

半导体辐射探测器

Semiconductor Radiation Detectors

[德] Gerhard Lutz 著
刘忠立 译

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

半导体辐射探测器

Semiconductor Radiation Detectors

[德] Gerhard Lutz 著

刘忠立 译

国防工业出版社

·北京·

图字:军-2003-014号

图书在版编目(CIP)数据

半导体辐射探测器/刘忠立编译. —北京:国防工业出版社, 2004. 5

书名原文: Semiconductor Radiation Detectors

ISBN 7-118-03269-7

I. 半... II. 刘... III. 半导体辐射热计
IV. TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 089438 号

Translation from the English language edition:

Semiconductor Radiation Detectors by Gerhard Lutz

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999

Springer-Verlag is a company in the BertelsmannSpringer publishing group

All Rights Reserved

本书中文简体字版专有出版权归国防工业出版社所有, 侵权必究。

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12¼ 318 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 30.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

序 言

几十年来,半导体核辐射及粒子探测器得到了迅速的发展。尽管这些发展已有大量的文献记载,但将这些资料收集起来形成一本既包括基本概念又包括最新进展的专业书籍是非常有用的。

本书作为一本科学基础教材,为研究和应用半导体探测器的工作者提供了指南及参考。

目前,半导体探测器在科学技术各个领域中被广泛采用,这些领域包括核物理、基本粒子物理、光学和 X 射线天文学、医学以及材料测试,而且其应用范围正在继续扩大。与此紧密相关,采用半导体使信号读出的低噪声—低功耗集成电子电路也得到了发展。

半导体探测器研制的成功,是由于它具有其它类型探测器不具备的优良性质,例如:极高精度的位置测量同高速度读出的结合;直接利用电子信号;能量及位置的瞬时精确测量;在一个公共衬底上将探测器同读出电子电路集成在一起。

值得一提的是,所有这些发展都是为基础研究,主要是为基本粒子物理提供研究工具而产生的,但是这些发展的成果现在也用于其它科学技术领域。

本书主要描述探测物理原理以及器件结构;而特殊应用以及探测器系统不作为重点,只介绍读出电子电路和对探测器—放大器系统噪声的一些考虑。

虽然探测器系统并未包括在本书中,但是涉及系统的要求却是根据探测器的性质决定的,因为在新建造的粒子碰撞机中计划用到几万个探测器。生产如此大量的探测器要求有一个简单的设计,它既要满足经济生产的要求,同时又要应对材料性质经辐射产生的巨大变化。因此,本书也广泛收集了辐射损伤以及器件稳定

性方面的内容。

在本书中,有些半导体探测器未收集进来,部分采用半导体材料并且工作在很低温度下的低温探测器也未涉及。本书重点集中在硅探测器上,尽管其它半导体材料(特别是化合物半导体)没有重点提及,但是大量的物理原理以及器件结构也可用于其它探测器材料。

探测器工艺这个重要的题目只概略论述,因为在计划中有几个作者即将撰写出版涉及到半导体探测器其它方面的几本书,其中正准备出版的两本书将包括探测器工艺及探测器测量精度物理限制的内容。

我是以直觉的方式决定本书的题目的,我认为,认识探测器的物理学不仅对从事探测器研究,而且对在一些特殊应用领域中选择及合理使用探测器的工作人员来说都是重要的。本书试图在内容上系统、全面,这样无需频繁查阅其它标准文献就可以阅读,因此,本书包括了基本半导体物理导论部分以及一些其它标准教科书中的知识。

在写本书时,我得到同事们的大力支持,特别是有些论点经过德国马克斯·普朗克物理及空间物理研究所半导体实验室的合作者们的认真讨论,他们中有几位还为我细心校阅了部分或全部手稿,并且提出了一些有价值的改进意见。其中我特别提出的是 E. Gatti, R. Wunstorff, J. Kemmer, L. Strüder, K. Kandiah, P. F. Manfredi, M. Doser, L. Andricek, D. Hauff, N. Hörnel, P. Höll, P. Klein, P. Lechner, H. Soltau, C. V. Zanthier, C. Fabjan, and D. Atkins.

