



# Si基<sup>63</sup>Ni辐射伏特效应同位素电池的优化设计与分析

汤晓斌, 丁丁, 刘云鹏, 陈达\*

南京航空航天大学材料科学与技术学院核科学与工程系, 南京 210016

\* E-mail: dachen@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2011-11-05; 接受日期: 2011-12-26

中国博士后科学基金资助项目(批准号: 20100481140)和南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(批准号: Y1065-063)

**摘要** 目前国内外研究的各类微能源中,  $\beta$  辐射伏特效应同位素电池因能量密度高、寿命长、输出性能稳定等优点在许多领域具有广泛的应用前景. 本文从辐射伏特效应的基本原理出发, 通过蒙特卡罗程序 MCNP 模拟计算  $\beta$  粒子在半导体材料中的输运过程, 得出了辐生电流、开路电压等性能参数的计算公式, 探讨了少子扩散长度、掺杂浓度、结深等对性能的影响, 并提出了采用硅基 <sup>63</sup>Ni 源的同位素电池的最佳设计参数: <sup>63</sup>Ni 源质量厚度为 1 mg/cm<sup>2</sup>, 单晶硅半导体 P 区掺杂浓度为  $1 \times 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>, N 区掺杂浓度为  $3.16 \times 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>, 结面积为 1 cm<sup>2</sup>, 结深为 0.3  $\mu$ m, 总厚度不超过 160  $\mu$ m. 得到的短路电流、开路电压、最大输出功率及转化率分别为: 573.3 nA, 0.253 V, 99.85 nW, 4.94%. 为低功率场所, 如微型机电系统、心脏起搏器等所需的微能源提供参数依据.

**关键词**

辐射伏特效应  
半导体材料  
同位素电池

相对于传统微能源, 利用核衰变能的同位素微能源不需要外界提供燃料就能独立工作, 而且结构简单, 使用寿命长, 采用 MEMS(微机电系统)工艺易于集成, 可以满足 MEMS 对微能源的要求. 其中  $\beta$  辐射伏特效应同位素电池因具有能量密度高、体积小、抗干扰性强、能量转化效率高等优势能更有效地解决 MEMS 能源的供应问题<sup>[1, 2]</sup>. 但是, 目前国内在这方面的研究仍处于初级阶段, 现有的硅基 PN 结式同位素电池输出功率和转化效率都比较低. 西北工业大学孙磊等研制的 <sup>63</sup>Ni-Si 基电池的最大输出功率达到 0.79 nW/mm<sup>2</sup>, 但转化效率为 0.767%<sup>[3]</sup>, 厦门大学郭航等研制的 <sup>147</sup>Pm-Si 基电池的最大输出功率为 4.89

nW/mm<sup>2</sup>, 转化效率为 1.75%<sup>[4]</sup>. 美国 Deus 报道的气态 <sup>3</sup>H-a-Si(无定型硅)基电池的最大输出功率为 1.36 nW/mm<sup>2</sup>, 转化效率为 1.2%<sup>[5]</sup>.

本文选用半导体材料 Si 和放射性同位素 <sup>63</sup>Ni, 构建了单层平板式  $\beta$  辐射伏特效应同位素电池的理论模型; 从辐射伏特效应的基本原理出发, 通过蒙特卡罗程序 MCNP 模拟计算  $\beta$  粒子在半导体材料中的输运过程, 得出了辐生电流、开路电压等性能参数的计算公式; 探讨了少子扩散长度、耗尽区宽度、反向饱和电流、掺杂浓度、结深等对电池性能的影响, 并对电池的初始设计参数进行了优化设计.

英文版发表信息: Tang X B, Ding D, Liu Y P, et al. Optimization design and analysis of Si-<sup>63</sup>Ni betavoltaic battery. Sci China Tech Sci, 2012, 55: 990-996, doi: 10.1007/s11431-012-4752-6

## 1 理论计算模型

### 1.1 辐射伏特效应同位素电池的基本结构与工作原理

如图 1 所示, 单层平板式  $\beta$  辐射伏特效应同位素电池主要由同位素源、半导体及电极材料三部分组成. 其工作原理为: 同位素源衰变产生的  $\beta$  粒子入射到半导体中, 通过电离激发产生电子空穴对, 当电子或空穴运动到耗尽区时, 在内建电场作用下产生分离, 即电子向 N 区、空穴向 P 区运动, 两侧加负载形成回路, 产生电流, 实现了核衰变能到电能的转换.

