

研究生教学用书

分析电子显微学导论

Introduction to
Analytical Electron Microscopy

戎咏华 编著



高等教育出版社

GRADUATE

研究生教学用书

分析电子显微学导论

Introduction to
Analytical Electron Microscopy

戎咏华 编著



高等教育出版社

内容简介

分析电子显微学是揭示材料介观和微观世界的有力工具,它可对材料显微组织的形貌、结构、成分进行三位一体的原位分析,是材料研究的重要现代技术之一。本书是材料科学与工程专业硕士生的课程教材。全书共分六章,其内容包括分析电子显微镜的构造及其功能、样品的制备方法、电子衍射花样的特征和标定方法、晶体衍射中的数学处理、电子衍射衬度运动学和动力学理论及其应用、高分辨和高空间分析电子显微术的原理和应用以及分析电子显微学的进展。

本教材是掌握分析电子显微术原理和应用的入门书,故注重基本的物理概念和相关的数学推导,并赋予实例加以理解,配以思考题和练习题使读者掌握重点。本书配有电子课件和练习题答案的光盘,便于教师授课。本教材也可作为正在从事该领域学习和研究的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

分析电子显微学导论/戎咏华编著. —北京:高等教育出版社,2006.10

ISBN 7-04-019942-4

I. 分... II. 戎... III. 电子显微镜分析-研究生-教材 IV. 0657.99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 095664 号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 张海雁 封面设计 李卫青
责任绘图 郝林 版式设计 史新薇 责任校对 朱惠芳
责任印制 韩刚

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	北京鑫丰华彩印有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2006 年 9 月第 1 版
印 张	32	印 次	2006 年 9 月第 1 次印刷
字 数	540 000	定 价	58.00 元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19942-00

序

牛津大学材料系将材料科学的内容归纳为:材料制备加工工艺 (processing)、材料的表征 (characterization)、材料的性质 (property)、理论与建模 (theory and modeling), 可见材料的表征是材料科学的重要组成部分。20 世纪 50 年代以来, 高分辨电子显微镜的发展使材料组织成像 (包括缺陷成像) 技术取得突破性进展, 而近十余年来, 在高分辨成像基础上原位结构和成分分析技术的问世, 使应用电子显微镜作材料表征如虎添翼, 倍领风骚。高分辨分析电子显微学正受到材料科学界的极大青睐。近几年上海交通大学材料学院为硕士研究生开设了“分析电子显微学导论”课程, 由戎咏华教授讲授, 取得较好效果。在各方面要求下, 他在繁忙的教学和科研工作中, 基于教学经验和科研积累, 编著成《分析电子显微学导论》书稿, 由高等教育出版社出版。本书对分析电子显微学的基本原理, 分析电子显微镜的样品制备, 分析电子显微镜的应用技术都作了清晰和较全面的阐述, 适用材料科学与工程研究生和材料工作者对分析电子显微镜原理和技术作基础性系统性学习。本人在粗读此书的原稿后, 认为本书的出版是作者对我国材料学科的发展和尖端人才的培养作出的重要贡献, 有助于我国材料科学与技术的自主创新。当然, 个人经验和一本著作难免有不尽意之处, 容以后逐步改进。写了这些感想, 姑为序。

徐祖耀

2006 年 6 月于上海

前 言

随着科学技术的发展,透射电子显微镜的性能和功能得到了长足的发展,不仅能对原子的排列进行直接的观察,而且同时能在纳米尺度对成分进行分析,从而使透射电子显微镜成为能对材料的形貌、结构、成分原位一一对应分析的分析电子显微镜。这种高分辨、高空间分析电子显微镜正适应当前涌现出的各种新材料,尤其是纳米材料的研究,因此我国诸多大学和研究机构近几年相继购买先进的分析电子显微镜。为了使学生能掌握分析电子显微镜在材料研究中的基础知识,上海交通大学材料科学与工程学院为硕士研究生开设了“分析电子显微学导论”(Introduction to Analytical Electron Microscopy)课程,该教材就是作者在多年的授课讲义基础上通过体系的调整和内容的增补,用两年的时间撰写完成的。

