

# 核探测器与核电子学

科学技术文献出版社重庆分社

## 核 探 测 器 与 核 电 子 学

|                  |   |   |
|------------------|---|---|
| 中国科学技术情报研究所重庆分所  | 编 | 辑 |
| 科学技术文献出版社重庆分社    | 出 | 版 |
| 重庆市市中区胜利路91号     |   |   |
| 四川省新华书店重庆发行所     | 发 | 行 |
| 科学技术文献出版社重庆分社印刷厂 | 印 | 刷 |

开本：787×1092毫米1/16

印张：15 字数：38万

1980年5月第一版

1980年5月第一次印刷

科技新书目：161—120

印数：1700

书号：15176.418

定价：1.55 元

# 目 录

## 探 测 器 部 分

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| 半导体探测器介绍                | ( 1 )  |
| 通用半导体材料的新进展             | ( 6 )  |
| 半导体探测器的制备工艺             | ( 11 ) |
| 探测器的应用                  | ( 18 ) |
| 外延硅半导体探测器的发展和前景         | ( 24 ) |
| 制造外延硅探测器的晶体生长和化学择优腐蚀    | ( 33 ) |
| 无定形锗作为高纯锗探测器的电子或空穴的阻塞接触 | ( 38 ) |
| 高纯锗核辐射探测器的离子注入 N 型接触    | ( 42 ) |
| n 型高纯锗同轴探测器             | ( 46 ) |
| 高分辨高纯锗探测器中能带电粒子谱仪       | ( 52 ) |

※ ※ ※

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| 重离子探测器                        | ( 56 ) |
| 适于轻重粒子的快的二维位置灵敏平行板雪崩计数器(PPAC) | ( 84 ) |

※ ※ ※

|                        |         |
|------------------------|---------|
| 高能物理仪器设备的新要求           | ( 89 )  |
| 探测技术的一些发展与应用           | ( 91 )  |
| 多丝正比室述评                | ( 98 )  |
| 漂移室及其新发展               | ( 105 ) |
| 用在高速率情况下的漂移室系统         | ( 123 ) |
| CRISIS 探测器             | ( 128 ) |
| 适用于交叉储存环实验的一个大型液氩簇射探测器 | ( 135 ) |

## 电 子 学 部 分

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| 固体探测器在能量测量中的一些电子学问题       | ( 150 ) |
| 使用脉冲漏反馈的 x 射线前置放大器        | ( 155 ) |
| 脉冲反馈前置放大器中的能量相关损失         | ( 159 ) |
| 适用于 x 射线荧光分析的探测器及电子学的若干方面 | ( 163 ) |

※ ※ ※

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| Le Croy 公司简介            | ( 172 ) |
| Le Croy 快脉冲仪器应用指南       | ( 174 ) |
| 用于液氩量热器的高计数率的放大器—数字读出系统 | ( 190 ) |

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 一种新的可编程序的高速触发逻辑·····                | (195) |
| 用于高能粒子物理实验的可编程序组合逻辑触发系统·····        | (202) |
| 供时间投影室用的原型CCD系统·····                | (206) |
| “快总线”——高能物理用标准高速数据获取总线的研制现状·····    | (215) |
| 用于脉冲波谱学的横向滤波器·····                  | (220) |
| 向着微微秒分辨率努力——微通道板电子倍增器对真空管设计的贡献····· | (231) |

# 半导体探测器介绍

F. S. Goulding

## 一. 历史

尽管贝尔电话实验室的Mckay多年前就表明用半导体二极管来探测 $\alpha$ 粒子,但半导体探测器真正出现在核物理学科中还是在1960年前后。早期的工作(恰好在1960年前)是集中在相对薄的锗表面势垒探测器上,用它来探测射程短的粒子。为降低这些探测器的漏电流,它要在低温下使用。证明半导体探测器的能量分辨比早期使用的气体电离室要好得多。而且固体具有在非常短的距离内阻止粒子的能力以及固体器件的致密的性质认为用它构成小而结实的探测器。

早期的工作注意力很快就移到硅探测器上,主要原因是它的禁带宽度比锗的要宽,提供了在室温有好的性能的希望。硅表面势垒探测器和稍后些的扩散结探测器它们都可在室温下使用,因此成为在核谱中使用的第一类半导体探测器,结果作为短射程粒子的探测器很快地得到了人们的重视。此时必须说一些有关这些探测器的局限性,细节多半在后面适当的地方补上。

核谱学主要是研究原子核中的核能级,并且研究这些能级的最有利的工具是观测在允许能级之间发生跃迁时发射的辐射。一般说来,这种辐射是 $\gamma$ 射线的形式,很清楚在这一研究中最强有力的工具是探测 $\gamma$ 射线的探测器。正是这个原因,NaI闪烁体成为重要的探测器。但因它们的能量分辨较差,不能分开能量靠得较近的能级,这是对它应用的主要限制。用于探测 $\gamma$ 射线,硅是非常差的材料,因为 $\gamma$ 射线效率近似与 $Z^5$ 成正比( $Z$ 是

吸收体的原子序数),而硅的 $Z$ 只有14。锗是比较好的材料( $Z=28$ ),但实现它的可能性之前是有一个过程的。

这些早期的探测器的第二个主要的限制(即使现在限制少些,但仍有一定的局限性)是探测器灵敏区太薄,使它们只能限于用来探测射程短的粒子。当然薄的灵敏区也限制了对 $\gamma$ 射线的探测效率,但在早期的这些工作中,仅仅认真考虑了带电粒子的探测。在本介绍的第二部分里我要比较详细的论述探测器的物理。暂且应该注意两点:

(i)在探测器中只有存在电场的区域才能有完好的电荷收集,在无场区只发生电荷的扩散,但很慢,而且这扩散效应通常是不希望的。在结或表面势垒(有时叫肖特基势垒)探测器中,耗尽层这个意思就是探测器的灵敏区。

(ii)在半导体二极管中,耗尽层厚度与 $\sqrt{V/N}$ 或 $\sqrt{\rho V}$ 成正比。这里 $V$ 是工作电压, $N$ 是半导体中起主要作用的杂质浓度, $\rho$ 是半导体材料的电阻率。因而就从电阻率为2000欧姆厘米的P型硅所做的探测器来说(这P型硅为商业上的标准硅,是很纯的),加上200伏工作电压得到的耗尽层厚度仅为200微米(0.2毫米)。这只能阻止15MeV的 $\alpha$ 粒子或4 MeV的质子,因此使用这样的探测器即使是做粒子实验仍受到很大的限制。

幸好,这一局限性被通用电气公司的Pell的工作很快克服了(与总的目的无关),他证明了间隙施主锂在适当的温度和电场作用下会漂移而补偿P型硅、锗中的受主杂质。这一工作很快被利用在半导体探测器上用来制备灵敏区厚度达几毫米的锂漂移探测

器。到1961年,这样的探测器在带电粒子实验中已成为主要的能谱学工具。

显然,第二个主要阶段因为它需要大量的液氮故不能为我们这领域的大部分工作所接受而延缓了。很明显,锗锂漂移探测器可提供高分辨 $\gamma$ 射线的探测(尽管与NaI闪烁探测器相比效率很低)。同样,显然由于锗的禁带宽度较窄因此需要在低温下工作。所以锗锂漂移 $\gamma$ 射线探测器的出现需要一些时间(1964年),但当它们制备出来时很快就被人们应用上了,而且在六十年代中后期的核谱学兴旺时期中它们必须被看做主要的工具。

