

现代物理基础丛书

54

薄膜生长

(第二版)

吴自勤 王兵 孙霞 著



科学出版社

(O-5045.0101)

科学出版中心·数理分社
电 话: (010) 64033664
E-mail: math-phy@mail.sciencep.com
网 址: <http://www.math-phy.cn>

销售分类建议: 高等物理

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-036731-0



定 价: 96.00 元

现代物理基础丛书 54

薄膜生长

(第二版)

吴自勤 王 兵 孙 霞 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书集中介绍了薄膜科学中的关键部分——薄膜生长。全书由五个方面15章的内容组成：第一至四章主要从薄膜的角度介绍相平衡和晶体表面原子结构的基础知识。第五至七章主要介绍薄膜中的缺陷和扩散。第八、九章主要介绍薄膜生长的三种模式和成核长大动力学。第十至十三章主要介绍金属薄膜、半导体薄膜、氧化物薄膜的生长和生长中出现的分形现象。第十四、十五章介绍薄膜制备和研究的各种方法。本书不仅系统地介绍了有关薄膜生长的固体物理学知识，而且介绍了薄膜生长的前沿进展和薄膜检测的各种先进方法。

本书可作为固体物理、材料科学专业的研究生教学用书，也可供从事薄膜研制和生产的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

薄膜生长/吴自勤,王兵,孙霞著. — 2版. —北京:科学出版社,2013
(现代物理基础丛书)

ISBN 978-7-03-036731-0

I. ①薄… II. ①吴… ②王… ③孙… III. ①薄膜生长 IV. ①O484.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第031894号

责任编辑:钱俊周涵/责任校对:包志虹
责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年9月第 1 版 开本:B5(720×1000)

2013年3月第 2 版 印张:23 1/2

2013年3月第六次印刷 字数:450 000

定价:96.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

《薄膜生长》第一版出版于 2001 年 9 月, 到 2010 年 1 月第五次印刷, 共印刷 8300 册. 这说明, 此书作为研究生教材拥有较广泛的读者.

正如《薄膜生长》第一版前言所述, 随着固态高科技产业的迅速发展, 薄膜科学和技术愈来愈受到重视, 薄膜领域中科研和生产的联系愈来愈紧密. 这十几年来出现了不少薄膜生长、薄膜结构、薄膜研究方法的新知识, 需要把它们补充到本书的专题部分中去 (基础部分基本上没有变动).

这些新增加的内容主要是:

1) 本书第二版增加了 11.7 节“石墨烯的制备、结构和性质”和 11.8 节“拓扑绝缘体的制备、结构和性质”. 这两节介绍近年来得到广泛重视的新型薄膜材料. 石墨烯是近乎完美的二维材料. 由于石墨烯独特的电子结构、优异的物理性质及潜在的应用前景, 它的发现获得 2011 年度诺贝尔物理学奖. 拓扑绝缘体是近十年来发现的新型固体材料, 其主要特征是固体内部为绝缘体, 其表面态或边缘态是导体, 这种材料具有新奇的量子性质.

2) 本书第二版 13.4 节“金属诱导非晶半导体薄膜低温快速晶化”是本书第一版 13.3.2 小节“非晶态薄膜中的分形晶化”发展出来的一小节. 过去的内容以基础研究成果为主, 目前增加的最主要是应用基础研究成果. 为了使快速晶化的薄膜能满足器件制备的要求, 研究重点集中在使晶态半导体薄膜的晶粒尽可能大、表面尽可能光洁, 并能覆盖宏观器件要求的全部面积.

3) 薄膜研究方法 (本书第一版第十五章) 中的“X 射线衍射方法”的以下 3 小节增加了较多的内容:

15.1.3 节“高分辨和掠入射 X 射线衍射”;

15.1.4 节“外延薄膜的一些高分辨 X 射线衍射实验结果”;

15.1.5 节“掠入射衍射的一些实验结果”.

掠入射 X 射线 (与样品表面的夹角为 1 度量级) 的全外反射效应显著增强了样品表层的衍射强度, 使高分辨和掠入射 X 射线衍射一起成为纳米量级薄膜三维结构和多层结构的常规研究方法.

