

基于镍-63 硅基辐伏能量转换结构初探*

高晖[†] 罗顺忠 张华明 王和义

(中国工程物理研究院, 核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2011 年 11 月 14 日收到; 2011 年 12 月 12 日收到修改稿)

针对辐射伏特效应同位素微电池研究中所面临的主要问题——辐伏转换效率提高与辐射损伤这一相互制约的矛盾体, 利用单晶硅低能电子辐照感生缺陷行为研究, 结合两种 PIN 结构的电学性能测试, 提出 I 区掺杂浓度为 $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 的 $\text{P}^+\text{I}(\text{N}^-)\text{N}^+$ 器件符合 P, N 型硅辐射损伤效应预测结果. 并以此为原型器件进行 ^{63}Ni 辐照在线输出特性测试, 通过与 Wisconsin 大学实验数据比较, 对影响能量转换效率低下的主要因素进行了分析, 考虑主要从器件采用三维 PIN 结构; 增大耗尽层能量沉积比重; I (N^-) 区宽度与沉积深度匹配; 控制漏电流在皮安量级等方面提高能量转换效率, 据此对硅基能量转换结构进行设计, 最终确定 PIN 多孔结构、辐射源厚度、掺杂浓度、耗尽层宽度等结构参数, 完成换能结构优化.

关键词: ^{63}Ni 源, 能量转换结构, 辐照效应, 辐射伏特

PACS: 61.80.Fe, 61.82.Fk, 84.60.-h, 85.30.De

2 单晶硅低能电子辐照感生缺陷行为

1 引言

目前放射性同位素衰变能正被用于微能源的开发, 其中利用辐射伏特效应, 将衰变能通过半导体器件直接转换为电能的 β 辐射微能源的研制, 由于其换能结构相对简单已成为关注热点之一^[1-7]. 实验表明现有硅基 PN, PIN 结式半导体器件作为能量转换结构, 可以将辐射能直接转换为电能, 但输出功率为纳瓦级, 并且能量转换效率低下. 同位素微电池主要包括辐射源和能量转换结构, 影响能量转换效率的因素除了能量转换结构自身外, 外置辐射源的辐射效应不可忽略, 分析造成能量转换效率低下的影响因素及对结构进一步设计、优化则是从根本上提高能量转换效率的有效途径. 本研究以 P, N 型单晶硅、基于硅基 PIN 器件辐射效应为基础, 针对加载 ^{63}Ni 原型器件的输出特性结果, 提出采用三维多孔 PIN 结构, 并通过辐射源、掺杂浓度、耗尽层宽度等结构参数的优化设计, 以期提高能量转换效率.

目前虽然通过采用现有的硅基 PN, PIN 结式半导体器件作为能量转换结构, 可以将辐射能直接转化为电能. 但其材料性质、结构的局限性导致能量转换效率低下的同时, 材料、结构的抗辐射性、器件性能长期稳定性也无从得知. 考虑到辐射源将与能量转换结构直接接触, 为此在前期工作中, 首先考察了 P (掺硼元素)、N (掺磷元素) 两种掺杂类型以及两种掺杂浓度下单晶硅的抗辐射效应^[8-11]. 将 N, P 两种掺杂类型、掺杂浓度分别为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的 4 种 (111) 晶向、直径为 3 cm 的硅片置于电子直线加速器下, 以能量为 400 keV 的电子束垂直辐照, 其束流强度为 $1.67 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 辐照注量为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, 随后对辐照样分别进行电子顺磁共振 (EPR)、X 射线光电子能谱 (XPS) 测试. 根据辐照后材料表面原子化学状态及化学组分的变化、辐照感生缺陷的引发显示, 相比于 P 型 Si, N 型 Si、特别是高掺杂的 N 型 Si, 在低能电子一定注量下易引起辐射感

* 中国工程物理研究院重点基金 (批准号: 2007A02001) 资助的课题.

[†] E-mail: 470398025@qq.com

生缺陷,主要来自于键合于磷的非桥联氧对空穴的诱捕作用,表现为磷氧空穴缺陷(POHC)中心明显的变化、 P_{2P} 芯能级谱突变,得出了N型硅、特别是高掺杂的N型硅耐辐照损伤能力较弱的结论,关于单晶硅低能电子辐照感生缺陷行为的讨论可以参考文献[12]. 这为能量转换结构的设计提供了依据,作为能量转换结构的顶层,要求其掺杂浓度不低于 10^{19} cm^{-3} 以实现与金属电极的良好欧姆接触,同时顶层作为辐射源直接受照面,鉴于该掺杂浓度下P,N型硅的辐射损伤效应,确定顶层为P层,且处于辐射范围内的N型硅,其掺杂浓度应接近本征值.

3 加载 ^{63}Ni 源原型器件的实验评价

鉴于能量转换结构主体厚度的限制及器件整体规模的小尺寸设计,入射粒子能量要与器件结构具有适配性,以尽量保证能量利用最大化,为此选用低能短射程的 ^{63}Ni 作为发射源.

