

一种基于 PIN 结的硅基微型核电池研究*

乔大勇[†] 陈雪娇 任 勇 藏 博 苑伟政

(西北工业大学微/纳米系统实验室, 西安 710072)

(2010 年 4 月 12 日收到; 2010 年 6 月 2 日收到修改稿)

针对 PN 结式微型核电池由于衬底掺杂浓度较大而造成的少子寿命短, 收集效率低等缺点, 提出使用硅基 PIN 结作为微型核电池的换能结构, 构建了 PIN 换能结构的电学模型, 并对其性能影响因素进行了分析和仿真, 优化了换能结构参数. 完成换能结构加工之后, 分别使用⁶³Ni, ¹⁴⁷Pm 和 ²⁴¹Am 对换能结构进行了辐照实验. 实验结果表明, PIN 换能结构通过增加耗尽层宽度来增大电子空穴对的收集空间, 通过使用保护环来降低漏电流, 能够有效提高短路电流和开路电压, 最终提升能量转换效率.

关键词: 微型核电池, 辐射伏特, 微机电系统, PIN 结

PACS: 07.10.Cm, 89.30.-g, 73.30.+y, 78.66.Fd

1. 引言

电池的体积、容量和环境适应性是决定电子产品体积和寿命的瓶颈性因素. 微型核电池具有寿命长、能量密度高、输出特性稳定等特点而成为未来能源发展的重要分支. 微型核电池按换能原理不同可分为间接式和直接式两种. 间接式换能结构有自震荡悬臂梁、辐射-荧光-电和辐射-热-电三种^[1,2]; 直接式换能结构有 PN 结式^[3]和肖特基结式两种^[4,5]. 直接换能是利用类似太阳能电池光生伏特^[6,7]的辐射伏特效应, 直接将放射性同位素的辐射能通过半导体结构转化为电能^[8,9], 其换能结构简单, 加工工艺成熟, 研究最为广泛. 现有的硅基 PN 结式微型核电池输出功率已达到纳瓦级, 但其结构的局限性导致电荷收集区域狭小, 少子寿命短, 能量转换效率低下. 本研究以现有的 PN 结为基础, 设计出一种具有保护环结构的 PIN 复合结换能结构(其中 I 代表高阻 N⁻型硅), 以期克服衬底掺杂浓度较大而造成的少子寿命短、耗尽层宽度小等缺点, 增大电子空穴对的收集空间, 并且通过合理设计的保护环来降低漏电流密度, 提高开路电压, 最终提升能量转换效率.

2. PIN 微型核电池结构设计

本研究设计的 PIN 结式微型核电池基本结构如图 1 所示, 依次包括上电极金属层、SiO₂ 钝化层、P⁺ 硅区、N⁻ (I) 硅区、N⁺ 硅区和下电极金属层. P⁺ 硅区和 N⁻ 硅区中间形成宽度为 W 的耗尽层.

1) 上、下电极 采用金属 Al 制作上、下电极, 作为器件打线以及降低器件整体串联电阻的导电层;

2) SiO₂ 钝化层 采用 SiO₂ 作为钝化层, 降低半导体表面活性, 以此来降低少数载流子表面复合速度, 提高电池的开路电压和短路电流;

3) P⁺ 硅区 注入 B 形成 P⁺ 硅区, 在高阻 N⁻ 层界面处形成突变 PN 结;

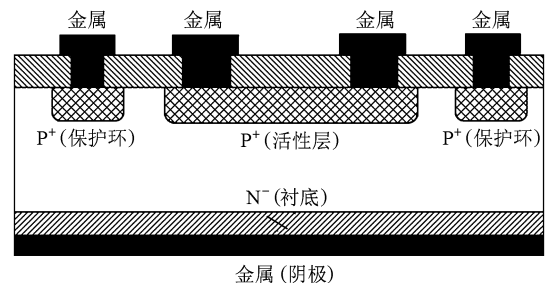


图 1 PIN 式微型核电池结构示意图

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2009AA04Z318)和教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-10-0075)资助的课题.

[†] E-mail: dyqiao@nwpu.edu.cn

4) N^- 硅区 PN 结式微型核电池中一般使用掺杂浓度较高 ($1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) 的 N 型硅片作为衬底, 在衬底的上表面扩散一层高掺杂的 P 区, 从而形成 PN 结. 但高掺杂衬底使得耗尽层宽度较小, 电子空穴对的吸收能力差, 影响器件性能. 本设计则是利用 P^+ 硅层和 N^- 型 (高阻) 衬底之间的浓度差, 形成宽度较大的耗尽层;

5) N^+ 硅区 同 P^+ 硅区一样, N^+ 硅区也是一个重掺杂区域, N^+ 硅区和下电极金属相连, 其高掺杂浓度是为了形成良好欧姆接触;

6) 保护环 表面反型层会使 PIN 结电场畸变, 在结边缘附近电场并不垂直于硅片表面, 而有横向分量存在, 如图 2(a) 所示. 当结表面附近有带电粒子产生和存在时, 此横向电场就推动了这些电荷的移动, 从而形成了表面漏电流. 对于太阳能电池, 光伏电流的数量级为 mA — 100mA , 而漏电流数量级只为 nA — μA , 影响不大. 而对于微型核电池, 辐生电

流的数量级为 pA 或 nA . 如果漏电流的量级仍为 nA — μA , 电池就无法产生电能输出. 为了减小漏电流, 在换能结构外围添加保护环, 将杂散电场的影响排除在换能结构之外, 如图 2(b) 所示.

