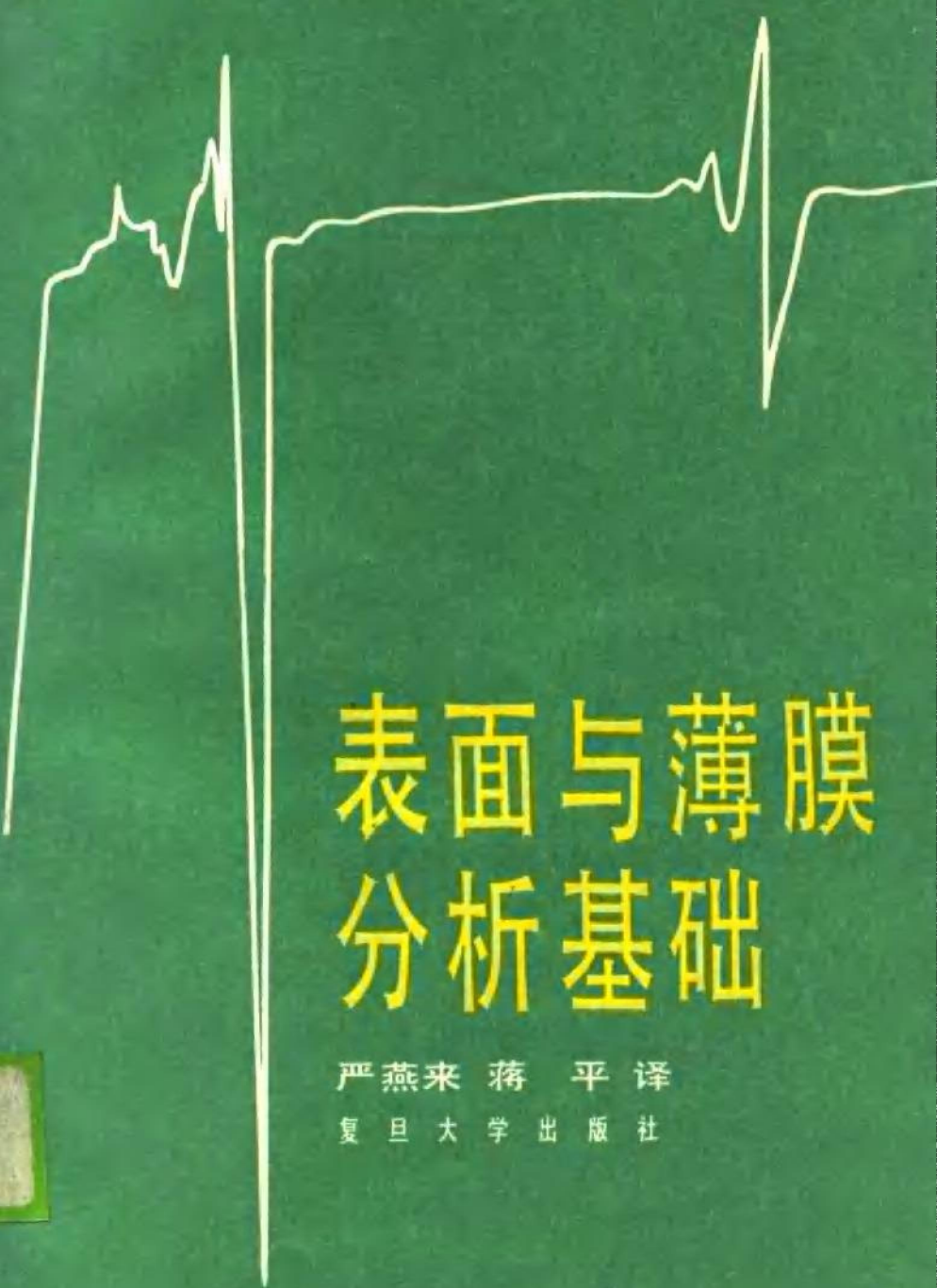


〔美〕 L. C. Feldman J. W. Mayer 著



表面与薄膜 分析基础

严燕来 蒋 平 译

复旦大学出版社

内 容 提 要

本书论述了用于材料表面和薄膜的各种重要的现代分析技术,包括背散射谱、低能电子衍射、次级离子质谱、广延X射线精细结构、光电子谱及核技术等。内容比较全面,对每一种分析技术均阐明其基本原理并给出应用实例,且附有相当详尽的数据附录。

