

扫描电子显微技术与 X射线显微分析

编 著 王 文 明 等 著

科学出版社



79.871
132

扫描电子显微技术与X射线显微分析

[美] J. I. 戈尔茨坦 等著

张大同 译

章一鸣 孙以材 校

科学出版社

1988

内 容 简 介

2572/19

本书系统地介绍扫描电子显微技术和电子探针显微分析的原理、仪器结构、实验方法、图象与化学成分分析,以及在固体和生物材料中的应用。

全书共分三个部分。第一部分包括第一至四章,介绍扫描电子显微技术和电子探针显微分析的发展和现状,电子光学原理,电子束与样品的相互作用,扫描电镜的成象和信号处理。第二部分包括第五至八章,介绍波长谱仪和能量谱仪,x射线定性分析和定量分析,以及各种修正方法。第三部分包括第九至十三章,介绍固体材料与生物材料的样品制备技术,及利用扫描电镜和电子探针仪进行分析的实例。书后附有大量的数据表和参考文献,为实际计算和进一步钻研提供方便。全书内容反映国际上80年代初期的水平。

本书可供在冶金、半导体材料与器件、生物、医学、化学、地质、天文学等领域从事扫描电镜和电子探针仪工作的科技人员及大专院校师生参考。

J.I.Goldstein et al.
SCANNING ELECTRON MICROSCOPY
AND X-RAY MICROANALYSIS
Plenum Press,1981

扫描电子显微技术 与X射线显微分析

[美] J. I. 戈尔茨坦 等著

张大同 译

章一鸣 孙以材 校

责任编辑 唐正必

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8月第一版 开本:787×1092 1/16

1988年8月第一次印刷 印张:29 1/2

印数:0001—3,750 字数:673,000

ISBN 7-03-000468-X/TN·26

定价:15.40元

本书作者

[美] J. I. Goldstein

美国 Lehigh 大学

[美] D.C. Joy

美国 Bell 实验室

[美] D. E. Newbury

美国国家标准局

[美] C. Fiori

美国国家健康研究所

[英] P. Echlin

英国 Cambridge 大学

[美] E. Lifshin

美国通用电器公司研究发展部

译 者 的 话

随着科学技术的发展,扫描电子显微镜(SEM)和电子探针仪(EPMA)已成为检测固体物质的重要手段。自从电子探针仪利用扫描电子束代替静止电子束后,两者在工作原理上已无区别。当今,许多扫描电子显微镜都备有波长或能量谱仪,具有电子探针仪的功能,在观察样品表面微观结构的同时,可以确定微区的化学成分;而在许多电子探针仪上也同样能获得扫描电子束所产生的高质量图象。由于这两类仪器具有操作方便、样品制备简单、实验结果比较直观、分析过程中样品不受损坏等特点,所以它们在材料科学、生物学、医学、化学、地质、矿物以及其它领域中得到日益广泛的应用。

我国目前已拥有相当数量的扫描电子显微镜和电子探针仪,今后将会有更多的单位装备这类先进的仪器。电子显微分析的应用研究队伍也在不断壮大。因此,较深入地理解这类仪器的物理本质和工作原理、主要结构,了解其获得最佳性能的操作技术,以及实验结果的解释、定性分析方法和定量分析的修正计算就显得十分必要,对这方面的技术参考书的迫切需要也无可置疑。此外,不少大专院校开设了有关电子显微技术方面的课程,广大师生渴望有合适的教材和参考书。J.I. Goldstein 等著的《扫描电子显微技术与X射线显微分析》一书基本能满足上述要求。该书自从1981年问世以来,已受到同行与有关科研人员的重视和好评。现将该书全文译出,希望对我国的科研工作、扫描电子显微镜和电子探针分析技术的发展能起一定的帮助作用。

