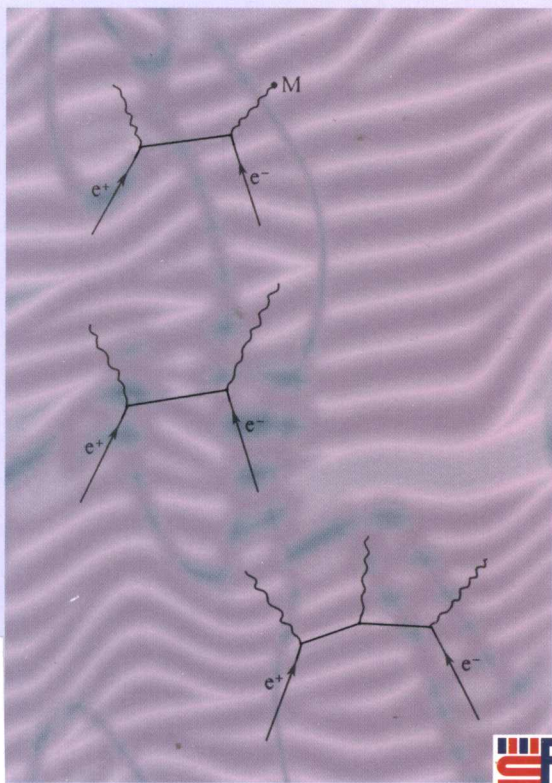




应用物理学丛书

正电子物理及其应用

郁伟中 编著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书全面介绍正电子湮没技术和谱学,将核技术用于研究固体、液体中与缺陷和相变有关的物理化学性质的测试手段。

本书第一章简要介绍正电子湮没技术的四种实验方法,第二章介绍正电子湮没谱学的基本原理,第三章和第十章详细介绍了常规正电子方法和慢正电子方法,第十一章介绍了正电子湮没在大学物理教学实验中的应用,其余的第四到第九章介绍了正电子湮没在金属、非晶态和纳米晶、半导体、离子晶体、聚合物、液晶等方面的应用。

本书可供材料相关专业的科技人员和大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

正电子物理及其应用/郁伟中编著. —北京:科学出版社, 2003.1

(应用物理学丛书/吴自勤,杨国桢主编)

ISBN 7-03-010307-6

I. 正… II. 郁… III. 正电子-电子物理学 IV. O572.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第018817号

责任编辑:李义发 张邦国/责任校对:柏连海

责任印制:安春生/封面设计:黄华斌 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年1月第一版 开本:850×1168 1/32

2003年1月第一次印刷 印张:16

印数:1—2 000

字数:411 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

《应用物理学丛书》出版说明

1978年夏在庐山召开的中国物理学会年会（“十年动乱”结束后的全国物理学界第一次大型学术会议）上，部分与会专家与学者经过充分酝酿和热烈讨论后一致认为，为了迎接科学春天的到来和追赶世界先进科学技术水平，有必要编辑出版一套《实验物理学丛书》，并组成以钱临照院士为主编，王淦昌等5位院士为副主编，王之江、王业宁等26位院士或专家为编委的《实验物理学丛书》编委会。

20年来，这套丛书在钱临照院士的主持下，通过编委们的积极工作（有的编委还亲自撰稿），先后出版了《实验的数据处理》、《X射线衍射貌相学》、《粒子与固体相互作用物理学》、《压电与铁电材料的测量》、《电介质的测量》、《物理技术在考古学中的应用》及《材料科学中的介电谱技术》等20部实验物理学著作。这些著作都是实验、科研和教学的系统总结，出版后受到读者的欢迎和好评，有不少被评为国家级、部级和院校级的优秀科技图书，如《实验的数据处理》一书获第一届全国优秀科技图书一等奖。这套丛书的陆续出版，在社会上引起较大影响，在科研、教学、经济建设和国防建设中发挥了积极的作用。

改革开放以来，我国在各个方面发生了翻天覆地的变化，经济体制由计划经济逐步转向社会主义市场经济，科学技术和教育也得到了空前的发展。为了适应社会主义市场经济的需要和满足社会的需求，我们决定对原丛书的出版宗旨、选题方向做相应的调整，重新组建编委会，并将原丛书更名为“应用物理学丛书”，使新丛书能在“科教兴国”和将科学技术转化为生产力的伟大实践中发挥更大的作用。