4) 本书第一版第十五章中的“光电子能谱(PES)”扩充为以下 3 小节:

15.4.1 节“X 光电子能谱 (XPS)”;

15.4.2 节“紫外光电子能谱 (UPS) 及反向光电子能谱 (IPES)”;

15.4.3 节“角分辨光电子能谱 (ARPES)”.

反向光电子能谱利用 5~15eV 入射电子激发出来的发光谱测定价带上面的空能带中电子状态的分布. 这里的 ARPES 特别重要, 它也是一种紫外光电子能谱, 它的突出优点是可以同时测定光电子的能量和动量 (角分辨的功能), 成为测定单晶薄膜以及新型材料的能带结构的先进方法.

5) 本书第十五章中的“扫描探针显微术 (SPM)”主要扩充了以下 1 小节:

15.5.1 节“扫描隧道显微术和谱学 (STM/STS)”.

扩充的内容包括近年来得到广泛应用的 STS 谱学方法, 包括一次微分谱和二次微分谱的原理和方法, 以及新发展出来的谱学成像方法. 这些方法主要用于表面电子态的测量 (一次微分谱) 和振动激发态或自旋激发态 (二次微分谱) 的测量. STS 谱学技术已成为表面局域电子态探测的常规方法.

近年来, 电子显微术有很多新的进展, 由于我们有一本新书《微分析物理及其应用》(丁泽军、吴自勤、孙霞、张人佶编著, 中国科学技术大学出版社, 2009) 可供参考, 本书第二版没有作补充.

补充后的第二版字数约为 450000, 比第一版的字数 351000 增加约 1/4, 并且列入科学出版社“现代物理基础丛书”.

为了便于读者查阅有关资料, 本书第二版的末尾增加了索引.

吴自勤 王 兵 孙 霞

2012 年 10 月于合肥

第一版前言

随着固态高科技产业(集成电路产业、固体发光和激光器件产业、磁记录材料和器件产业等)的迅速发展,薄膜科学和技术愈来愈受到重视,其原因是薄膜的研究和开发对生产的贡献日益增大,薄膜科学研究成果转化为生产力的速度愈来愈快.这些产业的一个特点是,它们使用的单项设备和实验仪器是接近的(当然整体规模上有很大的差距).这些产业的另一个特点是,要求工艺的控制精度达到纳米级水平.例如,美国半导体工业界预计2001年集成电路中的特征尺寸为150nm,互补金属氧化物半导体(CMOS)器件中栅氧化物的厚度为2~3nm,作为欧姆接触的金属硅化物层的厚度为45nm.随着集成电路的使用频率的不断增大,这些尺寸还将不断减小.半导体激光器件中广泛使用的量子阱和超晶格材料的单层厚度一般为10nm.近年来在磁头材料中引起广泛关注的巨磁电阻金属多层膜的单层厚度是1nm量级.

正是由于这种情况,薄膜领域中科学研究和生产的联系变得十分紧密.没有对薄膜生长的原子过程的深刻了解,没有在此基础上制定出来的高超的薄膜生长工艺,要使集成电路的运行速度不断提高,要使固体激光器的寿命达到几万小时,要利用巨磁阻现象提高磁记录密度,都是不可能的.

这些年来,在高科技产业需求的推动下,薄膜科学研究的深度和广度不断发展,这主要表现在:

1. 为了不断提高器件的性能,要求通过外延生长出缺陷很少的单晶薄膜,要求它们具有特定的组态(二维单晶薄膜组成的量子阱和超晶格、一维的单晶量子线、零维的单晶量子点等).例如,已经在精确定向的邻晶面衬底上外延生长了包含量子线或量子点的薄膜.

2. 希望深入了解薄膜外延生长的原子过程,特别是了解促成二维逐层生长的条件或三维岛优先横向生长的条件,以便更好地控制薄膜工艺.这里的一个突出例子是通过三维岛优先横向生长得到了缺陷较少的GaN外延薄膜,为GaN蓝色固体发光管和激光管产业的兴起提供了材料基础.

3. 改进和发展新的薄膜工艺,以便更好地控制薄膜的结构和性能.除了改进分子束外延、金属有机化学气相沉积(MOCVD)等方法使它们达到原子级精度外,还发展了多种溅射方法、脉冲激光熔蒸(ablation)方法等.