对于PN结式电池,由于其耗尽层窄, β 粒子在吸收区位于耗尽层外产生的电子、空穴只能进行低速度的扩散运动,增大反向电压可有限加宽耗尽层,而同位素微电池工作于零偏压下;另外要形成PN结,作为衬底的N区其掺杂浓度高于 10^{15} cm^{-3} ,与损伤分析结果要求相悖,因此同位素微电池不适于采用PN结式. 而采用PIN结式即在P区和N区之间增加低掺杂浓度的N⁻区(形成近乎本征区),一方面可有效增大耗尽层宽度,另一方面避免N型硅的辐射损伤效应. 考虑到同位素微电池与光电探测器工作原理类似,选用硅基P⁺I(N⁻)N⁺结型光电探测器作为原型器件(图3),其结构参数见表1,另外,采用相同生产工艺制备了I区掺杂浓度为 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的PIN结器件,以进一步考察辐射效应. 由图1可看出1#器件辐照前后具有较好的整流特性,而2#器件辐照后基本失效. 根据二极管I-V特性方程

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

表1 PIN结构参数

P ⁺ 区(顶层)		I(N ⁻)区		N ⁺ 区(背层)	
掺杂浓度/ cm^{-3}	厚度/ μm	掺杂浓度/ cm^{-3}	厚度/ μm	掺杂浓度/ cm^{-3}	厚度/ μm
6×10^{19}	1.2	2×10^{12}	180	7×10^{19}	3

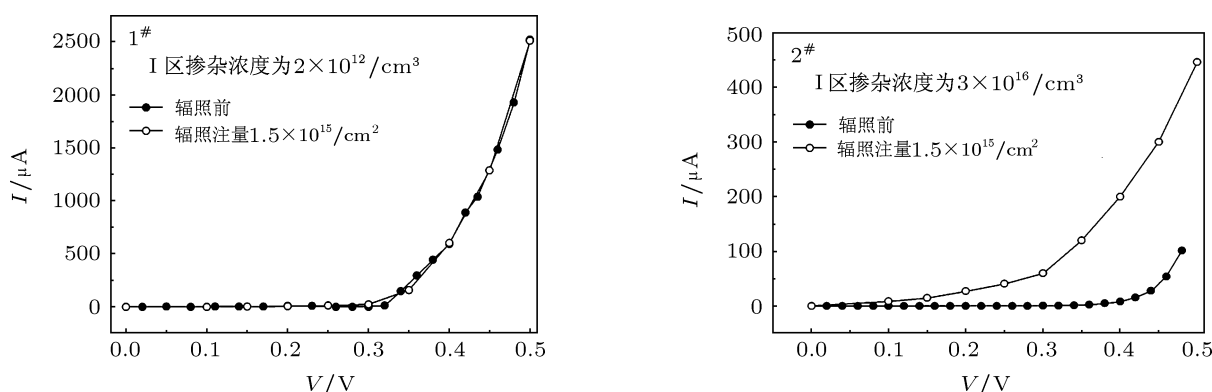


图1 ^{63}Ni 源辐照前、后PIN器件I-V曲线

对两种PIN器件在 ^{63}Ni 源辐照前、后的理想因子进行计算,结果见表2. 由Sah-Noyce-Shockley理论可知,本征理想因子 n 介于1—2,两种PIN器件辐照前的理想因子均小于2,但I区掺杂浓度

为 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的2#器件辐照后理想因子明显增大, $n > 2$,同时对2#器件反向偏置下的C-V特性进行测量,图2结果显示2#器件辐照后的C-V曲线形状异常,反映有缺陷造成的界面态发生改

变. 结合单晶硅辐照感生缺陷行为分析, 初步认为 I 区作为辐射灵敏区, 由于磷掺杂浓度大, 磷氧空穴缺陷 (POHC) 中心辐照后的明显增加, 可能导致器件界面态发生改变, 从而使得 $C-V$ 曲线发生形变, 进一步研究有待继续. 以上结果显示 1# 器件符合 P, N 型硅辐射损伤效应预测结果, 选作为同位素微电池原型器件. 随后用活度为 8 mCi ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$)、活性区直径为 1 cm (与器件受照面大小相等) 的 ^{63}Ni 固体源片覆盖在原型器件受照面上实现加载测量. 输出特性见图 3.

表 2 不同掺杂浓度 PIN 器件辐照前后理想因子变化

器件编号	I(N ⁻) 区掺杂浓度/cm ⁻³	n (辐照前)	n (辐照后)
1#	2×10^{12}	1.17	1.17
2#	3×10^{16}	1.44	3.38