《应用物理学丛书》的出版宗旨和选题方向如下：

1. 密切联系当前科研、教学和生产的实验需要，介绍应用物理学各领域的基本原理、实验方法、仪器设备及其在相关领域中的应用，并兼顾有关交叉学科。

2. 反映国内外最新的实验研究与技术水平和发展方向，并注重实用性。

3. 以大专院校师生以及科研单位、国防部门、工矿企业的科研人员为对象，理论与实验紧密联系。

这套丛书将按照“精而准、系统化”的原则，力求保持并发展原《实验物理学丛书》已形成的风格和特色，多出书、出好书。

需要强调的是，《应用物理学丛书》将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们坚信，在编委们的共同努力下，在广大科研和教学人员的积极参与和大力支持下，《应用物理学丛书》的出版将对我国科学技术和教育事业的持续发展发挥积极的作用！

《应用物理学丛书》编委会

目 录

第一章 正电子湮没技术基本原理介绍	(1)
§ 1.1 前言	(1)
§ 1.2 正电子和正电子湮没	(3)
§ 1.3 正电子湮没技术的四种实验方法	(4)
1.3.1 正电子湮没寿命测量	(4)
1.3.2 2γ 湮没角关联测量	(8)
1.3.3 湮没 γ 射线多普勒增宽能谱测量	(12)
1.3.4 慢正电子谱测量	(15)
参考文献	(17)
第二章 正电子湮没谱学基础	(18)
§ 2.1 正电子是电子的反粒子	(18)
2.1.1 狄拉克理论	(18)
2.1.2 安德森发现正电子	(21)
2.1.3 正电子的性质	(24)
§ 2.2 正电子湮没	(25)
2.2.1 正电子湮没截面	(25)
2.2.2 狄拉克湮没率公式	(27)
2.2.3 正电子在金属中的湮没率	(27)
2.2.4 关联效应	(29)
2.2.5 增强因子	(31)
2.2.6 正电子和 d 电子湮没	(33)
2.2.7 理论计算中的增强因子	(35)
§ 2.3 均匀介质中的正电子动力学	(38)
2.3.1 正电子的热化	(38)
2.3.2 正电子的注入深度剖面	(41)

2.3.3	注入深度分布的测量	(43)
2.3.4	正电子在固体中的扩散	(46)
2.3.5	电场中正电子运动	(48)
2.3.6	热化正电子的微观分布	(49)
§ 2.4	非均匀介质中的正电子动力学	(50)
2.4.1	晶体缺陷	(50)
2.4.2	单空位处电子密度的变化和简单图像	(51)
2.4.3	空位型缺陷捕获正电子	(52)
2.4.4	捕获模型的发展史	(53)
§ 2.5	电子偶素	(54)
2.5.1	电子偶素的性质	(55)
2.5.2	湮没选择定则	(58)
2.5.3	电子偶素的湮没率	(59)
2.5.4	电子偶素的撞击 (pick-off) 湮没	(60)
2.5.5	俄勒模型和径迹模型	(61)
2.5.6	自由体积模型和早期应用	(67)
2.5.7	刚性分子固体中微空洞的计算	(71)
§ 2.6	3γ 湮没和电子偶素的测量	(73)
2.6.1	3γ 湮没的测量	(73)
2.6.2	Ps 的探测	(76)
	参考文献	(80)
第三章	正电子湮没实验技术	(86)
§ 3.1	正电子源	(86)
3.1.1	正电子源的选择	(87)
3.1.2	放射源的制备	(90)
§ 3.2	正电子湮没寿命谱仪	(93)
3.2.1	两种寿命谱仪	(93)
3.2.2	寿命谱仪中的探测器	(97)
3.2.3	寿命谱能窗的确定	(102)
3.2.4	寿命谱时间分辨率的测定	(103)

3.2.5	寿命谱的测定	(106)
3.2.6	有缺陷样品的寿命谱	(107)
3.2.7	寿命谱的分析程序	(107)
3.2.8	寿命谱质量的分析	(109)
3.2.9	源修正	(111)
3.2.10	绝对空位浓度求导	(112)
§ 3.3	正电子湮没多普勒增宽谱仪	(113)
3.3.1	多普勒增宽谱仪中主要器件	(113)
3.3.2	多普勒增宽谱的数据处理	(114)
3.3.3	多普勒增宽谱分辨函数的改善	(117)
3.3.4	多普勒增宽谱测量的精度	(120)
3.3.5	复合的湮没谱系统	(120)
§ 3.4	角关联方法和金属中电子动量密度和费米 面	(124)
3.4.1	前言及早期的历史	(124)
3.4.2	实验技术	(126)
3.4.3	近期的发展	(133)
参考文献		(134)
第四章	热平衡缺陷	(138)
§ 4.1	前言	(138)
§ 4.2	热平衡状态	(139)
4.2.1	点缺陷浓度与温度的关系	(139)
4.2.2	点缺陷浓度和压强的关系	(142)
4.2.3	形成焓和形成焓的温度关系	(143)
4.2.4	杂质的影响	(143)
§ 4.3	研究热平衡缺陷所用的实验技术	(144)
4.3.1	电阻率	(144)
4.3.2	量热法测量	(145)
4.3.3	热膨胀测量	(145)
4.3.4	正电子湮没技术测量	(147)

