

## 半导体器件在辐射作用下的电学输出性能

王关全, 张华明, 罗顺忠, 胡睿, 高晖, 杨玉青, 魏洪源, 宋宏涛

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900)

**摘要:** 半导体结型器件是决定辐射伏特效应同位素电池能量转换效率的核心部件。本工作采用加速器产生的不同能量电子束和 $^{63}\text{Ni}$ 源的 $\beta$ 射线对硅基 PiN 结型器件进行辐照, 在线测量了其电学输出性能。结果表明, 当电子束能量为 18 keV 时, 能量转换效率 $>4\%$ ; 电子束能量为 6 keV 时, 能量转换效率为  $0.16\% \sim 0.33\%$ ; 活度为  $2.96 \times 10^8$  Bq 的 $^{63}\text{Ni}$ 源片辐照的能量转换效率约为  $0.1\%$ 。

**关键词:** 辐射伏特效应同位素电池; 半导体器件; 能量转换效率

**中图分类号:** TM910.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7512(2008)04-0198-06

### Electrical Capabilities of Silicon Diode on Irradiating

WANG Guan-quan, ZHANG Hua-ming, LUO Shun-zhong, HU Rui,

GAO Hui, YANG Yu-qing, WEI Hong-yuan, SONG Hong-tao

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

**Abstract:** Semiconductor diode, the core of betavoltaic microbattery, is the key to decide energy conversion efficiency. A sort of silicon diodes were irradiated by electron beam and  $^{63}\text{Ni}$  radioactive source, and their electrical capabilities were measured during the irradiation. The experiment results indicate that the energy conversion efficiency was higher than  $4\%$  for 18 keV electron beam, between  $0.16\%$  and  $0.33\%$  for 6 keV electron beam, and about  $0.1\%$  for  $^{63}\text{Ni}$  radioactive source with an activity of  $2.96 \times 10^8$  Bq.

**Key words:** betavoltaic microbattery; semiconductor diode; energy conversion efficiency

利用半导体 PIN 结型器件的特殊性质, 可将放射性同位素的衰变能转换为电能, 从而制成以辐射伏特效应为基础的同位素电池。这种同位素电池具有理论转换效率高、使用寿命长(视使用的放射性同位素半衰期而定, 一般可达 10 年以上)、能量密度高(单位质量含能量可达普通

锂电池的数千倍以上)、体积小、质量轻、抗干扰性强等优点, 特别适合作为微机电系统 (MEMS) 器件的供能单元, 如生物芯片、传感器、内置体内医疗器械以及卫星星载设备等。MEMS 的应用在很大程度上受限于没有合适的随机 (on chip 或 on board) 微型电源支撑<sup>[1-3]</sup>。通

收稿日期: 2008-04-14; 修回日期: 2008-09-02

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助 (2007A02001)

作者简介: 王关全 (1977~), 男 (汉族), 四川绵阳人, 助理研究员, 从事放射化学研究

常在同位素电池研制中,放射性同位素发射的 $\alpha$ 射线具有较高能量,会对硅基半导体材料晶格结构造成无法修复的损伤而降低其电学输出性能。 $\gamma$ 射线穿透能力强,不易屏蔽,需附加额外的防护层而增大了同位素电池的体积和质量,不利于小型化。相对于 $\alpha$ 和 $\gamma$ 这两种射线, $\beta$ 射线具有明显的优势,如合适的能量、易于屏蔽等,目前,发射低能 $\beta$ 射线的放射源已成为辐射伏特效应同位素电池研究的主要驱动源。本研究拟采用低能电子束(模拟发射的 $\beta$ 射线)和 $^{63}\text{Ni}$ (纯 $\beta$ 辐射,平均能量17.4 keV,半衰期100 a)辐照硅基PIN结型器件,对两种辐射源照射下的器件电学输出特性进行对比和分析,探讨影响器件性能稳定及电学输出参数的因素。

## 1 实验部分

### 1.1 材料和设备

PIN结型器件:制作材料为单晶硅,其顶层和背层分别为P型和N型重掺杂,在两层之间为硅本征层(i层),器件表面截面直径为1.0 cm,中科电重庆44所提供;低能直线加速器:四川大学原子核科学技术研究所研制; $^{63}\text{Ni}$ 源片:镀在直径1.0 cm不锈钢片上的圆形片, $2.96 \times 10^8$  Bq,原子高科股份有限公司提供。