本书既可作为高等院校研究生或高年级本科生的表面与薄膜分析教材,亦可供有关研究院、所及工矿企业科技人员参考。

Fundamentals of Surface and Thin Film Analysis

Leonard C. Feldman James W. Mayer

Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1986

表面与薄膜分析基础

[美] L.C.Feldman J.W.Mayer 著

严燕来 蒋 平 译

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 复旦印刷厂印刷

开本850×1168 1/32 印张 13.25 字数 390,000

1989 年 10 月第 1 版 1989 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—3,000

ISBN 7-309-00360-8/O · 65

定价 0.35元

写在中译本出版之前

表面科学是一门前沿科学，近年来我国表面科学有了很大发展。在这一领域尽量多出版有关的专著以适应不同层次读者的需要，无疑对表面科学的发展具有十分重要的现实意义。

表面科学的一个重要分支是材料的表面分析，即采用各种现代化的实验分析技术研究材料表面区的结构和组分。《表面与薄膜分析基础》正是一本比较全面介绍各种现代化测试手段的学术新著。该书1986年在美国出版，两位作者都是美国表面科学界的知名学者。多年从事教学与材料分析的研究工作使作者深信掌握一项现代分析技术必须深入了解有关的物理原理。因此，书中在介绍现代分析实验室中采用的各种分析技术时，首先从这些技术涉及的基本原理出发，阐明各项技术的物理基础。该书深入浅出，除了掌握阐明基本原理所必需的数学工具外，避开了过于繁冗的数学推算，以概念清晰、机理分明见长。每一章并附有习题和参考资料。在美国作为高年级大学生和研究生的教材，受到师生的好评。书中还着重比较了各种现代化测试分析技术的特点，举出应用实例及有关测量数据的数量级，因而能够指导读者在具体的研究工作中选择恰当的分析技术并作最佳组合；同时又以较大篇幅的附录收集了表面分析技术涉及的各种物理量的详细数据，使本书成为一本颇具实用价值的参考书，因而也受到工业界人士的欢迎。

本书译者在短时期内将这本新书翻译介绍给国内读者，我以为这是一件有意义的工作。译本既可作为国内大专院校有关系科高年级学生、研究生学习现代分析测试手段的教学参考书，又可适应科研单位研究人员了解、运用各种表面分析技术的需要，相信会对比较多的读者有

所裨益。因此,我很乐意应复旦大学出版社的要求,在此将本书推荐给广大读者。

谢希德

一九八八年十一月

译者的话

本书根据光子、电子、离子等与固体材料表面及薄膜的相互作用介绍作为结构、组分鉴定的各种现代分析技术。原书为美国 Cornell 大学教材；亦曾用作为工业界科技人士开设的有关课程的教材。出版后受到多方面的欢迎。

译者认为本书适合当前我国表面科学发展的需要。读者只要具备大学物理、固体物理及量子力学的基础知识即可阅读、使用本书。

本书注重于基本概念与实际应用的密切结合，而且配有习题和大量数据图表；既可用作教材，也可作工具书查考。本书取材相当完整，几乎覆盖了全部现代化测试分析技术，美中不足的是书中未能收入近年来发展起来的隧道电子显微镜，否则当使本书更为增色。

原书中偶有明显印刷错误，译者均尽量予以更正。

谢希德教授对中译本的出版给予了热情的关怀和支持，译者藉此机会谨致谢忱。

译文虽经交互校阅，但错误、疏漏之处在所难免，希望读者不吝指正。

作 者 序

当代技术的一个显著特点是强调了材料表面和近表面区的重要作用。我们使用离子注入、脉冲电子束和激光以改变组分和结构,使用各种各样的材料源以沉积薄膜,使用分子束以生长外延层,而氧化和催化反应也能在可控制的条件下加以研究。而这些方法得以实现的关键所在就是可以普遍获得对固体外层表面的组分和结构敏感的各种分析技术。

本书着重介绍用于材料表面区的各种分析技术所包含的物理学。虽然新的分析手段不断涌现以适应技术的需要,但所有这些手段仍然基于少数几种过程,这些过程支配着粒子和辐射与物质间的相互作用。本书即阐述这些过程的基础。掌握了这些过程如何确定出射辐射的能量以及强度后,将其应用于材料分析就是顺理成章的事了。本书是写给那些有志于使用电子谱或离子束分析作样品鉴定的材料科学家,也是写给那些需要了解本人实验室之外的技术资料的材料分析家,特别是写给那些将要在其研究工作中应用这些新一代分析技术的高年级学生及研究生的。

