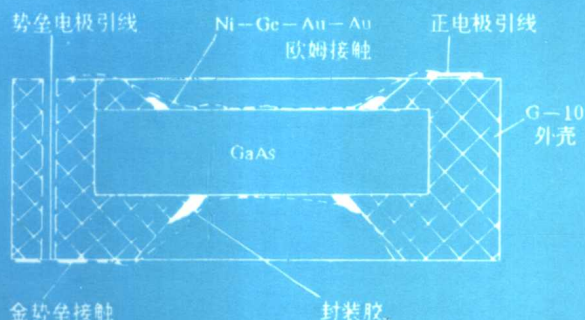


化合物半导体探测器 及其应用

丁洪林 张秀凤 编著



原子能出版社

• 北京

化合物半导体探测器 及其应用

丁洪林 张秀凤 编著

原子能出版社

• 北京

(京) 新登字 077 号

内 容 提 要

本书较系统地叙述了化合物半导体探测器的种类、性能和目前在各个领域内的应用。内容共分五章：第一章介绍化合物半导体和在室温下工作的化合物半导体探测器；第二章介绍 GaAs 核辐射探测器的发展、现状、制备和性能；第三章介绍 CdTe 核辐射探测器的发展、制备和性能；第四章介绍 HgI₂ 核辐射探测器的制备与性能；第五章介绍化合物半导体探测器在能谱测量、核医学(医用探针、骨密度仪等)、高能 CT 技术、剂量测量、核电站辐射安全监测、核废物处理、空间物理学、天体物理学、X 射线数字照相、 γ 射线成像、采矿工业以及在粒子物理学等学科中的应用。本书内容比较系统全面,可供从事核辐射探测器研制的技术人员、从事核医学工作的医务人员、从事天体物理学、剂量监测和核物理学研究的研究人员和其它有关科技人员及大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化合物半导体探测器及其应用 / 丁洪林, 张秀凤编著. — 北京:

原子能出版社, 1994. 3

ISBN 7-5022-1067-2

化…Ⅰ ①丁…②张…Ⅱ. ①化合物半导体-内放大探测器②内放大探测器 化合物半导体Ⅲ. TL814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 00818 号



原子能出版社出版发行

责任编辑: 袁祖伟

地址: 北京市阜成路 43 号 邮政编码: 100037

北京市平谷大北印刷厂印刷 新华书店经销

开本: 787×1092 毫米 1/32 印张: 3.875 字数: 100 千字

1994 年 3 月北京第 1 版 1994 年 3 月北京第 1 次印刷

印数: 0—1100 册 定价: 4.00 元

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应用的日益广泛,化合物半导体探测器作为一种可在室温下工作的核辐射探测器、对X、 γ 射线有较高的探测效率和较好的能量分辨,因此它已成为当前在核安全、环境监测、核医学、空间飞行、采矿工业等领域内一种不可缺少的探测元件。化合物半导体探测器能准确、迅速地给出所测的结果,因而它的应用日趋广泛,其发展将更加迅速和深入。

本书根据编著者的一些工作经验并结合国内外目前这项研究的发展,对化合物半导体探测器及其应用作了较全面的介绍,系统地叙述了化合物半导体探测器的种类、性能和目前在各个领域内的应用。内容共分五章:第一章介绍化合物半导体和在室温下工作的化合物半导体探测器;第二章介绍GaAs核辐射探测器的发展、现状、制备和性能;第三章介绍CdTe核辐射探测器的发展、制备和性能;第四章介绍HgI₂核辐射探测器的制备与性能;第五章介绍化合物半导体探测器在能谱测量、核医学(医用探针、骨密度仪等)、高能CT技术、剂量测量、核电站辐射安全监测、核废物处理、空间物理学、天体物理学、X射线数字照相、 γ 射线成像、采矿工业以及在粒子物理学等学科中的应用。本书内容比较系统,可供从事核辐射探测器研究和制造的技术人员,从事天体物理学、辐射剂量监测和核物理学研究的研究人员、从事核医学的医务人员和其它有关科技人员及大专院校有关专业的师生参考。