### 1.2 辐生电流的计算

从现有的国内外文献看, 辐生电流的计算主要基于肖克莱关于半导体材料 PN 结的理论模型, 根据一定的假定条件, 建立起电流密度方程和载流子连续性方程, 再结合一定的边界条件进行求解. 但是这种求解方式计算过程复杂, 而且为了方便求解往往要采用一些假定的简化条件, 计算复杂且工作量大, 计算精度无法保证<sup>[6, 7]</sup>. 众所周知, 蒙特卡罗方法是模拟放射性粒子在材料中输运过程精度最高的计算方法. 因此, 本文采用蒙特卡罗计算程序 MCNP 模拟同位素源衰变产生的  $\beta$  粒子在半导体材料中的输运过程, 通过计算  $\beta$  粒子在半导体材料中的能量沉积等参量<sup>[8, 9]</sup>, 从而计算辐生电流的具体数值. 这种计算方式相对于解析求解, 计算过程大为简化, 而且由于 MCNP 的计算具有较高精度从而保证了计算结果的准确性.

理论上, 单位厚度半导体材料中的电子空穴对的产生率可以由下式计算:

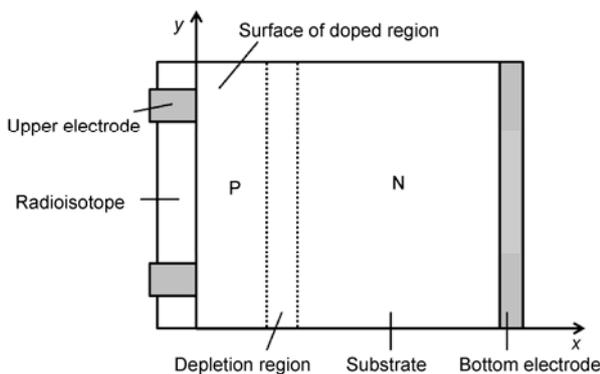


图 1 单层平板式  $\beta$  辐射伏特效应同位素电池的基本结构

$$G = \frac{A \cdot E}{\varepsilon}, \quad (1)$$

式中,  $A$  为同位素源活度,  $E$  为 MCNP 计算的单个  $\beta$  粒子在半导体材料中的能量沉积,  $\varepsilon$  为辐射电离能, 即每产生一个电子空穴对所需要的能量. 对硅半导体,  $\varepsilon=3.64 \text{ eV}$ .

在耗尽区内所产生的电子空穴对可认为完全收集, 而在耗尽区外电子空穴对的收集效率可由下式给出<sup>[10, 11]</sup>:

$$CE = 1 - \tanh \frac{d}{L}, \quad (2)$$

式中,  $d$  为离耗尽区的距离,  $L$  为少数载流子扩散长度,  $\tanh$  为双曲正切函数. 则辐生电流可以表示为下式:

$$\begin{aligned} I_R &= \int_0^H CE(x) \cdot q \cdot G(x) dx = \frac{qA}{\varepsilon} \int_0^H CE(x) \cdot E(x) dx \\ &= \frac{qA}{\varepsilon} \sum_{n=1}^k CE(n) \cdot E(n), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $H$  为半导体的厚度,  $CE(x)$  为电子空穴对收集几率,  $q$  为电子电量,  $E(x)$  为能量沉积函数,  $E(n)$  为 MCNP 计算的第  $n$  层半导体材料中的能量沉积值,  $k$  为 MCNP 中半导体材料所划分的总层数.

### 1.3 电池性能参数的计算

当同位素电池加负载时, 辐生电流流经负载, 并在负载两端建立起端电压, 由等效电路模型可以得出, 短路电流  $I_{SC}$ , 开路电压  $V_{OC}$  和最大输出功率  $P_m$  有如下关系<sup>[7]</sup>:

$$I_{SC} = I_R, \quad (4)$$

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_R}{I_0} + 1 \right), \quad (5)$$

$$P_m = FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}, \quad (6)$$

式中,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $I_0$  为 PN 结的反向饱和电流,  $FF$  为填充因子.

