

GaN/Si 单异质结太阳电池的模拟

王傲霜, 肖清泉*, 陈豪, 谢泉

贵州大学大数据与信息工程学院新型光电子材料与技术研究所, 贵州 贵阳 550025

摘要 采用 wxAMPS 软件模拟了 GaN/Si 单异质结太阳电池, 研究了电池各层掺杂浓度、厚度及温度对电池开路电压(V_{oc})、短路电流密度(J_{sc})、填充因子(F)和光电转换效率的影响。模拟结果表明, 随着 Si 层受主浓度的增大, J_{sc} 减小, V_{oc} 、 F 和转换效率均增大。当 GaN 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、Si 掺杂浓度为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时, Si 层厚度为 $16 \mu\text{m}$ 的超薄电池的转换效率可达到 16.91%。随着 Si 层厚度的增加, V_{oc} 、 J_{sc} 、 F 和转换效率均增大。GaN 层厚度为 $0.005 \mu\text{m}$ 、Si 层厚度为 $100 \mu\text{m}$ 时, 转换效率可达到 24.58%。研究表明, 当 GaN/Si 单异质结太阳电池的厚度为目前最高效硅基太阳电池厚度的 60% 时, 前者的效率达到后者的 92%。研究结果有助于制备高效的 GaN/Si 单异质结太阳电池。

关键词 材料; 晶体硅太阳电池; wxAMPS 软件; GaN/Si 单异质结; 转换效率

中图分类号 TM914.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2416001

Simulation on GaN/Si Single Heterojunction Solar Cells

Wang Aoshuang, Xiao Qingquan*, Chen Hao, Xie Quan

Institute of Advanced Optoelectronic Materials and Technology, College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

Abstract The wxAMPS software is used to simulate the GaN/Si single heterojunction solar cells, and the effects of doping concentration, thickness, and temperature of each layer on the battery open-circuit voltage (V_{oc}), short-circuit current density (J_{sc}), fill factor (F) and conversion efficiency are investigated. The simulation results show that as the acceptor concentration in the Si layer increases, J_{sc} decreases, but all of V_{oc} , F , and conversion efficiency increase. When the doping concentration of GaN is $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and the doping concentration of Si is $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, the conversion efficiency of the ultra-thin cell with a Si layer of $16 \mu\text{m}$ thickness can reach 16.91%. As the thickness of the Si layer increases, all of V_{oc} , J_{sc} , F , and conversion efficiency increase. When the thickness of the GaN layer is $0.005 \mu\text{m}$ and the thickness of the Si layer is $100 \mu\text{m}$, the efficiency can reach 24.58%. The simulation results show that when the thickness of the GaN/Si single heterojunction solar cell is 60% of the thickness of the current most efficient silicon-based solar cell, the efficiency of the former can reach 92% that of the latter. The research results are helpful to fabricate high-efficiency GaN/Si single heterojunction solar cells.

Key words materials; silicon solar cells; wxAMPS software; GaN/Si single heterojunction; conversion efficiency

OCIS codes 160.4760; 350.6050; 040.6040; 040.5350

1 引 言

太阳能取之不尽、用之不竭, 高效和绿色的太阳电池一直是研究热点。晶硅(c-Si)太阳电池的转换效率高^[1], 但成本较高、工序复杂^[2], 而非晶硅薄膜太阳电池的转换效率只有 10.2%^[1,3], 且寿命较短。硫化镉、碲化镉和铜铟镓硒薄膜^[4]太阳电池成本较硅太阳电池低, 转换效率也较高, 但镉剧毒且为稀有

元素, 钢含量稀少。异质结^[5]太阳电池具有高效、高可靠性及相对简单的低温工艺制程的优点, 异质结及其相关技术的引入成为解决上述问题的关键。

在硅基异质结太阳电池领域, Kaneka 公司通过结合叉指背接触(IBC)方法, 制造的厚度为 $165 \mu\text{m}$ 的非晶硅/晶硅异质结太阳电池的转换效率达到了 26.7%^[6]。对于厚度小于 $20 \mu\text{m}$ 的超薄晶体硅电池, 研究者已研制出硅基底厚度为 $16 \mu\text{m}$ 的超薄晶

收稿日期: 2020-08-20; **修回日期:** 2020-09-15; **录用日期:** 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61264004)、贵州省留学回国人员科技活动择优资助项目([2018]09)、贵州省高层次创新型人才培养项目([2015]4015)

