

# SiC基辐射伏特电池研制及性能优化

何厚军<sup>1,2,3</sup> 韩运成<sup>2</sup> 王晓彧<sup>2</sup> 任雷<sup>2,3</sup> 孟祥东<sup>2,3</sup> 郑明杰<sup>2,3</sup>

1(东华理工大学 南昌 330013)

2(中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031)

3(中国科学技术大学 合肥 230026)

**摘要** 为提升辐射伏特电池(简称辐伏电池)的总转换效率和输出功率,综合考虑耗尽区宽度、扩散长度及电极结构等因素对电荷收集效率、总转换效率及输出功率的影响,通过优化换能器件及电极结构,成功制备出总转换效率及输出功率较高的<sup>63</sup>Ni-SiC基PIN结换能器件。所制备的辐伏电池的短路电流、开路电压、输出功率及总转换效率分别达到了10.29~13.43 nA·cm<sup>-2</sup>、1.32~1.44 V、11.66~14.69 nW·cm<sup>-2</sup>及2.24%~2.82%。与团队之前的工作相比,开路电压、FF因子及总转换效率分别平均提高了127.50%、114.47%及512.10%,且总转换效率高于文献报道的结果(0.5%~1.99%)。结果表明:通过采用具有“浓度梯度层I层”的PIN结构、优化结区宽度和掺杂浓度,以及优化电极材料和结构,可显著提升辐伏电池的总转换效率和输出功率,为辐伏电池的设计与制备提供了重要的理论参考和实验依据。

**关键词** 辐射伏特电池, SiC, <sup>63</sup>Ni, 转换效率, 输出功率, 欧姆接触

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240117

**CSTR:** 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240117

## Fabrication and performance optimization of SiC-based betavoltaic batteries

HE Houjun<sup>1,2,3</sup> HAN Yuncheng<sup>2</sup> WANG Xiaoyu<sup>2</sup> REN Lei<sup>2,3</sup>

MENG Xiangdong<sup>2,3</sup> ZHENG Mingjie<sup>2,3</sup>

1(East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

2(Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

3(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** [Background] Betavoltaic nuclear batteries, leveraging beta-emitting radioisotopes, offer inherent advantages such as long-term reliability, high energy density, compact form factors, and robust resistance to interference, positioning them as promising power sources for self-powered portable or embedded microdevices. [Purpose] This study aims to enhance the conversion efficiency and output power of betavoltaic batteries with comprehensive consideration of the effects of backscattering, depletion region width, diffusion length, and electrode structure on charge collection efficiency, conversion efficiency, and output power. [Methods] By optimizing the device and electrode structure, i.e., introducing a PIN structure with "concentration gradient I-layer", optimizing the

国家自然科学基金(No.12305382)、国家自然科学基金通用技术基础研究联合基金(No.U2436201)、中国科学院院长基金(No.YZJJ202311-TS)、科学岛研究生创新创业基金(No.KY-2022-SC-04)资助

第一作者: 何厚军, 男, 1989年出生, 2017年毕业于兰州大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核电池

通信作者: 韩运成, E-mail: [yuncheng.han@inest.cas.cn](mailto:yuncheng.han@inest.cas.cn)

收稿日期: 2024-04-12, 修回日期: 2024-04-29

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12305382), the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (No.U2436201), HFIPS Directors Fund (No.YZJJ202311-TS), Science Island Graduate Innovation and Entrepreneurship Fund Project (No.KY-2022-SC-04)

First author: HE Houjun, male, born in 1989, graduated from Lanzhou University in 2017, master student, focusing on nuclear batteries

Corresponding author: HAN Yuncheng, E-mail: [yuncheng.han@inest.cas.cn](mailto:yuncheng.han@inest.cas.cn)

Received date: 2024-04-12, revised date: 2024-04-29

depletion region width, doping concentration and electrode materials, and increasing the spacing between electrode grid lines,  $^{63}\text{Ni}$ -SiC-based PIN junction betavoltaic batteries were successfully fabricated with higher overall conversion efficiency and output power. Both the Monte Carlo simulations and numerical computations were employed to obtain characteristic parameters of these developed batteries, and their performances were measured by experiments. **[Results]** The fabricated batteries exhibit short-circuit currents, open-circuit voltages, output powers, and total conversion efficiencies ranging from  $10.29 \text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$  to  $13.43 \text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,  $1.32 \text{ V}$  to  $1.44 \text{ V}$ ,  $11.66 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}$  to  $14.69 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}$ , and  $2.24\%$  to  $2.82\%$ , respectively. Compared with previous reported work, the open-circuit voltage, fill factor, and overall conversion efficiency increase by an average of  $127.50\%$ ,  $114.47\%$ , and  $512.10\%$ , respectively. Moreover, the overall conversion efficiency is higher than those reported in the literature ( $0.5\%$  to  $1.99\%$ ). **[Conclusions]** These results indicate that the conversion efficiency and output power of betavoltaic batteries can be significantly improved by taking above-mentioned optimization measures, providing important theoretical guidance and experimental evidence for the design and fabrication of betavoltaic batteries.

**Key words** Betavoltaic battery, SiC,  $^{63}\text{Ni}$ , Conversion efficiencies, Output power, Ohmic contacts

$\beta$  辐射伏特核电池(简称辐伏电池)因其长寿命、高能量密度、微尺寸、强抗干扰等优点,逐渐成为自供电便携式或嵌入式微型设备中最具吸引力的微型动力源之一<sup>[1-2]</sup>。该电池主要由 $\beta$ 放射源和半导体换能器件组成,通过产生和收集电子-空穴对(Electron-hole Pairs, EHPs),将 $\beta$ 射线能量转化为电能。在选择放射源时,考虑到半衰期、衰变能量、比功率和安全性等因素, $^{63}\text{Ni}$ 放射源因其较长的半衰期(约 100 a)、适中的衰变能量(平均能量 17.4 keV, 最大能量为 66.9 keV)及金属固态属性而成为优选之一。在选择半导体器件时,需要综合考虑辐射损伤阈值、禁带宽度、本征载流子浓度、扩散长度、背散射系数和加工工艺水平等因素。4H-SiC 具有较高的辐射硬度,制备工艺技术成熟,在耐高温、耐辐照和高性能的功率器件领域备受关注<sup>[3]</sup>,其较宽的禁带宽度、极低的本征载流子浓度和较低的背散射系数使其具备较高的转换效率、开路电压和输出功率,因此成为换能器件的优选之一。

