

实验物理学丛书

194529

粒子同固体相互作用物理学

上册

王广厚 著



科学出版社

实验物理学丛书

粒子同固体相互作用物理学

上册

王广厚 著

科学出版社

1988

元 68.00

80 册 50 字 841 页 开青英译

内 容 简 介

粒子同固体相互作用物理学是一门介于核物理与固体物理之间的交叉学科。本书讨论了这一学科的基本理论、实验方法和在科学技术中的应用。作者试图将三者有机地结合起来，系统地进行阐述，并用适当的篇幅详细介绍了实验方法和技术应用的新近发展。

本书可供原子核物理和核技术、固体物理和材料科学等方面从事研究、教学和应用的科技人员及大专院校有关专业师生参考。

实验物理学丛书

粒子同固体相互作用物理学

上 册

王 广 厚 著

责任编辑 荣毓敏 姚为克

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988年7月第一版 开本：850×1168 1/32

1988年7月第一次印刷 印张：19 7/8

印数：精 1—700 插页：精 2

平 1—1,800 字数：520,000

ISBN 7-03-000327-6/O·88

定价：布面精装：9.80 元

平 装：6.30 元

科技新书目：168-平 081 精 082

《实验物理学丛书》编委会序

实验是物理学发展的基础,又是检验物理理论的唯一标准。回顾物理学发展的历史,正是实验技术的发展,推动着整个物理学向前发展。因此,实验是物理学和一切科学技术发展的基础。

为了适应我国科技事业发展的需要,强调实验物理学的重要性,并总结我国物理学工作者在实验工作中的创新和实践经验,我们特编辑出版《实验物理学丛书》。

本丛书的编辑方针是: 1. 密切联系当前科研、教学、生产的实际需要,介绍各种物理实验的基本原理、技术、设备及其在各方面的应用。 2. 反映国内外最新的实验水平和发展动向,并注意实用性。 3. 以科技工作者和高等院校师生为对象,坚持理论联系实际,贯彻百家争鸣的方针,力求使丛书具有我国的特色和风格。

我国科技事业的发展已进入一个新的时期,实现科学技术现代化是我国广大科技工作者肩负的光荣而艰巨的任务。我们诚恳地希望广大物理学工作者发挥为社会主义事业著述的积极性,不断总结实践经验,总结研究成果,积极支持丛书的出版工作,共同为出好该丛书而努力。

《实验物理学丛书》编委会

《实验物理学丛书》编委会

主编 钱临照
副主编 王淦昌 王大珩 柯俊 洪朝生 管惟炎
编委 王之江 王业宁 王守觉 王华馥 王祝翔 许顺生
华中一 苟清泉 何寿安 吴自勤 张志三 汤定元
杨 桢 杨顺华 项志遵 姜承烈 徐其昌 徐叙瑒
章 综 郭可信 龚祖同 黄兰友 梅镇岳 程晓伍
薛鸣球 魏荣爵 王昌泰

会委编《丛书学野特编委》

序

70多年前，著名物理学家卢瑟福及其合作者利用 α 粒子轰击金箔，观测到背散射的现象，从而证实了原子核的存在，并建立了原子的有核结构模型，为微观世界的研究揭开了序幕。随后 Cockroft 与 Walton 首先制成了高压倍加器，开创了人工方法加速带电粒子的新纪元。从此，各种类型的粒子加速器相继问世，成为研究微观世界的主要实验手段。时至今日，加速器愈造愈大，继卢瑟福以后，高能物理学家们采用更高能量的粒子束来轰击靶材，或与另一粒子束相撞，从粒子束的散射研究中来索取有关基本粒子结构的信息。这反映了问题的一个方面，即基础研究愈来愈深入到微观世界更细微的层次。但另一方面，昔日的基础研究有些已转化成应用研究，例如：原始的卢瑟福背散射技术已成为表征固体材料的一种标准方法，可用以测定杂质原子在半导体中的分布；而应用高压倍加器及其它低能加速器发展起来的离子注入技术也在半导体的掺杂与材料改性方面获得了大量的应用，对于国民经济建设具有显著的效益；目前绝大多数的低能加速器的研究重点已从核物理本身转移到固体物理、材料科学以及化学、生物等应用领域。通过核物理学家和其它学科的科学家们的共同努力，开创了一门介于核物理与固体物理之间的新兴交叉学科——带电粒子与固体的相互作用。由此衍生的各种技术在材料科学中的应用，亦正方兴未艾。我国有许多单位已开展了这一领域中的研究和开发工作。因此，不论是人才的培养或技术的开拓，都迫切需要一本专著或教科书，深入浅出地叙述有关的基本理论，并对整个领域发展现状给予适当的介绍。