* **E-mail:** qqxiao@gzu.edu.cn

硅太阳能电池^[7],效率达到 16.4%。但利用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)制备掺杂非晶硅时,掺杂源(硼烷和磷烷)易燃易爆且有剧毒,非晶硅带隙较小(约为 1.7 eV),电池的短路电流密度较低,因此寻找一种新的半导体材料并使其与硅形成异质结是非常有必要的。GaN^[8]为直接带隙宽禁带半导体材料,具有高化学稳定性、无毒环保和耐高温的优点,适合用于制备太阳能电池的窗口层^[9-10]。并且硅基氮化镓(GaN-on-Si)技术中 Si 衬底的成本低,尺寸大,具有巨大的应用潜力。目前关于 GaN/Si 单异质结太阳能电池的研究鲜有报道,本文采用 wxAMPS^[11]软件,模拟了 n-GaN/p-c-Si 单异质结太阳能电池,研究了结构对电池开路电压、短路电流密度、填充因子以及光电转换效率的影响,并且对电池各层的掺杂浓度(浓度,全文同)和厚度进行了优化,为实验制备提供了参考。

2 建模与仿真

GaN/Si 单异质结太阳能电池的典型结构由 n-GaN 层和 p-Si 层组成,如图 1 所示,在模拟 GaN/Si 异质结时首先对 c-Si 进行模拟。初设 16 μm 厚的 p-Si 层和 0.005 μm 厚的 n-GaN 层,研究 GaN/Si 单异质结太阳能电池的转换效率,并与文献[7]进行对比。在标准太阳光谱照度(AM1.5)下,利用 wxAMPS 软件进行数值模拟,wxAMPS 软件的主要模型理论与 AMPS-1D^[12]软件相同,均是基于电流连续性方程和泊松方程的联列求解,相比 AMPS-1D 软件,wxAMPS 软件在界面风格和算法上有改进,最重要的是其隧穿模型更适合异质结及其界面^[11]。

太阳能电池的光电转换效率为

$$\eta = \frac{FV_{oc}I_{sc}}{P_i} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: F 为电池的填充因子; V_{oc} 为开路电压; I_{sc} 为短路电流; P_i 为入射光功率。

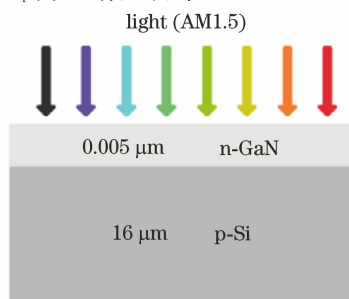


图 1 GaN/Si 单异质结太阳能电池的结构

Fig. 1 Structure of GaN/Si single heterojunction solar cell

随着禁带宽度的增加,短路电流减小,开路电压增加,禁带宽度为 1~2 eV 的半导体适合作为太阳能电池的材料^[10],Si 的禁带宽度为 1.12 eV,于是选择 Si 作为太阳能电池的吸收层^[13]。窗口层^[9]是表面层,表面复合现象严重,缺陷非常多,吸收太阳光后不利于电池输出,降低了电池效率。窗口层要尽量避免吸收光产生载流子,普遍采用禁带宽度大的材料来制备,而 GaN 的带隙为 3.4 eV(>3 eV),是宽带隙材料,适合用于制备窗口层^[9]。目前 GaN-on-Si 行业的生产良率较低,但在降低成本方面有着巨大的潜力:Si 是最成熟的无缺陷的衬底材料,成本低,且与现有微电子技术兼容;Si 容易制备成直径为 200 mm 的晶圆,降低了生产成本,其晶圆成本只有 SiC 基的 1%;Si 的生长速度是 SiC 晶体材料的 200~300 倍。同时,Si(100)仍然是主流硅技术的标准衬底^[14],但由于不同的晶体表面对称性,在 Si(100)上进行高质量 GaN 的生长是一个挑战,GaN 与 Si(100)之间的界面在很大程度上决定了 GaN 层的质量,并且界面态主要影响光生载流子的传输,界面态密度越大,电子复合的数量越多,载流子寿命越短,进而影响电池效率。Liu 等^[15]用原子层沉积(ALD)生长了 GaN/Si(100)界面,这有利于提高 Si(100)上 GaN 膜的质量。在 Si(100)上生长高质量的 GaN 仍然是未来发展趋势,通过研究者的努力,未来定能在 Si(100)上开发出高质量的 GaN,并且能通过表面钝化技术使界面钝化,从而优化界面态。

