

# Si 衬底掺杂浓度对 InGaN/Si 异质单结太阳能电池性能的影响\*

## Effects of Si Substrate Doping on the Performances of InGaN/Si Heterojunction Solar Cells

唐子媚, 鲁 姣, 刘宇伦, 翁 瑶, 陆珊珊, 莫祖康, 谢武林, 何 欢, 符跃春, 沈晓明\*\*

TANG Zimei, LU Jiao, LIU Yulun, WENG Yao, LU Shanshan, MO Zukang, XIE Wulin, HE Huan, FU Yuechun, SHEN Xiaoming

(广西大学资源环境与材料学院, 广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 广西南宁 530004)  
(Guangxi Key Laboratory for Non-ferrous Metal and Featured Materials, School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

**摘要:**【目的】研究 p-Si 衬底掺杂浓度对 InGaN/Si 异质单结太阳能电池性能的影响, 为制备高效太阳能电池提供理论基础。【方法】将器件的 n-InGaN 掺杂浓度固定为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 在改变 p-Si 衬底掺杂浓度  $N_A$  的情况下, 采用一维光电子和微电子器件结构分析模拟软件 (AMPS-1D) 对 InGaN/Si 异质单结太阳能电池器件的各项性能参数进行模拟。【结果】随着掺杂浓度  $N_A$  的升高, 电池的电流密度  $J_{sc}$  和填充因子 FF 随之升高, 当到达一定高的掺杂浓度范围时 ( $N_A > 5.00 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ),  $J_{sc}$  基本保持不变, 约为  $28.12 \text{ mA/cm}^2$ , FF 保持在 0.85 左右且变化不大。开路电压  $V_{oc}$  和光电转换效率  $E_{ff}$  与掺杂浓度的大小呈正相关关系, 随着  $N_A$  的增大,  $V_{oc}$ 、 $E_{ff}$  缓慢增大。【结论】高掺杂浓度下的太阳能电池具有较好的光电转换效率。低掺杂浓度的太阳能电池光电转换效率较低, 这是因为其对应的尖峰势垒高度和宽度均较大, 影响了光生载流子的输运。

**关键词:** 异质结 InGaN 薄膜 太阳能电池 AMPS-1D

**中图分类号:** TM914.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2017)06-0561-07

**Abstract:**【Objective】In order to provide a theoretical basis for the preparation of high efficiency solar cells, the effects of doping concentration of p-type Si on the performances of InGaN/Si heterojunction solar cells was studied.【Methods】In this paper, the n-type InGaN doping concentration was fixed at  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  when the doping concentration  $N_A$  of p-type Si substrate varied, then the results of the current density  $J_{sc}$ , the open circuit voltage  $V_{oc}$ , the filling factor

FF, and the photoelectric conversion efficiency  $E_{ff}$  of the InGaN/Si heterojunction solar cell device could be obtained by using a one-dimensional device simulation program for the Analysis of Microelectronic and Photonic Structures (AMPS-1D).【Results】With the increase of the doping concentration  $N_A$ , the current density  $J_{sc}$  and the filling factor FF increased. When the doping concentration reached a certain range ( $N_A > 5.00 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ),  $J_{sc}$  basically unchanged, about  $28.12 \text{ mA/cm}^2$ , FF remained around 0.85 and did not change much. The open circuit volt-

收稿日期: 2017-07-19

作者简介: 唐子媚(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事 GaN 基光电材料与器件的研究。

\* 国家自然科学基金项目(61474030), 广西自然科学基金项目(2015GXNSFAA139265), 中国科学院重点实验室开放基金项目(15ZS06), 广西科学研究与技术开发科技攻关计划项目(1598008-15)和南宁市科学研究与技术开发科技攻关计划项目(20151268)资助。

\*\* 通信作者: 沈晓明(1965—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事半导体光电薄膜材料与器件的研究, E-mail: docsjh@gxu.edu.cn.

age  $V_{OC}$  and the photoelectric conversion efficiency  $E_{ff}$  both had a positive correlation with the doping concentration  $N_A$ . As the  $N_A$  increased, the  $V_{OC}$  and  $E_{ff}$  increased slowly. **【Conclusion】** The solar cells with higher doping concentration of Si substrate had better photoelectric conversion efficiency. Those with lower doping concentration had lower efficiency, because their corresponding peak height and width of potential barrier were large, affecting the transport of photo-generated carriers.