《分析电子显微学导论》是一本掌握分析电子显微镜原理和应用的入门书,因此该书重点放在基本的物理概念和相关的数学推导,同时通过列举较多的实例来加强读者对基本原理的理解和拓宽读者的视野,并配以思考题和练习题使读者掌握每章的重点。为了保证教材内容的连续性以便于读者阅读,书中对某些本科生相关课程教材内容进行了简要的描述。本教材共分六章。第一章主要介绍了透射电子显微镜的构造及其功能,包括先进的场发射电子枪、会聚电子束的小聚光镜和物镜前场、记录电子图像的慢扫描 CCD 和成像板。第二章主要介绍了样品制备的方法,重点放在金属和无机非金属样品的制备,包括双喷电解抛光、离子减薄和聚焦离子束等制样技术。第三章主要介绍了电子衍射的条件和各种情况下的电子衍射特征和标定的方法,强调系统倾转技术的原理及其应用。第四章主要介绍了晶体衍射中的数学处理方法,包括晶体取向关系的转换矩阵、两相取向关系“边-边匹配”的理论预测、晶体对称性和系统消光的数学处理。第五章主要介绍了电子像衬度的分类及其成像方法,衍射衬度的运动学和动力学理论,重点放在缺陷晶体的衍射衬度分析方法,最后对缺陷晶体的衍射衬度像的计算机模拟和应用进行了简介。第六章介绍了高分辨和高空间分析电子显微术,包括高分辨电子显微术、会聚束电子衍射、薄膜样品 X 射线能谱的分析、电子能量损失谱的分析和分析电子显微术的进展,重点放在高分辨电子显微术和会聚束电子衍射的原理和应用。分析电子显微术的进展简介了负球差系数成像技术、原子序

数衬度(Z 衬度)成像技术和电子全息术。书后有12个附录,以供读者实际使用。为能使读者了解每章节更多的内容,每章后面列出了有关参考文献。为了便于教师授课,本教材配有电子课件和练习题解答的光盘。根据作者的教学实践经验,该教材采用电子课件授课,可在54~64学时内完成(不包括分析电子显微术的进展内容)。该教材也可作为36学时授课和理化检验科技人员的参考书。

这本教材是众多从事电子显微学研究人员贡献的成果,包括文献中列出的作者和文献中未列出的研究人员,在此,对他们的贡献表示感谢。在教材脱稿后我首先要感谢我们课题组的博士生和硕士生以及李戈扬教授的博士生和硕士生,其中有徐山清、温春生、王晓东、黄宝旭、李伟、钟宁、曹晔、王晓宇和孔明、岳建岭、韩增虎,当我对书中大量公式和图表望而生畏时,是他们给了我有力的支持,得以使该教材在今日问世。尤其是王晓东和黄宝旭博士生不仅在教材图文工作中投入了大量的劳动,而且承担了电子课件的制作。我要感谢在我整个写作过程中两任主管研究生教学的副院长张荻教授和王敏教授给予支持和帮助。我要感谢有助于我在电子显微学领域成长的同事胡赓祥教授、王永瑞教授、陈世朴教授和郭永祥博士(现在美国)。我还要感谢徐祖耀院士,在他组建的“相变理论及其应用”课题组工作至今近十年,扩大了我的知识面和研究领域(包括电子显微学的应用),尤其在学生的要求下,当我犹豫是否在繁重的科研教学之间撰写该书时,徐先生的一句话“著书立说乃是教授之本分”促成我开始动笔,书成之后他又欣然同意为此书写序。在该书初稿形成之后,恰逢我的老朋友邹进博士(现在澳大利亚)和贾春林博士(现在德国)来访,在我介绍了该书的内容后他们给予了肯定,并提出了建设性的意见,例如,要增加样品先进的制备方法和电子显微学进展的内容,随后又给我寄来他们的文章以供参考,对他们热情的帮助表示感谢。最后要感谢我的家人,是他们给了我八小时以外和节假日的时间安心于写作。

尽管作者涉足分析电子显微学20多年,但仍缺乏该领域的理论基础和实践经验,故本书存在缺点和错误在所难免,恭请读者批评指正,并将之发至我的电子邮件信箱 yhrong@sjtu.edu.cn,以便再版时加以修改,对此预表谢意。