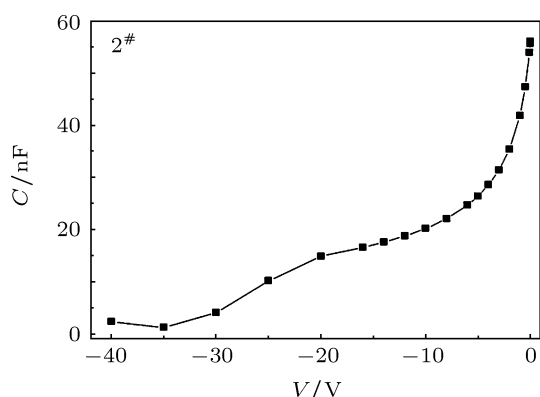


图 2 ^{63}Ni 源辐照 PIN 器件 $C-V$ 曲线

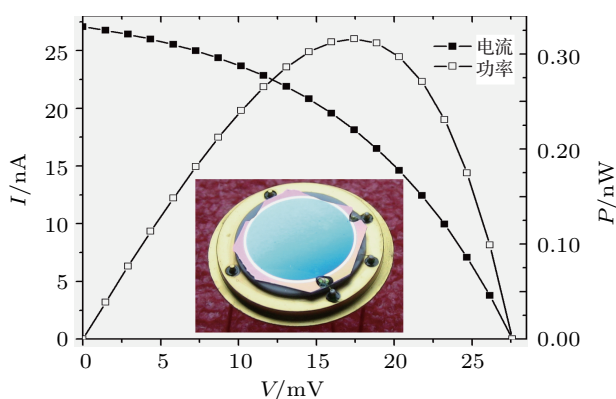


图 3 ^{63}Ni 源辐照原型器件输出特性

转换效率 η 是表征能量转换结构性能的重要参数, 由下式计算:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{1.6 \times 10^{-19} A E}, \quad (2)$$

式中 I_{\max} , V_{\max} 分别表示最大输出功率时的电流、电压, A 为活度, E 为 ^{63}Ni 衰变产生 β 粒子的平均动能. 计算获得的转换效率为 0.042%, 远低于美国 Wisconsin 大学报道的 1% 的转化效率 [13]. 而对于具有适度能量转换效率的电池来说, 填充因子 FF 的值在 0.70 至 0.85 的范围内, 其表达式为

$$\text{FF} = \frac{P_{\max}}{I_{\text{sc}} V_{\text{oc}}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{I_{\text{sc}} V_{\text{oc}}}, \quad (3)$$

计算得到的填充因子 FF 为 44.7%, 低于理想范围. 图 4 显示美国 Wisconsin 大学其 PN 结采用沟槽式三维结构, 与传统平面式 PN 结相比, 有效结面积增大了 55.82%, 这样的器件结构有利于增大辐生电流. 将实验结果与美国 Wisconsin 大学实验数据作对比, 见表 3, 可以看到相比于开路电压比率, Wisconsin 大学的短路电流产率明显相对较大. 对于辐射伏特效应同位素电池, 其核心组成部分是辐射源和能量转换结构, 整个系统的能量转换效率 η 由两部分决定, 即结器件能量沉积率 η_{source} 、电荷收集率 η_{conver} , 满足

$$\eta_{\text{实}} = \eta_{\text{source}} \times \eta_{\text{conver}}. \quad (4)$$

以沉积在结器件的总能量进行计算, 由 8 mCi ^{63}Ni 源产生的理论最大电流值 I_{\max} 为 200 nA, 与实际辐生电流相比产率仅为: $27.36/200 = 13.68\%$, 也就是说由器件自身因素造成电流损失 86.32%. 根据 ^{63}Ni 衰变产生 β 粒子的连续能量分布结果 (见图 5), 利用软件 MCNP4C 模拟计算 ^{63}Ni 源辐射原型器件的能量沉积情况 [14], 由图 6 可看到能量分布集中于近表面, 峰值约位于近表面 $1 \mu\text{m}$ 处, 表 4 显示一半以上的能量落在近表面的 P⁺ 区内, 仅有

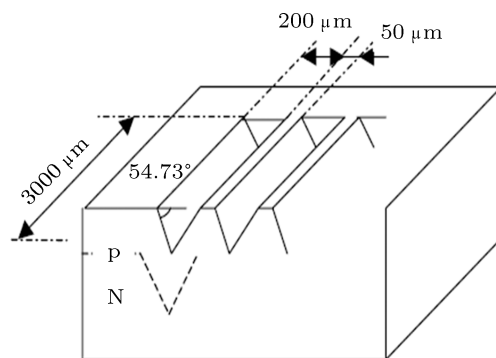


图 4 沟槽状 PN 结型能量转换结构

小部分落在 I(N⁻) 区. 硅是间接带隙的半导体材料, 当掺杂浓度大于 10^{17} cm^{-3} , 体复合以俄歇复

合为主. 原型器件顶层的掺杂浓度为 10^{19} cm^{-3} , 在接近表面的地方, 存有较强的表面复合效应, 半导体器件的特性和电离载流子的寿命在很大程度上受到半导体表面复合的影响, 加之 P^+ 区具有一定厚度 ($1.2 \mu\text{m}$), 位于顶层的沉积能量电离产生的载流子会在扩散过程中部分被复合掉. 而沉积在耗

尽层内的能量产生的电子空穴对虽可借助于漂移电场实现无复合的直接分离, 但由图 6 可知 ^{63}Ni 在结器件中有效射程为 $3.23 \mu\text{m}$, 而 $\text{I}(\text{N}^-)$ 区宽度为 $180 \mu\text{m}$, 即 $\text{I}(\text{N}^-)$ 区宽度与 ^{63}Ni 射程不匹配, 因此尽量提高在耗尽层内的能量沉积、调整 $\text{I}(\text{N}^-)$ 区宽度将是提高输出电流一个很重要的途径.

