

# 空间GaInP/GaAs/Ge三结太阳能电池结构参数对电学性能影响机理研究

王 畅

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年2月22日; 录用日期: 2024年3月17日; 发布日期: 2024年3月26日

## 摘 要

本文使用计算机模拟了三结GaInP/GaAs/Ge太阳能电池, 通过改变顶电池GaInP、中电池GaAs厚度以及掺杂浓度等结构参数, 得出了电池的光生载流子收集效率和电学特性之间的规律, 揭示了太阳能电池结构参数对电学性能影响的内在物理机制。结果表明, 发射区厚度变化主要影响短波区域, 基区厚度变化主要影响长波区域。顶电池GaInP发射区厚度增加, 短路电流、开路电压先增后降; 基区厚度增加, 短路电流降低, 最大功率随短路电流的变化而变化。中电池GaAs厚度增大, 短路电流整体呈降低趋势, 开路电压略有升高。GaInP工作区掺杂浓度升高, 电学性能几乎不发生改变; GaAs工作区掺杂浓度升高, 开路电压略有增加, 短路电流和最大功率均呈下降趋势。可见GaInP的掺杂浓度对电池的影响远远低于GaAs。

## 关键词

三结GaAs太阳能电池, 计算机仿真, 电学性能

# Study on the Influence Mechanism of Spatial GaInP/GaAs/Ge Three-Junction Solar Cell Structural Parameters on Electrical Performance

Chang Wang

School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2024; accepted: Mar. 17<sup>th</sup>, 2024; published: Mar. 26<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

This article uses computer simulation of a three-junction GaInP/GaAs/Ge solar cell. By changing

the structural parameters of thickness and doping concentration of the top cell GaInP and middle cell GaAs, the relationship between the photogenerated carrier collection efficiency and electrical properties of the cell is obtained, revealing the inherent physical mechanism of the influence of solar cell structural parameters on electrical performance. The results indicate that the thickness variation of the emission zone mainly affects the shortwave region, while the thickness variation of the base zone mainly affects the longwave region. As the thickness of the GaInP emission zone in the top cell increases, the short-circuit current and open-circuit voltage first increase and then decrease; as the thickness of the base zone increases, the short-circuit current decreases, and the maximum power follows the variation of the short-circuit current. As the thickness of GaAs in the middle cell increases, the overall short-circuit current shows a decreasing trend, while the open-circuit voltage slightly increases. As the doping concentration in the GaInP working area increases, the electrical performance remains almost unchanged; as the doping concentration in the GaAs working area increases, the open-circuit voltage slightly increases, while the short-circuit current and maximum power both show a decreasing trend. It can be seen that the doping concentration of GaInP has a much lower impact on the cell than that of GaAs.

## Keywords

Three-Junction GaAs Solar Cell, Computer Simulation, Electrical Performance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

国产三结 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池由于具有高效率被广泛应用于航天器，光电转换效率是表征太阳电池性能的重要参数，因此，研究三结电池的结构参数对多结电池的输出功率具有重要的意义。

对高效太阳电池的理论研究一直是光伏领域的热点，石易立[1]提出了对中电池采用 p-i-n 结构或对基区进行线性掺杂。p-i-n 结构耗尽区载流子受材料扩散长度影响小，且线性掺杂结构 i 层的掺杂浓度比普通 np 结构的 p 层低，空间电荷区更宽，从而增大了光生载流子收集效率，有效提升了中电池抗辐射性能。王博浩等人[2]通过改变单结 GaAs/Ge 电池的厚度和掺杂浓度，发现发射区厚度变化主要影响短波区域，基区厚度变化影响长波区域；且太阳电池工作区掺杂浓度影响开路电压，短路电流随掺杂浓度的升高而降低，得出了结构参数对电池电学性能的影响。陈帅[3]通过 Silvaco TCAD 对 GaInP/GaAs/Ge 进行建模，通过调节顶电池厚度和优化隧道结得到新的三结结构，得到的理论效率达到 30.919%。张理嫩等人[4]发现，使用分子束外延生长的 Si 基 II~VI 族材料可以应用于多结太阳电池中，比传统 III~V 族材料有更高的光电转换效率，并提出了提高效率的可能途径。Qu 等人[5]通过推导四结太阳电池的能量转换效率表达式，得出整个电池的最大效率可达 39.69%。目前，大部分研究主要围绕辐照粒子对电池内部损伤问题，而通过对多结电池的结构改进来增大电池输出效率或增强抗辐射性能的相关论文较少。