王广厚同志于1980—1982曾在美国纽约州立大学奥尔巴尼分校物理系进修，进行了一系列有关粒子与固体相互作用的研究

前 言

带电粒子同物质相互作用的研究为近代物理学奠定了基础，人们对微观世界层次——原子核、基本粒子——的认识也以此为开端。近代物理学上许多重大的成就，都是从研究带电粒子的行为获得的。早在 20 世纪初，卢瑟福用 α 粒子对金属箔片的散射实验证实了原子核的存在，揭开了原子世界的奥秘。随着带电粒子加速器的建成，可以人工地产生带电粒子束，人们研究微观世界物质结构的手段更加强有力了。在向物质世界更深层次——基本粒子结构进军的同时，原子核物理学家同其它领域的科学家们结合起来，利用核物理及小型粒子加速器这一工具，向原子分子物理、固体物理以及化学、生物学和医学等方面渗透与发展。这不仅大大促进了这些学科的发展和进化，形成了一些生命力很强的交叉学科，而且把由实验核物理发展起来的现代科学技术直接为人类生产和生活服务，进一步推动着科学革命和技术革命。例如，被称作三束技术的离子束、电子束和光子束，推动了半导体器件和集成电路的高速发展，使半导体生产进入到超大规模集成电路的新时代。离子束分析方法是特有的高灵敏度和高效率微探针技术，这一方法已广泛应用于各个科学技术领域。带电粒子同固体相互作用物理学就是一门原子核物理和固态物理相互渗透的边缘学科，也是理论和实验密切结合的新兴学科。它的发展和应用不仅为研究固态物质结构和特点提供了强有力的工具，而且为工业、农业、国防、现代科学技术以及人民生活提供更多更好的新型材料。正因为如此，从六十年代中期开始，这一学科在国外发展极为迅速，各种类型的低能加速器很快转向这方面的研究工作。国际会议也相当多，如固体中原子碰撞会议 (Conference On Atomic Collisions in Solids)，离子束分析会议 (Conference On Ion Beam

Analysis)。离子束材料改性会议 (Conference On Ion Beam Modifications of Materials), 小型加速器在科学研究和工业中应用会议 (Conference On the Applications of Small Accelerators in Research and Industry) 以及粒子-固体相互作用的戈登研究会议 (Gordon Research Conference on Particle-Solid Interaction) 等。国内不少单位正在大力开展这方面的研究和应用工作。

本书系统地讨论了粒子同固体相互作用物理学的基本理论、实验方法和在科学技术中的应用。作者试图将三者有机地结合起来, 用较统一的观点处理各方面的典型事例。理论上以林哈德 (Lindhard) 固体中原子碰撞的思想为线索, 吸取国际上现有主要学派的长处, 并根据作者自己研究工作的体会, 从带电粒子与物质相互作用的基本物理过程、理论和实验研究方法, 一直到该学科最新发展方向和最活耀的研究领域, 连贯地加以阐述。

除第一章引言部分为预备知识外, 全书大致分为五个部分。第一部分, 带电粒子在无定形物质中的运动 (第二、三章和第四章); 第二部分, 带电粒子在晶体中运动的沟道效应 (第五章和第六章); 第三部分, 离子注入和离子束混合 (第七章和第九章); 第四部分为辐照损伤 (第八章), 这一部分内容在粒子同固体相互作用中占有特殊位置; 第五部分论述的沟道辐射 (第十章) 是根据作者最近一篇评述性文章, 并结合本人在这方面的实验工作经验所写的。