自从 1954 年 Rappaport<sup>[4]</sup>首次公开基于  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  和 Si 型 p-n 结的辐伏电池以来,已经有大量工作致力于辐伏电池的实验及理论研究。Belghachi 等<sup>[5]</sup>指出, $\beta$  粒子在换能器件表面发生的背散射效应会显著影响转换效率。Maximenk 等<sup>[6]</sup>系统研究了  $^3\text{H}$  和  $^{63}\text{Ni}$  与多种半导体材料之间的耦合效率,指出 SiC 材料因其较低的背散射系数而成为与  $^3\text{H}$  和  $^{63}\text{Ni}$  相匹配的最佳候选材料之一。诸多研究<sup>[6-8]</sup>表明,耗尽区外的 EHPs 复合,会显著影响收集效率及转换效率。赵陈等<sup>[9]</sup>分析了耗尽区内的 EHPs 复合对换能器件转换效率的影响,发现未考虑耗尽区 EHPs 复合时的 SiC 基辐伏电池的转换效率相较于考虑耗尽区 EHPs 复合的情况被高估了 1.4 倍。Sachenko 等<sup>[10]</sup>使用经典扩散-漂移理论研究了载流子收集效率,指出

EHPs 产生深度与半导体中扩散长度之间的不匹配是收集效率较低的主要原因。欧姆接触电极的制备工艺及电极几何结构会影响电流在外回路的收集及输运,比接触电阻较低和几何结构良好的欧姆接触电极可以明显改善电池输出性能<sup>[11-13]</sup>。

研究人员为提高辐伏电池的转换效率和输出功率做了大量工作,包括在放射源背面增加金属反射器以减小方向性能量损失<sup>[5]</sup>;优化结区宽度和掺杂浓度,以扩大耗尽区宽度,从而提高载流子收集效率<sup>[14-17]</sup>;在 PN 结中,通过插入“浓度梯度层”引入额外的电场,以降低辐射诱导载流子的复合损失<sup>[18-19]</sup>。当前,公开报道的  $^{63}\text{Ni}$ -SiC 基电池总转换效率处于  $0.5\%\sim 1.99\%$ <sup>[20-24]</sup>,器件转换效率处于  $3.7\%\sim 15.3\%$ <sup>[3,25]</sup>,输出功率密度处于  $2\sim 8 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}$ <sup>[3,20-25]</sup>。

为提升辐伏电池的总转换效率及输出功率,本文综合考虑了耗尽区宽度、扩散长度等因素对 EHPs 收集效率、总转换效率及输出功率的影响,制备了  $^{63}\text{Ni}$ -SiC 基 PIN 结换能器件。结果表明,通过采用具有“浓度梯度 I 层”的 PIN 结构,选择优化的结区宽度、掺杂浓度以及电极材料和电极结构,得到了总转换效率及输出功率较为优异的辐伏电池。

## 1 辐伏电池的理论研究

### 1.1 换能器件的设计

为降低辐伏电池背散射损失及提升开路电压,选择背散射效应较低且本征载流子浓度极低的 4H-SiC 作为换能器件。图 1 描述了辐伏电池的工作原理: $\beta$  粒子入射到换能器件中,通过电离产生 EHPs,在内建电场的作用下,EHPs 发生漂移、扩散及复合等,从而产生辐生电流( $J_{\beta}$ )及正向电流等。最终,这些电流通过电极传输到外部电路,实现衰变

能转换为电能的过程。 $\beta$ 粒子在换能器件中的能量沉积决定EHPs产生率( $G(x)$ ),从而影响电池输出性能。通过蒙特卡罗方法模拟,可得到 $^{63}\text{Ni}$ 放射源发射的 $\beta$ 粒子在换能器件中沿着入射方向的能量沉积分布( $E_{\text{dep}}(x)$ ),其中使用的 $^{63}\text{Ni}$ 为全能谱放射源<sup>[26]</sup>,其比活度、丰度及密度分别为 $2.1 \times 10^{11} \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 、20%及 $8.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。通过 $\beta$ 粒子的能量沉积分布及放射源活度可得到 $G(x)$ ,如式(1)所示。

$$G(x) = \frac{A \cdot E_{\text{dep}}(x)}{\varepsilon} = G_0 \exp(-\alpha x) \quad (1)$$

式中: $A$ 为放射源活度; $x$ 为 $\beta$ 粒子在换能器件中的入射深度; $\varepsilon$ 为SiC的平均电离能(7.78 eV)<sup>[16]</sup>。 $G_0$ 和 $\alpha$ 分别是表面EHPs产生率和吸收系数,与放射源厚度 $t$ 相关。在耗尽区内产生的EHPs可以完全收集(即收集效率为100%),而在耗尽区外产生的EHPs,只能在扩散至耗尽区以后才能被收集,该区域的收集效率 $CE(x)$ 可通过式(2)得到。

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

式中: $d(x)$ 表示EHPs产生位置与耗尽区边界的距离,其在耗尽区内被设为0。 $L$ 表示少数(电子、空穴)的扩散长度。通过EHPs的收集就可以产生辐生电流。辐生电流密度( $J_\beta$ )为:

$$J_\beta = q \int_0^H G(x) CE(x) dx \quad (3)$$

式中: $q$ 为电子电荷; $H$ 为换能器件的厚度。

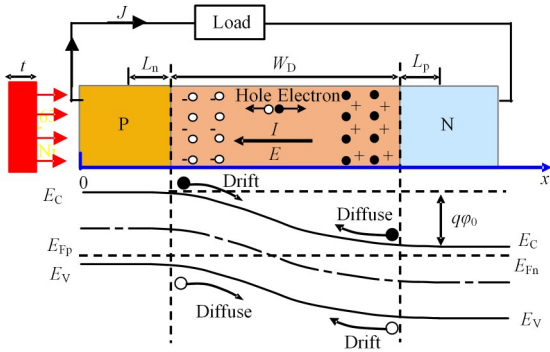


图1 换能器件工作原理图及其能带图  
Fig.1 The schematic diagram and band diagram of the converter

当辐伏电池处于短路时,外加偏压 $V=0 \text{ V}$ ,正向电流 $J_F$ 等于0,此时电池输出电流 $J$ 称为短路电流( $J_{\text{sc}}$ ),它等于EHPs产生的辐生电流 $J_\beta$ 。即:

$$J_{\text{sc}} = J_\beta - J_F = J_\beta \quad (4)$$

由肖克利公式<sup>[27]</sup>可知,辐伏电池的开路电压( $V_{\text{oc}}$ )可表示为:

$$V_{\text{oc}} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{J_{\text{sc}}}{J_0} + 1 \right) \quad (5)$$

式中: $k$ 为玻尔兹曼常数,为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T$ 是温度,在本工作中取值为300 K; $J_0$ 是反向饱和电流,与本征载流子浓度呈正相关,而跟掺杂浓度呈反相关<sup>[14,28]</sup>。可见降低 $J_0$ 是提升 $V_{\text{oc}}$ 的关键。辐伏电池的最大输出功率( $P_{\text{out}}$ )可表示为:

$$P_{\text{out}} = J_{\text{sc}} V_{\text{oc}} \text{FF} \quad (6)$$

式中:FF是填充因子,表示为 $V_m J_m / V_{\text{oc}} J_{\text{sc}}$ ,且 $V_m$ 通过解微分方程 $d(V \cdot J) / dV = 0$ 得到,联立式(5)得 $J_m$ 。总转换效率可表示为 $\eta_{\text{tot}} = P_{\text{out}} / (A \cdot E \cdot q)$ ,与输出功率成正比,其中 $E$ 表示为 $^{63}\text{Ni}$ 放射源产生的 $\beta$ 粒子的平均能量(17.4 keV)。