现代材料分析是建筑在对光子、电子或重粒子等辐照下的固体发射出来的粒子与辐射进行测量的基础之上的。元素的识别是基于出射辐射的能量,而原子浓度则基于出射辐射的强度。原子的 Coulomb 散射(Rutherford 背散射)、电子结构中内壳层空位的形成(X 射线光电子谱)以及能级间跃迁(电子微探针和 Auger 电子谱)皆为材料分析的基础。本书对此进行了详细讨论。组分的深度剖面可由重离子溅射结合对表面敏感的技术(电子谱与次级离子质谱)而得到;也可由轻粒子的能量损失(Rutherford 背散射和瞬发核分析)来获得。表面层的结构采用衍射的观点(低能电子衍射)和粒子的观点(沟道效应)加以讨论。本书以运用核技术作组分分析的讨论作为结束。

由于本书关注于现代表面分析的基础,我们提供了对基本参数,即能量和截面(或跃迁几率)的推导。而本书的内容安排则由原子碰撞的经典概念开始,继之将其用于 Rutherford 散射(第2章)、能量损失(第3章)、溅射(第4章)、沟道效应(第5章)和电子间相互作用(第6章)。然后是用于电子和 X 射线结构分析中的衍射技术的综述(第7章)。欲了解光电截面的荧光产额要用到波动力学,故第8章我们回顾波动力学的微扰理论。再将这些关系用于讨论光电子谱(第9章)、辐射跃迁(第10章)和非辐射跃迁(第11章)。最后在第12章讨论核技术对薄膜分析的应用。

我们两人都以主要精力从事以材料分析为中心的研究工作,我们认识到对用于薄膜和近表面区的分析技术作全面探讨是很必要的。我们知道在一个迅速变化的领域对有关过程的基本理解是至关重要的。仪器设备可以更换,但其基本过程仍将保持不变。

我们曾将本书的材料用作 Cornell 大学高年级学生及研究生的教材,也用于对工业界的科学家和工程师开设的短期课程。我们感谢 Cornell 的大学生和研究生以及我们的同事们,他们对修改本教材提出了许多意见和建议。我们感谢 Faure 国家加速器中心 R. Pretorius 博士的贡献,第12章的大部分内容由他负责。我们还感谢 Jane Jorgensen 和 Ali Avcisoy 为本书作插图及美术加工。

本书中使用的符号

符号	名 称	公式、表 或图	页 码
a	Thomas-Fermi 屏蔽半径	(4.4)式	74
A	质量数	(2.22)式	26
a_0	Bohr 半径, $a_0 = \hbar^2/me^2 = 0.529 \text{ \AA}$	(1.14)式	9
b	碰撞参量	图 2.6	19
C^b	体原子浓度	(4.28)式	89
C^s	表面原子浓度	(4.28)式	89
d	最接近距离	(2.18)式	23
e	电子电荷, $e^2 = 14.40 \text{ V} \cdot \text{\AA}$	(1.5)式	5
E_B	电子结合能	(6.11)式	130
E_0	入射粒子能量	(2.5)式	14
E_1	探测粒子能量	(2.5)式	14
E_2	传递给靶原子的能量	(2.7)式	15
f_{AB}	溅射因子	(4.30)式	89
F_D	蓄积能量密度	(4.2)式	73
I	电子的平均激发能	图 3.4	45
K	运动学因子	(2.5)式	14
m	电子的静止质量	(1.9)式	6
M_1	入射粒子质量	图 2.1	13

续表

符号	名 称	公式、表 或图	页 码
M_2	靶原子质量	图 2.1	13
N	原子密度(原子数/cm ³)	(1.8)式	5
N_A	Avogadro 数	(1.6)式	5
N_s	靶原子数/cm ²	(2.9)式	19
Q	入射粒子数	(2.9)式	19
Q_D	探测粒子数	(2.9)式	19
R	核半径	(2.22)式	26
R	荷电粒子射程	(6.31)式	140
S_n	核阻止截面	(4.3)式	73
[S]	背散射能量损失因子	(3.20)式	48
t	厚度	—	18
T	碰撞中传递的能量	(3.3)式	42
u^2	均方热振幅	—	154
u	统一质量单位	(1.7)式	7
v_0	Bohr 速度, $v_0 = e^2/\hbar = 2.2 \times 10^8 \text{ cm/s}$	(1.15)式	9
W	单位时间的跃迁几率	(8.24)式	187
Y	溅射产额	(4.1)式	71
Z	原子序数	—	12
Γ	受激态的能量宽度	(10.9)式	235
ε	阻止截面	—	39
θ	散射角	图 2.1	13
θ_D	Debye 温度	(7.4)式	155

