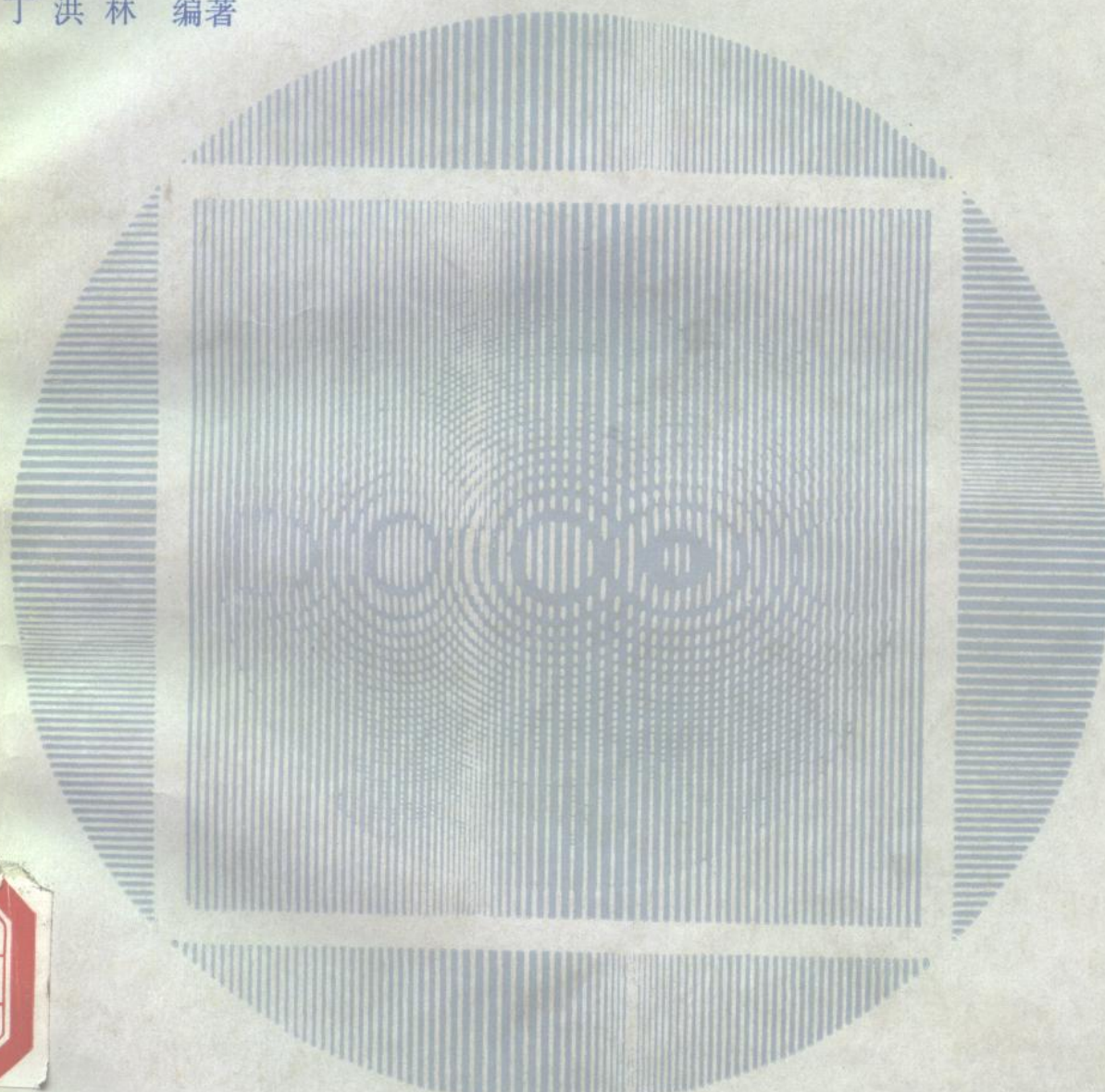


半导体探测器及其应用

BANDAOTITANCEQI
JIQIYINGYONG

丁洪林 编著



原子能出版社



73.7351
163

半导体探测器及其应用

丁洪林 编著

孙雪瑜 审

※



原子能出版社

3910349

内 容 简 介

本书较全面地叙述了半导体探测器的工作原理、制备工艺及其应用。内容共分五章，前两章介绍半导体探测器的发展史、工作原理、结构和制备工艺流程；后三章介绍半导体探测器的电特性、核辐射探测特性及其测试方法，半导体探测器在各领域的应用和使用中的注意事项等。

本书内容比较系统，书中还相应地列出了一些常用的曲线、图表和数据，各章后面附有参考文献。

本书可供从事半导体探测器研究和制备的技术人员，从事核物理研究和放射性测量的科技人员和大专院校有关专业的师生参考。

DT3562

半导体探测器及其应用

丁洪林 编著

孙雪瑜 审

责任编辑 袁祖伟

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京海淀区北下关印刷厂印刷

(北京市海淀区魏公村)

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张14.875·字数 371 千字

1989年9月北京第一版·1989年9月北京第一次印刷

印数：1—1150

统一书号：15175·748 定价：10.55元

ISBN 7-5022-0063-0/TL·26

前 言

随着国民经济和科学技术的发展,核技术和放射性同位素的应用也日益广泛。在核物理实验研究中,半导体探测器是必不可少的一种探测元件。此外,在宇宙航行、受控热核反应、工业、医学、生物防护、卫生防疫、食品检验等领域,利用放射性同位素和半导体探测器能迅速、准确地给出所测的结果;因而半导体探测器的应用日趋广泛,其发展更加迅速和深入。

