

空间倒置InGaP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.58}Ga_{0.42}As 四结太阳结构参数对电池性能机理研究

刘 雯

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: 2025年1月15日; 录用日期: 2025年2月8日; 发布日期: 2025年2月17日

摘 要

本文使用计算机软件模拟了倒置四结电池, 通过改变子电池的工作区厚度以及掺杂浓度等结构参数, 探究其对电学特性的影响。改变InGaP等子电池发射区参数时, 短波光长的光子受影响。改变基区参数时, 影响长波长光子的吸收效率。随着四结倒置太阳电池的工作区厚度的增加, 短路电流先升高再降低, 开路电压几乎不变, 最大功率也先升高再降低, 基区是主要工作区, 受到的影响大于发射区; 随着InGaP等子电池发射区掺杂浓度的增加, 电学参数几乎不受影响。随着子电池基区掺杂浓度变化, 短路电流几乎不变, 开路电压逐渐升高, 最大功率的变化与开路电压变化保持一致。

关键词

四结倒置太阳电池, 计算机仿真, 电学性能

Research on the Mechanism of Structural Parameters of Inverted InGaP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.58}Ga_{0.42}As Four-Junction Solar Cells on Battery Performance

Wen Liu

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

Received: Jan. 15th, 2025; accepted: Feb. 8th, 2025; published: Feb. 17th, 2025

文章引用: 刘雯. 空间倒置 InGaP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.58}Ga_{0.42}As 四结太阳结构参数对电池性能机理研究[J]. 材料科学, 2025, 15(2): 221-226. DOI: 10.12677/ms.2025.152025

Abstract

In this paper, computer software was used to simulate the inverted four-junction solar cell. By changing the structural parameters such as the thickness of the working region and the doping concentration of the sub-cells, the impact on their electrical characteristics was explored. When parameters of the emitter region of sub-cells like InGaP were changed, photons with short wavelengths were affected. When parameters of the base region were changed, the absorption efficiency of photons with long wavelengths was influenced. As the thickness of the working region of the inverted four-junction solar cell increased, the short-circuit current first increased and then decreased, the open-circuit voltage remained almost unchanged, and the maximum power also first increased and then decreased. The base region is the main working area and was more affected than the emitter region. As the doping concentration of the emitter region of sub-cells like InGaP increased, the electrical parameters were hardly affected. As the doping concentration of the base region of the sub-cells changed, the short-circuit current remained almost unchanged, the open-circuit voltage gradually increased, and the change in the maximum power was consistent with that of the open-circuit voltage.

Keywords

Four-Junction Inverted Solar Cell, Computer Simulation, Electrical Performance

Copyright © 2025 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

空间太阳能电池是航天器的功能装置，由于国家航天技术突飞猛进，对其供能装置的要求更高。为了满足需要，对空间太阳能电池需要进一步研究。研究者们一方面从如何提高电池的光电转化效率，主要是研究多结太阳能电池。另一方面是思考如何减少空间环境中的各种粒子对电池的损伤[1]。空间太阳能电池的发展经历了一个过程，三结太阳能电池比传统的单结电池具有更好的稳定性，光电转化效率为30%，作为现在利用率最高的电池之一[2]，但由于最后的子电池 Ge 的禁带宽度太大，导致底电池的光生电流过大，与前两节子电池电流不匹配，光电转化率低。为了提高电池的转化效率以及延长使用年限，研究者们尝试选取新的电池材料，四结太阳能电池以更高的转化效率进入研究者的视野。目前，美国制造出的倒置四结太阳能电池的转化率已经高达 37.75%，比一般的三结太阳能电池高出 7% [3]。由于电池在轨服役期间，空间环境过于复杂，模拟地面实验中成本高，周期长且无法体现内部载流子的损伤效应，无法解释内部损伤机理。利用计算机软件构建电池模型，进一步模拟辐照后的电池状态成为了新的研究方法。陈帅[4]利用计算机软件 silvaco TCAD 软件成功模拟了三结太阳能电池，李相骞[5]进一步采用实验数据和计算机理论仿真结合研究不同环境下电池电学性能的变化，本文将继续运用此方法模拟倒置四结太阳能电池。

本文以倒置 InGaP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.58}Ga_{0.42}As 四结太阳(简称倒置四结电池)为研究对象，采用实验数据与计算机理论仿真数据结合，改变电池的结构参数对电学参数 $I-V$ 的影响，对涉及优化四结太阳能电池提供理论基础，由于底电池的结构参数变化对电池性能影响很小，本文只探究其他的三结子电池。

