

**OCIS codes** 310.6870; 250.0250; 230.0230

## 1 引言

非晶硅薄膜光伏电池由于生产成本较低、工艺简单、用料省、便于大面积沉积等优点,在太阳能光伏发电领域具有很大的优势,引起国内外学者的高度关注<sup>[1~5]</sup>。20 世纪 80 年代早期,Tawada 等<sup>[6]</sup>成功制备了基于 a-SiC:H 薄膜的 pin 型非晶硅光伏电池,使光伏电池的开路电压从 0.8 V 提高到 0.9 V。1985 年,Hack 等<sup>[7]</sup>考虑到自由载流子、空间电荷、复合速率以及电场分布等因素,理论分析了非晶硅 pin 光伏电池的物理机制,讨论了非晶硅材质和厚度对光伏特性的影响。2003 年,Dhariwal 等<sup>[8]</sup>通过对非晶硅的复合电离动力学、空间电荷密度分布等的理论研究,详细分析了非晶硅 pin 光伏电池的光电转换特性。2008 年,Klaver 等<sup>[9]</sup>研究了 nip 非晶硅光伏电池中 p 型层的物性(纳晶、多晶/非晶、微晶)对开路电压的影响,结果显示,非晶硅光伏电池的开路电压不仅取决于本征层带尾能态的复合率,而且与 p 型层及其界面的特性有关。p 型层的纳晶结构(nc-Si)比其他结构具有更高的开路电压(1.022~1.042 V),光电转换效率可达 6.22%~8.87%;而微晶硅

收稿日期: 2011-02-28; 收到修改稿日期: 2011-04-22; 网络出版日期: 2011-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(61077037)和河南省基础与前沿技术研究计划(102300413214)资助课题。

作者简介: 吴定允(1959—),男,硕士,副教授,主要从事信号处理与检测等方面的研究。E-mail: wudingyun@zknu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: yufengp@sina.com

( $\mu\text{c-Si}$ )<sub>p</sub> 型层的 nip 光伏电池转换效率为 2.94%~5.98%。

与传统太阳能电池不同的是,纳米薄膜太阳能电池的吸收层为纳米结构,可以有效地解决光子吸收效率和电荷传导效率之间的矛盾。虽然目前纳米薄膜太阳能电池转换效率还无法与传统固态结太阳能电池相比,但由于其制造成本低廉、工艺简单、光子吸收效率高潜在优势,因而极具潜在应用前景。nip 型非晶硅光伏电池的性能参数除了跟膜层晶态与非晶态的特性有关,还与光伏电池的膜层几何结构以及掺杂浓度密切相关。本文基于 AFORS-HET 仿真软件<sup>[10]</sup>分析了 nip 非晶硅薄膜光伏电池膜层厚度、掺杂浓度等对电池转换效率、填充因子、开路电压、短路电流密度等参数的影响,并与实验测量的非晶硅光伏电池光谱响应特性进行比较。

## 2 理论基础

nip 非晶硅薄膜光伏电池几何结构如图 1 所示。假定光照条件为 AM1.5,即  $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ,有效波段为  $300 \sim 1000 \text{ nm}$ <sup>[11,12]</sup>。光伏电池无陷光结构和背场效应,正背面电池接触为欧姆接触。根据半导体稳态方程和相应的边界条件可得非晶硅薄膜电池的光伏特性<sup>[13]</sup>:

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial x} = +q(p - n + \rho + N_D - N_A), \quad (1)$$

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} = -q(G - R_n), \quad (2)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} = +q(G - R_p), \quad (3)$$

式中  $\mathbf{D}$  为电位移矢量, $q$  为单位电荷, $p$  和  $n$  分别表示空穴和电子密度, $\rho$  为带间净陷阱电荷, $N_D$  和  $N_A$  分别为施主和受主浓度, $G$  为光生载流子产生速率, $R_n$  和  $R_p$  分别表示电子和空穴的复合速率。

填充因子是评估光伏电池负载能力的重要因素,其表达式为

$$F_f = I_m V_m / (I_{sc} V_{oc}), \quad (4)$$

式中  $I_{sc}$  为短路电流, $V_{oc}$  为开路电压, $I_m$  为最佳工作电流, $V_m$  为最佳工作电压。

光电转换效率是指在光伏能光伏系统中光伏能电池板把光伏能转换为电能的效率,即在标准测试条件下(AM1.5)光伏电池外部回路上连接最佳负载时的最大能量转换效率,可表示为

$$\eta = P_m / P_{in} = V_m I_m / P_{in} = F_f V_{oc} I_{sc} / P_{in}, \quad (5)$$