填充因子  $FF$  可以由如下经验式计算<sup>[8]</sup>:

$$FF = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0.72)}{v_{OC} + 1}, \quad (7)$$

式中,  $v_{OC}$  为归一化开路电压, 且  $v_{OC} = \frac{qV_{OC}}{kT}$ .

电池的转化效率可以由(8)式计算:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{AEq}, \quad (8)$$

式中,  $P_m$  为电池的最大输出功率,  $P_{in}$  为  $\beta$  粒子的入射功率,  $A$  为同位素源的活度(对单层平板式, 取同位素源的单面表面源活度),  $\bar{E}$  为入射  $\beta$  粒子的平均能量,  $q$  为电子电量.

## 2 电池参数的优化设计与分析

单晶硅是目前研究最成熟的半导体材料, 因其具有耐高温、抗辐射等特性已广泛用于同位素电池的研究中. 同位素源的选择需要综合安全性、可靠性、半衰期及对半导体材料的损伤等因素,  $^{63}\text{Ni}$  源衰变产生的  $\beta$  粒子的能量范围为 0~66.7 keV, 平均动能为 17.1 keV, 最大动能为 66.7 keV 的辐射粒子根本穿透不了人的真皮, 并且远低于对硅晶格造成无法恢复性损伤的阈值 200~250 keV. 因此本文选取了单晶硅和  $^{63}\text{Ni}$ , 对其设计参数进行了优化分析.

### 2.1 同位素源的自吸收效应

同位素源衰变产生的  $\beta$  粒子因在源本体内部的输运过程而损失能量, 导致表面源活度和出射功率的减弱, 即存在自吸收现象. 图 2 给出了由 MCNP 计算的不同丰度的  $^{63}\text{Ni}$  同位素源表面源(单面)活度( $A_s$ )与质量厚度( $T_m$ )的关系, 可以看出表面源活度随着质量厚度的增加而增大, 而当质量厚度约为 5.2  $\text{mg}/\text{cm}^2$  时, 表面源活度达到饱和. 当质量厚度为 1  $\text{mg}/\text{cm}^2$  时, 表面活度约为饱和时表面源活度的 80%, 因此从提高源的利用率的角度, 可选择质量厚度为 1  $\text{mg}/\text{cm}^2$  的  $^{63}\text{Ni}$  同位素源.

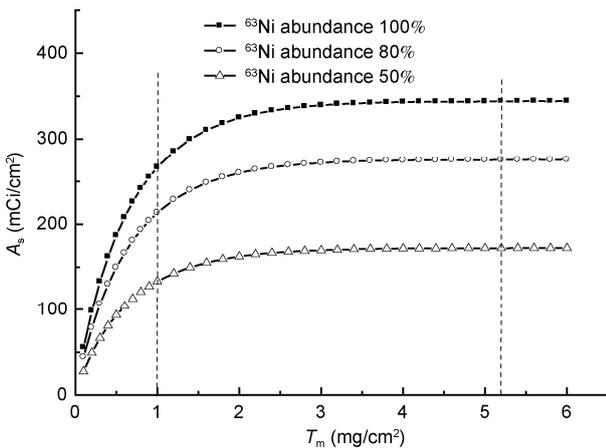


图 2 不同丰度的  $^{63}\text{Ni}$  源表面源(单面)活度与其质量厚度的关系

### 2.2 $\beta$ 粒子在半导体材料中的能量沉积

图 3 给出了由 MCNP 计算所得到的质量厚度为 1  $\text{mg}/\text{cm}^2$  的  $^{63}\text{Ni}$  同位素源  $\beta$  粒子沿硅半导体厚度方向的能量沉积分布及累积沉积能比重, 可以看出  $\beta$  粒子的能量主要沉积在半导体的表层, 沉积能以近似指数衰减的形式沿厚度方向分布, 当半导体厚度约为 5  $\mu\text{m}$  时, 累积沉积能占总沉积能量的比重达到 80%, 当厚度约为 20  $\mu\text{m}$  时, 累积沉积能比重达到 99.9%.