在1965年开始研究半导体探测器的第一个非核应用。低噪声场效应晶体管的具备和在低温下的硅探测器一起使用,得到了足以能分开大多数元素的特征 $Kx$ 射线的能量分辨。它使能量色散 $x$ 射线荧光领域可能得到发展,并导致大量的商业应用,激励着核范围以外的许多领域的研究。

我想论述探测器最后的发展,即高纯锗的研制,它不需要进行锂漂移就可能做厚的锗探测器。这工作是在1970年初由通用电气公司的R.N.Hall开始的,现在已取得了很大的成绩。它的贡献解决了锗锂漂移探测器由于锂在室温时的大的迁移、造成处理和加工的困难以及构成多探测器系统的麻烦。高纯锗避免了这些问题,因此可容易地构成探测器排列和多个探测器望远镜。此外一些储备引起表面污染,高纯锗探测器可在需要时冷却而贮存时可回暖到室温。不过由于可能会发生表面污染,所以使用时必须注意。在原来位置上进行辐照损伤退火的可能性,在某些长射程粒子望远镜应用中是一个关键因素。

在这一简短的评述中,我没有论述硅、锗以外的其它材料。本课程\*部分内容将涉及这个课题,但是这些材料目前所起作用的范

围很小,而且对任何一种起主要作用的效果并不良好。

在结束这一历史的回顾前,我应该提醒你们注意,在最近几年探测器用于核研究方面已不是主要的了。一是因为 $x$ 射线荧光分析,环境测量工作和空间应用变得更为重要,另一个是因为在核物理方面的兴趣发生了实际变化。现在核物理方面的兴趣已集中到重离子物理,而重离子的特性又导致气体电离探测器的复兴。因此,虽然半导体探测器在它的特殊优点是重要的地方仍然使用着,但它们已不象1965—1975这十年那样在核科学中占主要地位了。

## 二、探测器物理

对半导体探测器简单的理解可把它们看成与气体电离室相类似。象这样的简要评论中,假定这样简单的处理是使人信服的。不过要真实的介绍,讲详细一点是必要的。

首先要了解的是在半导体中(或所有的固体中)释放电子(包括在它附近的空穴)所需要的能量比在气体中释放电子所需要的能量要小得多。例如在锗中产生一空穴-电子对所需要的平均能量仅为 $3eV$ ,在硅中约 $3.7eV$ ,而在气体中约为 $30eV$ 。相对地说,在固体中容易产生自由的电子-空穴,这些电子-空穴是由靠得很近的原子产生的,而这些原子刚好在导带下面的能级上存在着许多电子。在气体中,实际上原子是孤立的,相对地说电子键合得比较紧密。重要的结果是从入射辐射吸收给定的能量所产生的自由电荷在固体中要比气体中多,因此统计涨落只是总释放电荷的一小部分。这就是半导体探测器比气体探测器能得到较好能量分辨的一个基本理由。至少对较高的能量是如此。在低能下,信号比电子学噪声大10倍,而噪声在电子学前置放大器中与信号相比放大率是

\* 指刊登在IEEE Trans.Nucl. Sci., 1978, 25,2上的半导体器件课程的五篇文章[译注]

比较小的。

其次必须搞清楚的是半导体结的重要性。如果我们将电阻率为2000欧姆·厘米、厚1毫米、面积为1平方厘米的硅片，在其两个相对面上做上欧姆接触，我们很容易得到一个200欧姆的电阻。要是在这个电阻上加100伏电压，则一定会产生0.5安的电。射线入射到这电阻上便产生自由的空穴和电子，由这些自由空穴和电子产生的电流所引起电流的变化与通过这电阻的稳定大电流相比是很微小的。这与漏电流很微小的气体电离室形成一鲜明的对照。半导体结提供了克服这一问题的途径。

在所有的半导体物理和电子学的课程中都讨论了半导体结，但在半导体探测器和材料上重点有所不同，在某些方面是比较简单。在固定温度下对给定的半导体，结的作用与下列事实有关，即质量作用定律迫使电子、空穴浓度的乘积是一常数。因此对重掺杂施主的材料，不但增加自由电子的浓度而且降低空穴的浓度，以满足 $n \cdot p$ 的乘积仅依赖于半导体材料必须具有的值。例如在室温的硅， $n \cdot p \approx 10^{20}$ ，因此对施主浓度为 $10^{18}$ 的重掺杂区它所含有空穴浓度应该是 $10^2$ 。

在半导体中结的性能图解见图1。图示出在轻掺杂p层的顶部有一重掺杂的n层。不加偏压时见图1(A)，有少量的自由电子扩散穿过结进入p区，而空穴扩散进入n区产生电荷偶极层见图1(B)。这一电荷分布结果形成如图1(B)所示的电势分布。因此在平衡时产生了自调整的势垒。现在在结上加上反向偏压(就是n侧接正见图1(C))，其作用在p侧是驱使自由空穴离开结，在n侧是驱使电子离开结。在晶格位置上留下固定的离子，施主用(+)表示，受主用(-)表示，因此产生一电荷分布及由此形成的电场和电势的分布见图1(D)。产生一没有空穴或电子的区域(取一级近似)，这就是大家所熟知的耗尽

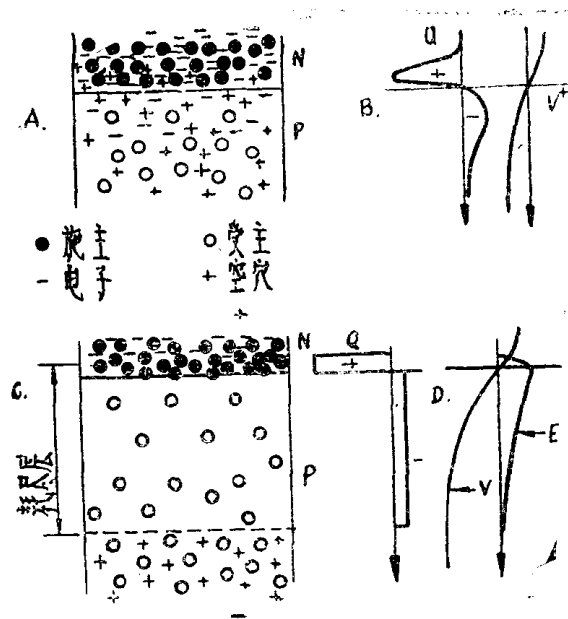


图1 A. 平衡的结  
B. 电荷和电势分布图  
C. 反向偏压  
D. 电荷, 电场(E)电势分布图

层。但是，在这区域中存在电场，由射线产生的电子-空穴对被收集而外电路中产生一电流，这就是半导体探测器的基础。当然由热过程产生的任一电子-空穴对也是被收集的，这就是体漏电流的起源。

重要的是这漏电流不再是未经加工处理的半导体片的漏电流了。代替它的几乎完全是在耗尽层中由热产生载流子所引起的小电流(在实际器件中虽然表面效应通常是主要的)。这一结果的简单解释是上电极接触实际上不含有被电场往下推的空穴，而下电极接触几乎不含有被向上拉的电子，因此结掺杂几乎消除了反偏压方向的漏电流。