式中  $P_m$  表示最大功率(峰值功率), $P_{in}$  是光伏入射功率。

量子效率是衡量光伏电池光谱响应特性的物理参数,又分为内量子效率(IQE)和外量子效率(EQE)。

## 3 结果与分析

### 3.1 p 型层参数对电池性能的影响

#### 3.1.1 p 型层厚度

n 型层厚度为  $5 \text{ nm}$ ,掺杂浓度为  $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,电子亲和势为  $3.9 \text{ eV}$ ;本征层厚度为  $5 \text{ nm}$ ;本征层和掺杂层的缺陷态密度数值采用文献<sup>[14]</sup>的实验数据,其他参数如表 1 所示。利用德国 AFORS-HET 专业软件计算得到了 p 型层的厚度为  $10 \sim 10^4 \text{ nm}$  时电池的光伏性能,如图 2 所示。由图可以看出,随着 p 型层厚度的增加,光伏能电池的短路电流密度  $J_{sc}$ 、转换效率  $\eta$ 、开路电压  $V_{oc}$  都会有所增加;当其厚度到  $10 \mu\text{m}$  时,光电转换效率可达 9.728%。

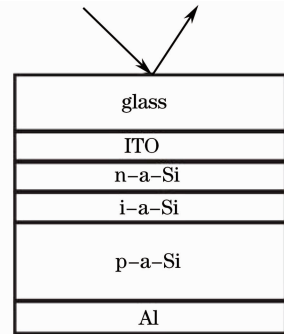


图 1 非晶硅光伏电池的结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of a-Si solar cell