本书根据编著者和同事们的一些工作经验并结合国内外目前的进展,对半导体探测器及其应用作了较全面的介绍。首先简要地介绍了半导体探测器的特点、发展史和近年来的进展;还介绍了探测器的工艺原理和特点;着重介绍各种半导体探测器的性能、特点和用途,以便帮助读者根据自己的工作内容选用合适的半导体探测器。书中还列出了一些常用的曲线、数据和图表,以供读者查阅。

本书可供从事半导体探测器研究和制备工作的技术人员、从事核物理研究和放射性测量的科技人员和大专院校有关专业的师生参考。

在本书的编写过程中,核物理学家王淦昌教授给予了支持和鼓励,并阅读了书稿,北京核仪器厂的孙雪瑜和宿昌厚同志审阅了全书,从书的结构到内容的选取提出了许多宝贵意见,在最后修改时还提供了不少资料和素材;另外,原子能研究所周俞斌、孙汉城等同志对本书内容的选取和整理给予了不少帮助;特在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中难免有不少缺点和错误,恳请读者不吝指教。

编著者

一九八四年五月

目 录

前言

第一章 绪论

- § 1-1 半导体探测器的特点和发展史..... (1)
- § 1-2 半导体探测器的现状与发展动向..... (2)

第二章 半导体探测器的工作原理、结构、类型、制备工艺和对材料的要求

- § 2-1 半导体探测器的工作原理、结构和类型 (10)
- § 2-2 半导体探测器的制备工艺原理和工艺流程..... (27)
- § 2-3 半导体探测器对材料的要求..... (48)

第三章 半导体探测器的电特性和核辐射探测特性及其测试方法

- § 3-1 电特性..... (60)
- § 3-2 核辐射探测特性..... (93)

第四章 半导体探测器的应用

- § 4-1 带电粒子谱仪和粒子的鉴别..... (154)
- § 4-2 β 和电子谱仪 (169)
- § 4-3 X射线的探测和测量..... (176)
- § 4-4 γ 射线的探测和测量 (187)
- § 4-5 中子探测和测量..... (204)
- § 4-6 在核防护工作中的应用——微弱放射性的测量..... (211)
- § 4-7 在高能、空间和等离子体物理中的应用..... (212)
- § 4-8 在医学、生物学中的应用..... (215)

第五章 探测器的存放、保管、使用注意事项以及使性能重新恢复的处理方法

- § 5-1 引言..... (224)
- § 5-2 探测器的存放保管和使用注意事项..... (224)
- § 5-3 硅面垒探测器使用中可能出现的故障及其原因..... (227)
- § 5-4 使探测器性能重新恢复的处理方法..... (229)
- § 5-5 半导体探测器专用的低温装置 (231)

第一章 绪论

§ 1-1 半导体探测器的特点和发展史

半导体探测器是六十年代以来得到迅速发展的一种新型核辐射探测元件。它的特点是：能量分辨率高，线性响应好，脉冲上升时间短，结构简单，探测效率高，偏压低（除锗和高纯硅探测器需要上千伏的偏压外），操作方便，所以在核物理实验和研究方面得到了广泛的应用，并在核科学技术的许多应用中替代了气体探测器和闪烁计数器。这也是核辐射探测技术的一个重要发展。

利用半导体来探测射线是美国贝尔电话实验室的麦凯（McKay）在1949年首先提出的。当时他发现，用磷铜丝压在锗半导体块上构成的耐反向高压的点接触型二极管，在受到钋（Po）放出的 α 粒子射线照射时有脉冲输出，这说明，这种二极管可以构成射线探测器。1951年他又用锗晶体的P-N结型二极管记录了 α 粒子。于是，这种探测器很快就引起了世界各国的重视。

第一个作核辐射探测器用的半导体材料是金刚石，它在1956年就开始被用作核粒子辐射探测器。但这种材料不易获得，而且原子序数太低，能量分辨又不好，所以在1958年前后戴维斯（Davis）等人利用加反向偏压的锗和硅的扩散型和面垒型P-N结构成半导体核辐射探测器后，它就被淘汰了。1960年，弗里尔达（Frieldan）等人用硅晶体的P-N结测量了 α 粒子的能谱，对5MeV的 α 粒子，能量分辨率高达0.6%，比当时所有其它探测器的性能都好。同期便有美国、加拿大的二、三家公司开始生产半导体探测器，并把它作为商品出售。

1960年迈耶（Mayer）等人利用锂离子漂移技术成功地制成了硅锂漂移探测器。到1962年，半导体探测器已被用来测量电子、质子、 α 粒子、重离子和裂变碎片；能量分辨率也进一步得到了提高，对 ^{241}Am 5.486MeV α 粒子，其半高宽为22keV。

1962年弗雷克（Freck）和韦克菲尔德（Wakefield）应用佩尔（Pell）锂离子漂移原理成功地制成第一个锗锂漂移 γ 射线探测器。鉴于对 γ 射线，锗比硅有更高的探测效率，所以锗锂漂移〔简称作锗（锂）〕探测器受到了人们的重视，得到了迅速的发展。

在这期间，世界各国例如美国、加拿大、法国和英国都在积极研究半导体探测器，开始是对半导体材料及其制备过程进行了研究，进而又对半导体材料的辐射效应、表面效应和温度效应等理论问题进行了研究，并举行了一系列有关半导体辐射探测器的学术会议，进行了专题讨论。例如在1961年由国际原子能机构召开的核电子学会议，对半导体探测器给予极大的重视。1962年4月，联合原子核研究所举行了关于核辐射半导体探测器的学术会议。另外在美国华盛顿召开了几次有关闪烁计数器和半导体探测器的会议。之后，每年都有关于半导体探测器的专题讨论。

从1966年起人们就开始了化合物半导体核辐射探测器的研制工作，其中包括化合物半导体单晶生长的研究。到七十年代初，所研制的用于核辐射探测器的化合物半导体材料，除砷化镓、碲化镉外还有碘化汞。这些材料中除碘化汞进展较快外，其余的仍然处在实验室研究试