原著的几位作者都是电子显微分析领域的知名学者,来自国际上有声望的大学和研究机构。他们撰写该书的出发点是为适应不同专业的读者,尽量减少繁琐的理论细节和纯数学推导,力图从物理意义上深入浅出地阐明问题。原著从实用角度出发,以简练的笔触,选择最基本的理论和课题,系统地介绍扫描电子显微镜、电子探针仪及相应的样品制备技术。特别值得一提的是本书对近年来不断发展和完善的X射线能量谱仪(EDS)的工作原理和结构、谱的失真处理、探测器的安装和检测方法、定性分析和定量计算的各种修正方法都进行了详细讨论。另外,作者认为生物样品微观结构和微区成分分析受到样品制备技术的限制,因而专门开辟了独立的章节,系统地介绍生物样品的各种制备方法。这些内容很有参考价值。

原著涉及的领域比较广泛,其中出现大量专业名词和术语,翻译时则以科学出版社的《英汉物理学词汇》、《英汉生物学词汇》和《英汉数学词汇》为准,并参考了国内其它出版社的有关专业词典。书中个别有待商榷之处以“译者注”指明。原著中的人名,凡已为广大读者所熟悉、又有公认译法的,译文中采用中文译名,其余均保持原文写法。译著末的索引删节了原著中个别重复的条目,并以中文笔划为序重排,以便读者查找。

本书前言,第一、二、四、十一、十二、十三各章由河北工学院孙以材校订;第三、五、六、七、八、九、十、十四各章由中国科学院仪器厂章一鸣校订。书中有关生物的内容由华南农业大学章潜才审核。华南工学院倪乃君承担了大部分译稿的整理工作,在此一并致

谢.

由于译者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,恳请批评指正.

张大同
华南工学院
一九八七年七月

5

序 言

本书是在 Plenum 出版社 1975 年出版的《实用扫描电子显微术》一书的基础上进行修订和充实而成的。作者通过在 Lehigh 大学每年举办的扫描电子显微术与 X 射线显微分析短训班的教学,使这本教科书更加完善。书的选材旨在给学生全面介绍适用于生物、地质、固体物理和材料科学等领域的扫描电子显微术与 X 射线显微分析技术。本书内容基本上根据《实用扫描电子显微术》一书的章节安排,介绍了以下几方面的基础知识:(1)使用者应该掌握的扫描电子显微镜和电子探针的电子光学功能;(2)电子束与样品的相互作用特性;(3)象的形成和解释;(4)X 射线谱的测定;(5)定量 X 射线显微分析。作者对《实用扫描电子显微术》书中多数章节都做了补充,上述的每个题目都有最新的内容,读者能从中获得足够的知识去加深理解本书的内容,并且在实验中应用这些知识。全书我们力求强调这些技术的实用性,同时阐述仪器的各种参数,因为一个显微镜工作者能够而且必须掌握了它们才能从样品中得到优化的信息。目前,某些技术在扫描电子显微术领域内日趋重要,本书也特别予以充实。书中还详细地讨论了已获得很大进展的能量色散 X 射线谱仪。此外,我们体会到,在定性 X 射线显微分析(即鉴别样品中的元素组成)中发展各种精细方法的重要性,因此在书中介绍了适用于能量色散和波长色散 X 射线谱仪的若干方法。

由于制备一个可供扫描电镜检验和分析的理想生物样品很不容易,本书着重增加了有关生物样品制备与镀膜的内容,并详细地讨论了这个题目。应该认识到,这些内容不仅对生物工作者有价值,而且也适用于非生物学科。很多脆弱的样品,例如高分子聚合物、颜料、腐蚀性产品、纺织品和许多其它材料,常常会含有水分或别的液体,为了供扫描电镜观察,也必须进行样品制备。

书后附有常用资料的数据表,包括 X 射线主要线系的能量、质量吸收系数和背散射系数等,以方便读者在对扫描电镜和 X 射线显微分析进行计算时查阅某些重要物理量数据。

《实用扫描电子显微术》书中的某些章节或内容在本书中被删去了,其中有在“材料科学中特别有意义的反差机理”和“离子显微探针质量分析”,这些课题与其它内容将放在另一本书中,书名暂定为《扫描电子显微术和显微分析的新课题》。该专集的读者对象为已具有基本知识并想进一步深造的专业工作者。