本书根据作者在南京大学物理系给研究生讲授“粒子同固体相互作用物理学”的讲义加以修改和补充而成。写成本书时, 作者对讲义内容作了很大的扩充和发展。但是, 由于这一领域是蓬勃发展的新兴学科, 内容丰富而广泛, 并且正在向各个科学技术领域渗透, 因此本书不可能包括所有的理论和实际问题, 即便在书中已经讨论过的内容中, 也还是有不少课题属于探索性的, 加之时间紧迫和本人知识水平所限, 书中一定存在不少缺点和错误, 望读者批评指正。

作者曾于 1980—1982 年在美国纽约州立大学 (奥尔巴尼) 物

理系，与吉卜森 (W. M. Gibson)、孙至锐 (C. R. Sun)、陈显邦 (N. Cue) 和斯科茨 (W. Scholz) 等教授合作，从事粒子-固体相互作用方面多项课题的科学研究，受益匪浅，为本书写作打下一定基础。中国科学院学部委员、南京大学物理系冯端教授始终关心和支持本书的写作和修改工作，在百忙中审阅了全部原稿，并提出许多宝贵的修改意见。本书在写作过程中还得到其它许多国外专家教授的支持和帮助，如戴维斯 (J. Davies) (加拿大 Chalk River)、迈耶 (J. Mayer) (美国康乃尔大学)、费尔德曼 (L. Feldman) (美国 Bell 实验室)、朱维干 (W. K. Chu) (美国 North Carolina 大学)、皮克罗 (S. Picraux) (美国 Sandia 实验室)、林哈德 (J. Lindhard)、安德森 (J. U. Andersen) 和邦德罗卜 (E. Bonderup) (丹麦科学院和 Aarhus 大学) 和西格蒙德 (P. Sigmund) (丹麦 Odense 大学) 等；魏荣爵、程开甲、李恒德、龚昌德、杨福家、施士元、周瑞英、王忠烈和冯致光等教授和学者都以多种方式给予作者支持和鼓励。作者谨向他们表示衷心感谢。

王广厚

02	.....	三
03	.....	四
11	.....	2.5.2
15	.....	2.5.2
05	.....	一
08	.....	二
12	.....	三

目 录

上 册

前言.....	xi
第一章 引言.....	1
§ 1.1 粒子同固体相互作用物理学讨论范围.....	1
§ 1.2 各种能量下粒子同固体相互作用的应用.....	2
§ 1.3 原子物理的概念和定义.....	3
一 玻尔原子和单位.....	4
二 卢瑟福散射.....	5
三 运动学.....	10
四 原子的激发和电离——非弹性碰撞.....	11
第二章 带电粒子在原子为无序分布物质中的运动.....	14
§ 2.1 能量损失的定性描述.....	14
一 概念和定义.....	14
二 库仑散射和能量损失.....	19
三 托马斯-费米原子.....	21
§ 2.2 核阻止.....	25
一 简单的相互作用势.....	26
二 散射截面.....	28
三 弹性能量损失.....	33
§ 2.3 电子阻止和迁移截面.....	36
一 电子气体中的阻止能力.....	36
二 散射势.....	41
三 迁移截面.....	43
四 低速下电子阻止截面.....	46
§ 2.4 电子阻止的量子力学处理.....	49
一 玻恩近似计算电子阻止能力.....	50
二 贝特公式的修正.....	60

