

The cover features a light blue background with a fine, vertical-line texture. Scattered across this background are ten stylized atomic symbols, each consisting of a central nucleus with a small circle and two intersecting elliptical orbits. These symbols are positioned in the corners and between the title and publisher information.

核探测器和核电子学

(1979年会议资料汇编)

原子能出版社

内 容 简 介

本文集汇编了“核探测器和核电子学交流会”学术报告 123 篇，内容分为两大部分：第一部分为核探测器，包括半导体探测器、气体电离探测器、闪烁探测器、一些其它类型的探测器及各种探测器的应用技术等；第二部分为核电子学，包括模拟信号处理、时间测量、数字电路和仪器、电源及其它。

本文集可供从事核探测器、核电子学仪器设计、研制和使用等方面工作的技术人员及大专院校有关专业师生参考。

核探测器和核电子学

(1979年会议资料汇编)

核探测器部分

主编 许庭宝

编审 李藩庭 张锦添 李广将

核电子学部分

主编 杨衍明

编审 戴贵亮 林金铎

责任编辑 袁祖伟

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

陕西523厂排版

北京市丰台区靛厂印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $29^{3/4}$ ·字数703千字

1982年3月第一版·1982年3月第一次印刷

印数001—1700·统一书号 15175·305

定价：3.45元

前 言

一九七九年五月，中国科学院在上海召开了核探测器和核电子学交流会。这是自一九五九年天津会议以来，本领域的第二次全国性技术交流活动。从这次交流会上可以看出，我国广大核探测技术工作者在核探测仪器的研制与应用等各方面做了大量的工作，取得了可喜的成果。为了扩大交流这些成果，促进本领域工作的开展，我们编辑出版了本文集。

本文集共分两大部分：第一部分是核探测器，包括半导体探测器、气体探测器、闪烁探测器、其它类型探测器及各种探测器的应用技术等；第二部分是核电子学，包括模拟信号处理、时间测量、数字电路和仪器、电源及其它等。共收集了123篇报告，其中少部分为文章摘要。

为使本文集能早日与读者见面，编审工作做得仓促，对文章内容未能仔细推敲，同时，由于我们水平有限，缺点和错误一定不少，请读者批评指正。

本文集编审工作是在中国科学院二局主持下进行的。原子能研究所岳清宇同志参加了部分工作，特此致谢。

编审组

1979年9月

目 录

第一部分 核探测器

I. 半导体探测器	(1)
平面型高纯锗探测器	(1)
离子注入的高纯锗探测器	(6)
同轴 Ge (Li) 探测器的研制与问题	(9)
单开端同轴型 Ge (Li) 探测器的制备	(14)
Ge (Li) 探测器在装置内的净化漂移	(17)
薄窗锗锂漂移探测器的研究	(23)
Si (Li) X 射线探测器及其研制的新结果	(26)
Si (Li) X 射线探测器	(27)
简单的 Si (Li) β 谱仪	(27)
半导体探测器的冷却装置	(30)
用铍沉淀法测定探测器级单晶锗中的氧含量	(32)
外延硅 dE/dx 核粒子探测器	(33)
高压金硅面垒型探测器的研制	(36)
金硅面垒型离子探测器	(39)
用离子注入法制造核粒子探测器	(43)
电流型 PIN 半导体探测器的研究	(47)
离子注入型 Si 位置灵敏探测器	(51)
硅 PN 结表面造型雪崩内放大探测器的制备及某些性能	(55)
大面积的离子注入 Si 探测器	(62)
dE/dx 硅探测器	(62)
全耗尽透射式 Si 探测器	(68)
金硅面垒型半导体探测器	(72)
^6Li 夹心半导体中子谱仪探头	(73)
大面积硅面垒型低水平 α 测量仪	(78)
碲化镉半导体探测器对 γ 射线照射量的探测特性	(82)
研制离子注入半导体探测器的装置——电磁同位素分离器	(88)
金硅面垒型半导体探测器的多峰现象和反偏压效应	(89)
电流型半导体探测器性能测定	(89)
II. 气体探测器	(96)
反应堆监测用的高温卤素盖革计数管	(96)
卤素管脉冲供电采样输出	(100)

盖革计数管的脉冲供电	(106)
用于 X 射线荧光分析的密封式正比计数管	(111)
ZJ-101 型 X 射线正比计数管的性能及制造工艺	(116)
^3He 正比计数管	(120)
质子反冲正比计数器望远镜	(124)
大面积流气式计数管的设计、制造和使用方法	(127)
大面积多丝流气式正比计数器	(132)
FJ-2600 低水平 α 、 β 测量仪	(135)
多丝正比室的研制	(141)
小型多丝正比室	(148)
0.2cm^3 超小型电离室的研制	(149)
测定环境天然本底辐射的高气压电离室	(154)
$4\pi\gamma$ 高压电离室	(155)
充气 γ 剂量电离室	(156)
X 射线电离室的研制	(163)
DLS-105 型中子电离室的研制	(167)
四种小裂变室的研制	(172)
高温脉冲裂变室的研制	(179)
J431Z 型中子计数管的试制	(179)
1. 闪烁探测器及其它	(183)
双碱光电倍增管	(183)
GDB-50 型快速光电倍增管的结构和工艺	(187)
NaI (Tl) 闪烁体	(189)
300kg 圆盘型塑料闪烁体的制备	(190)
CsI (Tl) 闪烁薄膜	(191)
玻璃闪烁体的制备与性能	(195)
有机液体闪烁体 $n\gamma$ 分辨性能的测量	(199)
采用铝化塑料闪烁体的低能 β 探头	(205)
FH-1906 型低本底 γ 闪烁谱仪	(209)
闪烁 γ 强度仪	(210)
球型中子剂量当量率仪探头的研制	(215)
测量强脉冲混合辐射场的探测器件	(218)
康普顿二极管的研究	(224)
康普顿二极管探测器	(228)
长钒自给能探测器的研制	(229)
堆芯自给能中子通量探测器	(232)
KY-526 自给能测量装置	(233)
热释光剂量测量中的单光电子技术	(237)
BF_3 真空往复络合纯化法及其应用	(238)