2. 实验与理论建模

由图 1 可知, 本文模拟的电池是使用金属有机化合物气相沉积法(MOCVD)制备的倒置四结电池。与目前利用率最高的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池相比, 多加了一节电池, 进一步优化了三结电池禁带宽度的匹配度, 增加了对光谱的利用率, 使四结太阳能电池的效率提高。

本文通过 silvaco TCAD 软件对四结太阳能电池的结构进行理论仿真。由实验数据可知, 在 AM0 光谱下四结电池的短路电流 $I_{sc} = 144.8 \text{ mA}$, 开路电压为 $V_{oc} = 3.129 \text{ V}$, 最大功率 $P_m = 368.9 \text{ mW}$ 。理论模拟仿真后的电池短路电流 $I_{sc} = 154.32 \text{ mA}$, 开路电压 $V_{oc} = 3.124 \text{ V}$, 最大功率 $P_m = 384 \text{ mW}$, 符合良好。产生差异的原因可能是各子电池的吸收层材料的折射率文件来源于网上数据, 与真实的材料数据有差异, 影响了仿真结果。

电极			
p-In _{0.58} Ga _{0.42} As	base	3000 nm	$2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
n-In _{0.58} Ga _{0.42} As	emitter	100 nm	$2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Tunnel junction			
p-In _{0.3} Ga _{0.7} As	base	3000 nm	$2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
n-In _{0.3} Ga _{0.7} As	emitter	100 nm	$2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Tunnel junction			
p-GaAs	base	3000 nm	$2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
n-GaAs	emitter	100 nm	$2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Tunnel junction			
p-GaInp	base	800 nm	$2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
n-GaInp	emitter	900 nm	$2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
电极			

Figure 1. Structure diagram of four-junction InGaP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.58}Ga_{0.42}As battery
图 1. 四结 InGaP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.58}Ga_{0.42}As 电池结构图

3. 结果与分析

3.1. 子电池发射区厚度变化对 I-V 的影响

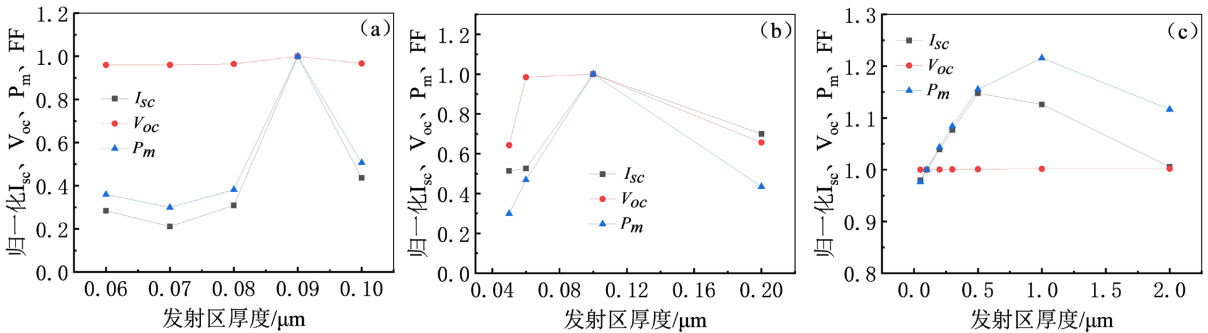


Figure 2. Influence of sub-battery emitter region thickness on electrical properties: (a) InGaP sub-battery; (b) GaAs sub-battery; (c) In_{0.3}Ga_{0.7}As sub-battery

图 2. 子电池发射区厚度对电学性能的影响: (a) InGaP 子电池; (b) GaAs 子电池; (c) In_{0.3}Ga_{0.7}As 子电池

由图 2 可知, 随着子电池发射区厚度的增加, 短路电流都呈现一个先增加后降低的趋势。一方面,

厚度略微增加,吸收的光子数会增加,在运输过程被利用的载流子数增加,导致外量子效率增加,短路电流也会略微地增加。但当厚度继续增加,吸收的光子数虽然变多,载流子在运输过程中复合率增加,碰撞次数增加,串联电阻增加,光电流减小,电池的性能降低,短路电流会减小。电池的开路电压由内建电压决定,改变工作区厚度对内建电压影响小,开路电压几乎不变。最大功率由短路电流决定,变化趋势与短路电流变化相同。由图 2(a)发现改变顶电池的发射区厚度对整个电池性能的影响极大,这是由于顶电池在整个电池中主要吸收短波长光子,当发射区厚度过大,光子无法到底底部被利用,导致四个子电池的输出电流不匹配,电池性能下降。