戎咏华

2006年5月

目 录

绪 论	1
第一章 分析电子显微镜的构造及其功能	4
1.1 电子波长和电磁透镜	4
1.1.1 电子波长	4
1.1.2 电磁透镜	6
1.2 构造及其特性	10
1.2.1 照明系统	11
1.2.2 多功能样品室	16
1.2.3 成像系统	17
1.2.4 图像观察与记录系统	18
1.2.5 真空和供电系统	20
1.2.6 仪器的计算机控制和分析数据的计算机处理	20
1.3 成像、变倍和衍射实现的原理	22
1.4 理论分辨本领极限	25
参考文献	27
第二章 透射电子显微镜样品的制备方法	28
2.1 表面复型技术	28
2.1.1 一级复型	30
2.1.2 塑料-碳二级复型	33
2.1.3 抽取复型	35
2.2 粉末样品和薄膜样品的制备	37
2.2.1 粉末样品的制备	37
2.2.2 薄膜样品的制备	37
2.3 块体样品制成薄膜的技术	40
2.3.1 金属块体制成薄膜样品	40
2.3.2 无机非金属块体制成薄膜样品	45
2.3.3 高分子块体制成薄膜样品	48
2.3.4 聚焦离子束方法	49
参考文献	52
第三章 电子衍射	54
3.1 电子衍射与 X 射线衍射的比较	54

3.2 衍射产生的条件	55
3.2.1 几何条件	55
3.2.2 物理条件	56
3.3 电子衍射几何分析公式及相机常数	59
3.3.1 电子衍射仪中的衍射	59
3.3.2 透射电子显微镜中的衍射	61
3.4 选区电子衍射的原理及操作	63
3.5 多晶电子衍射花样及其应用	65
3.5.1 多晶衍射花样的产生及几何特征	65
3.5.2 多晶电子衍射花样的应用	67
3.6 单晶电子衍射花样及其应用	70
3.6.1 单晶电子衍射花样的几何特征和强度	70
3.6.2 单晶电子衍射花样的标定方法	74
3.6.3 单晶电子衍射花样的基本应用	80
3.7 大量平行层错的单晶电子衍射花样	85
3.7.1 HCP 结构的花样特征和层错概率的计算	85
3.7.2 FCC 结构的花样特征和层错概率的计算	91
3.8 系统倾转技术及其应用	96
3.8.1 双倾台系统倾转技术	96
3.8.2 电子束方向的测定	97
3.8.3 重位点阵特征参数的测定	98
3.8.4 三维重构法确定物相	101
3.8.5 迹线分析方法	104
3.9 复杂电子衍射花样的特征和标定方法	109
3.9.1 具有取向关系的电子衍射花样	109
3.9.2 孪晶电子衍射花样	110
3.9.3 高阶劳厄花样	116
3.9.4 超点阵衍射花样	124
3.9.5 二次衍射花样	125
3.9.6 调幅结构的电子衍射花样	129
3.9.7 长周期结构的电子衍射花样	130
3.9.8 菊池电子衍射花样	137
参考文献	144
第四章 晶体衍射中的数学处理	147
4.1 取向关系的转换矩阵	147
4.1.1 基体任意位向下两相取向花样的预测	147
4.1.2 晶体在不同坐标下的晶向和晶面指数的转换矩阵	161