续表

符号	名 称	公式、表 或图	页 码
λ	波长	(1.3)式	4
λ	逃逸深度	(6.2)式	127
μ	线性衰减系数	(8.38)式	192
μ/ρ	质量衰减系数(cm^2/g)	(8.38)式	192
ρ	质量密度(g/cm^3)	(1.8)式	5
σ_e	电子碰撞截面	(6.8)式	129
σ_{ph}	光电效应截面	(8.37)式	191
σ_{sc}	屏蔽散射截面	(2.21)式	26
$\sigma(\theta)$	散射截面	(2.8)式	18
τ	受激态的平均寿命	(10.9)式	235
ϕ	反冲角	图 2.1	13
χ	沟道效应最小产额	(5.16)式	103
ψ_e	轴沟道临界角	(5.7)式	101
ψ_p	面沟道临界角	(5.14)式	103
Ω	探测器立体角	(2.8)式	18
Ω_B	能量离散的 Bohr 值	(3.32)式	57
ω_p	等离子激元频率	(6.14)式	132

目 录

写在中译本出版之前

译者的话

作者序 i

本书中使用的符号 iii

第1章 综述:概念、单位与 Bohr 原子 1

§ 1.1 引论 1

§ 1.2 能量、单位与粒子 4

§ 1.3 波粒二象性与晶格间距 6

§ 1.4 Bohr 模型 8

问题 9

参考资料 11

第2章 原子碰撞与背散射谱 12

§ 2.1 引论 12

§ 2.2 弹性散射的运动学 13

§ 2.3 Rutherford 背散射谱——实例 17

§ 2.4 散射截面与碰撞参数 18

§ 2.5 中心力散射 20

§ 2.6 散射截面:二体情形 23

§ 2.7 低能与高能情形对 Rutherford 散射的偏离 25

§ 2.8 低能离子散射(LEIS) 27

§ 2.9 前向反冲谱 30

§ 2.10 质心系到实验室系的坐标变换 32

问题.....	35
参考资料.....	37

第 3 章 轻离子的能量损失和背散射深度剖面.....	38
§ 3.1 引论	38
§ 3.2 能量损失的一般介绍及其单位	38
§ 3.3 MeV 级的轻离子在固体中的能量损失.....	39
3.3.1 适用的能量范围.....	39
3.3.2 推导 dE/dx	41
3.3.3 电子能量损失与核能量损失的比较	44
§ 3.4 化合物中的能量损失—Bragg 定则.....	45
§ 3.5 背散射中的能量宽度	47
§ 3.6 背散射谱的谱形	50
§ 3.7 Rutherford 散射的深度剖面.....	52
§ 3.8 深度分辨能力与能量损失离散	54
3.8.1 掠射角技术	55
3.8.2 离散.....	56
§ 3.9 氢与氘的深度剖面	58
§ 3.10 H 与 He 离子的射程	60
§ 3.11 溅射及其灵敏度极限.....	62
§ 3.12 散射关系概要.....	64
问题.....	65
参考资料.....	67
第 4 章 溅射深度剖面与次级离子质谱.....	69
§ 4.1 引论	69
§ 4.2 离子轰击溅射——一般概念	71
§ 4.3 核能量损失	74
§ 4.4 溅射产额	79
§ 4.5 次级离子质谱(SIMS).....	80
§ 4.6 次级中性质谱(SNMS).....	87

§ 4.7 择优溅射与深度剖面	89
§ 4.8 界面展宽和离子混杂	90
§ 4.9 原子的 Thomas-Fermi 统计模型	94
问题	96
参考资料	96

第 5 章 沟道效应	99
§ 5.1 引论	99
§ 5.2 单晶中的沟道效应	99
§ 5.3 杂质在晶格中的位置	103
§ 5.4 沟道效应通量分布	105
§ 5.5 表面相互作用的二原子模型	109
§ 5.6 表面峰	112
§ 5.7 衬底遮蔽作用: Ag(111) 上外延 Au	116
§ 5.8 外延生长	118
§ 5.9 薄膜分析	119
问题	121
参考资料	122

第 6 章 电子-电子相互作用与电子谱的深度灵敏度	124
§ 6.1 引论	124
§ 6.2 电子谱: 能量分析	124
§ 6.3 逃逸深度与探测体积	125
§ 6.4 非弹性电子-电子碰撞	129
§ 6.5 电子碰撞电离截面	130
§ 6.6 等离子激元	130
§ 6.7 电子平均自由程	133
§ 6.8 薄膜的表面形貌对电子衰减的影响	135
6.8.1 逐层生长	135
6.8.2 单层加成岛式	137