作者感谢许多同行对本书的大力支持,特别是允许作者引用他们论文中的资料,感谢他们对《实用扫描电子显微术》一书和本书手稿所提出的批评指正。J.I. 戈尔茨坦还感谢国家宇航局行星材料计划和国家基金会地球科学部地球化学计划给予研究工作的支持和鼓励。特别感谢 Lehigh 大学的 Betty Fekete Zdinak 和 Louise Valkenburg 帮助整理手稿。感谢国家健康研究所的 Carlo Swyt 对许多原始章节的建设性批评指正。感谢通用电器公司的 Roger Bolon 和 Mike Ciccarelli 及国家标准局的 Bob Myklebust 和 Harvey Yakowitz 对本书的特别贡献。

全体作者

• v •

目 录

译者的话

序言

第一章 引言	1
1.1. 扫描电镜的进展	1
1.2. 电子探针的进展	7
1.3. 本书概要	12
第二章 电子光学	14
2.1. 电子枪	14
2.1.1. 热发射	14
2.1.2. 钨阴极	17
2.1.3. 六硼化镧 (LaB ₆) 阴极	17
2.1.4. 场发射枪	20
2.2. 电子透镜	21
2.2.1. 磁透镜的一般性质	21
2.2.2. 最小束斑尺寸的获得	23
2.2.3. 电子光学柱中的象差	26
2.3. 电子探针直径 d_p 与电子探针电流 i 的关系	28
2.3.1. d_{\min} 和 i_{\max} 的计算	28
2.3.2. 电镜参数 (d_p, i, α) 的测定	31
2.3.3. 高分辨率扫描电镜	32
第三章 电子束与样品的相互作用	34
3.1. 引言	34
3.2. 散射	34
3.2.1. 弹性散射	35
3.2.2. 非弹性散射	36
3.3. 相互作用区	38
3.3.1. 实验依据	38
3.3.2. Monte Carlo 计算法	39
3.4. 背散射电子	48
3.4.1. 与原子序数的关系	51
3.4.2. 与能量的关系	52
3.4.3. 与倾斜的关系	52
3.4.4. 角度分布	53
3.4.5. 能量分布	56
3.4.6. 空间分布	56
3.4.7. 取样深度	57

3.5. 非弹性散射产生的信号	58
3.5.1. 二次电子	59
3.5.2. X射线	63
3.5.3. Auger 电子	78
3.5.4. 阴极荧光	80
3.6. 小结	80
第四章 扫描电镜的成象	82
4.1. 引言	82
4.2. 扫描电镜的基本成象过程	82
4.2.1. 扫描作用	82
4.2.2. 图象的构成	83
4.2.3. 放大倍率	85
4.2.4. 象素(象点)	86
4.2.5. 景深	89
4.2.6. 图象的畸变	90
4.3. 立体显微技术	95
4.4. 探测器	97
4.4.1. 电子探测器	98
4.4.2. 阴极荧光探测器	103
4.5. 样品和探测器在反差形成中的作用	104
4.5.1. 反差	104
4.5.2. 原子序数(成分)反差(背散射电子信号)	104
4.5.3. 成分反差(二次电子信号)	107
4.5.4. 反差分量	109
4.5.5. 形貌反差	109
4.6. 图象质量	115
4.6.1. 信号质量和反差信息	115
4.6.2. 扫描电镜成象的方法	117
4.6.3. 分辨率限度	117
4.7. 显示反差信息的信号处理	122
4.7.1. 能见度问题	122
4.7.2. 信号处理技术	125
4.7.3. 探测器组合	134
4.7.4. 电子束能量的影响	134
4.7.5. 小结	136
第五章 X射线谱的测量: 波长谱仪和能量谱仪	137
5.1. 引言	137
5.2. 波长谱仪	137
5.2.1. 基本设计	137
5.2.2. X射线探测器	140
5.2.3. 探测器的电子系统	142
5.3. 能量谱仪	147

