

黄兰友 刘绪平 著

# 电子显微镜与 电子光学

科学出版社

# 电子显微镜与电子光学

黄兰友 刘绪平 著

科学出版社

1991

(京)新登字 092 号

## 内 容 简 介

本书概括地论述了电子光学的基本原理和象差理论,并在此基础上系统地介绍了电子显微镜的设计原则。书中既对各类实际透镜,特别是对一些重要的新型透镜的光学性能作了较详细的介绍,又对如何改善分辨本领进行了分析,同时还包括了作者长期从事电子显微镜研制工作的部分研究成果和实践经验。本书后半部分重点阐述了分析电子显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜和全息法等的新发展和应用。

本书可供从事电子显微镜研制和生产的技术人员,利用电子显微镜作研究的科研人员和相关专业的大学教师、大学生及研究生参考。

## 电子显微镜与电子光学

黄兰友 刘绪平 著

责任编辑 杨家福 李 红

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

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

\*

1991 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1991 年 12 月第一次印刷 印张: 15 3/4 插页: 3

印数: 0001—1 800 字数: 348 000

ISBN 7-03-002444-3/TB·78

定价: 15.50 元

## 序 言

电子显微镜(以下简称电镜)作为研究微观世界的有力工具,其应用日益广泛,是本世纪最重要的科学发明之一。透射电镜的发明者 E. Ruska 和扫描隧道电镜的发明者 G. Binnig, H. Rohrer 共同获得 1986 年度诺贝尔物理学奖正是对这一事实的确认。50 多年来,电镜分辨本领已成功地提高到  $1-2 \text{ \AA}$  的量级,而光学显微镜的最高分辨本领仅为  $3000 \text{ \AA}$  左右。近些年,高压电镜、分析电镜、扫描透射电镜、低温电镜等的发明又极大地丰富了电镜的功能,使科研工作者能够对试样进行原子尺度级的观察与分析。

作为一种综合性的分析仪器,现代电子显微镜不仅需要先进的电子光学设计,而且需要精密的机械和电子技术的配合。为了充分理解和利用电镜所提供的各种信息,还必须对电镜中发生的物理过程有清楚的认识。本书的目的就在于对电镜的物理基础,特别是对基本的电子光学原理和设计原则予以较系统的介绍。

全书分两部分。第一部分为电镜设计,这部分除对基础性的电子光学原理和象差等作了简明的陈述外,对各类实际透镜,特别是对一些重要的新型透镜的光学性能也作了较详细的介绍,从而为新型电镜的设计提供了重要的设计资料;这部分还介绍了成象理论以及为改善分辨本领所作的努力。第二部分为电子显微镜的一些新发展,这部分重点介绍了分析电镜、扫描透射电镜和全息法的发展与应用。限于篇幅,对

高压电镜、超导低温电镜等在此不作叙述,有兴趣者可参阅有关书籍。为了兼顾各方面的读者,写作中有意避免了一些冗长的数学推导,而着重于基本物理概念的阐述,同时注意保持了电子光学基础知识的系统性。另外,本书虽然主要是结合透射电子显微镜写的,但大部分内容同样适用于扫描电子显微镜及与之相类似的电子光学仪器。

本书有助于广大利用电镜作研究的科研人员更深入地了解电镜的物理基础、基本的制约关系及其含义,以便他们更自觉地选择最合适的电镜和最佳的工作条件,从而更充分地发挥仪器的作用。从事电子显微镜的研制和生产的技术人员,可从本书得到最基本的设计原则和资料。本书包括了作者长期从事电镜研制工作的部分研究成果和实践经验。最后,对于有关专业的研究生、大学生,本书可作为教学参考书,学生们从中可直接接触电镜中的实际设计课题、设计方法及技术。

作者在写作过程中,力求认真严谨,但还是难免有错误之处,欢迎读者指正。

本书的写作得到很多同志的支持和帮助,其中李成达同志曾协助整理过第一至四章的文稿,在此一并致谢!