根据漂移扩散理论,位于PN结耗尽区内以及距离耗尽区一个扩散长度以内的少数,能被有效收集到。这个区域称作有效电荷收集区(Effective Charge Collection Region, ECR),其长度为 $H_{\text{ECR}} = (W_d + L_n + L_p)$ 。为扩大 $H_{\text{ECR}}$ ,采用具有“浓度梯度I层”的PIN结,与PN相比,可产生额外电场,有效电荷收集区长度增至 $H_{\text{ECR}} = (W_d + L_n + 2L_p + L_{p1})$ ,从而降低EHPs的复合损失、提升电荷收集效率<sup>[19]</sup>。 $W_d$ 、 $L_n$ 、 $L_p$ 和 $L_{p1}$ 分别表示耗尽区宽度、P区电子扩散长度、I区和N区空穴扩散长度。

如图2(a)、(b)所示, $W_d$ 、 $L_n$ 和 $L_p$ 随着掺杂浓度的升高而降低,较低的掺杂浓度有利于增加 $W_d$ 、 $L_n$ 和 $L_p$ ,从而提升EHPs收集效率及短路电流 $J_{\text{sc}}$ 。因此,降低掺杂浓度提升耗尽区宽度和扩散长度使得 $\beta$ 粒子射程与换能器件中的有效电荷收集区匹配是提升输出功率与总转换效率的关键。

从图3(a)观察到, $J_{\text{sc}}$ 随着 $N_D$ (I区掺杂浓度)的降低而增加,而随 $N_A$ (P区掺杂浓度)的变化不敏感。这是因为 $L_n$ 随 $N_D$ 的变化幅度远大于 $L_p$ 随 $N_A$ 的变化幅度(图2(b)), $N_D$ 的降低可显著增加 $H_{\text{ECR}}$ ,从而增加电荷收集效率及 $J_{\text{sc}}$ 。从图3(b)可以看到, $V_{\text{oc}}$ 随着 $N_A$ 及 $N_D$ 而增加。这是因为更高的掺杂浓度会降低反向饱和电流密度( $J_0$ ),导致 $V_{\text{oc}}$ 增大(图2(c))。图3(c)展示了 $P_{\text{out}}$ 与掺杂浓度的相关性,发现 $P_{\text{out}}$ 随 $N_A$ 的增加先增加,随后达到饱和,而与 $N_D$ 呈反相关。因此I区轻掺杂与P区重掺杂可显著提升 $P_{\text{out}}$ 及总转换效率。

综上所述,为提升辐伏电池的总转换效率及输出功率,辐伏电池的设计要满足:1)选择背散射效应较低及本征载流子浓度极低的半导体材料(如4H-SiC)作为换能器件;2)采用具有“浓度梯度I层”的PIN结,降低EHPs的复合损失、提升电荷收集效率;3)采用P区重掺杂及I区轻掺杂提升输出功率及总转换效率。基于当前SiC材料的低掺杂工艺水平,将I层的掺杂浓度设置为 $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。而重掺杂区

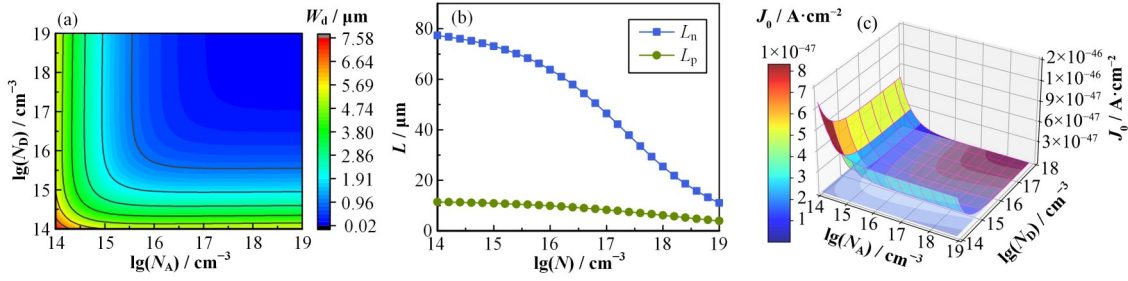


图2 掺杂浓度 $N_D$ 和 $N_A$ 与耗尽区宽度(a)、扩散长度(b)及反向饱和电流密度(c)的相关性

Fig.2 Relationship between doping concentrations  $N_D$  and  $N_A$  and depletion width (a), diffusion length (b), and reverse saturation current density (c)

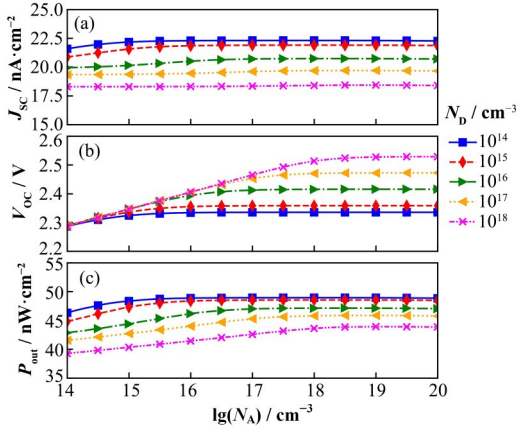


图3  $N_D$ 和 $N_A$ 与短路电流(a)、开路电压(b)及输出功率(c)的相关性

Fig.3 Relationship between  $N_D$  and  $N_A$  and short-circuit current (a), open-circuit voltage (b) and output power (c)

( $P^+$ 和 $N^+$ 区)的掺杂浓度则分别设置为 $N_A=10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 和 $N_D=2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,以形成良好的欧姆接触。由于 $^{63}\text{Ni}$ 放射的 $\beta$ 粒子在SiC换能器件中的穿透深度为 $10.2 \mu\text{m}$ <sup>[19]</sup>,并且当 $P^+$ 和I区掺杂浓度分别为 $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 及 $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时,耗尽区宽度为 $5.65 \mu\text{m}$ , $L_n$ 及 $L_p$ 分别为 $11.06 \mu\text{m}$ 及 $11.44 \mu\text{m}$ ,且耗尽区主要分布在I区要求 $P^+$ 层尽可能薄,以提高电荷收集效率,因此将 $P^+$ 层及I层厚度分别设置为 $0.2 \mu\text{m}$ 及 $10 \mu\text{m}$ ,以匹配 $\beta$ 粒子射程与换能器件中的有效电荷收集区。

## 1.2 电极设计

欧姆接触电极的材料选择及电极几何结构会影响电流在外回路的收集及输运,选择比接触电阻较低及几何结构良好的欧姆接触电极可明显改善电池的输出性能<sup>[11-13]</sup>。