第二部分 核电子学

I. 模拟信号的处理	(245)
高分辨率核能谱仪中的脉冲成形方法	(245)
脉冲光反馈电荷灵敏前置放大器	(256)
快速电荷灵敏放大器	(261)
FH4-028X 射线谱仪放大器	(263)
低噪声高稳定电荷灵敏前置放大器	(269)
快电荷灵敏前置放大器	(271)
FH-1026A 型谱仪放大器	(274)
在 YS 系列液体闪烁计数器中使用的对数放大器	(280)
DC-1 型静电计电子管直流对数放大器	(283)
用于液体闪烁计数装置的对数电荷放大器	(287)
FH4-908 有源线性门	(288)
堆积脉冲排除器	(293)
配 Si (Li) 探测器的脉冲光反馈前置放大器和脉冲处理器	(298)
用于粒子鉴别系统的可变跨导模拟乘法器	(299)
II. 时间测量	(300)
短时间间隔测量	(300)
引出定时脉冲的简单方法	(307)
恒比定时甄别器	(311)
FH4-006 型恒比定时甄别器	(315)
快速时间测量装置	(319)
FH4-001 型时间-幅度变换器	(324)
正电子湮没寿命谱仪的安装测试	(328)
FH4-012 型定时滤波放大器	(334)
III. 数字电路及系统	(338)
逐次渐近法 4096 道模-数变换器	(338)
8192 道脉冲幅度分析器的研制	(342)
^{241}Am 低能 γ 稳谱技术在野外能谱仪器中的应用	(349)
4096 道稳谱器	(352)
关于模数变换器一些问题的分析	(357)
用 DJS-130 计算机直接通道构成基于计算机的多道分析器	(364)
计算机在核物理实验中的应用	(367)
国外微型计算机在核科学技术中的应用	(375)
DJS-8/CAMAC 分支驱动器	(382)
CAMAC 机箱控制器	(385)
DJS-130 机多机箱 CAMAC 系统	(388)
小型多丝正比室计算机在线实验	(394)
小型多丝正比室计算机在线实验程序设计	(400)

在严密性监测系统中使用计算机自动报警和抄表的初步试验	(404)
核能谱数据获取和处理用的 CAMAC 计算机系统	(411)
单次多路快速信号的数字化测量设备	(412)
单次取样分析	(417)
指数函数倍增率测量仪	(422)
IV. 仪器、电源及其它	(427)
水银开关高压毫微秒脉冲产生器	(427)
线性率表的分辨本领与高精度测量	(430)
带模拟运算直读镭、钍含量的携带式 γ 能谱仪	(435)
NIM 插件型高压电源介绍	(439)
NIM 系统 V-H 型电源中的热耗温升问题	(442)
BJGY-2A 型高压电源的试制和生产	(446)
3-10kV 高压电源	(447)
核物理与高能物理实验用的 24W、12W 输出高压系列	(450)
平滑脉冲产生器	(451)
用于数字式个人 γ 累积剂量仪的电流-频率变换器	(451)
自动换档线性率表	(452)
结型场效应管的噪声分析	(453)
YSJ-76 型液体闪烁计数器的研制与实验	(457)
稳压变压器的制造与应用	(458)
电子计算机式多道脉冲幅度分析器	(459)

I. 半导体探测器

平面型高纯锗探测器

吴绍云 张淑娟 邢静姝 孙复生

一、前言

近十年来,在高分辨 Ge 探测器中最引人注目的发展是平面型高纯锗 (HPGe) 探测器,这是因为 HPGe 探测器不需进行锂补偿,因而可以在室温下保存;另外,它的制造工艺简单、周期短,有薄的入射窗等优点,这都促使加速了对它的研究和发展。尽管目前 HPGe 单晶的成本还比较高,但是 HPGe 探测器在许多应用中已迅速代替了 Ge (Li) 探测器,例如在铀矿勘探 [1]、中能核物理实验 [2、3]、环境监测 [4]、空间物理 [5] 以及核医学 [6] 等方面得到了越来越广泛的应用,其中应用最多的是平面型 HPGe 探测器。

HPGe 探测器的制造方法是多种多样的,最常采用的方法是扩散锂构成 N^+ 接触和蒸发金属形成面垒接触 [7~9]; 离子注入技术也已用来制造 HPGe 探测器 [10、11]。近来, Hansen [12] 在高纯锗上蒸发无定型 Ge 构成电子或空穴的阻塞接触,制成了很好的 HPGe 探测器。

本文报告我们用净杂质浓度 $N_I = 3 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{11}$ (受主) / cm^3 的 Ge 单晶研制平面型 HPGe 探测器的结果,分析探测器的基本电性能并讨论与探测器性能有关的几个问题。

二、探测器的基本电性能

在 P 型 Ge 上采用扩散锂和蒸发钨构成的平面型探测器是一个典型的“突变” N^+P 结二极管结构,因此,对探测器的基本电参数(耗尽宽度 W , 耗尽区电容 C_d 和耗尽区的电场分布等)可以采用“突变”二极管相应的表达式 [13] 进行分析。

