

大面积 Si(Li)X 射线探测器

沈浩元 林荷莲

(中国科学院上海原子核研究所)

Si(Li)X 射线探测器在核技术应用领域十分有用。我们制成的系列化的高分辨率 Si(Li)X 射线探测器, 器件最大灵敏面积为 200mm^2 , 对 5.9keV 最好能量分辨率(FWHM) 为 216eV 。能量分辨率的平均值是 223eV 。另一只 28mm^2 Si(Li) 探测器的最好能量分辨率为 139.6eV 。

关键词: Si(Li)X 射线探测器 高分辨率

一、引 言

Si(Li)和 Ge(Li) 探测器的使用已有二十多年历史。因 Ge(Li) 探测器的使用和保存都需要液氮, 目前已被 HpGe 探测器所代替。而 Si(Li) 探测器在核物理研究和核技术应用领域里仍广泛地采用, 主要原因是: (1) 随着硅单晶提纯技术的提高, $1000\text{—}3000\Omega\cdot\text{cm}$ P-型硅单晶材料比较容易获得, 而且价格便宜; (2) 近年来探测器制备技术已经成熟, 制作灵敏层厚度为 $0.5\text{—}7\text{mm}$ Si(Li)探测器比较方便。而一般 Au(Si)面垒探测器灵敏层厚度较薄, 要想制备 $\geq 5\text{mm}$ 厚 Au(Si)面垒探测器需要较高电阻率的 N-型材料, 可是 $1\times 10^4\Omega\cdot\text{cm}$ 以上的 N-型硅单晶材料在国内外市场上并不多见, 而且价格昂贵。Si(Li)探测器在核结构工作范围内可测量 $10\text{—}100\text{MeV}$ 的天然 α 粒子、 β 射线和核反应研究中的 γ 射线等^[1]; (3) 在 X 射线荧光分析领域里, 高分辨率 Si(Li)探测器特别适合快速特征 X 射线能谱分析。因此, Si(Li) 探测器在常用的硅和锗探测器中占有十分重要的地位。

二、器件制造

采用区域提纯的 P-型硅单晶, 电阻率 $1500\text{—}4000\Omega\cdot\text{cm}$, 少数载流子寿命为 $500\text{—}1000\mu\text{s}$, 无位错及单晶生长沿着[1.1.1.]方向。北京有色金属研究院和浙江大学半导体材料研究所提供的探测器级 P-型硅单晶, 质量已达到丹麦 Topsil 公司同样水平。

(1) P-N 结形成 蒸发和扩散过程都在高真空系统中完成, 首先把高纯锂块加热蒸发到硅片的一个表面上, 然后将硅片立即投入 400°C 扩散炉中加热, 时间的长短取决于片子的厚度, 硅片厚, 扩散时间适当延长, 扩散结束后立即吊出炉外冷却, 这样就制成 P-N 结。

(2) 高温漂移 我们采用本单位制备的温度自动控制 $0\text{—}1000\text{V}$ 直流漂移电源, 探测器在空气中进行漂移, 工作温度从室温到 150°C 。为了提高漂移速率, 一般采用提高 P-N 结上漂移电压和选择尽可能高的漂移温度的办法。

在制备 Si(Li) 探测器时净化漂移常常被人们忽视, 因为在高温漂移过程中即使局部区域存在着锂离子补偿不完整现象, 但对 Si(Li)探测器的性能影响往往不容易发现。我们在制备大面积高分辨率 Si(Li)探测器过程中, 遇到大约有百分之十几的器件电容随偏压升高而逐