对全耗尽探测器应该多说几句，就是说这探测器的耗尽层耗尽了探测器材料的整个厚度并贯穿到背面接触。这样的探测器常常是被用来作为 $\Delta E$ 探测器(就是说，探测器厚度仅是粒子射程的一小部分)而有时作为能量探测器(例如锂漂移或高纯探测器)。它们的厚度范围从几微米(硅 $\Delta E$ 探测器)到15毫米(在粒子望远镜中使用的锗探测器)。从

• 原文误为 $10^{10}$  (译注)

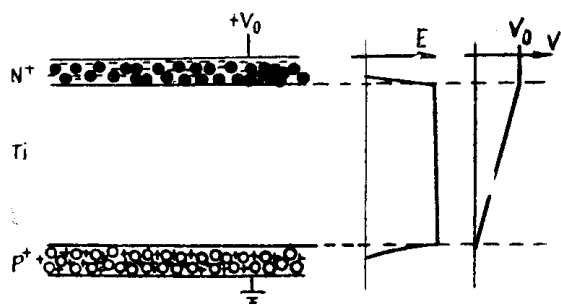
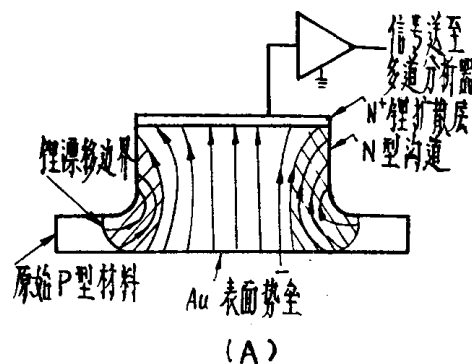


图2 全耗尽探测器

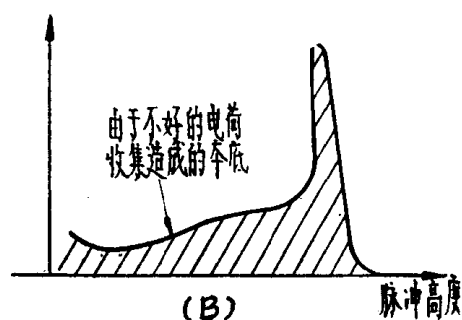
先前章节的论述中，很明显  $\Delta E$  或全耗尽探测器必须由把相对地轻掺杂的体材料夹在中间的两个相反的重掺杂接触来组成，见图2。这种探测器有时称为p-i-n探测器，而接触是叫做阻塞效应接触。每一个接触的类型必须是体电场驱使多数载流子离开体材料而进入接触区，这样  $n^+$  接触接正偏压， $p^+$  接触接负偏压。

在这一简单的介绍中，我可以再说几句有关表面问题的论题，探测器制造者经过数年在这个问题上花费了不少时间。众所周知，在表面晶格突然终止，表面的电性能可能是决定器件漏电流的主要原因，但其他一些作用还不十分清楚。取决于污染的情况，表面的行为可以象轻掺杂的  $n$  或  $p$  型沟道。轻掺杂时，作用象非常坏的伸到体内的结。因此在许多二极管中它们是造成坏的漏电流特性的原因。而且它们还会使体材料内部电场发生畸变。图3(A)是说明在  $x$  射线谱中由于表面效应引起本底计数的一个例子。这里在探测器侧面上的  $n$  型沟道，其作用象  $n^+$  锂接触的延伸，电场的畸变结果使由  $x$  射线在阴影区中产生的电荷在表面部分被收集，并在那里缓慢的耦合到外电路。由此产生的部分脉冲在谱的  $x$  射线峰下造成一更平坦的本底见图3(B)。

在一些  $x$  射线探测器中本底可占总计数的40%。在锗  $\gamma$  射线探测器中也出现类似的效应，即表面沟道会引起效率的损失以及表面条件随时间的变化引起效率的漂移。如果带电粒子从探测器的侧面进入，表面沟道也



(A)



(B)

图3 表面沟道效应  
A. 探测器的内电场 B. 对本底的影响

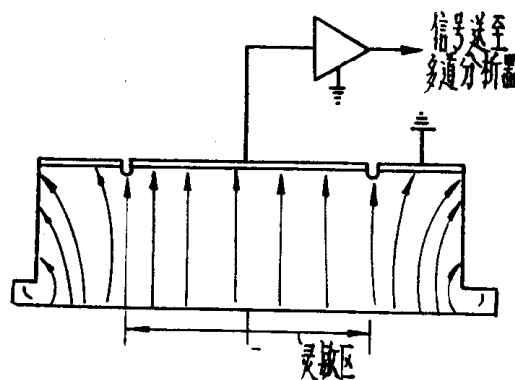


图4 带保护环结构的探测器

构成一未知的而且是可变的死层，因此使用这种工作方式时必须十分小心。

顺便说几句，在低本底  $x$  射线系统中为了解决本底问题，我们使用了如图4所示的保护环结构。这时产生外部信号的灵敏区边界被体内的电场线所限定，因此避免了表面的影响。

最后说一说同轴探测器。为了做成暴露面较小，载流子收集距离合理地短的大体积探测器，同轴几何结构是一种非常方便的技术。因此，这一几何结构在  $\gamma$  射线探测器方

面占主导地位。对于锂漂移探测器，原始材料是p型，在外表面形成锂扩散层后实现漂移。当原来的p型材料剩下小的p芯时便停止漂移，p芯的作用象是一个电学接触，而外面的锂扩散层是另一个电学接触。在最后的探测器中这芯对慢脉冲有贡献，在某些实验条件下（例如非常高的计数率）是会有影响的。不可避免地，必须制备高纯锗同轴探测器，首先除去p芯材料，然后在内表面和外表面做上接触。因此在最后构成的探测器中不存在死材料的p芯，所以不会发生慢脉冲。此外，我们有可能自由地选择内表面是 $n^+$ 接触还是 $p^+$ 接触，这证明是有用的，因为辐照损伤往往引起空穴俘获，当电子是由中心接触电极收集时（也就是 $n^+$ 中心接触），这种俘获就少多了。为避免在这接触附近有非常高的电场，应优先选用n型材料。因此从辐照损伤这一观点来看，理想的高纯锗同轴探测器应与锂漂移同轴锗探测器相反，即用n型材料制成而 $n^+$ 接触是做在内表面。不过，特别要说的是现在市场上能买到的高纯锗同轴探测器不是按这方法做的。

### 三、对材料的要求

半导体探测器对材料提出了非常严格的要求。下面较详细的说明材料的性质和存在的问题，因为这在探测器制备中是一个重要因素。这里我想对材料所必须具备的特性作一简要的叙述，强调对材料要求的严格性。

我们对强调的问题作一粗略的比较。硅和锗晶体最初的研制是用于晶体管的，其大多数的研制工作是在四十年代末期开始直到1960年。现代晶体管的有效线度是20微米，所以有效体积是 $10^{-8}$ 厘米<sup>3</sup>。即使是大规模集成电路（LSI），含有上千个有源元件所采用材料的实际体积也只有 $\sim 10^{-5}$ 厘米<sup>3</sup>。材料中的缺陷如不命中有源元件就不会影响这电路的性能。另一方面，半导体探测器的体积可大至100厘米<sup>3</sup>，要比大规模集成电路大 $10^7$