# 目 录

第一章 电子显微镜发展简史	1
第二章 电子光学基础	14
§ 2.1 磁场的基本方程	14
§ 2.2 轴对称磁场	15
§ 2.3 傍轴区磁场分布的幂级数展开式	17
§ 2.4 电子在轴对称磁场中的运动方程	19
§ 2.5 轴对称磁场中的傍轴电子轨迹方程	20
§ 2.6 轴对称电场中的傍轴电子轨迹方程	25
§ 2.7 轨迹的可逆性原理	27
§ 2.8 电子透镜的聚焦成象性质	28
§ 2.9 焦点、焦面和焦距	30
§ 2.10 亥姆霍兹-拉格朗日定理	36
§ 2.11 物方焦距 $f_1$ 和象方焦距 $f_2$ 的关系	38
§ 2.12 加速电压的相对论修正	39
§ 2.13 电子光学中的相似性原理	41
第三章 常用磁透镜的傍轴光学参数	47
§ 3.1 磁透镜的预备知识	48
§ 3.2 磁透镜光学性质的求解法	51
§ 3.3 常用的几套磁透镜光学性质的设计曲线(或数表)	53
§ 3.4 弱透镜焦距公式及其引伸	58
§ 3.5 均匀场透镜模型	60
§ 3.6 物镜焦距的近似公式	65
§ 3.7 物镜焦点位置的近似公式	68
§ 3.8 投影镜焦距的近似公式	71

§ 3.9	最短绝对焦距 .....	74
§ 3.10	象转角 .....	77
§ 3.11	峰值场强与场分布的半宽度 .....	79
第四章	磁透镜的象差 .....	82
§ 4.1	电磁透镜的几何象差 .....	83
§ 4.2	球差 .....	94
§ 4.3	磁透镜的球差系数 .....	102
§ 4.4	有限放大倍数下的球差系数 .....	107
§ 4.5	畸变 .....	110
§ 4.6	磁透镜的色差 .....	119
§ 4.7	透镜场非严格轴对称的影响 .....	131
§ 4.8	透镜系统中象差的传递关系 .....	137
第五章	强激励透镜和非对称透镜 .....	146
§ 5.1	强激励透镜(未饱和) .....	146
§ 5.2	强激励透镜(饱和极靴) .....	153
§ 5.3	非对称透镜 .....	160
§ 5.4	几种特殊透镜 .....	165
§ 5.5	低象差探针透镜 .....	172
第六章	透镜磁路与线包的设计 .....	174
§ 6.1	磁路设计的基本原则 .....	174
§ 6.2	透镜线包的设计思路 .....	186
§ 6.3	透镜线包的小型化 .....	194
§ 6.4	透镜设计中的合轴措施 .....	198
第七章	电子枪 .....	205
§ 7.1	电子发射的基本物理过程 .....	205
§ 7.2	电子枪的亮度 .....	211
§ 7.3	三极电子枪 .....	217
§ 7.4	六硼化镧电子枪 .....	226
§ 7.5	场发射枪 .....	228

第八章 偏转系统.....	236
§ 8.1 均匀偏转场模型 .....	236
§ 8.2 双偏转系统 .....	240
§ 8.3 偏转线圈的设计 .....	243
第九章 照明系统和成象系统.....	259
§ 9.1 照明系统的组成 .....	259
§ 9.2 照明系统的一些特殊工作方式 .....	266
§ 9.3 成象放大系统 .....	274
§ 9.4 计算机控制的操作系统 .....	282
第十章 象的观察与记录.....	284
§ 10.1 荧光屏 .....	284
§ 10.2 长工作距离光学放大镜的作用 .....	286
§ 10.3 照相乳胶对电子的响应 .....	287
§ 10.4 象增强器的作用 .....	298
第十一章 成象理论初步.....	307
§ 11.1 关于相干性的初步讨论 .....	308
§ 11.2 非相干照明下的分辨本领 .....	316
§ 11.3 非相干性成象的局限性 .....	320
§ 11.4 干涉与相位反差的初步概念 .....	321
§ 11.5 弱相位样品的相位反差 .....	326
§ 11.6 透镜对电子波相位移的计算 .....	334
§ 11.7 波阵面偏差与最佳离焦量 .....	336
§ 11.8 强反差的出现条件及光学衍射分析 .....	341
§ 11.9 象散的影响 .....	346
§ 11.10 传递函数 .....	348
§ 11.11 弱振幅反差传递函数 .....	355
§ 11.12 部分相干照明对传递函数的影响 .....	357
§ 11.13 色差对传递函数的影响 .....	361
§ 11.14 有效传递函数 .....	363