探测器的耗尽宽度 W 为:

$$W = \left(\frac{2\epsilon V_R}{qN_I} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中, ϵ 是半导体的介电常数, V_R 是反向偏压, q 为电子电荷, N_I 是半导体材料的净杂质浓度。由 (1) 式可见,耗尽宽度是由材料的净杂质浓度和加上的反向偏压决定的。若 $N_I = 1 \times 10^{11}/\text{cm}^3$, 要达到 5mm 的耗尽宽度,则需 1400V 工作电压,这样高的工作电压是不易达到的,所以,适合制造 HPGe 探测器的 Ge 材料的净杂质浓度应 $\leq 5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 。

面积为 A 的探测器的耗尽区电容 C_d 为:

$$C_d = \frac{\epsilon A}{W} = A \left\{ \frac{\epsilon q N_i}{2V_R} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

显然，器件的电容大小主要取决于它的面积和材料的净杂质浓度，因此，选择尽可能低的净杂质浓度的材料是必要的。目前，国外制造HPGe探测器使用的Ge单晶有低达 $5 \times 10^9/\text{cm}^3$ 的净杂质浓度 [3]。

探测器耗尽区的电场分布为：

$$E(x) = \frac{N_i d}{2\epsilon} + \frac{V}{d} - \frac{N_i x}{\epsilon} \quad (3)$$

式中， d 是探测器的有效厚度， x 是距 N^+P 结的距离。根据 (3) 式计算了探测器 77-3-4 耗尽区的电场分布 (图 1)。由于在 P^+ 层附近是低电场，就要求探测器能工作在较高的过耗尽电压下，特别是在探测低能射线时，以保证 P^+ 层一侧有高的电场 ($\geq 1000\text{V/cm}$) 和好的电荷收集。

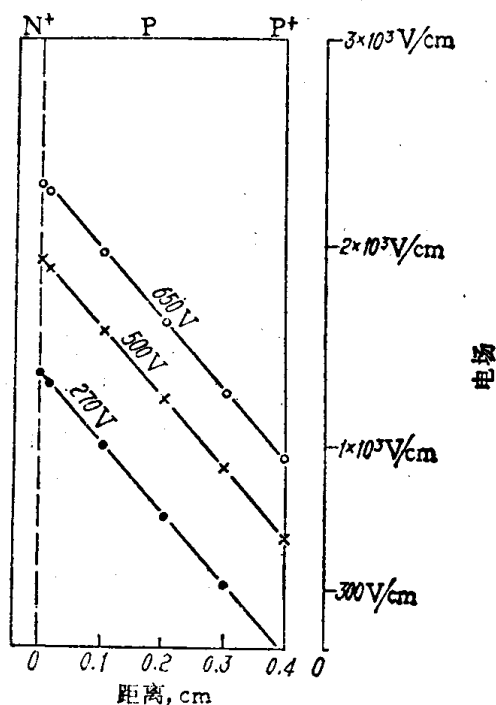


图 1 HPGe 探测器 77-3-4 的电场分布 $N_i = 3 \times 10^{10}/\text{cm}^3$

三、探测器的制备和初步估价

HPGe单晶是由有色金属研究院提供的 {100} 方向生长的P型材料。

为了提高探测器的击穿电压和降低漏电流，探测器被加工成槽沟几何形状 [14] (图2)。

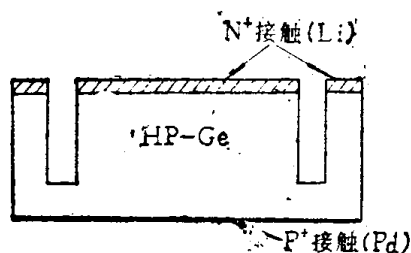


图 2 HPGe 探测器构型示意图

N^+ 接触是在单晶的一面真空蒸发一层锂，然后在 300°C 下扩散 8 分钟构成的，扩散层的厚度大约是 $350\mu\text{m}$ ； P^+ 接触是在真空中在单晶的另一个面上蒸发一层钯形成的非注入势垒接触。蒸发前样品的表面处理分为两步：首先在 $3:1 = \text{HNO}_3 : \text{HF}$ 腐蚀液中腐蚀 3 分钟；然后在 $1:1 = \text{HF} : \text{H}_2\text{O}_2$ 腐蚀液中腐蚀样品，当由于反应放热使腐蚀液的温度升到 60°C 左右时，再二次加入一份 HF，在

样品表面出现浅黄色时淬灭腐蚀。第一次腐蚀是为去掉样品表面的机械损伤层，第二次腐蚀是在 Ge 表面产生氧化层。

制成的二极管经过最后的侧面处理后，装在样品架上直接浸入液氮中测量二极管的电性能。根据二极管的电容 C_D -电压 V_R 和电流-电压特性，可以测定探测器的全耗尽电压和二极管可能承受的工作电压是否 $\geq$ 全耗尽电压 V_D ，图 3 是这种测量的结果。为了鉴定构成探测器的 Ge 材料的实际净杂质浓度 N_i ，我们由 C_D - V_R 曲线和 $1/C^2$ - V_R 曲线，采用下式：

$$N_i = \frac{2}{\epsilon q A^2} \times \frac{dV}{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}$$