6485皮安表:美国Keithley公司;SH1843直流数字电压表:苏州华仪电讯科技有限公司;ZX21A、ZX84P直流电阻器:上海正阳仪表厂。

### 1.2 电子束辐照模拟

电子束由低能直线加速器产生。本实验考察了18 keV和6 keV两种能量电子束辐照硅基PIN结型器件时,器件电学输出特性的作用。在能量为18 keV下,分别考察了电子束流密度为5.9、11、17、38  $\text{nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下该器件的电学输出性能;在能量为6 keV下,分别考察了电子束流密度为4.7、10、19、50、114  $\text{nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下该器件的电学输出性能。

该直线加速器产生电子束同时会有一定强度光束伴随电子束产生并照射在受辐照半导体器件表面。由于光伏效应,光能也可以通过器件转换成电能产生光生电流。在现有条件下无法将光束和电子束分开,为此,在实验中采用了如下方法:在一定电子束能量和束流下,先加厚度为1.0 mm、光透过率为90%的玻璃罩挡住电子束对器件辐照,再在相同条件下取掉玻璃罩对器

件辐照。这样前者可以测得器件在光束作用下的光生电输出,后者测得器件在光束和电子束共同作用下的电输出,经数据处理可以得到单电子束作用下的辐生电输出。

### 1.3 $^{63}\text{Ni}$ 源片辐照

在1.2节中所述电子束辐照前,使用一片 $2.96 \times 10^8$  Bq的 $^{63}\text{Ni}$ 放射源片与该PIN器件直接接触持续辐照9 d。电子束辐照后,又用该源对该器件持续辐照20 d。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模拟电子束辐照的等效电路

该辐照模型等效电路示于图1。

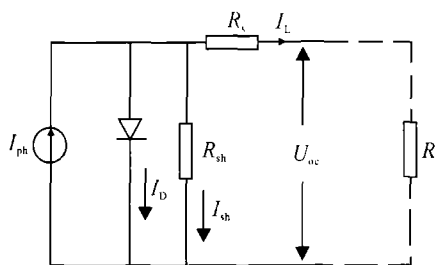


图1 电输出等效电路

图1中, $I_{ph}$ 为外界射线(包括光束和电子束等)作用在器件上产生的电流; $I_D$ 为暗电流; $I_L$ 为负载电流; $U_{oc}$ 为开路电压; $R_L$ 为负载电阻; $R_{sh}$ 为并联电阻,主要由结型器件表面污浊和半导体晶体缺陷引起的漏电流所对应的结泄电阻等组成; $R_s$ 为串联电阻,主要由结型器件的体电阻、表面电阻、电极导体电阻、电极与硅表面间接触电阻等组成。

由等效电路分析可知,单电子束辐射作用的电输出可由下式计算:

$$I_L = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

$I_L$ 即实验中测得的负载电路中的电流值。在一定的辐射作用下, $I_{ph}$ 为定值,但 $I_D$ 、 $I_{sh}$ 随外加电压变化而改变,因此,在不同的辐射条件和负载 $R_L$ 下具有不同的数值。根据等效电路及相关参数之间的关系<sup>[4]</sup>,可以得到(2)式:

$$I_{sc} - I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(R_L I_L + R_s I_L)}{A k T}\right) - 1 \right] - \frac{U_D}{R_{sh}} = 0 \quad (2)$$

(2)式中, $k$ 为玻尔兹曼常数, $q$ 为基本电荷, $I_0$ 为结型器件反向饱和电流,一般为常数,仅与

器件自身性能有关;  $A$  为 PIN 结曲线常数。

由于  $R_{sh} \ll R_L$ , 并且  $R_s \ll R_L$ , 因此在理想情况下, (2) 式中  $R_s$ 、 $R_{sh}$  项可以忽略, 曲线常数  $A$  取 1, 可将 (2) 式简化为:

$$I_{sc} - I_L - I_0 \exp \frac{qI_L R_L}{kT} + I_0 = 0 \quad (3)$$

由 (3) 式可以计算得到  $I_L$ 。从计算的结果看, 以上简化处理是合理的, 具有一定可信性。

电子束流 ( $\beta$  粒子流) 由器件表面进入器件内部, 由于电离作用, 会在器件内产生电子-空穴对, 这些电子-空穴对在器件内建电场作用下实现分离, 将器件正负端连接构成回路即产生电流。对于入射能量为  $E_r$ , 束流  $I_r$  的辐射作用产生的短路电流  $I_{sc}$  由 (4) 式获得<sup>[3]</sup>:

$$I_{sc} = n \times (1 - \rho) \times \left( \frac{E_r}{E_p} \right) \times I_r \quad (4)$$