编著者 1993.12月

目 录

第一章 化合物半导体和在室温下工作的化合物

半导体探测器	(1)
1.1 化合物半导体	(1)
1.2 化合物半导体与元素半导体 Si、Ge 间的差别及特点	(3)
1.2.1 化学键	(3)
1.2.2 晶体结构	(4)
1.2.3 杂质、缺陷和化学比	(6)
1.3 制备核辐射探测器对化合物半导体材料的要求	(10)
1.4 几种常用的半导体材料的性能参数	(11)
1.5 半导体核辐射探测器的分类和在室温下工作的半导体 核辐射探测器的现状	(15)
1.5.1 半导体核辐射探测器的分类	(15)
1.5.2 可在室温下工作的半导体 X、 γ 射线探测器 的现状	(16)
参考文献	(21)
第二章 砷化镓 (GaAs) 核辐射探测器	(23)
2.1 GaAs 核辐射探测器的发展与现状	(23)
2.2 GaAs 核辐射探测器的制备与性能	(24)
2.2.1 用于制备核辐射探测器的 GaAs 单晶	(24)
2.2.2 GaAs 核辐射探测器的制备和种类	(25)
2.2.3 GaAs 表面势垒型核辐射探测器的 I - V 和 C - V 特性	(28)
2.2.4 GaAs 核辐射探测器的能谱特性	(32)
参考文献	(47)
第三章 碲化镉 (CdTe) 核辐射探测器	(48)

3.1 CdTe 核辐射探测器的发展与现状	(48)
3.2 CdTe 核辐射探测器的制备与性能	(50)
3.2.1 用于 CdTe 核辐射探测器的 CdTe 单晶的生长和 晶体中的主要缺陷	(50)
3.2.2 CdTe 核辐射探测器的种类和它的制备工艺	(53)
3.2.3 CdTe 核辐射探测器的 I - V 特性	(57)
3.2.4 CdTe 核辐射探测器的能谱特性和性能数据	(62)
参考文献	(68)
第四章 碘化汞 (HgI_2) 核辐射探测器	(70)
4.1 引言	(70)
4.2 用于核辐射探测器的 HgI_2 单晶材料	(71)
4.3 HgI_2 核辐射探测器的制备与性能	(72)
4.3.1 HgI_2 核辐射探测器的制备	(72)
4.3.2 HgI_2 核辐射探测器的 I - V 和 C - V 特性	(74)
4.3.3 HgI_2 核辐射探测器的能谱特性	(76)
参考文献	(80)
第五章 化合物半导体探测器的应用	(81)
5.1 引言	(81)
5.2 在能谱测量中的应用	(82)
5.3 在核医学 (医用探针和骨密度仪) 中的应用	(82)
5.3.1 用于肿瘤定位的外科手术探针	(83)
5.3.2 骨密度仪	(87)
5.3.3 便携式区域性脑血流量实时分析系统	(88)
5.3.4 核医学医疗剂量测定仪	(89)
5.3.5 核医学手术刀—— γ 射线刀 (简称 γ 刀)	(89)
5.4 在高能 CT 技术中的应用	(90)
5.5 在粒子物理学中的应用	(92)
5.6 在剂量测量中的应用	(93)

5.6.1	在核电站监控中的应用	(93)
5.6.2	在核辐射剂量测量中的应用	(93)
5.7	在核废物处理中的应用	(97)
5.8	在空间物理学和天体物理学中的应用	(98)
5.8.1	用于 Soviet Mars 任务中的 X 射线仪器	(98)
5.8.2	在天体物理学中的应用	(103)
5.9	在 X 射线闪光辐射照相和数字式照相中的应用	(105)
5.10	在皮秒 X、 γ 射线快速脉冲诊断中的应用	(109)
5.11	在采煤工业中的应用	(110)
5.12	在 γ 射线成像技术中的应用	(111)
参考文献		(114)