5.3.1.	工作原理	147
5.3.2.	检测过程	149
5.3.3.	检测过程的失真	150
5.3.4.	主放大器和脉冲堆积排除器	155
5.3.5.	来自探测器周围环境的失真	160
5.3.6.	多道分析器	167
5.3.7.	小结: 能量谱仪的操作和失真	172
5.4.	波长谱仪与能量谱仪的比较	173
5.4.1.	几何收集效率	173
5.4.2.	量子效率	173
5.4.3.	分辨率	174
5.4.4.	谱的接收范围	175
5.4.5.	最大计数率	175
5.4.6.	最小探针尺寸	175
5.4.7.	分析速度	177
5.4.8.	谱的失真	177
	附录: 探测器的初次安装和检验	178
第六章	定性 X 射线显微分析	180
6.1.	引言	180
6.2.	能量谱仪定性分析	181
6.2.1.	X 射线谱线	181
6.2.2.	能量谱仪定性分析要点	185
6.2.3.	能量谱仪定性分析中的谱峰严重重叠	189
6.2.4.	能量谱仪定性分析实例	190
6.3.	波长谱仪定性分析	192
6.3.1.	X 射线谱线的测定	192
6.3.2.	波长谱仪定性分析要点	195
6.4.	X 射线扫描	197
第七章	定量 X 射线显微分析	201
7.1.	引言	201
7.2.	ZAF 技术	201
7.2.1.	引言	201
7.2.2.	吸收因子 A	203
7.2.3.	原子序数因子 Z	208
7.2.4.	特征荧光修正 F	212
7.2.5.	连续谱荧光修正	214
7.2.6.	ZAF 方法概述	215
7.3.	经验法	218
7.4.	倾斜入射电子束的定量分析	221
7.5.	颗粒和粗糙表面的分析	223
7.5.1.	几何效应	223
7.5.2.	几何效应的补偿	229

7.5.3. 小结	237
7.6. 薄膜和薄片的分析	232
7.6.1. 薄片	233
7.6.2. 基片上的薄膜	234
7.7. 生物材料的定量分析	240
7.7.1. 引言	240
7.7.2. 分析时的质量损失和失真	241
7.7.3. 块状样品	241
7.7.4. 块状基片上的厚切片	244
7.7.5. 薄样品	244
7.7.6. 连续谱法	245
7.7.7. 在很薄支持物上的厚样品	248
7.7.8. 微滴法	249
7.7.9. 标样	249
7.7.10. 结论	250
附录 A: 连续谱法	250
附录 B: 生物材料定量分析实例	254
符号意义	257
第八章 X 射线显微分析的实用技术	259
8.1. 数据处理的一般考虑	259
8.2. 背底形状	261
8.2.1. 背底模拟	261
8.2.2. 背底滤波	266
8.3. 谱峰重叠	268
8.3.1. 线性度	270
8.3.2. 拟合优度	270
8.3.3. 线性法	271
8.3.4. 非线性法	276
8.3.5. 误差估计	278
8.4. 死时间修正	280
8.5. 定量分析实例	281
8.6. X 射线分析的精度和灵敏度	282
8.6.1. 计算精度和灵敏度的统计基础	283
8.6.2. 样品均匀性	283
8.6.3. 分析灵敏度	285
8.6.4. 微量元素分析	285
8.7. 轻元素分析	288
第九章 扫描电镜和 X 射线显微分析的样品制备技术	293
9.1. 金属和陶瓷	293
9.1.1. 扫描电镜	293
9.1.2. X 射线显微分析	294
9.2. 颗粒和纤维	296