§ 11.15	包络函数的局限性 .....	364
§ 11.16	关于分辨本领的讨论 .....	365
第十二章	改善分辨本领的努力 .....	373
§ 12.1	改善理论分辨本领的努力 .....	373
§ 12.2	限制分辨本领的实际因素 .....	378
§ 12.3	合轴问题 .....	386
第十三章	分析电子显微镜 .....	396
§ 13.1	电子和试样相互作用产生的信号 .....	396
§ 13.2	X 光谱及能量色散谱仪 .....	403
§ 13.3	电子能量损失谱 .....	406
§ 13.4	微区电子衍射 .....	413
§ 13.5	分析电镜用的物镜 .....	418
§ 13.6	样品损伤 .....	420
第十四章	扫描透射电子显微镜 .....	428
✓ § 14.1	<u>倒易原理</u> .....	430
§ 14.2	弹性和非弹性散射电子成象 .....	433
§ 14.3	扫描透射电镜的优缺点 .....	435
第十五章	全息法 .....	439
§ 15.1	传统电镜的局限 .....	439
§ 15.2	全息象的获得 .....	440
§ 15.3	从全息象重组显微象 .....	443
§ 15.4	图象重组 .....	444
§ 15.5	无象差成象 .....	446
§ 15.6	其它应用 .....	448
参考文献	.....	451
附录	商品电子显微镜发展简史 .....	466

## 第一章 电子显微镜发展简史

在电子光学或电子显微镜（下面一般简称电镜）的书中，一般都有一段关于电子显微镜发展历史的介绍。诸如，1878年，Abbe 指出光学显微镜分辨本领受到光波衍射的限制，给出了表示显微镜分辨本领极限的公式。1897年，J.J. Thomson 证实了电子的存在。1924年，德布罗意提出微观粒子的波粒两重性原理，计算表明电子波长比可见光的波长短得多，从而为电子显微镜获得更高的分辨本领提供了理论依据。1926年，Busch 建立了几何电子光学理论。正是由于有了物理学和电子光学的这些最基本的发现和理论，才导致 M. Knoll 和 E. Ruska 于1932年发明了电子显微镜。

实际上，上述一连串似乎很合乎逻辑的发展过程并不能完全反映发明电子显微镜的真实过程。本章不拟系统地描写电子光学和电子显微镜的发展史，许多作者对此已作了很好的论述<sup>[1,2,9]</sup>。这里只想介绍在这个领域中人类所走过的崎岖路程中的一些史实，以期给人们一些有益的启示。

虽然早在1834年，法拉第在“皇家学会会报”上发表的文章中就第一次提到基本电荷——“电的原子”的概念，但真正对电子进行实验研究的则是德国波恩的一位吹玻璃的手工业工人 Geissler<sup>[3]</sup>。在19世纪50年代，Geissler 设计了一台在当时被认为是效率很高的抽气泵，获得了较高的真空。然后，他成功地把金属电极封入玻璃管中制成气体放电管；当在

其电极间加上一定电压后，管内就会产生彩色的光弧。这种气体放电管最初只是被 Geissler 制造成各种装饰品，供人们观赏（在德国，这种简单的放电管至今仍被称为 Geissler 管）。一位在波恩担任物理教学的数学家 J. Plücker 为制备他的实验设备而与 Geissler 相识，受到他的放电管的吸引，开始对放电现象进行研究。1858 年 J. Plücker 发现在最佳的真空下，放电管阴极会射出直射的光束，这实际上是人类第一次发现阴极射线。自此以后相当长一段时间内，即使一些赫赫有名的学者也没真正弄清阴极射线的性质。如赫兹在 1881 年总结自己的实验时得出结论说：这种阴极射线没有或者只有很弱的静电或电动力学效应，而阴极射线对电是不反应的。在已知的物质中，它似乎和光最接近。到 1893 年，赫兹仍不认为阴极射线是由带电粒子（电子）所组成，主要因为他发现阴极射线可以穿透薄金属箔，他认为粒子不可能穿过实实在在的金属。