制阶段。

从1967年起,关于锗(锂)探测器提高性能和效率的实验研究工作报道得很少,因为当时已能提供对 ^{60}Co 1.33MeV γ 射线的能量分辨率为2keV的小平面锗(锂)探测器和分辨率优于3keV的大体积同轴型探测器。对低能X射线,分辨率也已达到优于200eV的水平。所以基本上认为在电子学线路上的改进已比进一步提高这些探测器的质量更为重要。确实如此,在采用了光反馈前置放大器后,系统的分辨率达到了140eV,此时对 ^{60}Co 1.33MeV γ 射线的分辨率为1.3keV。为了解决锗(锂)探测器必须在低温下工作和存放的问题,六十年代末期就开始了高纯锗材料的研究,七十年代初就研制出高纯锗探测器。而后这种探测器得到了很快的发展,现在已制备出性能与锗(锂)探测器相当的高纯锗探测器。

七十年代起,特别是七十年代末,硅材料的拉制工艺和探测器制备工艺的不断改进,不仅使硅(锂)探测器得到了很快的发展,而且也促使人们采用外延硅和高阻硅单晶来研制性能更优良的硅探测器。

§ 1-2 半导体探测器的现状与发展动向

一、引言

虽然贝尔实验室的麦凯在五十年代就表明了用半导体二极管可以探测 α 粒子,但半导体探测器真正应用到核科学研究中还是在六十年代初。由于它所独有的特点,在基础物理和应用物理中,它是唯一适合于宽能谱同时分析的探测器。用于带电粒子谱仪中的磁谱仪,虽然能提供较好的能量分辨,但它体积大,代价高,使用也很不方便,此外它还不能直接用于宽量程的能谱测量。闪烁体在制备、使用和代价上与半导体探测器相近,但能量分辨率要比后者差90—99%。所以自六十年代以来,半导体探测器得到了迅速的发展,它在核科学中的地位日益提高,到七十年代末,在许多领域内得到了广泛的应用。下面我们介绍半导体探测器的工艺、探测器用的材料以及锗(锂)探测器、高纯锗探测器、硅(锂)探测器、硅探测器(包括面垒探测器、平面工艺探测器、外延硅探测器和高阻硅探测器)、化合物半导体探测器、金刚石探测器和特殊类型半导体探测器等七类半导体探测元件近几年来的发展现状与动向。

二、半导体探测器工艺的现状与发展动向

半导体探测器有结型探测器、锂漂移型探测器、高纯锗、高纯硅和化合物半导体探测器等。就其工艺来说,探测器的P-N结和欧姆接触的N⁺和P⁺层是采用扩散、离子注入或外延生长重掺杂层工艺来制备的。这些工艺能满足对探测器电场和最小体漏电流的要求。

目前用于硅、锗探测器上的接触材料和工艺技术如下:

	锗		硅	
工艺技术	N ⁺	P ⁺	N ⁺	P ⁺
扩 散	锂	/	锂、磷、砷	硼
离子注入	磷	硼	磷、砷	硼
肖特基势垒	/	镍铬金钼	钼	金 钼
固相外延生长	/	铝钼钨	/	钼 钨

就制备探测器的锂漂移、离子注入和面垒工艺来说，它们之间各有长处和缺点。例如，锂漂移工艺周期长，在室温下有锂的移动和析出（沉淀）等缺点；面垒工艺的探测器表面是极为关键的问题；但它们有一个共同的问题就是探测器的表面处理需要进一步解决。探测器的表面处理对其耐压和漏电流的影响是很大的。它与选择好的单晶材料一样重要，是制备探测器的关键之一。人们曾采用各种技术来使表面漏电流减到最低限度的稳定值。这些技术是：生长硅氧化层、环氧封装、涂敷特殊的涂料、绝缘半导体薄膜的淀积以及器件本身的特殊形状的设计制造等。这些技术在控制半导体探测器的表面漏电流方面起到了积极的作用。为了获得高质量的探测器，表面保护技术是一项重要的研究课题。在硅探测器方面，除了采用平面工艺中的氧化物钝化保护和离子注入相结合的工艺外，还采用了势垒金属和硅层间夹一层其它介质的工艺，都得到了较好的结果。对锗探测器来说，在氩气氛中进行溅射非晶态锗，获得了好的表面保护层，因此对高纯锗（HP Ge）探测器来说表面保护问题基本上解决了。对Si（Li）探测器来说，采用机械方法构成沟槽和顶帽型结构可以提高击穿电压，降低漏电流。合适的表面处理对探测器性能的提高有着重要的意义。

三、探测器用半导体材料的现状和动向

高纯锗单晶，主要的杂质是Al、B，现在净杂质浓度能降低到 10^{10}cm^{-3} 数量级，所以不用锂漂移技术便可制备灵敏体积上百 cm^3 的 γ 射线探测器。但在拉制高纯锗晶体时，石墨覆盖炉壁和周围气氛渗入的氧、硅与锗构成复合体，这对高纯锗有较大的影响；拉晶过程中由于冷热骤变而熔在锗中的氢与缺陷有关，并影响其结晶的完整性。

对硅单晶来说，用分子筛提纯单硅烷制备的基础硼含量少的高纯P型硅单晶，其电阻率 $\rho > 30\text{k}\Omega\text{cm}$ ；用高纯、高阻P型硅制备的厚耗尽层的探测器可与Si（Li）相媲美。另外，用中子嬗变掺杂（简称NTD）技术使高纯高阻P型硅转变为N型硅，获得了较高质量的高阻N型硅，并制备成性能较好的探测器。