渐减小,所以完成高温漂移后进行几十小时的净化漂移对改善 Si(Li)探测器的 C-V 特性同样是非常重要的。

三、探测器的特性

1. 室温特性

Si(Li)探测器结束漂移前十分重要的一步是检查灵敏区范围内是否达到完全补偿。所用的最直接的方法是 α 源扫描。因为 $^{241}\text{Am}\alpha$ 粒子在硅中的射程 $\sim 25\mu\text{m}^{[2]}$,用准直孔为 $\phi 1\text{mm}$ 的 α 源从锂扩散层的背面沿灵敏区对称轴线上扫描,直到整个漂移区域输出讯号幅度都达到最大值(在我们测试条件下为 4.4V)。此外,还可以在室温测量器件电容与理论计算式 $C\approx 1.1A/W(\text{pF})$ (式中, W 用 cm 、 A 用 cm^2 为单位)得出的值结合起来加以判断。器件的耗尽电压 (V_{dp}) 在一定程度上能反映补偿的完整性,一般 Si(Li) 探测器的 V_{dp} 为 100—200V,性能较好的探测器 V_{dp} 为 50 V,而且在较低的偏压条件下电荷收集完全。耗尽电压可在室温条件下使用 $^{241}\text{Am} \alpha$ 源通过 1024 多道能谱仪精确测定。

2. 低温特性

到 1988 年 10 月已完成灵敏面积分别为 20、28、50、80、100 和 200mm^2 等六种尺寸 Si(Li) X 射线探测器的研制工作,采用本所研制的光反馈前置放大器、X 射线谱仪放大器和微机多道分析器组成测量系统,灵敏面积 200mm^2 Si(Li)-88-13* 在偏压为 -700V 时,对 ^{55}Fe 5.9keV 最好能量分辨率 ($FWHM$) 为 216eV,五次连续测量平均值 $FWHM$ 为 223eV, 28mm^2 Si (Li)-88-3-1* 探测器最好 $FWHM$ 为 139.6eV,详细结果见表 1。

表 1 Si(Li) X-射线探测器
Table 1 Si (Li) X-ray detectors

ϕ (mm)	A (mm^2)	探测器编号 Detector No.	能量分辨率(eV) (对 5.9keV)	$FWHM$ (eV) (At 5.9keV)
			最 好 值 The best value	平 均 值 Average value
5	20	Si(Li)-5-1	146.5	148
		Si(Li)-5-2	148	150.6
6	28	Si(Li)-88-3-1*	139.6	145.3
		Si(Li)-6-8-2	144	148.6
8	50	Si(Li)-8-8-12	165	168
		Si(Li)-8-9-2	165	169
10	80	Si(Li)-10-8-5	165	171
		Si(Li)-10-8-2	164	175
11	100	Si(Li)-11-7-4	173	178
		Si(Li)-11-7-3	178	180
16	200	Si(Li)-88-13*	216	223
		Si(Li)-16-8-1	237	240.6

3. 能量分辨率与计数率的关系

在高分辨率谱仪中，在计数率 (cps) 超过一定值之后，半导体探测器的能量分辨率会随计数率的提高而变坏。所以在 X 射线荧光分析领域里以及探测器能量分辨率测试时一般取 $\text{cps} \leq 1000$ 。实际上，在某些核技术应用中常遇到高计数率，同时又要求高分辨率，以便对多元素进行快速分析。我们根据实际使用要求，对 $28\text{mm}^2\text{Si(Li)}$ 探测器测定了分辨率与计数率的关系曲线如图 1 所示。当 $\text{cps} > 4000$ ，分辨率从原来的 148eV 增大到 163eV ，变化 10.2% ，结果表明 Si(Li)-88-3-1^* 谱仪能在较高的计数率情况下正常工作。

4. 器件结构对电容的影响

在研制 Si(Li) 探测器时，为了减小器件电容，必须设计合理的结构。因为在光反馈前置放大器电路里场效应晶体管 2N4416 低温斜率约为 30eV/pF ，所以减小探测器的电容对提高能量分辨率是十分重要的。我们选择两种不同结构 (即斜槽和直槽型) 的 Si(Li) 探测器进行试