表 3 与 Wisconsin 大学实验数据的比较

	活度/mCi	短路电流/nA	(短路电流/理论值)/%	开路电压/V	(开路电压/理论值)/%	转换效率/%
本文	8	27.36	13.68	0.028	3.73	0.042
Wisconsin	0.064	1.31	64.07	0.053	10.6	1

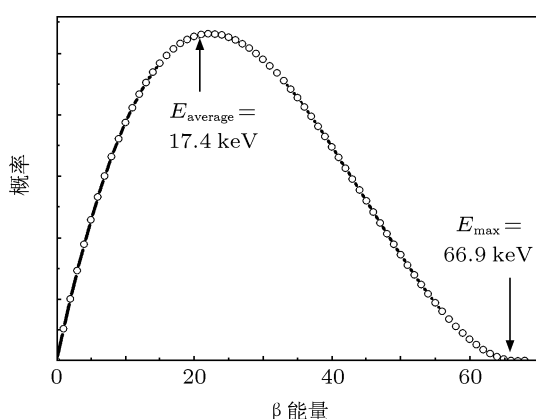


图 5 ^{63}Ni 衰变产生 β 粒子连续能量分布图

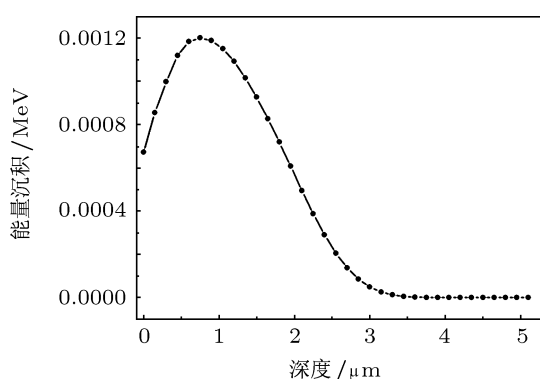


图 6 ^{63}Ni 在结器件中能量沉积-深度曲线

表 4 ^{63}Ni 在原型器件中电子能量沉积

顶层能量沉积/keV	耗尽层能量沉积/keV	器件总能量沉积/keV
9.45 (62%)	5.79 (38%)	15.24

对开路电压来说, 它的极限值由器件内建势垒电压所决定为 0.7 V , 实验结果显示获得的开路电压远远小于内建势垒电压. 由于原型器件工作于零偏压下, 由器件的暗电流曲线获得零偏压下的漏电

流大小为 4.95 nA . 图 7 给出了开路电压与 I_{sc}/I_0 比值的曲线, 可以看出, 当 $I_{\text{sc}}/I_0 \ll 1000$ 时, V_{oc} 值相当小, 将实验获得的 I_{sc}/I_0 值代入, 得到的开路电压与实际获得的开路电压很接近, 由此得出, 要得到较大的开路电压, 应尽可能地降低漏电流, 使 $I_{\text{sc}}/I_0 \gg 1000$. 通过对加载 ^{63}Ni 源原型器件的辐照特性分析, 初步得到以下结论: 1) 对结构参数设计合理的器件, mCi 量级的 ^{63}Ni 源对其电学性能影响小. 2) 在制备工艺上严格控制漏电流在皮安量级. 3) 要增大输出电流, 主要从以下几个方面考虑: ①器件采用三维 PIN 结构^[15,16]; ②增大耗尽层能量沉积比重; ③ $\text{I}(\text{N}^-)$ 区宽度与沉积深度匹配.

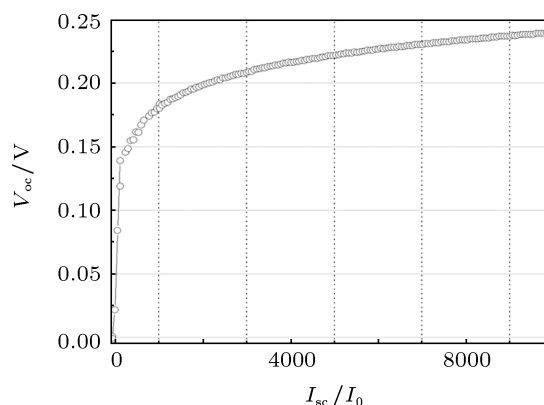


图 7 V_{oc} 与 I_{sc}/I_0 的关系曲线

4 硅基辐伏能量转换结构设计

影响辐伏效应同位素微电池的因素很多, 在借助于对 $\text{P}^+\text{I}(\text{N}^-)\text{N}^+$ 结辐照特性分析的基础上, 进行能量转换结构设计, 基本结构依次为: P^+ 区 (辐射源直接接触)、 $\text{I}(\text{N}^-)$ 区、 N^+ 区. 主要从以下几

个方面考虑: 增大辐射源比接触面积; 增大源活性; 掺杂浓度的优化; 体电阻优化.