1897 年，Thomson 证明了阴极射线是一种带负电的粒子束，而且用磁场偏转方法测出了它的荷质比为  $10^{14} \text{C/kg}$ 。但他没有把这种粒子命名为电子。根据法拉第等效定律，一些科学家认为，每个离子的带电量是某一最小电荷量的整数倍。1890 年，J. Stoney 把这个基本电荷量命名为电子电量，但是他认为电子的质量是氢原子质量的  $1/1000$  倍是不可思议的。在 Thomson 发现电子后不久，电子这一名称就被使用了。这样，Stoney 当初所选用的只是表示电荷量单位的名称便有了完全新的含义。然而这个时期，电子的存在和它的性质仍不是被普遍接受的。如 1898 年，W. Wien 在总结这个阶段发展时仍认为对电子的存在还不能完全下结论，因为很难设想物质粒子穿透密实的金属膜后还保持原有的速度。直到

20 世纪初,电子的存在和它的一些性质才为科学家们普遍承认。从 19 世纪 50 年代开始一直到本世纪初,人类发现电子(人类找到的第一个亚原子粒子)花费了整整半个世纪的时间。

既然 Thomson 于 1897 年已发现电子,并证明了自由电子在静电场和静磁场中的运动服从牛顿力学定律。哈密尔顿又早在 1834 年就推导出质点运动与几何光学等效原理,那么电子光学的全部理论基础应该说在上个世纪末已经存在而且很完整了。然而实际上电子光学并不是从理论物理这个领域中引伸和发展起来的,而是在 1926 年起源于一位应用物理学家 H. Busch。他首先发表的一篇关于带有铁轭的短磁透镜聚焦理论的文章,被后人认为是电子光学发展的开始。其后于 1931 年, C. J. Davisson 和 C. J. Calbick 又发表了静电透镜的文章。这些研究成果给电子光学的发展奠定了理论基础。虽然在 H. Busch 以前就有若干物理学家和工程技术人员,如柏林工学院的 A. Matthias 和 M. Knoll 教授领导下的一批青年研究生,已经使用线圈激励的磁场作为聚焦电子束的透镜。他们当时做的工作开始只是技术性的,主要是制造和改进用于研究高压放电过程的高压示波器,但 A. Matthias 和 M. Knoll 鼓励他们把其中的物理问题搞清楚,使得这些人后来在电子显微镜的发展中起了很大的作用。这些学生中的 D. Gabor (此人后来在 1948 年提出全息技术,试图用此法提高电镜的分辨本领,但由于在 40—50 年代电子束源的相干性问题没有解决而未获成功。到 70 年代激光技术出现之后,他作为全息术的发明者而获诺贝尔奖。)在柏林工学院时期,首先使用带铁轭的磁透镜,所以被认为是现代磁透镜的发明者,不过 D. Gabor 本人不这么认为,因为他当

时这样做只是为了屏蔽掉线包的杂散场的影响，而没有意识到加铁轭后会使磁场集中和加强以形成短磁透镜。只有当 H. Busch 的文章发表，并经过 Ruska 和 Knoll 所做的精细实验验证后，人们才明白了铁轭在磁透镜中所起的巨大作用。1933 年，Ruska 和他当时的同学 Bodo Von Borries（他们后来在发展透射电子显微镜上曾长期共事）共同在磁透镜中采用了极靴。

在 Ruska 还未想到做电子显微镜之前，曾有一位年轻的理论物理学家在谈话中提到过制造透射电镜的可能性，此人就是后来成为著名核物理学家的 L. Szilard。在第二次世界大战中此人曾推动美国政府制造原子弹，并起草了爱因斯坦致美国总统罗斯福的署名信。据 D. Gabor 回忆<sup>[4]</sup>，早在 1928 年，他和 L. Szilard 在柏林一家咖啡馆里闲谈时，L. Szilard 这个具有丰富想象力和敏锐洞察力的青年理论物理学者就提出：既然 Busch 发明了电子透镜，德布罗意又指出电子的波长在‘埃’的数量级以下，你们为什么不制造一台电子显微镜呢？用它可以看到原子。D. Gabor 当时回答说：是啊，不过活样品经不起真空，而任何物质在电子束的照射下都会被烧成渣子。正如 D. Gabor 在 1974 年回忆此事时所说，在当时谁会想象到这种渣子不但能保持原来的宏观结构，甚至还能保持有机分子的原形。