为了对太阳能电池性能进行模拟,有必要引入各项精确的材料参数。这些参数包括:公共参数,即所有材料都共用的参数,如温度和光子流密度等;各种材料自身的参数,如材料的带隙、亲和势、光吸收系数和缺陷态密度等。用于计算 GaN 电子/空穴迁移率的函数^[16]为

$$\mu_i(N) = \mu_{\min,i} + \frac{\mu_{\max,i} - \mu_{\min,i}}{1 + (N/N_{g,i})^{\gamma_i}}, \quad (2)$$

式中: i 代表电子(e)或空穴(h); N 是掺杂浓度; μ_{\min} 、 μ_{\max} 、 N_g 和 γ 是给定半导体材料的参数。表 1 给出了这些参数的值。

在 300 K 时,根据表 1 的参数,利用(2)式计算 GaN/Si 单异质结太阳能电池的仿真参数。其中部分数值取自文献[16-17],如表 2 所示。

对于理想化的直接带隙半导体,吸收系数(α)的值是与能量有关的函数^[16],可以表示为

$$\alpha(\lambda) = \alpha_0 \sqrt{E - E_g}, \quad (3)$$

式中:吸收系数 α 的单位是 cm^{-1} ; α_0 为比例常数; E

表 1 用于计算 GaN 载流子迁移率的参数^[16]

Table 1 Parameters used to calculate carrier mobility of GaN^[16]

Carrier type	$\mu_{\min}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\mu_{\max}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$N_{\text{g}}/\text{cm}^{-3}$	γ
Electron(e)	55	1000	2×10^{17}	1
Hole(h)	3	170	3×10^{17}	2

表 2 每一层的仿真参数^[16-17]

Table 2 Simulation parameters for each layer^[16-17]

Parameter	GaN	Si
Relative permittivity	8.90	11.90
Band gap /eV	3.42	1.12
Electron affinity /eV	4.16	4.05
Effective conduction band density /(10^{19} cm^{-3})	0.23	2.86
Effective valence band density /(10^{19} cm^{-3})	1.80	1.04
Electron mobility /($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	325	1350
Hole mobility /($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	47.21	500
Band tail density of state /($\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$)	1×10^{14}	1×10^{14}
Characteristic energy of donor-like and acceptor-like tails/eV	0.01	0.01
Capture cross section for acceptor states / cm^2	1×10^{-17} (e), 1×10^{-15} (h)	1×10^{-17} (e), 1×10^{-15} (h)
Capture cross section for donor states / cm^2	1×10^{-15} (e), 1×10^{-17} (h)	1×10^{-15} (e), 1×10^{-17} (h)

是光子能量,与波长 λ 的关系可以表示成 $E=hc/\lambda$, 其中 h 为普朗克常数, c 为光速; E_{g} 为禁带宽度。GaN 材料为直接带隙半导体, α_0 的值为 2.2×10^5 。由(3)式可得 GaN 的吸收系数, c-Si 的吸收系数取自文献[18], GaN、Si 的吸收系数与波长的关系如图 2 所示。Si 在短波处的吸收系数远大于 GaN, 截

止波长也扩展至近红外波段,可以直观地看出 Si 适合用作吸收层,而 GaN 的吸收系数在波长还没到可见光波段时就截止了。太阳光辐射能量 7% 来自紫外波段,其余都在可见光波段以及红外波段,所以 GaN 吸收的太阳光较少,再次证实了 GaN 适合用作窗口层。

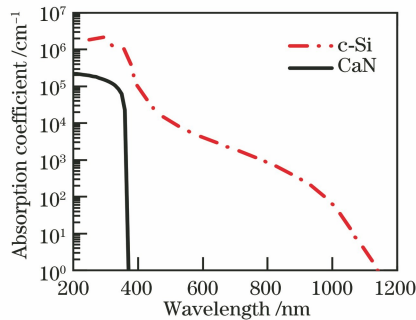


图 2 GaN、c-Si 的吸收系数与波长的关系

Fig. 2 Relationship between absorption coefficients of GaN and c-Si and wavelength

表 3 GaN/Si 太阳能电池的参数设置

Table 3 Parameters setting of GaN/Si solar cell

Parameter	n-GaN	p-Si
Thickness / μm	0.005	16
Donor concentration / cm^{-3}	$5 \times 10^{15} - 5 \times 10^{18}$	0
Acceptor concentration / cm^{-3}	0	$5 \times 10^{15} - 5 \times 10^{19}$