(4) 式中,  $n$  为电子-空穴对分离系数, 与  $E_r$  成正相关关系;  $\rho$  为束流在器件表面的反射系数;  $E_p$  为产生一对电子-空穴对所需要的辐射能量, 对单晶硅约为  $3.6 \text{ eV}$ <sup>[5]</sup>。

器件输出短路电流  $I_{sc}$ 、开路电压  $V_{oc}$ 、最大输出功率  $P_{max}$  以及转换效率  $\eta$  等有如下关系<sup>[4]</sup>:

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \times \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (5)$$

$$P_{max} = FF \times I_{sc} \times V_{oc} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_0} \times 100\% \quad (7)$$

在器件结构和状态一定的情况下, (5) 式中反向饱和电流  $I_0$  为确定值, (6) 式填充因子  $FF$  为常数, 一般为  $0.4 \sim 0.6$ 。结合式 (4) ~ (7), 可得到转换效率  $\eta$ :

$$\eta = AkT \times FF \times n \times (1 - \rho) \times \ln \left( \frac{n \times (1 - \rho) \times E_r \times I_r}{I_0 E_p} + 1 \right) \times 100\% / q \times E_p \quad (8)$$

在一定条件下, (8) 式中仅有  $n$ 、 $E_r$  和  $I_r$  可变, 其他参数均为定值。而  $n$  与  $E_r$  呈正相关关系, 因此能量转换效率  $\eta$  与  $E_r$  和  $I_r$  成正相关关系。

被电子束辐照后, PIN 结的内建电势  $V_d$  可由 (9) 式表示:

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (9)$$

## 2.2 电子束辐照下器件的电输出性能

在电子束能量为  $18 \text{ keV}$  时, 光生电流远远小于电子束产生的辐生电流, 考察单电子束作用

于器件的电学输出性能时可以忽略光的影响, 在  $6 \text{ keV}$  情况下光的影响不能忽略, 需扣除光生电流的作用以得到单电子束对于器件的电学输出。

在能量为  $18 \text{ keV}$  和  $6 \text{ keV}$  时的各电子束流密度下, 电子束辐照半导体器件输出电流和电压关系曲线示于图 2 和图 3, 在线测量电学输出结果列于表 1 和表 2。由这些结果可见, 在能量为  $18 \text{ keV}$  时, 随着电子束流增大, 器件输出短路电流  $I_{sc}$  和最大输出功率  $P_{max}$  呈线性增大, 开路电压  $V_{oc}$ 、能量转换率  $\eta$  小幅增加, 最大电荷放大率、填充因子  $FF$  等没有明显的变化趋势。能量为  $6 \text{ keV}$  时, 器件电学输出结果与电子束流的变化关系与  $18 \text{ keV}$  能量的结果相似, 但器件转换效率低, 在低电子束流密度辐照下转换效率更低, 随着束流密度增大, 转换效率有所增大。但束流密度高达  $120 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$  时, 转换效率又有下降, 结合到电荷放大率也有所下降, 估计在此束流密度下, 该器件转换能力已经下降, 此后用  $^{63}\text{Ni}$  源片辐照的结果也证明有该情况出现, 且实验结果与公式 8 相符。

## 2.3 $^{63}\text{Ni}$ 源片辐照下器件的电输出性能

$^{63}\text{Ni}$  源片辐照半导体器件在线测量电学输出结果列于表 3。在线测量  $I-V$  曲线示于图 4 和图 5。由表 3 及图 3、图 4 可以看出, 器件受  $^{63}\text{Ni}$  源片持续辐照时短路电流  $I_{sc}$  基本不变, 开路电压  $V_{oc}$  逐渐增大, 因此最大输出功率  $P_{max}$  也逐渐增加。被电子束辐照后, 器件受  $^{63}\text{Ni}$  源片辐照, 电学输出性能明显降低, 虽然  $I_{sc}$  变化不大, 但  $V_{oc}$ 、 $FF$ 、 $P_{max}$  等显著减小, 这可能和并联电阻  $R_{sh}$  减小和反向饱和电流  $I_0$  增大有关, 而这两

