



《中国工程物理研究院科技丛书》第011号

半导体材料的 辐射效应

曹建中 等 著

科学出版社

《中国工程物理研究院科技丛书》 第 011 号

半导体材料的辐射效应

曹 建 中 等 著

科 学 出 版 社

1 9 9 3

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书以原子物理和核物理为基础,分析辐射与半导体材料相互作用的微观机制。全书共六章:第一章介绍半导体材料辐射效应的基础知识;第二章至第四章分别讨论半导体材料的辐射掺杂效应、电离效应和位移效应;第五章介绍了测量辐射损伤缺陷性质的重要方法;第六章介绍了材料的辐射效应与电子元器件辐射效应的关系。

本书可供大学原子核物理等有关专业师生参考;也可供从事抗辐射电子学研究和器件研制的有关人员参考。

《中国工程物理研究院科技丛书》第 011 号

半导体材料的辐射效应

曹建中等著

责任编辑 鄢德平 林鹏

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

北京朝阳大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993 年 5 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1993 年 5 月第一次印刷 印张: 10 3/8

印数: 1-1100 字数: 267 000

ISBN 7-03-003322-1/O·603

定 价: 12.00 元

《中国工程物理研究院科技丛书》出版说明

中国工程物理研究院建院三十年来，坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向，完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务，在许多专业学科领域里，不论在基础理论方面，还是在实验测试技术和工程应用技术方面，都有重要发展和创新，积累丰富的知识和经验，造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作，促进我院事业的继承与发展，系统地总结我院三十年来在各个专业领域里集体积累起来的经验，吸收国内外最新科技成果，形成一套系列科技丛书，无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科研工作的成果，内容涉及本院过去开设过的二十几个主要学科。现在和今后开设的新学科，也将编著出书，续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍，经编委会审定后，也纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给三十年来为我国国防现代化而献身的人们！

《中国工程物理研究院科技丛书》编审委员会

1989年1月25日

《中国工程物理研究院科技丛书》

编 审 委 员 会

主 任 杜祥琬

副主任 章冠人 华欣生

委 员 (以姓氏笔划为序)

水鸿寿 方乃相 王之康 王铁铮 刘庆兆

汤绍源 陈银亮 吴宏志 汪源浚 张永昌

张寿齐 张仕发 杨成龙 周正朝 姚景华

姜学贤 赵维晋 俞大光 胡再军 徐锡申

徐玉彬 高天祐 高国桐 董海山 赖祖武

丛书编辑部负责人 吴衍斌

本册编辑 吴衍斌

《中国工程物理研究院科技丛书》

已 出 版 书 目

001 高能炸药及相关物性能

董海山主编 科学出版社 1989年10月出版

002 光学高速摄影测试技术

谭显祥编著 科学出版社 1990年2月出版

003 凝聚炸药起爆动力学

章冠人等编著 国防工业出版社 1991年11月出版

004 线性代数方程组的迭代解法

胡家贇编著 科学出版社 1991年12月

005 映象与混沌

陈世刚编著 国防工业出版社 1992年2月

006 高温辐射物理与量子辐射理论

陈世昌编著 国防工业出版社 1992年3月

007 再入遥测技术 (上册)

谢铭勋编著 国防工业出版社 1992年3月

008 再入遥测技术 (下册)

谢铭勋编著 国防工业出版社 1992年3月

009 粘性消去法和差分格式粘性

郭柏灵著 科学出版社 1993 年 3 月

010 无损检测技术及其应用

张俊哲等著 科学出版社 1993 年 5 月

011 半导体材料的辐射效应

曹建中等著 科学出版社 1993 年 5 月

前 言

抗辐射电子学是 60 年代开始发展起来的一门新兴的、涉及固体（半导体）物理、表面物理、器件物理及其它半导体技术、原子物理和核物理、辐射剂量学和电子学等学科的、综合性很强的边缘学科。它主要包括辐射损伤机制、电子元器件及系统的辐射效应、加固技术和加固保证技术等四方面；辐射损伤机制是核心和基础。

早在 50 年代，人们就发现了辐射对半导体的损伤，但没有给予足够的重视。1963 年发现人造卫星穿越范·艾伦辐射带时，内部电子系统的晶体管因受辐射而失效，这才引起人们对半导体辐射损伤的重视，并着手进行研究。1965 年 Watkin 成功地利用电子顺磁共振（EPR）技术测量了中子在硅单晶中产生的损伤缺陷；从此，半导体辐射效应研究进入了系统深入的新阶段，并很快进入高潮。随着 MOS 器件的出现和广泛应用，从 70 年代初开始，研究的重点逐渐从以双极性器件为中心的位移效应转移到以 MOS 器件为中心的电离效应方面。大规模（特别是超大规模）集成电路出现之后，由于集成度的提高和单元线度的缩小，又出现了许多新的辐射响应机制（如单粒子效应和光电流效应引起的闭锁等），进一步丰富和深化了抗辐射电子学的内容。

