

摘要

核电池,又被称作放射性同位素电池。由于核电池具有能量密度高、半衰期长、能量稳定、易集成等特点成为了微机电系统的理想选择。微机电系统是微电路和微机械按功能要求在芯片上的集成,具有微型化、批量生产、集成化、多学科交叉等特点。本文主要研究的是 β 辐射伏特效应核电池(后简称 β 核电池),它是将 β 放射源衰变时释放的能量转换为电能的装置。 β 核电池的研究内容主要包括两个方面:一是选择合适的放射源和半导体换能器件材料,二是 β 核电池的换能器件结构。通过对 β 核电池进行优化设计,进而提升电池的输出性能。本文的工作有以下两个部分:

一、本文主要利用基于蒙特卡罗方法的 MCNP 软件(Monte Carlo N-Particle)进行模拟计算。首先,模拟 Ti^3H_2 源的自吸收效应和 Ti^3H_2 源在 SiC 半导体材料中的能量沉积分布。其次,通过计算公式分析了掺杂浓度与少子扩散长度和耗尽层宽度等基本参数之间的关系。最后,通过计算最大输出功率密度和能量转换效率对 β 核电池的输出性能进行优化。结果表明: Ti^3H_2 的最佳厚度为 $0.7\ \mu\text{m}$, p 区和 n 区掺杂浓度为 $2.5 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$, 结深为 $0.1\ \mu\text{m}$, 电子和空穴表面复合速度为 $1 \times 10^6\ \text{cm/s}$, 短路电流密度为 $0.11\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 开路电压为 $2.23\ \text{V}$, 最大输出功率密度为 $0.22\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 填充系数为 0.94 , 能量转换效率为 2.37% 。

二、利用 MCNP 软件模拟 ^{63}Ni 源在 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 半导体材料中的能量沉积分布。然后,利用 COMSOL Multiphysics 软件对应 β 核电池的结构参数进行优化,计算出其最大输出功率密度,优化输出性能。同时,利用 COMSOL Multiphysics 软件也可以模拟能带结构,载流子的传输和收集。结果表明,优化后的异质结 β 核电池具有更有利的能带结构,有利于载流子的输运和收集。优化后的 p 型 GaAs 帽子层的掺杂浓度是 $2 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$, p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 窗口层的掺杂浓度是 $9 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$, p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 发射层的掺杂浓度是 $1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$, n 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 基层的掺杂浓度是 $8 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$, n 型 GaAs 缓冲层的掺杂浓度是 $1 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$, p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 窗口层的 Al 摩尔系数是 0.9 , p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 发射层的 Al 摩尔系数是 0 , n 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 基层的 Al 摩尔系数是 0.4 , p 型 GaAs 帽子层的厚度是 $0.01\ \mu\text{m}$, p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 窗口层的厚度是 $0.01\ \mu\text{m}$, p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 发射层的厚度是 $3.6\ \mu\text{m}$, n 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

基层的厚度是 $3\ \mu\text{m}$, n 型 GaAs 缓冲层的厚度是 $0.1\ \mu\text{m}$, 短路电流密度为 $93.65\ \text{nA}/\text{cm}^2$, 开路电压为 $1.23\ \text{V}$, 最大输出功率密度为 $107.04\ \text{nW}/\text{cm}^2$, 能量转换效率为 6.14% 。

本文的主要研究内容为: 首先, 模拟放射源的自吸收效应, 确定放射源的最佳厚度; 其次, 模拟放射源在半导体材料中的能量沉积分布; 最后, 通过理论计算公式或者 COMSOL Multiphysics 软件对 β 核电池的输出性能进行优化。本文的研究结果对 β 核电池的发展具有一定的推动作用。此外, 本文的蒙特卡罗方法模拟、理论计算和 COMSOL Multiphysics 软件模拟可应用于任何含有其他半导体材料和 β 放射源的 β 核电池。

关键词:

β 核电池, ^3H 源, ^{63}Ni 源, SiC, GaAs, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, pn 结

Abstract

The nuclear battery, also known as radioisotope battery. Nuclear battery is an ideal choice for MEMS because of its high energy density, long half-life, stable energy and easy integration. Microelectromechanical system (MEMS) is the integration of microcircuits and micromachinery on the chip according to the function requirements, which has the characteristics of miniaturization, mass production, integration and multidisciplinary crossing. In this paper, we mainly study the betavoltaic battery (hereafter referred to as beta nuclear battery), which is the device that converts the decay energy released by radioactive sources into electricity. The research content of beta nuclear battery mainly includes two aspects: one is the selection of appropriate radioactive sources and semiconductor energy converter materials, the other is the structure of energy converter of the beta nuclear battery. By optimizing the design of the beta nuclear battery, the output performance of the battery is improved. The work of this paper consists of the following two parts:

1. In this paper, MCNP software (Monte Carlo N-Particle) based on Monte Carlo method is used for simulation calculation. Firstly, the self-absorption effect of Ti^3H_2 source and the energy deposition distribution of Ti^3H_2 source in the SiC semiconductor material are simulated. Then, the relationship between doping concentrations and basic factors such as minority carrier diffusion lengths and the width of the depletion region are analyzed via the calculation formulas. Finally, the maximum output power density and energy conversion efficiency are calculated to optimize the output performance of the beta nuclear battery. The results show that the optimal thickness of the Ti^3H_2 is about 0.7 μm , the doping concentrations of P-region and N-region are $2.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, and the junction depth of PN junction is 0.1 μm . The surface recombination velocities of electron and hole are $1 \times 10^6 \text{ cm/s}$, respectively. The short-circuit current is 0.11 $\mu\text{A/cm}^2$, the open-circuit voltage is 2.23 V, the maximum output power density is 0.22 $\mu\text{W/cm}^2$, the filling factor is 0.94, and the energy conversion efficiency is 2.37%.

2. Firstly, the energy deposition distribution of ^{63}Ni source in $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ semiconductor material is simulated based on Monte Carlo method, and then the generation rate distribution of electron-hole pairs is obtained. Then, COMSOL Multiphysics software was used to optimize the structural parameters of the energy converter, calculate the maximum output power density, and optimize the output performance. At the same time, COMSOL Multiphysics software can also simulate the energy band structure, transport and collection of carriers. The results show that the optimal heterojunction beta nuclear battery have more favorable energy band structure, which is conducive to the transport and collection of carriers. The thickness of P-type GaAs cap layer is $0.01\text{ }\mu\text{m}$, the thickness of P-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ window layer is $0.01\text{ }\mu\text{m}$, the thickness of P-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ emission layer is $3.6\text{ }\mu\text{m}$, the thickness of N-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ base layer is $3\text{ }\mu\text{m}$, and the thickness of N-type GaAs buffer layer is $0.1\text{ }\mu\text{m}$. The doping concentration of P-type GaAs hat layer is $2\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$, that of P-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ window layer is $9\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$, and that of P-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ emission layer is $1\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$. The doping concentration of N-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ base layer is $8\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$, the doping concentration of N-type GaAs buffer layer is $1\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$, the Al mole coefficient of P-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ window layer is 0.9, and the Al mole coefficient of P-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ emission layer is 0. The Al molar coefficient of N-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ base layer is 0.4, the short-circuit current density is 93.65 nA/cm^2 , the open-circuit voltage is 1.23 V , the maximum output power density is 107.04 nW/cm^2 , and the energy conversion efficiency is 6.14% .