### 2.3 少数载流子扩散长度

少数载流子扩散长度  $L$  是少子复合之前扩散的平均距离. 由(2)式可以看出, 少子扩散长度是影响载流子收集效率的直接因素, 而且少子扩散长度越长, 在耗尽区外产生的电子空穴对就越容易扩散到耗尽区, 对辐生电流的贡献越大, 相应的也就能提高电池性能.

少子扩散长度可以由下式计算:

$$L = \sqrt{D\tau} = \sqrt{\frac{kT}{q} \mu\tau}, \quad (9)$$

式中,  $D$  为少子扩散系数,  $\tau$  为少子寿命,  $\mu$  为少子迁移率.

对于硅半导体, 根据少子迁移率及少子寿命的经验公式, P 区和 N 区的少子扩散长度可以分别表示为<sup>[12]</sup>

$$L_n = \sqrt{\frac{kT}{q} \left[ 232 + \frac{1180}{1 + \left( \frac{N_A}{8 \times 10^{16}} \right)^{0.9}} \right] \cdot \frac{1}{3.45 \times 10^{-12} N_A + 9.5 \times 10^{-32} N_A^2}}, \quad (10)$$

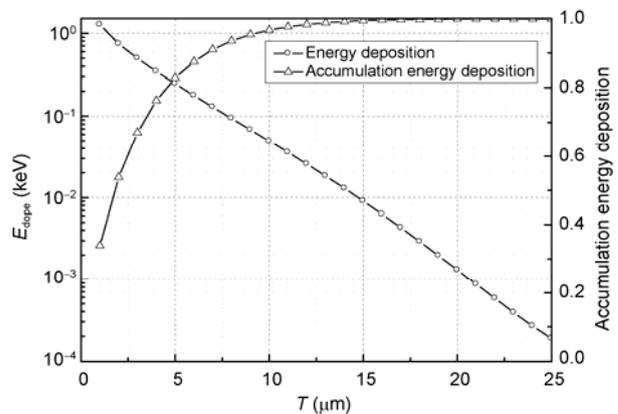


图 3  $^{63}\text{Ni}$  源  $\beta$  粒子沿硅半导体厚度方向的能量沉积分布

$$L_p = \sqrt{\frac{kT}{q} \left[ 130 + \frac{370}{1 + \left( \frac{N_D}{8 \times 10^{17}} \right)^{1.25}} \right] \cdot \frac{1}{7.8 \times 10^{-13} N_D + 1.8 \times 10^{-31} N_D^2}}, \quad (11)$$

其中,  $L_n, N_A$  分别为 P 区的少子(电子)扩散长度和掺杂浓度,  $L_p, N_D$  分别为 N 区的少子(空穴)扩散长度和掺杂浓度, 扩散长度的单位  $\mu\text{m}$ , 掺杂浓度单位为  $\text{cm}^{-3}$ .

由经验公式(10)和(11)可以作出常温下(300 K)硅半导体中少子扩散长度与掺杂浓度的关系, 如图 4 所示. 可以看出, 掺杂浓度是影响少子扩散长度的重要因素, 随着掺杂浓度的增加, 少子扩散长度从掺杂浓度为  $10^{15} \text{cm}^{-3}$  时的  $1000 \mu\text{m}$  迅速减小到  $10^{20} \text{cm}^{-3}$  时的不足  $1 \mu\text{m}$ .

### 2.4 耗尽区宽度

由(2)式可知, 在耗尽区外产生的电子空穴对的收集效率除了与少子扩散长度有关外, 还与离耗尽区的距离  $d$  有关, 距离耗尽区越近的区域其收集效率越高. 在耗尽区内产生的电子空穴对完全收集, 当耗尽区宽度越宽时, 收集的电子空穴对越多, 对短路电流的贡献就越大, 因此耗尽区宽度是影响电池性能的一个重要参数.