抗辐射电子学是以原子物理和核物理为基础，分析辐射与半导体材料（也包括绝缘体、金属和空气）的相互作用和从固体（半导体）物理的角度分析这些作用对材料电性能的影响以及系统结构（或器件）内部发生的各种效应；研究辐射损伤机制和如何提高电子元器件和系统的抗辐射能力的一门学科。它的主要任

务在于研究辐射损伤模式和机理；并据此进行特定辐射环境下的效应预估、寻求合理有效的加固途径和可靠的加固保证技术，以解决电子元器件和系统在恶劣辐射环境中的辐射损伤失效问题和常规环境（本底辐射水平）下由辐射效应机制引发的可靠性问题。实际上，它的研究成果已被应用到许多方面，外延领域十分广泛。

本书主要从半导体材料电学性能的角度介绍辐射损伤机制研究的一些重要成果。全书共分六章。第一章简要介绍半导体物理、辐射以及辐射与物质相互作用的基础知识。辐射效应所涉及基础知识是很丰富的，难以在一章内对它们做出简明而完整的概括。一个效应工作者，能否熟练地运用原子物理、核物理和剂量学的知识，准确和透彻地分析辐射穿过物质时产生的相互作用的微观机制，以及从半导体（固体）物理角度分析这些作用的电学效应，是衡量其专业水平高低的标志。因此，读者需要参考其它的有关文献，以弥补本章的不足。

第二章至五章是本书的重点。第二章介绍半导体材料的辐射掺杂。辐射的掺杂效应对能量沉积来说是次要的；我们将其既作为一种有益的辐射效应、又作为一种新掺杂工艺加以介绍。第三章讨论电离效应：内容包括半导体绝缘体材料的瞬态电离效应和总剂量效应。单粒子效应也是一种重要的电离效应；由于它主要是大规模（或超大规模）集成电路的一种辐射脆弱性，经多方征求意见，最后决定将这部分内容删去。第四章介绍半导体材料的位移效应。位移效应与辐射产生的位移损伤缺陷性质紧密相关；所以，我们在第五章中介绍了一些测量辐射损伤缺陷性质的重要方法。除了介绍每种方法的原理和测试技术外，还结合每种方法的成功实例，说明如何使用这些方法分析损伤机制及其动态过程。第六章提要性地介绍了材料效应与电子元器件和系统辐射效应的关系和在其它方面的应用价值。

本书主要介绍半导体材料电学性质的辐射效应；其它性质，

如机械和光学性质的辐射效应和电磁脉冲效应等都没有涉及。虽然没有命名为“半导体辐射效应机理”，本书的内容事实上包括了辐射效应机理的各主要方面。

我们所的抗辐射电子学研究是在赖祖武研究员的创导和领导下，由吴宏志副研究员具体组指导进行的；开始于1968年。在有关电子元器件和系统抗辐射能力摸底工作的基础上，从1975年开始，在进行元器件效应工作的同时，也开展了辐射损伤机理、加固和加固保证技术的研究。本书是我们辐射机理研究工作的总结。参加这项工作的人很多，变动较大；参加全过程的有：赖祖武、吴宏志、景涛和曹建中。此外，黄世明、阎光彬、陈盘训、余仁根、冒逸、李培俊、和米榜以及陈琅轩、王更、梁跃文和向天兰也参加了部分工作。

本书是在院、所科技委的安排和领导下编写的。编写本书的目的是为了给后继人员提供一个较为全面的系统的资料，作为他们了解这个领域的概貌和深入研究的基础。借此公开出版的机会，我们想通过本书向具有一定物理和数学基础的读者介绍半导体辐射损伤机制的内容、分析方法和测量技术及发展概况，同时，作为从事这项工作的收获，与同行们交流。

编写本书的时候，我们假定读者具有物理专业大学本科水平。所以，没有过多地涉及有关的基本理论。在论述上力求突出物理概念，避免繁琐的数学推导。在取材方面，力求尽可能吸收公开发表的、较新的内容和数据。但是，限于笔者的水平和见闻，很可能达不到这个要求。希望读者注意参阅最近文献，以弥补可能存在的陈旧概念和数据。