3.2. 子电池基区厚度变化对 I - V 的影响

由图 3 可知,随着子电池基区厚度变化,短路电流变化趋势与发射区厚度变化时的趋势一致,都是先升高再降低,原因同发射区厚度变化的机理一致。开路电压几乎不变,最大功率的变化与短路电流的变化趋势一致。改变顶电池基区厚度时,电池的电学参数变化幅度大,与发射区厚度变化时相同。

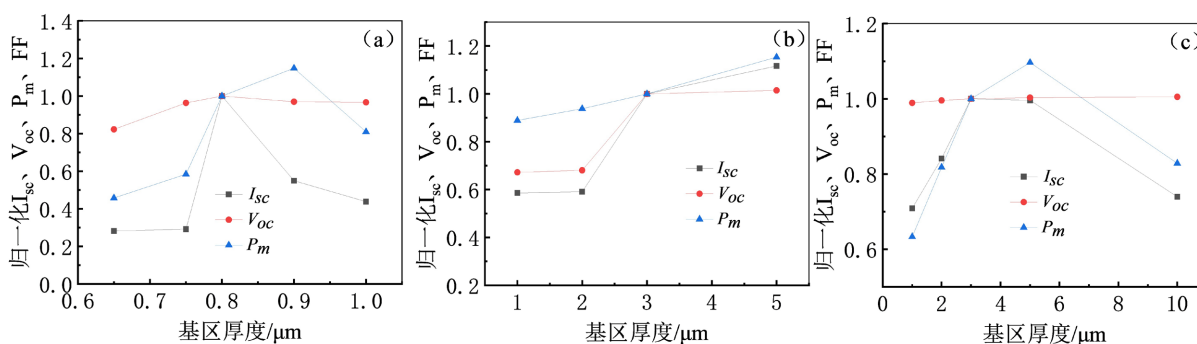


Figure 3. Influence of sub-battery base region thickness on electrical properties: (a) InGaP sub-battery; (b) GaAs sub-battery; (c) In_{0.3}Ga_{0.7}As sub-battery

图 3. 子电池基区厚度对电学性能的影响: (a) InGaP 子电池; (b) GaAs 子电池; (c) In_{0.3}Ga_{0.7}As 子电池

3.3. 子电池发射区掺杂浓度变化对 I - V 的影响

由图 4 可知,改变发射区掺杂浓度,电学参数变化不明显。倒置四结电池基区的厚度比发射区的厚度要大得多,发射区主要是高掺杂区,他的目的是将少量载流子运输到基区,根据半导体扩散理论,当基区厚度足够大时,少数载流子能够有足够的距离进行扩散运动,在这个过程中通过晶格散射、杂质散射等相互作用,产生更多的电子-空穴对,充分地参与到电流传输过程,所以是电池的主要工作区。

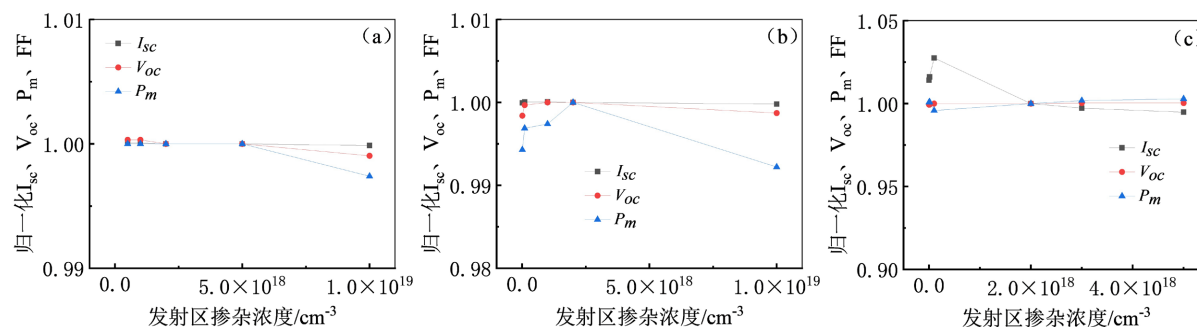


Figure 4. Influence of sub-battery emitter region doping concentration on electrical properties: (a) InGaP sub-battery; (b) GaAs sub-battery; (c) In_{0.3}Ga_{0.7}As sub-battery