耗尽区宽度  $W$  可以由下式给出<sup>[12]</sup>

$$W = \sqrt{V_D \left( \frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)}, \quad (12)$$

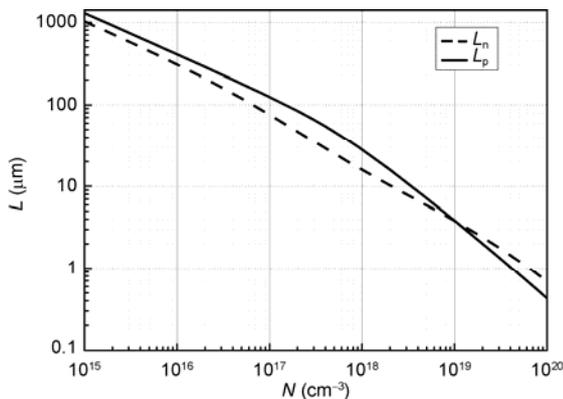


图 4 常温下(300 K)硅半导体中少子扩散长度与掺杂浓度的关系

$$V_D = \frac{kT}{q} \left( \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right), \quad (13)$$

其中,  $V_D$  为内建电势差,  $\epsilon_r$  为半导体材料的介电常数,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $N_A, N_D$  分别为 P 区和 N 区的掺杂浓度,  $n_i$  为本征载流子浓度.

由(12)式可以得出耗尽区宽度与各区掺杂浓度的关系图, 如图 5 所示. 可以看出耗尽区宽度随掺杂浓度变化很大. 对于单边突变结, 耗尽区宽度主要与低掺杂浓度有关, 低掺杂浓度越低时, 耗尽区宽度越宽.

### 2.5 反向饱和电流

由(5)式可知, PN 结的反向饱和电流是影响电池开路电压的直接参数, 反向饱和电流越小, 开路电压越大. 图 6 给出了常温下(300 K)开路电压  $V_{OC}$  与  $I_R/I_0$

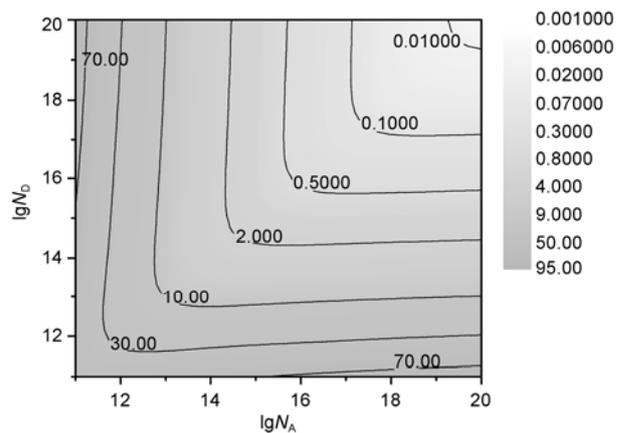


图 5 硅 PN 结耗尽区宽度与各区掺杂浓度的关系

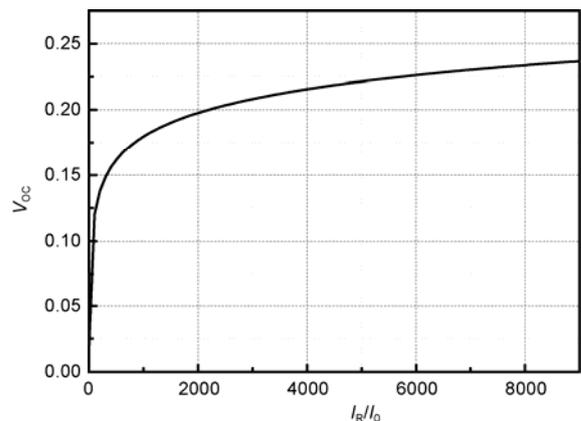


图 6 开路电压  $V_{OC}$  与  $I_R/I_0$ (辐生电流与反向饱和电流的比值)的关系

(辐生电流与反向饱和电流的比值)的关系图。

可以看出, 为了获得大的开路电压,  $I_R/I_0$  的值应大于 1000. 对于太阳能电池, 光伏电流的数量级为 mA~100 mA, 而反向饱和电流仅为 nA~ $\mu$ A, 影响不大. 而对于本机制的微电池, 辐生电流的数量级一般为 pA~nA, 如果反向饱和电流的量级仍为 nA~ $\mu$ A, 电池就无法产生电能输出。

PN 结的反向饱和电流可以由下式计算<sup>[12]</sup>:

$$I_0 = Sqn_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right), \quad (14)$$