计算了探测器材料的 N_i ，结果列在表 1。

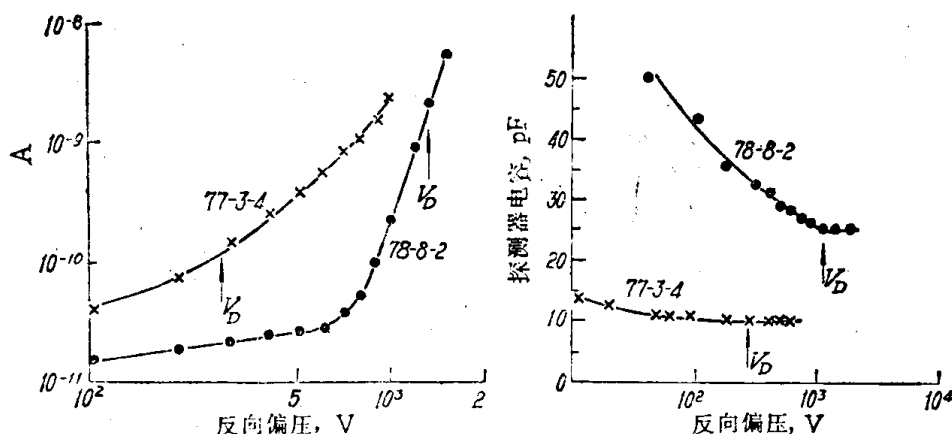


图 3 探测器的电流-电压和电容-电压特性曲线

二极管的侧面处理与探测器的电性能有密切的关系。我们采用了二种处理方法，分别用 3 : 1 = HNO_3 : HF 腐蚀液和 1 : 10 = HNO_3 : HF 腐蚀液处理器件的侧面。对不同的样品，二种方法都可能是有效的（见图 4）

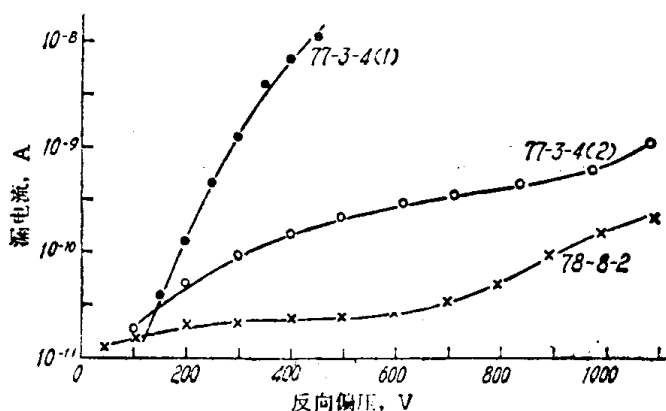


图 4 不同的侧面处理方法对探测器电流-电压特性的影响

探测器封装在 Ge (Li) 探测器通用的低温装置内， P^+ 面面向 $50\mu\text{m}$ 厚的铝窗。

77-3-4 (1) : 2 : 1 = HNO_3 : HF 腐蚀液；77-3-4 (2) :

1 : 10 = HNO_3 : HF 腐蚀液；78-8-2 : 3 : 1 = HNO_3 : HF 腐蚀液。

四、探测器的性能与讨论

目前，探测器配用室温电荷灵敏前置放大器，对 ^{241}Am ， ^{57}Co ， ^{137}Cs 和 ^{60}Co 源的 γ

射线进行了测量，最好的能量分辨是用HPGe77-3-4得到的。当采用噪声水平为700eV + (20 eV/pF) 的电荷灵敏前置放大器时，对59.6 keV、122keV、661keV和1.33MeV的 γ 射线的能量分辨率分别是1.1、1.2、1.8和2.3 keV。图5是用HPGe77-3-4测量的 γ 射线能谱，其它探测器的性能见表1。