The main research contents of this paper are as follows: firstly, the self-absorption effect of radioactive isotope sources is simulated and the optimal thickness of radioactive isotope sources is determined; Secondly, the energy deposition distribution of radioactive isotope sources in semiconductor materials is simulated. Finally, the theoretical calculation formulas or COMSOL Multiphysics software are used to calculate the parameters of the beta nuclear battery in theory or software simulation, so as to optimize the output performance of the beta nuclear battery. The results of this paper have a certain promoting effect on the development of beta nuclear battery. In addition, the Monte Carlo method simulation, theoretical

calculation and COMSOL Multiphysics software simulation in this paper can be applied to any beta nuclear battery containing other semiconductor materials and beta radioactive isotope sources.

Keywords:

Beta nuclear battery, ^3H source, ^{63}Ni Source, SiC, GaAs, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, pn junction

目 录

第一章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 核电池的分类	1
1.3 核电池的应用	2
1.4 β 辐射伏特效应核电池的研究现状	3
1.5 本文的主要研究内容	5
第二章 β 辐射伏特效应核电池原理	7
2.1 β 粒子与物质相互作用	7
2.2 β 辐射伏特效应核电池的能量转换机制	7
2.3 β 辐射伏特效应核电池中放射源和换能材料的选择	10
2.3.1 β 辐射伏特效应核电池中放射源的选择	10
2.3.2 β 辐射伏特效应核电池中换能材料的选择	11
第三章 $\text{SiC-}^3\text{H}$ 源 β 辐射伏特效应核电池的研究	14
3.1 本章放射源和换能材料的选择	14
3.2 放射源的自吸收效应和放射源在半导体材料中的能量沉积分布	15
3.2.1 放射源的自吸收效应	15
3.2.2 放射源在半导体材料中的能量沉积分布	21
3.3 $\text{SiC-}^3\text{H}$ 源 β 辐射伏特效应核电池的输出性能计算	25

3.4 本章小结	32
第四章 GaAs/Al_xGa_{1-x}As-⁶³Ni 源 β 辐射伏特效应核电池的研究 ...	34
4.1 本章放射源和换能材料的选择	34
4.2 放射源在半导体材料中的能量沉积分布	35
4.2 GaAs/Al _x Ga _{1-x} As- ⁶³ Ni 源 β 辐射伏特效应核电池的输出性能计算	38
4.4 本章小结	57
第五章 总结和展望	58
5.1 研究工作总结	58
5.2 研究工作展望	59
参考文献	60
作者简介及在学期间所取得的科研成果	68
致 谢	71

第一章 引言

1.1 研究背景

微机电系统(MEMS)是微电路和微机械按功能要求在芯片上的集成,尺寸通常在毫米或微米级,在交叉学科领域有着重要的研究价值,涉及到电子、机械、材料、信息等多项科学技术工程^[1-5]。微机电系统具有微型化、批量生产、集成化、多学科交叉等特点^[5-8]。因此,微机电系统在生物医疗、国防领域、航空探测、航天探测、海底探测、极地探测、环境监测均有着广泛的应用前景^[5, 9-11]。核电池是将放射性同位素衰变时释放的能量转换为电能的装置^[12, 13]。由于核电池具有能量密度高、寿命长、能量稳定、易集成等特点成为了微机电系统的理想选择^[14, 15]。

1.2 核电池的分类

根据能量转换机制,核电池有以下两种。一是辐射热转换核电池,其分为静态转换核电池和动态转换核电池,静态转换核电池主要包括温差热电转换核电池、热离子发射核电池、碱金属热电转换核电池、热致光伏效应核电池,动态转换核电池主要包括布雷诺循环核电池、兰金循环核电池、斯特林循环核电池^[16-22]。二是辐射粒子转换核电池,其分为直接转换核电池和核电池间接转换,直接转换核电池主要包括直接收集核电池和辐射伏特效应核电池,间接转换核电池主要包括压电悬梁臂核电池、射线致光伏效应核电池、磁约束电磁辐射核电池、衰变耦合LC 震荡核电池^[23-27]。