外延硅也已较好地用来制备 ΔE 和位置灵敏探测器，在制备整体结构的 ΔE 、 E 探测器方面也取得了较好的结果。

至于化合物半导体，要得到高质量的满足核辐射探测器要求的材料，一方面要保证有正确的化学剂量比，另一方面要防止引入杂质、缺陷，因此需要高精度的晶体生长技术。对碲化镉（CdTe）已研究出能去除极化效应的材料控制技术；对碘化汞（ HgI_2 ）也研究出了新的晶体拉制系统，使用在表面涂有丙烯保护层的系统可拉制出质量好的晶体，不过，这种丙烯

保护层过半年左右其特性就可能开始变化。

探测器的性能与探测器材料的纯度有着密切的关系,因而与高纯材料的制备技术的提高密切相关。因此,作为探测器制备的中枢,高质量晶体的研制以及在现有制备技术上改进仍然是当前的重要课题。

新半导体探测器的研制与材料的研制是紧密相关的,例如对于铽化铝,理论上计算的能带结构,禁带宽度比硅、锗的大,原子序数比硅、锗的高,另外还具有高的电子、空穴迁移率($\mu_n = 1100 \text{ cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$, $\mu_p = 700 \text{ cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$),少子寿命为1ms,所以它是具有很大的潜力的,可作为室温高能光子探测器的一种材料。现在的主要问题是怎样得到纯度高、净杂质浓度低($10^{12} - 10^{14}$ 原子/ cm^3)、完整性好的材料,但这样的铽化铝晶体的生长是非常困难的。再如SiC,它作为高温探测器确实是举世无双的,而且其抗辐照能力又很强(比硅高100倍),但SiC晶体非常小,所以到目前为止,它依然是实验室的珍品。

四、半导体探测器的现状与动向

(一) 锗锂漂移探测器

在六十年代初,人们还认为半导体探测器不可能测量 γ 射线,因为当时半导体探测器对 γ 射线的能量分辨率与当时最实用的技术——闪烁[NaI(Tl)]计数器差不多,效率又很低。而闪烁计数器在当时来说有成本低、体积大、效率高和使用方便等优点。1962年弗雷尔和韦克菲尔应用佩尔锂离子漂移原理成功地制成了第一个锗锂漂移 γ 射线探测器,并在实践中显示出它的优越性。此后这种探测器受到了人们的重视进而得到了迅速的发展。

随着大体积高质量锗单晶的研制成功和锂漂移工艺技术的不断改进,现在已能制备出体积大于 200 cm^3 的同轴锗(锂)探测器。从探测器制备工艺角度来看,国外大量研究工作是在六十年代中后期开展的。灵敏体积为几十 cm^3 的几种规格的锗(锂)探测器已批量生产,并已作为商品销售。

作为高分辨率 γ 射线谱仪的锗(锂)探测器已经能在各种场合中使用。对 ^{60}Co 1.33MeV γ 射线的分辨率为1.8keV,最大的峰康比为50,相对探测效率接近50%。锗(锂)探测器具有很好的能量分辨特性和相对高的探测效率,因此它特别适用于精度测量。在数据处理系统配合下,它在确定MeV量级的 γ 射线能量时的误差可达 10^{-5} 量级(即10eV左右),因而在实验核物理中得到了广泛的应用。如在核衰变纲图的研究中,过去用NaI(Tl)对 ^{239}Np 的 γ 射线谱进行测量时只观察到在440keV和490keV处的两个峰,而用锗(锂)探测器则看到了12条谱线^[1]。在短寿命核测量、核反应中的 γ 能谱分析等方面,用锗(锂)探测器也得到了很好的结果。另外,它可作为低本底 γ 谱仪应用于环境科学中。

锗(锂)探测器到七十年代末在如下两个方面取得了较大的进展:一是提高锗(锂)探测器的效率,特别是对低活度射线计数,希望有高的探测效率;二是锗单晶的鉴定。为提高探测效率也曾采取了各种措施,如研制井型同轴锗(锂)探测器,尽量加大灵敏体积和去掉P芯等。ORTEC公司利用基于调制原理工作的多路复合器^[2]将许多探测器并联使用,只提高效率不增加噪声,给出的结果是:十个(对 ^{60}Co 的1.33MeV γ 射线)效率为13%—19%、分辨率为1.80—2.08keV的同轴锗(锂)探测器并联得到的相对效率为158.3%、分辨率为2.01keV。近年来的主要发展动向是进一步研究如何提高对环境样品等微弱放射性测量的灵

敏度。

(二) 高纯锗 探测器

高纯锗探测器的出现是锗 γ 射线探测器制备工艺中的一个突破。由于净杂质浓度可达 10^9 — 10^{10} 原子/ cm^3 的数量级,这样就可以不用锂漂移补偿技术而制备出厚的 γ 射线探测器。这不仅简化了制备工艺程序,更大的优点在于:

1) 这种探测器封装在一个密封的盒里,可在室温下存放,经多次室温-低温的循环,性能保持不变。

2) γ 射线能谱的光电峰近于对称。

3) 使用时的工作温度可高至170K。

4) 可制成薄窗 N^+ 和 P^+ 接触。

5) 耐辐射损伤的能力强,而且产生辐射损伤后可在原来的装置上进行退火,处理方便。

目前国外已制备出性能与锗(锂)探测器相当的高纯锗探测器,大平面探测器的体积 $>70\text{cm}^3$,同轴探测器体积已超过 100cm^3 。能量分辨率,对 ^{60}Co 的1.17MeV γ 射线,半高宽为1.8keV;对 ^{57}Co 的122keV γ 射线,半高宽为630eV;对 ^{55}Fe 的5.9keV X射线,半高宽为160eV。

美国ORTEC公司等已出售用离子注入工艺制备的高纯锗带电粒子探测器,其灵敏面积为 10cm^2 ,厚为10mm,单个探测器能阻止200MeV的 α 粒子、60MeV的质子和10MeV的电子。对10MeV的电子,半高宽为3keV,对200MeV的 α 粒子,半高宽为20keV。