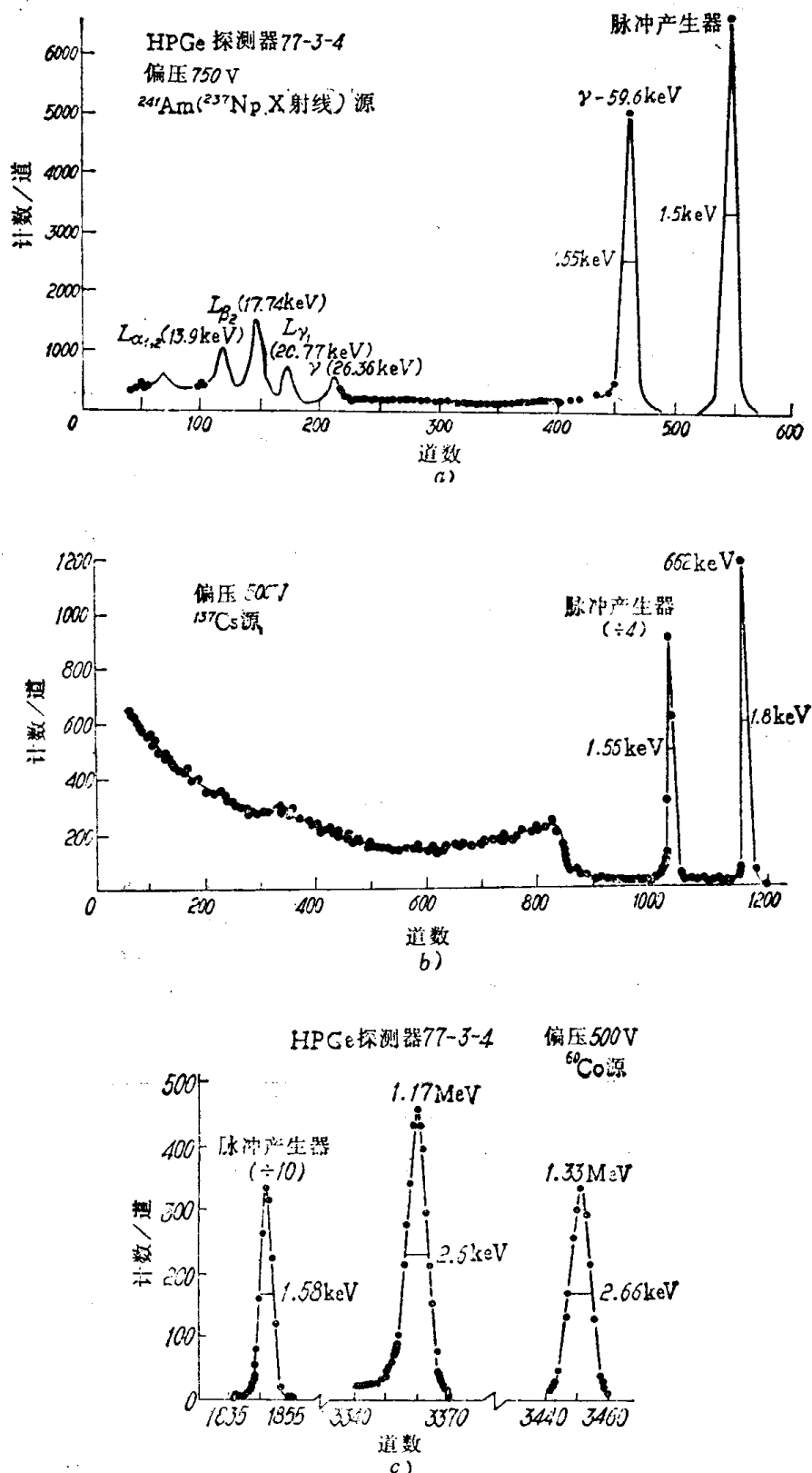


图5 用HPGe77-3-4得到的 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的能谱

表 1 平面型 HPGe 探测器的性能

编 号	灵敏面积 cm ²	厚 度 cm	耗尽电压 V	N _L , 1/cm ³		电 压 V	能量分辨率, keV			
				C _D -V _R 方法	1/C ² -V _R 方法		59.6	122	661	1332
H1-1A	20	2.8	380	1.1×10 ¹¹	—	360			8.4	
76-1-2	37	3.3	450	1.0×10 ¹¹	9×10 ¹⁰	400			9.6	
77-2-1	60	4.0	200	3.0×10 ¹⁰	5.0×10 ¹⁰	150			16	
77-3-4*	60	4.4	270	3.0×10 ¹⁰	5.3×10 ¹⁰	>300	1.1	1.2	1.8	2.3
78-8-2	150	5.25	1200	1.0×10 ¹¹	4×10 ¹¹	1500			9.4	
78-8-2(2)	100	5.15	1000	8.0×10 ¹⁰	—	1000	1.6		7.0	

• 前置放大器: 0.7 keV + (0.02 keV/pF)。

(一) 探测器的法诺因子 F

Sher 和 Keery [15] 证明 Ge 探测器的法诺因子 F 应小于 0.11。目前已发表的 HPGe 探测器的最好结果是 $F = 0.088 \sim 0.11$ 。为了比较, 计算了探测器 77-3-4 的 F 因子。 F 与探测器贡献的谱线宽度 ΔE_D 的关系可表示为:

$$F = \frac{(\Delta E_D)^2}{8 \ln 2} \frac{1}{W E_\gamma}$$

式中, E_γ 是 γ 射线能量; W 是产生一对电子-空穴对需要的能量, 计算结果列在表 2;

$(\Delta E_D)^2$ 是光电峰宽度平方扣除脉冲产生器宽度平方, 所以这个结果包含了电荷产生的涨落和探测器电荷收集过程的涨落二部分的贡献。

表 2 探测器能量分辨率与 γ 射线能量的关系

放 射 源	能 量 keV	系 统 分 辨 率 keV	脉冲产生器宽度 keV	探测器贡献 keV	F
²⁴¹ Am	59.6	1.55	1.5	0.38	0.15
¹³⁷ Cs	661	2.1	1.56	1.41	0.19
⁶⁰ Co	1170	2.6	1.58	2.03	0.23
	1332	2.66	1.58	2.15	0.25

(二) 探测器的窗

N⁺PP⁺ 结的探测器采用 P⁺ 面为入射窗, 在全耗尽后, P⁺ 层下面仍存在近乎死层的弱电场区, 因此, 当 5.9keV 的 X 射线入射到探测器 77-3-4P⁺ 面时, 只在 650V 偏压下 ($V_D = 270V$) 才第一次观察到光电峰, 而且, 全能峰计数随偏压的增高而继续增加。按照 Llaier [16] 的方法, 在 800V 偏压下测得探测器有约 4 μ m 厚的死层。

(三) 探测器的温度特性

HPGe 探测器最突出的特点是可在室温下保存和经受低温到室温的循环, 而性能不变坏。探测器 77-3-4 经受了七次温度循环, 并在室温下贮存近千小时, 未发现性能变坏。

五、结 束 语

已经证明, 采用上述工艺可以成功地制造平面型薄窗 HPGe 探测器。最好的探测器

可以承受电场 $>1000\text{V/cm}$ 的过耗尽电压, 对 X 射线和 γ 射线有高的分辨本领。探测器 77-3-4 已满意地用于钼的核衰变纲图测量。目前, 研制 HPGe 探测器工作中的一个主要问题是缺少合乎要求的高纯 Ge 单晶。研制更大体积探测器的工作还在继续。