4.1 辐射源设计

4.1.1 辐射源比接触面积

由美国 Wisconsin 大学采用沟槽式 PN 结, 使得辐生电流增大, 说明相比平面结型, 三维结型能够有效提高辐射源的利用率和转换效率. 图 8 是上海交大采用微通道结构技术制备出的多孔硅, 从 $I-V$ 曲线来看, 已成功制作出三维 PN 结, 即从工艺上可实现多孔硅 PN 结结构. 根据这样一个结构, 建立物理几何模型 (见图 9), 其中分布有孔径 $3\ \mu\text{m}$ 、深 $30\ \mu\text{m}$ 的微孔 10^6 个, ^{63}Ni 源分布于底表平面及孔内壁, 孔间距为 $10\ \mu\text{m}$, 两孔壁间的最短距离为 $7\ \mu\text{m}$. 根据这个模型对孔状体源辐照的能量沉积进行计算, 图 10 给出了平面体源及孔状体源辐照的能量沉积曲线, 可看出孔状结构相比于平面结构能非常有效地吸收源发射出的 β 粒子, 计算结果显示这种深径比为 $10:1$ 的多孔结构可以将有

效利用面积增加 5 倍, 电离激发沉积的总能量增加 18.15 倍, 因此能够有效地提高源利用率和转换效率. 另外, 若在正表面采用绒面结构, 辐射源比接触面积进一步增大, 有利于增大能量沉积率, 从而进一步提高输出电流. 而图 11 则显示随着孔径的减小, 能量沉积程度增大, 由于受到制备工艺条件的限制, 目前比较成熟的工艺可以达到 $3\ \mu\text{m}$ 左右.

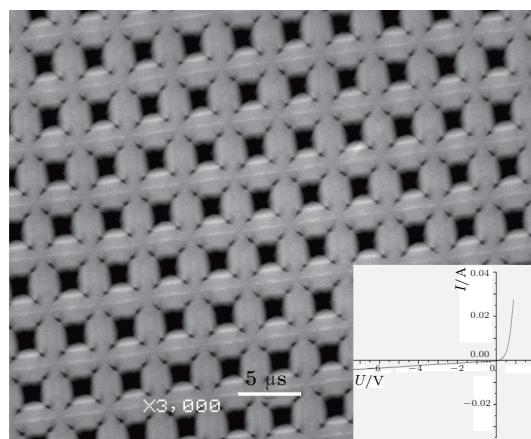


图 8 多孔硅形貌图

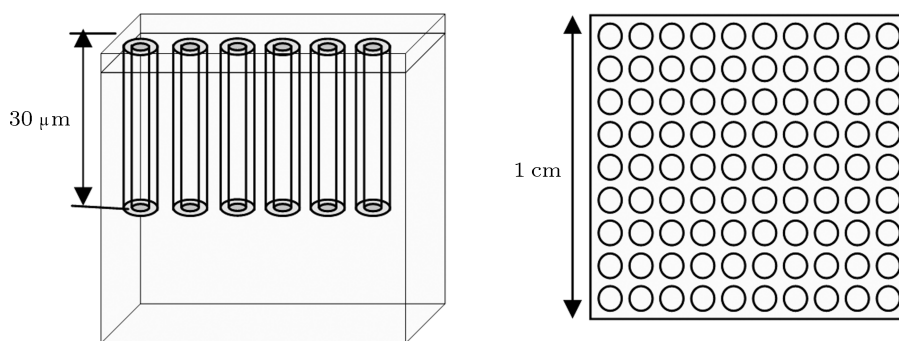


图 9 多孔硅几何结构示意图

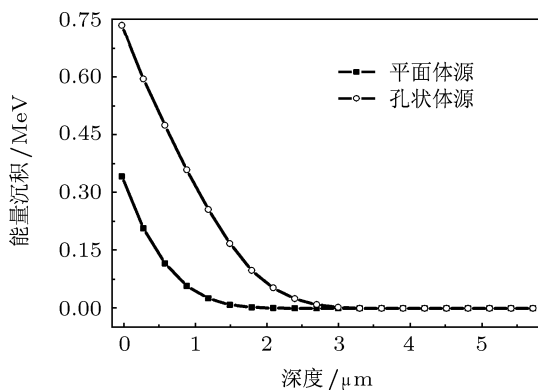


图 10 平面体源及孔状体源能量沉积曲线

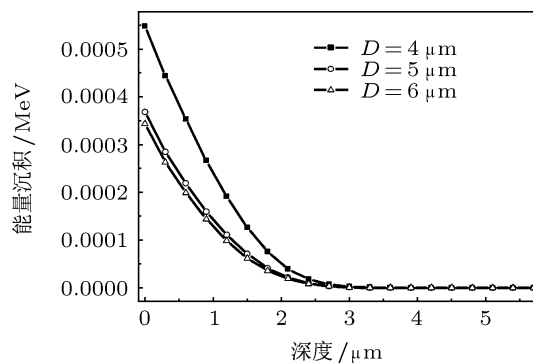


图 11 孔径与能量沉积关系曲线

4.1.2 辐射源活度

由辐伏效应原理可知 β 粒子辐射 PIN 结产生电子-空穴对, 形成辐生载流子, 通过辐生载流子的定向移动以辐生电流形式输出. 如果辐射到结内的 β 粒子激发产生的电子-空穴对全部被收集, 即在忽略电学损失的情况下, 由图 12 可看到源活度与短路电流 I_{sc} 近乎成正比例关系, 同时开路电压 V_{oc} 也随活度呈对数增加. 因此要增大输出功率, 源活度要尽可能大. 但是由于 ^{63}Ni 源存在自吸收效应, 使得装填量与表观活度之间不成正比, 即当源厚度达到一定程度后, 表观活度不再改变. 由图 13

可看到, 在孔径为 $4\ \mu\text{m}$ 时, 随着源厚度的增加, 单个粒子沉积能量呈现明显的下降趋势, 而由核素活度与质量关系

$$A = \lambda N = \frac{4.17 \times 10^{23} m}{MT} = \frac{4.17 \times 10^{23} \rho V}{MT}, \quad (5)$$

式中 A 为核素活度, λ 为衰变常数, N 为核素的原子数, V 为体积, M 为核素摩尔质量, T 为半衰期. 可知总粒子发射率与源体积成正比, 由图 14 可看出当源厚超过 $0.5\ \mu\text{m}$ 时, 辐射源沉积能量基本稳定, 达到最大, 因此, 确定 ^{63}Ni 源的镀层厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$.