倍，而在这体积内的任何缺陷对探测器的应用都可是灾难性的。而且，在探测器中要求在2厘米的距离上载流子达到几乎完全收集，而晶体管的基区厚度只有几微米（两者之比达 $10^4$ ）。与用于一般电子器件的材料相比，这些条件对材料性质的要求（即晶体完整性，纯度、均匀性）是非常严格的。

较敏感的问题也是重要的。例如，在锗中只要含有极微量的氧，进行锂漂移时由于氧的存在而阻止着漂移。即使不要用锂漂移（如高纯探测器）氧也是不能容许的，因为它引起严重的载流子俘获。我们也知道，无位错晶体也不能用来制备探测器。我们认为这是由于在这样的材料中存在着大量的双空位，而这双空位是陷阱中心。因此用于锗探测器的晶体生长必须含有均匀而适量的位错以使空位下沉。现在变得明显的是，锗中所含的氢（因为实际上所有高纯锗是在纯氢气氛中生长的）对锗的性能起着重要的作用。而氢在锗中的作用还没有完全搞清，这是目前要积极研究的问题。

鉴于这些熟知特性和比较简单的材料（如锗、硅）中有这些敏感的效应，那末更复杂的Ⅲ-V族和Ⅲ-VI族化合物半导体尚有许多困难的问题是不足为奇的了。确实，从这几种材料（如GaAs、HgI<sub>2</sub>、CdTe）已做成探测器（尽管不是好的谱仪）也许是令人惊奇的。实际上所有这些情况，由于存在着对一种载流子的严重俘获，因此完全限制了探测器的使用。

对材料的最后评论上必须考虑高纯锗，高纯锗是极难得到的最纯的材料，电活性杂质浓度为 $10^{10}$ /厘米<sup>3</sup>（ $10^{13}$ 分之一）。尽管如此，材料的电学性能和探测器的性能完全受这些微量杂质浓度（两种电活性杂质或其他杂质，如引起俘获的氧）所控制。

### 四、信号处理

探测器的发展伴随着低噪声电子学和信

# 通用半导体材料的新进展

E. E. Haller

## 引言

半导体晶体用于制备核辐射探测器已有30多年了。从早期的p-n扩散结的窄耗尽层起,我们已经做出了大体积的高纯锗探测器。对半导体材料、方法的研究和发展曾作了巨大的努力,才达到现在的结果。在这篇讲稿里,不可能对这众多的贡献、发明和发现都给予回顾。读者可以参考 Dearnaley和Northrop<sup>[1]</sup>、Bertolini和Coche<sup>[2]</sup>的书,这些书生动地叙述了10年前所做的工作。

当时, Hall在通用电器公司作过这样的预言<sup>[3]</sup>:只要锗晶体的纯度足够高,那么在大体积辐射探测器的制备过程中,完全可以省去锂漂移这一工艺。今天,我们仍然十分重视Hall的这一有益的判断。现在,高纯锗探测器已是市售商品。这篇讲稿的大部分篇幅将讨论用超纯锗最近所得到的令人兴奋的结果。

用于做探测器的硅材料,和迅速发展的锗材料不同,缺少纯化和晶体生长这方面的经验。这种情况部分地是由于在硅的处理过程中遇到更大的困难。另一方面,也因为商

业部门方面对此兴趣有限。所以,要得到探测器级的硅材料常常是相当困难的。

不想在硅的问题上花费时间,我力求概括一下下述三方面的最近研究成果:固相外延,离子注入和非晶层的再生长。这些新结果中有许多已经用于探测器的制备。

由于时间和篇幅有限,我只能认为,半导体的基本物理概念已为大家所熟知。

## 新技术

### 1) 固相外延 (SPE)

加利福尼亚工学院的Mayer组已从事固相外延工作数年<sup>[4,5]</sup>。他们指出:在温度远低于共熔点时,与锗或硅单晶相接触的金属,能使百分之几的锗或硅溶解。在冷却过程中,依赖于温度、冷却速率等因素,被溶解的硅或锗在半导体衬底上外延再生长,迁移到其它的金属表面并(或)发生沉淀(图1和图2)。再生长层中所含金属原子的量由其溶解度而定。固相外延可用于获得薄掺杂层。铝-锗系已经成功地应用于高纯锗探测器的制备中<sup>[6]</sup>。为了用固相外延技术获得均匀再生长层,十分重要的条件是:在金属和

号处理技术的发展。这些发展在探测器的应用上起了很大的作用。在本课程末,我们要对探测器体系的电子学部分给予简要的评论\*。目前,我要强调正确的电子学类型是好的探测系统的一个重要组成部分,正如许多物理工作者认为的这样的电子学设计是可以

理解的。这是容易搞懂的问题,而对一个聪明的探测器使用者来说,应该熟悉信号处理系统的显著的特性。

[张秀凤译自IEEE Trans. Nucl. Sci., 1978, 25, 2, 916-920, 丁洪林校]

\* 见“固体探测器在能量测量中的一些电子学问题”一文[译注]

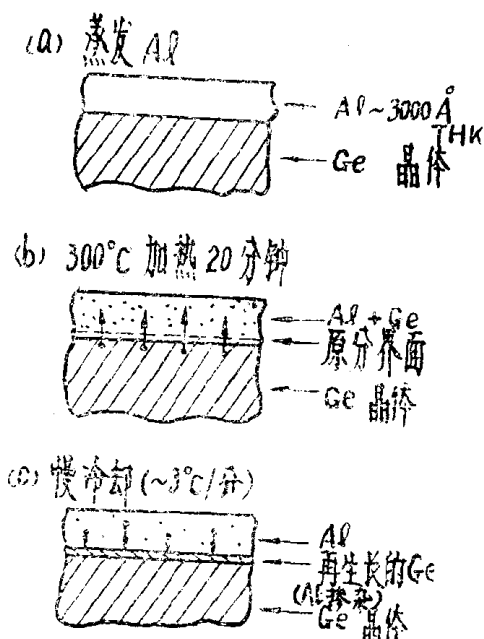


图1: 从锗晶体上的 3000 Å 厚的铝膜中固相外延再生长的示意图。300°C 时, 锗扩散进入铝, 一直达到其在铝中的溶解度极限。慢冷却时, 锗在锗衬底上外延再生长。(引自参考文献16)。

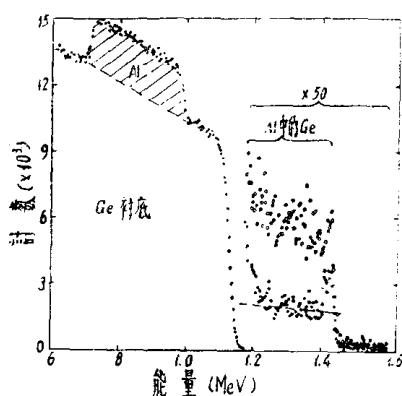


图2: 1.8 MeV He<sup>+</sup> 在 Ge + 6400 Å Al 样品上的背散射谱。低于 1.2 MeV 的谱与热处理无关。空圆点: 350°C 下处理15分钟后。实圆点: 250°C 接着再处理1小时后。为了比较, 虚线表明仅仅经250°C 处理后, Ge在相同样品中的浓度。