其中,  $S$  为结面积,  $n_i$  为本征载流子浓度,  $D_{p(n)}$  为少数载流子扩散率,  $L_{p(n)}$  为少数载流子扩散长度,  $N_{D(A)}$  为掺杂浓度。

可以看出, 影响 PN 结反向饱和电流的主要参数有温度、结面积和掺杂浓度等. 图 7 给出了温度 300 K、结面积 1 cm<sup>2</sup> 时, 硅 PN 结的反向饱和电流随掺杂浓度的变化关系. 反向饱和电流随 P 区和 N 区掺杂浓度的减小而增大, 而且在掺杂浓度比较低时, P 区的掺杂浓度  $N_A$  对反向饱和电流的影响比 N 区掺杂浓度  $N_D$  的影响更为显著。

## 2.6 掺杂浓度

由前面的分析可知, PN 结的少子扩散长度、耗尽区宽度及反向饱和电流均与掺杂浓度有关. 当掺杂浓度越低时, 少子扩散长度越长, 耗尽区宽度也越宽, 这将有利于电子空穴对的收集, 使得电池的短路电流升高. 但另一方面, 掺杂浓度的降低, 会使 PN 结反向饱和电流升高, 进而使电池的开路电压降低. 因

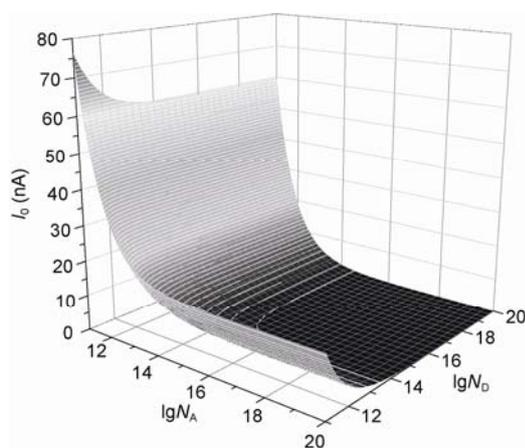


图 7 硅 PN 结的反向饱和电流随掺杂浓度的变化关系

此在电池的优化设计中需要综合考虑这两方面因素的影响, 并从获得功率最大化的角度选择合适的掺杂浓度。

电池最大输出功率的计算所涉及的参数比较多, 当温度、同位素源活度、结面积及结深等发生变化时, 最大输出功率随掺杂浓度的变化规律均不尽相同, 难以直接单一分析掺杂浓度对输出功率的影响, 因此本文借助数学分析软件 MATLAB 对电池的短路电流、开路电压和最大输出功率进行了数值分析和模拟。

图 8 给出了温度 300 K 时, 采用质量厚度为 1 mg/cm<sup>2</sup> 的 <sup>63</sup>Ni 同位素源, 源活度 100 mCi(单面表面源活度约 19.6 mCi), 结面积 1 cm<sup>2</sup>, 结深为 0.5  $\mu$ m 情况下, 电池的最大输出功率与掺杂浓度的关系图, 图中掺杂浓度单位为 cm<sup>-3</sup>, 功率单位为 nW. 可以看出, 在上述参数条件下, 表面掺杂区(即 P 区, 掺杂浓度  $N_A$ )为重掺杂(掺杂浓度在 10<sup>18</sup>~10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> 量级), 基区(即 N 区, 掺杂浓度  $N_D$ )为轻掺杂(掺杂浓度在 10<sup>16</sup>~10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> 量级)时, 获得的最大输出功率最高。

## 2.7 结深

PN 结的耗尽区是电子空穴对收集效率最高的区域, 而靠近同位素源的表面区域是电子空穴对产生率最高的地方, 因此当 PN 结的耗尽区距离表面越近(即结深越浅)时, 电子空穴对的总收集率越高, 短路电流也越大。

表 1 给出了温度 300 K 时, 采用质量厚度为 1 mg/cm<sup>2</sup> 的 <sup>63</sup>Ni 同位素源, 源活度 100 mCi(单面表面源活度约 19.6 mCi), 结面积 1 cm<sup>2</sup> 情况下, 由 MATLAB 计算得到的不同结深下的最大功率值, 以