第一章 化合物半导体和在室温下工作的化合物半导体探测器

1.1 化合物半导体

在无机化合物中，除金属、类似合金（置换固溶体如AgCu等）、共价性晶体（SiC）、离子性晶体（NaCl）和分子性晶体等比较简单的物质外，还有广义的金属间化合物（intermetallic）。这种化合物大致可以分为金属性金属间化合物、共价性金属间化合物和间隙性金属间化合物等三种基本类型。很多金属性金属间化合物（如CuZn等）遵从休谟—饶塞里电子构型定则，它们在电学性质上属于金属。共价性金属间化合物（InSb等）是共价键占大部分内聚力的物质，由电子参加键合，所能采取的晶体类型也有限制。这种化合物一定含有元素周期表中长周期ⅢB族右侧的元素，能够满足离子价的关系，而且离子性也逐渐加强，形成离子性晶体。一般说来，随着金属键向共价键过渡，内聚力逐渐增大，熔点也提高，在电学性质上则由金属变成半导体和绝缘体。

在化合物半导体中，用于核辐射探测器的化合物半导体材料是共价性化合物。形成这种化合物半导体的条件是材料中存在 sp^3 或 p^3 键。判断半导体的性质时，可以采用穆塞—皮尔逊定则^[1]，用以解释不存在自由电子的条件。满足下列式（1）的化合物就是半导体（或绝缘体）：

$$\frac{n_c}{n_a} + b = 8 \quad (1)$$

式中:

n_c 为价电子数;

n_a 为从 IV A 到 VI A 之间的元素的原子数;

b 为同价元素的原子相互之间键合的原子数。

能够满足式 (1) 关系的化合物其价电子填满满带, 所以满带中不存在自由电子。

我们以半导体核辐射探测器常用的几种半导体材料为例进行计算, 计算结果列于表 1.1。

表 1.1 式 (1) 实例计算结果

	n_c	n_a	b	$\frac{n_c}{n_a} + b$
Ge IV	4	1	4	8
Si IV	4	1	4	8
SiC IV-IV	8	2	4	8
GaAs III-V	8	1	0	8
CdTe II-VI	8	1	0	8
HgI ₂ II-VI	16	2	0	8

用于制备核辐射探测器的化合物半导体, 目前主要有 III-V 族化合物半导体中的 GaAs、II-VI 族化合物半导体中的 CdTe 和 II-VII 族化合物半导体中的 HgI₂。

1.2 化合物半导体与元素半导体 Si、Ge 间的差别及特点

化合物半导体与元素半导体 Ge、Si 相比，既有相似之处，又有较大的差别。下面我们从如下几个方面作一简要的介绍。

1.2.1 化学键

Ge、Si 等 IV 族元素组成晶体时用来描述原子间的相互作用的化学键是共价键，亦称原子键。简单地说，共价键中的一对电子为共价结合的两个原子所共有，不能区分它们是属于哪个原子的。

以 III 族和 V 族元素组成的化合物半导体为例，它是由两种元素组成的二元化合物，它们的结合带有共价键的性质，这是与 Ge、Si 相似的，但也有不同的特点。III - V 族化合物中原子之间的相互作用除了共价键的作用外，同时还存在着离子键的作用，所以它属于混合键型。当然在混合键型中是以共价键为主的。但是，由于化合物半导体中同时存在着离子键，而离子键与共价键是不同的，电子不是完全共有的，可看作与某一原子联系得更紧密，电子云分布的方向性不显著。在离子键结合中，靠近离子间联线中心处的电子云密度几乎为零，因此离子键对化合物半导体晶体的特性有一定的影响，并会产生与 Ge、Si 不同的新的效应。

下面我们简略地说明在化合物半导体中是如何同时存在共价键和离子键的。仍以 III - V 族化合物半导体为例：形成共价键的情形可以这样理解：III 族元素原子 A 外层有 3 个电

子, V 族元素原子 B 外层有 5 个电子, B 原子把 1 个电子给了 A 原子, 则各有 4 个外层电子 (如 Ge、Si 那样), 正好组成 4 个共价键。另一方面, 这时 A 原子得到一个电子后变成负离子, 而 B 原子失去一个电子变成正离子, 正负离子通过库仑场相互吸引而结合成为离子键。所以说化合物半导体内同时存在着共价键和离子键。