**Key words:** heterojunction, InGaN films, solar cells, AMPS-1D

## 0 引言

**【研究意义】**研发使用高效率太阳电池是解决能源危机和环境污染的一个有效方式,现成为当今国际研究的热点之一<sup>[1-2]</sup>。目前用于制作太阳电池的 Si、Ge、GaAs 等常规材料都不能完全覆盖太阳光谱,从而制约了太阳电池的发展。第三代半导体 GaN 及其系列材料(包括 InN、GaN、AlN 及其合金)的出现,使太阳电池效率的进一步提高成为可能<sup>[3]</sup>。尤其是直接带隙半导体材料 InGaN,可以通过改变 In 组分,实现带隙宽度从 0.7 eV (InN)到 3.4 eV (GaN)连续可调<sup>[4-5]</sup>,所对应的吸收光谱的波长大约为 365 ~ 1 770 nm,从紫外波段一直延伸到红外波段,几乎覆盖整个太阳光谱,因此它能够很好地吸收在太阳光谱范围内的各个频率的光子,从而转化为电能,为高效的光电转换提供了材料基础。另外,InGaN 的吸收系数较高(约  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ )<sup>[6]</sup>,几百纳米的 InGaN 层即可吸收绝大部分入射光,相比之下,硅却至少需要几百个微米厚,侧面表明 InGaN 是一种节约资源的材料;而且,InGaN 还具有电子和空穴的有效质量低、电子迁移率高、饱和速度快<sup>[7]</sup>等一系列优点,是制备多结电池等复杂器件所需的重要性质;除此之外,InGaN 材料的化学稳定性、机械强度、耐高温、耐腐蚀性能都十分优越,还具有抗辐射性能,可以在恶劣环境甚至在太空中工作,潜力巨大,可制备成空间太阳电池<sup>[8]</sup>。因此,InGaN 材料在制备高效低成本太阳电池方面具有诸多潜力,从而成为人们研究的热点课题之一。**【前人研究进展】**很多研究小组在过去几年里制备或模拟了多种结构的太阳电池器件<sup>[9]</sup>,但是实际转换效率并不理想,普遍在 1% ~ 3%<sup>[10-13]</sup>。Yang 等<sup>[14]</sup>制备并分析了低 In 组分的 InGaN 单结太阳电池,但并没有对全太阳光谱下电池的工作特性进行研究。Zhang 等<sup>[15]</sup>优化了  $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$  单结太阳电池,但对于太阳电池中的杂质和缺陷没有进行详细讨论。周梅等<sup>[16]</sup>模拟并分析了 p-InGaN 层厚度对 p-i-n 结构 InGaN 太阳电池性能的影响和机理,指出选择较薄的 p-InGaN 层有利于提高 p-i-n 结构 InGaN 太阳电池的效率。文博等<sup>[17]</sup>通过计算证明了将 InGaN

材料分别应用于单结、双结和三结太阳电池中,电池的转换效率皆有很大提高,并计算得到了  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  单、双和三结太阳电池的最佳禁带宽度和组分。**【本研究切入点】**由于高 In 组分 InGaN 材料的生长较为困难,故本研究借助计算机软件从理论上对 InGaN 太阳电池进行模拟和计算,研究各个参数对电池性能的影响,为制备高效太阳电池提供理论基础。**【拟解决的关键问题】**本研究采用 AMPS-1D 软件,从理论上根据解连续性方程以及泊松方程模拟计算 InGaN/Si 异质单结太阳电池器件的光电转换性能随 p-Si 衬底掺杂浓度变化的规律,并分析其物理机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 软件介绍

本模拟计算运用了太阳电池模拟软件 AMPS-1D,全称是 Analysis of Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional,即一维光电子和微电子器件结构分析模拟软件<sup>[18]</sup>。AMPS-1D 模拟分析的基本原理方程有 3 个:泊松方程、电子连续性方程和空穴连续性方程<sup>[19]</sup>。泊松方程的计算公式如下:

$$\frac{d}{dx}[\epsilon(x) \frac{d\psi(x)}{dx}] = q[p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x) + p_t(x) - n_t(x)], \quad (1)$$

式中,  $\epsilon$  为介电常数,  $\psi$  为静电势,  $n(x)$ 、 $p(x)$  为电子和空穴浓度,  $n_t(x)$ 、 $p_t(x)$  为复合中心电子和空穴的浓度。