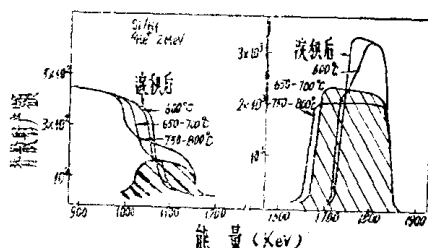


图3: 2 MeV He<sup>+</sup> 在不同的温度加热后的 Hf—Si 器件上的背散射谱, 说明生成了 HfSi 和 HfSi<sub>2</sub> 化合物。(引自参考文献26)。

半导体的界面上, 必须不存在任何氧化物或可能的沾污。

## 2) 硅化物和锗化物

如果有大量的半导体材料溶解在金属层内 (多于30%), 就称为硅化物<sup>[7, 8]</sup> 或锗化物<sup>[9]</sup>。

图3表明, 这样的化合物具有金属的特性以及形成肖特基势垒。它和用蒸发或其它淀积方法所做的肖特基势垒接触相比, 有着显著的优点: 即半导体和金属间紧密接触, 不存在任何界面层。这种肖特基势垒器件的物理性质已被很好地了解, 它与界面上有害的氧化物和离子无关。硅化物和锗化物都是在很低的温度下形成的 (例如在 200°C 下生成 Pd<sub>2</sub>Si)。它们已商业应用于功率整流器和快二极管。关于用钼、铂的硅化物以及钼锗化物制备探测器, 我们已经有了一些经验。这样的探测器具有强度高、稳定性好等明显的优点。由于金属-半导体化合物产生死层, 继而又出现死层均匀性的问题。我们观察到, 人们可以得到非常不均匀的窗, 它在很小的范围上变化非常大, 我们认为, 这是由极少量的指状的硅化物或锗化物所引起的, 这些硅化物或锗化物比较深地伸进了半导体体内。我们确信, 只要精心地选择晶体取向和温度等参数, 此现象就能避免。

## 3) 离子注入和非晶层的退火

在半导体器件的生产方面已经广泛地应用了离子注入, 但是在核探测器制备中, 至今还很少应用这项技术。离子注入设备昂贵可能是一个原因。另外, 很显然, 也是由于离子注入的早期工作结果还不足以吸引探测器制造者。尽管精心地进行退火, 然而高能离子与半导体单晶碰撞所产生的损伤, 看来不可能全部除去。

锗材料的离子注入历史, 是特别有趣和典型的。Herzer、Kalbitzer<sup>[10]</sup> 和 Ponpon 等人<sup>[11]</sup> 以前所做的工作证实了: 注入的硼离子已经具有电活性。所以在 200°C 左右稍微退火, 就足以激活几乎 100% 的离子。另一

方面,磷离子注入不容易生成坚固的掺杂层,它所产生的损伤也不能通过退火完全去掉,而且只有百分比很少的离子才成为替位施主。上述这些作为长期以来的最终结果而被接受。仅仅在努力寻求解决高纯锗探测器的薄 $n^+$ 接触问题时才又重新注意到离子注入。Hubbard等<sup>[12]</sup>的仔细的工作表明,有四个参数强烈影响离子注入的最终结果:即1)待注入的表面必须没有任何氧化物,使轻“碰撞”离子(即氧)在半导体体内所造成的损伤深度为最小,2)注入时晶体的温度,3)注入时晶体的取向,这一点不太重要,4)退火循环时的温度-时间关系。近来的工作都指出了这些参数的重要性。Glowinski K. N. 等人<sup>[13]</sup>发现,在室温下,由于离子所产生的缺陷之间的相互作用,导致了不能退火的络合物。Sigmon<sup>[14]</sup>提出,若将离子注入进冷晶体(77°K)则可避免这个问题。Csepregi等人<sup>[15]</sup>研究了硅晶体表面层的再生长,由于硅离子的注入,这种表面层是非晶态的(图4)他们还发现,每一个晶向都以在一定的温度下,一定的速率并按照晶体自己的完整性程度进行再生长。[100]面上的再生长速度最快,完整性也最好。在稍高的温度下(150℃)进行预退火,会在单晶体和非晶层之间出现分界面,这样再生长就更完整。Hubbard 等人<sup>[12]</sup>表明,即使这些参数都很仔细地加以选择,要制备当电场高达几千伏/cm<sup>2</sup>时还能作

为极好阻塞接触的薄 $n^+$ 层,仍然是不可能的(图5和6)。如今,把许多个高纯锗探测器堆积起来,可以得到实际上可认为无窗的望远镜。在劳伦兹-伯克里实验室(LBL)正在组装由3个和7个探测器堆积的望远镜。

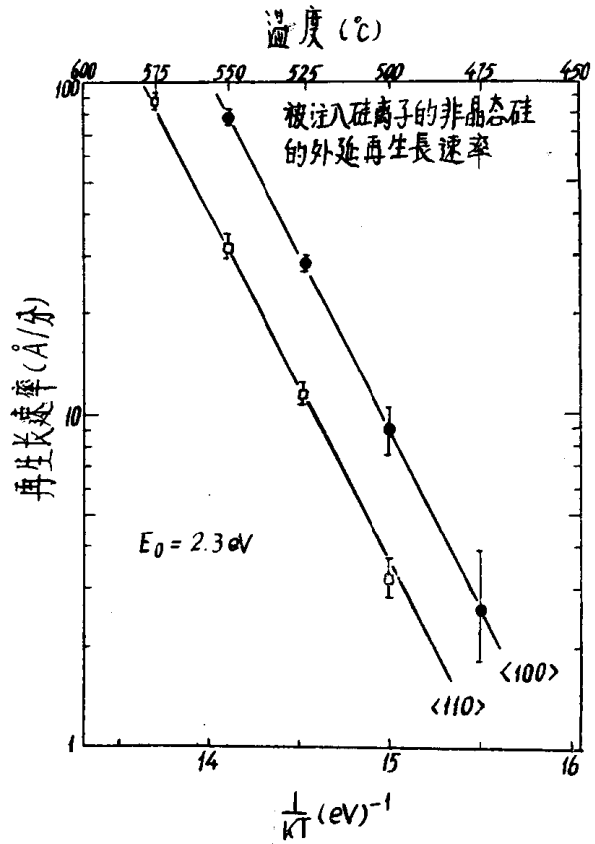


图4、硅晶体的不同晶向上的外延再生长速率。锗样品所得的结果与硅样品在325℃时在(100)方向上的再生长速率一样。(111)方向上的速率大约比(100)方向上的速率小10倍。(引自参考文献15)。

| 探测器      | $(N_A - N_D)$<br>(原子/cm <sup>3</sup> ) | $V_d$ (伏特) | $V_a$ (伏特) | $(E_c \text{ 伏特/cm})$ | 备注        |
|----------|----------------------------------------|------------|------------|-----------------------|-----------|
| 457—5.5  | $3 \times 10^{10}$                     | 430        | 6          | 200                   | 未处理       |
| 457—5.0  | $3 \times 10^{10}$                     | 320        | 20         | 370                   | 未处理       |
| 466—3.2  | $4.5 \times 10^{10}$                   | 250        | 7          | 270                   | 未处理       |
| 194—5.0  | $8 \times 10^9$                        | 200        | 350        | 1000                  | 1%HF      |
| 201—7.6  | $-1.7 \times 10^{10}$                  | 1100       | 2500       | 1300                  | 1%HF      |
| 473—2.0  | $4 \times 10^{10}$                     | 400        | 475        | 2000                  | 注入后1%HF + |
| 482—10.0 | $2 \times 10^{10}$                     | 1200       | 600        | 1900                  | “预退火”处理   |