4. 为了精细地观察薄膜生长过程,改进和发展了一系列纳米级以至原子级的

研究方法. 这里最突出的例子是多种多样的扫描探针显微术. 目前, 不仅扫描电子显微镜早已纳入集成电路生产线, 高分辨透射电子显微镜和扫描探针显微镜也已经在许多高科技产业的检测部门中发挥着十分重要的作用, 例如 Intel 公司就一贯用最先进的仪器武装它的检测部门.

薄膜的研究丰富了凝聚态物理的内容, 高质量的半导体异质结、量子阱和超晶格、量子点、为发现量子霍尔效应、分数量子霍尔效应、量子尺寸效应、单电子隧穿效应提供了材料基础. 薄膜的研究推动了晶体学的发展, 例如在超高真空中用原子级分辨率的扫描隧道显微术得出了增原子的表面扩散激活能, 观察到密排衬底上超薄膜的分形生长和再构表面上的各向异形生长以及邻晶面上的台阶流动生长模式, 从而扩展了晶体的成核长大理论.

薄膜的研究和开发为微电子学、光电子学、磁电子学等新兴交叉学科的发展提供了材料基础, 高质量薄膜的生长工艺、有关薄膜的组成、晶体结构和物理性能成为这些新学科的重要组成部分.

作为现代晶体学的组成部分的薄膜生长和相关的基础学科有着密切的联系, 这些学科 (如表面物理、金属物理、衍射物理等) 为薄膜科学技术的发展提供了坚实的理论基础. 例如要深入了解薄膜生长的原子过程, 需要有关衬底表面原子结构和薄膜中的缺陷和扩散的基础知识. 因此本书由以下五部分 (共 15 章) 组成.

一、界面相和表面结构 (1~4 章);

二、薄膜中的缺陷和扩散 (5~7 章);

三、薄膜的成核和长大理论 (8~9 章);

四、金属、半导体、氧化物薄膜的生长和薄膜生长中的分形现象 (10~13 章);

五、薄膜的制备和研究方法 (14~15 章).

第一部分主要从薄膜的角度介绍相平衡 (如介绍界面相概念、讨论表面能和界面能对薄膜稳定性的影响) 和晶体表面原子结构 (特别是表面的台面、台阶、扭折结构和再构表面) 的基础知识.

第二部分主要介绍薄膜中的缺陷和扩散. 薄膜中的缺陷可以从衬底延伸出来, 也可以在薄膜生长过程中产生. 获得高质量薄膜的关键是抑制影响器件性能的某些缺陷 (如错配位错和穿过位错) 的产生. 薄膜中的扩散, 特别是短路扩散对薄膜结构有重大的影响, 需要掌握它的规律以趋利避害. 这部分还包括了集成电路工艺中经常采用的双层膜反应扩散过程的推导.

第三部分主要介绍薄膜生长的三种模式和成核长大动力学. 经典理论一般以形成规则外形晶核及规则晶核长大为前提, 近年来超高真空变温扫描隧道显微术显示的多枝杈分形生长、台阶流动和再现的二维逐层生长等现象丰富了成核长大理论

和薄膜的生长模式,并证实了非线性科学中著名的扩散控制聚集(DLA)生长模型.在这一部分还介绍了薄膜生长的计算机模拟工作.

第四部分主要介绍金属薄膜、半导体薄膜和氧化物薄膜的生长.除了介绍大量重要的原子级分辨率研究成果外,综述了若干种金属磁性薄膜(包括自旋阀巨磁阻多层膜)、半导体薄膜(包括量子阱和超晶格)和氧化物薄膜(包括高温超导体和铁电体)的生长.这一部分还介绍了薄膜中出现的分形现象.

第五部分除了介绍一般的薄膜制备和研究方法外,还介绍多种新的方法,包括新的溅射、化学气相沉积和激光熔蒸(ablation)等制备方法以及新的X射线衍射方法(如掠入射X射线衍射)、显微术(如扫描探针显微术、低能电子显微术)和表面分析方法等.