5.5.5	离子注入和重离子辐照后的正电子研究	(217)
§ 5.6	氢脆及金属氢化物的研究	(217)
5.6.1	氢脆研究	(217)
5.6.2	金属氢化物的研究	(223)
5.6.3	反应堆材料中气泡的研究	(224)
5.6.4	氢-钯系统和氘-钯系统中的研究	(224)
§ 5.7	固态相变	(226)
5.7.1	bcc-fcc 转变	(228)
5.7.2	马氏体相变	(229)
5.7.3	GP 区	(231)
5.7.4	有序无序转变	(232)
§ 5.8	固态液态相变	(234)
§ 5.9	金属研究中的另外几个例子	(236)
5.9.1	缺位固溶体	(236)
5.9.2	高温结构金属中空位的回复	(237)
5.9.3	合金中原子的偏聚	(238)
5.9.4	镀铁层的结构研究	(238)
5.9.5	蠕变	(239)
5.9.6	形状记忆合金	(240)
参考文献		(241)
第六章	正电子湮没在非晶态和纳米晶中的应用	(248)
§ 6.1	前言	(248)
6.1.1	非晶态合金的结构	(248)
6.1.2	非晶态合金的制备	(249)
6.1.3	早期工作后的启迪	(250)
§ 6.2	缺陷研究	(251)
6.2.1	Bernal 空位	(251)
6.2.2	非晶态的形变和辐照研究	(253)
§ 6.3	结构弛豫研究	(254)
§ 6.4	晶化过程	(256)

§ 6.5	电子结构	(259)
§ 6.6	结晶度	(260)
§ 6.7	微晶	(260)
§ 6.8	正电子湮没技术在纳米晶体中的应用	(262)
6.8.1	纳米晶体	(262)
6.8.2	从非晶态制备纳米晶体	(265)
§ 6.9	碳 60 (C_{60})	(266)
参考文献		(269)
第七章 正电子湮没在半导体中的应用		(273)
§ 7.1	半导体的性质	(273)
§ 7.2	正电子湮没技术测量半导体的体效应	(274)
7.2.1	半导体体性质的正电子方法研究	(275)
7.2.2	生产的硅棒和其它半导体体材中缺陷分布	(278)
7.2.3	生产温度对缺陷的影响	(280)
7.2.4	形变和压力对缺陷的影响	(280)
7.2.5	晶体缺陷和掺杂效应	(280)
7.2.6	硅氢键的性质	(283)
7.2.7	硅的激光退火过程	(283)
7.2.8	缺陷的转换	(283)
§ 7.3	半导体的辐照效应	(284)
7.3.1	电子辐照	(284)
7.3.2	质子辐照	(285)
7.3.3	中子辐照	(285)
7.3.4	硅的嬗变	(287)
§ 7.4	离子注入和产生的损伤	(289)
7.4.1	B 注入	(289)
7.4.2	P 注入	(290)
7.4.3	Si 注入及 Si 的自注入	(291)
7.4.4	H 注入	(292)
7.4.5	He 注入	(292)

7.4.6	Kr 注入	(294)
7.4.7	Ar 注入	(295)
7.4.8	O 注入	(295)
7.4.9	F 注入	(296)
7.4.10	N 注入	(297)
7.4.11	As 注入	(297)
7.4.12	Ge 注入	(298)
7.4.13	多种离子综合注入	(298)
§ 7.5	非晶态 Si 的正电子湮没研究	(299)
7.5.1	非晶硅的缺陷	(299)
7.5.2	a-Si:H 中的电子偶素	(300)
7.5.3	制备工艺对非晶硅的影响	(301)
7.5.4	晶化和非晶化	(301)
§ 7.6	叠层膜中的正电子和慢正电子束研究	(301)
§ 7.7	SiO ₂ -Si 界面的正电子湮没研究	(305)
7.7.1	界面缺陷的研究	(305)
7.7.2	各种氧化生长过程的正电子湮没研究	(308)
7.7.3	微空洞、退火和氢钝化	(309)
7.7.4	辐照损伤	(310)
7.7.5	Si ₃ N ₄ -Si 中缺陷	(312)
7.7.6	金属-氧化物-半导体 (MOS) 的结果	(313)
7.7.7	正电子界面捕获位的模型	(318)
7.7.8	正电子瞬态谱	(319)
7.7.9	MOS 电容中的电场	(320)
§ 7.8	其它半导体中的正电子湮没研究	(321)
7.8.1	Ge 的正电子研究	(321)
7.8.2	InP 的正电子研究	(322)
7.8.3	GaAs 的正电子研究	(322)
7.8.4	CdTe 和 HgCdTe 中的正电子湮没	(325)
7.8.5	CuInSe ₂	(327)