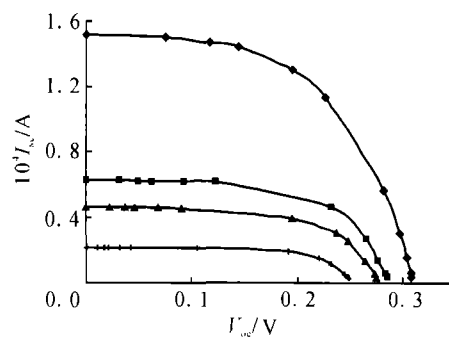


图 2  $18 \text{ keV}$  能量各束流密度辐照下器件电学输出  $I-V$  曲线

◆—— $38 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; ■—— $17 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  
▲—— $11 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; |—— $5.9 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$

项的变化都反映出器件对辐(光)生电子-空穴对的复合作用增强,使其电学输出性能显著降低。能使硅原子发生位移效应产生 Frekel 缺陷所需要的最低电子能量约为 155 keV<sup>[5-6]</sup>,6 keV 和 18 keV 并不能使器件产生永久性缺陷。使  $V_{oc}$ 、

FF、 $P_{max}$  等降低的直接原因可能是大电子束流致器件高温而引起的暂时的性能衰退。高温会影响器件内阻、本征载流子浓度  $n_i$  等参数,其中  $n_i$  随温度上升按指