在本书的编著中我们整理了过去研究生教学中有关讲稿,充实了大量当前薄膜生长研究前沿的资料,包括我们近几年访问美国几所大学(柏克莱加州大学、斯坦福大学等)、香港科技大学以及参观美国硅谷一些公司获得的资料 and 知识.编著中还利用了国内学者和我们在《物理》上发表的一些综述文章.在编著中我们力图做到:基础概念清楚和易于理解,尽可能反映当前的学科先进水平,简明、系统地介绍薄膜制备方法和研究方法.

近10年来,在国内出版了若干本薄膜物理和薄膜材料方面的专著和教材,其中的以下三本各有特色.

薛增泉等的《薄膜物理》完成于1989年,1991年由电子工业出版社出版.它的特色是把原子团物理(或团簇物理)和薄膜物理结合起来,这是一本很有参考价值的著作.根据该书的特色,它大量介绍了多晶薄膜,特别是颗粒膜及其电学性质的知识.

曲喜新等的《电子薄膜材料》1996年由科学出版社出版.它的特色是系统介绍微电子技术和光电子技术中使用的超导薄膜、导电薄膜、电阻薄膜、半导体薄膜、介质薄膜、磁性薄膜、压电薄膜和热电薄膜的技术资料,包括它们的制造技术、组成、性能和应用.对广大读者,特别是专业人员很有参考价值.

杜经宁等著,黄信凡等译,陈坤基校的《电子薄膜科学》英文原版1992年在美国由MacMillan出版公司出版,中译本1997年由科学出版社出版.这是一本为大学生和研究生写的教材.书中介绍了有关薄膜的材料科学的基础知识、半导体的外延生长和电学、光学性质以及薄膜中的动力学过程和相变,很有参考价值.

本书集中介绍薄膜科学中的关键部分——薄膜生长,并且尽可能把近几年来有关的重要结果概括进来.它可以作为凝聚态物理、材料科学和有关薄膜科学技术专业的研究生的教材,也可以作为有关专业高年级大学生的教学参考书.对于从事薄

膜研制和生产的专业人员也有参考价值.

在本书的编写过程中得到张庶元、高琛教授、王晓平副教授、孙霞博士、何维、赵瑾、万威同学的大力协助, 我们在此表示感谢.

由于我们的水平有限, 本书中的错误和缺点在所难免, 我们衷心希望得到读者的指正.

吴自勤 王 兵

2000 年 3 月

于合肥中国科学技术大学

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 相平衡和界面相	1
1.1 相平衡	1
1.2 元素和合金的相图	2
1.3 固溶体的能量	4
1.4 固溶体的组态熵	5
1.5 界面相	6
1.6 界面曲率半径对压强的影响	10
1.7 晶体表面能、界面能和黏附能	10
1.8 固体表面张力的测定方法	13
1.9 表面能对薄膜稳定性的影响	14
参考文献	16
第二章 晶体和晶体表面的对称性	17
2.1 晶体的对称性	17
2.1.1 晶体的平移对称性 (平移群)	17
2.1.2 14 种布拉维点阵和 7 种晶系	18
2.1.3 32 种点群	20
2.1.4 230 种空间群	22
2.1.5 群的基本概念	23
2.2 晶体表面的对称性	24
2.2.1 晶体表面的平移对称性	24
2.2.2 5 种二维布拉维点阵和 4 种二维晶系	25
2.2.3 10 种二维点群	26
2.2.4 17 种二维空间群	27
2.3 晶面间距和晶列间距公式	28
2.3.1 晶面间距公式	28
2.3.2 晶列间距公式	29

2.4 倒易点阵	30
2.4.1 三维倒易点阵	30
2.4.2 二维倒易点阵	30
2.4.3 倒易点阵矢量和晶列、晶面的关系	31
参考文献	33
第三章 晶体表面原子结构	35
3.1 一些晶体表面的原子结构	35
3.2 表面原子的配位数	40
3.3 表面的台面-台阶-扭折 (TLK) 结构	41
3.4 邻晶面上原子的近邻数	43
3.5 晶体表面能的各向异性	44
3.6 台阶和台面的粗糙化	47
参考文献	48
第四章 再构表面和吸附表面	49
4.1 再构表面和吸附表面结构的标记	49
4.2 半导体再构表面结构	50
4.2.1 Si(111)	50
4.2.2 Si(001)	52
4.2.3 Si(110)	55
4.2.4 Ge(111)	55
4.2.5 Ge(001)	57
4.2.6 GeSi(111)	57
4.2.7 GaAs(110)	57
4.2.8 GaAs(001)	58
4.2.9 GaAs(111)	58
4.3 金属再构表面结构	59
4.4 吸附表面结构	59
4.4.1 物理吸附和化学吸附	59
4.4.2 Si 吸附表面	61
4.4.3 Ge 吸附表面	62
4.4.4 GaAs 吸附表面	62
4.4.5 金属的吸附表面	63
4.5 表面相变	63