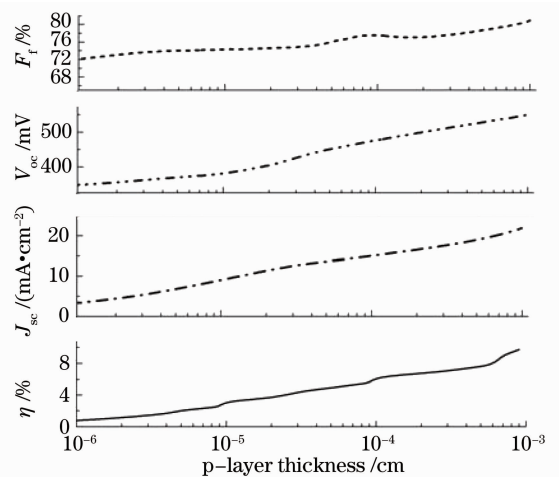


图 2 p 型层厚度对电池性能的影响

Fig. 2 Effect of the p-layer thickness on the performance of the solar cell

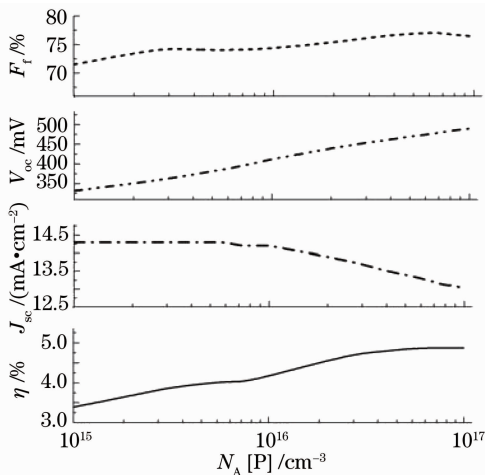
表 1 非晶硅光伏能电池各层的有关参数

Table 1 Parameters of different layers for the amorphous silicon solar cell

Parameter	n-a-Si	i-a-Si	p-a-Si
Layer thickness /nm	1	1	300
Dielectric constant	11.9	11.9	11.9
Electron affinity /eV	3.9	3.9	4.05
Band gap /eV	1.72	1.72	1.72
Optical band gap /eV	1.72	1.72	1.72
Effective conduction band density /( $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ )	1	1	0.28
Effective valence band density /( $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ )	1	1	0.104
Electron mobility /( $\text{cm} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	5	5	1041
Hole mobility /( $\text{cm} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1	1	412
Donator concentration / $\text{cm}^{-3}$	0	0	$1.5 \times 10^{16}$
Acceptor concentration / $\text{cm}^{-3}$	$2.5 \times 10^{19}$	1	0
Thermal velocity of electron /( $10^7 \text{ cm/s}$ )	1	1	1
Thermal velocity of hole /( $10^7 \text{ cm/s}$ )	1	1	1
Layer density /( $\text{g/cm}$ )	2.238	2.238	2.238
Recombination for electron /( $\text{cm}^6/\text{s}$ )	0	0	$2.2 \times 10^{-31}$
Recombination for hole /( $\text{cm}^6/\text{s}$ )	0	0	$9.92 \times 10^{-32}$
Band to band recombination /( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	0	0	0

### 3.1.2 p 型层掺杂浓度

选定本征层厚度为 1 nm, n 型 Si 层厚度为 1 nm, p 型层厚度为 300 nm. p 型层受主杂质的掺杂浓度  $N_A[\text{p}]$  与光伏电池开路电压  $V_{oc}$ 、短路电流密度  $J_{sc}$ 、填充因子  $F_f$  及转换效率  $\eta$  之间的关系如图 3 所示. 由图可以看出, 电池的转换效率  $\eta$  和开路电压  $V_{oc}$  均随着  $N_A[\text{p}]$  的增加而增加. 当掺杂浓度为  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时, 转换效率  $\eta = 4.8\%$ , 填充因子  $F_f = 0.77$ , 开路电压  $V_{oc} = 0.47 \text{ V}$ , 短路电流密度  $J_{sc} = 13.4 \text{ mA/cm}^2$ .

图 3 p 型层掺杂浓度  $N_A[\text{p}]$  与电池性能的关系Fig. 3 Effect of the acceptor impurity  $N_A[\text{p}]$  of p-layer on the performance of the solar cell

### 3.2 本征层对电池性能的影响

选定 n 型层厚度为 1 nm, p 型层厚度为 300 nm, 本征层厚度为 0~30 nm, 其他参数如表 1 所示<sup>[15,16]</sup>, 可以得到本征层厚度与光伏电池转换效率  $\eta$ 、填充因子  $F_f$ 、开路电压  $V_{oc}$  等的关系, 如图 4 所示. 图 5 给出了不同本征层厚度下内量子效率和光谱响应特性的变化情况.

由图 5 可以看出, 当本征层的厚度增加时, 光谱在短波部分的光谱响应变差, 短波段内量子效率下降, 从

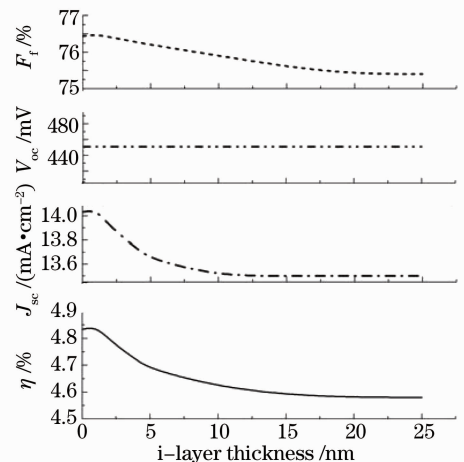


图 4 本征层厚度对电池性能的影响

Fig. 4 Effect of the intrinsic layer thickness on the performance of the solar cell

而引起光电转换效率、短路电流和填充因子的降低。

## 4 结 论

由于纳米晶粒中光吸收截面的增大以及载流子电导率的提高,纳米硅薄膜与晶体硅相比具有更强的光吸收和更大的光电流。分析了纳米硅薄膜太阳能电池的结构参数影响因素。结果显示,nip 非晶硅光伏电池的性能参数除了跟膜层晶态与非晶态的特性有关,还与光伏电池的膜层几何结构以及掺杂浓度密切相关。随着 p 型层厚度的增加,光伏电池的短路电流密度、转换效率、开路电压值都会有所增加。当本征层的厚度增加时,短波部分的光谱响应变差,短波段内量子效率下降。