电子连续性方程计算公式如下:

$$\frac{1}{q} \left[ \frac{dJ_n(x)}{dx} \right] = -G_L(x) + R(x). \quad (2)$$

空穴连续性方程计算公式如下:

$$\frac{1}{q} \left[ \frac{dJ_p(x)}{dx} \right] = G_L(x) - R(x). \quad (3)$$

式 2) 和式 3) 中,  $J_n(x) = n\mu_n \frac{dE_f^n(x)}{dx}$ ,  $J_p(x) =$

$p\mu_p \frac{dE_f^p(x)}{dx}$ , 分别对应电子和空穴的电流密度,其中  $\mu$  为各自的迁移率,  $E_f$  为各自的准费米能级,  $G_L(x)$  为各自的光子生成率,  $R(x)$  为由直接复合作用和间接复合作用共同产生的净复合率。从式(1)、(2)和

(3)这3个方程出发,可以得到3个状态变量:电子准费米能级、空穴准费米能级和电势(它们都是位置的函数),而后再由这3个状态变量出发得到太阳电池的一系列特性。

AMPS-1D 输入界面有两个计算模式: DOS model 和 Lifetime model, 为了计算的方便和准确

表 1  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  系列合金的各项参数计算公式

| 项目<br>Items                          | 参数 Parameter                                   |                                 |   |  |
|--------------------------------------|--|---------------------------------|---|--|
|                                      | 禁带宽度<br>Band gap $E_g$ (eV)                    | 介电常数<br>Relative constant       | 导带有效态密度<br>Effective density of states in<br>the conduction band $N_C$<br>( $\times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) | 价带有效态密度<br>Effective density of states in<br>the valence band $N_V$<br>( $\times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ) |
| $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | $E_g(x) = 0.7x + 3.4(1-x) - bx(1-x), b = 1.43$ | $\epsilon_r = 15.3x + 9.5(1-x)$ | $N_c = 0.9x + 2.3(1-x)$   | $N_v = 5.3x + 1.8(1-x)$  |
| InN                                  | 0.7  | 15.3                            | 0.9   | 5.3  |
| GaN                                  | 3.4  | 9.5                             | 2.3   | 1.8  |

对于电子亲和势  $\chi$  (Electron affinity, 单位 eV), 有<sup>[21]</sup>:

$$\chi = \chi(\text{GaN}) + 0.7(E_g(\text{GaN}) - E_g(\text{InGaN})), \quad (4)$$

式中  $\chi(\text{GaN}) = 4.1 \text{ eV}$ 。

对于迁移率(Mobilities), 具有如下形式<sup>[22]</sup>:

$$\mu_i(N) = \mu_{\min,i} + \frac{\mu_{\max,i} - \mu_{\min,i}}{1 + (\frac{N}{N_{g,i}})^{\gamma_i}}, \quad (5)$$

式中  $i$  代表电子或空穴, 表示载流子类型;  $N$  为掺杂浓度;  $\mu_{\max,i}, \mu_{\min,i}, N_{g,i}, \gamma_i$  都是由材料本身决定的参数, 如表 2 所示。

表 2 InGaN 的迁移率公式中的各参数取值<sup>[22]</sup>

Table 1 The value of each parameter in the mobilities formula of InGaN<sup>[22]</sup>

| 载流子类型<br>Type  | $\mu_{\max,i}$<br>( $\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $\mu_{\min,i}$<br>( $\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $N_{g,i}$<br>( $\text{cm}^{-3}$ ) | $\gamma_i$ |
|----------------|---|---|-----------------------------------|------------|
| 电子<br>Electron | 1 000   | 55  | $2 \times 10^{17}$                | 1          |
| 空穴<br>Hole     | 170   | 3   | $3 \times 10^{17}$                | 2          |

## 1.2 参数设置

本计算所模拟的 InGaN/Si 异质单结太阳电池

表 3  $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N/Si}$  异质单结太阳电池的基本参数设置

Table 3 Basic parameter settings of  $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N/Si}$  heterojunction solar cells in AMPS-1D

| 参数<br>Parameter                               | 厚度<br>Thickness (nm) | $E_g$<br>(eV) | 介电常数<br>Relative constant | $\chi$<br>(eV) | $N_C$<br>( $\times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) | $N_V$<br>( $\times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ) | 迁移率 Mobilities<br>( $\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |            |
|---|----------------------|---------------|---------------------------|----------------|--|--|---|------------|
|   |                      |               |                           |                |  |  | 电子<br>Electron  | 空穴<br>Hole |
| p-Si  | 1 300                | 1.12          | 11.90                     | 4.05           | 28   | 1.04   | 1 350   | 350        |
| n- $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ | 800                  | 1.32          | 13.27                     | 5.56           | 1.57   | 3.62   | 450   | 100.2      |