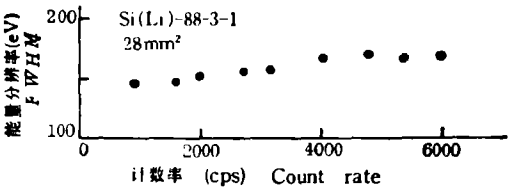


图1 能量分辨率随计数率的变化
Fig. 1 Variation of FWHM as a function of cps

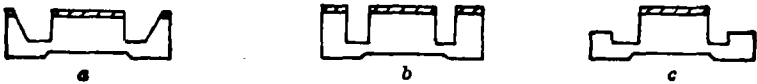


图2 不同结构的Si(Li)探测器
Fig. 2 Si(Li)-detectors with different configurations

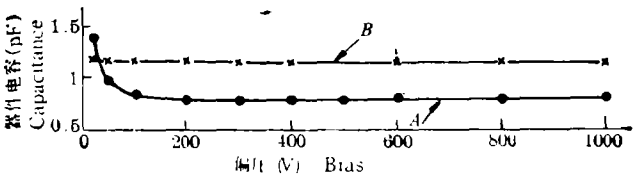


图3 器件电容随偏压的变化
Fig. 3 Capacitance of device versus the applied voltage

验，A 组是四只 $\phi 5 \times 3.3\text{mm}$ Si(Li) 探测器 (如图 2a)，B 组是四只 $\phi 5 \times 4\text{mm}$ Si(Li) 探测器 (如图 2.b)。两组探测器电容的平均值随偏压变化曲线如图 3 所示。根据器件电容理论计算 A 组电容值应略大于 B 组，可是图 3 表明在偏压高于 50V 时出现了相反的现象，其主要原因是 A 组采用斜槽结构减少了分布电容。为了进一步证实探测器不同的结构对电容的影响，从 B 组取出其中一只 Si(Li) 探测器，用机械加工方法降低探测器边缘的高度如图 2.c，结果同一只探测器在相同偏压条件下电容从 1.2pF 减小为 0.8pF 。

四、结 束 语

Si(Li) 探测器级的 P 型硅单晶虽然比高阻 N 型硅容易生长, 但是比电子工业上广泛采用的硅材料要求高, 尤其是大直径($\phi \geq 70\text{mm}$)材料, 目前国际上还是硅单晶生长过程中的副产品。

利用不同的硅单晶材料, 在同样的工艺条件下制成的一批合格 Si(Li) 探测器, 存放在清洁的空气培养皿里数天之后, 大部分探测器的反向漏电流无明显变化, 而少量探测器漏电流很快增大, 表面再处理后, 电流减小, 但数天后又出现增大, 经仔细观察发现这种现象与不同的硅单晶材料有关, 不同材料制成的探测器对周围环境的影响各异, 有些表面比较稳定, 有些十分敏感, 其原因有待进一步研究。关于 Si(Li) 探测器的保存问题, 国外有些实验室采用器件表面涂胶、低偏压(100V)长期加在探测器的 P-N 结上或者在一定的气氛(例如氩气、氧气和氮气等)条件下结合低偏压保存, 但是经过半年或更长时间后, 有些探测器漏电流仍不稳定, 所以探测器的长期保存问题至今都没有完全解决。

作者对为 Si(Li) 探测器的制备和性能测试提供条件的卢宋林、薛缪栋、浦世节和顾桂君等同志表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Fred S, Goulding, UCRL-16231, 1965年。
- [2] Abraham Fong et al., LBL-12122, 1981年。

Large area Si(Li) X-ray detectors

Shen Haoyuan Lin Helian

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica)

Abstract

Si(Li) X-ray detectors are available today in the field of nuclear techniques. At present we have made a series of Si(Li) X-ray detectors with high resolution. The processing technology and performance of the detectors are described. The largest active area of the devices is 200 mm^2 with the best resolution (FWHM) of 216 eV and an average resolution of 223 eV for 5.9 keV. The best resolution for 28mm^2 Si(Li) detector is 139.6 eV.

Keywords: Si(Li) X-ray detector High resolution

(1989年12月7日收到)