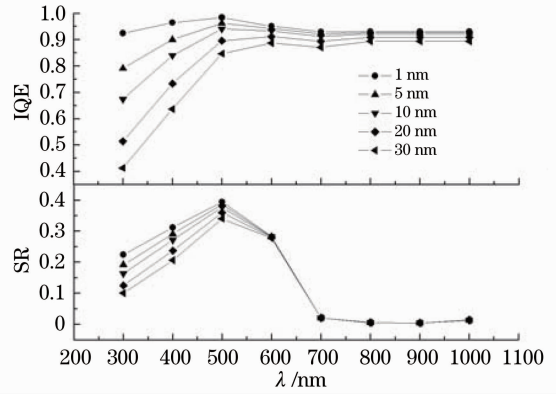


图5 内量子效率 IQE、光谱响应 SR 与本征层厚度的关系  
Fig. 5 Changes of internal quantum efficiency (IQE) and spectral response (SR) with different i-layer thicknesses

## 参 考 文 献

- 1 S. Guha, J. Yang. Progress in amorphous and nanocrystalline silicon solar cells[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, **352**(9-20): 1917~1921
- 2 Hou Guofu. Research progress of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin films as novel photovoltaic materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(8): 61~66
- 侯国付. 新型薄膜窄带隙光伏材料  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(8): 61~66
- 3 Yu Rongjin. Optics and solar energy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1751~1755
- 于荣金. 光学与太阳能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1751~1755
- 4 Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Lin Zi *et al.*. Design and optimization of heliostat field layout for solar tower power plant[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2652~2656
- 魏秀东, 卢振武, 林梓等. 塔式太阳能热发电站镜场的优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2652~2656
- 5 Xiang Ming, Li Ming, Wan Liuling *et al.*. Investigation of performance on trough concentrating solar photovoltaic/thermal system based on super cells[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 482~489
- 项明, 李明, 王六玲等. 空间太阳能电池槽式聚光热电联供系统特性分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 482~489
- 6 Y. Tawada, K. Tsuge, M. Kondo *et al.*. Properties and structure of a-SiC:H for high efficiency a-Si solar cell[J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**(7): 5273~5281
- 7 M. Hack, M. Shur. Physics of amorphous silicon alloy p-i-n solar cells[J]. *J. Appl. Phys.*, 1985, **58**(2): 997~1020
- 8 S. R. Dhariwal, S. Rajvanshi. Theory of amorphous silicon solar cell (a): numerical analysis[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2003, **79**(2): 199~213
- 9 A. Klaver, R. Swaaij. Modeling of light-induced degradation of amorphous silicon solar cells[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2008, **92**(1): 50~60
- 10 X. B. Liao, W. H. Du, X. S. Yang *et al.*. Nanostructure in the p-layer and its impacts on amorphous silicon solar cells [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, **352**(9-20): 1841~1846
- 11 A. Froitzheim, R. Stangl, L. Elstne *et al.*. AFORS-HET; a computer-program for the simulation of heterojunction solar cells to be distributed for public use[EB/OL]. <http://www.macs.hw.ac.uk/~michael/papers/hmi/aforshet.pdf>
- 12 S. A. Filonovich, P. Alpuim, L. Rebouta *et al.*. Hydrogenated amorphous and nanocrystalline silicon solar cells deposited by HWCVD and RF-PECVD on plastic substrates at 150 °C[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2008, **354**(19-25): 2376~2380
- 13 M. Tucci, Cesare G. De. 17% efficiency heterostructure solar cell based on p-type crystalline silicon[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2004, **338-340**: 663~667
- 14 Ren Bingyan, Wang Minhua, Liu Xiaoping *et al.*. Simulation of heterojunction solar cell with AFORS-HET[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2008, **29**(2): 125~129
- 任丙彦, 王敏花, 刘晓平等. AFORS-HET 软件模拟 N 型非晶硅/P 型晶体硅异质结光伏电池[J]. *太阳能学报*, 2008, **29**(2): 125~129
- 15 M. Schmidt, A. Schoepke, L. Korte *et al.*. Density distribution of gap states in extremely thin a-Si:H layers on crystalline silicon wafers[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2004, **338-340**: 211~214
- 16 Zhao Lei, Li Hailing, Zhou Chunlan *et al.*. Optimized resistivity of p-type Si substrate for HIT solar cell with Al back surface field by computer simulation[J]. *Solar Energy*, 2009, **83**(6): 812~816