3. PIN 式微型核电池电学模型

微型核电池等效电路如图 3 所示, 由一个能产生稳定辐生电流的电流源 I_B 、一个理想二极管电流 I_D 和并联电阻 R_{sh} 、串联电阻 R_s 组合而成. R_{sh} 为考虑载流子产生与复合以及沿电池边缘的表面漏电流而设计的一个等效并联电阻, R_s 为扩散顶区的表面电阻、电池体电阻及上下电极之间的欧姆电阻等综合得到的等效串联电阻, R_L 为外负载电阻. 电池两端的电压为 V_j , 负载两端电压为 V , 流过电池单位面积的电流为 I .

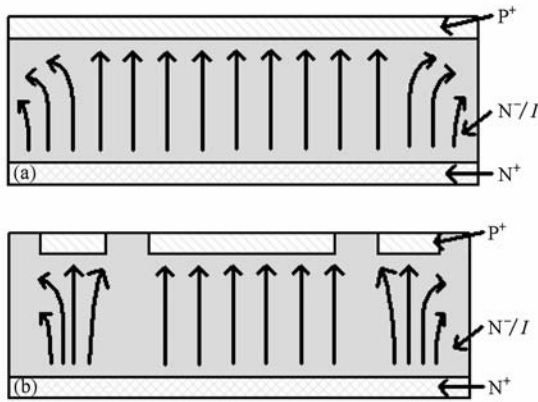


图 2 内电场图 (a) 无保护环结构的内电场, (b) 有保护环结构的内电场

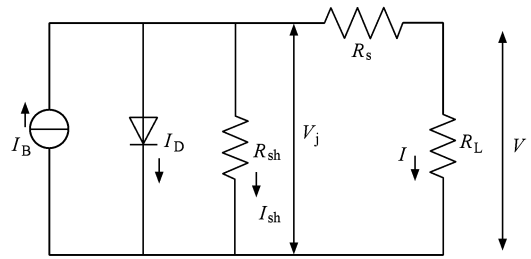


图 3 微型核电池等效电路图

微型核电池电学特性参数主要有:

1) 辐生电流密度

外部 β 粒子入射到微型核电池换能结构中, 激发出电子空穴对产生辐生电流, 辐生电流密度表示为^[10]

$$J_B = q \frac{E\Phi}{E_{\text{pair}}} \left\{ \frac{L_a L_n}{L_a^2 - L_n^2} \left[\left(\coth \frac{T_p}{L_n} + \frac{L_n}{L_a} \right) e^{-\frac{T_p}{L_a}} - \frac{1}{\sinh \frac{T_p}{L_n}} \right] + e^{-\frac{T_p}{L_a}} [1 - e^{-\frac{W}{L_a}}] \right. \\ \left. + \frac{L_p L_a}{L_a^2 - L_p^2} \times \left[\left(\coth \frac{T - W - T_p}{L_p} - \frac{L_p}{L_a} \right) e^{-\frac{W + T_p}{L_a}} - \frac{e^{-\frac{T}{L_a}}}{\sinh \frac{T - W - T_p}{L_p}} \right] \right\}, \quad (1)$$

其中 T_p 是 P^+ 层的厚度, L_a 是入射粒子穿透材料的厚度, L_n, L_p 分别是电子、空穴的扩散长度, T 是总的有效电池厚度, W 是耗尽层宽度, E_{pair} 是材料的电离能 (对于硅而言, $E_{\text{pair}} = 3.2 \text{ eV}$), $\Phi \cdot E$ 是放射源的输出功率. 如果以 α_1, α_2 和 α_3 分别代表 P^+ 层、耗尽层

和 N^- 层三部分对辐生电流的贡献比例, 则公式 (1) 可以表示为

$$J_B = q \frac{E\Phi}{E_{\text{pair}}} (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3). \quad (2)$$

2) 短路电流 I_{sc}

在图 3 所示的电路模型中,设微型核电池的反向饱和电流为 I_0 ,根据理想二极管方程则有

$$I_D = I_0 (e^{\frac{qV_j}{kT}} - 1), \quad (3)$$

则短路电流可以表示为

$$I_{sc} = (I_B - I_D) \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_s}. \quad (4)$$

3) 开路电压 V_{oc}

当负载 R 无穷大时,相当于开路,此时 $I=0$,电池开路电压 V_{oc} 为

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_B}{I_0} + 1 \right). \quad (5)$$

4) 输出功率 P

电池的输出功率表达式为

$$P = IV. \quad (6)$$

5) 填充因子 FF

填充因子用“ FF ”表示,也就是最大功率矩形面积对 $V_{oc} \cdot I_{sc}$ 矩形面积比例,即

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}, \quad (7)$$

式中 V_m 是最大输出功率时的电压, I_m 代表最大输出功率时的电流.