性, 此次模拟采用的是 DOS model<sup>[20]</sup>。计算时, 输入各种光学参数, 即可根据控制变量法, 模拟出不同情况下太阳电池的光电转换率乃至其他的光学参数。  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  系列合金的物理特性和光学特性都与 In 组分大小密切相关, 通过 GaN 和 InN 参数的线性拟合, 可以获得 InGaN 的部分参数(表 1)。

为垂直结构, 由厚度为 1 300 nm 的 p-Si 层和厚度为 800 nm 的 n-InGaN 层构成(图 1)。

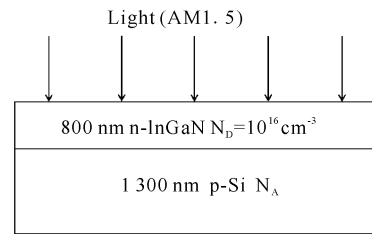


图 1 InGaN/Si 异质单结太阳电池的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of InGaN/Si single-heterojunction solar cells structure

在模拟过程中, 设定 InGaN 中的 In 组分为 65% ( $E_g = 1.32 \text{ eV}$ ), 同时设定 n-InGaN 的掺杂浓度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  且保持不变, 通过改变 p-Si 的掺杂浓度  $N_A$  的值, 得到相应条件下的电流密度  $J_{sc}$ 、光电转换效率  $E_{ff}$ 、填充因子 FF 和开路电压  $V_{oc}$  的数据, 绘制  $J_{sc}$ 、 $E_{ff}$ 、FF 和  $V_{oc}$  与 p-Si 掺杂浓度  $N_A$  之间的变化关系曲线, 分析造成这些变化的原因。设定条件后的  $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N/Si}$  异质单结太阳电池的有关基本参数设置如表 3 所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 $J_{sc}$ 、 $E_{ff}$ 、FF、 $V_{oc}$ 与 p-Si 掺杂浓度 $N_A$ 的变化关系

如图 2 所示,  $In_{0.65}Ga_{0.35}N/Si$  异质单结太阳能电池的电流密度  $J_{sc}$  随着 p-Si 掺杂浓度  $N_A$  的增大而增大,但在掺杂浓度较低时,略微增大掺杂浓度,电流密度便会呈明显升高的趋势;在一定高的掺杂浓度范围内 ( $N_A > 5.00 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时),增大掺杂浓度,电流密度基本保持不变(图 2a)。在低的 p-Si 掺杂浓度下模拟得到的太阳能电池的光电转换效率较低,仅为 16.68%,而当掺杂浓度升高时,光电转换效率得到显著提高(图 2b)。值得一提的是,本实验只模拟到 p-Si 掺杂浓度  $N_A$  为  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,并不意味着越来越高的掺杂浓度就一定有更高的光电转换效率,具体情况还有待进一步探讨。在掺杂浓度较低时填充因子也较低,但随着掺杂浓度的增加,填充因子的值将增大,并且在高浓度的范围内 ( $N_A > 5.00 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时)保持在 0.85 左右且变化不大;开路电压的值也与掺杂浓度的大小呈正相关关系,随着掺杂浓度的增加,开路电压  $V_{oc}$  的值缓慢增大(图 2c~d)。

### 2.2 掺杂浓度对太阳能电池性能的影响

由图 3a 可以看出,在  $N_A = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  的高掺杂浓度下,电池的开路电压约为 1.15 V,电流密度约为  $28 \text{ mA/cm}^2$ ,光电转换效率达到了 27.569%,说明此状态下的电池工作性能良好;对比图 3b 可以看到,在  $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  的低掺杂浓度下,电池的开路电压约为 0.8 V,电流密度约为  $27 \text{ mA/cm}^2$ ,光电转换效率为 16.681%,远低于具有高掺杂浓度的 p-Si 衬底的异质单结太阳能电池。