§ 7.9 多孔硅·····	(328)
7.9.1 多孔硅中电子偶素的观察·····	(329)
7.9.2 气氛对发光和正电子测量的影响 ·····	(329)
7.9.3 生长条件对多孔硅的影响·····	(330)
7.9.4 用慢正电子束研究多孔硅·····	(331)
§ 7.10 小结 ·····	(332)
参考文献 ·····	(332)
第八章 离子固体中的准电子偶素 ·····	(340)
§ 8.1 前言·····	(340)
§ 8.2 绝缘固体中电子-正电子湮没对的基础理论 ·····	(341)
8.2.1 极限情况 ·····	(341)
8.2.2 孤立湮没对的能级和态的分类 ·····	(342)
8.2.3 孤立湮没对的湮没率 ·····	(343)
8.2.4 斯塔克效应 ·····	(344)
8.2.5 磁场效应·····	(345)
§ 8.3 q-Ps 特性的实验测定 ·····	(347)
8.3.1 形成概率测量 ·····	(348)
8.3.2 湮没率测量 ·····	(349)
8.3.3 电子密度参数 κ 的测量 ·····	(350)
8.3.4 局域长度测量 ·····	(350)
8.3.5 慢正电子方法测量 ·····	(351)
§ 8.4 固体中 Ps 和 q-Ps 特性: 实验结果 ·····	(351)
8.4.1 离子晶体·····	(351)
8.4.2 中性离子共价化合物: 晶体石英 ·····	(356)
8.4.3 无机玻璃·····	(358)
8.4.4 分子固体·····	(359)
§ 8.5 非金属导体·····	(360)
8.5.1 快离子导体 ·····	(360)
8.5.2 有机导体·····	(365)

§ 8.6 正电子湮没在超导中的应用	(365)
8.6.1 寻找 e^+ 参数和超导温度的关系	(365)
8.6.2 寻找 e^+ 参数和缺陷的关系	(368)
8.6.3 寻找 e^+ 参数和相结构的变化的关系	(370)
8.6.4 改变超导体中某些元素的含量引起 e^+ 参数的 变化	(372)
8.6.5 寻找超导体在热处理前后氧含量的变化	(377)
8.6.6 超导体 e^- 结构和费米面的测量	(378)
§ 8.7 正电子湮没在陶瓷中的应用	(378)
§ 8.8 正电子湮没在沸石中的应用	(381)
参考文献	(384)
第九章 正电子湮没在聚合物中的应用	(389)
§ 9.1 聚合物的性质	(389)
§ 9.2 用正电子湮没研究聚合物	(391)
9.2.1 正电子湮没在聚合物和分子固体中主要特点	(392)
9.2.2 正电子湮没谱	(393)
9.2.3 电子偶素形成的自由体积模型	(394)
9.2.4 刚性分子固体中的正电子湮没	(395)
§ 9.3 相变	(395)
9.3.1 固-固相变	(395)
9.3.2 固-液相变的分子材料	(397)
§ 9.4 聚合物的玻璃态转变	(397)
9.4.1 齐聚的苯乙烯和正三联苯	(397)
9.4.2 热塑性聚合物系统	(400)
9.4.3 共聚物	(406)
§ 9.5 聚合物的物理老化	(406)
§ 9.6 研究聚合物中的缺陷	(407)
9.6.1 拉伸	(407)
9.6.2 压力的影响	(408)