表1总结了国内外在N型和P型SiC材料上制备欧姆接触的实验条件和参数。N型SiC通常采用Ni金属体系,并通过高温氮气氛围下的退火,成功制备出比接触电阻低于 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的高质量欧姆接触<sup>[29]</sup>。相比之下,P型SiC的欧姆接触更为困难,需要选择功函数较高的金属体系,并通过提高掺杂浓度、快速退火及添加保护层等实现。从表1可以看

出,Ni/Ti/Al/Ni与Ni/Ti/Al/W这两种P型电极的比接触电阻相当。我们之前的工作<sup>[13]</sup>同时制备了这两种电极,并采用相同的退火处理,通过比接触电阻测试发现Ni/Ti/Al/W的比接触电阻( $3.35 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ )大于Ni/Ti/Al/Ni的比接触电阻( $2.73 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ )。此外,由于Ni金属容易氧化,采用化学性质更稳定的W金属作为覆盖层,可有效改善P型电极表面氧化问题,因此本工作选择Ni/Ti/Al/W(50/30/90/50 nm)作为P型欧姆接触电极。同时,为了降低比接触电阻,本工作选择了Ti/Ni作为N型欧姆接触电极的主要材料,并在电极金属上面覆盖一层惰性金属Au,以防止电极金属氧化,制备稳定的Ti/Ni/Au(80/110/100 nm)欧姆接触电极。

为增加表面电流传输效率,N型电极(背电极)采用全覆盖结构。由于P型电极面向放射源,占空比及厚度过大的电极会导致 $\beta$ 粒子的能量损失,因此P型电极采用栅型结构。它由较宽的主栅线和较窄的副栅线构成,其中副栅线用于收集电流,并通过主栅线传输到外部负载,如图4所示。电极栅线的密集程度决定了电流的收集效率和电极的电阻。然而,电极栅线过多会显著增加 $\beta$ 粒子的遮挡损失,导致辐生电流减少。因此,为解决收集效率、电阻和遮挡损失间的矛盾,需对各种功率损失进行权衡,优化电极栅线的宽度和间距,以实现电极结构优化设计。

辐伏电池中与表面电极相关的功率损失主要包括扩散层电阻功率损失率 $\eta_{rd}$ 、主栅线电阻功率损失率 $\eta_{rb}$ 、副栅线电阻功率损失率 $\eta_{rf}$ 、副栅线接触电阻功率损失率 $\eta_{cf}$ 和栅线电极遮挡功率损失率 $\eta_s$ 。电池总功率损失率可由修正的公式(7)表示<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_{rd} + \eta_{rb} + \eta_{rf} + \eta_{cf} + \eta_s \\ &= \frac{J_m H^2 \rho_{\square}}{12 V_m} + \frac{J_m L L_a^2 \rho_p}{3 w_b h_b V_m} + \frac{J_m H L^2 \rho_p}{12 w_f h_f V_m} + \\ &\quad \frac{J_m H \rho_c}{w_f V_m} + \eta_c \frac{(H + w_f) \cdot w_b + \frac{L}{2} \cdot w_f}{(H + w_f) \cdot \left( w_b + \frac{L}{2} \right)} \end{aligned} \quad (7)$$

表1 制备SiC欧姆接触的工艺参数  
Table 1 Process parameters for preparing SiC Ohmic contacts

掺杂类型 Doping type	金属化系统 Metallization system	掺杂浓度 Concentration / $\text{cm}^{-3}$	退火环境 Annealing environment	比接触电阻 Specific resistance / $\Omega \cdot \text{cm}^2$	参考文献 Reference
N型	Ni/Ti/Al/	$2 \times 10^{19}$	800 °C 2 min	$1.8 \times 10^{-5}$	[30]
	Ti	$1 \times 10^{20}$	950 °C 3 min	$7.7 \times 10^{-4}$	
	Al/Ni	$9 \times 10^{18}$	800 °C	$5.0 \times 10^{-3}$	
	Ge/Ti/Al	$4.5 \times 10^{18}$	600 °C 30 min	$1.0 \times 10^{-4}$	
	Ni	$1 \times 10^{17}$	1 050 °C 10 min	$6.0 \times 10^{-6}$	[31]
	Ti/Ni	$8 \times 10^{18}$	950 °C 1 min	$2.3 \times 10^{-6}$	[32]
P型	Ti/Al/W	$1 \times 10^{20}$	1100°C	$5.8 \times 10^{-4}$	[33]
	Ni/Ti/Al/W	$1 \times 10^{20}$	750°C 120 s	$4.1 \times 10^{-5}$	[34]
	Ni/Ti/Al/Ni	$3 \times 10^{19}$	800°C 90 s	$1.5 \times 10^{-5}$	[35]
	Ge/Ti/Al	$4.5 \times 10^{18}$	600°C 30 min	$1.7 \times 10^{-4}$	[36]

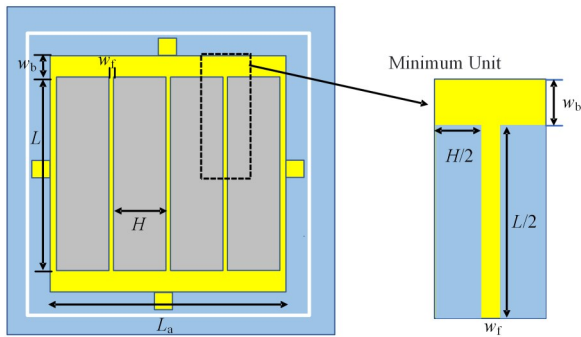


图4 SiC基辐伏电池P型电极设计  
Fig.4 Design of the P-type electrode for SiC-based betavoltaic cells

式中： $\rho_{\square}$ 、 $\rho_p$ 、 $\rho_c$ 、 $w_b$ 、 $w_f$ 、 $h_b$ 、 $h_f$ 和 $L_a$ 的取值分别为 $4.2 \times 10^6 \Omega$ 、 $0.0187 \Omega \cdot \mu\text{m}$ 、 $3350 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ 、 $100 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 、

$220 \text{ nm}$ 、 $220 \text{ nm}$ 和 $0.3 \text{ cm}^{[13,37]}$ 。由式(3)~(5)可得， $J_m$ 和 $V_m$ 分别为 $22.18 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $2.18 \text{ V}$ 。 $\eta_e$ 为 $220 \text{ nm}$ 厚的全覆盖P型电极导致的 $\beta$ 粒子能量损失率，经过蒙特卡罗计算为 $28.92\%$ 。表2列出了栅型电极图形设计涉及的相关参数。