有色金属研究院吴绪礼等同志为我们提供了 HPGe 单晶; 在能谱测量中得到王征华、高德喜同志的帮助; 在低温装置方面得到了梁春新同志的帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Frank E. Senftle, et al., *Nucl. Instr. Meth.*, 138 (2), 380 (1976) .
- [2] J. F. Amann, et al., *Nucl. Instr. Meth.*, 126(2), 193 (1975) .
- [3] R. Eisberg, et al., *Nucl. Instr. Meth.*, 146(3), 487 (1977) .
- [4] Kirk K. Nielson, et al., *Nucl. Instr. Meth.*, 138(2), 227 (1976) .
- [5] J. Mraz, IAEA-R-1317-F.
- [6] J. H. Ewins, et al., IAEA-SM-210/62.
- [7] R. D. Baertsh, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-17(3), 235 (1970) .
- [8] H. R. Hard, et al., *IEEE Trans Nucl. Sci.*, NS-19(1), 265 (1972) .
- [9] J. Llacer, *Nucl. Instr. Meth.*, 98(2), 259 (1972) .
- [10] J. P. Ponpon, et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-13 (5) 221 (1972) .
- [11] C. Scott. Hubbard, et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-24 (1), 161 (1977) .
- [12] Willion L. Hansen, et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-24 (1), 61-63 (1977) .
- [13] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Part. I, (1969) .
- [14] J. Llacer, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-13 (1), 98 (1968) .
- [15] A. H. Sher and W. J. Keery, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-17 (1) , 39~43 (1970) .
- [16] J. Llacer, et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-24 (1) , 53 (1977) .

离子注入的高纯锗探测器

王国干 赵世明 尤乃谈

一、原 理

Si(Li) 和 Ge(Li) 探测器在核辐射测量中已成为优异的探测工具, 这些探测器能够有效地探测光子和带电粒子, 在很宽的能量范围内有良好的能量分辨率, 但是 Si 和 Ge 有着不同的性质。对于光子的探测, 光电截面正比于 Z^5 , 所以 Ge 的探测效率大大高于 Si; 对于带电粒子的探测, Ge 的阻止本领也比 Si 强, 如 40MeV 的质子的射程在 Si 中有 9mm, 而在 Ge 中仅有 5mm。此外, 产生一个电子-空穴对所需要的平均能量, Ge 比 Si 小, 这也意味着 Ge 的能量分辨率比 Si 要好, 就是说 Ge(Li) 探测器与 Si(Li) 探测器相比较, Ge(Li) 探测器对 γ 射线有高的探测效率, 对带电粒子有大的阻止本领, 以及具有好的能量分辨率等。因此, Ge(Li) 探测器在核辐射探测中被广泛采用, 并占有重要的地位。但是用 Ge(Li) 探测器的麻烦是必须在低温下工作并经常贮存在低温下, 否则就会造成

Li 沉淀使其性能变坏,以致不能使用,而且 Ge (Li) 探测器制造周期长,工艺复杂。为了避免和克服 Ge(Li)探测器的上述缺点,利用高纯锗材料制造的核辐射探测器,已引人注意。因为,在利用高纯锗制造探测器时, Li 漂移的手续不再需要了,所以使探测器的制备工艺大大简化,周期大大缩短,探测器的性能也较为稳定,如探测器偶而由 77K 升到室温,其性能也不会有显著的变化,甚至可贮存在室温下。同时,它还保持有 Ge(Li)探测器的优点。制造 Ge (HP) 探测器使用的高纯锗材料,可以用 N 型,也可以用 P 型,制备接触可以用金属面垒,也可以用离子注入。对于一个平面型 Ge (HP) 探测器来说,它的耗尽层深度与材料的杂质浓度及应用在探测器上的偏压有关,如下式所示:

$$W = 4.2 \times 10^4 \left(\frac{v}{N} \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中: W = 耗尽层厚度 (mm);

v = 加在探测器上的反向偏压 (V);

N = 材料的杂质浓度 (原子/cm³)。

由 (1) 式看出,要做出厚耗尽层的探测器,必须使用高纯度的锗材料。如 J. Llacer 用杂质分布为 4×10^{10} (施主)/cm³ 或 6×10^{10} (受主)/cm³ 的高纯 Ge 单晶,制造出了耗尽层厚度为 20mm 和面积为 16cm² 的 Ge (HP) 探测器。若使用杂质浓度 $> 10^{12}$ /cm³ 的材料是做不出厚耗尽层的探测器来的。

二、探测器的制备

制造 Ge (HP) 探测器的方法有多种,但它有一个共同的目的,就是在一块大小合适的经过处理的晶片上形成两个满意的接触,一个是整流接触,另一个是欧姆接触,并能够在这个接触之间施加较高的反向偏压,以获得较厚的探测器的耗尽层。我们制造 Ge(HP) 探测器的简要步骤如下:

(1) 采用 P 型高纯 Ge 单晶的杂质浓度 $\approx 10^{10}$ (受主)/cm³, 晶片厚度约为 5mm, 直径约为 15mm。

(2) 分别用 14 号和 7 号金刚砂磨光两个表面和边缘。

(3) 用丙酮超声清洗二次,每次各 10 分钟左右。

(4) 用抗酸保护膜覆盖一个表面,用 3HNO₃:1HF 溶液腐蚀另一个表面和边缘。

(5) 在腐蚀的表面上真空蒸发和扩散 Li, 以获得 N⁺ 型整流接触,真空度 $< 5 \times 10^{-6}$ mmHg, 310℃ 下扩散 8 分钟。

(6) 在 Li 扩散的背面注入 B⁺ 离子,以获得 P⁺ 接触。注入量为 10^{14} /cm², 能量为 15 keV。

(7) 在 Li 扩散的表面上,用超声波或钻床刻保护沟槽。

(8) 两个表面用抗酸保护膜覆盖,用 3HNO₃:1HF 溶液腐蚀边缘,用去离子水冲洗,烘干待测。探测器的示意图见图 1。

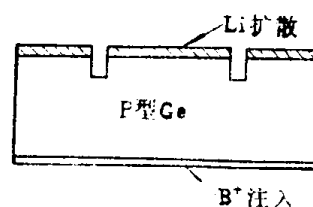


图 1 探测器示意图

三、离子注入的 Ge (HP) 探测器的优点

(1) 入射窗薄: 用能量为 15 keV 的 B^+ 离子注入, 其窗厚一般仅有 2000 Å 左右, 因此探测器可以作为中低能 γ 射线谱仪, 也可以作为带电粒子谱仪。