根据上述的能量转换机制的分类,辐射伏特效应核电池是核电池研究领域的主要内容。根据放射源的种类,其可以分为 α 、 β 和 γ 核电池。其中,由于 α 放射源衰变能量较高,在半导体材料中产生辐射损伤,导致核电池的寿命缩短。 γ 放射源衰变释放出的高能 γ 射线,具有很强的穿透力,需要较厚的材料作屏蔽,以减低 γ 射线的强度,使得辐射伏特效应核电池难以微型化。与 α 放射源相比, β 放射源衰变释放的能量可以减少对半导体材料造成的损伤,同时穿透深度适中。因此, β 源是辐射伏特效应核电池的首选放射源。根据半导体换能器件结构分类,

β 辐射伏特效应核电池主要分为 pn 结核电池、pin 结核电池和肖特基结（金属-半导体）核电池。其中，pn 结核电池又分为同质结核电池和异质结核电池。

1.3 核电池的应用

核电池是一种新型能源，在无线网络传感器、医学领域、航空领域、航天领域、深海领域和极地领域中都有广泛的应用^[28, 29]。

（1）无线网络传感器的应用：

传感器种类很多，主要包括：流量、磁场、温度、湿度、pH 值、加速度、压力等。典型的微机械传感器件主要包括加速度计和压力传感器^[30, 31]。

（2）医学领域的应用：

在医学上，核电池最早应用于医疗植入装置，如心脏起搏器，它具有工作稳定、使用寿命长、体积小、重量轻、功率密度高和危险性小等优点。除此之外，放射性同位素电池现在还能用作人工血压调节器、人工肾脏、人工肺脏、神经模拟器等方面^[32, 33]。

（3）航空领域的应用：

1958 年，美国发射的人造地球卫星的导航系统所用的无线电导航设备的电源就是核电池。

（4）航天领域的应用：

从上世纪中叶起，木星和土星探测器都使用了放射性同位素温差发电机作为电源。此外，受到火星环境温度的影响，着陆在火星上的宇宙飞船也使用核电池作为电源。

（5）深海领域的应用：

在深海里，化学电池和燃料电池的使用寿命太短，太阳能电池也不能使用。因此，使用寿命长的核电池便成了设备工作时的理想电源。例如，用核电池作水下监听器的电源来监听敌方潜水艇的活动；用核电池作海底潜艇的导航信标，使能够航标能够几秒钟闪光一次；又或者用核电池作海底电缆的无线电中继站电源，能够避免海水压力问题^[11, 12]。

（6）极地领域的应用

20 世纪 60 年代初到现在，多个国家相继将核电池应用在环境恶劣、地理位

置险要的偏僻地区和极地地区。例如，1976 年，将核电池用作南极建立的南极气候观察站的电源；1972-1974 年，中国科学院上海应用物理研究所为了保证航标灯能够长期工作，使用了电热转换核电池。

1.4 β 辐射伏特效应核电池的研究现状

1937 年，Becker 和 Kruppke 通过电子轰击半导体材料硒时，在半导体材料硒内部观察到了电子-空穴对的产生，并将这一现象命名为电子伏特效应，这是人们第一次发现辐射伏特效应现象^[23]。1953 年，Rappaport 等人成功制造首个 pn 结 β 核电池^[34]。 β 放射源 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) 辐照半导体材料硅时，在半导体材料内部发现了电子-空穴对的产生，并且得到了电流-电压特性曲线，该电池的最大转换效率为 0.4%，最大输出功率为 0.8 mW。此后， β 核电池的研究成为了一个话题，对优化电池输出性能的研究也越来越多，特别是对最大输出功率密度和转换效率的提高。