主要研究窗口层(n-GaN 层)中施主浓度以及光吸收层(p-Si 层)中受主浓度对电池性能的影响,因此电池中的变量为掺杂浓度,电池每层的厚度不

3 结果与讨论

3.1 掺杂浓度对 GaN/Si 单异质结电池性能的影响

对于 Si 衬底上的 n-GaN 薄膜,由于 Si 杂质会通过并入位错中心的方式在薄膜中引入张应力,为了调控应力和抑制裂纹产生,不采用太高浓度的 Si 掺杂,所以 n-GaN 掺杂浓度在 $5 \times 10^{15} \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 范围内进行调整。模拟掺杂浓度对电池性能的影响时,设置参数如表 2、3 所示,该电池前后接触电势均为 0。

变,其中窗口层厚度设为 $0.005 \mu\text{m}$,光吸收层的厚度设为 $16 \mu\text{m}$ 。模拟结果如图 3 所示,其中 N_{D} 为 n-GaN 层施主浓度, J_{sc} 为电池短路电流密度, η 为

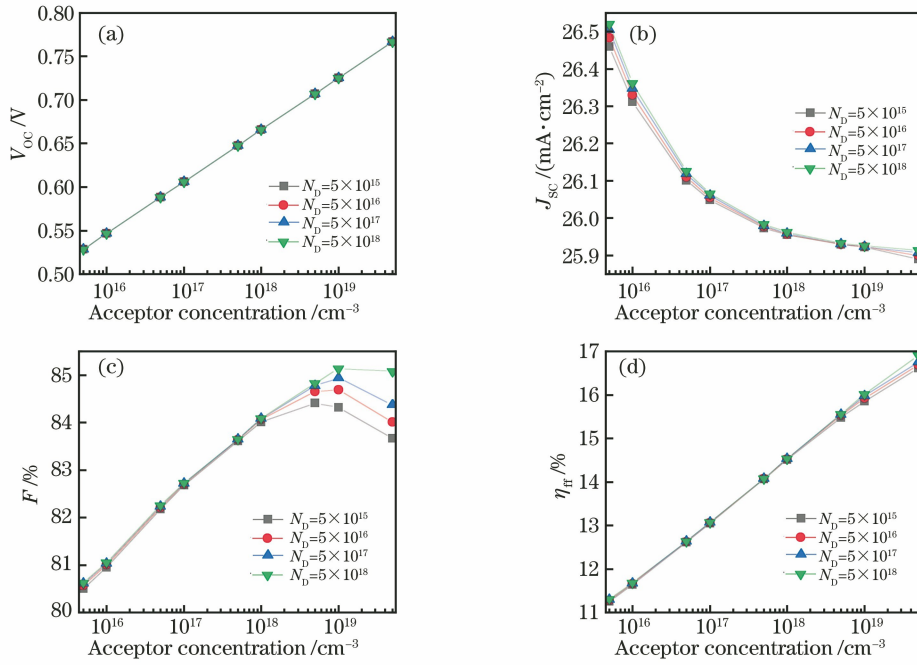


图3 掺杂浓度对电池特性的影响。(a)开路电压;(b)短路电流密度;(c)填充因子;(d)转换效率

Fig. 3 Effect of doping concentration on battery characteristics. (a) Open circuit voltage; (b) short circuit current density; (c) fill factor; (d) conversion efficiency

电池光电转换效率。

从图3可知,电池开路电压不随 n-GaN 层施主浓度的变化而变化,短路电流密度、填充因子和转换效率随着 n-GaN 层施主浓度的增大而增加,但增加幅度较小。当 n-GaN 层施主浓度不变时,短路电流密度随着 p-Si 层受主浓度的增大而减小,填充因子在 p-Si 受主浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时存在极值,电池开路电压和转换效率均随着 p-Si 层受主浓度的增大而增加。当 n-GaN 层施主浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, p-Si 层受主浓度为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时,转换效率达到 16.91%,对比已研制出的基底厚度为 $16 \mu\text{m}$ 的超薄晶硅太阳能电池^[7],GaN/Si 单异质结太阳能电池的理论效率更高。对于 n-GaN/p-Si 结构电池,提高光吸收层的掺杂浓度可以很好地增大电池的效率。这主要是由于掺杂浓度的增加,内建电场电势差变大,对应的尖峰势垒高度和宽度均变小,这有利于光生载流子的输运,电子迁移率变大,增加了半导体的导电性^[19]。但当掺杂浓度的增加导致缺陷密度过大时,填充因子降低,从而电池质量下降,所以在掺杂浓度的选择上应该综合考虑。