9.3. 含水材料	300
9.3.1. 土和泥	300
9.3.2. 聚合物	300
第十章 扫描电镜和 X 射线显微分析的镀膜技术	301
10.1. 引言	301
10.1.1. 样品的特性	302
10.1.2. 代替镀膜的其它方法	304
10.1.3. 薄膜技术	305
10.2. 热蒸发	305
10.2.1. 高真空蒸发	307
10.2.2. 低真空蒸发	312
10.3. 溅射镀膜	312
10.3.1. 离子束溅射	313
10.3.2. 二极(直流)溅射	314
10.3.3. 冷二极溅射	314
10.3.4. 溅射技术	314
10.3.5. 靶的选择	315
10.3.6. 镀层厚度	315
10.3.7. 溅射镀膜的优点	315
10.3.8. 溅射镀膜的假象	316
10.4. 特殊的镀膜方法	317
10.4.1. 高分辨率镀膜	317
10.4.2. 低温镀膜	318
10.5. 镀膜厚度的确定	319
10.5.1. 镀膜厚度的估算	320
10.5.2. 镀膜过程中的测量	320
10.5.3. 镀膜后的测量	321
10.5.4. 镀层的去除	321
第十一章 扫描电镜的生物样品制备技术	322
11.1. 引言	322
11.2. 电镜上采取的措施	322
11.2.1. 环境台	323
11.2.2. 非最佳的电镜操作	324
11.3. 样品上采取的措施	324
11.3.1. 对照显微术	324
11.3.2. 样品的选择	326
11.3.3. 样品的清洁	328
11.3.4. 样品的固定	329
11.3.5. 暴露内表面	331
11.3.6. 已知生理活性区的定位	338
11.3.7. 样品的脱水	340
11.3.8. 样品的支持物	347

11.3.9.	样品的导电性	347
11.3.10.	重金属浸泡	347
11.3.11.	图象的解释和假象	349
第十二章	X 射线显微分析的生物样品制备技术	354
12.1.	引言	354
12.1.1.	问题的性质和难点	354
12.1.2.	X 射线显微分析的应用	355
12.1.3.	X 射线分析检测的种类	355
12.1.4.	生物样品的类型	355
12.1.5.	重要的原则	358
12.1.6.	样品优化制备的判据	359
12.2.	室温制备法	359
12.2.1.	固定前的工作	359
12.2.2.	固定	359
12.2.3.	组织化学法	361
12.2.4.	沉淀法	361
12.2.5.	脱水	362
12.2.6.	包埋	364
12.2.7.	切片和断裂	365
12.2.8.	样品的支持物	365
12.2.9.	样品的染色	366
12.2.10.	样品的镀膜	366
12.3.	低温制备方法	366
12.3.1.	样品的预处理	367
12.3.2.	冷冻方法	368
12.3.3.	元素在某个细胞间隙内的移动	370
12.3.4.	冷冻后的处理	370
12.3.5.	冷冻含水和部分冷冻含水的材料	371
12.3.6.	冷冻干燥	371
12.3.7.	冷冻置换	374
12.3.8.	切片	376
12.3.9.	断裂	380
12.3.10.	样品的处理	381
12.4.	微焚化	382
第十三章	扫描电镜和电子探针在固体样品与生物材料上的应用	384
13.1.	铝-铁电连接点的研究	384
13.2.	在扫描电镜中原位研究材料的变形	386
13.3.	Raney 镍合金中的相分析	388
13.4.	一种新矿物氮氧硅石 (Sinotite) 的定量分析	389
13.5.	确定 Fe-Ni-C 系的平衡相图	390
13.6.	月球金属颗粒 63344,1 的研究	391
13.7.	含水分高的植物软组织的观察	393

13.8. 含水分高的多胞植物软组织的研究	394
13.9. 含水分高的单胞动物软组织的检验	396
13.10. 含水分低的植物硬组织的观察	397
13.11. 外壳硬而内部含水分高的单胞植物组织的研究	398
13.12. 含水分高的动物中软组织的检验	399
13.13. 含水分高的单胞动物组织的研究	400
第十四章 数据表	402
表 14.1. 原子序数、原子量、金属密度	403
表 14.2. 元素一般的氧化物	405
表 14.3. $K\alpha$ 谱线的质量吸收系数	406
表 14.4. $L\alpha$ 谱线的质量吸收系数	408
表 14.5. 部分质量吸收系数	410
表 14.6. K 系 X 射线的波长和能量	427
表 14.7. L 系 X 射线的波长和能量	428
表 14.8. M 系 X 射线的波长和能量	428
表 14.9. Duncumb-Reed 背散射修正因子 R 的拟合参数	429
表 14.10 J 值和荧光产额 ω 值	430
表 14.11. 部分镀膜元素的主要性质	431
参考文献	432
英汉名词对照表	447