特别感谢我的妻子 Ette,感谢她在我写本书几年中的耐心及支持。

Gerhard Lutz

慕尼黑, 1999 年 3 月

译者序

电离辐射探测器起源于核物理及基本粒子物理,它不仅在核物理及基本粒子物理的发展中仍然起着十分重要的作用,而且在其它科学技术领域,如 X 射线天文学、医学、材料科学、空间科学中也得到了广泛的应用。

半导体辐射探测器,是半导体技术同辐射技术结合的产物。半导体辐射探测器,不仅具有极高的辐射能量和位置测量精度,而且还可以同半导体信号读出电路集成在一起,构成体积小、性能优良的辐射探测系统,这是任何其它的辐射探测器难以做到的。

德国马克斯·普朗克物理和空间物理研究所半导体实验室,在发展半导体辐射探测器方面做出过卓越的贡献。该实验室的格·鲁茨(Gerhard Lutz)博士撰写的专著《半导体辐射探测器》,总结了近几十年来半导体辐射探测器的重要研究成果。由于很多最新研究成果是作者及其同事亲自参加取得的,因此本书是一本权威性的著作。

本书从半导体物理的角度出发,重点介绍了半导体辐射探测器的原理、器件结构、读出电子学、器件稳定性、辐射加固及器件模拟等内容,构思严谨,内容丰富。

本书用教学方式写成,书中给出了大量的计算例子,使读者不仅可以从本书了解到半导体辐射探测器的最新发展,而且还能加深对半导体辐射探测器的系统认识。本书对我国从事半导体辐射探测器及其相关领域研究和生产的广大科技人员、大学生和研究生,是一本极有价值的参考书。

本书的翻译出版得到李志坚、周炳昆、王启明及郑厚植四位院士的推荐,同时还获得国防工业出版社的资助;该社的江洪潮先生

在本书的审批及定稿过程中,给予了很多的帮助;中国科学院半导体研究所的宁瑾博士、李宁先生及亢亚萍女士,在整理和打印译稿的过程中做了大量工作,对此我一并深表感谢!

由于本书翻译的时间比较仓促,虽经反复审校,一定还会有不妥之处,恳请读者批评指正。

刘 忠 立

中国科学院半导体研究所

目 录

第1章 引言	1
--------------	---

第一部分 半导体物理

第2章 半导体	4
2.1 晶体结构	4
2.2 能带	5
2.3 本征半导体	8
2.4 非本征半导体	12
2.5 半导体中载流子的输运	14
2.5.1 漂移	15
2.5.2 扩散	15
2.5.3 磁场效应	17
2.6 半导体中载流子的产生和复合	19
2.6.1 载流子的热产生	19
2.6.2 电磁辐射产生载流子	20
2.6.3 带电粒子产生载流子	21
2.6.4 辐射产生电荷云的形状	23
2.6.5 倍增过程	25
2.6.6 复合	27
2.6.7 载流子的寿命	28
2.6.8 间接半导体中载流子的寿命	30
2.7 载流子产生及输运的同时处理	35
2.8 小结及讨论	37
第3章 基本半导体结构	40
3.1 pn 二极管结	40

3.1.1	热平衡中的 pn 二极管	40
3.1.2	有外加电压的 pn 二极管	44
3.1.3	用光辐照的 pn 二极管	47
3.1.4	电容—电压特性	51
3.1.5	强反偏压下的击穿	53
3.2	金属—半导体接触	58
3.2.1	电流—电压特性	61
3.2.2	欧姆接触	61
3.3	金属—绝缘体—半导体结构	62
3.3.1	热平衡条件	63
3.3.2	Si—SiO ₂ MOS 结构	71
3.3.3	电容—电压特性	72
3.3.4	非平衡及恢复到平衡	74
3.4	n ⁺ n 或 p ⁺ p 结构	75
3.5	小结及讨论	77