图5展示了电池总功率损失率 $\eta$ 与副栅线长度 $L$ 、副栅线间距 $H$ 之间的关系。随着副栅线长度 $L$ 的增加，总功率损失率 $\eta$ 减小，表明在电池面积一定的情况下，主栅线数量应尽量减少。此外，随着副栅线间距 $H$ 的增加，总功率损失率 $\eta$ 呈现降低趋势。当 $L$ 为 $3000 \mu\text{m}$ 、 $H$ 大于 $500 \mu\text{m}$ 时，总功率损失率 $\eta$ 小于 $2\%$ ，且 $\eta$ 随 $H$ 的变化率逐渐变小直至趋于0。可见，应适当增加 $H$ 与 $L$ 以降低电池总功率损失率。

表2 栅型电极图形设计涉及的相关参数  
Table 2 Relevant parameters involved in the design of grid electrode patterns

变量 Variable	变量含义 Variable meaning	变量 Variable	变量含义 Variable meaning
$\eta_{rd}$	扩散层电阻功率损失率 Diffusion layer resistance power loss rate	$H$	副栅线间距 Subgrid line spacing
$\eta_{rb}$	主栅线电阻功率损失率 Main grid line resistance power loss rate	$L_a$	主栅线长度 Main grid line length
$\eta_{rf}$	副栅线电阻功率损失率 Subgrid line resistance power loss rate	$w_b$	主栅线宽度 Main grid line width
$\eta_{cf}$	副栅线接触电阻功率损失率 Subgrid line contact resistance power loss rate	$h_b$	主栅线厚度 Main grid line thickness
$\eta_s$	栅线电极遮挡功率损失率 Grid line electrode shielding power loss rate	$\rho_{\square}$	扩散层方块电阻 Diffusion layer square resistance
$\eta$	总功率损失率 Total power loss rate	$\rho_c$	副栅线接触电阻率 Subgrid line contact resistance
$L$	副栅线长度 Subgrid line length	$\rho_p$	金属电极电阻率 Metal electrode resistivity
$w_f$	副栅线宽度 Subgrid line width	$V_m$	最大功率点电压 Maximum power point voltage
$h_f$	副栅线厚度 Subgrid line thickness	$J_m$	最大功率点电流密度 Maximum power point current density

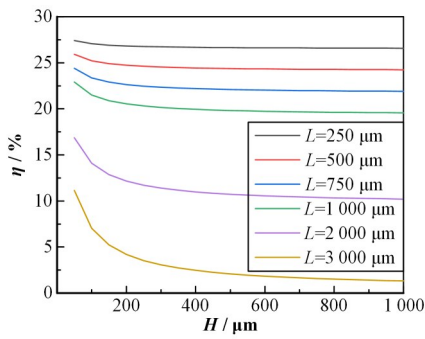


图5 电池总功率损失率 $\eta$ 与 $H$ 和 $L$ 相关性(彩图见网络版)  
Fig.5 Relationship between the total power loss rate  $\eta$  of the battery and  $H$  and  $L$  (color online)

## 2 辐伏电池的实验研究

### 2.1 辐伏电池制备及输出性能测试

辐伏电池换能器件的制备工艺主要包括外延、光刻、刻蚀、钝化、电极制备及退火等,具体工艺流程以及材料参数如图6所示。根据§1.1 辐伏电池的优

化设计标准,采用厚度为 $350\ \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $2\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 的N型掺杂SiC片作为衬底;在此基础上采用等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)工艺外延生长一层厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $1\times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ 的N型低掺杂本征层(I层);最后,外延生长一层厚度为 $0.2\ \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $1\times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 的P<sup>+</sup>层。采用电感耦合等离子体方法(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀宽度为 $50\ \mu\text{m}$ 的沟槽以实现器件隔离目的,单个器件尺寸为 $0.4\ \text{cm}\times 0.4\ \text{cm}$ 。钝化工艺采用干氧化法,并在 $\text{N}_2$ 氛围中退火,以降低表面漏电流。根据§1.2 电极优化标准,通过二次光刻及磁控溅射制备#1~#4不同几何结构的多层P型电极Ni/Ti/Al/W( $50/30/90/50\ \text{nm}$ ),电极几何结构参数如表3所示;接着在换能器件的背电极区域,通过磁控溅射依次镀上Ti/Ni/Au( $80/110/100\ \text{nm}$ ),背电极为全覆盖结构;最后在 $950\ ^\circ\text{C}$ 的氮气氛围中退火 $5\ \text{min}$ 以形成稳定的欧姆接触电极。

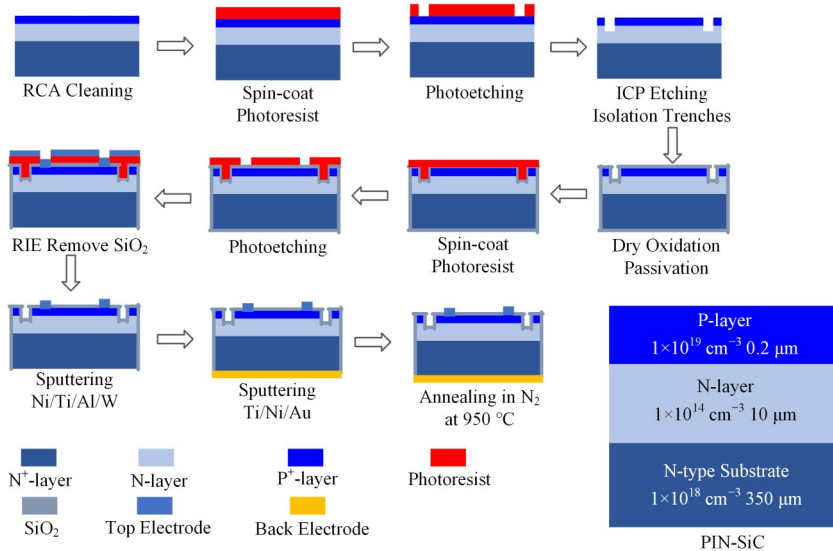


图6 SiC基辐伏电池制备工艺流程及其材料参数  
Fig.6 Process flow and material parameters for SiC-based betavoltaic battery

将待测试电池放置在 Cascode SUMMIT200 探针台的真空腔室内(图7(a)),并将 $^{63}\text{Ni}$ 放射源片覆盖在电池表面,抽真空后通过 Keysight B1500A 半导体分析仪进行 $I$ - $V$ 特性测试。从图7(b)可以观察到,待测样品的测试过程, $^{63}\text{Ni}$ 放射源片放置在样品正上方,通过探针与电极接触即可测试样品的 $I$ - $V$ 特性。最后,通过半导体分析仪的 $I$ - $V$ 模块获取 $I$ - $V$ 特性曲线,完成测试。 $^{63}\text{Ni}$ 放射源活度约为 $1.85\times 10^8\ \text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,丰度约20%。