高纯锗探测器的研制和应用中有如下四个显著的特点:

1) 开拓了使用探测器阵列结构的可能性,从而增大灵敏面积,这在核医学上已得到了应用。

2) 可设计成多层叠加的探测器望远镜,以阻止能量高、射程长的粒子。例如,用八个厚1cm、直径3cm的高纯锗探测器组成的望远镜代替磁谱仪工作,可阻止200MeV的质子、270MeV的氦核和330MeV的氘核。

3) 用N型高纯锗和离子注入工艺可构成新型的X- γ 射线探测器^[8]。

4) 利用N型高纯锗可制成倒装电极的抗辐射性能好的高纯锗探测器。

近年来的发展动向有以下两个方面:

1) 替代锗(锂)探测器。

2) 进一步开发表面保护技术。

(三) 硅锂漂移探测器

硅(锂)X射线探测器是六十年代后期发展起来的,它配以低噪声前置放大器已广泛用来进行X射线荧光分析和X射线能谱分析。

硅(锂)漂移探测器用于X射线探测的最突出的优点是:

1) 死层薄、本底低、能量分辨率高。

2) 探测效率高、速度快、准确、稳定。

由于在减小入射窗厚度和电子学噪声方面获得了进展,因此它在能量分辨和向低能范围扩展上有了显著的提高。关于起着主要作用的低噪声电荷灵敏前置放大器的研究工作已有不少报道^[4-7],在零电容情况下电子学线路本身的固有噪声已降至80eV左右(对硅)。国外

利用脉冲光反馈前置放大器的硅(锂)X射线谱仪,对 ^{55}Fe 的5.9keV K_{α} X射线,其半高宽为148eV。1977年在X射线谱仪系统里增加一个增强分辨能力的插件,有效地去掉电子学系统的高斯噪声,使半高宽从148eV提高到130eV^[8]。这一改进对清楚地分辨低原子序数元素的X射线是一大贡献。

在向低能范围扩展方面,无窗硅(锂)X射线探测器已能分析硼K壳层X射线(185eV)。对Si、O的 K_{α} X射线得到的分辨率,分别为105eV和91eV。对C、N、O、F的特征X射线谱,半高宽为100eV,能把227eV的碳元素峰从噪声中区分出来;对碳 K_{α} X射线227eV的半高宽为99eV。所以它能分开元素周期表中原子序数大于碳的元素,为用能谱方法鉴别元素和痕量分析提供了极为方便的条件。

在带电粒子活化分析中,使用“Kevex”硅(锂)探测器对元素作定量分析的灵敏度可达 10^{-12}g 。

古尔丁(Goulding)1976年在瑞典召开的带电粒子活化分析会议上,总结了作X射线荧光分析用的硅(锂)探测器和电子学系统的一些问题,指出从探测器制造者的观点来看,应更好地了解材料参数的影响和找到优质硅的稳定来源。当然人们都希望能获得具有更大禁带宽度的材料,从而制成能在室温下工作的高分辨率探测器。不过很清楚,在今后多年内,低能X射线谱仍将依赖于硅,不仅探测器而且前置放大器的输入级FET(场效应晶体管)仍需在低温(130K)下工作。

今后的工作,主要应在保持目前水平的基础上,更好地搞清楚影响探测器本底的因素,这对改善Si(Li)X射线谱仪的灵敏度是极为重要的。而目前Si(Li)探测器的发展动向,一方面是标准化、系列化,另一方面是进一步研制多探测器阵列型望远镜以及大面积($\phi 75\text{mm}$ 、厚5mm)Si(Li)探测器并构成堆积式,再一方面是研究用于同步加速器辐射光子的Si(Li)位置灵敏探测器。这些均已成为低能X射线高分辨测量和宇宙航天应用中不可缺少的探测器。

(四) 硅(面垒、平面工艺、外延和高阻)探测器

1. 硅面垒探测器

对探测器的整流结而言,表面势垒探测器从开始应用至今已有三十多年了,现在应用较广并实现了系列化(有部分耗尽、全耗尽、 dE/dx 、优质和加固型等系列),它有整个工艺不需要进行高温处理和作为带电粒子探测器用时能量分辨率高(在忽略探测器本身和放大器线路噪声影响时,可计算出硅面垒探测器对5.5MeV α 粒子的本征线宽应小于9keV^[9],实际上最好的实验结果为11.2keV)等优点,但又存在有稳定性差的缺点。所以,为克服此缺点,采用了平面工艺——氧化物钝化保护离子注入(或扩散)工艺制备探测器。但从应用上来说,这种面垒探测器还有它特有的优点,例如探测重离子和低能电子还必须使用金硅面垒探测器,用其它工艺制备的探测器是无法完全替代它的(因为氧化层和离子注入层或扩散层是严重影响重离子和低能电子测量的非常厚的死层,例如10keV的电子只能穿透 $1\mu\text{m}$ 厚的硅层)。

2. 平面工艺——氧化物钝化保护离子注入(或扩散结)硅探测器

这是目前国内外正在开发研究的课题。

为了满足核物理实验和研究的需要,满足应用的需要,为了克服面垒探测器易受环境气氛的影响,采用了晶体管平面工艺(氧化物钝化保护)和离子注入相结合的工艺研制了高分辨

率带电粒子探测器,并取得了很好的结果。这种探测器的反向电流是表面势垒探测器的

$\frac{1}{50} - \frac{1}{100}$ 。在22°C时,对于 ^{241}Am 的5.486MeV α 粒子,能量分辨率为10.0keV^[10]。