第一章 引言

在当代迅速发展的科学技术中，科学家需要观察、分析和正确地解释在一个微米(μm)或亚微米范围内所发生的现象。扫描电镜和电子探针是两个强有力的仪器，可用它们观察和检测非均相有机材料、无机材料及在上述微米、亚微米局部范围内的表面特征。这两种仪器都用一束精细聚焦的电子照射需要检测的区域或是需要分析的微体积，该电子束可以是静止的，也可在样品表面做光栅扫描。当电子束轰击到样品表面时会产生各种信号，其中包括二次电子、背散射电子、俄歇(Auger)电子、特征X射线和不同能量的光子。这些信号来自样品中特定的发射体积，能用于研究样品的许多特性(成分、表面形貌、晶体结构等)。

在扫描电镜(SEM)中，人们最感兴趣的信号是二次电子和背散射电子，因为当电子束在样品表面扫描时，这些信号随表面形貌不同而发生变化。二次电子的发射局限于电子束轰击区附近的体积内，因而可获得相当高分辨率的图象。象的三维形态起因于扫描电镜的大景深和二次电子反差的阴影起伏效果。其它的信号在许多情况下也同样有用。

在通常称为电子探针的电子探针显微分析仪(EPMA)中，人们最感兴趣的辐射是由于电子轰击而发射的特征X射线。从特征X射线的分析能够得到样品中直径小到几微米区域内的定性和定量成分信息。

从历史上看，扫描电镜和电子探针是作为不同的仪器发展起来的。但是，显而易见，这两种仪器很相似，其区别主要是所用的方法不同。本章将讨论这两种仪器(SEM和EPMA)的发展及其同现代商品仪器的区别与共同点。

1.1. 扫描电镜的进展

扫描电镜是用途最为广泛的一种仪器，可以用来检验和分析固体样品的显微结构特征。扫描电镜之所以十分有用，其主要原因是当检验大块样品时能够获得高分辨率。商品仪器声称的分辨率通常约为 5nm (50\AA)。高级研究仪器已经获得大约 2.5nm (25\AA)的分辨率(Broers, 1974b)。图1.1是一张高分辨率显微照片，这是用一台先进的商品扫描电镜在标准操作条件下拍摄的。

扫描电镜的另一个重要特点是样品象的三维形态，这是由大景深直接造成的。图1.2(a)和1.2(b)分别表示某个小水生有机生物躯体(放射虫, *Trochodiscus longispinus*)在光学显微镜和扫描电镜下观察到的形貌。扫描电镜景深大，提供的样品信息更多。实际上，扫描电镜文献指出，正是这个特点对使用者最有价值。多数扫描电镜显微照片是在8000倍以下的放大倍率拍摄的；在这些放大倍率时，扫描电镜容易操作，并且保持它的分辨率。图1.3是一个花粉颗粒 *Ipomoea purpurea* L (牵牛花)的显微照片，用一张照片便可显示这个单植物细胞壁表面的复杂形貌。获得这种细节的其它唯一方法是用透射电镜