### 2.2 结果和讨论

测得#1~#4样品在源环境及暗环境下的 $J$ - $V$ 曲

线分别如图8(a)和(b)所示,其中反向饱和电流密度 $J_0$ 是根据公式( $\ln J = qV/nkT + \ln J_0$ )拟合正偏时暗环境下的 $J$ - $V$ 曲线获得的<sup>[38]</sup>, $n$ 为理想因子。可以观察到,这4个样品的 $J_{sc}$ 随着副栅线间距 $H$ 的增加,从 $10.29\ \text{nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 增加至 $13.43\ \text{nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。这主要是由于随着 $H$ 的增加,电极的数量减小,电极对于 $\beta$ 粒子的遮挡损失率显著降低,沉积到换能器件的能量显著增加,导致换能器件中EHPs的数量显著增加,最终导致 $J_{sc}$ 增加。这与图5功率总损失率随着 $H$ 的增加而降低的变化趋势是一致的。

进一步分析得到FF、 $J_0$ 、 $P_{\text{out}}$ 、 $\eta_{\text{tot}}$ 及相对损失率,如表3所示。 $V_{\text{oc}}$ 处于 $1.32\sim 1.44\ \text{V}$ ,FF处于 $0.79\sim$

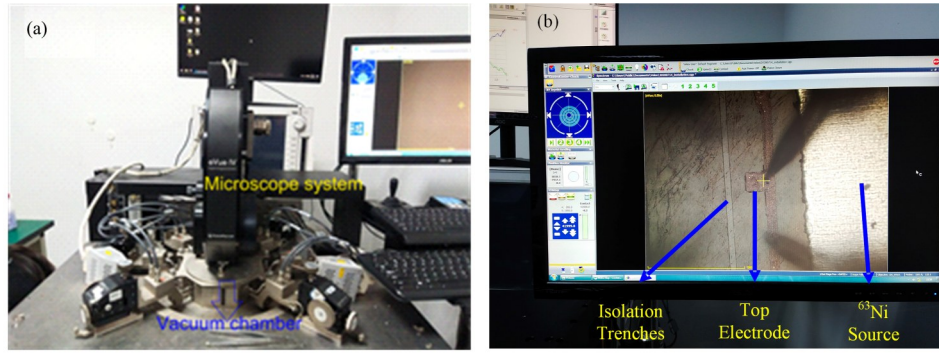


图7 (a) 半导体分析仪及探针台, (b) 辐伏电池测试显微镜视图  
Fig.7 (a) Semiconductor analyzer and probe station, (b) Microscopic view of betavoltaic battery testing

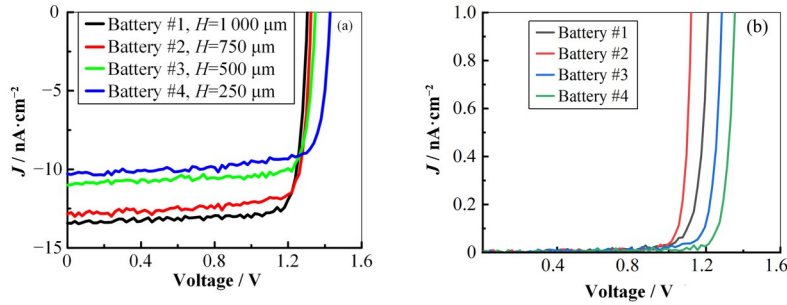


图8 不同电极结构的辐伏电池在不同环境下的 $J$ - $V$ 特性曲线(彩图见网络版)  
(a) 源环境, (b) 暗环境

Fig.8  $J$ - $V$  characteristic curves of betavoltaic batteries with different electrode structures in various environment (color online)  
(a) Source environment, (b) Dark environment

0.83,  $P_{out}$  处于  $11.66\sim 14.69 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,  $\eta_{tot}$  处于  $2.24\%\sim 2.82\%$ 。发现  $P_{out}$  及  $\eta_{tot}$  随着  $H$  而增加, 这与  $J_{sc}$  随  $H$  的变化规律是一致的。这是因为  $H$  的增加, 使得电极对于  $\beta$  粒子的遮挡损失率降低, 导致沉积到换能器件的沉积功率增加, 从而使得  $P_{out}$  及  $\eta_{tot}$  增加。与团队之前的工作<sup>[39]</sup>相比,  $V_{oc}$ 、FF 及  $\eta_{tot}$  分别平均提高了 127.50%、114.47% 及 512.10%, 如表 3 所示。这归因于以下主要原因: 1) 对 P 型欧姆接触电极材料和结构以及退火条件进行了优化。P 型欧姆接触电极材料由之前的 Ti/Al/Au (50/100/100 nm) 优化为 Ni/Ti/Al/W (50/30/90/50 nm); 退火温度和退火时间由之前的 1050 °C 和 3 min 优化为 950 °C 和 5 min, 使得欧姆接触更良好。电极结构由之前的密集程度较高的回字形结构优化为更稀疏的栅型电极, 有效降低了遮挡损失率, 从而提升了总转换效率。2) 外延、钝化及欧姆接触电极等整体器件制备工艺有较大改善, 显著降低了器件的反向饱和电流  $J_0$  (降低了 4~13 个数量级), 从而显著提升了开路电压, 导致总转换效率及输出功率的显著提升。

此外, 总转换效率高于已公开报道的结果 ( $\eta_{tot}$ :  $0.5\%\sim 1.99\%$ <sup>[20-24]</sup>)。对于 PIN 结构辐伏电池<sup>[20,23]</sup>来说, 这主要是因为 I 层的掺杂浓度从  $(1\sim 3)\times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

降低至  $1\times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 从而有效提升了电荷收集效率及总转换效率。此外 I 层厚度从  $3.5\sim 4 \mu\text{m}$  提升至  $10 \mu\text{m}$ , 也可能改善了  $\beta$  粒子射程与换能器件中的有效电荷收集区的匹配程度。

以电池 #1 的输出功率密度为归一化因子, 分别计算了所有电池的相对损失率, 发现相对损失率随着  $H$  的增加而降低, 与电极设计的理论计算结果的规律(图 5)是一致的。表明应适当地增加电极间的间距以降低电池总功率损失率, 从而提升电池总转换效率及输出功率。

### 3 结语

通过综合考虑背散射效应、耗尽区宽度、扩散长度及电极结构等因素对辐伏电池的性能影响, 设计并制备了总转换效率和输出功率处于较高水平的  $^{63}\text{Ni}$ -SiC 基 PIN 结辐伏电池。在优化条件下, 所制备的辐伏电池表现出了优异的性能: 短路电流达到了  $10.29\sim 13.43 \text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 开路电压为  $1.32\sim 1.44 \text{ V}$ , 输出功率密度为  $11.66\sim 14.69 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 总转换效率处于  $2.24\%\sim 2.82\%$ 。相较于本团队之前的工作, 经过工艺优化后的辐伏电池在开路电压、填充因子和总转换效率方面分别平均提高了 127.50%、114.47% 及