图5  $(N_A - N_D)$ : 净浅杂质浓度  
 $V_d$ : 耗尽电压  
 $V_a$ : 最大工作电压  
 $E_c$ :  $V_a$ 时在 $n^+$ 接触处的电场  
 (引自参考文献12)

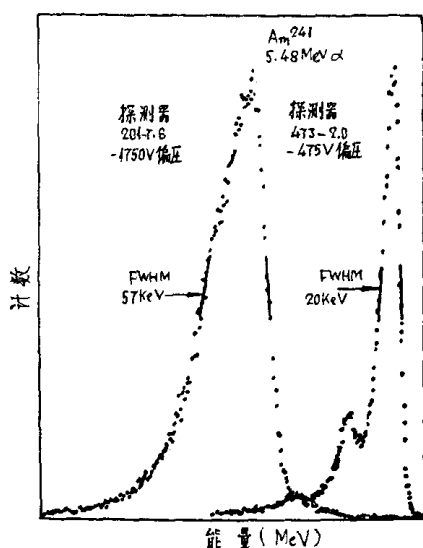


图6: 5.48 MeV  $\alpha$ 粒子通过 $n^+$ 接触。

473—2.0探测器在420°K下经过了  $1\frac{1}{2}$

小时的预退火。峰的位移是由于死层的厚度不同所致。20KeV相当于0.3—0.4  $\mu\text{m}$ 的窗。(引自参考文献12)。

Hall<sup>[18]</sup>介绍了制备具有近似恒定电场的锗同轴型探测器的一项新技术。他证明了,通过限定锂量的向外或向内受控扩散,可以获得径向的浓度梯度,这种径向浓度梯度在一限定的偏压下,将导致均匀的电场。

## 高 纯 锗

尽管高纯锗作为市售商品已经有相当长的时间,但是我们认为,它仍然处于发展阶段。这个观点可以由下列实验:区域提纯,“单体”,锗中的含氢量以及受力晶体的红外光谱所得出的最新结果来加以说明。

一旦明白了获得高纯锗的困难并不是由于拉晶设备所带来的偶然或系统污染,而是由于杂质硼、铝偏析不好<sup>[17]</sup>,便可朝这个方向努力。Hubbard等人<sup>[18]</sup>已证实,氧和硅与受主硼和铝形成络合物,它们是非电活性的,并且偏析也相当差(偏析系数K接近于1)。上述的这种吸气作用是有益的,因为它可以减小受主的浓度。但是另一方面,它又妨碍了有效的偏析,而这种偏析作用正是半

导体和其它物质纯化的基础。Hubbard等人表明,通过适当地选择容器、涂料材料和环境气氛,硅和氧都是能控制的。他们成功地将A1和B降到 $10^{10}/\text{cm}^3$ 水平以下,而与市售的本征多晶锗锭中的浓度无关。

由Hall<sup>[18]</sup>所发明的“单体”使设计人员的梦想成为现实(图7)。“单体”是这样的一块半导体晶体,它内部的导电类型与整个外表面的导电类型正好相反,亦称为“隐埋结”。应用高压电脉冲能部分地耗尽这个“隐埋结”,电导率的测量可用来确定耗尽深度。此器件可用于研究反偏压结漏电流的起源而不受任何表面的影响。初步的研究表明,周围环境的 $\gamma$ 辐射也影响测量。“单体”实验正在进行之中。我们希望将来能用它来阐明起支配作用的复合中心的特性。

近来,对于溶于锗中的氢的作用,人们的认识也有了迅速发展。和离子注入一样,它的进展也受到早期研究结果的阻碍。早期研究得出了这样的结论:氢以原子形式溶于锗中,它是电中性的。但是,Hall<sup>[20]</sup>所谓“快缺陷”的发现和Haller<sup>[21]</sup>近来证明这些中心含有氢的实验都改变了这个观点。让我对这个论题再花费点时间,因为它很好地说明了应该怎样把一些技术结合起来才能够解决问题。Hall对迅速淬火的锗样品进行了研究。他表明:400°K左右,约有 $4 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 浓度的后来被称为 $A_2$ <sup>[22]</sup>的缺陷或者杂质中心存在于锗中。 $A_2$ 是浅受主,它在室温时是不稳定的。缺陷怎么会在室温下不稳定,却在400°K时又存在呢?答案是: $A_2$ 在400°K时存在着连续不断的产生和复合过程。随温度升高,其产生的速率大于复合速率, $A_2$ 的亚平衡浓度也随之增加。当 $A_2$ 退火时,便产生施主D<sup>[22]</sup>,D的浓度可达到非常接近于 $A_2$ 的值。在160°K左右,D退火而晶体回到它原来的状态。根据中性杂质M和一些热缺陷之间的相互作用,Hall设计出一个模型,再运用二个速率方程式,他便能够拟合他的结果。曾经认为,在 $A_2$ 和D的产生和复合中,硅起

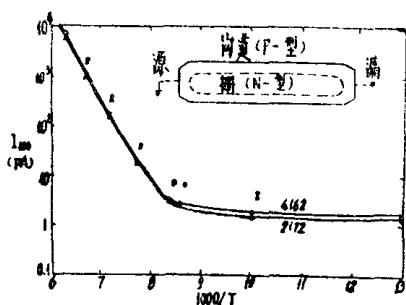


图7: 1000 伏时所测得的体漏电流。插图表明了“单体”结构和测量方法(引自参考文献19)。

着重要的作用,但是Haller<sup>[23]</sup>应用了同位素效应成功地证实了: $A_2$ 和D都与锗中的氢有关(图8)。从D的红外光电谱看出<sup>[24]</sup>,很显然,D的结构没有与五族施主和所有锗原子同样的对称性(图9),D的对称轴平行于[111]方向。要说明在 $A_2$ 和D的构成中是否还进一步包含杂质的实验正在进行之中。

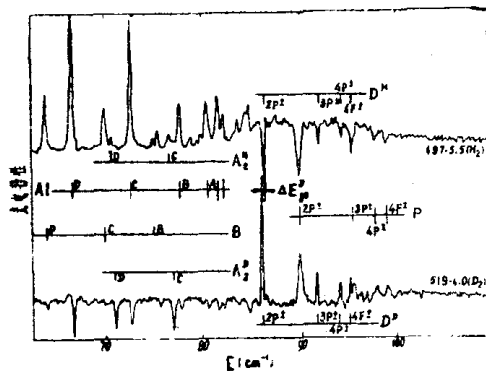


图8: 氢( $H_2$ )气氛中生长的锗晶体样品(497—5.5)和氘( $D_2$ )气氛中生长的锗晶体样品(519—4.0)的光电谱。在这二个谱中,受主元素A1和B,施主P的谱线都很精确地出现在同样的能量处。施主D和受主 $A_2$ 的谱线显示出同位素的位移,它直接证明了在这些中心中存在氢或氘。在这二个谱中谱线的符号相反,是由于二块锗样品的型号相反。(引自参考文献21)。