第二部分 半导体探测器

第 4 章	用于探测器的半导体	79
4.1	本征半导体材料的性质	79
4.2	非本征半导体材料的性质	85
4.2.1	半导体的掺杂	85
4.2.2	体缺陷	88
4.2.3	对材料性质的影响	90
4.3	绝缘体和金属	90
4.3.1	绝缘体的性质	91
4.3.2	半导体表面缺陷	91
4.3.3	金属的性质	92
4.4	探测器材料的选择	93
4.4.1	辐射同半导体的相互作用	94
4.4.2	电荷收集及测量精度	95
第 5 章	用于能量及辐射水平测量的探测器	97
5.1	无偏压二极管	97

5.2 反向偏压二极管	103
5.2.1 电荷收集及测量	106
5.2.2 表面势垒探测器	109
5.2.3 pn 结探测器	109
5.3 小结	111
第 6 章 用于位置及能量测量的探测器	112
6.1 电阻的电荷分配	112
6.2 二极管条形探测器	113
6.2.1 读出方法	115
6.2.2 电荷收集及测量精度	117
6.2.3 几何参数的选择	119
6.3 双面读出条形探测器	120
6.4 有集成电路读出耦合的条形探测器	124
6.5 漂移探测器	130
6.5.1 线列漂移器件	132
6.5.2 阵列漂移器件	137
6.5.3 径向漂移器件	140
6.5.4 单面结构器件	141
6.5.5 漂移器件的读出及测量精度	143
6.6 用作探测器的电荷耦合器件	145
6.6.1 三相“常规”MOSCCD 器件	145
6.6.2 线列及阵列 CCD 器件	147
6.6.3 电荷收集及电荷传输	147
6.6.4 信号读出	152
6.6.5 其它类型的 MOSCCD 器件	153
6.6.6 全耗尽 pnCCD 器件	154
6.7 小结	161
第 7 章 读出功能的电子电路	163
7.1 晶体管的工作原理	163
7.1.1 双极晶体管	163
7.1.2 结型场效应晶体管	171
7.1.3 金属—氧化物—半导体场效应晶体管	177

7.1.4 单极晶体管的阈值行为	189
7.1.5 不同类型的 JFET 及 MOSFET	192
7.2 噪声源	194
7.2.1 热噪声	194
7.2.2 低频电压噪声	195
7.2.3 散粒噪声	195
7.2.4 晶体管中的噪声	196
7.3 电荷测量	204
7.3.1 电荷灵敏放大器	205
7.3.2 电荷灵敏放大器的噪声	206
7.3.3 滤波及整形	207
7.4 基本电子电路	211
7.4.1 电流源及电流镜	211
7.4.2 反相器	213
7.4.3 源跟随器	216
7.4.4 级联放大器	217
7.4.5 差分放大器	218
7.5 集成电路工艺	220
7.5.1 NMOS 工艺	220
7.5.2 CMOS 工艺	222
7.5.3 双极工艺	223
7.5.4 SOI 工艺	223
7.5.5 混合工艺	224
7.6 用于条形探测器的集成电路	224
7.7 用于像素探测器的集成电路	228
7.8 条形探测器中的噪声——前端系统	229
7.8.1 偏置电路	229
7.8.2 偏置电路中的噪声	235
7.8.3 噪声相关性	242
7.9 小结	245
第 8 章 探测器及其电子电路的集成	248
8.1 探测器及其电子电路的混合系统	248

8.1.1 条形探测器	249
8.1.2 像素探测器	251
8.2 探测器—工艺—兼容的电子电路	252
第9章 具有本征放大的探测器	260
9.1 雪崩二极管	260
9.2 耗尽型场效应晶体管结构	264
9.2.1 耗尽型 p 沟 MOS 场效应晶体管(DEPMOSFET)	266
9.2.2 电学性质及器件的电路符号	268
9.2.3 其它类型的 DEPFET 结构	273
9.2.4 DEPFET 的性质及应用	275
9.3 DEPFET 像素探测器	276
9.3.1 具有随机存取读出的 DEPFET 像素探测器	277
9.3.2 连续工作的 DEPFET 像素探测器	278
9.3.3 混合的 DEPFET 像素探测器	280
9.3.4 具有三维模拟存储器的 DEPFET 像素探测器	280
第10章 探测器工艺	282
10.1 探测器衬底的生产	282
10.2 平面工艺的加工次序	283
10.2.1 光刻制造结构	284
10.2.2 化学刻蚀	285
10.2.3 掺杂	285
10.2.4 氧化	286
10.2.5 气相沉积	287
10.2.6 金属沉积	287
10.2.7 热处理	288
10.2.8 钝化	289
10.3 工艺模拟	289
第11章 器件稳定性及辐射加固	291
11.1 电击穿及保护	291
11.1.1 二极管条形探测器的击穿保护	292
11.1.2 探测器边缘的击穿保护	297
11.2 半导体中的辐射损伤	300