赖祖武同志关心和鼓励本书的编写，并与包宗明教授（复旦大学）负责本书的专审，提出了许多有价值的修改意见；吴宏志和赵维晋负责本书的初审，也提出了一些重要的修改意见。此外，黄世明、吴衍斌和金家华同志也给了笔者许多帮助。在此一并致谢。

由于笔者的理论水平、实践经验和见识都有限，书中难免存在缺点错误，希望读者批评指正。

曹建中
92.10.24

目 录

第一章 基础知识	(1)
1.1 半导体物理基础	(1)
1.2 辐射的基本概念	(15)
1.3 辐射与物质的相互作用	(23)
参考文献	(45)
第二章 半导体的辐射掺杂	(47)
2.1 半导体的离子注入掺杂	(47)
2.2 中子嬗变掺杂	(54)
参考文献	(64)
第三章 电离效应	(66)
3.1 体半导体的电离效应	(66)
3.2 绝缘体材料的电离效应	(85)
3.3 辐射感生界面态和氧化物电荷	(107)
3.4 电离效应的相关性——剂量增强效应	(125)
参考文献	(127)
第四章 位移效应	(131)
4.1 位移损伤缺陷的形成	(131)
4.2 位移损伤缺陷对宏观电参数的影响	(152)
4.3 位移损伤的相关性	(179)
4.4 小结	(192)
参考文献	(195)
第五章 辐射损伤缺陷测量	(200)
5.1 电子显微镜方法	(200)
5.2 沟道-背散射方法	(203)

5.3	红外光谱方法	(231)
5.4	电子顺磁共振(EPR)方法	(240)
5.5	深能级瞬态谱仪(DLTS)方法	(267)
5.6	正电子湮没技术(PAT)	(284)
5.7	其它方法	(305)
5.8	小结	(307)
	参考文献	(308)
第六章	结语	(312)
6.1	电子材料辐射效应摘要	(312)
6.2	半导体元器件的辐射效应	(312)
6.3	辐射效应的应用	(313)

第一章 基础知识

1.1 半导体物理基础

1.1.1 能带理论

半导体是由大量原子组成的晶体。由于原子之间的距离很近,相邻原子上的电子轨道相互交叠,电子可以从一个原子转移到相邻的原子上去,出现电子共有化运动。共有化运动使孤立原子的允许分离能级分裂并合并成能带。能带由低至高分成许多组,分别与孤立原子的各能级相对应,每一组都含有大量能量很接近的能级。各相邻组(能带)之间的间隙称为禁带。电子按照不相容原理优先填满最低能带,填满电子的能带称为满带。能量最高的满带是价电子填充的能带,称为价带。价带以上的能带基本上是空的,其中最低的能带称为导带。导带最低能级(导带底)和价带最高能级(价带顶)之间的能量差 E_G 称为能隙或禁带宽度(见图 1.1)。

1.1.2 本征半导体

本征半导体是一种禁带中的能级密度很小或者它们对材料电学性质的影响可忽略不计的半导体。完美晶体的能级图可用来说明本征半导体的许多特征。在一定的温度下,价带中的一些电子,被热激发进入导带。通常把价带中出现的缺少电子的空能级看作正电荷载流子,称为空穴;而把导带中的负电荷载流子(电子)称为传导电子或电子。在有限温度下,导带和价带中的电子能量分布服从费米-狄拉克分布:

$$F_n(E) = [1 + \exp(\frac{E - E_F}{kT})]^{-1} \quad (1.1.1)$$

其中, $F_n(E)$ 是能量为 E 的能态被电子占据的概率; E_F 是费米能量; k 是玻耳兹曼常量; T 是绝对温度。

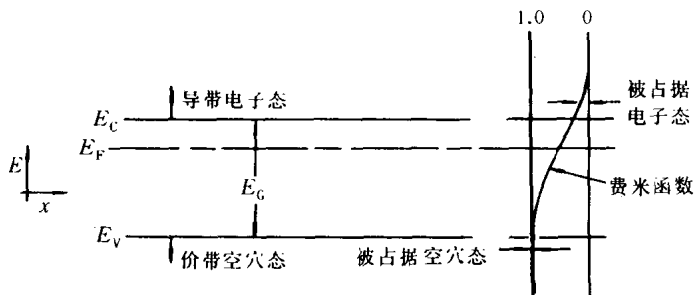


图 1.1 能带间隙和费米函数

价带和导带中的电子分布可用包含晶格温度 T 的费米函数 $F_n(E)$ 描述, 意味着这些能带中的电子与晶格振动处于热平衡。换句话说, 电子与晶格声子不断地相互碰撞, 以致达到热平衡。此时, 有效电子温度等于晶格温度, 电子和空穴的平均动能等于 $(3/2)kT$ 。故电子和空穴的平均热速率分别为:

$$(v_n)_{th} = \left(\frac{3kT}{m_n^*} \right)^{1/2} \quad (1.1.2)$$

$$(v_p)_{th} = \left(\frac{3kT}{m_p^*} \right)^{1/2} \quad (1.1.3)$$

其中, m_n^* 和 m_p^* 分别为导带电子和价带空穴的有效质量。

价带中能量为 E 的态被空穴占据的概率是:

$$F_p(E) = 1 - F_n(E) = \left\{ 1 + \exp\left(\frac{E_F - E}{kT}\right) \right\}^{-1} \quad (1.1.4)$$

$F_n(E)$ 和 $F_p(E)$ 分布见图 4.2。

当禁带中的费米能级与价带顶或导带底相距几个 kT 时, 我们称这样的材料为非简并的或常态的。此时, 若能量 E 处在 $(E-E_F)/kT \gg 1$ 范围内, $F_n(E)$ 可近似表示为:

$$F_n(E) = \exp\left[-\frac{E-E_F}{kT}\right] \quad (1.1.5)$$

和当能量 E 处在 $E_F - E/kT \gg 1$ 范围时, $F_p(E)$ 可近似表示为:

$$F_p(E) = \exp\left[\frac{E-E_F}{kT}\right] \quad (1.1.6)$$

上述结果表明, 导带中的电子集中在导带底附近; 价带中的空穴集中在价带顶附近。在这样狭窄的范围内, 一般半导体材料的能态密度 $\rho_{c或v}(E) \propto (E-E_c)^{\frac{1}{2}}$ 或 $(E_v-E)^{\frac{1}{2}}$ 。导带中总的电子密度可由能态密度乘以电子占据概率 $F_n(E)$, 然后在整个导带内 (从 E_c 至 ∞) 积分得到:

$$n = N_c \exp\left[-\frac{E_c-E_F}{kT}\right] \quad (1.1.7)$$

其中,

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} = 4.83 \times 10^{15} \left(\frac{m_n^*}{m_0}\right)^{\frac{3}{2}} T^{\frac{3}{2}} \quad (1.1.8)$$

N_c 是导带的有效态密度, h 是普朗克常量, m_0 是电子静止质量。同样, 态密度与 $F_p(E)$ 的积对整个价带 (E_v 至 $-\infty$) 的积分, 即是价带的空穴密度:

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F-E_v}{kT}\right) \quad (1.1.9)$$

其中,

$$N_v = 2\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} = 4.83 \times 10^{15} \left(\frac{m_p^*}{m_0}\right)^{\frac{3}{2}} T^{\frac{3}{2}} \quad (1.1.10)$$

N_v 是价带的有效态密度。

对非简并半导体，电子密度与空穴密度的乘积

$$np = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{kT}\right) = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right) \quad (1.1.11)$$

与费米能（即掺杂浓度）无关。因而，无论掺杂半导体或本征半导体， np 都相等。根据电荷守恒定律，本征半导体的 n 和 p 应相等，都等于按(1.1.12)式定义的本征载流子浓度 n_i ：

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right) \quad (1.1.12)$$

因此，若假设迁移率本质上是个与温度有关的常数，则本征半导体的电导率随温度指数地变化，其斜率正比于 $E_G/2$ 。

令(1.1.7)式和(1.1.8)式相等，得到具有抛物线能带的本征半导体的费米能级为：

$$E_F = \frac{E_G}{2} + kT \ln \sqrt{\frac{N_v}{N_c}} = \frac{E_G}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right) \quad (1.1.13)$$

能量的量度从价带顶算起。上式中 $\frac{E_G}{2}$ 项代表禁带的中心线，后面一项因 N_c 往往比 N_v 大几倍，所以为负值。因此，本征半导体的费米能级是位于禁带中心线以下的（偏离中心线的量级为 kT ）。

由于运动的电子或空穴与晶格电荷的相互作用，晶体中的有效质量 m_n^* 和 m_p^* 往往不等于自由电子质量 m_0 而是可用 $E(K)$ 函数（ K 为动量）曲线曲率来表示的：

$$m^* = \hbar^2 / \left(\frac{\partial^2 E}{\partial K^2} \right) \quad (1.1.14)$$

像硅和锗这类具有非对称恒定能量面 and 多重谷的半导体，对不同的谷和恒定能量面的各个不同取向，电子和空穴的有效质量是不同的。就诸如电导率和态密度的平均效果而言，合适的有效