### 2.3 掺杂浓度对能带和电子分布的影响

由图 4 可知,导带 EC 有一处尖峰势垒,正是这个尖峰势垒影响了电子的正常移动。由于  $InGaIn/Si$  为异质结结构,其交界面能带是不连续的,当电子从 p 区移动到 n 区时会受到尖峰势垒的阻碍,势能差使得电子无法正常移动。当掺杂浓度较高时,对应的窄带材料区域的掺杂浓度就会高,势垒落在另外一个区域,即宽带的空间电荷区,此时的尖峰势垒高度是正值,有利于电子等粒子的通过;相反,相应的低浓度掺杂电池的尖峰势垒高度为负值,电子会在尖峰势垒处聚集,不利于通过,所以在一定程度上低掺杂浓度

的太阳能电池的光电转换效率会比高掺杂浓度的太阳能电池的效率要低。

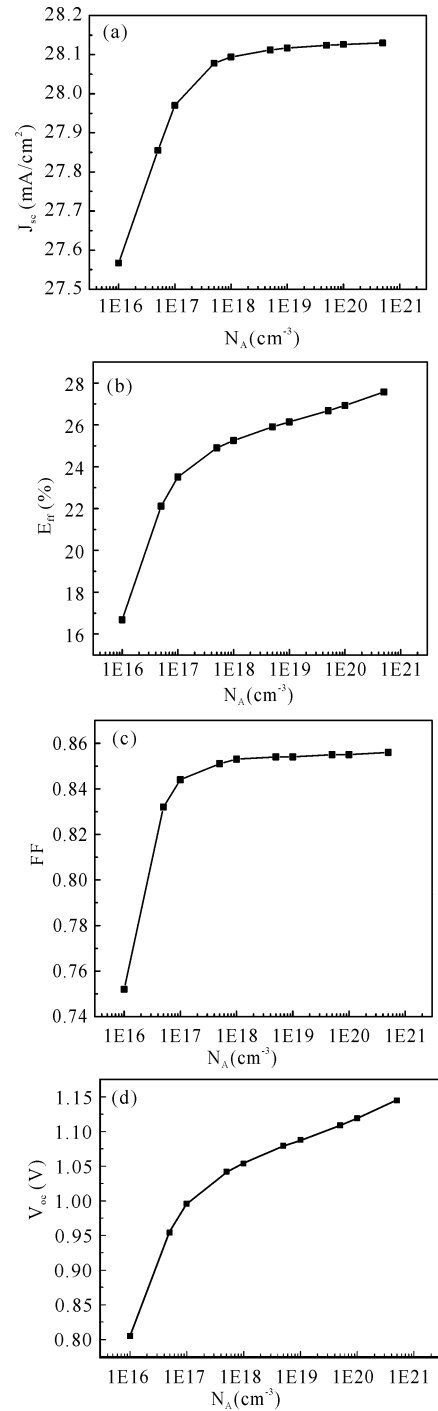
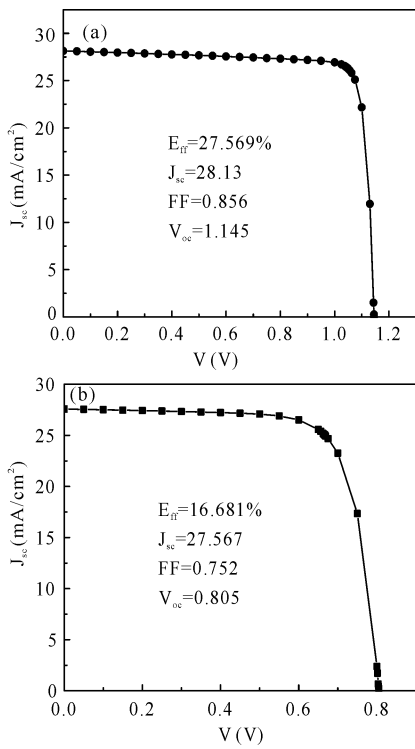
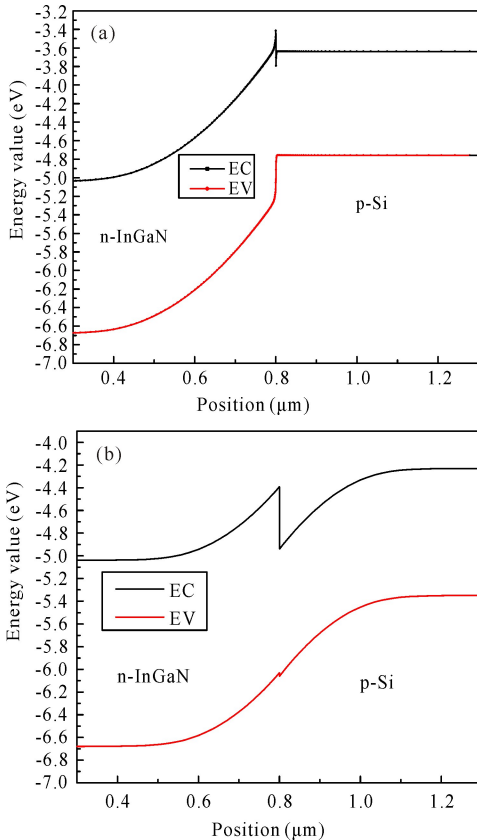