β 核电池的研究主要包括两方面：一是选择合适的放射源和半导体换能器件材料，二是核电池的换能器件结构。常见的放射源主要有 ^3H 源、 ^{63}Ni 源， $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源， ^{147}Pm 源。放射源的选取需要考虑其衰变粒子的平均能量和最大能量、半衰期和衰变类型等。其中， ^3H 源和 ^{63}Ni 源是常用的放射源。目前，对放射源的研究主要包括厚度、粒子平均出射能量、自吸收效应和表面出射能谱等方面。2016 年，Gui Gui 等人我们建立了平面 pn 结 β 核电池的模型，研究了 ^{63}Ni -4H-SiC 的自吸收效应，包括同位素杂质、自吸收和全 β 能谱。通过模拟的 pn 结结构和放射源厚度对电池输出性能的影响，实现了装置的优化设计和最大的能量转换效率^[35]。2019 年，Russo 等人建立了三维耦合配置 β 核电池模型（矩形柱阵列和圆柱孔阵列），既增加放射源和纹理换能器表面之间的界面，也增加了到换能器件的能量沉积比^[36]。2019 年，吴猛等人介绍了一种由多层硅 p-n 结和 ^{63}Ni 源交替堆叠而成的高转换效率电池，研究了不同厚度源内部的自吸收效应和放射源在换能器件中的能量沉积分布。与体积和源活度相同的简单双层结构电池相比，转换效率和最大输出功率显著提高^[37]。2020 年，Swastya 等人研究了 ^{63}Ni 源对矩形平面设计的 4H-SiC 基 β 核电池的自吸收效应。 β 粒子在 n^+ 衬底中的分布必须有一个狭窄的角分布，以最小化原子间相互作用造成的能量损失。因此，为了使电学性能最

大化, 电池的总厚度应考虑 β 粒子的最大穿透范围^[28]。2021 年, Rahastama 等人研究了圆柱形 ^{63}Ni 源的自吸收效应, 圆柱形设计的自吸收效应优于矩形设计自吸收效应, 同时圆柱面放大率对能量沉积也有积极影响^[38]。

半导体换能器件材料主要有 Ge、Si、GaAs、GaP、4H-SiC、GaN、ZnO、Diamond 等, 换能材料的选择不仅要考虑半导体材料的禁带宽度, 还需要考虑及放射源衰变时释放的能量是否超过半导体材料的辐射损伤阈值能量和半导体材料工艺的影响。2014 年, Gholam 等人制作了 ^{63}Ni -GaAs 基 β 核电池。当 $N_a=1\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 和 $N_d=1\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 时, 开路电压为 0.445 V。当放射源活度范围为 100 mCi 到 0.001 mCi 时, 它的温度敏感度传感器范围为 -2.42 mV/K 到 -3.41 mV/K^[39]。2017 年, Butera 等人研究了一种温度范围为 -20 °C 至 70 °C 的 ^{63}Ni -GaAs 基 β 核电池对输出性能的影响。饱和电流随温度的降低而减小, 而开路电压、短路电流、最大功率和能量转换效率随温度的升高而降低。在 -20°C 时, 其最大输出功率和内部转换效率分别为 1.8 pW 和 7%^[40]。2018 年, Munson 等人设计、制作和实验测试了 ^{63}Ni -GaN 基 β 核电池, 其最大输出功率为 0.52 nW^[41]。2018 年, 刘玉敏等人研究了一种 ^{63}Ni -4H-SiC 基 pn 结 β 核电池。结果表明, 当 ^{63}Ni 源的厚度由 0.002 μm 增加到 10 μm 时, 理论最大器件转换效率由 16.77% 增加到 23.51%, 总转换效率由 16.73% 降低到 1.48%。最后, 最大输出功率密度为 0.36 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 器件转换效率为 23.51%^[42]。2019 年, Sha Xue 等人提出并实验验证了提高核电池的能量转换效率的不同技术, 在电池结构中增加了一层薄薄的闪烁体层, 通过间接(光产生)和直接(电子-空穴对产生)收集辐射能量来提高能量转换效率。闪烁层还充当能量降解器, 以减少带电粒子的能量, 从而增加其敏感区域的能量沉积^[43]。