由于化合物半导体的化学键是混合键型, 在整个晶体内 B 原子处出现正的有效电荷, 而 A 原子处出现负的有效电荷, 产生了电荷分布的不均匀。另一方面, 由于离子键的作用, 电子云有向 B 原子处移动的趋向, 即产生极化现象, 这又导致 B 原子处出现负的有效电荷, A 原子处出现正的有效电荷。两个效应叠加的结果, 在 III-V 族化合物半导体中存在负电性差。实际上, 负电性这一特性在化合物半导体中是普遍存在的, 负电性差愈大, 则离子键占的比例也就愈大, 极化现象也就愈明显。

1.2.2 晶体结构

Ge、Si 等 IV 族元素半导体的晶体结构是金刚石结构, 这种结构是全由一种原子组成的。而大多数化合物半导体的晶体结构是闪锌矿结构, 它是由二种 (或二种以上) 原子组成的。这种结构中每一个原子的近邻是 4 个另一种原子, 例如 III-V 族的 InSb, 如图 1.1 所示, 每 1 个 In 原子周围近邻有 4 个 Sb 原子, 而每 1 个 Sb 原子周围近邻又为 4 个 In 原子, 所以闪锌矿结构是非中心对称的, 与金刚石的对称结构不同, 它不具有反映中心。

在闪锌矿结构与金刚石结构中晶体的解理面不同, 金刚

石结构的解理面是(111)面,而闪锌矿结构的解理面为(110)。这是由于闪锌矿结构中除共价键外还有离子键成分,以(110)为界面把晶体的两部分分开时,界面两边同符号离子

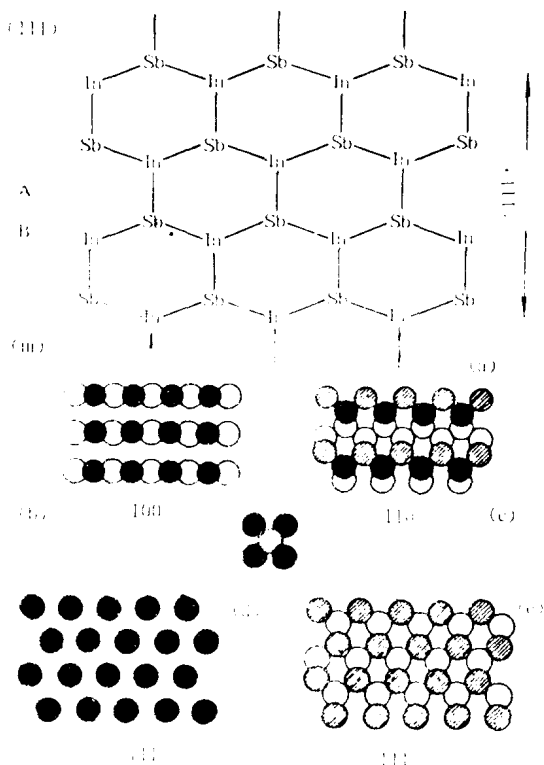


图 1.1 III-V 族化合物半导体 (闪锌矿结构) 的原子排列
 (a)以 $[111]$ 极性轴方向 InSb 的原子排列结构;(b)在 (100) 面的连接和排列;
 (c)在 (110) 面的连接和排列;(d)在 (111) 面的单键连接;(e)在 (111) 面的三键
 连接。黑圆点表示 III 族表面原子;阴影圆点表示 V 族表面原子;白圆点表示下
 一表面层的原子。

之间的库仑排斥力能起一定作用；而以(111)为界面分开时界面一边均为一种离子，另一边为另一种离子，于是有较强的库仑吸引力。因此，库仑作用力的影响有可能大到使(110)面更易被拉断而成为晶体的解理面。