参考文献	64
第五章 薄膜中的晶体缺陷	65
5.1 密堆积金属中的点缺陷	65
5.1.1 八面体间隙	65
5.1.2 四面体间隙	66
5.2 半导体中的点缺陷	68
5.2.1 四面体间隙	68
5.2.2 六角间隙	70
5.2.3 点缺陷的畸变组态	70
5.2.4 替代杂质原子	72
5.3 表面点缺陷	73
5.4 位错和层错	76
5.4.1 面心立方金属中的位错和层错	76
5.4.2 金刚石结构中的位错和层错	80
5.4.3 闪锌矿结构中的位错和层错	83
5.4.4 纤锌矿结构中的位错和层错	84
5.5 孪晶界和其他面缺陷	85
参考文献	87
第六章 外延薄膜中缺陷的形成过程	88
6.1 晶格常数和热膨胀系数对缺陷形成的影响	88
6.2 异质外延薄膜中的应变	91
6.2.1 外延薄膜的错配度	91
6.2.2 异质外延薄膜中的应变	91
6.3 外延薄膜中的错配位错	92
6.3.1 产生错配位错的驱动力	92
6.3.2 错配位错的成核和增殖	95
6.4 岛状薄膜中的应变和错配位错	99
6.5 外延薄膜中其他缺陷的产生	102
参考文献	104
第七章 薄膜中的扩散	105
7.1 扩散的宏观定律和微观机制	105
7.2 短路扩散	107
7.3 半导体晶体中的扩散	109

7.4 短周期超晶格中的互扩散	111
7.5 反应扩散	112
7.6 表面扩散	116
7.6.1 表面扩散的替代机制	116
7.6.2 表面扩散系数	119
7.6.3 增原子落下表面台阶的势垒	120
7.7 表面扩散的实验研究方法	121
7.7.1 超高真空扫描隧道显微镜 (STM) 直接观测法	121
7.7.2 场离子显微镜直接观测法	123
7.7.3 浓度梯度法	123
7.7.4 表面张力引起的表面扩散	123
7.8 电迁移	124
参考文献	125
第八章 薄膜的成核长大热力学	126
8.1 体相中均匀成核	126
8.2 衬底上的非均匀成核	127
8.3 成核的原子模型	131
8.4 衬底缺陷上成核	133
8.5 薄膜生长的三种模式	134
8.6 薄膜生长三种模式的俄歇电子能谱 (AES) 分析	139
参考文献	140
第九章 薄膜的成核长大动力学	141
9.1 成核长大的热力学和动力学	141
9.2 起始沉积过程的分类	144
9.3 成核率	147
9.4 临界晶核为单个原子时的稳定晶核密度	148
9.5 临界晶核为多个原子时的稳定晶核密度	151
9.6 成核长大动力学的透射电子显微镜研究	152
9.7 合并过程和熟化过程的影响	153
9.8 成核长大过程的计算机模拟	155
9.9 厚膜的生长	157
参考文献	158