(2) 结构牢靠: B^+ 离子是注入到 Ge 的表面内, 形成的 P^+ 接触比金属面全牢靠, 不会发生接触脱落现象, 可以反复进行试验和表面处理。

(3) 不用 Li 离子补偿, 制造方便, 处理简单, 用足够纯的 Ge 单晶, 可以在较短的时间内作出大体积探测器。

(4) 温度由 77K 升高到 300K, 探测器的性能无明显变化。

四、实验结果

将制备好的 Ge(HP) 探测器封装入低温真空装置中排气, 待真空度达到 10^{-4} mmHg 后, 将装置的阀门关好, 插入液氮杜瓦瓶中。由于分子筛在低温时的吸气作用, 装置的真空度能达到 10^{-6} mmHg, 此时可进行探测器的低温真空性能测试。在 77K 下测得 Ge(HP) 探测器的伏安特性如图 2 所示; 测得的电容-电压特性如图 3 所示。利用多道谱仪系统测得 ^{241}Am 和 ^{57}Co 源的能谱线见图 4, 对 59.57 keV 和 122 keV 的能量分辨率分别为 510.4 eV 和 812.3 eV, 此时 Ge (HP) 探测器所加的反向偏压 $V_r = 285\text{V}$, 仪器成形时间常数 $\tau = 4\mu\text{s}$ 。利用这个谱仪系统测得的 ^{137}Cs 源的能谱见图 5, 对 ^{137}Cs (662 keV) 的能量分辨率为 2.13 keV。

目前探测器对低能 X 射线的能量分辨率还不够好, 特别是对 ^{56}Fe 的能谱还未能测出, 我们认为这是由于探测器的晶片过厚和施加的偏压太低, 未能使 5mm 的晶片完全耗尽, 致使入射窗较厚, 低能部分在非耗尽区内被吸收和损耗的缘故, 这有待今后在探测器的制备技术中加以改进。

测量谱仪中使用的多道脉冲幅度分析器是由本室吕谦银和邵鹏等同志研制提供的。对于他们在测量工作中给予的支持, 在此表示感谢。并对上海钟表元件厂翁建权同志在离子注入工作中所给予的大力协助表示感谢。