3.2 电池厚度的优化

厚度是影响太阳能电池光电转化效率的又一关键因素,通过调整电池厚度可以使太阳光谱在电池各层之间得到更精细的分配,从而提高器件的

转换效率。由于 GaN 的光吸收系数达到了 10^5 数量级,因此窗口层过厚势必会影响光吸收,从而影响电池效率。为了探究电池各层的最佳厚度,分别模拟电池各层厚度对电池性能的影响,参数如表 2、4 所示。

表 4 太阳能电池的参数设置

Table 4 Parameter setting of solar cell

Parameter	n-GaN	p-Si
Thickness / μm	0.005–0.500	0.500–500.000
Donor concentration / cm^{-3}	5×10^{18}	0
Acceptor concentration / cm^{-3}	0	5×10^{19}

主要研究窗口层以及光吸收层的厚度对电池性能的影响,因此电池中的变量为每层的厚度,电池每层的掺杂浓度不变。由前面的模拟结果可知,当 n-GaN 层施主浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, p-Si 层受主浓度为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时,效率最佳。因此, n-GaN 层施主浓度取 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, p-Si 层受主浓度取 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,模拟结果如图 4 所示,其中 T_{GaN} 为 n-GaN 的厚度。

从图 4 可知,对于 n-GaN 层厚度不同的 GaN/Si 单异质结太阳能电池,存在相同的规律,即开路电压、短路电流密度、填充因子和转换效率均随着 p-Si 层厚度的增加而增加,但增加的幅度减小。这

是因为光吸收层厚度的变化不仅会引起短路电流的改变,还会引起开路电压的改变。当 p-Si 层厚度由 $0.5 \mu\text{m}$ 增加到 $200.0 \mu\text{m}$ 时,透射光引起的损失随着 p-Si 层厚度的增加而减小,更多的光子被 p-Si 层吸收,从而产生了更多的光生载流子^[20],增加了电池的效率。当 p-Si 层厚度增加到 $200.0 \mu\text{m}$ 时,继续增加 p-Si 层厚度,电池效率基本不变,这时少数载流子扩散长度小于 p-Si 层厚度,背表面的复合速

度对电池效率几乎无影响。当 p-Si 层厚度不变时,转换效率随 n-GaN 厚度的增加而变小,符合前文对窗口层的预测。此外,填充因子随着 n-GaN 层厚度的增加先减小后增大,变化幅度较小,当窗口层厚度为 $0.005 \mu\text{m}$ 时填充因子相对较高,电池质量也较高,因此厚度取 $0.005 \mu\text{m}$ 最佳。但在实际制备中,由于工艺的影响,n-GaN 层厚度值可以稍微大一点,这对电池性能的影响不大。