4.1.3 晶体间的重位点阵	164
4.1.4 孪晶关系的转换矩阵	168
4.2 取向关系的理论预测	176
4.2.1 原理和判据	177
4.2.2 HCP/BCC 体系	178
4.2.3 HCP/FCC 体系	188
4.3 晶体对称性引起的系统消光	201
4.3.1 对称元素及其对应操作的矩阵	201
4.3.2 宏观对称元素的组合规律	204
4.3.3 点群的推导和转换矩阵	207
4.3.4 点群、晶系和布拉菲点阵之间的关系	215
4.3.5 空间群中的平移对称元素	217
4.3.6 等效点系	219
4.3.7 二维点阵、平面点群和平面群	221
4.3.8 电子衍射花样的对称性	226
4.3.9 系统消光	227
4.3.10 晶体对称性在结构分析中的应用举例	231
参考文献	237
第五章 电子衍射衬度成像	240
5.1 电子像衬度的分类及其成像方法	240
5.1.1 质厚衬度成像原理	240
5.1.2 衍射衬度成像的原理	244
5.1.3 相位衬度成像原理	246
5.2 衍衬运动学理论	247
5.2.1 基本假设和近似处理	247
5.2.2 完整晶体衍衬的运动学方程	251
5.2.3 完整晶体运动学衍衬理论的实验验证	253
5.2.4 缺陷晶体衍衬的运动学理论及其应用	256
5.3 衍衬动力学理论(波动光学方程)	285
5.3.1 电子的散射及其交互作用	285
5.3.2 完整晶体衍衬动力学方程	288
5.3.3 完整晶体的动力学方程的解	291
5.3.4 厚度消光和弯曲消光	295
5.3.5 反常吸收效应	298
5.3.6 缺陷晶体衍衬动力学方程及其应用	304
5.3.7 缺陷晶体衍衬像的计算机模拟及其应用	310
参考文献	320

第六章 高分辨和高空间分析电子显微术	322
6.1 高分辨电子显微术	322
6.1.1 傅里叶变换与卷积理论	322
6.1.2 高分辨像形成过程描述的两个重要函数	329
6.1.3 弱相位体高分辨像的直接解释	334
6.1.4 高分辨像的多层法计算机模拟	341
6.1.5 高分辨像显示位错特征的方法	346
6.1.6 用高分辨像确定未知晶体结构的方法	349
6.2 会聚束电子衍射	357
6.2.1 各种衍射方式和特点的比较	357
6.2.2 会聚束电子衍射花样形成和特征	358
6.2.3 HOLZ 线的指标化	363
6.2.4 会聚束电子衍射的应用举例	363
6.3 薄膜样品的 X 射线能谱分析	381
6.3.1 X 射线固体探测器的原理	381
6.3.2 薄样品成分定量分析原理及特点	384
6.4 电子能量损失谱	389
6.4.1 电子能量损失谱仪	390
6.4.2 电子能量损失谱	391
6.4.3 电子过滤成像和衍射	401
6.5 分析电子显微学进展	402
6.5.1 负球差系数成像技术	403
6.5.2 定量扫描透射电子显微术	408
6.5.3 电子全息术	416
参考文献	422
附录 1 物理常数和换算关系	424
附录 2 晶体几何关系	425
附录 3 立方晶体的晶面(或晶向)夹角表	428
附录 4 面心立方、体心立方和密排六方标准电子衍射花样	438
附录 5 面心立方、体心立方和密排六方高阶劳厄标准电子 衍射花样	444
附录 6 材料常见的几种结构	450
附录 7 立方和六方晶系的极图($c/a = 1.633$)	451
附录 8 立方晶体重位点阵特征参数之间的关系	461
附录 9 电子的原子散射振幅	469
附录 10 特征 X 射线的波长和能量表	478

附录 11 用于电子能量损失谱的电子结合能表 (EELS)	482
附录 12 分析电子显微术的有关计算机软件	484
附录出处说明	489
思考题与练习题	490