本文以国产 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池为研究材料，采用实验数据与理论模拟数据相结合的方式探究了电池结构变化对电池外量子效率和 I-V 特性的影响，对设计优化三结电池提供理论基础。其中，Ge 电池禁带宽度较小，对顶电池和中电池的光吸收无影响[6]，所以本文主要对顶电池与中电池的厚度以及掺杂浓度进行分析。

## 2. 实验与理论建模

本文使用的是国产空间三结 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池, 是使用金属有机化合物气相沉积法(MOCVD)制备而成。GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池具备不同禁带宽度可选择吸收几乎全部太阳光谱, 本文使用的 GaInP/GaAs/Ge 面积为  $3 \times 4 \text{ cm}^2$ , 其结构参数如图 1 所示。

本文采用计算机进行理论模拟三结 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池, 该程序依据连续性方程和泊松方程构建物理模型, 通过添加俄歇复合模型、SRH 复合模型、能带变窄模型等, 设置为均匀掺杂, 通过光谱响应数据模拟出少子寿命, 得出在 AM0 光谱辐照下短路电流为  $I_{sc} = 208 \text{ mA}$ , 开路电压  $V_{oc} = 2438 \text{ mV}$ , 最大效率  $P_{max} = 447 \text{ mW}$ 。实验数据得出在  $25^\circ\text{C}$  时, AM0 光谱辐照下, 短路电流为  $I_{sc} = 200 \text{ mA}$ , 开路电压  $V_{oc} = 2590 \text{ mV}$ , 最大效率  $P_{max} = 437.3 \text{ mW}$ , 可见实验数据与理论模拟数据相差较小, 出现差异的原因可能是未设置减反射层结构。

正面电极			
n-InGaP	Emitter	0.1 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
P-InGaP	Base	0.5 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Tunnel Junction 1			
n-GaAs	Emitter	0.2 $\mu\text{m}$	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
P-GaAs	Base	3.5 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Tunnel Junction 2			
n-Ge	Emitter	1 $\mu\text{m}$	$3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
P-Ge	Substrate	160 $\mu\text{m}$	$5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
背面电极			

Figure 1. Schematic diagram of spatial three-junction GaInP/GaAs/Ge cell structure