3. 外延硅面垒探测器

早期的薄的全耗尽探测器是用研磨和化学腐蚀减薄硅单晶片的厚度来制备的。利用这种工艺制备厚度小于20 μm 的全耗尽硅面垒探测器并不容易。七十年代初开始研究用外延硅单晶片来制备极薄的dE/dx探测器,这是工艺上的一个重要突破。对外延硅片的衬底进行择优腐蚀,可制成厚度为1.5 μm —11.0 μm ,有效面积为10—50mm²的全耗尽探测器^[11-13]。这种探测器的特点是:

- 1) 多重散射小,空间分辨率高。
- 2) 响应时间快;耐辐射。
- 3) 可改进粒子/重离子的鉴别。
- 4) 可提高能量和快定时测量中的信噪比。

另外,用外延生长硅单晶还可制备如下探测器(也是目前研究的重要课题之一.):

- 1) 利用外延生长技术制备阴埋层构成整体化的 ΔE -E探测器。
- 2) 构成多层外延层晶体结构,这对半导体探测器来说可期待有新的功能。
- 3) 利用外延结晶层电阻均匀性好的特点,可制备出位置分辨率为0.2mm的高分辨率位置灵敏探测器。因为外延硅片能大量生产,所以这种位置灵敏探测器很有发展前途。
- 4) 虽然锂漂移硅探测器可制备出耗尽层厚的探测器,但由于其制备工艺复杂、周期长,另外还有锂的移动、析出(沉淀)使特性变坏的问题,所以利用高纯硅制备的厚耗尽层的探测器是七十年代引人注目的一种新型探测器^[14-16]。现在用来制备厚耗尽层(0.5—3mm)的高纯硅有P型和NTD(N型)硅两种,它们除了具有硅(锂)和金硅面垒探测器的全部优点外,还具有它们自己特有的优点。

4. 高阻硅探测器

对高阻P型硅探测器来说,它可构成“异质结”型和“MOS”型结构,在新腐蚀并经过一定表面处理后的P型硅样品表面上淀积一层低阻的锗(介质层)或金属氧化物(如 SnO_2 、 WO_3),就可制备出能承受强电场而且反向电流小的探测器。在77K,漏电流为 10^{-13} — 10^{-14}A ,这么小的漏电流对探测器能量分辨率的影响低于100eV。它的特点是:

- 1) 工艺简单、周期短,不需要锂离子漂移补偿就可获得耗尽层较厚的探测器,而且稳定性好。
- 2) 探测器死层(窗厚度)不变。
- 3) 抗辐射能力强(比金硅面垒探测器大10倍、比硅(锂)探测器大 10^3 倍,在有快中子场合下对质子的抗辐射能力要比其它硅探测器大 10^2 倍)。
- 4) 经77—300K的温度循环,不影响它的性能,且真空性能稳定。
- 5) 可构成N-P-N结构,两面都是无注入的欧姆接触,这对探测器全耗尽使用来说特别有意义。对这样的结构,电压的极性可根据性能的好坏来选取,因此不会因搞错偏压极性而损坏探测器。

这种探测器目前已得到较好的结果。如作为 α 谱仪,对 ^{241}Am 的5.486MeV α 粒子,其半

高宽为14—16keV (室温)；作为转换电子谱仪，对 ^{207}Bi 的976keV内转换电子，其半高宽为1.90keV (77K)；作为X、 γ 射线谱仪，对 ^{55}Fe 的5.9keV X射线，其半高宽为180eV，对 ^{57}Co 的122keV γ 射线，其半高宽为800eV (77K)。

要注意的是，在制备高阻P型硅探测器时，必须进行特殊的表面处理，而制备N型硅探测器时则不需要。另外，同样电阻率，N型硅可制备出比P型硅厚1.7倍的耗尽层。因此，利用中子嬗变掺杂技术使高阻P型硅转变为高阻N型硅成为近两三年来的重要研究课题之一，已摸索出一套消除中子掺杂引起的晶格损伤和保持原始材料少数载流子寿命的退火工艺，取得了很好的结果。用 ρ 为20k Ωcm 的NTD硅制成厚为3mm、面积为150mm²的探测器，对 ^{207}Bi 的976keV内转换电子，在77K、900V偏压下，其半高宽为1.90keV。

另外，利用高纯硅(P型和N型(包括NTD硅))和氧化物钝化光刻工艺(或是面垒工艺加化学刻蚀)便可构成用于高能物理的高分辨率带状阵列探测器。

(五) 化合物半导体探测器

六十年代的后五年解决了锗(锂) γ 射线探测体系，使得这期间的核谱工作有了一个飞跃。但由于锗(锂)探测器需要持续的低温，因而整个锗(锂) γ 射线探测系统体积大而笨重。化合物半导体探测器近年来引起人们很大的兴趣。因为它很有希望成为常温下使用的 γ 射线探测器。所以很多研究工作者都在寻找合适的具有较大原子序数和禁带宽度的化合物半导体材料。但是到目前为止只有GaAs、CdTe、 HgI_2 得到了较好的结果。它们在室温下对 ^{57}Co 的122keV γ 射线的分辨率可达4%^[17-20]。特别是 HgI_2 最近有较大的进展，对 ^{60}Co 的1.33MeV γ 射线的分辨率已达1.7%^[21]；此外，对低能X射线也有较好的分辨率，如对5.9keV X射线的分辨率，用漏反馈前置放大器，分辨率达310eV，用脉冲光反馈前置放大器，分辨率为295eV^[22]；若将 HgI_2 探测器冷却到0°C，将脉冲光反馈前置放大器冷却到170K，则能量分辨率已达200eV^[22]。

化合物半导体探测器除上述用于X、 γ 射线的探测取得了一定的成绩外，还可用于高温环境下测量带电粒子。例如，外延GaAs探测器，对 ^{241}Am 的5.486MeV α 射线，在室温下半高宽为16keV，而温度高至120°C时仍能得到较好的能量分辨率，其半高宽为40keV。