图 2  $J_{sc}$  (a)、 $E_{ff}$  (b)、FF (c) 和  $V_{oc}$  (d) 与掺杂浓度  $N_A$  的变化关系

Fig. 2 Relationship between  $J_{sc}$  (a),  $E_{ff}$  (b), FF (c) and  $V_{oc}$  (d) and doping concentration  $N_A$



(a)  $N_A = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ; (b)  $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$   
 图3 不同 p-Si 衬底掺杂浓度下的太阳电池 J-V 曲线  
 Fig. 3 The J-V curve of solar cells at different doping concentrations of p-type Si substrate



(a)  $N_A = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ; (b)  $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

图4 不同 p-Si 衬底掺杂浓度下的平衡能带图

Fig. 4 Equilibrium band diagram at different doping concentrations of p-type Si substrate

另外,尖峰势垒本身的高度和宽度也会影响载流子的移动。尖峰势垒在量子力学中可以等价为一个三角形势垒,如图5所示。关于高度和宽度的影响关系可以用量子力学的内容去说明。对于三角形势垒的计算有下列情况:

三角形势垒计算公式为

$$a = \frac{U_0}{qF_x}, \quad (6)$$

其中  $U_0$  为势垒的高度,  $a$  为势垒的宽度,  $F_x$  为电场。

而三角形势垒的隧穿效率计算公式为

$$D(E_x) = \exp \left[ -\frac{4\sqrt{2m_2^*}}{3q\hbar F_x} (U_0 - E_x)^{\frac{3}{2}} \right], \quad (7)$$

其中  $2m_2^*$  为有效的粒子质量,  $\hbar$  为普朗克常量,为了方便计算,取  $E_x = 0$ ,此时公式变为

$$D(E_x) = \exp \left[ -\frac{4\sqrt{2m_2^*}}{3q\hbar F_x} U_0^{\frac{3}{2}} \right], \quad (8)$$

联立式(5)和式(7)两个公式可以推出:

$$D(E_x) = \exp \left[ -\frac{4a\sqrt{2m_2^*}}{3\hbar} U_0^{\frac{3}{2}} \right]. \quad (9)$$

由公式(9)可以清楚地看到,当增大势垒高度  $U_0$  和宽度  $a$  时,隧穿效率  $D(E_x)$  将减小,清楚地解释了在较低的掺杂浓度 ( $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) 下,尖峰势垒的高度和宽度都比高掺杂浓度 ( $N_A = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) 时大得多,所以异质结的隧穿效率很低,因而电池的光电转换效率也很低。

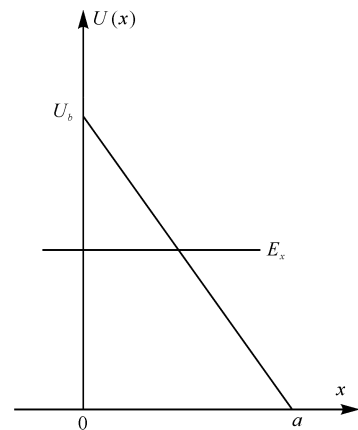
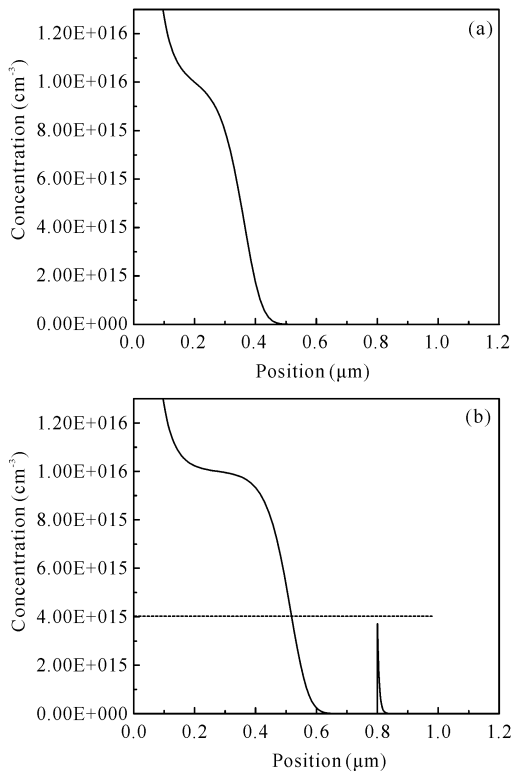