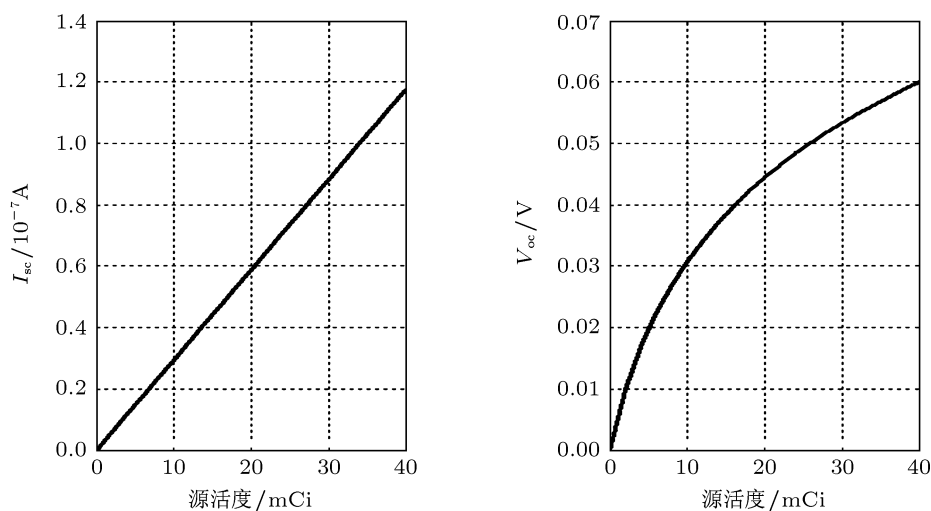


图 12 源活度与短路电流、开路电压关系

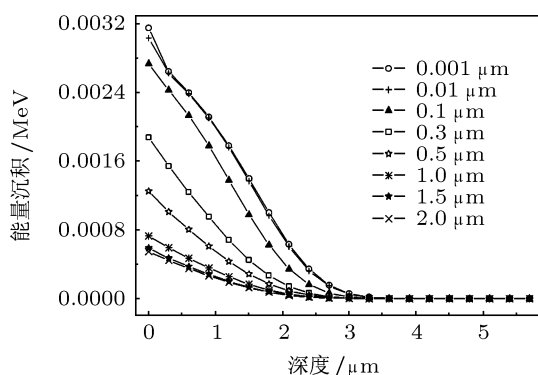


图 13 不同源厚下单粒子能量沉积

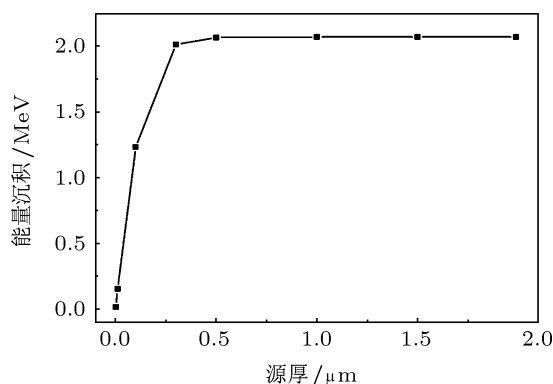


图 14 源厚与沉积能量关系曲线

4.2 掺杂浓度

限制能量转换结构输出性能的因素之一——载流子的渡越时间取决于本征区的宽度和载流子

的漂移速度, 即 $t = W/v$, 而迁移率是单位电场强度引起的载流子的平均漂移速度, 其数值与半导体器件的基本参数-掺杂浓度有关. 图 15 显示, 在掺杂浓度低于 $10^{16}/\text{cm}^3$ 时, 电子、空穴的迁移率保持最大

值,基本上与掺杂浓度无关,由辐照感生缺陷研究结果,选取 I(N⁻) 区掺杂浓度为 10¹²—10¹³ cm⁻³. 而顶层 (P⁺) 及背层 (N⁺), 要求与金属电极形成良好欧姆接触的掺杂浓度不低于 10¹⁹/cm³, 为此在保证 I(N⁻) 层为低掺杂浓度时,顶层 (P⁺) 及背层 (N⁺) 掺杂浓度定为 10¹⁹/cm³.