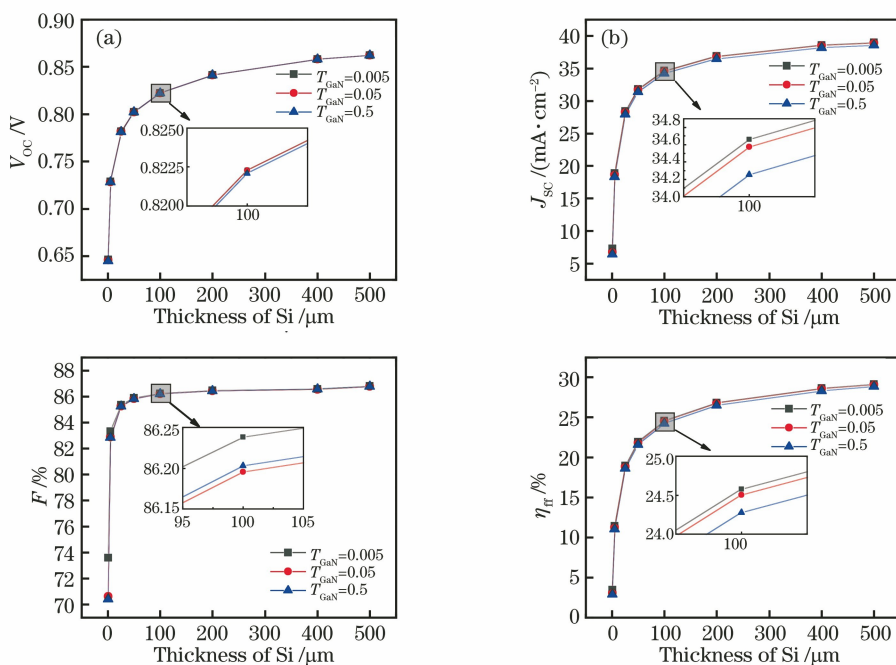


图 4 厚度对电池特性的影响。(a)开路电压;(b)短路电流密度;(c)填充因子;(d)转换效率

Fig. 4 Effect of thickness on battery characteristics. (a) Open circuit voltage; (b) short circuit current density; (c) fill factor; (d) conversion efficiency

p-Si 厚度过高会导致成本过高,因此在制作太阳能电池时还需遵循低成本高效率的原则。根据 Andreani 等^[21]的计算结果可知,最佳 c-Si 厚度约为 $100 \mu\text{m}$ 。当 n-GaN 厚度为 $0.005 \mu\text{m}$ 、p-Si 厚度为 $100.0 \mu\text{m}$ 时,太阳能电池转换效率可以达到 24.58% ,此时电池厚度是目前最高效的硅基太阳能电池^[6]厚度的 60% ,但效率为后者的 92% ,n-GaN/p-Si 单异质结太阳能电池具有较为可观的应用前景。Si 的带隙为 1.12 eV ,根据细致平衡理论,Rühle^[22]提出了基于 AM1.5 的单结太阳能电池 Shockley-Queisser(S-Q)极限的列表值,其中太阳能电池光吸收体带隙为 $1.1\sim 1.2 \text{ eV}$ 时,单结太阳能电池的转换效率极限可以达到 $32.23\%\sim 32.74\%$, V_{OC} 极限可以达到 $0.842\sim 0.935 \text{ V}$, J_{sc} 极限达到 $44.32\sim 39.99 \text{ mA}/\text{cm}^2$, F 极限为 $86.6\%\sim 87.7\%$ 。n-GaN/p-Si 单异质结太阳能电池的转换效率还有优

化空间, V_{OC} 和 F 接近其 S-Q 极限, J_{sc} 与 S-Q 极限还有一定差距,可以通过寻找改进 J_{sc} 的方法来提高转换效率。

3.3 温度对 GaN/Si 单异质结电池性能的影响

在模拟温度对电池性能的影响时,研究电池的开路电压、短路电流密度、填充因子和转换效率在 $240\sim 380 \text{ K}$ 间的变化,模拟结果如图 5 所示。

由图 5 可知,短路电流密度随温度的升高而略有提高,开路电压、填充因子和转换效率都随温度的升高而降低。短路电流密度和开路电压的变化可以通过半导体材料带隙宽度的温度效应来解释,温度升高会造成材料的晶格膨胀和晶格振动的增强,导致材料的带隙宽度减小,而温度降低时,带隙会变大,这与红外探测器中低温探测范围蓝移的现象吻合^[23]。带隙宽度的减小拓宽了电池的光吸收范围,电池可以吸收更多的光子,使短路电流密度略有提