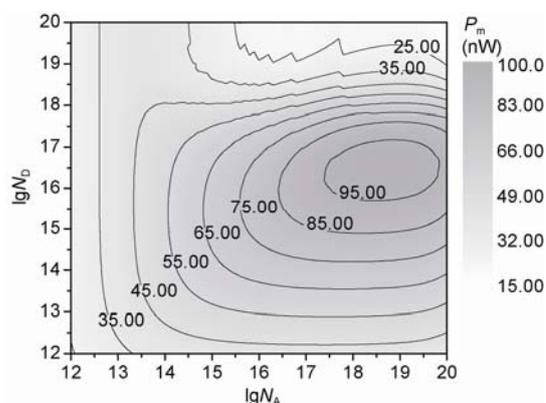


图 8 最大输出功率与掺杂浓度的关系

表 1 不同结深下, 电池的最大输出功率及其他相应参数值

Junction depth ( $\mu\text{m}$ )	Maximum output power (nW)	Doping concentration of P-type region ( $\text{cm}^{-3}$ )	Doping concentration of N-type region ( $\text{cm}^{-3}$ )	Short-circuit current (nA)	Open-circuit voltage (V)	Conversion efficiency (%)
0.1	99.829	$3.98 \times 10^{19}$	$3.16 \times 10^{16}$	571.100	0.253	4.939
0.2	99.851	$2.00 \times 10^{19}$	$3.16 \times 10^{16}$	572.035	0.253	4.940
0.3	99.847	$1.00 \times 10^{19}$	$3.16 \times 10^{16}$	573.347	0.253	4.940
0.4	99.851	$7.94 \times 10^{18}$	$3.98 \times 10^{16}$	567.057	0.255	4.940
0.5	99.842	$5.01 \times 10^{18}$	$3.98 \times 10^{16}$	568.624	0.254	4.940
0.6	99.826	$3.98 \times 10^{18}$	$3.98 \times 10^{16}$	569.543	0.254	4.939
0.7	99.798	$3.16 \times 10^{18}$	$3.98 \times 10^{16}$	570.553	0.254	4.938
0.8	99.760	$2.51 \times 10^{18}$	$3.98 \times 10^{16}$	571.684	0.253	4.936
0.9	99.718	$2.51 \times 10^{18}$	$5.01 \times 10^{16}$	565.196	0.255	4.934

及对应的各区掺杂浓度、短路电流、开路电压与转化效率. 从表 1 中可以看出, 当结深为  $0.3 \mu\text{m}$  时, 短路电流和转化效率达到最大.

在此基础上, 本文还给出了结深在  $0 \sim 20 \mu\text{m}$  之间变化, 电池的最大输出功率及对应的最佳掺杂浓度的变化, 如图 9 所示. 可以看出, 最大输出功率基本上随着结深的增加而减小, 而 P 区与 N 区的最佳掺杂浓度随结深的变化趋势恰好相反, 在结深比较浅时, 宜取 P 区重掺杂, N 区轻掺杂.

## 2.8 电池内阻与基区宽度

电池的电阻包括并联电阻和串联电阻, 通过增大并联电阻, 减小串联电阻可以提高电池的开路电压和短路电流. 增加并联电阻需要选择良好的单晶衬底, 要求晶格缺陷少、表面沾污小等, 以降低反向饱和电流. 串联电阻主要包括电池体电阻、金属电极电阻、金属电极与半导体的接触电阻.

电池的体电阻定义为

$$R = \frac{\rho H}{S}, \quad (15)$$

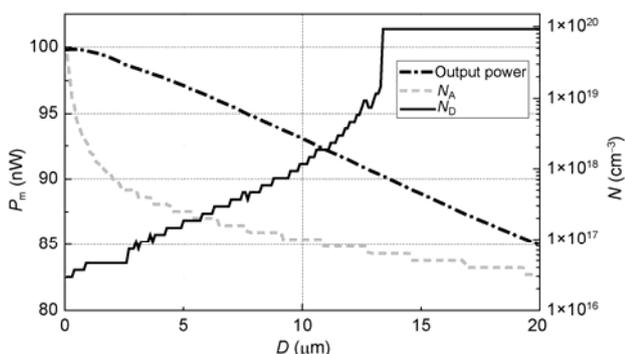


图 9 最大输出功率及对应的最佳掺杂浓度的随结深的变化关系

式中,  $\rho$  为体电阻率,  $H$  为半导体厚度,  $S$  为结面积. 电阻率  $\rho$  主要取决于基区的掺杂浓度, 当基区掺杂浓度越高时, 电阻率越小. 当半导体厚度越大时体电阻越高, 因此在表面掺杂区及耗尽区宽度确定时应控制基区的厚度, 即应小于基区少子扩散长度与耗尽区宽度之和.