换能器件结构主要包括 pn 结(同质结和异质结), pin 结, 肖特基结(金属-半导体)。2012 年, Chen 等人发明了一种由 ^{63}Ni 薄膜作为放射源的单壁碳纳米管薄膜-硅异质结构成的新型 β 核电池。在 3.3 mCi/ cm^2 的 ^{63}Ni 源辐照下, 短路电流密度为 13 nA/ cm^2 , 开路电压为 6.5 mV, 电流放大率约为 2000, 能量转换效率为 0.15%。与其他类型的 β 核电池相比, 单壁碳纳米管薄膜-硅异质结构成的新型 β 核电池具有更高的短路电流密度和电流放大率^[44]。2019 年, Reyyan 等人首次对 GaN 核电池和 GaN-Si 异质结 β 核电池进行了研究和比较。与 GaN 核电池相比, GaN-Si 异质结 β 核电池有更高的电子-空穴对收集效率, 有更低反向

饱和电流, 获得更高的开路电压, 使得电池的输出功率增加, 进而提升电池的输出性能^[1, 45]。2020 年, Mina 等人制备了一种基于还原氧化石墨烯(rGO)/硅异质结的新型 β 核电池。不对称的手指形电极会导致金属/还原氧化石墨烯界面附近的能带弯曲, 利用这种内部电场, 还原氧化石墨烯中产生的电子-空穴对将被分离和收集, 使得外部电路中的总电流将会增强, 进而使得转换效率更高^[15]。2021 年, 王宇等人研究了 GaP-Si 异质结和 Si 基肖特基结 β 核电池的输出性能。对于 ^{63}Ni -GaP-Si β 核电池, 在优化的 GaP 层厚度和 Si 掺杂浓度下, 最大输出功率密度为 $0.189 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 转换效率为 1.83%; 对于含有 Al、Ti、Ag 和 W 的 Si 基肖特基势垒电池, 在相同的金属层厚度和 Si 掺杂浓度下, ^{63}Ni -Al-Si β 核电池具有最佳的电输出性能。当金属 Al 厚度为 $0.1 \mu\text{m}$, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 时, 输出功率密度和转换效率分别为 $0.121 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和 1.18%; 计算结果表明, ^{63}Ni -GaP-Si 电池比 ^{63}Ni -Al-Si 肖特基电池具有更好的电输出性能^[46]。在 2022 年, 郑人洲等人制备了具有 pn 结和肖特基结 β 核电池。对于 GaAs 基 pn 结核电池, 输出功率密度最大为 $0.135 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 能量转换效率为 2.63%。在选定的 Au、Pd、Ni 和 Pt 四种金属中, Pt-GaAs 电池由于具有较大的功函数而具有最佳的输出性能。最大输出功率密度为 $0.169 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 电池相关输出参数分别为 $0.234 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、0.835 V、86.5%和 3.29%^[47]。

1.5 本文的主要研究内容

本文对 β 核电池的输出性能进行系统计算, 共分为五章, 主要工作为第三章和第四章, 主要的研究内容和结论如下:

一、首先, 利用 MCNP 软件模拟 Ti^3H_2 源的自吸收效应和 Ti^3H_2 源在 SiC 半导体材料中的能量沉积分布。然后, 通过计算公式分析了掺杂浓度与少子扩散长度和耗尽层宽度等基本参数之间的关系。最后, 通过计算最大输出功率密度和能量转换效率对 β 核电池的输出性能进行优化。

二、首先, 利用 MCNP 软件模拟 ^{63}Ni 源在 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 半导体材料中的能量沉积分布。然后, 利用 COMSOL Multiphysics 软件对 β 核电池的结构参数进行优化, 计算出电池的最大输出功率密度, 优化电池的输出性能。同时, 利用 COMSOL Multiphysics 软件也模拟能带结构, 载流子的传输和收集。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/748020011133006043>