绪 论

自从 1924 年德布罗意提出了电子与光一样,具有波动性的假说和 1926 年 Busch 发现了旋转对称、不均匀的磁场可作为一个用于聚焦电子束的透镜,就为后来的电子显微镜的问世奠定了理论基础.柏林技术大学的 Knoll 和 Ruska 通过几年的努力,于 1933 年制造出世界上第一台电子显微镜,分辨本领为 50 nm. Knoll 和 Ruska 的先驱工作引起了人们的极大注意.许多科学工作者在此基础上进行了广泛的研究和改进,克服了透镜的缺陷和生物样品的损伤等问题.1939 年德国西门子公司生产了第一批作为商品的透射电子显微镜,其分辨本领优于 10 nm. 20 世纪 50 年代以来,电子显微镜开始了批量生产,并着重于改善仪器的分辨本领和生产更高加速电压的电子显微镜.至今,电子显微镜的点分辨率已优于 0.3 nm,晶格条纹分辨率优于 0.14 nm.透射电子显微镜在 20 世纪 50 年代后,开始配有选区电子衍射装置,这样不仅可获得形貌图像,而且可以进行微区的结构分析.另外,在样品室备有加热、冷却、拉伸的样品台等附件,使电子显微镜可进行原位动态观察.随着科学研究的需要和科学技术的发展,透射电子显微镜还可具有扫描透射功能,并配置以 X 射线谱仪、电子能量损失谱议等,这样可对样品的组织、结构和成分进行原位对应的综合性分析,使其能成为高分辨分析电子显微镜.例如,日本电子公司出品的 JEM-2010,飞利浦公司的 Tecnai-20 和日本日立公司的 HF-2200 及其系列分析电子显微镜近几年来相继问世.这些高性能的分析电子显微镜呈现出诸多技术的发展.场发射电子枪的商业化使电子显微镜获得相干性好,照明亮度高和能量发散小的电子源.在原双聚光镜的基础上加入小聚光镜和物镜前置磁场作为会聚透镜,可获得平行或大角度会聚的纳米尺度电子束以满足不同成像和衍射的需要.能量过滤器的问世极大地改善了电子的单色性,从而显著地提高了电子显微像和电子衍射花样的质量.物镜的球差系数通过特殊的技术可以被校正为零或负值,这一突破性的技术发展使透射电子显微镜的分辨率进一步提高.慢扫描 CCD 和电子成像板实现了电子显微像和电子衍射花样的数字化,因此可以脱机和在线分析和处理图像数据.仪器的计算机控制使透镜系统获得最佳条件变得很容易,并可自动进行消像散和聚焦.

电子显微镜的诞生,首先在医学生物上应用,随后用于金属材料的研

究. 在早期的研究中, 由于金属样品的制备问题, 只能采用间接的复型技术. 1949年, Heidenreich 第一个用透射电子显微镜观察了用电解减薄的铝试样, 他的工作说明了即使对电子具有强烈散射的金属也是能够在电子显微镜中观察的. 自从 50 年代后期, 材料的显微组织和亚结构的研究有着决定性的突破. 在这期间, 英国剑桥大学的 Hirsch 和他的合作者, 首先发展了电解减薄金属试样技术和建立薄晶体电子衍射运动学和动力学理论, 成功地分析了透射电子显微镜中所观察到的图像, 例如位错、层错等. 各种晶体缺陷以前只能在理论上描述和间接地演示, 现在能直接在电子显微镜下观察到.

1956年, Menter 用双束电子成像的方法, 在电子显微镜下直接观察酚菁铂晶体中 $(20\bar{1})$ 点阵平面间距为 1.2 nm 的条纹像, 开创了高分辨电子显微术. 实验高分辨电子显微术的形成是在 20 世纪 70 年代初, 日本的 Uyeda 等人和美国亚利桑那州立大学电子显微镜实验室的 Lijima 相继拍摄出称为结构像的照片, 证实了 Cowley 按照相位衬度提出的多层法模型的正确性. 随着该理论的日趋成熟, 借助计算机可对不同厚度晶体的成百束衍射束在各种成像条件下重构高分辨像作细致模拟, 使高分辨像的解释有了坚实的理论基础. 因此, 可从高分辨结构像了解原子点阵的排列, 打开了观察原子世界的大门. 70 年代末日本大阪大学应用物理系教授 H. Hashimoto 应用透射电子显微镜直接观察到单个重金属原子(金原子)及原子集团中的近程有序排列, 并用快速摄影记录下原子跳动的踪迹, 终于实现了人类 2000 年来直接观察原子的夙愿. 20 世纪 90 年代末, 物镜球差校正器的研制成功, 使其安装在第一台场发射透射电子显微镜的点分辨率从 0.24 nm 提高到 0.13 nm, 并用负球差系数成像技术首次获得氧化物中单氧原子列清晰的高分辨像.