Ruska 在 1931 年向他的导师 Knoll 提出电子显微镜的设想，他的想法是：电子是极小的粒子，所以电子显微镜的分辨本领不会像光学显微镜那样受波长的限制，应该有分辨分子和原子的能力。可是 Ruska 当时根本不知道德布罗意在 1924 年已提出的物质波的著名论断。Ruska 后来回忆说<sup>[5]</sup>，当他们的导师 Knoll 在 1932 年通过一位物理学家了解到电

子有波动性,回来后对他讲起此事时,他开始非常失望,因为他当初所设想的电子显微镜分辨本领不会受到波长限制的想法破灭了。不过,在作了计算,发现电子的波长非常短,它所限制的分辨本领大大超过光学显微镜分辨本领后,他才放心下来。

1931年6月4日,Knoll首次公开报告他和 Ruska 合做的第一台两级放大的透射电镜的结果(图 1.1)。可是在比他们早五天以前, Siemens-Schuchert 公司的一位主任电气工程师 R. Rüdberg 已申请了包括静电和电磁电镜的专利,于是从专利法角度讲,这个想得很周到,但什么也没有做的人则是电子显微镜的发明者。尽管如此, Ruska 的贡献最终毕

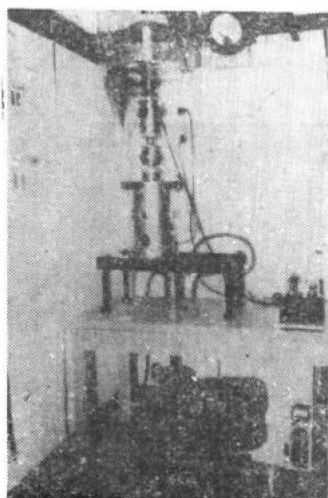


图 1.1 Knoll 和 Ruska 的第一台电子显微镜(复制品), 1931 年

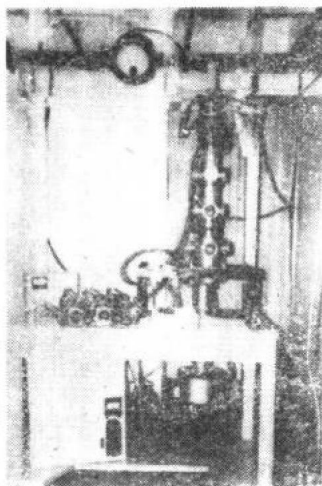


图 1.2 Ruska 和 Bodo Von Borries 试制的第二台电子显微镜(复制品), 1933 年,放大倍数已超过光学显微镜

竟得到了历史的承认。相隔 50 余年以后，1986 年的诺贝尔物理奖金的一半授予了 Ruska，以表彰他对电子显微镜所作的工作和开拓性的贡献。

1932 年，Knoll 离开了柏林工学院，去开发电视技术，后来他成为电真空方面的权威人士。1933 年 Ruska 和 Bodo

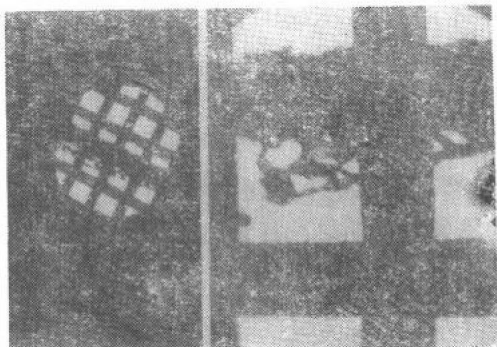


图 1.3 第一张生物样品的电子显微象 ( $15\mu\text{m}$  厚的切片), 1934 年

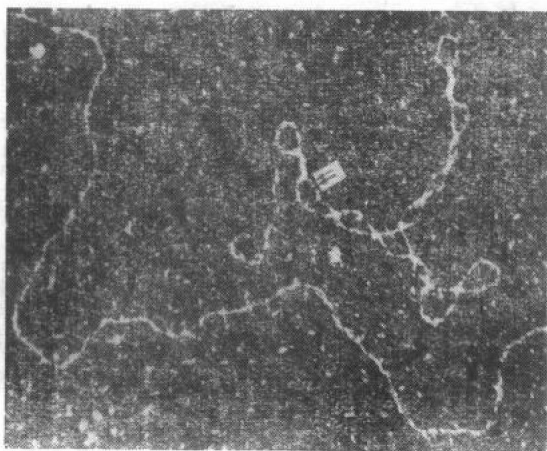


图 1.4 超螺旋 DNA 分子, 两箭头之间的间距为  $30\text{\AA}$ , 相当于 10 个核苷酸(北京大学生物系提供)