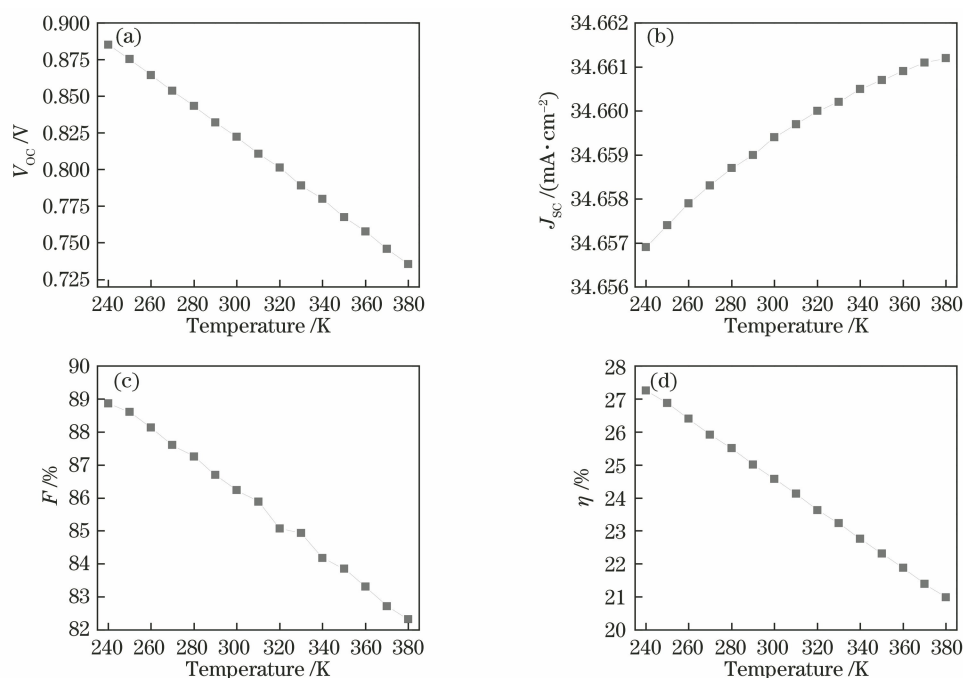


图5 温度对电池特性的影响。(a)开路电压;(b)短路电流密度;(c)填充因子;(d)转换效率

Fig. 5 Effect of temperature on battery characteristics. (a) Open circuit voltage; (b) short circuit current density; (c) fill factor; (d) conversion efficiency

高。而带隙宽度变窄导致本征载流子浓度迅速增加,进而造成开路电压明显下降。另外,温度升高,扩散层的薄层电阻会增大,从而导致填充因子降低,而开路电压的显著变化会导致效率随温度的升高而下降。

4 结 论

利用数值模拟的方法设计了具有平面结构的 GaN/Si 单异质结太阳能电池,研究了掺杂浓度、厚度和温度对 GaN/Si 单异质结太阳能电池 V_{oc} 、 J_{sc} 、 F 和转换效率的影响,研究结论有助于在实验中制备高效的 GaN/Si 单异质结太阳能电池。根据模拟结果可知:在 n-GaN 施主浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、p-Si 受主浓度为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时,电池达到 16.91% 的转换效率;n-GaN 层厚度为 $0.005 \mu\text{m}$ 、p-Si 层厚度为 $100 \mu\text{m}$ 时,转换效率可以达到 24.58%。当 GaN/Si 单异质结太阳能电池的厚度为目前最高效硅基太阳能电池厚度的 60% 时,前者的效率达到后者的 92%,转换效率较高,成本较低。但模拟的是界面缺陷态密度保持在 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 以下的结果,考虑到界面态的缺陷,未来的目标是控制和稳定半导体的表面特性,进而得到高质量少缺陷态大晶粒尺寸的 p-Si 吸收层及高质量 n-GaN 薄膜^[24]。可以通过前电极与背电场的处理、绒面陷光结构优

化^[25]、串联电阻的减小、抗反射膜的蒸镀及聚光技术^[26]等方法来提高太阳电池的整体性能。

参 考 文 献

- [1] Green M A, Dunlop E D, Hohl-Ebinger J, et al. Solar cell efficiency tables [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2020, 28 (7): 629-638.
- [2] China Photovoltaic Society, China Renewable Eenergy Society. Report on 2019 China PV technology development——research progress of new solar cells (part 1) [J]. Solar Energy, 2020(313): 5-15.
中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2019 年中国光伏技术发展报告——新型太阳能电池的研究进展(1) [J]. 太阳能, 2020(313): 5-15.
- [3] Matsui T, Bidiville A, Maejima K, et al. High-efficiency amorphous silicon solar cells: impact of deposition rate on metastability[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(5): 053901.
- [4] Zhang C J, Chu J H. Research progress and challenges of thin film solar cells[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2524-2531.
张传军, 褚君浩. 薄膜太阳能电池研究进展和挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2524-2531.
- [5] Durbin S M, Gray J L. Considerations for modeling heterojunction transport in solar cells [C]// Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on