自从 1939 年 Kossel 和 Möllenstedt 发现了会聚束电子衍射后, 随着 20 世纪 60 年代微细电子束技术的出现, 会聚束电子衍射理论和应用得到系统的研究和发展, 至今已成为高分辨分析电子显微学的重要分支, 能用于晶体对称性的测定, 微区点阵参数的精确测定和薄晶体厚度和晶体势函数的测定.

20 世纪 90 年代发展了高分辨原子序数衬度成像技术, 这种扫描透射电子显微镜高角环形暗场像中的亮点总是反映真实的原子, 像的解释一般不需要繁琐复杂的计算机模拟, 并且亮点的强度与原子序数的平方成正比, 由此能得到原子分辨率的化学成分信息.

伽博(Gabor)在 1948 年提出了相干衍射的概念——全息成像原理, 用这种方法可以显示电子波的相位和振幅. 电子全息术在近十几年来随

商业化场发射枪电子显微镜的出现开始在材料研究中得到实际应用,显示出它在晶体陶瓷界面、薄膜和纳米材料的磁学和电学性能研究中的独特优点.

在 20 世纪 60 年代末被研制出的 X 射线能谱仪,在 70 年代中期被用于透射电子显微镜对薄样品的成分分析,随后电子能量损失谱仪的问世,不仅弥补了 X 射线能谱仪在超轻元素分析的不足,同时克服了 X 射线能谱仪微分析与高分辨成像的不兼容性,从而使现代的分析电子显微镜同时具有高分辨结构成像和高空间分辨率微区成分分析的功能,为材料的结构和成分表征提供了有力的工具.

50 多年来的实践证明,电子显微镜是 20 世纪最重大的发明之一. Ruska 教授由于他的先驱工作给科学带来的巨大贡献,从而获得了 1986 年的诺贝尔物理学奖.随着电子显微镜的进一步完善和各种电子显微术的产生和发展,毫无疑问,电子显微镜将对科学的发展产生不可估量的作用.

第一章 分析电子显微镜的构造及其功能

1.1 电子波长和电磁透镜^[1,2]

分析电子显微镜(AEM: analytical electron microscope)是具有成分分析功能的透射电子显微镜(TEM: transmission electron microscope).它是一种以高能电子束为照明源,通过电磁透镜将穿过样品的电子(即透射电子)聚焦成像的电子光学仪器.电子束照明源和电磁透镜是透射电子显微镜有别于光学显微镜的两个最主要的组分.

1.1.1 电子波长

1924年,德布罗意(de Broglie)鉴于光的波粒二象性提出这样一个假设:运动的实物粒子(静止质量不为零的那些粒子:电子、质子、中子等)都具有波动性质,后来被电子衍射实验所证实.运动电子具有波动性使人们想到可以用电子束作为电子显微镜的光源.对于运动速度为 v ,质量为 m 的电子,波长为

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (1.1)$$

式中, h 为普朗克常量.

一个初速度为零的电子,在电场中从电位为零处开始运动,因受加速电压 U (阴极和阳极的电位差)的作用获得运动速度为 v ,那么加速每个电子(电子的电荷为 $-e$)所做的功(eU)就是电子获得的全部动能,即

$$\begin{aligned} eU &= \frac{1}{2}mv^2 \\ v &= \sqrt{\frac{2eU}{m}} \end{aligned} \quad (1.2)$$

加速电压比较低时,电子运动的速度远小于光速,它的质量近似等于电子的静止质量,即 $m \approx m_0$,合并(1.1)和(1.2)式得

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em_0U}} \quad (1.3)$$

把 $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m_0 = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 代入(参见附录 1)(1.3)式即为

$$\lambda = \left(\frac{1.5}{U} \right)^{1/2} \quad (1.4)$$

式中 λ 以 nm 为单位, U 以 V 为单位. 上式说明电子波长与其加速电压平方根成反比. 加速电压越高, 电子波长越短.