三	中速区域的电子能量损失	68
四	阻止截面的线性相加	70
§ 2.5	能量损失的测量方法	71
§ 2.6	能量离散	74
一	电子对能量离散的贡献	76
二	核碰撞对能量离散的影响	80
三	能量离散的线性相加	82
§ 2.7	离子穿进物质的电荷状态	83
一	电子俘获和损失	85
二	平衡电荷态的分布	89
三	原子跃迁和固体中电荷平衡	94
第三章	离子束分析固态材料的组分和结构	99
§ 3.1	离子背散射谱学	100
一	运动学因子和微分散射截面	101
二	深度刻度	105
三	背散射产额——能谱高度	116
§ 3.2	各种靶的背散射谱	119
一	单元素靶	119
二	化合物靶($\theta_1 = 0$, 垂直入射)	129
三	混合物的分析	138
四	杂质的深度分布	142
§ 3.3	背散射实验方法和仪器	148
一	加速器	149
二	能量稳定系统	153
三	真空系统	154
四	散射束能量分析的电子学系统	157
§ 3.4	低能离子散射	160
一	与“高能”(兆电子伏)离子散射的联系和区别	161
二	低能离子在固体表面中性化	163
三	组分分析	167
四	表面结构	171
五	聚合物表面的研究	174
§ 3.5	中能离子散射	183

142	一	作为低能离子散射的上限	184
142	二	轻离子的背散射	186
142	三	背散射粒子的电荷态	193
142	§ 3.6	粒子感生 X 射线发射 (PIXE)	195
142	一	轻离子产生 X 射线	197
142	二	重离子产生 X 射线	204
142	三	X 射线探测	212
142	四	本底辐射	214
142	五	PIXE 定量分析方法	218
142	六	PIXE 分析特点及应用	226
142	§ 3.7	核反应分析	240
142	一	核反应分析的一般特点	240
142	二	定量分析	244
142	三	分析研究的范围	254
142	四	材料中的氢剖析	257
	第四章	溅射物理	267
142	§ 4.1	溅射的一般描述	267
142	一	运动粒子同固体表面的相互作用	267
142	二	溅射的基本概念	270
142	§ 4.2	溅射理论	275
142	一	溅射分类	275
142	二	玻耳兹曼迁移方程	277
142	三	线性级联理论的基本特点	279
142	四	线性碰撞级联的溅射	283
142	五	简单级联碰撞理论的修正	298
142	六	透射溅射	312
142	§ 4.3	溅射的钉扎模式	313
142	§ 4.4	多组分靶的溅射	321
142	一	初级效应	322
142	二	次级效应——表面组分的变化	325
142	三	固态化合物的溅射	327
142	§ 4.5	溅射粒子的电荷状态	332
142	一	基本假定	333

881	二 电离理论	334
881	三 实验验证	342
891	§ 4.6 二次离子质谱 (SIMS)	346
901	一 二次离子质谱的实验条件	346
907	二 多组分的 SIMS 分析	349
908	三 金属离子簇溅射	356
918	§ 4.7 离子感生辐射和非辐射跃迁	365
918	一 离子中性化谱学	365
918	二 离子感生俄歇电子谱学 (IAES)	379
928	三 中性和离子感生辐射分析表面组分 (SCANIR)	391
948	§ 4.8 溅射物理的应用	394
948	附录 向前和向后玻耳兹曼方程的联系	395
	第五章 带电粒子在晶体中的沟道效应	399
958	§ 5.1 沟道效应和连续模型	399
968	一 晶格的取向和沟道	399
970	二 轴沟道的连续模型	403
988	三 晶格原子热振动的影响	412
988	四 平面沟道	414
998	§ 5.2 沟道的统计平衡理论	416
998	一 统计模型的基本考虑	416
998	二 横能量分布及反应产额	418
998	三 粒子在沟道中通量分布——通量峰效应	424
998	四 计算机模拟和平衡连续模型的局限性	434
988	§ 5.3 沟道离子的能量损失	439
988	一 玻姆-派恩斯 (Bohm-Pines) 模型	440
998	二 空间周期性电子气中的能量损失	442
998	三 芯电子对沟道离子能量损失的贡献	448
998	§ 5.4 离子在晶格中的退道	453
998	一 阻止能力与退道率	454
998	二 原子核和热振动原子的散射	459
998	三 电子引起的散射	464
998	四 退道的稳定增加模型	469
998	五 轴向沟道的扩散模型	470