- Photovoltaic Energy Conversion, December 5-9, 1994, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE, 1994: 5189050 .
- [6] Yoshikawa K, Kawasaki H, Yoshida W, et al. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% [J]. Nature Energy, 2017, 2(5): 17032.
- [7] Tan X Y, Yan W S, Tu Y T, et al. Small pyramidal textured ultrathin crystalline silicon solar cells with double-layer passivation [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14725-14731.
- [8] Du W C, Kang J J, Li Y, et al. Optimization of facet reflectivity of 450 nm GaN-based semiconductor lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (6): 0614002.
杜维川, 康俊杰, 李弋, 等. 450 nm GaN 基半导体激光器腔面反射率的优化 [J]. 光学学报, 2019, 39 (6): 0614002.
- [9] Jiang J H, Wu K P, Lu K L, et al. Effect of intermediate-band on the ZnO/ZnTe photovoltaic solar cell [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (9): 0916003.
蒋建慧, 吴孔平, 鲁开林, 等. 中间带对 ZnO/ZnTe 光伏太阳能电池性能的影响 [J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0916003.
- [10] Meng Q J, Liu H B, Meng Q H. Physics of semiconductor devices [M]. Beijing: Science Press, 2009: 249-261.
孟庆巨, 刘海波, 孟庆辉. 半导体器件物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 249-261.
- [11] Liu Y M, Sun Y, Rockett A. A new simulation software of solar cells: wxAMPS [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 98: 124-128.
- [12] Norberto H C, Arturo M A. Simulation of heterojunction silicon solar cells with AMPS-1D [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(1): 64-67.
- [13] Ichimura M, Takeuchi K, Ono Y, et al. Electrochemical deposition of SnS thin films [J]. Thin Solid Films, 2000, 361/362: 98-101.
- [14] Lin G T, Mo Z K, Weng Y, et al. Microstructure and optical properties of c-AlN/TiN/Si (100) heterostructure [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (8): 0816003.
林国涛, 莫祖康, 翁瑶, 等. c-AlN/TiN/Si(100) 异质结构的显微组织及光学性能 [J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0816003.
- [15] Liu S J, Zhao G, He Y F, et al. Interfacial tailoring for the suppression of impurities in GaN by *in situ* plasma pretreatment via atomic layer deposition [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(38): 35382-35388.
- [16] Brown G F, Ager J W, Walukiewicz W, et al. Numerical simulations of novel InGaN solar cells [C]//2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), June 7-12, 2009, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE, 2009: 11152215.
- [17] Deng Q R, Wang Z, Wang S G, et al. Simulation of planar Si/Mg₂Si/Si p-i-n heterojunction solar cells for high efficiency [J]. Solar Energy, 2017, 158: 654-662.
- [18] Kato T, Sago Y, Fujiwara H. Optoelectronic properties of Mg₂Si semiconducting layers with high absorption coefficients [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(6): 063723.
- [19] Tu Y, Yang W, Yang P Z, et al. Research on interlayer in "a-Si:H/ μ c-Si:H" tandem solar cells [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 36(6): 0616003.
涂晔, 杨雯, 杨培志, 等. 非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池中间层的研究 [J]. 光学学报, 2015, 36(6): 0616003.
- [20] Ma D Y, Chen N F, Tao Q L, et al. Performance of space GaInP/(In)GaAs/Ge triple-junction solar cell containing Bragg reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1131001.
马大燕, 陈诺夫, 陶泉丽, 等. 包含布拉格反射器的空间用 GaInP/(In)GaAs/Ge 三结太阳能电池性能 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1131001.
- [21] Andreani L C, Bozzola A, Kowalczewski P, et al. Silicon solar cells: toward the efficiency limits [J]. Advances in Physics: X, 2019, 4(1): 1548305.
- [22] Rühle S. Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells [J]. Solar Energy, 2016, 130: 139-147.
- [23] Wei R S, Deng N, Wang M S, et al. Si-based Ge quantum dot infrared photodetectors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(4): 379-382.
魏榕山, 邓宁, 王民生, 等. Si 基 Ge 量子点光电探测器的研究 [J]. 半导体光电, 2006, 27(4): 379-382.
- [24] Chen X L, Chen L, Zhou Z X, et al. Progress of Cu₂O/ZnO oxide heterojunction solar cells [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(11): 118401.
陈新亮, 陈莉, 周忠信, 等. Cu₂O/ZnO 氧化物异质结太阳能电池的研究进展 [J]. 物理学报, 2018, 67(11): 118401.
- [25] Wang L G, Zhao Z Y, Zhang X D, et al. Optimization of light trapping structure on textured silicon substrate for heterojunction solar cells [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0216001.
王利果, 赵振越, 张晓丹, 等. 异质结太阳能电池硅衬

- 底绒面陷光结构的优化[J]. 光学学报, 2015, 35 (2): 0216001.
- [26] Chen F, Gao C, Yang C X, et al. Surface-shape construction and optical analysis of novel solar compound parabolic concentrator with circular absorber [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (6): 0608001.
- 陈飞, 高崇, 杨春曦, 等. 新型圆形吸收体太阳能复合抛物聚光器面形构建及光学分析[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0608001.