图 4. 子电池发射区掺杂浓度对电学性能的影响: (a) InGaP 子电池; (b) GaAs 子电池; (c) In_{0.3}Ga_{0.7}As 子电池

开路电压取决于内建电压的变化，内建电压公式为：

$$V_D = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

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。当改变发射区掺杂浓度时，由于缓冲层的存在，缓冲层可以起到调节和缓冲电场的作用。从能带角度来看，缓冲层改变了空间电荷区的电场分布，使电场分布更加平滑。当发射区掺杂浓度发生变化时，缓冲层中的电荷分布会进行调整，以平衡电场的变化。比如发射区浓度增加，内建电压应该会增强，缓冲层可以储存电荷，对内建电压的影响很小，基区输出的载流子数量不变，对电池的影响很小。

3.4. 子电池基区掺杂浓度变化对 I - V 的影响

由图 5 可知，随着各子电池基区掺杂浓度的增加，短路电流几乎不受影响。粒子数增加，内建电压增大，开路电压和最大功率都增加。短路电流主要取决于少子扩散长度的变化，掺杂浓度较小时，少子迁移率会有略微的降低，短路电流变化不明显。最大功率的变化与开路电压一致。

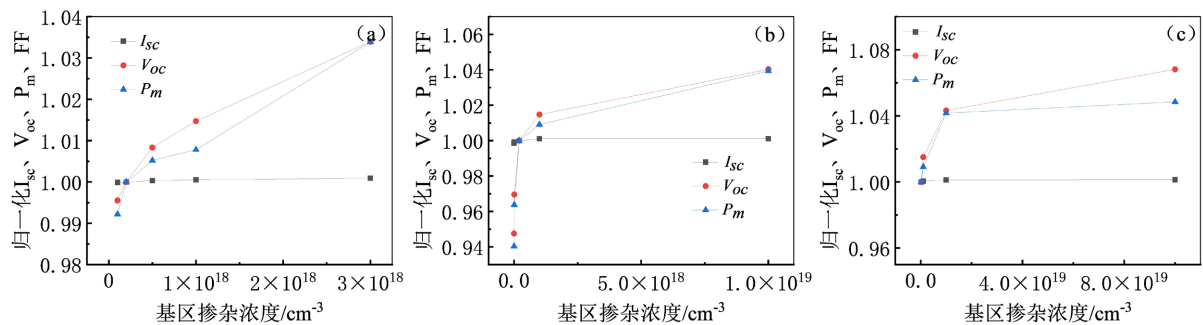


Figure 5. Influence of sub-battery base region doping concentration on electrical properties: (a) InGaP sub-battery; (b) GaAs sub-battery; (c) In_{0.3}Ga_{0.7}As sub-battery

图 5. 子电池基区掺杂浓度对电学性能的影响：(a) InGaP 子电池；(b) GaAs 子电池；(c) In_{0.3}Ga_{0.7}As 子电池

4. 结论

改变工作区厚度对电池性能会有影响。工作区厚度过薄，吸收的光子数会变少，导致电池的光电转换能力降低，光谱响应降低，电池的性能会下降。工作区厚度过厚，吸收的光子数增加，但也同时增加了光子在运输过程中被复合的几率且串联电阻增大，导致性能下降。当子电池对光的吸收能力较弱时可以通过适当增加工作区厚度提高光电转换能力。

改变工作区掺杂浓度对电池性能有影响。工作区掺杂浓度过小，内部载流子数量少，到达空间电荷区被利用的少，短路电流降低电池性能下降，同时掺杂浓度小会导致内建电压变小，载流子被分离的效率降低，开路电压降低电学性能降低。工作区掺杂浓度过高，载流子数目增加，粒子碰撞以及散射的概率增加，能带结构会发生变化使载流子运输变得困难，电池的电学性能下降。

参考文献

- [1] 张延清, 齐春华, 周佳明, 等. 倒置四结(IMM4J)太阳电池中 InGaAs(1.0 eV)和 InGaAs(0.7 eV)子电池高能电子辐照退火效应[J]. 物理学报, 2020, 69(22): 420-432.
- [2] King, R.R., Bhusari, D., Larrabee, D., et al. (2012) Solar Cell Generations over 40% Efficiency. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20, 801-815. <https://doi.org/10.1002/pip.1255>
- [3] 王波, 周丽华, 施祥蕾, 等. 基于晶格大失配 In_{0.58}Ga_{0.42}As 材料的高效四结太阳电池[J]. 微纳电子技术, 2024,

61(5): 58-64.

- [4] 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.
- [5] 李相叟. 倒置三结太阳能电池 TCAD 仿真建模及低温辐照效应仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023: 59-60.