填充因子越大,输出功率越接近极限功率.在一定照射活度下,填充因数越大,输出功率就越高.

6) 转换效率 η

微型核电池的转换效率 η 是判定换能结构优良的标准,可以表示为

$$\eta = FF \frac{V_{oc} I_{sc}}{V_{beam} I_{beam}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \frac{V_{oc} I_{sc}}{V_{beam} I_{beam}}, \quad (8)$$

式中 V_{beam} 对应加速带电粒子相应动能所需的电压,例如, ^{63}Ni 放射出的 β 粒子的平均动能为 17.1 keV,那么 V_{beam} 则为 17.1 kV; I_{beam} 为放射源衰变发出的带电粒子电量(活度乘以电子电量).

4. PIN 换能结构优化设计

影响 PIN 结式微型核电池的因素很多,本研究从微型核电池的微观电学特性角度着手,在分析微电池性能影响因素的基础上,进行换能结构的优化设计.

4.1. β 粒子穿透深度

β 粒子在材料中的射程尚没有一种精确的定量解,目前有两种理论求解方法,一种方法是根据电

子在介质中的电离损失的 Bethe 变形公式^[11],一种则是利用经验公式来推导其射程. β 粒子射程的经验公式可以表示为^[12]

$$R = \frac{0.412}{\rho} E^{1.265-0.0954 \ln E} \quad E \leq 2.5 \text{ MeV}, \quad (9)$$

式中的 E 代表粒子动能(单位为 MeV), R 代表 β 粒子射程(单位为 cm), ρ 为穿透物质的密度(硅的密度为 2.33 g/cm³). 本研究所用到的两种放射源 ^{63}Ni 和 ^{147}Pm 粒子能量均在此范围内.

利用经验公式,可以计算出 ^{63}Ni 最大动能为 66.7 keV 的 β 粒子在硅中的射程约为 28 μm , ^{63}Ni 平均动能为 17.1 keV 的 β 粒子在硅中的射程为 2.8 μm . 图 4 给出不同能量的 β 粒子在硅中的射程.

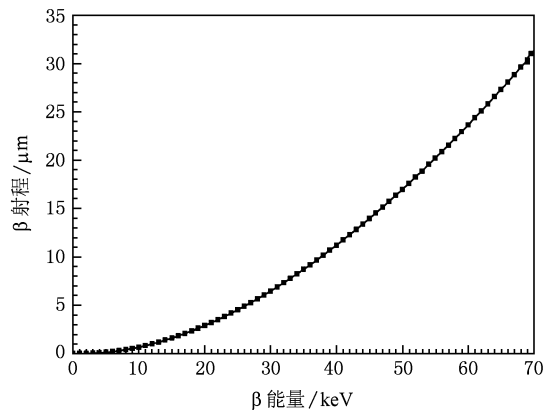


图 4 不同能量的 β 粒子在硅中的射程

4.2. 耗尽层宽度优化

耗尽层内部存在内建电势,利用电场力对耗尽层内部的电子空穴对进行分离,从而在外电路产生电流.耗尽层是对短路电流贡献最大的区域,为了在耗尽层内部激发出的电子空穴对最多,就要让外部 β 粒子的能量尽可能的在耗尽层区域释放,设计的耗尽层宽度必须和 β 粒子的穿透深度相匹配,达到能量利用的最大化.

对于 PN 结,其耗尽层宽度的表达式为

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_{bi}}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{1/2}, \quad (10)$$

其中 N_A 是 P 区(受主区)掺杂浓度, N_D 为 N 区(施主区)掺杂浓度,对于 PIN 结,由于 N_A 数量级要远远高于 N_D ,上式可以简化成

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_{bi}}{q N_D} \right]^{1/2}, \quad (11)$$

其中 ϵ_s 为硅的介电常数, ϵ_0 为真空中的介电常数, q 为电子电量值, V_{bi} 是内建电势

$$V_{bi} = V_t \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right), \quad (12)$$

式中 V_t 是热电压, 常温下等于 0.0259 V, n_i 是硅材料的本征载流子浓度.

开路电压的理论极限值等于内建电势, 图 5 给出了 N^- 型衬底掺杂浓度与耗尽层宽度及内建电势的关系.