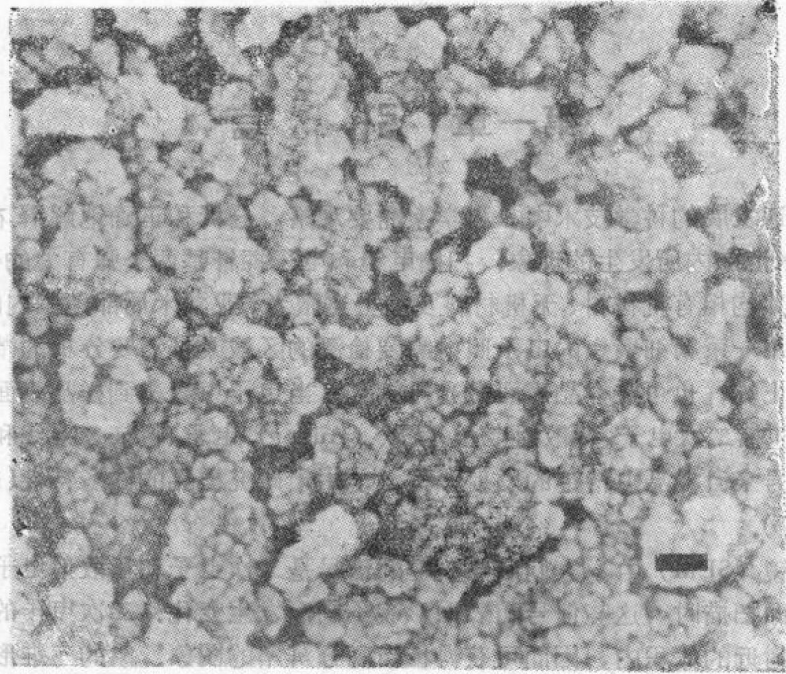


图 1.1. 磁带上具有 Au:Pd 镀层的高分辨率显微照片。图象是用备有标准钨灯丝的 JEOL-100CX 拍摄的。标尺为 30nm(感谢 JEOL 公司 J. Geller 的显微照片)

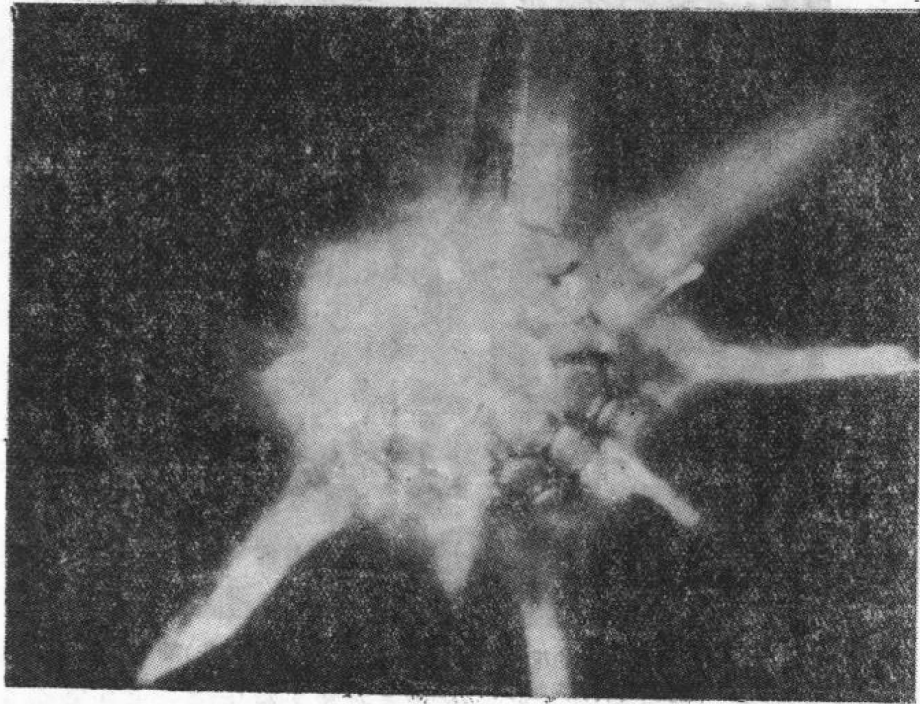
观察多个平面断层，再组成三维结构。精心制作这样细微且又不规则表面的准确复型是很困难的。