对 $A_2$ 和D的探索决不仅仅是出于学术性的好奇。探测器制造者的经验表明,用锂扩散方法制备 $n^+$ 接触时,会形成“快缺陷”。而 $A_2$ 和D的存在又使得净杂质浓度改变,以致使有价值的锗片变成无用。为了减少这些缺陷的出现,建议减慢温度变化,使能进行充分的退火。

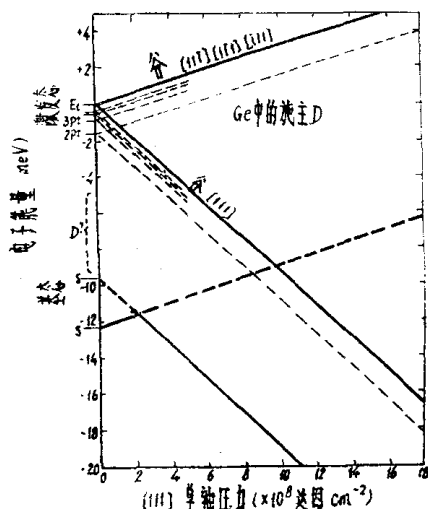


图9: 和施主D有关的氢的基态组分的能量与沿[111]方向上的单轴压力的关系。其激发态和[111]谷的情况与文献21中的图2一样。与元素替代施主相反,D谱的谱线在单轴压力下不移动,但是它们的强度在 $2.1 \times 10^8$  达因/cm<sup>2</sup>附近迅速下降。新的一组线出现在比原谱线低2.7mev的位置。这个行为可通过二个单态(s)的交叉来解释。基态成分中的双重态(D)或者二个以上的单态(S)必须存在于接近于导带最小值处,但是在所使用的温度下,它们无法存在,因此也观察不到。(引自参考文献21)。

## 参 考 文 献

1. Dearnaley, G. and Northrop, D.C., *Semiconductor Counters for Nuclear Radiations*, series ed., Burge, E.J. E. & F.N.Spon., Ltd., London, (1966).
2. Bertolini, G. and Coche, A., *Semiconductor Detectors*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, (1968).
3. Hall, R.N., *Prospects for High-Purity Germanium*, report of the meeting "Semiconductor Materials for Gamma Ray Detectors", New York City, eds., Brown, W.L. and Wagner, S., (1966).
4. Ottaviani, G. et al., *J. Appl. Phys.* 45, 1730—1739, (1974).
5. Sigurd, D. et al., *J. Appl. Phys.* 45, 1740—1745(1974).
6. Marelllo, V. et al., *Nucl. Instr. Methods* 108, 93—97, (1973).
7. Kircher, T. J., *Sol. State Electr.* 14, 507—513, (1971).

8. Andrews, J.M. and Lepselter, M. P., Sol.State Electr.13, 1011—1023, (1970).
9. Magni, G. et al., Sol.State Electr. 20, 551—553, (1977).
10. Herzer, H. and Kalbitzer, S., Proc.2nd Int.Confr.on "Ion Implantation on Semiconductors" Springer Verlag, 307—314, (1971).
11. Ponpon, J. P. et al., Proc. 2nd Int. Confr.on "Ion Implantation on Semiconductors" Springer Verlag, 420—429, (1971).
12. Hubbard, G. S. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 24, 161—164, (1977).
13. Glowinski, L. D. et al., Appl. Phys. Letter 28, 312—313 (1976).
14. Sigmon, T. W., private communication.
15. Csepregi, L. et al., Phys. Letter 54A, 157—8, (1975).
16. Hall, R. N. and Soltys, T. J., IEEE Trans. Nucl. Sci. 23, 88—91, (1976)
17. Haller, E. E., and Hansen, W. L., IEEE Trans. Nucl. Sci. 21, 279—286, (1974).
18. Hubbard, G. S., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 25, (1978) to be published.
19. Hall, R.N., Appl. Phys. Letter 29, 202—204, (1976).
20. Hall, R.N., Inst. Phys. Conf. Ser. 23, 190—197, (1975).
21. Haller, E.E., IEEE Trans. Nucl. Sci. 25, (1978) to be published.
22. Haller, E. E., Proc. "First Seminar on Photoelectric Spectroscopy of Semiconductors", Moscow, 1977.
23. Haller, E.E., to be published in Phys. Rev. Lett. see also Ref. 21.
24. Kogan, S. M. and Lifshits, T. M., Phys. Stat. Sol. (a) 39, 11—39, (1977)
25. Caywood, J.M. et al., Appl. Phys. Lett. 20, 326—327, (1972).
26. Saxena, A.N. et al., Inst. Phys. Conf. Ser. 22, 160—170, (1974).

〔倪绍灵译自IEEE Trans. Nucl. Sci., 1978, 25, 2, 921—926, 李广将校〕

## 半 导 体 探 测 器 的 制 备 工 艺

Rex. C. Trammell

### 引 言

虽有几种有用的可以描述半导体探测器的分类,但本文的范围将限于硅和锗二极管结构的制备工艺,重点在用于高能带电粒子、X射线及γ射线高分辨能量测量的器件上。

在讨论特殊器件之前,回顾一些基本工作原理和如何决定器件的设计,以及所要求的制备工艺是有益的。

简单的反向偏压二极管结构见图1。耗尽

区是器件灵敏区域,其厚度正比于 $\sqrt{V/N}$ ,式中V是所加的反向偏压,N是净杂质浓度。当带电粒子或光子与晶体相互作用时,在耗尽区中产生电子-空穴对,它们在电场的作用下被收集到合适的电极上。如能满足以下条件,则所收集的电荷量恰好正比于粒子或光子的能量,这些条件是:

(1) 全部能量必须损失在耗尽区内。在器件接触或无场区内损失的能量不能产生所要求的收集电荷。

(2) 电荷收集必须完全。在到达电极以

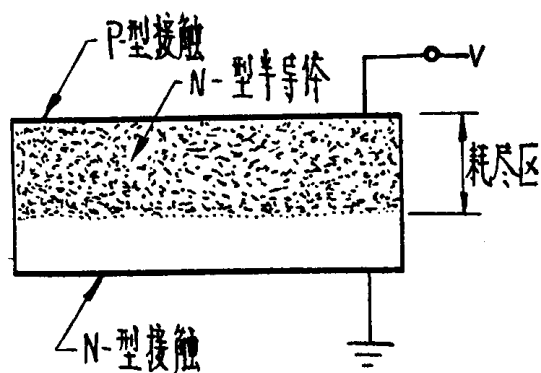


图1. 简单的反向偏压二极管结构

前被俘获的载流子对信号完全没有贡献，因此影响了能量测量的精确度。

如果我们再加上第三个条件，二极管电噪声和电子学有关的噪声必须足够的低，这样才不影响电荷测量的准确性，所以大多数设计参数或是预先确定，或是至少要明确到足以使合理的设计做到折衷考虑。