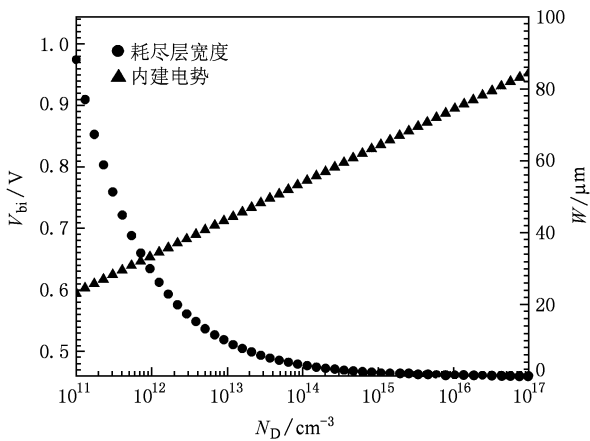


图5 衬底掺杂浓度与耗尽层宽度及内建电势关系曲线

从图 5 可以看出, 耗尽层宽度 W 与衬底掺杂浓度成反比, 而内建电势 V_{bi} 随着掺杂浓度升高而变大. 对于最大动能的 ^{63}Ni β 粒子射程来说, 耗尽层宽度 W 应该保持在 28 μm 左右, 得到的衬底掺杂浓度为 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$. 但从另一方面来说, 内建电势 V_{bi} 是开路电压 V_{oc} 的理论极限值, 提高内建电势, 开路电压的上限也会有所上升, 但实际上开路电压并不是完全按照理论值线性上升, 随着掺杂浓度的升高, 由于少数寿命、扩散长度等参数的限制, 开路电压会先增大后下降.

4.3. 少数寿命和扩散长度优化

辐生伏特效应也与少数载流子的寿命和扩散长度有关. 少数载流子寿命越高, 扩散长度越长, 在耗尽层外产生的空穴电子对就越容易通过漂移运动进入耗尽层而对辐生电流作出贡献, 相应的短路电流也就越高. 实验研究表明, 少数扩散长度以及少数寿命随掺杂浓度的增加而减少, 并且在掺杂浓度大于 $10^{17}/\text{cm}^3$ 时, 扩散长度和少数寿命急剧下降.

为了增加少数寿命、增大少数扩散长度, P 区和

N 区的掺杂浓度应该尽可能低. 对于 N 区来说, 实验表明, 虽然 N_D 小于 $10^{14}/\text{cm}^3$ 时少数寿命还在增大, 但其少数扩散长度 L_p 已经没有太大变化, 故选择的衬底硅材料掺杂浓度只要小于 $10^{14}/\text{cm}^3$ 就可以了. 对于 P 区来说, 能够与上电极金属形成较好欧姆接触的掺杂浓度下限为 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, 掺杂浓度在 $10^{19}/\text{cm}^3$ 量级左右是比较合适的, 再高会使 P 区禁带宽度收缩, 少数寿命降低, 从而影响开路电压和短路电流.

4.4. 体电阻优化

增加开路电压和短路电流的另外一个途径是减小串联电阻 R_s 和增加并联电阻 R_{sh} . 串联电阻是电极金属电阻、金属与硅的欧姆接触电阻和衬底体电阻. 在器件加工良好的条件下, 金属电极电阻和金属-硅欧姆接触电阻较小, 可以忽略不计.

衬底体电阻定义为

$$R_b = \frac{\rho_b T}{A}, \quad (13)$$

式中 ρ_b 是体电阻率, A 是换能结构面积, T 是换能结构厚度. 电阻率 ρ_b 主要取决于衬底的掺杂浓度, 它随着掺杂浓度的减小而增大. 当 N^- 层的掺杂浓度为 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 时, ρ_b 会达到 $2000 \Omega \cdot \text{cm}$, 高的电阻率必然会增大体电阻, 因此, 换能结构的厚度必须加以控制.

换能结构厚度为 P^+ 区厚度、 N^- 层宽度、 N^+ 区厚度和上下电极厚度之和. 采用突变式 PN 结, P 区厚度小于 1 μm , 耗尽层宽度根据 β 粒子的穿透深度决定, 约为 28 μm , 背面的 N^+ 区只是为了做欧姆接触层, 厚度也低于 1 μm , 主要影响体电阻的部分分布在 N^- 层区域. 为了能让在耗尽层外部产生的电子空穴对也可以跃迁到耗尽层内部, 并在内建电场下分离以产生可用的电流, 理想的 N^- 层厚度的选取应该等于耗尽层宽度 W 和少数(空穴)扩散长度 L_p 之和. 设计中, 认为 L_p 长度约为 200 μm ^[13]. 按照上述理论, 器件的总厚度就可以确定, 约为 240 μm .

4.5. 优化结果

根据优化所得到的准则, 最终选择 P^+ 区掺杂为 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, N^- 区掺杂浓度为 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^3$. 由于市场上的高阻硅厚度一般为 300 μm (2 英寸), 在尽量满足要求的前提下, 选择 300 μm 厚的区熔高阻硅作为衬底.