图5 三角形势垒示意图

Fig. 5 Schematic diagram of triangular barrier

由图6可以看出,在较高的掺杂浓度 ( $N_A = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) 下, p-Si 衬底的电子分布比较均匀;在较低的掺杂浓度 ( $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) 下,在  $0.8 \mu\text{m}$  的位置有大量的电子聚集,说明低掺杂浓度的太阳电池尖峰势垒的势能差比较大,不利于电子的正常移动,故光电转换效率较低。



(a)  $N_A = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ; (b)  $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

图 6 不同 p-Si 衬底掺杂浓度下的 E-L 电子分布

Fig. 6 E-L electron distribution at different doping concentrations of p-type Si substrate

### 3 结论

利用 AMPS-1D 模拟软件研究了 p-Si 的掺杂浓度对 InGaN/Si 异质单结太阳能电池性能的影响, 主要结论如下:

1) p-Si 衬底的掺杂浓度对 InGaN/Si 异质单结太阳能电池的性能有明显影响。随着掺杂浓度  $N_A$  的升高, 电流密度  $J_{sc}$  和填充因子 FF 随之升高, 当到达一定高的掺杂浓度范围时 ( $N_A > 5.00 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ),  $J_{sc}$  基本保持不变, 约为  $28.12 \text{ mA/cm}^2$ ; FF 保持在 0.85 左右, 变化不大; 随着掺杂浓度  $N_A$  的升高, 开路电压  $V_{oc}$  和光电转换效率  $E_{ff}$  缓慢增大, 与  $N_A$  大小呈正相关关系, 但并不意味着更高的掺杂浓度就一定能获得更高的光电转换效率, 有待进一步探究。

2) 高掺杂浓度下的太阳能电池具有较好的光电转换效率。低掺杂浓度的太阳能电池光电转换效率较低, 是因为其对应的尖峰势垒高度和宽度均较大, 影响了光生载流子的输运。

#### 参考文献:

[1] 广西科学院学报编辑部. 中国新能源产业异军突起[J].

广西科学院学报, 2011, 27(2): 87.

The Editorial Office of Journal of Guangxi Academy of Sciences. Rapid development of New Energy in China [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2011, 27(2): 87.

[2] 黄志民. 开发广西太阳能资源的可行性[J]. 广西科学院学报, 1992, 8(1): 94-98.

HUANG Z M. The feasibility of developing Guangxi's solar energy resource [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 1992, 8(1): 94-98.

[3] 李福宾, 林硕, 李建功, 等. GaN 肖特基紫外探测器的电流输运研究[J]. 广西科学, 2009, 16(2): 158-160.

LI F B, LIN S, LI J G, et al. Current transport of GaN Schottky UV detectors [J]. Guangxi Sciences, 2009, 16(2): 158-160.

[4] WU J, WALUKIEWICZ W, YU K M, et al. Unusual properties of the fundamental band gap of InN [J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(21): 3967-3969.

[5] DAVYDOV V Y, KLOCHIKHIN A A, EMTSEV V V, et al. Band gap of hexagonal InN and InGaN alloys [J]. Phys Stat Sol: B, 2002, 234(3): 787-795.

[6] DAVYDOV V Y, KLOCHIKHIN A A, SEISYAN R P, et al. Absorption and emission of hexagonal InN. Evidence of narrow fundamental band gap [J]. Phys Stat Sol: B, 2002, 229(3): R1-R3.

[7] WU J, WALUKIEWICZ W, YU K M, et al. Superior radiation resistance of  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(10): 6477-6482.

[8] AGER III J W, WALUKIEWICZ W. High efficiency, radiation-hard solar cells [R]. Lawrence Berkeley National Laboratory Report, 2004.

[9] WU M H, CHANG S P, CHANG S J, et al. Characteristics of GaN/InGaN double-heterostructure photovoltaic cells [J]. International Journal of Photoenergy, 2012(1): 174-178.