图 1. 空间三结 GaInP/GaAs/Ge 电池结构示意图

## 3. 结果与分析

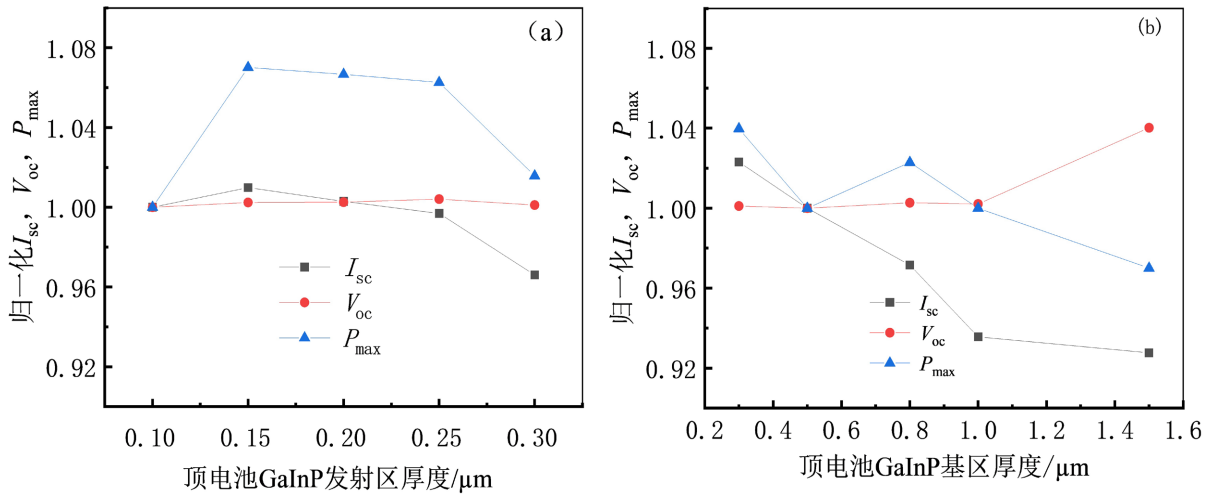
### 3.1.1. 顶电池 GaInP 厚度变化对 I-V 的影响

由图 2(a)可知, 短路电流、开路电压和最大功率随发射区厚度的增加先增大后减小, 短路电流先升高后降低是由于外量子效率先增后降导致的, 最大功率与短路电流变化一致, 开路电压主要受到掺杂浓度影响, 所以工作区厚度变化对开路电压影响不大。由图 2(b)可知, 短路电流和最大功率随基区厚度的增加而降低, 开路电压是由于空间电荷区变大而略有升高。与发射区机理相似, 顶电池基区厚度增加, 串联电阻变大, 外量子效率降低, 是短路电流衰减的根本原因。

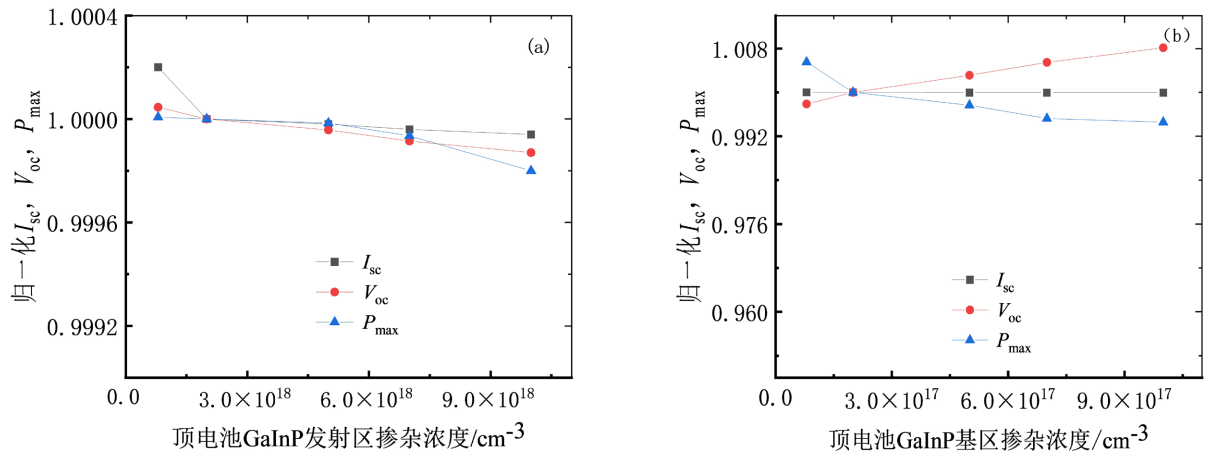
### 3.1.2. 顶电池 GaInP 掺杂浓度变化对 I-V 的影响

由图 3 可知, 顶电池 GaInP 的工作区掺杂浓度对电池的电学性能影响不大。由图 3(a)可知, 发射区厚度几乎不影响电学性能。由图 3(b)可知, GaInP 基区厚度增大, 短路电流和最大功率均出现一定程度的退化, 提升掺杂浓度导致少子迁移率降低, 短路电流下降, 最大功率也下降。

开路电压取决于内建电压的变化, 由内建电压为  $V_D = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$ , 其中  $N_A$  为受主浓度,  $N_D$  为施主浓度,  $n_i$  为本征载流子浓度, 基区掺杂浓度升高, 开路电压也随之升高。



**Figure 2.** Effect of GaInP working area thickness on the electrical parameters of top battery: (a) Batteries with different thicknesses of the top battery emission zone; (b) Batteries with different thicknesses of the top battery base zone  
**图 2.** 顶电池 GaInP 工作区厚度对电池电学参数的影响: (a) 顶电池发射区厚度不同的电池; (b) 顶电池基区厚度不同的电池