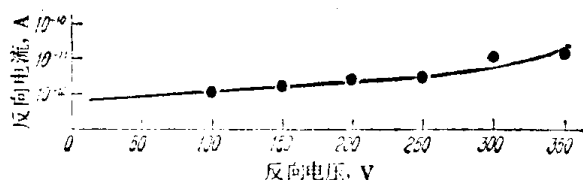


图 2 Ge(HP)探测器的反向电流与反向电压的关系

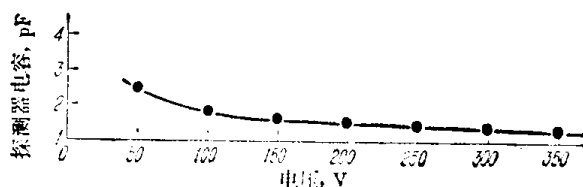


图 3 Ge(HP)探测器的电容与电压的关系

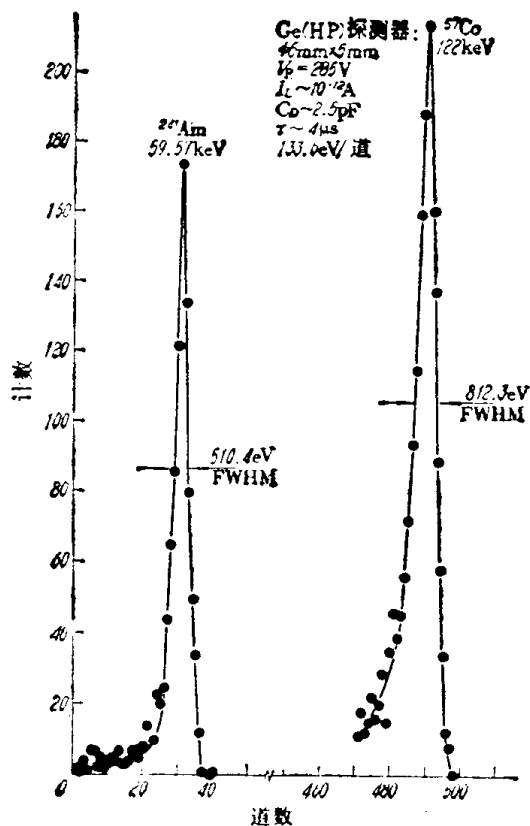


图 4 用 Ge(HP) 探测器获得的能谱

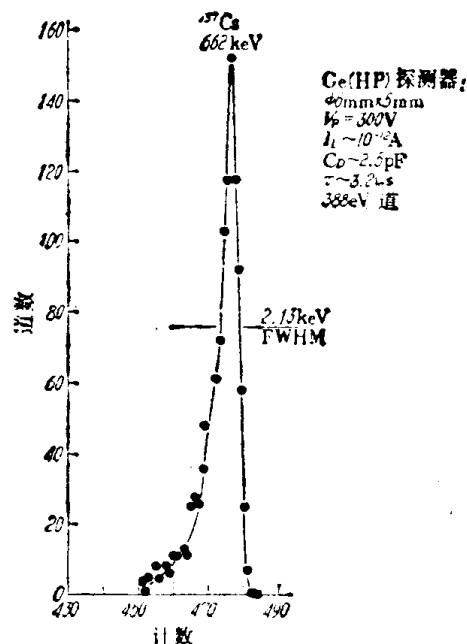


图 5 用 Ge(HP) 探测器获得的 ^{137}Cs 能谱

同轴 Ge(Li) 探测器的研制与问题

原子能研究所同轴 Ge(Li) 探测器研制组

一、引言

国外，随着对材料性能的深入研究和工艺技术的提高，同轴 Ge(Li) 探测器早已进入商品阶段。目前能提供相对光电峰效率 $\geq 25\%$ （有效体积约为 140cm^3 ）、对 ^{60}Co 射线能量分辨率 $\leq 2\text{keV}$ 、峰康比 $\geq 50:1$ 的商品探测器。因此，同轴 Ge(Li) 探测器在核物理实验与国民经济其他领域里的应用越来越广泛。我们在初步试制成同轴 Ge(Li) 探测器的基础上，近几年来在工艺上作了一些改进，使探测器的能量分辨率又有了一些提高，如探测器 73-1-2-1 对 ^{60}Co 能量分辨率为 2.9keV ，峰康比 $>10:1$ ，效率为 3.8% 。

二、工艺上的改进

（一）漂移

样品在高温（ 36°C ）漂移完后，我们增加了室温漂移，然后再由 0°C 逐渐降低到零

下 60°C 进行逐级降温漂移。这样做可以尽量减少热生载流子产生的空间电荷对补偿度的影响，从而使本征区中的施主和受主能有充分的补偿。另外，也试验了将高温漂移过的样品直接封装在低温装置中进行逐级降温漂移，看来也可起到同样的作用。

(二) 封装条件的改进

我们先后设计了专门封装用的小房间和手套箱。图 1 是目前我们使用的通氮气的封装手套箱示意图。

采用封装手套箱的好处是：(1) 可控制箱内温度 (30% 左右)，以减少季节条件、天气好坏对封装的影响。(2) 可减少操作者手汗和呼出的废气对封装的影响，改善了清洁度。当环境温度小时，还可以在超净工作台上封装，如探测器 74-1-4 就是这样封装成功的。

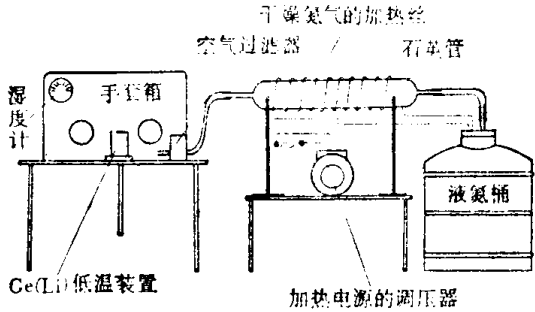


图 1 同轴 Ge (Li) 探测器手套箱封装设备简图

(三) 真空性能的改善

样品封入装置后，用离子泵取代扩散泵抽气，部分消除了扩散泵油对样品表面的沾污，并且真空度也由约 10^{-4} Torr 提高到 5×10^{-5} Torr，抽气时间缩短了近半小时。另外，我们还试验了用吸附泵取代机械泵-扩散泵抽气处理低温装置，实验结果表明，用吸附泵抽气处理装置是可行的。

(四) 低温装置中样品封装架结构的改进

图 2 是我们原来使用的样品封装架结构。

为了保证样品接近液氮温度，同轴样品被固定在与冷指相接的小铝板上， n^+ 端与铝板紧贴接地（不是绝缘型），而绝缘型封装则用聚四氟乙烯薄膜使 n^+ 端与铝板隔开。上述结构的缺点是反射罩与样品配合很不紧密，不可避免地会产生热电磁辐射效应^[1]，即室温下的铝帽发出的波长为 $2\mu\text{m}$ 左右的红外光对探测器漏电流有贡献，尤其是当不用反射罩时，这种热电磁辐射效应更为严重。我们用冷氮气流使铝帽的外面温度由室温降低到零度左右，观察到探测器漏电流明显下降（试验的探测器为 74-2-15，有效体积为 42.9cm^3 ，未加反射罩），这时室温铝帽黑体热辐射对探测器漏电流的贡献约为 $4 \times 10^{-10}\text{A}$ 。这说明，对大体积同轴 Ge (Li) 探测器来说，这种效应对漏电流的贡献是不可忽略的。另外，由于反射罩与样品配合得不紧密，所以样品与周围非控制气氛的接触机会增加，装置抽气时冷指内的分子筛粉末容易沾污样品表面，从而影响探测器性能。

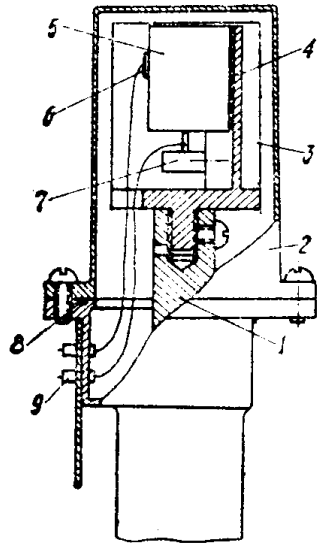


图 2 同轴 Ge (Li) 探测器低温装置封装简图

- 1——铜冷指棒；2——冷指盖；
- 3——反射罩；4——晶体座；
- 5——Ge (Li) 晶体；6——固定带（兼作 n^+ 接触）；7——p 电极座；8——密封“O”圈；
- 9——绝缘子。

为了减少热辐射对漏电流的影响，我们设计了铝盒封装结构，如图 3 所示。其特点是铝盒与样品装配紧密，采用导热性能良好的氮化硼绝缘片使铝盒与冷指绝缘，可使铝盒处在接近液氮温度，从而可避免热电磁辐射效应以及上述其他一些缺点。有五块样品采用铝盒封装。有三块样品取得了比较好的结