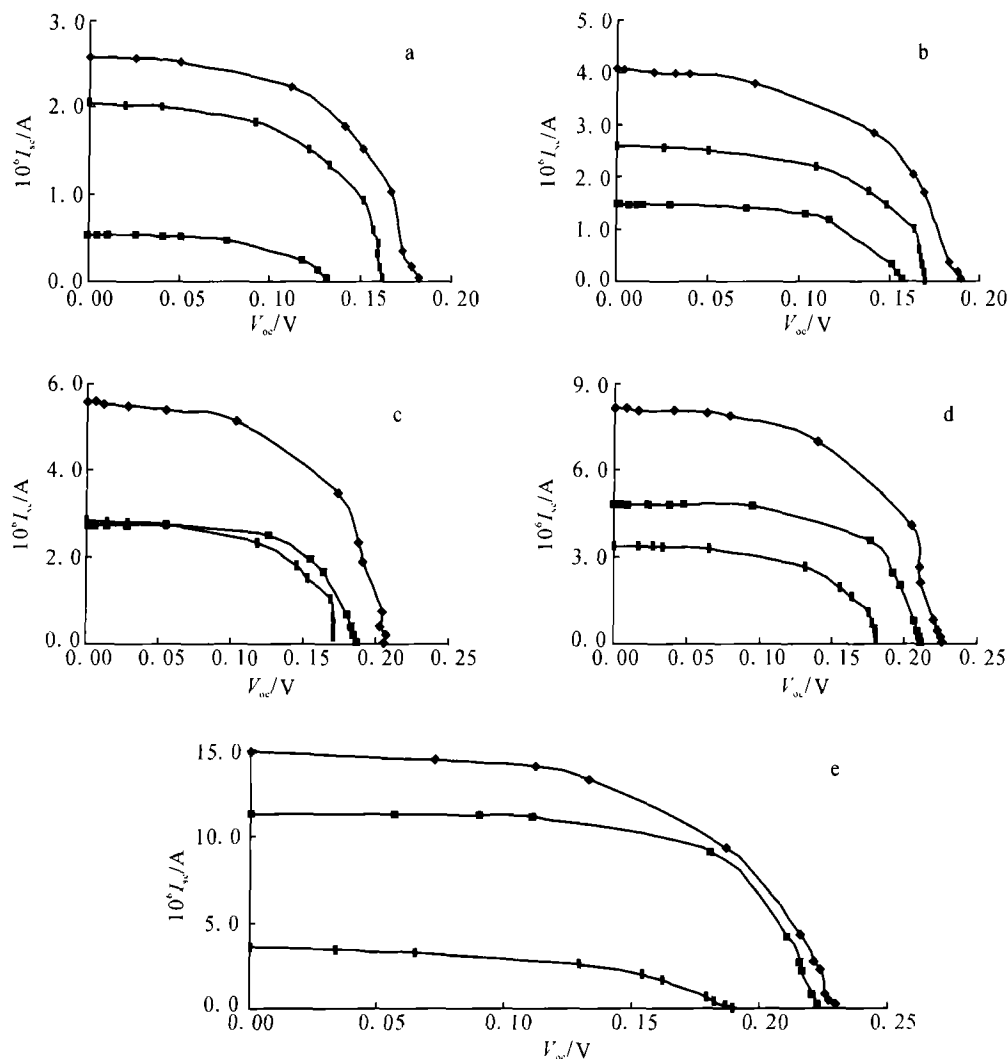


图 3 6 keV 能量各束流密度辐照下器件电学输出 I-V 曲线

a——束流密度为  $4.7 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; b——束流密度为  $10 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; c——束流密度为  $19 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  
 d——束流密度为  $50 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; e——束流密度为  $114 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  
 ◆——总输出; ■——辐生电输出; |——光生电输出

表 1 18 keV 各束流密度下器件电学输出性能参数

束流密度 $J_0 /$ ( $\text{nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	电学输出性能参数					
	短路电流 $I_{sc} /$ nA	最大电荷 放大率	开路电压 $V_{oc} /$ V	最大功率 $P_{max} / \text{nW}$	能量转换率 $\eta / \%$	填充因子 FF
5.9	21.0	4 124	252	3.68	4.01	0.695
11	43.7	4 414	274	7.61	4.28	0.614
17	59.7	4 007	284	11.6	4.33	0.652
38	149	4 510	308	26.1	4.39	0.558

数形式增大,内建电势  $V_d$  迅速减小,理论上  $V_{oc}$  的极限值由  $V_d$  决定(见式 9),此外温度升高使暗电流  $I_D$  迅速增大,这些都会令  $V_{oc}$  下降<sup>[7]</sup>。

由表 3 可以出,随着辐照时间增加,器件输出的  $V_{oc}$  值逐渐增加,在持续辐照 20 d 后,  $V_{oc}$ 、

$P_{max}$ 、 $\eta$  和 FF 值相应增加,恢复到被电子束辐照前的水平,但对  $I_{sc}$  影响较小,甚至可忽略不计,这表明一定时间低能  $\beta$  辐照对于硅基 PIN 结型器件的电学输出性能有一定的改善作用。

表 2 6 keV 各束流密度下器件电学输出性能参数

束流密度 $J_0/$ ( $nA \cdot cm^{-2}$ )	电学输出性能参数					
	短路电流 $I_{sc}/nA$	最大电荷放大率	开路电压 $V_{oc}/V$	最大功率 $P_{max}/nW$	能量转换率 $\eta/\%$	填充因子 FF
4.7	0.53	133	133	0.0392	0.163	0.556
10	1.48	163	158	0.138	0.253	0.590
19	2.76	167	187	0.325	0.328	0.630
50	6.29	144	208	0.869	0.331	0.664
114	11.3	114	223	1.67	0.281	0.662

注:已扣除光生电输出影响

表 3  $^{63}Ni$  源辐照 PIN 器件电学输出性能参数

辐照时间	电学输出性能参数					
	短路电流 $I_{sc}/nA$	开路电压 $V_{oc}/V$	最大功率 $P_{max}/nW$	最大电荷 放大率	能量转换 率 $\eta/\%$	填充因子 FF
电子束辐照前, $^{63}Ni$ 源辐照 0 d	28.3	0.068	0.77	597	0.093	0.399
电子束辐照前, $^{63}Ni$ 源辐照 9 d	28.4	0.081	1.05	600	0.127	0.456
电子束辐照后, $^{63}Ni$ 源辐照 20 d	28.2	0.084	1.07	595	0.130	0.452
电子束辐照后, $^{63}Ni$ 源辐照 0 d	28.2	0.047	0.44	595	0.054	0.337