5. PIN 核电池版图设计与制造工艺

换能结构版图如 6 所示. 换能结构大小为 $1.2\text{ cm} \times 1.2\text{ cm}$, 有效面积为 1 cm^2 , 上电极宽度设计为

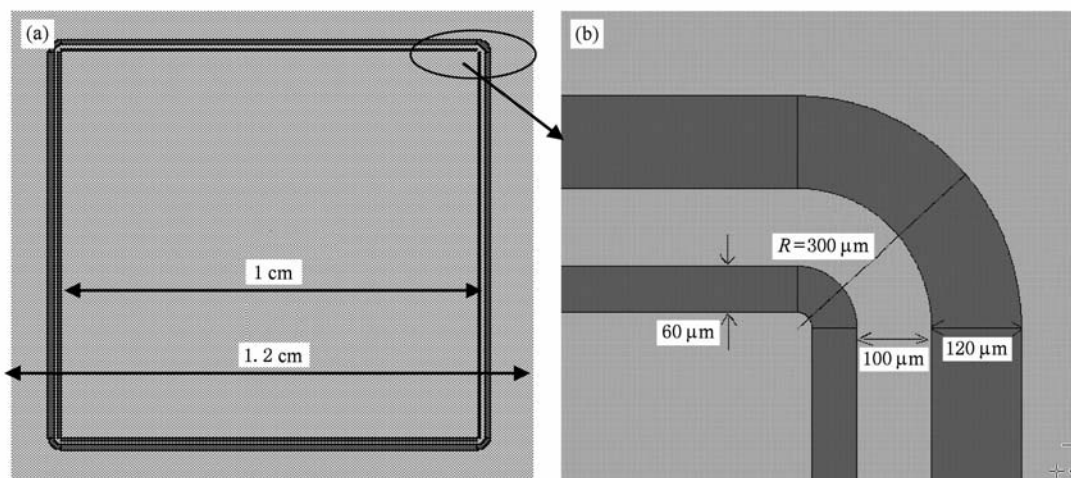


图 6 版图形貌及局部放大图

微型核电池的工艺流程如图 7 所示.

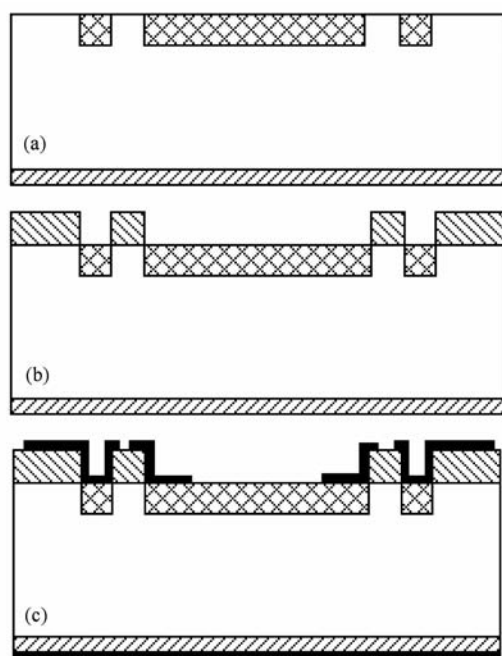


图 7 PIN 微型核电池器件加工工艺流程 (a) 注入杂质 P 和 B, (b) 生长 SiO_2 钝化层并图形化, (c) 制作正面电极和背面电极

极 $\square$ B $\square$ P $\square$ SiO_2 $\blacksquare$ 金属

如图 7(a) 所示, 衬底正面注入杂质 B, 注入能量为 60 keV , 掺杂浓度在 $10^{19}/\text{cm}^3$ 量级, 注入剂量为 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$, 注入掩模为光刻胶. 在衬底背面注

$60\text{ }\mu\text{m}$, 保护环宽度设计为 $120\text{ }\mu\text{m}$. 根据 Kyuregyan^[14] 的理论, 保护环与上电极的间隔距离必须大于或等于 3 倍的耗尽层宽度, 由于前面设计的耗尽宽度约为 $28\text{ }\mu\text{m}$, 考虑到一些误差因素, 实际版图中金属电极与保护环之间的距离为 $100\text{ }\mu\text{m}$.

入 P, 使硅中掺杂浓度大于 $10^{19}/\text{cm}^3$, 以确保硅能和金属形成良好的欧姆接触, 参数如表 1 所示. 为了防止注入形成死层, 在注入之前需要通过热氧化在衬底表面形成一层氧化硅.

表 1 离子注入相关参数

杂质	注入能量 /keV	注入剂量 / 10^{15} cm^{-2}	结深 / μm	峰值浓度 / 10^{19} cm^{-3}
正面 B	60	1	0.68	5.32
背面 P	80	5	0.34	54.5

图 7(b) 使用 $40\%\text{ HF}$ 溶液去除二氧化硅层, 快速热退火激活注入杂质. 低压化学沉积二氧化硅并湿法腐蚀形成钝化层. 图 7(c) 为制备上电极和下电极.