1.2.3 杂质、缺陷和化学比

元素半导体中杂质和缺陷对材料的性能有很大的影响。在Ge、Si中杂质能态在禁带中的相对位置以及是施主型还是受主型杂质（杂质的导电类型），列于图1.2和图1.3中。

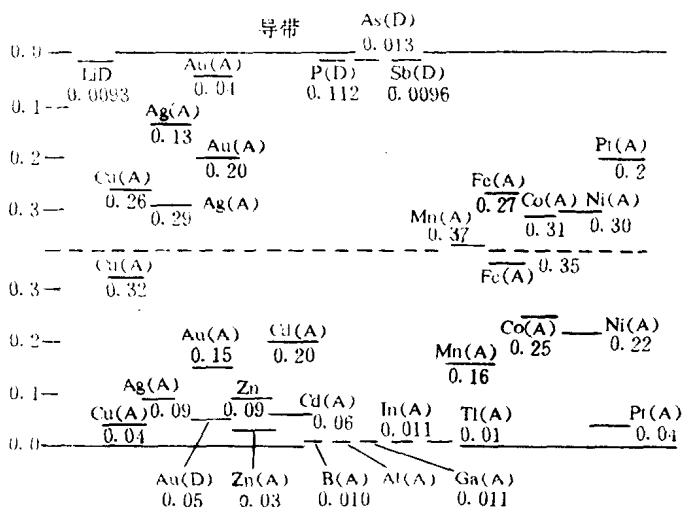


图 1.2 Ge 中的杂质态

禁带中央虚线以上的能量是从导带测得的；
中央虚线下的能量是从满带测得的，其单位为 eV。

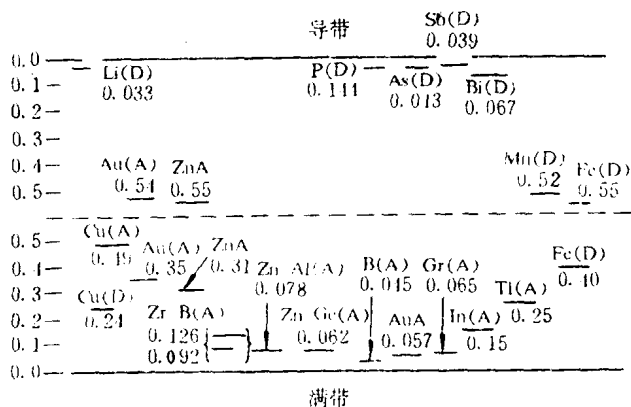


图 1.3 Si 中的杂质态

禁带中央虚线以上的能量是从导带测得的；

中央虚线以下的能量是从满带测得的，其单位为 eV。

化合物半导体中的杂质和缺陷对半导体的性质有决定性的影响。就Ⅲ-V族化合物半导体来说，按杂质对Ⅲ-V族化合物半导体晶体电性的作用，大体可分为4种类型：1) 施主，2) 受主，3) 电中性，4) 复杂的深能级（或称陷阱），它能使Ⅲ-V族化合物半导体变成高电阻率。ⅥB族元素，一般地说，在Ⅲ-V族化合物半导体中起施主作用，表明它们在化合物晶体中取代了V族原子的位置。ⅡB族元素，一般地说，在Ⅲ-V族化合物中起受主作用，取代了Ⅲ族原子的位置。在Ⅲ-V族化合物半导体中杂质的导电类型见表1.2，在GaAs中的一些杂质的能级和它的导电类型见图1.4。

表 1.2 III-V 族化合物中杂质的导电类型

D 施主；A 受主；N 电中性；T 深能级。

化合物半导体 杂 质	GaAs	InSb	InAs	InP	GaSb	AlSb
H	N					
Li	D					
Na	A					
Cu	A					
Mg	D→A					
Zn	A	A	A	A	A	
Cd	A	A	A	A	A	
Hg	A					
Al	N					
In	N					
Si	D→N		D			
Ge	D→N		D			
Sn	D→N		D			
Pb	D→N					
N	N					
P	N					
Sb	N					
O	T					
S	D					
Se	D	D	D		D	D
Te	D	D	D		D	D
Cl	N					
Fe	T					
Co	T					
Ni	T					