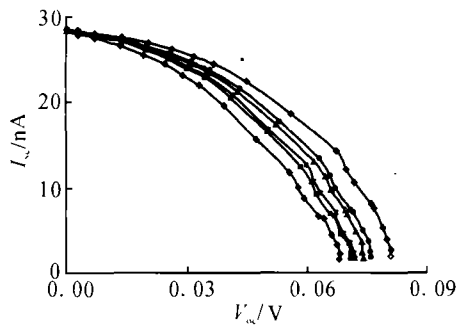


图 4 电子束辐照前 $^{63}Ni$  源持续辐照器件电学输出  $I-V$  曲线

◆—0 h; ■—3 h; \*—72 h; ▲—96 h;  
●—144 h; ◇—216 h

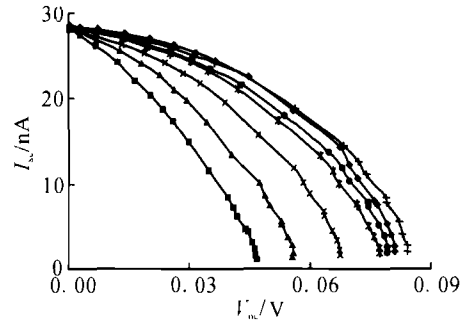


图 5 电子束辐照后 $^{63}Ni$  源持续辐照器件电学输出  $I-V$  曲线

◆—Be; ■—0 d; ▲—1 d; √—3 d;  
\*—10 d; ●—11 d; +—20 d

注:图 5 中“Be”曲线即图 4 中 216 h 曲线。

### 3 结 论

本实验所使用的硅基 PIN 结型器件,在受电子束或 $^{63}Ni$  源片辐照时可以将电子束流放大或将衰变能转换为电能。当电子束能量为 18 keV,可以得到大于 4%的能量转换效率;电子束

能量为 6 keV,能量转换效率为 0.16%~0.33%; $2.96 \times 10^8$  Bq 的 $^{63}Ni$  源片辐照,能量转换效率约为 0.1%(受大束流密度电子束辐照后器件性能衰退,转换效率只有 0.05%)。造成转换效率不同主要与入射辐射能量  $E_i$  和入射辐射

束流  $I_e$  两个因素有关,并均成正相关关系。 $^{63}\text{Ni}$  源辐照实验表明,用低能  $\beta$  射线持续辐照 Si 基器件,对其电学输出性能有一定改善作用。以上结果对于辐射伏特效应同位素电池的设计、研制和使用具有一定的参考意义。

**致谢:**感谢四川大学原子核科学技术研究所黄宁康教授、任丁博士、杨淑勤硕士在电子束辐照方面所给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] 王铁山,张保国. 放射性同位素衰变能发电机制的研究与探索[J]. 核技术,1994,17(9):548-551.
- [2] 郝少昌,卢振明,符晓铭,等. 核电池材料及核电池的应用[J]. 原子核物理评论,2006,23(3):353-358.
- [3] 邹宇,黄宁康. 伏特效应放射性同位素电池的原理和进展[J]. 核技术,2006,29(6):432-437.
- [4] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [5] 杨玉青,王关全,张华明. 辐射伏特效应同位素电池探索研究 2006 年度技术总结报告[R]. 绵阳:中国工程物理研究院核物理与化学研究所,2006.
- [6] 卢玉楷主编. 简明放射性同位素应用手册[M]. 上海:上海科学普及出版社,2004.
- [7] 安其霖,曹国琛,李国欣,等. 太阳能电池原理与工艺[M]. 上海:上海科学技术出版社,1984.

#### 专利简讯:

### 用于脉冲伽马探测的散射式闪烁探测器

【公开日】2008.08.27 【分类号】G01T1/20 【公开号】CN101251601

【申请日】2008.04.07 【申请号】200810089537.4 【申请人】西北核技术研究所;清华大学

【文摘】本发明属于辐射探测装置,具体涉及一种用于脉冲伽马探测的散射式闪烁探测器。本发明中,上下光电装置相同的电子过滤片、反射膜、闪烁体和光电倍增管相同,且对称布置。因此可以事先标定好两边探测器的灵敏度差异,将其中一边的光电装置作为本底探测器,另一边的光电装置作为总信号探测器。测量时,在其中一边的光电装置的闪烁体前加 3 mm 厚的石墨片或铝片用于阻挡从靶出射的电子,使其无法到达闪烁体,这样,它得到的便是周围伽马和中子的干扰信号。两光电装置的输出信号经过延时校正和灵敏度校正后进行相减,便得到真实的信号。因此,本发明可以有效扣除屏蔽不足造成的干扰,从而提升了探测器的性能。