表3 辐伏电池测试分析结果  
Table 3 Analysis results of betavoltaic battery testing

电池编号 Battery ID	$H$ / $\mu\text{m}$	$J_{\text{sc}}$ / $\text{nA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$V_{\text{oc}}$ / $\text{V}$	FF	$J_0$ / $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	$P_{\text{out}}$ / $\text{nW}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\eta_{\text{tot}}$ / $\%$	相对损失率 Relative loss rate	参考文献 Reference
#1	1 000	13.43	1.32	0.83	$8.9\times 10^{-17}$	14.69	2.82	0	本工作
#2	750	12.85	1.34	0.81	$1.4\times 10^{-16}$	13.99	2.69	4.8%	This work
#3	500	11.00	1.36	0.83	$2.0\times 10^{-23}$	12.37	2.37	15.8%	
#4	250	10.29	1.44	0.79	$1.2\times 10^{-23}$	11.66	2.24	20.6%	
#a	—	17.03	0.45	0.28	$5.9\times 10^{-10}$	2.13	0.26	—	本团队之前的工作 <sup>[39]</sup>
#b	—	12.36	0.82	0.30	$1.2\times 10^{-12}$	3.09	0.38	—	Our previous work <sup>[39]</sup>
#c	—	16.41	0.53	0.56	$5.3\times 10^{-10}$	4.84	0.60	—	

512.10%。与已公开报道的结果相比,本研究的辐伏电池总转换效率取得了明显提高。短路电流、输出功率及总转换效率随着电极副栅线间距而增加。上述结果验证了通过优化换能器件和电极结构可以有效提升辐伏电池的性能,可为辐伏电池的设计与制备提供重要的理论指导和实验依据。

**致谢** 感谢中国科学院合肥物质科学研究院核能安全技术研究所公共技术中心及中国科学技术大学工程与材料科学实验中心为本文测试工作提供的专业技术支持。

**作者贡献声明** 何厚军负责文章构思、理论计算、实验制备、实验测试、数据分析,起草文章;韩运成负责全面指导,文章审阅修改;王晓彧负责审查、编辑及修订文章;任雷参与编辑及修订文章;孟祥东参与修订文章;郑明杰负责指导、修改及监督。

#### 参考文献

- Katiyar N K, Goel S. Recent progress and perspective on batteries made from nuclear waste[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(3): 33. DOI: [10.1007/s41365-023-01189-0](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01189-0).
- Naseem M B, Kim H S, Lee J, *et al.* Betavoltaic nuclear battery: a review of recent progress and challenges as an alternative energy source[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2023, **127**(16): 7565 - 7579. DOI: [10.1021/acs.jpcc.3c00684](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c00684).
- Chandrashekhar M V S, Thomas C I, Li H, *et al.* Demonstration of a 4H SiC betavoltaic cell[J]. Applied Physics Letters, 2006, **88**(3): 033506. DOI: [10.1063/1.2166699](https://doi.org/10.1063/1.2166699).
- Rappaport P. The electron-voltaic effect in p - n junctions induced by beta-particle bombardment[J]. Physical Review, 1954, **93**(1): 246 - 247. DOI: [10.1103/physrev.93.246.2](https://doi.org/10.1103/physrev.93.246.2).
- Belghachi A, Bozkurt K, Ozdemir O, *et al.* Enhancement of Ni-63 planar source efficiency for betavoltaic batteries [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, **53**(44): 445501. DOI: [10.1088/1361-6463/ab9977](https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9977).
- Maximenko S I, Moore J E, Affouda C A, *et al.* Optimal semiconductors for  $^3\text{H}$  and  $^{63}\text{Ni}$  betavoltaics[J]. Scientific Reports, 2019, **9**: 10892. DOI: [10.1038/s41598-019-47371-6](https://doi.org/10.1038/s41598-019-47371-6).
- Alam T R, Pierson M A, Prelas M A. Beta particle transport and its impact on betavoltaic battery modeling [J]. Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine, 2017, **130**: 80 - 89. DOI: [10.1016/j.apradiso.2017.09.009](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.09.009).
- Zhao C, Liao F Y, Liu K Z, *et al.* Breaking the myth: wide-bandgap semiconductors not always the best for betavoltaic batteries[J]. Applied Physics Letters, 2021, **119** (15): 153904. DOI: [10.1063/5.0068269](https://doi.org/10.1063/5.0068269).
- Zhao C, Lei L, Liao F Y, *et al.* Efficiency prediction of planar betavoltaic batteries basing on precise modeling of semiconductor units[J]. Applied Physics Letters, 2020, **117**(26): 263901. DOI: [10.1063/5.0033052](https://doi.org/10.1063/5.0033052).
- Sachenko A V, Shkrebti A I, Korkishko R M, *et al.* Efficiency analysis of betavoltaic elements[J]. Solid-State Electronics, 2015, **111**: 147 - 152. DOI: [10.1016/j.sse.2015.05.042](https://doi.org/10.1016/j.sse.2015.05.042).
- 刘云鹏.  $\beta$ 辐射伏特效应同位素电池的设计、制备及环境因素影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014. LIU Yunpeng. Design, fabrication and environmental factors of betavoltaic isotope battery[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- 郑人洲.  $\beta$ 辐射伏特效应同位素电池的优化设计与制备工艺研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023. DOI: [10.27162/d.cnki.gjlin.2023.000094](https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2023.000094).