6. PIN 微型核电池的测试及分析

加工完成的 PIN 换能结构如图 8 所示. 抽取 6 片换能结构作为测试对象. 首先测试暗特性曲线, 得到漏电流. 从 0 V 逐渐加偏压到 100 V , 6 片器件的漏电流均在 11 nA 以下, 最优值不超过 1 nA . 在无外置偏压下, 漏电流均保持在皮安级, 说明器件的加工工艺较好、污染小.

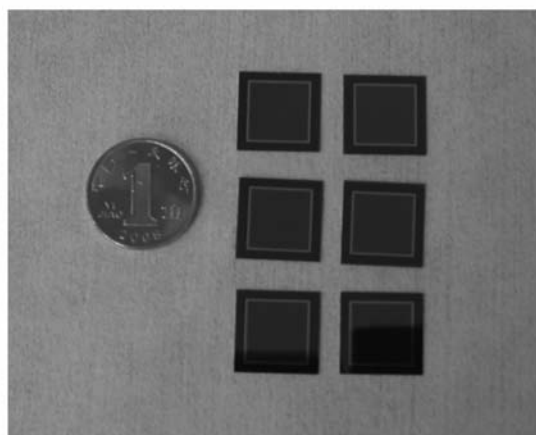


图8 PIN 微型核电池样件

其次用 ^{63}Ni , ^{147}Pm , ^{241}Am 三种放射源对换能结构进行辐照测试. 三种放射源的基本参数如表 2 所示.

用活度密度为 4 mCi/cm^2 ($1\text{Ci} = 37\text{ GBq}$) 的 ^{63}Ni 放射源进行了辐照测试, 测试结果如表 3 所示. 由表 3 可见, 器件的一致性较好, 每个器件的并联电阻都在兆欧姆级, 可以认为旁路电阻对器件性能的影响忽略不计. 对于微型核电池来讲, 转换效率和最终输出功率是衡量器件实用性的标准. 可以看出, 3 号器件最大输出功率为 9.94 nW/cm^2 , 转换效率最高的可以达到 2.45% (硅的理论极限转换效率为 $4\% - 6\%$). 在同样的放射源测试下, PN 结的输出功率只能达到 0.12 nW/cm^2 ^[13], 表明采用 PIN 结构之后, 硅基微型核电池的转化效率得到明显提高.

表2 三种核素放射源的基本参数

核素源	辐射粒子类型	半衰期/a	粒子最大动能(E_{max})/MeV	粒子平均动能(E_{avg})/MeV
^{63}Ni	β 粒子	100.2	0.0667	0.0171
^{147}Pm	β 粒子	2.6	0.2200	0.0620
^{241}Am	α 粒子	458.0	5.5000	—

表3 换能结构一致性测试对照表

器件号	1	2	3	4	5	6
开路电压/V	0.16	0.18	0.19	0.18	0.18	0.18
短路电流/nA	67.60	61.87	90.91	64.56	64.87	64.66
并联电阻/M Ω	10.8	277	188	162	130	48.9
填充因子	0.490	0.649	0.641	0.615	0.624	0.613
最大输出功率/ $\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2}$	6.35	8.69	9.94	9.07	9.35	8.65
转换效率/%	1.56	2.14	2.45	2.24	2.31	2.13

在使用 ^{63}Ni 放射源进行一致性测试后, 取 2 号和 3 号器件, 分别使用 ^{63}Ni 和 ^{147}Pm 放射源进行为期 1 a 的不间断辐照, 测量前后的性能变化如表 4 所示. 其中, ^{63}Ni 的活度密度为 4 mCi/cm^2 , 且因为 ^{63}Ni 的半衰期长达 100 a, 可以忽略 ^{63}Ni 在一年时间内的活度变化; 而 ^{147}Pm 在 2008 年的活度密度为 64 mCi/

cm^2 , 因为其半衰期仅为 2.6 a, 辐照 1 a 后对其活度进行重新测试, 活度密度下降为 44 mCi/cm^2 , 在计算换能结构转换效率的时候应该使用下降后的活度密度. 测试数据表明, 换能结构在低能 β 放射源下持续辐照 1 a 后, 其性能没有明显衰减.