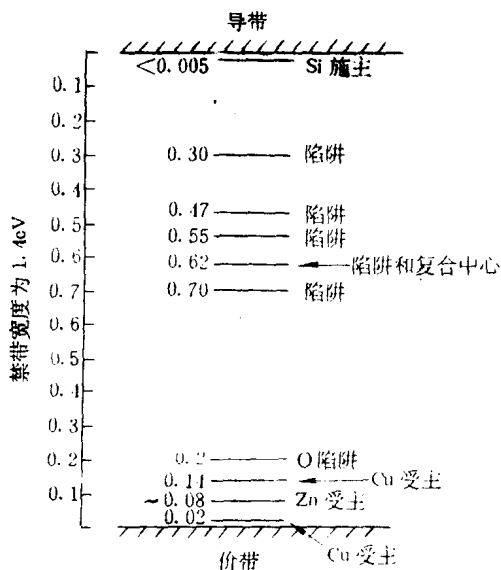


图 1.4 在 GaAs 中测得的一些杂质或缺陷能级

在化合物半导体中除杂质以外，还存在化学比^{*}的问题，这与化合物半导体的缺陷有着密切的关系。

* 化学比（即化学计量比）与非化学比：定比定律是化学基本定律之一，它表述为化合物中的组元有一定的简单整数的比例，化学比指的就是这种比例。对于气体它是精确的，对于固体，由于存在缺陷，它可以发生偏离现象，即所谓非化学比现象。化合物固体中的非化学比是普遍现象，它为固体与另外的相的热平衡过程所决定，与各种缺陷密切相关。

在化合物半导体中化学比的偏离一般是比较小的，常远小于1%。不同结合类型的化合物半导体晶体实际发生偏离的程度也不同，离子性强的晶体一般比共价性强的晶体更容易发生较大的偏离。因为一般破坏一个共价键比破坏一个离子键需要更多的能量，所以在共价性强的晶体中，缺陷的平衡浓度较小。与外来杂质元素的存在一样，偏离化学比所相应的缺陷也能改变化合物半导体的电学性质。

1.3 制备核辐射探测器对 化合物半导体材料的要求

对元素半导体材料来说, 现在已能制备出适合于核辐射探测器要求的高精度(高纯、高完整性)材料, 如高纯 Ge、高纯 Si 和高阻 NTDSi (中子嬗变掺杂 Neutron Transmutation Doping), 另外, 在元素半导体材料上制备 P-N 结和欧姆接触的技术也已较成熟和完善, 加上 Si、Ge 单晶材料纯度高、完整性好、少数载流子寿命长、迁移率大($\mu\tau$ 积可达 $0.22\sim 0.84\text{ cm}^2/\text{V}$), 所以自 60 年代以来 Si、Ge 半导体核辐射探测器就得到了迅速的发展, 在带电粒子、X 射线和 γ 射线的能谱测量中取得了极好的能量分辨, 因此在核科学研究中的地位日益提高。到 70 年代末, Si、Ge 半导体核辐射探测器在许多领域如宇宙航行、受控热核反应、卫生防疫、食品检验、工业、医学、生物防护等领域得到了广泛的应用。但作为 X、 γ 射线测量, Si、Ge 半导体的禁带宽度较窄 (Ge 的 E_g 为 0.66 eV ; Si 的 E_g 为 1.06 eV), 所以必须在低温下工作。

为克服半导体核辐射探测器中 Si 探测器对 γ 射线吸收系数小、探测效率低, Ge 探测器必须冷却的缺点, 为实现能在常温下工作而且能量分辨又好的目的, 制备核辐射探测器对化合物半导体材料的物理特性有如下几个要求:

- 1) 高的原子序数(平均值), 对 γ 射线有高的探测效率。
- 2) 禁带宽度 (E_g) 要大, 可在室温下应用。
- 3) 高的纯度和高的完整性, 有好的电荷收集特性。
- 4) 少数载流子的迁移率和寿命的乘积 (即 $\mu\tau$) 要大, 这