Von Borries 制造了第二台配有极靴的两级短焦距透镜的电子显微镜，分辨本领与光学显微镜相当或略好一些(图 1.2)。这一年，这两位青年人先后获得博士学位并离开了柏林工学院，电子显微镜的工作也就停了下来。当时多数人对电子显微镜的意义从两个方面持有怀疑态度，一方面认为没有必要去追求观察更细的结构，另一方面对电子显微镜能否获得更高的分辨本领表示怀疑。当时电子显微镜拍下的最好的照片，也只是类似被电子束烧焦的棉花纤维之类很不像样的照片。

三年以后，经过一番努力，Ruska 通过医学界一些有影响和有远见的人物，说服了 Zeiss 和 Siemens 公司试制商品电子显微镜。因为考虑到电镜需要高稳定度的电源，Ruska 选择了 Siemens 公司，并与 Bodo Von Borries 合作，开始制造电子显微镜。在这段时间里，比利时大学的 L. Marton (“Advances in Electronics and Electron Physics” 的创刊人和编辑)制造了一台极简陋的卧式电镜，并拍出了第一张生物切片照片。这张照片虽然很不像样，但它促使人们看清电镜发展势头(图 1.3)。作为图 1.3 的对比，图 1.4 给出了一张现代电镜拍的生物切片照片。

在工业企业办的研究所里，首先开展电子显微镜研究工作的是德国的 AEG 公司。1930 年 E. Brüche 和 H. Johnson 开始研究发射式电镜。AEG 这个大电气公司一直是西门子公司们的竞争者。在西门子公司发展磁透镜式电子显微镜时，AEG 就发展静电式电子显微镜。后来 AEG 与蔡司联合研究静电电子显微镜与西门子公司竞争，为此他们集中了相当一批很有才能的科学家，其中有著名的理论家 O. Scherzer。可是由于当时无法预料的原因(随着研究



的深入,人们发现静电透镜的象差比磁透镜大得多,而且提高电镜的加速电压会带来很多的不便),静电式电子显微镜敌不过磁透镜式电子显微镜。AEG 首先退出了这场竞争。不过在 40 年代末期,静电透镜的电子显微镜的末日已是在预见之中的事了。虽然蔡司的科学家们想了种种巧妙的办法,如 G. Möllenstedt 将样品放在高压上使电子能以更高的速度穿过样品,也尝试过 Scherzer 提出的用非轴对称电子光学系统消球差等等,但所有这些努力都没有能挽救静电式电子显微镜最后被淘汰的命运。尽管如此,AEG 的科学家还是作出了很多重要的贡献。例如 Mahl 首先采用复型技术,从而成功地把电子显微技术引进金属学研究。Haus Boersch 在 1936 年首先发现和解释了成象过程中的电子衍射现象,并提出了选区衍射方法,该方法后来经 Von Ardenne 及 Le Poole 改进后成为电子显微镜的基本技术之一。

德国的科学家们主要是进行了开拓性的工作。当电子显微镜的成功一经传开,立即吸引了世界各地很多的科学家。早在 1935 年,Whelpton 和 Parnum 就建立了英国第一台电子显微镜“EMI”。从 1938 年起,加拿大人 J. Hillier 和 A. Poebus 也开始试制电子显微镜,他们的工作导致 1941 年制成一批商用电子显微镜 RCA-B。在此期间,电子显微镜的实际分辨率一直停留在  $20 \text{ \AA}$  左右。稍后,J. Hillier 和 E.G. Ramberg 证明这主要为轴上象散所限制,为此他们发明了消象散器,把分辨率降到  $10 \text{ \AA}$  以下。为了测量象散量,他们利用了薄膜边缘上的费涅耳衍射。

自此,在进一步作了很多技术性的改进以后(如减少振动、提高电源稳定度等等),电子显微镜的分辨能力逐步提高。到目前已能制造具有原子分辨能力的高分辨率电镜。同时,