表4 时隔 1a 两种放射源辐照结果

放射源	开路电压/V	短路电流/nA	最大输出功率/nW	最大功率电压/V	最大功率电流/nA	填充因子	转换效率/%
^{147}Pm 2009 年 (44 mCi/cm^2)	0.25	984.28	157.51	0.18	853.32	0.668	0.96
(3 号) 2008 年 (64 mCi/cm^2)	0.26	1300.12	220.42	0.19	1128.41	0.651	0.94
^{63}Ni 2009 年 (4 mCi/cm^2)	0.17	58.21	6.42	0.12	53.52	0.661	1.58
(2 号) 2008 年 (4 mCi/cm^2)	0.18	61.87	6.35	0.12	52.81	0.613	1.56

使用低能 β 放射源得到的输出功率距离实用的微瓦级还有一定的距离. 提高输入功率的方法有

两种:

1) 增大单位面积上 β 放射源的活度. 但是由于放射源的自吸收效应, 使得投料量和最终表观活度两者增长不成正比, 并且当源厚度达到一定程度后, 表观活度不再增长;

2) 选择更高能量的 α 放射源. α 射线能量高, 能在更小的活度下产生较大的源功率, 且其在空气中的电离衰减很快, 比较容易防护.

因此, 本研究尝试了用低活度、高能量的放射源 ^{241}Am 进行测试. ^{241}Am 半衰期为 458 a, 衰变 α 粒

子, 能量为 5.5 MeV, 在空气中射程超过 20 cm 后损失殆尽, 容易防护. 选择 ^{241}Am , 首先其在烟雾探测器中应用广泛, 比较容易购买, 其次是根据 Trim95 仿真其在 Si 中的穿透深度接近 28 μm , 与前面所研制换能结构的耗尽层宽度匹配度较高.

测试中用到的每个放射源活度为 0.8 μCi , 面积大约为 3 mm^2 , 为了使器件的辐照区全部被放射源照射, 本文使用了 16 个相同规格的放射源放置在换能结构表面, 分别测试辐照时间为 1 min, 10 min, 10 h 和 24 h 的 1 号换能结构的 I-V 性能曲线.

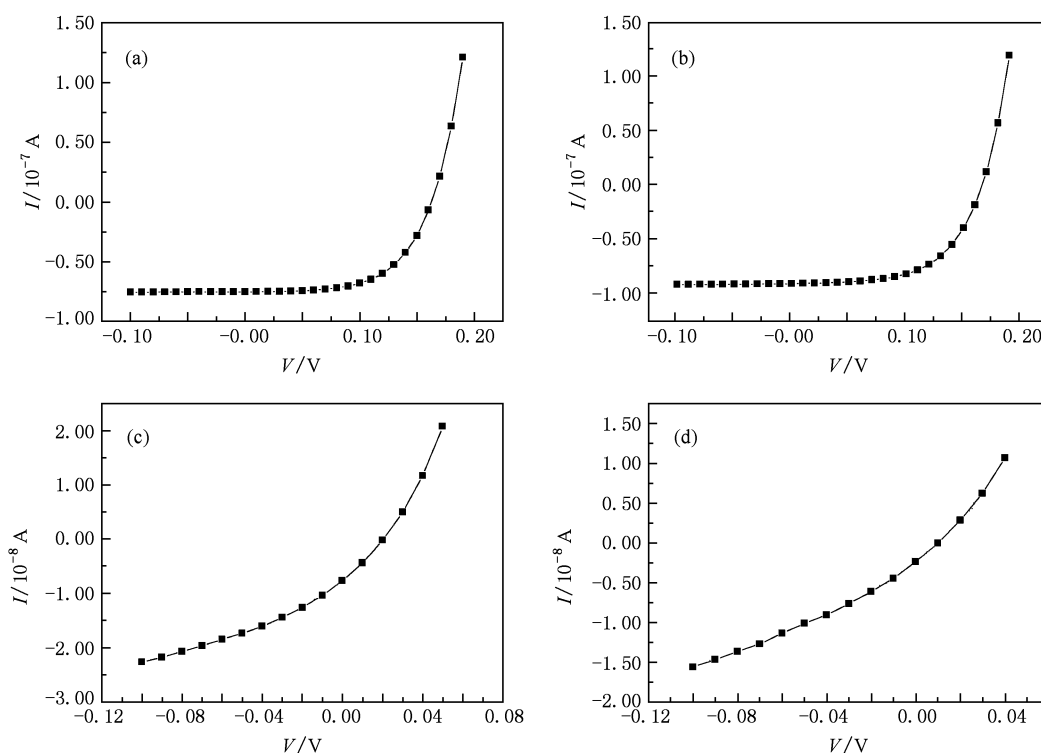


图9 ^{241}Am 辐照不同时间下的 I-V 曲线 (a) 1 min 后测试曲线, (b) 10 min 后测试曲线, (c) 10 h 后测试曲线, (d) 24 h 后测试曲线

表5 在 ^{241}Am 辐照不同时间下的测试数据

辐照时间	开路电压/V	短路电流/nA	最大输出功率 P_{max} /nW	填充因子 FF	转换效率/%
1 min	0.16	75.4	7.18	0.595	1.89
10 min	0.16	91.5	8.86	0.605	2.33
10 h	0.02	7.6	—	—	—
24 h	0.01	2.3	—	—	—

从图9中可以看出, 硅基 PIN 换能结构在活度仅为 12.8 μCi 的强 α 放射源的照射下, 初期性能优越. 但是, 硅基换能结构在长时间的高能 α 粒子轰击下, 性能逐渐变差, 经过 10 h 的照射, 换能结构已经遭受了不可逆转的晶格损伤, 经过 24 h 的辐照

后, 电学性能基本消失, 结构彻底失效. 虽然硅结构不能承受 α 的辐照能量, 但是证明如果能够选择抗辐射能力更强、禁带宽度更大的材料 (如 SiC), 就可能制造出转换效率更高、输出功率密度更大的器件.