- ZHENG Renzhou. Optimization design and preparation technology of betavoltaic batteries[D]. Changchun: Jilin University, 2023. DOI: [10.27162/d.cnki.gjlin.2023.000094](https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2023.000094).
- 13 张佳辰. 宽禁带半导体辐射伏特式核电池设计与关键工艺研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023. DOI: [10.27517/d.cnki.gzkju.2023.001059](https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2023.001059).
- ZHANG Jiachen. The design and fabrication of betavoltaic battery based on wide bandgap semiconductors [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023. DOI: [10.27517/d.cnki.gzkju.2023.001059](https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2023.001059).
- 14 Tang X B, Ding D, Liu Y P, *et al.* Optimization design and analysis of Si-<sup>63</sup>Ni betavoltaic battery[J]. Science China Technological Sciences, 2012, **55**(4): 990 - 996. DOI: [10.1007/s11431-012-4752-6](https://doi.org/10.1007/s11431-012-4752-6).
- 15 Bouzid F, Dehimi S, Hadjab M, *et al.* Performance prediction of AlGaAs/GaAs betavoltaic cells irradiated by nickel-63 radioisotope[J]. Physica B: Condensed Matter, 2021, **607**: 412850. DOI: [10.1016/j.physb.2021.412850](https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.412850).
- 16 Zheng R Z, Lu J B, Wang Y, *et al.* Understanding efficiency improvements of betavoltaic batteries based on 4H-SiC, GaN, and diamond[J]. Applied Physics Letters, 2022, **121**(10): 103902. DOI: [10.1063/5.0102995](https://doi.org/10.1063/5.0102995).
- 17 Liu Y M, Lu J B, Li X Y, *et al.* A 4H-SiC betavoltaic battery based on a <sup>63</sup>Ni source[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(11): 168. DOI: [10.1007/s41365-018-0494-x](https://doi.org/10.1007/s41365-018-0494-x).
- 18 Zhang L, Cheng H L, Hu X C, *et al.* Model and optimal design of <sup>147</sup>Pm SiC-based betavoltaic cell[J]. Superlattices and Microstructures, 2018, **123**: 60 - 70. DOI: [10.1016/j.spmi.2018.01.007](https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.01.007).
- 19 He H J, Han Y C, Wang X Y, *et al.* Enhancing betavoltaic nuclear battery performance with 3D P+PNN+ multi-groove structure via carrier evolution[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(12): 181. DOI: [10.1007/s41365-023-01331-y](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01331-y).
- 20 Guo H, Shi Y Q, Zhang Y M, *et al.* Fabrication of SiC p-i-n betavoltaic cell with <sup>63</sup>Ni irradiation source[C]//2011 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits. Tianjin, China. IEEE, 2011: 1 - 2. DOI: [10.1109/EDSSC.2011.6117636](https://doi.org/10.1109/EDSSC.2011.6117636).
- 21 Qiao D Y, Yuan W Z, Gao P, *et al.* Demonstration of a 4H SiC betavoltaic nuclear battery based on Schottky barrier diode[J]. Chinese Physics Letters, 2008, **25**(10): 3798 - 3800. DOI: [10.1088/0256-307x/25/10/076](https://doi.org/10.1088/0256-307x/25/10/076).
- 22 Li X Y, Ren Y, Chen X J, *et al.* <sup>63</sup>Ni Schottky barrier nuclear battery of 4H-SiC[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2011, **287**(1): 173 - 176. DOI: [10.1007/s10967-010-0746-7](https://doi.org/10.1007/s10967-010-0746-7).
- 23 Krasnov A A, Legotin S A. Advances in the development of betavoltaic power sources (a review) [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2020, **63**(4): 437 - 452. DOI: [10.1134/S0020441220040156](https://doi.org/10.1134/S0020441220040156).
- 24 Qiao D Y, Chen X J, Ren Y, *et al.* A micro nuclear battery based on SiC Schottky barrier diode[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, **20**(3): 685 - 690. DOI: [10.1109/JMEMS.2011.2127448](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2011.2127448).
- 25 Zhao C, Liu A, Bai S, *et al.* Understanding efficiency differences of betavoltaic batteries measured by electron Gun mimicked source and radioactive  $\beta$  source[J]. Applied Physics Letters, 2020, **117**(19): 193901. DOI: [10.1063/5.0028450](https://doi.org/10.1063/5.0028450).
- 26 Zuo G P, Zhou J L, Ke G T. A Simple theoretical model for <sup>63</sup>Ni betavoltaic battery[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2013, **82**: 119 - 125. DOI: [10.1016/j.apradiso.2013.07.026](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.07.026).
- 27 孟庆巨, 刘海波, 孟庆辉. 半导体器件物理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- MENG Qingju, LIU Haibo, MENG Qinghui. Semiconductor device physics[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- 28 Anderson B L, Anderson R L. Fundamentals of semiconductor devices[M]. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- 29 吴昊, 黄云辉, 李玲, 等. SiC MOSFET 欧姆接触的研究进展综述[J]. 智能电网, 2017, **5**(8): 773 - 776. DOI: [10.14171/j.2095-5944.sg.2017.08.007](https://doi.org/10.14171/j.2095-5944.sg.2017.08.007).
- WU Hao, HUANG Yunhui, LI Ling, *et al.* Current research progress on ohmic contact for SiC MOSFET[J]. Smart Grid, 2017, **5**(8): 773 - 776. DOI: [10.14171/j.2095-5944.sg.2017.08.007](https://doi.org/10.14171/j.2095-5944.sg.2017.08.007).
- 30 张旭芳. 4H-SiC 欧姆接触研究及其应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- ZHANG Xufang. The study and application of 4H-SiC ohmic contact[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- 31 Fursin L, Zhao J, Weiner M. Nickel ohmic contacts to p- and n-type 4H-SiC[J]. Electronics Letters, 2001, **37**(17): 1. DOI: [10.1049/el:20010738](https://doi.org/10.1049/el:20010738).
- 32 Joo S J, Baek S, Kim S C, *et al.* Simultaneous formation of ohmic contactson p+- and n+-4H-SiC using a Ti/Ni bilayer[J]. Journal of Electronic Materials, 2013, **42**(10): 2897-2904. DOI: [10.1007/s11664-013-2677-x](https://doi.org/10.1007/s11664-013-2677-x).

- 33 Vivona M, Greco G, Lo Nigro R, *et al.* Ti/Al/W Ohmic contacts to p-type implanted 4H-SiC[J]. Journal of Applied Physics, 2015, **118**(3): 035705. DOI: [10.1063/1.4927271](https://doi.org/10.1063/1.4927271).
- 34 He Y J, Lv H L, Tang X Y, *et al.* Ohmic contacts simultaneously formed on n-type and p-type 4H-SiC at low temperature[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, **805**: 999 - 1003. DOI: [10.1016/j.jallcom.2019.07.126](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.126).
- 35 Laariedh F, Lazar M, Cremillieu P, *et al.* The role of nickel and titanium in the formation of ohmic contacts on p-type 4H-SiC[J]. Semiconductor Science and Technology, 2013, **28**(4): 045007. DOI: [10.1088/0268-1242/28/4/045007](https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/4/045007).
- 36 Sakai T, Nitta K, Tsukimoto S, *et al.* Ternary TiAlGe ohmic contacts for p-type 4H-SiC[J]. Journal of Applied Physics, 2004, **95**(4): 2187 - 2189. DOI: [10.1063/1.1643772](https://doi.org/10.1063/1.1643772).
- 37 Zhang J C, Han Y C, Ren L, *et al.* Study on the series resistance of betavoltaic batteries[J]. Semiconductor Science and Technology, 2022, **37**(12): 125009. DOI: [10.1088/1361-6641/ac985b](https://doi.org/10.1088/1361-6641/ac985b).
- 38 Ding Z, Jiang T X, Zheng R R, *et al.* Quantitative modeling, optimization, and verification of <sup>63</sup>Ni-powered betavoltaic cells based on three-dimensional ZnO nanorod arrays[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(11): 144. DOI: [10.1007/s41365-022-01127-6](https://doi.org/10.1007/s41365-022-01127-6).
- 39 张佳辰, 韩运成, 任雷, 等. SiC 辐射伏特式同位素电池的设计及制备研究[J]. 原子能科学技术, 2021, **55**(S1): 182 - 188. DOI: [10.7538/yzk.2020.youxian.0896](https://doi.org/10.7538/yzk.2020.youxian.0896).  
ZHANG Jiachen, HAN Yuncheng, REN Lei, *et al.* Design and preparation of SiC radiation volt isotope battery[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, **55**(S1): 182 - 188. DOI: [10.7538/yzk.2020.youxian.0896](https://doi.org/10.7538/yzk.2020.youxian.0896).