另一种在室温下对高能光子的探测有很大潜力的半导体材料是碲化铝^[23]。

(六) 金刚石探测器

它虽然是第一个用作核辐射探测器的材料，但在1958年就被淘汰了。随着科学技术的发展，工艺水平的提高，用金刚石探测器来探测带电粒子最近又引起人们的注意。由于它有较大的禁带宽度、高的电阻率，并具有低噪声和可在500°C高温下工作的优点，而且耐腐蚀和抗辐射(快中子注量可达 10^{14}cm^{-2} 而不引起性能恶化)，其耐辐射能力比硅大100倍，所以在一些特殊条件下如空间探索方面的应用很令人感兴趣。它对 ^{207}Bi 482keV内转换电子的能量分辨率为8.5keV^[24]，但是由于它体积小，价格较贵，目前还未得到广泛应用。

(七) 特殊类型的半导体探测器

虽然都是致电离辐射在半导体探测器耗尽层离子化产生电子-空穴对，但特殊类型探测器的工作原理有其自己的特点，而且能提供一般探测器所不具备的性能。近几年来，位置灵敏探测器、雪崩倍增探测器以及核试验中专用的P-I-N电流型探测器、MOS-C探测器等探测元件均有不同程度的发展。其中以电荷分配为基础的位置灵敏探测器和具有内放大的雪崩倍增探测器较为突出。位置灵敏探测器取得了较好的结果并得到了广泛的应用，对5MeV α

粒子, 位置分辨率和能量分辨率分别为0.12mm和1%。具有内放大的雪崩倍增探测器在性能和应用上有了新的进展, 除用作计数外, 已有可能成为良好的室温X射线探测器, 对5.9keV X射线, 已得到的能量分辨率为600eV^[25]。

随着高纯硅单晶质量的提高, 用高纯硅研制微条带状阵列结构的探测器, 成为特殊类型探测器中的新品种, 它将在高能物理和需要高位置分辨率的应用领域内作出贡献。

参 考 文 献

- [1] D.W. Davies et al., *Nucl. phys.*, **63**, 161 (1965) .
- [2] K.W. Renner, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-25**, 62 (1978) .
- [3] ORTEC, HP-Ge X-Y ray detector, *phys. Today*, **31**, 4 (1978) .
- [4] F.S. Goulding et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **71**, 273 (1969) .
- [5] F.S. Goulding et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-17** (1) , 218(1970).
- [6] D.A. Landis et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-18** (1) , 115 (1971)
- [7] E. Elad, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-19** (1) , 403 (1972) .
- [8] R. Jenkins, *X-Ray Spectrom.*, **6** (2) , 104 (1977) .
- [9] D. Engerlken *Nucl. Instrum. Methods*, **48**, 335 (1967) .
- [10] J. Kemmer, *Nucl. Instr. Methods*, **169**, 499 (1980) .
- [11] J.P. Ponpon et al., *Nucl. Instr. Methods*, **112**, 465 (1973) .
- [12] C.J. Maggiore et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-24**(1) , 104(1977).
- [13] C.R. Grahn, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-24** (1) , 93 (1977) .
- [14] V.V. Avdeichiko et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **133**, 579 (1976) .
- [15] V.V. Avdeichiko, *Nucl. Instr. Methods*, **138**, 381 (1976) .
- [16] V.V. Avdeichiko, *Nucl. Instr. Methods*, **155**, 125 (1978) .
- [17] G.A. Armantrout et al. , *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-24**(1), 121(1977).
- [18] R.D. Bell et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-19** (3) , 334 (1972) .
- [19] J.P. Ponpon et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-22** (1) , 182 (1975) .
- [20] J.E. Eberhart et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **94**, 463 (1971) .
- [21] L. Van den Berg et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-25**(1), 395(1978) .
- [22] A.J. Dabrowski et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **213**, 89 (1983) .
- [23] J.H. Yee et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-24**(4), 1962 (1977) .
- [24] S.F. Kozlov et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-22**(1), 160 (1975) .
- [25] P.P. Webb et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-23**(1), 138 (1976) .

第二章 半导体探测器的工作原理、结构、类型、制备工艺和对材料的要求

§ 2-1 半导体探测器的工作原理、结构和类型

2-1-1 一般工作原理和结构

一、一般工作原理

用于射线测量的探测器有一个共同的工作原理，就是射线被探测器阻止而损耗能量，并由这部分能量来产生信号。

半导体探测器是一种反向偏置的P-N结二极管。它实质上是一个固体电离室，工作原理与气体电离室的相似，不同的是用半导体如硅、锗取代了通常气体探测器中的气体。在气体电离室中射线使气体电离形成可移动的电子和离子（产生一个可移动的电荷需要30eV的能量）。

在反向偏压下，半导体P-N结形成一个具有一定厚度的耗尽区，当射线入射到耗尽区时，射线和物质相互作用，产生电子-空穴对。产生一电子-空穴对所需要的能量，在硅中为3.60eV，在锗中为2.95eV。电子与空穴在耗尽区电场作用下，分别向两电极运动而被收集从而产生脉冲信号，其原理图见图2-1。射线产生的电压脉冲 u 正比于入射射线在耗尽区中所损耗的能量，即

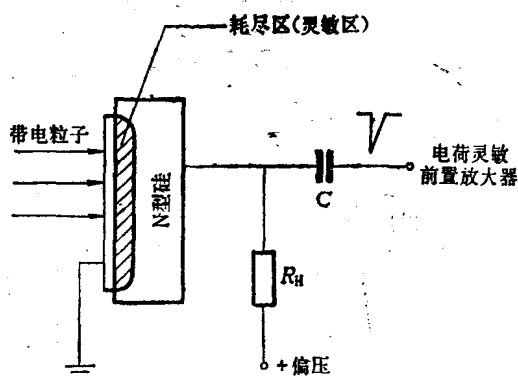


图2-1 半导体探测器的工作原理图

$$u = \frac{Eq}{\epsilon C} = \frac{Q}{C} \quad (2-1)$$

式中： E 是入射射线的能量； q 是电子电荷； ϵ 是产生一电子-空穴对所需要的平均能量； Q 是入射射线在耗尽层中产生的总的电离电荷； C 是探测器的结电容 C_d 和杂散电容 C_s 的和。