7. 结 论

使用硅基 PIN 结作为换能结构来增大耗尽层宽度,并使用保护环减小漏电流,可以有效增强微型核电池的转化效率. β 粒子辐照实验表明,换能结构没有出现明显性能衰减,可以长期有效地将辐射能

转化为电能. α 粒子辐照实验表明,在有限的活度下,高能粒子能够产生较大的电能输出,虽然由于硅材料的禁带宽度小而在长时间辐照后发生损伤而失效,但证明采用更高能量的放射源和更高禁带宽度的耐辐照半导体材料制备换能结构是提升辐射伏特型微型核电池效率的有效途径.

-
- [1] Li H, Lal A, Blanchard J, Henderson D 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 1122
 - [2] Rinehart G H 2001 *Prog. Nucl. Energ.* **39** 305
 - [3] Chandrashekhar M V S, Thomas C I, Li H, Spencer M G, Lai A 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 033506
 - [4] Lee S K, Son S H, Kim K, Park J W, Lim H, Lee J M, Chung E S 2009 *Appl. Radiat. Isotopes* **67** 1234
 - [5] Qiao D Y, Yuan W Z, Gao P, Yao X W, Zang B, Zhang L, Guo H, Zhang H J 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3798
 - [6] Tian R Y, Yang R Q, Peng J B, Cao Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 1032
 - [7] Yuan Y J, Hou G F, Xue J M, Han X Y, Liu Y Z, Yang X Y, Liu L J, Dong P, Zhao Y, Geng X H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3892 (in Chinese) [袁育杰、侯国付、薛俊明、韩晓艳、刘云周、杨兴云、刘丽杰、董 培、赵 颖、耿新华 2008 物理学报 **57** 3892]
 - [8] Guo H, Li H, Lal A, Blanchard J 2008 *Proceeding of the 9th IEEE International Conference on Solid State and Integrated Circuit Technology Beijing, China, October 20—23, 2008* p2365
 - [9] Guo H, Yang H, Zhang Y 2007 *Proceeding of the 20th IEEE International Conference on MEMS Hyogo, Japan, January 21—25, 2007* p867
 - [10] Lutz G 1999 *Semiconductor Radiation Detectors* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag) p95
 - [11] Lu X T 1981 *Nuclear Physics* (Beijing: Atomic Energy Press) p 104 (in Chinese) [卢希庭 1981 原子核物理 (北京: 原子能出版社) 第 104 页]
 - [12] Liu Q C 2005 *Overview of Nuclear Science* (Harbin: Harbin Institute of Technology Press) p 28 (in Chinese) [刘庆成 2005 核科学概论 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社) 第 28 页]
 - [13] Dong P 2008 *MS dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [董 鹏 2008 硕士论文 (西安: 西北工业大学)]
 - [14] Kyuregyan A S 2000 *Semiconductors* **34** 835

A nuclear micro-battery based on silicon PIN diode^{*}

Qiao Da-Yong[†] Chen Xue-Jiao Ren Yong Zang Bo Yuan Wei-Zheng

(Micro and Nano Electromechanical Systems Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 12 April 2010; revised manuscript received 2 June 2010)

Abstract

Due to the use of heavily doped N type silicon substrate, the nuclear micro-battery based on silicon PN diode suffers from the small minority carrier life-time and small depletion region width, and can not achieve high energy transfer efficiency. A nuclear micro-battery utilizing silicon PIN diode as the energy transfer structure was demonstrated with achieves higher electrical power output. Theoretical model was built to predict the power output performance of this kind of micro-nuclear battery and structure optimization was performed in terms of the stopping range of beta particles, the depletion region width, the minority carrier life-time and the body resistance. Prototypes of PIN energy transfer structure were fabricated and were illuminated by using beta radioisotopes ^{63}Ni , ^{147}Pm and alpha radioisotope ^{241}Am as the radiation sources, and proved to be effective to improve the energy transfer performance.

Keywords: micro-nuclear battery, betavoltaics, MicroElectroMechanical systems, PIN diode

PACS: 07.10.Cm, 89.30.-g, 73.30.+y, 78.66.Fd

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA04Z318) and Program for the New Century Excellent Talents in Universities, Ministry of Education of China (Grant No. NCET-10-0075).

[†] E-mail: dyqiao@nwpu.edu.cn