6.8.3 成岛式.....	138
6.8.4 淀积原子的分布.....	138
§ 6.9 电子在固体中的射程.....	139
§ 6.10 电子能量损失谱(EELS).....	142
§ 6.11 韧致辐射	145
问题	149
参考资料	150
 第 7 章 表面结构	152
§ 7.1 引论.....	152
§ 7.2 衍射参数.....	152
§ 7.3 热振动与 Debye-Waller 因子.....	154
§ 7.4 低能电子衍射 (LEED)	157
§ 7.5 掠射角 X 射线衍射.....	164
§ 7.6 透射电子显微镜.....	169
问题	176
参考资料	177
 第 8 章 固体中的光子吸收与 EXAFS.....	178
§ 8.1 引论.....	178
§ 8.2 Schrödinger 方程	178
§ 8.3 波函数.....	180
8.3.1 平面波 ($V = 0$).....	181
8.3.2 类氢波函数 [$V(r) = -Ze^2/r$]	181
§ 8.4 量子数、电子组态与符号.....	184
§ 8.5 跃迁几率.....	185
§ 8.6 光电效应——方阱近似.....	187
§ 8.7 类氢原子的光电跃迁几率.....	190
§ 8.8 X 射线吸收.....	192
§ 8.9 广延 X 射线吸收精细结构(EXAFS)	197

§ 8.10 与时间有关的微扰理论	200
8.10.1 Fermi 黄金定则	200
8.10.2 振荡电场中的跃迁几率	203
8.10.3 自发跃迁	204
问题	206
参考资料	207
 第 9 章 X 射线光电子谱(XPS)	209
§ 9.1 引论	209
§ 9.2 实验	210
9.2.1 辐射源	210
9.2.2 电子谱仪	212
§ 9.3 光电子动能	213
§ 9.4 光电子能谱	215
§ 9.5 结合能与终态效应	217
§ 9.6 结合能位移; 化学位移	219
§ 9.7 定量分析	220
问题	223
参考资料	224
 第 10 章 辐射跃迁与电子微探针	227
§ 10.1 引论	227
§ 10.2 X 射线谱的术语	228
§ 10.3 偶极选择定则	228
§ 10.4 电子微探针	230
§ 10.5 自发发射跃迁率	233
§ 10.6 Ni 中 K_{α} 发射的跃迁率	234
§ 10.7 电子微探针: 定量分析	235
10.7.1 定量分析	237
10.7.2 校正因子	239

§ 10.8 质子(和氦)感生 X 射线发射(PLE)	240
§ 10.9 辐射跃迁几率的计算	242
§ 10.10 比值 K_{β}/K_{α} 的计算	246
问题	248
参考资料	249

第 11 章 非辐射跃迁与 Auger 电子谱251

§ 11.1 引论	251
§ 11.2 Auger 跃迁	252
11.2.1 术语	252
11.2.1.1 KL_1L_1	253
11.2.1.2 KL_1L_2 或 KL_1L_3	254
11.2.1.3 KL_2L_2 、 KL_2L_3 、 KL_3L_3 跃迁	254
11.2.2 能量	255
11.2.3 化学位移	256
11.2.4 类氢原子中 Auger 跃迁几率的估算; KLL 跃迁 ..	257
§ 11.3 Auger 电子产额与荧光产额	260
§ 11.4 原子能级的宽度与寿命	262
§ 11.5 Auger 电子谱	263
§ 11.6 定量分析	269
§ 11.7 Auger 深度剖面	270
问题	273
参考资料	275

第 12 章 核技术: 活化分析与瞬发辐射分析277

§ 12.1 引论	277
§ 12.2 Q 值与动能	281
§ 12.3 放射性衰变	285
12.3.1 β 衰变	286
12.3.2 γ 衰变	287

§ 12.4	放射性衰变定律	288
§ 12.5	放射性核素的产生	289
§ 12.6	活化分析	290
§ 12.7	瞬发辐射分析	292
12.7.1	能量分析法	293
12.7.1.1	热中子感生反应	293
12.7.1.2	荷电粒子感生反应	295
12.7.2	共振法	297
问题		301
参考资料		302

附录 1	入射粒子为 ^4He , 靶原子量 M_2 为整数的运动学因子 K_{M_2}	304
附录 2	元素对 1 MeV ^4He 的 Rutherford 散射截面	311
附录 3	^4He 的阻止截面	318
附录 4	原子的电子组态和电离势	331
附录 5	电子的结合能 (eV)	339
附录 6A	X 射线波长(以 $\text{\AA}$ 为单位)	345
附录 6B	密度与质量吸收系数	352
附录 7	KLL Auger 能量	358
附录 8	元素表	366
附录 9	K, L 及 M 壳层的荧光产额	385
附录 10	物理常数、相互关系及单位转换	389
缩略语表		390
索引		393
表面分析技术		402