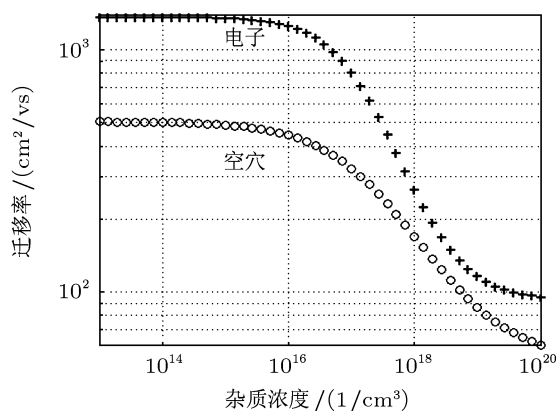


图 15 掺杂浓度与扩散长度关系曲线

4.3 体电阻

当同位素微电池接上负载时,电流流经负载,并在负载两端建立起端电压,这时电池的工作情况相当于一个恒流源 I_{ion} 与一个正向二极管并联,再结合电池内部及外部串并联电阻,可用图 16 所示的等效电路来描述. 可得出其电流电压关系

$$I = I_{ion} - I_D - I_{sh}, \quad (6)$$

即

$$I = I_{ion} - I_s [\exp q(V + IR_s)/kT - 1] - (V + IR_s)/R_{sh}, \quad (7)$$

绘出的输出 $I-V$ 曲线见图 17, 可见 R_{sh} 的增大和 R_s 的减小有利于能量转换效率的提高, 其中串联电阻 R_s 主要包括电极电阻、欧姆接触电阻和体电阻, 电极电阻、欧姆接触电阻阻值小, 可忽略, 由于体电阻与结构厚度, 尤其与 I(N⁻) 区厚度有关, 减小能量转换结构厚度是减小 R_s 的有效途径. 能量转换结构厚度主要包括 P⁺ 区厚度、I(N⁻) 厚度、N⁺ 区厚度. 由前面内容可知, P⁺ 区厚度影响耗尽层内的能量沉积, 基于减小能量转换结构的非灵敏区厚度, P⁺ 区的厚度尽可能薄, 厚度小于 1 μm, 以工艺实现为准. 而为保证耗尽层内沉积能量最大化, 耗尽层宽度取决于 ⁶³Ni 在结器件中有效射程 3.23 μm, 有文献报道 ⁶³Ni 衰变产生最大动

能为 66.9 keV 的 β 粒子其在硅中射程约为 28 μm, 并以此射程作为耗尽层宽度 [17], 厚度相比增大了 6 倍, 对于掺杂浓度为 10¹² cm⁻³ 的 N⁻ 区而言, 由公式

$$\rho = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \quad (8)$$

得到电阻率为 4148 Ω·cm, 厚度的增大使得体电阻将显著增大, 而由图 5 得到 ⁶³Ni 衰变产生最大动能为 66.9 keV 的 β 粒子的概率仅为 0.004%, 故而

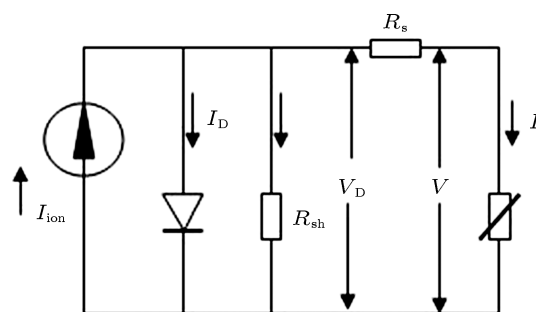


图 16 同位素微电池等效电路

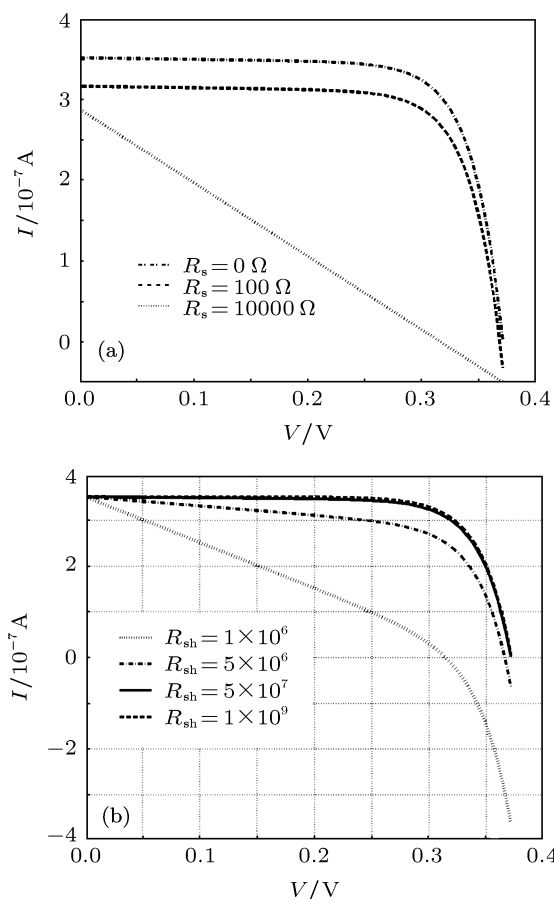


图 17 R_s 与 R_{sh} 对 $I-V$ 特性的影响

以 ^{63}Ni 有效射程为准, 确定耗尽层宽度为 3—4 μm , N^+ 区作为衬底由于目前制作工艺限制, 最大能减薄到 120 μm 左右, 以此减少电荷的传输路径, 增加电荷收集率.