对于低于 500 eV 的低能电子来说, 用公式(1.4)式计算波长已足够准确, 但一般透射电子显微镜的加速电压在 80 ~ 200 kV 或更高, 而超高压电子显微镜的电压在 1 000 ~ 2 000 kV. 对于这样高的加速电压, 上述近似不再满足, 因此必须引入相对论校正, 即

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2}} \quad (1.5)$$

式中 c 为光速. 相应的电子动能为

$$eU = mc^2 - m_0c^2 \quad (1.6)$$

整理(1.1)、(1.5)、(1.6)三式得

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em_0U(1 + eU/2m_0c^2)}} \quad (1.7)$$

与(1.3)式相比, (1.7)式中 $(1 + eU/2m_0c^2)$ 为相对论校正因子. 在加速电压 U 为 50 kV、100 kV 和 200 kV 时, 这个修正值分别约为 2%、5%、10%. 表 1.1 中列出了不同加速电压下电子的波长和速度. 从表中可知, 电子波长比可见光波长短得多. 以电子显微镜中常用的 80 ~ 200 kV 的电子波长来看, 其波长仅为 0.002 51 ~ 0.004 18 nm, 约为可见光波长的十万分之一.

表 1.1 不同加速电压下的电子波长和速度

U/kV	λ/nm	$V/(10^{11} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1})$
40	0.006 01	1.121 6
60	0.004 37	1.338
80	0.004 18	1.506
100	0.003 70	1.644
200	0.002 51	2.079
500	0.001 42	2.587
1 000	0.000 87	2.822

1.1.2 电磁透镜

一定形状的光学介质界面(如玻璃凸透镜旋转对称的弯曲折射界面)可使光波聚焦成像,而特殊分布的电场、磁场,也具有玻璃透镜类似的作用,可使电子束聚焦成像的电场和磁场统称为电子透镜(electron lens)。人们把用静电场做成的透镜称为静电透镜(electrostatic lens)。最初静电透镜既用于电子枪又用于成像透镜,而现在只用于电子枪,成像透镜采用更安全的电磁透镜(electromagnetic lens),因此下面仅讨论电磁透镜的聚焦原理和特点。

磁场 \mathbf{B} 对电荷量为 $-e$ 和速度为 \mathbf{v} 的电子的作用力,即洛伦兹力,其矢量表达式为

$$\mathbf{F} = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.8)$$

F 的大小为

$$F = evB\sin(\mathbf{v}, \mathbf{B}) \quad (1.9)$$

F 垂直于电荷运动速度 \mathbf{v} 和磁感应强度 \mathbf{B} 所决定的平面, F 的方向按矢量叉积 $(\mathbf{B} \times \mathbf{v})$ 的右手法则来确定。为了便于分析电磁透镜聚焦原理,把透镜磁场中任意一点的磁感应强度 \mathbf{B} 分解为平行于透镜主轴的轴向分量 B_z 和与之垂直的径向分量 B_r ,如图 1.1(a) 所示。

如果一束速度为 \mathbf{v} 的电子沿着透镜主轴方向射入透镜,其中精确的沿轴线运动的电子不受磁场力作用而不改变运动方向,由(1.9)式可知,轴线上磁感应强度径向分量为零。而其他与主轴平行的入射电子将受到电子所处位置磁感应强度径向分量 B_r 的作用,产生切向力 $F_t = evB_r$,使电子获得切向速度 v_t ,如图 1.1(b) 所示。一旦电子获得切向速度 v_t ,开始做圆周运动的瞬间,由于 \mathbf{v}_t 垂直于 B_z ,产生径向作用力 $F_r = ev_t B_z$,使电子向轴偏转。结果使电子做如图 1.1(c)、(d) 所示的那样的圆锥螺旋运动。一束平行于主轴的入射电子,通过电磁透镜后被聚焦在轴线上一点,即焦点。这与光学玻璃凸透镜对平行于轴线入射的平行光聚焦作用十分相似[见图 1.1(e)]。

一、电磁透镜的折射行为

实验和理论证明,电子束在电磁透镜中的折射行为和可见光在玻璃透镜中的折射行为相似,满足下列性质:

- (1) 通过透镜光心的电子束不发生折射;
- (2) 平行于主轴的电子束,通过透镜后聚焦在主轴上一点 F ,称为焦点;经过焦点并垂直于主轴的平面称为焦平面;
- (3) 一束与某一副轴平行的电子束,通过透镜后将聚焦于该副轴与