探测器输出的电压幅度与电容有关，平面型探测器的结电容 C_d 为

$$C_d = \frac{\epsilon S}{4\pi W} = \frac{\sqrt{\epsilon} S}{(2\mu_n \rho_n u)^{1/2}} \quad (\text{以金硅面垒探测器为例，其它不同类型的})$$

的探测器的电容表示式见 § 3-1-2)

式中： ϵ 是半导体材料的介电常数； ρ_n 是N型半导体的电阻率； u 是反向工作电压。由此可见，材料电阻率愈高，反向工作电压愈大，面积 S 愈小，则 C_d 愈小；反之则 C_d 愈大。通常情况下，对一特定的探测器， ρ 和 S 是固定的，改变外加反向工作电压， C_d 则跟着改变。由(2-1)式知，探测器输出脉冲幅度 u 等于 Q/C_d （为了简单，暂不考虑杂散电容的影响）。 C_d 的变化，导致 u 的改变，这对实际测量来说，是不希望有的。所以，对半导体探测器的输出脉冲，要采用电荷灵敏前置放大器来放大，其等效电路见图2-2。电荷灵敏前置放大器的原理图见图2-3。

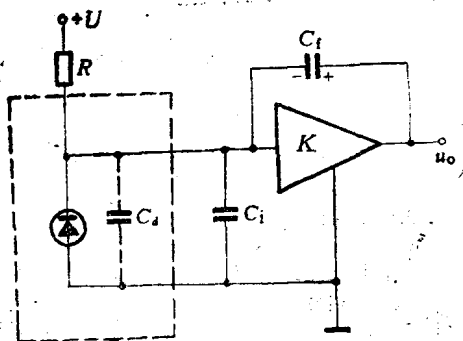


图2-2 探测器和电荷灵敏前置放大器连接的等效电路

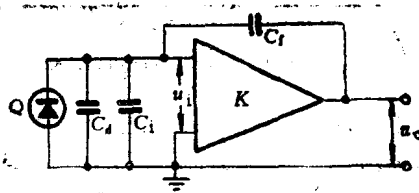


图2-3 电荷灵敏前置放大器的原理图

C_f 为放大器的反馈电容； K 为输出和输入极性相反的开环电压放大倍数； Q 为半导体探测器的

输出电荷； C_d 为探测器的电容； C_i 为放大器的输入电容（不包括 C_f 的影响）与分布电容之和。

由图可见， C_f 两端电压幅度 $u_f = u_i - u_o = (1+K)u_i$ ， C_f 上的总电荷量 $Q_f = C_f u_f = (1+K)C_f u_i$ 。由此可见，就 C_f 对放大器输入端的影响来说，与输入端并接一个电容 $(1+K)C_f$ 的效果相同。开环放大倍数越大，动态输入电容也越大。由于 C_f 的作用，放大器输入端的总电容为

$$C_{\Sigma} = C_d + C_i + (1+K) C_f$$

这时前置放大器输入电压为

$$u_i = \frac{Q}{C_d + C_i + (1+K) C_f}$$

如果 $K \gg 1$, 且 $(1+K) C_f \gg (C_d + C_i)$, 则

$$u_i = \frac{Q}{C_f (1+K)} \approx \frac{Q}{C_i K} \quad (2-2)$$

(2-2) 式表明, 当满足上述条件时, 放大器的输入电压 u_i 是探测器收集电荷 Q 的线性函数, 且基本上与探测器电容 C_d 的变化无关。这一点正是实际测量所希望的。

二、半导体探测器的一般结构

半导体探测器的种类繁多, 但其中多数都可以看成是一个加反向偏压的P-N结二极管。更具体地说, 它是由P-N结的两个电极(整流接触电极、欧姆接触电极)和P-N结的耗尽区构成的, 不同的探测器, 结构上各有差异。

(一) 金硅面垒探测器的结构

金硅面垒探测器的结构示意图见图2-4。

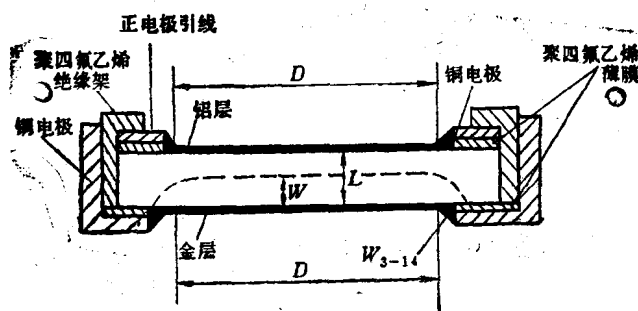


图2-4 金硅面垒探测器的结构示意图

D 是探测器灵敏面积的有效直径 (cm); W 是灵敏区 (耗尽层) 的厚度 (mm);
 L 是硅片的总厚度 (mm)。

(二) 硅锂漂移探测器的几种结构

硅锂漂移探测器的结构通常分为五种^[1-4], 见图2-5。

图2-5a是顶帽型^[1-2]结构, 它的特点是, 能耐高的反向偏压, 漏电流小。这两个条件是制备高分辨率X射线谱仪所希望具有的。

图2-5b是倒T型^[1,3]结构, 它与顶帽型结构有相同的优点, 在Kevex型X射线体系中使用。