[10] BAE S Y, SHIM J P, LEE D S, et al. Improved photovoltaic effects of a vertical-type InGaN/GaN multiple quantum well solar cell [J]. Jpn J Appl Phys, 2011, 50(9): 092301.

[11] BAI J, YANG C C, ATHANASIOU M, et al. Efficiency enhancement of InGaN/GaN solar cells with nanostructures [J]. Appl Phys Lett, 2014, 104(5): 051129.

[12] CHANG Y A, CHEN F M, TSAI Y L, et al. Fabrication and characterization of back-side illuminated InGaN/GaN solar cells with periodic viaholes etching and Bragg mirror processes [J]. Optics Express, 2014, 22(5): A1334-A1342.

[13] CAI X, WANG Y, CHEN B, et al. Investigation of

- InGaN p-i-n homojunction and heterojunction solar cells[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(1):59-62.
- [14] YANG C B, WANG X L, XIAO H L, et al. Photovoltaic effects in InGaN structures with p-n junctions[J]. Physica Status Solidi: A, 2007, 204:4288-4291.
- [15] ZHANG X B, WANG X L, XIAO H L, et al. Simulation of  $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$  single-junction solar cell[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(23):7335-7338.
- [16] 周梅, 赵德刚. 结构参数对 p-i-n 结构 InGaN 太阳能电池性能的影响及机理[J]. 物理学报, 2012, 61(16):168402.  
ZHOU M, ZHAO D G. Influence of structure parameters on the performance of p-i-n InGaN solar cell[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(16):168402.
- [17] 文博, 周建军, 江若璘, 等. InGaN 太阳能电池转换效率的理论计算[J]. 半导体学报, 2007, 28(9):1392-1395.  
WEN B, ZHOU J J, JIANG R L, et al. Theoretical calculation of conversion efficiency of InGaN solar cells[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(9):1392-1395.
- [18] 张聪亮. 硅基薄膜太阳能电池的数值模拟[D]. 温州:温州
- 大学, 2011.  
ZHANG C L. Numerical simulation of silicon-based thin-film solar cells[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2011.
- [19] LIN S, LI X R, PAN H Q, et al. Numerical analysis of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{SnS}$  and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{SnS}$  heterojunction solar cells [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 119(1):361-367.
- [20] 张利超. InGaN 基太阳能电池的结构设计及极化效应研究[D]. 石家庄:河北科技大学, 2015.  
ZHANG L C. Structural design and polarization effect of InGaN-based solar cells[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015.
- [21] LEVINSHTEIN M E, RUMYANTSEV S L, SHUR M S. Properties of advanced semiconductor materials [M]. Chichester, UK: Wiley, 2001.
- [22] MNATSAKANOV T T, LEVINSHTEIN M E, POMORTSEVA L I, et al. Carrier mobility model for GaN[J]. Solid-State Electronics, 2003, 47(1):111-115.

(责任编辑:陆 雁)

(上接第 560 页 Continue from page 560)

- [18] 关丽. 脉冲激光沉积技术中等离子体演化及薄膜生长的模拟研究[D]. 湖北:华中科技大学, 2006.  
GUAN L. Study on plasma evolution and film growth in pulsed laser deposition[D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [19] 江辉明, 叶志清, 曾明生. 脉冲激光沉积(PLD)机理分析及其应用[J]. 江西师范大学学报, 2005, 29(1):53-57.  
JIANG H M, YE Z Q, ZENG M S. Application and mechanism analysis of pulsed laser deposition[J]. Journal of Jiangxi Normal University, 2005, 29(1):53-57.
- [20] 卢意飞. GaN 及 GaN 基薄膜的制备、表征和特性研究 [D]. 上海:复旦大学, 2008.  
LU Y F. Preparation, characterization and properties of GaN and GaN based films[D]. Shanghai: Fudan University, 2008.
- [21] 张磊, 王秀凤, 林晓东. 脉冲激光沉积类金刚石薄膜的厚度均匀性建模[J]. 西南科技大学学报, 2007, 22(4):14-19.  
ZHANG L, WANG X F, LIN X D. The thickness uniformity modeling for DLC films obtained by PLD[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2007, 22(4):14-19.
- [22] 皇甫国庆. 脉冲激光沉积 BST 铁电薄膜的厚度分布 [J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2003, 31(3):55-58.  
HUANGFU G Q. Thickness distribution of BST ferroelectric film deposited by pulsed laser [J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2003, 31(3):55-58.

(责任编辑:陆 雁)