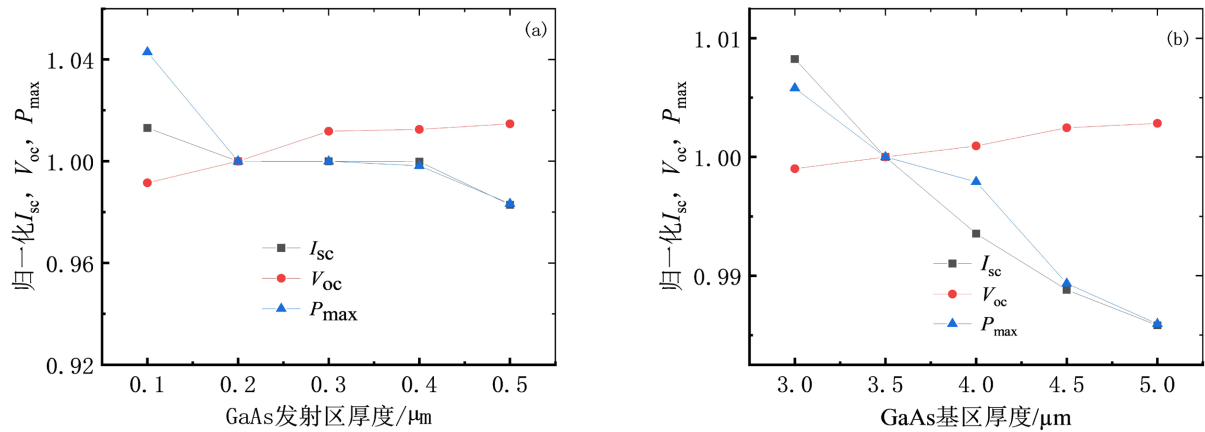
**Figure 3.** I-V curves of GaInP working area doping concentration variation of top battery: (a) Batteries with different doping concentrations in the top battery emission zone; (b) Batteries with different doping concentrations in the top battery base zone  
**图 3.** 顶电池 GaInP 工作区掺杂浓度变化时的 I-V 曲线: (a) 顶电池发射区掺杂浓度不同的电池; (b) 顶电池基区掺杂浓度不同的电池

### 3.1.3. 中电池 GaAs 厚度变化对 I-V 的影响

图 4(a)为基区厚度 3.5 μm 不变时, 短路电流、开路电压和最大功率随发射区厚度变化关系。由图可知, 发射区厚度增加, 短路电流降低, 开路电压升高, 最大功率降低。图 4(b)为发射区厚度 0.2 μm 不变时, 短路电流、开路电压和最大功率随发射区厚度变化关系。短路电流和最大功率均下降, 开路电压略有增加。基区厚度增大, 串联电阻增大导致短路电流降低, 达到 3.5 μm 时光电流趋于饱和状态, 短路电流趋于饱和, 再升高基区厚度, 底部的少数载流子难以到达耗尽层, 致使短路电流下降。厚度增大, 导致空间电荷区变厚, 所以开路电压升高。与图 4 对比, 可得出顶电池 GaInP 的基区厚度比 GaAs 工作区厚度变化对电池电学性能影响大。

### 3.1.4. 中电池 GaAs 掺杂浓度变化对 I-V 的影响

改变发射区和基区掺杂浓度, 归一化短路电流, 开路电压及最大功率的变化曲线如图 5 所示, 随发



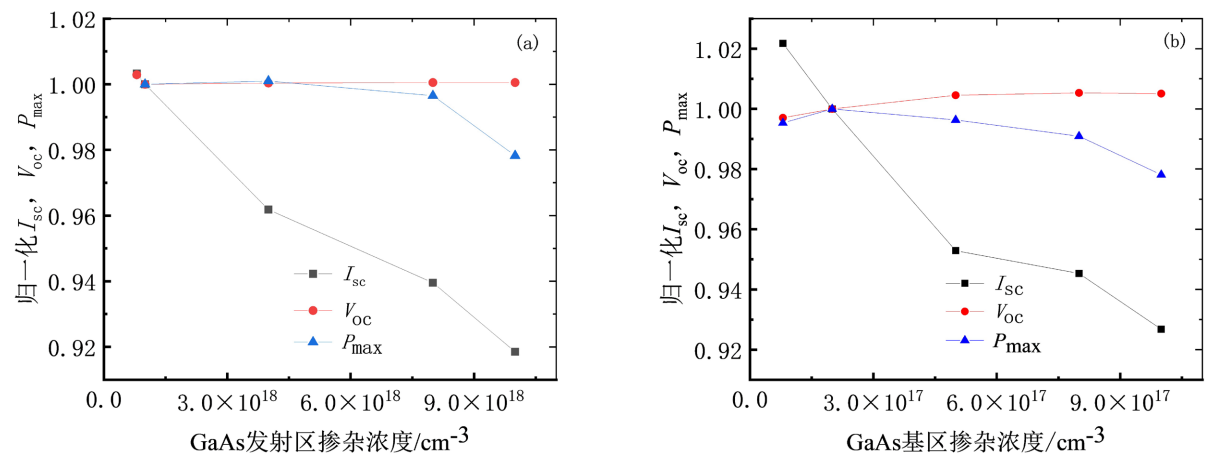
**Figure 4.** I-V curves of GaAs working area thickness variation of medium battery: (a) Batteries with different thicknesses in the central battery emission zone; (b) Batteries with different thicknesses in the central battery base zone