5 结论

根据单晶硅低能电子辐照感生缺陷行为, 对 I 区为两种掺杂浓度的 PIN 结进行 I - V , C - V 测试, 结果显示当 I 区 P 掺杂浓度大时, 作为辐射灵敏区, 随着辐照注量的增加, 可能由于磷氧空穴缺陷中心的大量产生使得 PIN 结界面态发生改变, 导致器件失效, 而对于低掺杂 $\text{PI}(\text{N}^-)\text{N}$ 结, 没有出现 ^{63}Ni 辐照引起的性能衰退. 通过加载 ^{63}Ni 原型器件的输

出特性与 Wisconsin 大学实验数据比较显示, 采用三维 $\text{PI}(\text{N}^-)\text{N}$ 结构、尽量提高在耗尽层内的能量沉积、调整 I (N^-) 区宽度与沉积深度匹配、控制漏电流为皮安量级将是提高能量转换效率的有效途径. 为此建立三维多孔几何模型, 计算结果显示孔径为 3—4 μm 、深径比为 10:1 的多孔结构可以将有效利用面积增加 5 倍, 电离激发沉积的总能量增加 18.15 倍; 当源厚为 0.5 μm , 辐射源沉积能量达到最大; 而为保证耗尽层内沉积能量最大化, 同时基于减少能量转换结构的非灵敏区厚度、体电阻, 以 ^{63}Ni 有效射程为准, 确定耗尽层宽度、PIN 结掺杂浓度及结构尺寸. 以上结论为进一步完善同位素微电池样品设计及制备提供参考.

- [1] Zou Y, Huang N K 2006 *NUCLEAR TECHNIQUES* **29**
- [2] Kavetskiya A, Yakubovaa G, Yousafa S M, Bower K 2011 *Applied Radiation and Isotopes* **69** 744
- [3] Lua M, Zhang G G, Fu K, Yu G H, Su D, Hu J F 2011 *Energy Conversion and Management* **52** 1955
- [4] Chandrashekar M V S, Christopher I Thomas, Hui L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 033506
- [5] Qiao D Y, Chen X J, Yong R, Yuan W Z 2011 *Journal of Micro-electro mechanical Systems* **20** 685
- [6] Li X Y, Ren Y, Chen X J, Qiao D Y, Yuan W Z 2011 *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **287** 173
- [7] Qiao D Y, Yuan W Z, Gao P, Yao X W, Zang B, Zhang L, Guo H 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3798
- [8] Ohyama H, Nakabayashi M, Simoen E, Claeys C, Tanaka K, Kobayashi K 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **186** 176
- [9] Liu C S, Wu D X, Zhao L L 2010 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* **268** 1146
- [10] Kleider J P, Chouffot R, Gudovskikh A S, Labrune M, Ribeyron P J, Brüggemann R 2009 *Thin Solid Films* **517** 6386
- [11] Boesch H E, McLean F B 1985 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **32** 39403945
- [12] Gao H, Wang H Y, Yuan Y G 2012 *Rare Metals* **31** 289
- [13] Gao H, Li H, Lal A, Blanchard J 2008 *Solid-State and Integrated-Circuit Technology* **20** 2365
- [14] Zine-El-Abidine Chaoui 2008 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **266** 4976
- [15] Wei S, Nazir P, Karl D, Larry L, Philippe M, Faucher A 2005 *Advanced Materials* **17** 1230
- [16] Guo H, Yang H, Zhang Y 2007 *IEEE 20th International Conference* **21** 867
- [17] Qiao D Y, Chen X J, Ren Y, Zang B, Yuan W Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 020701 (in Chinese) [乔大勇, 陈雪娇, 任勇, 藏博, 苑伟政 2011 物理学报 **60** 020701]

Investigation of a energy conversion silicon chip based on ^{63}Ni radio-voltaic effect*

Gao Hui[†] Luo Shun-Zhong Zhang Hua-Ming Wang He-Yi

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 14 November 2011; revised manuscript received 12 December 2011)

Abstract

Aiming at the main problem encountered in the research of radioisotope microbattery based on β radio-voltaic effect-enhancement of energy transfer efficiency and radiation damage as mutually constraining sides of a contradiction, an investigation of radiation-induced defects in different silicon wafers by low-energy electron irradiation was carried out and the electrical characteristic measurement for two types of PIN structures indicated that $\text{P}^+\text{I}(\text{N}^-)\text{N}^+$ device in I zone with a dopant concentration of $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ agreed with the predicted result of P, N type silicon radiation damage effect. This was then taken as the prototype device, on which test of ^{63}Ni radiation output characteristics was performed. The test result was compared with the experimental data of Wisconsin University and the major factors causing low energy transfer efficiency were analysed. Adoption of three-dimensional PIN junction structure, increasing the proportion of energy deposition in depletion region, matching I (N^-) zone width and deposition depth and controlling the leak current under an order of magnitude of Picoampere were considered to enhance the energy transfer efficiency, based on which energy transfer structure was designed and ultimately structure parameters such as multi-hole PIN structure, radiation source thickness, depletion region width were determined, thus the energy transfer structure optimization was accomplished.

Keywords: ^{63}Ni source, energy conversion structure, radiation effect, betavoltaic

PACS: 61.80.Fe, 61.82.Fk, 84.60.-h, 85.30.De

* Project supported by the Major Foundation for Development of Science and Technology of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2007A02001).

[†] E-mail: 470398025@qq.com