六	晶体缺陷引起的退道	481
§ 5.5	表面非晶层对沟道的影响	486
§ 5.6	平面退道	496
附录	扩散方程的数值解	501
第六章	沟道效应和阻塞效应的应用	506
§ 6.1	沟道实验的特点	506
一	晶体定位——定向谱和随机谱	507
二	阻塞效应	512
§ 6.2	晶格中杂质原子定位	515
一	基本原理	515
二	晶格对称性和杂质原子位置	516
三	“完全”替代的杂质原子	517
四	“不完全”替代的情况	518
五	间隙原子	521
六	内壳层 X 射线产额的沟道关联	528
§ 6.3	缺陷分析	530
一	点缺陷	531
二	晶体覆盖非晶或多晶薄膜	533
三	位移原子的随机分布	536
四	考虑沟道效应的位移原子分布	544
五	位错退道	548
六	堆积层错和孪晶	555
§ 6.4	表面和界面的研究	561
一	离子同表面原子的作用	561
二	晶体的表面结构和表面峰	568
三	表面重构	570
四	表面弛豫	573
五	衬底荫蔽: Ag(111) 面的外延层 Au	574
六	阻塞方法确定表面吸附原子的位置	576
七	金属-半导体界面的反应	578
§ 6.5	原子核寿命的确定	580
一	阻塞法测量核寿命的原理和方法	581
二	质子和中子引起的裂变寿命	585

184	三 重离子感生裂变	587
184	四 基本粒子寿命	593
189	§ 6.6 高能沟道效应	596
197	一 实验方法	597
202	二 透射粒子角分布	601
207	三 环形效应——横能量均衡特性	606
207	四 弯曲晶体的沟道效应	610
212	五 可能的应用	615

下 册

184	第七章 离子注入及其应用	一
184	第八章 辐照损伤	二
184	第九章 离子束引起原子混合	三
184	第十章 沟道辐射	四
222	第十一章 离子束与物质的相互作用	五
222	第十二章 离子束在材料科学中的应用	六
222	第十三章 离子束在医学中的应用	七
222	第十四章 离子束在农业中的应用	八
222	第十五章 离子束在工业中的应用	九
222	第十六章 离子束在环境科学中的应用	十
222	第十七章 离子束在空间科学中的应用	十一
222	第十八章 离子束在基础科学中的应用	十二

第一章 引言

§ 1.1 粒子同固体相互作用物理学讨论范围

粒子同固体相互作用物理学是讨论一束质量为 M_1 、电荷为 Z_1e 的带电粒子(有时叫做投射体)以速度 v 打到一片含有原子序数为 Z_2 和质量为 M_2 的固态物质(有时叫做靶)上所发生的相互作用现象和物理过程。主要入射粒子是质子和质量不等的各种离子,不包括中性粒子(如中子、中性介子和中微子等)。但是,有些中性粒子(如中子)同物质相互作用所引起固体物质的某些问题是可以利用离子束分析的方法来很好地研究的,如反应堆壁和材料因中子辐照产生的辐射损伤。还有一些带电粒子的问题不是我们讨论的范围,如等离子体问题,包括聚变反应堆和聚变溅射现象等。至于入射粒子同靶原子核发生强相互作用的过程,我们除了对某些核反应过程所得到的结果加以研究(如阻塞效应测量复合核寿命等)外,对其它细节不作过多的描述和讨论。固态靶物质可以是单元素原子,也可以是多元素原子,甚至是以分子、高分子(如聚合物)的形式存在。但是为了讨论方便,在大多数理论处理过程中,我们仅限于一种元素构成的物质。有时在某些特定条件下,把固体中的原子当作气体原子来处理,这样取得的近似结果,同实验比较后再加以修正。

从基本粒子的观点看,带电轻粒子(这里系指电子和正电子)参与电磁相互作用和弱相互作用这两种过程。 β 衰变属于弱作用,不在我们讨论之列;正、负电子湮灭放出光子过程属于电磁相互作用,是粒子同固体相互作用的一个重要方面。近年发展起来的正电子谱仪已经广泛地应用到固体材料的研究中,并有不少专著发表,在此我们不对这方面的内容做详细讨论,只在后面章节讨