**图 4.** 中电池 GaAs 工作区厚度变化时的 I-V 曲线: (a) 中电池发射区厚度不同的电池; (b) 中电池基区厚度不同的电池

射区和基区掺杂浓度的升高, 短路电流和最大功率整体呈降低趋势, 开路电压略微升高。由于 GaAs 电池中少子迁移率主要受掺杂浓度的影响。掺杂浓度升高, 缺陷增多, 少子迁移率降低。少子扩散长度为

$L = \sqrt{\frac{k_B T \mu \tau}{q}}$ , 其中  $k_B$  为玻尔兹曼常量,  $\mu$  为迁移率,  $\tau$  为少子寿命, 则扩散长度缩短, 短路电流降低。

由图可知, 短路电流衰降受掺杂浓度影响较大, 当工作区掺杂浓度较高时, 属于重掺杂, 晶格结构受到破坏, 缺陷增多导致少子复合率升高, 短路电流急剧下降。内建电压随工作区掺杂浓度的增加而增大, 最大功率随短路电流的变化而变化。



**Figure 5.** I-V curves of GaAs working area doping concentration variation of medium battery: (a) Batteries with different doping concentrations in the central battery emission zone; (b) Batteries with different doping concentrations in the central battery base zone

**图 5.** 中电池 GaAs 工作区掺杂浓度变化时的 I-V 曲线: (a) 中电池发射区掺杂浓度不同的电池; (b) 中电池基区掺杂浓度不同的电池

#### 4. 结论

本文对三结 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池进行了理论建模, 改变顶电池 GaInP 和中电池 GaAs 工作区的厚度和掺杂浓度, 得出结论如下: 顶电池 GaInP 发射区厚度升高, 短路电流先升高后降低; 基区厚度增

加, 串联电阻变大使短路电流降低, 开路电压几乎不受到厚度影响。中电池 GaAs 发射区厚度增加, 大于少子扩散长度导致外量子效率下降, 短路电流下降; 当基区厚度大于少子扩散长度时, 短路电流降低, 而开路电压几乎不变, 最大功率随短路电流的变化而变化。

改变电池材料的掺杂浓度, 得出 GaAs 的掺杂浓度对电池电学性能影响最大, 而顶电池的掺杂浓度几乎无影响。GaInP 与 GaAs 工作区受掺杂浓度影响情况一致, 都随工作区掺杂浓度的升高使短路电流发生一定的退化, 这主要是由于掺杂浓度的升高会使少子的散射能力增强, 缺陷增多致少子扩散长度缩短, 使短路电流衰减。基区掺杂浓度升高, GaInP 与 GaAs 的开路电压都略有上升, 最大功率下降。原因是开路电压与材料结构的掺杂浓度呈正相关, 短路电流衰减, 最大功率受填充因子影响也下降。

## 参考文献

- [1] 石易立. III-V 族三结抗辐照太阳能电池结构的改进初探[J]. 南通航运职业技术学院学报, 2011, 10(2): 58-62.
- [2] 王博浩, 胡建民. 空间 GaAs/Ge 太阳能电池电学性能仿真与优化机理研究[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2022, 38(2): 43-47.
- [3] 陈帅. 三结太阳能电池的性能模拟、优化和制备[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2016: 35-37.
- [4] 张理嫩, 刘超, 崔利杰, 等. 硅基 II-VI 族单结及多结太阳能电池研究进展[J]. 半导体技术, 2014, 39(4): 241-247.
- [5] Qu, X.S., Zhang, S.S., Bao, H.Y. and Xiong, L.L. (2013) The Effect of InAs Quantum-Dot Size and Interdot Distance on GaInP/GaAs/GaInAs/Ge Multi-Junction Tandem Solar Cells. *Journal of Semiconductors*, **34**, 062003-1-062003-5. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/34/6/062003>
- [6] 陶泉丽. 多结太阳能电池优化设计及制备[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021: 45-46.