第十章 金属薄膜的生长	160
10.1 金属超薄膜的成核过程	160
10.2 二维晶核的形貌	162
10.2.1 二维岛的分形生长	162
10.2.2 二维岛的枝晶状生长	164
10.2.3 二维岛的规则形状生长	165
10.3 准二维逐层生长和再现的逐层生长	167
10.4 表面活性剂对二维逐层生长的促进作用	169
10.5 巨磁电阻金属膜的生长	170
10.5.1 巨磁电阻多层金属膜	171
10.5.2 巨磁电阻金属颗粒膜	174
10.6 作为软 X 射线元件的周期性多层膜的生长及其热稳定性	174
参考文献	176
第十一章 半导体薄膜的生长	178
11.1 台阶流动和二维成核	178
11.2 自组织量子线和量子点的形成	183
11.3 双层台阶的形成	184
11.4 超晶格的生长和化学组分突变界面的形成	185
11.5 实际半导体薄膜的生长	186
11.5.1 半导体的一些性质	186
11.5.2 SiGe 薄膜的生长	187
11.5.3 金刚石薄膜的生长	189
11.5.4 SiC 薄膜的生长	191
11.5.5 BN 薄膜的生长	192
11.5.6 GaN 薄膜的生长	193
11.5.7 AlN 薄膜的生长	195
11.6 非晶态薄膜的生长	196
11.6.1 非晶态的分类 (非金属)	196
11.6.2 非晶态材料的原子结构	198
11.6.3 非晶态结构的计算机模拟	202
11.7 石墨烯的制备、结构和性质	202
11.7.1 石墨烯的发现获得诺贝尔物理学奖	203
11.7.2 石墨烯的制备方法	203

11.7.3 石墨烯独特的电子结构和性质	207
11.8 拓扑绝缘体的制备、结构和性质	213
11.8.1 量子霍尔效应与量子自旋霍尔效应	214
11.8.2 拓扑绝缘体的能带结构	215
11.8.3 二维拓扑绝缘体	216
11.8.4 三维拓扑绝缘体	217
参考文献	222
第十二章 氧化物薄膜的生长	225
12.1 氧化物高温超导体薄膜	225
12.2 氧化物磁性薄膜	229
12.2.1 巨磁电阻氧化物薄膜	229
12.2.2 磁光和磁记录氧化物薄膜	230
12.3 氧化物铁电薄膜	230
12.4 氧化物介质薄膜	232
12.5 氧化物导电薄膜	233
参考文献	233
第十三章 薄膜中的分形	235
13.1 分形的一些基础知识	235
13.1.1 规则几何图形的维数	236
13.1.2 规则分形和它们的分维	236
13.1.3 随机分形	239
13.1.4 随机分形维数的测定	241
13.1.5 标度不变性	242
13.2 多重分形	243
13.2.1 规则的多重分形谱	243
13.2.2 多重分形谱 $f(\alpha)$ 的统计物理计算公式	246
13.2.3 随机多重分形谱 $f(\alpha)$ 的计算	248
13.3 薄膜中的一些分形现象	253
13.3.1 薄膜生长初期的分形	253
13.3.2 非晶态薄膜中的分形晶化	254
13.3.3 溶液薄膜中的晶体生长	258
13.3.4 其他薄膜中的分形生长	258
13.4 金属诱导非晶半导体薄膜低温快速晶化	259

参考文献	264
第十四章 薄膜的制备方法	266
14.1 真空蒸发和分子束外延	266
14.1.1 常规的真空蒸发	266
14.1.2 分子束外延	269
14.1.3 热壁生长	272
14.1.4 离子团束生长	272
14.2 溅射和反应溅射	273
14.2.1 溅射	273
14.2.2 磁控溅射	274
14.2.3 离子束溅射	275
14.3 化学气相沉积和金属有机化学气相沉积	276
14.3.1 化学气相沉积 (CVD)	276
14.3.2 金属有机化学气相沉积 (MOCVD)	277
14.3.3 原子层外延	278
14.4 激光熔蒸	279
14.5 液相外延和固相外延	281
14.5.1 液相外延生长	281
14.5.2 固相外延生长	282
14.6 有机薄膜生长	284
14.6.1 朗缪尔-布洛吉特 (Langmuir-Blodgett) 法	284
14.6.2 自组装单层膜 (self-assembled monolayer)	286
14.7 化学溶液涂层法	287
参考文献	289
第十五章 薄膜研究方法	291
15.1 X 射线衍射方法	291
15.1.1 研究晶体结构的衍射方法的物理基础	291
15.1.2 常规 X 射线衍射	295
15.1.3 高分辨和掠入射 X 射线衍射	296
15.1.4 外延薄膜的一些高分辨 X 射线衍射实验结果	298
15.1.5 掠入射衍射的一些实验结果	299
15.1.6 X 射线吸收谱精细结构 (XAFS)	302
15.2 电子显微术	303