扫描电镜也能在很低的放大倍率下检验样品，这个特征对侦破案件和对其它领域的研究都很有用。图 1.4 是一个考古文物的低倍显微照片。

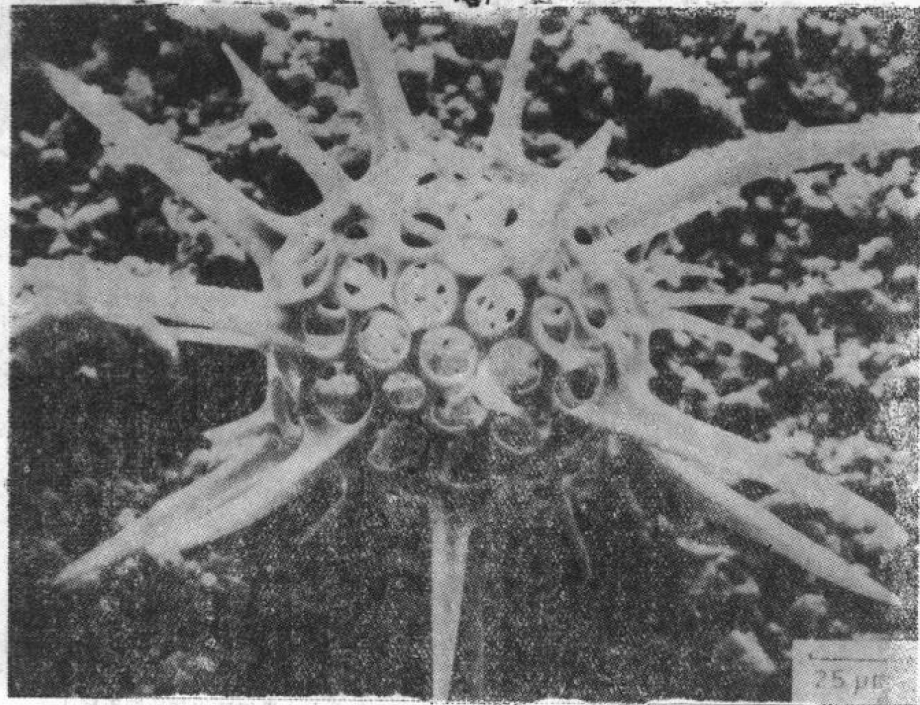
扫描电镜的基本部件是透镜系统、电子枪、电子收集器、观察与记录用的阴极射线管 (CRTs)，以及有关的电子装置。配备有这些部件的第一台商品仪器是 1965 年问世的(剑桥科学公司 Mark I 型仪器)。考虑到目前扫描电镜已相当普遍，而从 Zworykin, Hillier 和 Snyder (1942) 发表的现代扫描电镜的基础理论算起，到第一台商品仪器的出现只用了 23 年，这一事实真是令人难以置信。这个简要的历史介绍是为了指出扫描电镜的开创者及其发展过程。

早在 1938 年 von Ardenne 已描述了扫描电镜的结构，这是公认的最早的工作。实际上，他是在一台透射电镜上加装了扫描线圈，这样就相当于构成了第一台扫描透射电镜 (STEM)。对于扫描透射电镜的理论基础和实用情况他都做了十分全面而又详细的讨论。第一张 STEM 显微照片是 ZnO 晶体象，它是在 23kV 的操作电压下拍摄的，放大倍率为 8000 倍，空间分辨率在 50 和 100nm 之间。这张照片有 400×400 条扫描线，记录时间用了 20 分钟 (von Ardenne 1938a, b)，这样长的时间是因为底片是通过机械扫描与电子束同步的。这台仪器有两个静电聚光镜，扫描线圈置于这两个透镜之间。仪器上有一个阴极射线管，但不是用于拍照片的 (von Ardenne 1938a, b)。

Zworykin 等人 (1942) 描述了第一台用于检验厚样品的扫描电镜。他们认为形貌反差主要是由二次电子发射所致，并且做了图 1.5 所示的结构设计。收集器相对样品带有 50V 的正偏压，它收集的二次电子流在通过一个电阻时产生电压降，这个电压降被送到电



(a)



(b)

图 1.2. (a) 放射虫 (*Trochodiscus longispinus*) 光学显微照片。
(b) 同一个放射虫扫描电镜显微照片, 显然, 焦深大, 分辨率高

裸装置上成象, 然而, 只得到 $1\mu\text{m}$ 的分辨率。他们不满意这个结果, 因为他们要寻求得到比光学显微镜 (200nm) 高的分辨率。

因此, Zworykin 等人 (1942) 决定减少束斑尺寸和改善信噪比, 以便制造出一台较好的仪器。他们对镜头象差、电子枪亮度和束斑尺寸之间的关系做了详细分析, 导出了一个