9.6.3	γ 辐照对聚合物微观结构的影响	(410)
9.6.4	电场的影响	(410)
9.6.5	自由体积的各向异性	(411)
§ 9.7	聚合物化学成分和所含气体对正电子测量的 影响	(412)
9.7.1	化学成分的影响	(412)
9.7.2	气体渗透的影响	(413)
§ 9.8	热固系统 环氧树脂	(414)
§ 9.9	正电子湮没方法在液晶相变研究中的应用	(416)
§ 9.10	结论	(418)
参考文献		(418)
第十章	慢正电子湮没谱学	(423)
§ 10.1	前言	(423)
§ 10.2	慢正电子的获得	(424)
10.2.1	慢正电子谱仪中快正电子的获得	(424)
10.2.2	如何降低正电子的能量	(426)
10.2.3	慢化体和它的效率	(427)
10.2.4	慢化体的研制	(428)
10.2.5	加电场慢化体	(430)
10.2.6	慢化体的几何结构	(431)
10.2.7	二次慢化和亮度增强	(431)
§ 10.3	慢正电子束的输运和测量	(434)
10.3.1	慢正电子束的输运	(434)
10.3.2	慢正电子束的探测	(436)
§ 10.4	慢正电子束用于散射研究	(437)
10.4.1	慢正电子和固体相互作用的初级阶段研究—— 正电子和固体的散射	(437)
10.4.2	慢正电子研究固体表面势	(438)
10.4.3	慢正电子在金属中的慢化	(439)

10.4.4	慢正电子在半导体和离子固体中的慢化	(440)
10.4.5	慢正电子在绝缘体中的慢化	(441)
10.4.6	慢正电子注入剖面	(441)
§ 10.5	慢正电子束研究中的扩散过程	(444)
10.5.1	扩散	(444)
10.5.2	金属中的慢正电子扩散理论	(447)
10.5.3	表面扩散理论	(449)
10.5.4	金属中的正电子 实验观察	(450)
10.5.5	半导体中正电子的扩散	(450)
10.5.6	Ps 扩散	(452)
§ 10.6	表面研究	(452)
10.6.1	功函数的研究	(453)
10.6.2	正电子功函数的测量	(455)
10.6.3	表面的重发射正电子	(459)
§ 10.7	表面 Ps 的形成和发射	(461)
10.7.1	Ps 发射的依据	(461)
10.7.2	eV 量级能量 (高能) Ps 的形成	(462)
10.7.3	热 Ps 的形成	(463)
10.7.4	Ps 从绝缘体和分子晶体中发射	(465)
§ 10.8	慢正电子束应用于缺陷研究	(465)
10.8.1	体缺陷研究	(466)
10.8.2	表面缺陷	(467)
10.8.3	界面和多层结构	(468)
10.8.4	缺陷的深度剖面	(470)
§ 10.9	慢正电子束部分的说明	(474)
	参考文献	(475)
第十一章	正电子湮没应用于高级物理实验	(481)
§ 11.1	正电子是大学物理的教学实验中很好的题目	(481)
§ 11.2	正电子寿命谱用于诊断单晶, 微晶和非晶	

的结构	(482)
§ 11.3 多普勒增宽谱测量费米能级	(482)
§ 11.4 γ 光子速度的测定	(483)
11.4.1 γ 光子的速度	(483)
11.4.2 利用正电子湮没的测量原理	(483)
§ 11.5 康普顿剖面的测定	(486)
11.5.1 测量原理	(486)
§ 11.6 原子激子的验证	(487)
参考文献	(489)

第一章 正电子湮没技术基本原理介绍^[1~3]

§ 1.1 前 言

本章是相对独立的一章,我们希望用简要和通俗的语言概括正电子湮没方法,以便使广大的材料科学工作者和初次接触正电子的读者不用花很多时间,在阅读了本章以后能对正电子湮没技术的基本原理和应用范围有一个大体的了解,也有利于读者在阅读后面的文章时能更好地理解。

人们在 20 世纪 30 年代发现了正电子(以下简称为 e^+)*,40 年代起把它应用于固体物理研究,60 年代末又在材料科学中使它得到了广泛应用,80 年代又把它应用于表面和表层研究。

e^+ 湮没在物理学中常称为 e^+ 湮没谱学,在材料科学中常称为 e^+ 湮没技术,简称为 PAT(positron annihilation technique),是一门把核物理和核技术应用于固体物理和材料科学研究的新技术,还可以应用于化学和生物等学科。本章简述 PAT 的四种实验技术和它们在材料科学中的应用。第二章起叙述在物理领域内的 e^+ 湮没谱学。

PAT 包括多种实验技术,其中早期最常用的有三种,即 e^+ 湮没寿命谱、 2γ 湮没角关联和 e^+ 湮没 γ 射线多普勒能谱(其装置分别简称为寿命谱仪、角关联装置和多普勒谱仪)。80 年代起又发展了应用于表面研究的慢 e^+ 束技术。此外又有许多新的方法如 e^+ 年龄-动量关联谱仪、低能 e^+ 衍射谱仪、 e^+ 显微镜、 e^+ 引发俄歇电子谱仪、医用 e^+ 层析照相(PET)等也在日益发展。

* 本书为了节省篇幅,正电子用符号(e^+)表示,电子用 e^- 表示,电子偶素用 Ps 表示。