金属电极与半导体的接触电阻主要与金属和半导体的功函数有关, 对于掺硼的表面重掺杂区, 其与电极金属形成良好的欧姆接触所需的掺杂浓度一般为  $10^{19} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ , 因此参照表 1, 并综合上述分析, 应选取结深为  $0.3 \mu\text{m}$ , 表面重掺杂区 (P 区) 掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ , 基区 (N 区) 掺杂浓度为  $3.16 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 此时基区少子扩散长度约为  $164 \mu\text{m}$ , 考虑到硅片抛光减薄等工艺的限制, 半导体的总厚度取  $160 \mu\text{m}$  为宜.

## 3 结论

本文选用半导体材料 Si 和放射性同位素  $^{63}\text{Ni}$ , 构建了单层平板式  $\beta$  辐射伏特效应同位素电池的理论模型; 从辐射伏特效应的基本原理出发, 通过蒙特卡罗程序 MCNP 模拟计算  $\beta$  粒子在半导体材料中的输运过程, 分析了各项因素对电池性能参数的影响机制, 并给出了硅基微电池优化的设计参数: 即同位素源  $^{63}\text{Ni}$  源质量厚度为  $1 \text{mg/cm}^2$ , 单晶硅半导体材料 P 区掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ , N 区掺杂浓度为  $3.16 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 结面积为  $1 \text{cm}^2$ , 结深为  $0.3 \mu\text{m}$ , 总厚度不超过  $160 \mu\text{m}$ . 若同位素源活度为  $100 \text{mCi}$ , 则采用此参数的微电池可以获得的最大短路电流、开路电压、输出功率、转化效率分别为  $573.3 \text{nA}$ ,  $0.253 \text{V}$ ,  $99.85 \text{nW}$ ,  $4.94\%$ . 本文的研究结果可以为 Si 基  $^{63}\text{Ni}$  辐射伏特效应同位素电池的设计提供重要的理论参考.

## 参考文献

- 1 王铁山, 张保国. 辐射伏特效应用于核衰变能发电的初步研究. 核技术, 1995, 18(012): 740-743
- 2 邹宇, 黄宁康. 伏特效应放射性同位素电池的原理和进展. 核技术, 2006, 29(6): 432-437
- 3 孙磊, 苑伟政, 乔大勇. 一种新型基于 MEMS 的同位素微电池的研究. 功能材料与器件学报, 2006, 12(005): 434-438
- 4 Guo H, Yang H, Zhang Y. Betavoltaic micro batteries using porous silicon. In: Proceedings of the 20th IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Japan Kobe. New York: IEEE, 2007. 867-870
- 5 Deus S. Tritium-powered betavoltaic cells based on amorphous silicon. In: Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2000. 1246-1249
- 6 秦冲. MEMS 同位素微电池能量转换建模及性能分析. 硕士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2007. 22-29
- 7 Guo H, Lal A. Nanopower betavoltaic microbatteries. Proceedings of 12th International Conference on Transducers, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2003. 36-39
- 8 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用(修订版). 北京: 原子能出版社, 2006. 262-270
- 9 Briesmeister J F. MCNP-A general monte carlo n-particle transport code. Version 4C. LA-12625, 1993
- 10 Honsberg C. GaN betavoltaic energy converters. Conference Record of the Thirty-First IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2005. 102-105
- 11 Mohamadian S M, Fegghi S A H, Afarideh H. Analyze and simulation of a typical mems rpg using mcnp code. Icone16: Proceeding of the 16th International Conference on Nuclear Engineering. 2008, 1: 883-886
- 12 Anderson B L. Fundamentals of Semiconductor Devices. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2005. 83-120