11.2.1	原始晶格缺陷的形成	301
11.2.2	稳定缺陷的形成及性质	302
11.2.3	缺陷络合物的电学性质	304
11.2.4	缺陷对探测器性质的影响	314
11.2.5	辐射损伤的退火	325
11.2.6	逆向退火	328
11.2.7	低通量辐射下辐射损伤的参数化	329
11.3	表面的辐射损伤	330
11.3.1	氧化物损伤	330
11.3.2	表面附近体损伤的不均匀性	332
11.4	探测器的辐射损伤	332
11.5	电子电路的辐射损伤	337
11.6	辐射加固技术	338
11.7	小结	340
第 12 章	器件模拟	342
12.1	数学公式	342
12.1.1	泊松方程及连续方程	343
12.1.2	稳态情形的深能级缺陷	344
12.1.3	准费密能级	347
12.2	稳态情形的数值解	350
12.2.1	问题的线性化	350
12.2.2	有限差分法	353
12.2.3	稳态问题的例子	360
12.3	时间相关情形的模拟	364
附录 A	常用符号	365
附录 B	物理常数	370
参考文献		371

第1章 引言

核带电粒子及辐射探测器,可以利用它们同物质的相互作用进行探测。为此目的最广泛采用的材料是气体(最早的例子是盖革—穆勒(Geiger-Muller)计数器),也采用液体(例如液氩)及固体材料。带电粒子及电磁辐射均可沿其飞行路径或在它们的相互作用点附近电离原子,从而产生可以被收集及直接测量的带电载流子。我们也可以利用二次效应,例如:在闪烁器中,使离子同电子复合产生光。

近几十年来发展了基于气体电离的各种电离核辐射探测器,这些探测器能够测量辐射的位置以及能量。尽管半导体探测器用于核能谱已有相当长的时间,但是半导体用于位置测量却是最近的事情,然而这个领域发展得很快。

位置敏感半导体的发展起源于实验粒子物理,这门学科需要能够测量精度约为 $10\mu\text{m}$ 同时以高速率工作的粒子径迹。这种测量的目的是基于研究 1976 年发现的稀薄灿粒子的行为。这种粒子较长的寿命($10^{-13}\text{s}\sim 10^{-12}\text{s}$)使得直接用这些探测器可观察到它们的短衰变时间。

采用微电子的工艺制造硅探测器使具有这些性质的探测器得到了发展,此工作是 20 世纪 70 年代由 Josef Kemmer 开拓的。1979 年用这种平面工艺技术制造的硅片探测器用来进行灿粒子搜索实验,它标志着包含用于发展半导体探测器读出的低噪声—低功耗模拟电子电路粒子物理实验技术革新的开始。其它的重要事件,是 1983 年 Emilio Gatti 及 Pavel Rehak 发明半导体漂移探测器,这种探测器的信号电荷输运是同半导体晶片表面平行的。

漂移室的原理及由平面工艺所开辟的技术可行性是很多新思

想及新概念的源泉,由此发明了同探测器集成在一起的电子电路以及一些全新的半导体结构。

同时,这些新的探测器扩展了它们的应用领域。用这些新的结构可以改善能量测量的能力,这使它们有利于纯能谱的应用,而且现在可能以更高速率以及在更高的温度下来完成。特别有意义的是,由此实现了位置和能量同时具有精确测量的可能性,例如在X射线天文学中便有这种要求。