上述的这些条件认为是对二极管生产的一般要求，原则上与整流器及太阳电池没有多少差别，只是对尺寸大小、晶体质量和纯度有特殊的要求。条件(1)常常要求大面积整流接触，而整流接触的厚度比我们在条件(3)中所要求的薄，而物理尺寸比大多数半导体电子学中的器件要大得多。如图2示出了与由上千个有源元件组成的集成电路基片作比较大锗锂 $\gamma$ 射线探测器。探测器是由锗单晶制备的同轴N-I-P结构二极管，重二磅。总体积的90%是灵敏的耗尽区，要求净电活性杂质浓度约为 $10^{-14}$ ，正常工作温度 $\leq 90^\circ\text{K}$ 时，在反向偏压为5000伏时漏电流

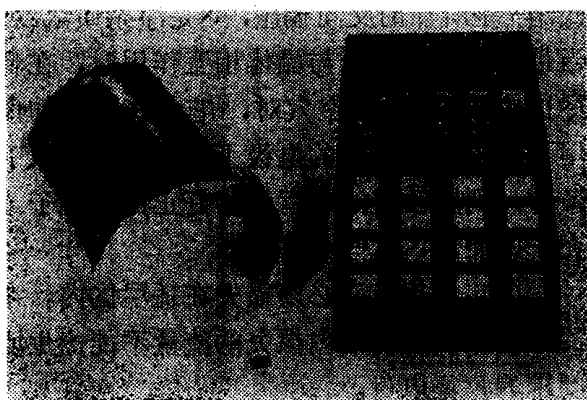


图2 大面积锗锂 $\gamma$ 射线探测器

约为100微微安。显然这种器件所采用的制备过程与一般常规生产大不相同，但仍有许多相似处。在介绍特殊类型器件的制备工艺中，我们将试图阐明这些相似之处以及一些独特的工艺要求。

## 硅带电粒子探测器

半导体探测器第一个重要的类型是硅带电粒子探测器。这类器件广泛使用了将近二十年，应用范围从核物理、空间实验到实验室的常规监测甚至铀矿的测量。

足够纯的硅材料可获得的灵敏区厚度，好的一般为2毫米，特殊好的可达5毫米。这样的厚度范围完全可阻止所有天然 $\alpha$ 粒子、能量高达30MeV的质子、2MeV的电子及能量高得多的重带电离子。在这些能量范围中，室温下工作选用硅比锗要方便。选择硅探测器并根据粒子的种类、能量、所要求的计数率和能量分辨来确定灵敏层厚度和面积，我们必须研究生产二极管结构的几种可能性，以满足我们对窗厚度、材料质量和反向电流的要求。另外，我们有时还考虑器件其它方面的要求，如对恶劣环境的灵敏度及在正常光照环境下的工作能力。

整流接触实际选用三种工艺：面垒、离子注入或扩散结。扩散结是坚固的，成本也比较低，但工艺中要经过高温，使材料的电荷收集特性变差，而且窗厚度比选择其它两种工艺的要厚。离子注入在一些特殊场合中是有用的，而其成本还可以。一般说来，面垒(或肖特基垒)提供了最好的性能和最大的设计适应性，下面我们将进行详细讨论。制备的基本步骤如下：

### 1. 材料选择

所采用的硅是经真空悬浮区熔生长的高质量单晶。单晶锭是经过仔细挑选的，没有俘获效应和缺陷，这些会影响电学特性。面积由器件设计来决定，纯度由所要求的灵敏层厚度来确定。为了制备比较简单的灵敏深

度为 0.5 毫米的探测器并具有一合适的 5000 伏/厘米场强, 则要求材料在反向偏压为 125 伏下的电阻率为 8500 欧姆-厘米(每  $10^{11}$  个硅原子中有一个杂质原子)。要制备大面积和灵敏层较厚的探测器, 则对材料特性的要求愈来愈重要而且选择也越来越困难。

## II. 机械加工

标准的硅单晶形状近似为一圆棒, 生长方向为  $[111]$  方向。根据所要求的厚度从棒上切下片子, 切割通常采用多刀切片机, 为鉴定片子或制备的探测器数量很少的情况下可采用金刚石锯。为了减少沟道效应, 通常切片的时候与单晶棒轴线成一定的角度。然后再根据所要求的尺寸切成一个或更多的圆片(或所要求的其它形状)。超声波切割机是优先被选用的, 因为它可得到无损伤的表面。但有时也使用其它技术。

接着仔细研磨片子的两面以消除机械损伤并达到最后所要求的厚度。要达到最好的结果研磨工作是非常关键的, 而且要仔细、清洁。因为此时会引入不易察觉到的表面损伤, 结果使探测器得不到应有的好的电性能而最终失败。样品(片子)经研磨后应立即进行仔细清洗。

## III. 化学处理

为了得到好的整流接触和小的表面漏电流, 必须除去剩余的机械损伤。采用各种化学抛光(通常称为腐蚀), 最常用的是氢氟酸和硝酸的混合液进行腐蚀。对于  $dE/dx$  测量的非常薄的探测器是用特殊的腐蚀剂, 化学机械抛光或是采用除去外延层衬底的方法。

腐蚀、清洗后, 硅片表面复盖了相当复杂的硅氧化层, 其中含有氟离子、水分子、也许还有其他种类化学物质定位在硅-氧化物交界面上、氧化物中或氧化物上面。采用各种化学浸渍、空气老化、工艺秘方和暗室达到一形成表面势垒接触所要求的表面条件。达到这一目的的工艺技术和探测器制造者的数目一样多, 田纳西州橡树岭的空气

在实际上已作为必要条件, 这一广泛为人们所相信的事实可能是不正确的。

## IV. 封装涂胶

为了提供稳定的表面和表面保护, 大多数表面势垒探测器是用环氧树脂安装在绝缘环上, 环的两面已金属化了, 因此也提供了用于压力接触的合宜的面积。腐蚀好的样品手工涂环氧树脂, 若工艺不熟练可在废片上练习以至能极好完成此项工作。

## V. 蒸发接触

环氧树脂固化后, 在装好的样品上蒸发一 N 和 P 型接触。虽然其它金属也可作接触, 但是典型的是, 金作为 P 型接触、铝作为 N 型接触, 而且表面化学至少与金属本身一样重要。完整的结构见图 3。

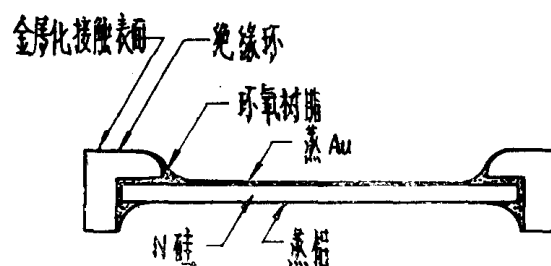


图3. 完整的表面势垒探测器

## VI. 外壳包装

探测器常常是正好压住它的环或是堆积或是构成望远镜使用。不过在大多数应用中探测器要有一外壳或封装好以提供一接地外壳和同轴电缆接触器才较方便。为避免探测器的损伤或因电接触不好而造成噪声增加, 这些外壳必须仔细设计。

以上概要地叙述了典型的探测器, 但还有许多变化, 如特殊的形状和外壳, 用于位置指示的分裂条状电极、带有中心孔的环形探测器, 入射束通过中心孔, 因此能观察到差不多直接的反射体。微型医用探针及其它多种特殊探测器, 采用这些多用工艺均可容易地制备出来。

## 锂漂移补偿

反向偏压二极管的耗尽层深度与  $N^{-1/2}$