本书旨在给出半导体探测器原理和性质的基本知识,而对应用则略加描述,并把重点放在发展最快的硅探测器上,由于它在电子电路中应用广泛,因而采用最先进的工艺技术,而且对其材料的性质了解也最深刻。第2章及第3章对同探测器相关的半导体基本性质以及一些大家熟知的结构进行回顾。第4章讨论用于核辐射探测的半导体特殊性质。第2章也讨论了作为核辐射探测基础的电荷产生的基本机制,几种半导体材料在这方面进一步的资料在第4章描述,而第11章则涉及辐射损伤。第4章还给出制造探测器结构的金属以及绝缘体的知识,第5章讨论最基本的辐射探测器,即有和没有偏压的整流结。第6章描述较复杂的探测器,这些探测器的共同特点是它们都能测量入射辐射的位置,尽管在某些应用中我们只是利用它们优良的能量测量能力。第5章及第6章描述的探测器没有本征放大性质,但在某些情况下,读出功能电子电路的一次放大元件同探测器是集成在一起的。第7章在讨论电荷测量之前先进行晶体管原理的基本解释,重点描述探测器产生的信号电荷测量精度的物理过程。由于微电子学在半导体探测器读出功能中起着越来越重要的作用,因此在同一章中也描述适于这些工艺的电子学电路元件,并且对某些集成电路工艺的基本性质进行讨论。本章结尾,简短介绍片式探测器的偏置方法以及同电子读出有关的噪声。第8章讨论探测器和辅助电子电路之间集成的问题,第9章描述具有本征放大的探测器。

第10章给出器件工艺的简短评论,这只对完全不熟悉探测器制造的人有意义。有关这方面知识广泛地包含在其它相关书籍

中。

第 11 章结合了(某种程度)器件稳定性、辐射损伤以及辐射加固相关的论题。器件电击穿的物理机制以及防止击穿发生的方法,既适合于辐射损伤引入前的探测器,也适合于辐射期间及辐射以后的探测器。在设计探测器时,我们必须考虑辐射损伤引入材料性质的变化。第 11 章的大部分内容涉及这些变化的物理原因及其参数化的方法。

数值模拟的结果贯穿全书。没有数值模拟,设计较复杂的探测器几乎是不可能的。第 12 章介绍器件模拟是如何完成的,为了达到简洁明了的目的,介绍限于一维,但是在模拟时,包括了在很多情况下被忽略而在辐射损伤的探测器中起主要作用的深能级缺陷。

本书最后的部分列出工作中有用的参考材料。附录 A 给出书中所用的常用符号。附录 B 汇编了众所周知的一些物理常数。书中单位的选择并不完全同国际标准统一。基本单位制对于长度用厘米,时间用秒,而能量用电子伏。参考文献部分列出了书中所涉及的参考书及杂志论文(采用哈佛格式)。

第一部分 半导体物理

第2章 半导体

很多优秀的著作(Spenke 1965; Smith 1979; Kittle 1976; Grove 1976; 及 Sze 1981 和 1985)都介绍过基本的半导体物理,感兴趣的读者可以参考这些著作。为了对探测器有一个半定量的了解,在这一部分内容中将作一简短的介绍,介绍的基础是将晶体的电子和空穴看成是微粒子,并且采用有效质量、平均自由程等这些由晶体周期势中电子量子力学计算得到的参数。本书不涉及半导体的量子力学基础,因为它可以在标准的文献(例如 Spenke 1965 及 Wang 1989)中找到。

半导体物理的内容限制在晶体材料范围内,本书不包括非晶体探测器。

2.1 晶体结构

最常用的半导体是金刚石晶格类型(Ge 及 Si)及闪锌矿晶格类型(GaAs)的单晶,其晶格示于图 2.1。

二种晶格都可以看作是由二个面心立方(fcc)子晶格套构而成的,一个子晶格可以沿立方体对角线移动 $1/4$ 距离取代另一个。金刚石晶格中所有原子都是相同的。每个原子都由四个属于其它面心子晶格的邻近原子所包围,它们构成一个四面体(见图 2.2 (a)),并且每个原子分享邻近原子的四个外部(价)电子,从而形