

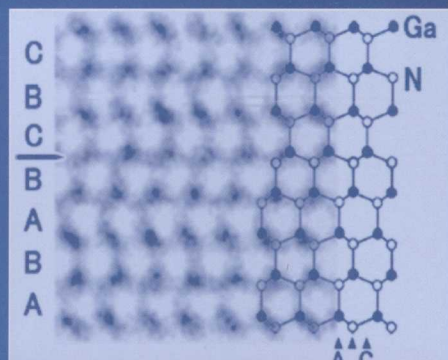
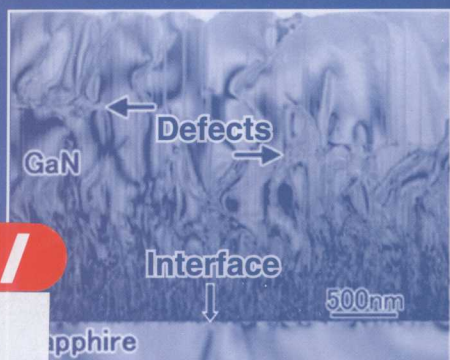


半导体化合物研究与应用丛书

普通高等教育“十二五”规划教材

半导体化合物 光电器件检测

■ 许并社 主 编 ■ 贾虎生 刘旭光 梁 建 副主编



PHOTOELECTRIC DEVICE DETECTION
AND MEASUREMENT
OF SEMICONDUCTOR COMPOUND



化学工业出版社

014013026

TN36
09



半导体化合物研究与应用丛书

普通高等教育“十二五”规划教材

半导体化合物 光电器件检测

■ 许并社 主 编 ■ 贾虎生 刘旭光 梁 建 副主编



TN 36
09



化学工业出版社

· 北京 ·



北航

C1699854

350810310

本系列丛书共分《半导体化合物光电原理》、《半导体化合物光电器件制备》、《半导体化合物光电器件检测》三部。从ⅢA~ⅤA族半导体化合物的基本原理、光电器件制备与工艺,以及器件性能检测等方面,较系统地介绍了相关基础知识,适合材料,物理化学,光学,微电子学与固体电子学等专业的本科和研究生以及工程技术人员和企业相关人员阅读。

半导体化合物光电器件检测

主编 许并社 副主编 刘俊之 宋夏

图书在版编目(CIP)数据

半导体化合物光电器件检测/许并社主编. —北京:
化学工业出版社, 2014. 2

(半导体化合物研究与应用丛书)

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-18947-9

I. ①半… II. ①许… III. ①化合物半导体-半导体
光电器件-检测-高等学校-教材 IV. ①TN360.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第267181号

责任编辑:刘俊之

责任校对:宋夏

文字编辑:杨帆

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张16 $\frac{3}{4}$ 字数433千字 2013年12月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

半导体化合物研究与应用丛书编写委员会

主 编 许并社

副主编 刘旭光 梁 建 贾虎生

委 员 (按姓氏笔画排列)

马淑芳 王 华 王淑花 李天保 杨永珍

陈柳青 余春燕 张竹霞 张 艳 贾 伟

章海霞 鲁 麟 翟光美 薛晋波

《半导体化合物光电器件检测》编著者

张 艳 第1章、第2章、第3章

杨永珍 第4章、第5章、第6章

薛晋波 第7章、第8章

前言

近年来,以ⅢA~VA族化合物为代表的半导体照明(发光二极管:LED)产业迅猛发展,并呈现出取代传统照明器件的摧枯拉朽之势。目前,已形成了从源头的高纯度有机金属源、上游外延片、中游芯片、下游封装和终端应用等较完整的研发与产业体系。为适应我国快速发展的新型照明领域的自主创新、产品生产与新器件研发等,以及相关科技人员和企业人员对该产业的了解和科技知识方面的需求,特编写了这套半导体化合物系列丛书。

丛书从ⅢA~VA族半导体化合物的基本原理、光电器件制备与工艺,以及器件性能检测等方面,较系统地介绍了相关基础知识,适合本科生、研究生、工程技术人员和企业相关人员阅读使用。共分《半导体化合物光电原理》、《半导体化合物光电器件制备》、《半导体化合物光电器件检测》三部。

《半导体化合物光电原理》:主要介绍半导体化合物的结构学和物理学基础、电学和光学性质、应用以及器件的结构和工作原理。

《半导体化合物光电器件制备》:主要介绍LED外延片生长、芯片制作和封装、器件组装以及太阳能电池的工作原理、结构、分类和应用。

《半导体化合物光电器件检测》:主要介绍半导体材料和器件以及太阳能电池的各种测试分析技术,涉及扫描电子显微镜,高分辨透射电子显微镜,原子力显微镜,薄膜X射线衍射仪,光致发光光谱,电致发光光谱,霍尔效应等的测试原理、测试步骤和应用。

本丛书由许并社主编,刘旭光、梁建和贾虎生为副主编。许并社负责系列丛书的统筹工作,并负责审核有关材料界面结构部分的内容。刘旭光负责统编和审核《半导体化合物光电原理》,梁建负责统编和审核《半导体化合物光电器件制备》,贾虎生负责统编和审核《半导体化合物光电器件检测》。

本书的编写参考了国内外的有关科技著作、相关教材和论文等文献,每章均列出了参考文献,在此向原著及出版机构表示衷心感谢!

本丛书在编写过程中也得到了许多科技人员的指导,在此表示衷心感谢!也诚恳地希望读者给予斧正。

编委会全体成员

2013年5月

目录

第 1 章 透射电子显微镜	1
1.1 透射电子显微镜的结构与成像原理	2
1.1.1 电磁透镜	3
1.1.2 照明系统	5
1.1.3 成像系统	8
1.1.4 观察记录、真空与供电系统	10
1.1.5 主要部件的结构和工作原理	11
1.1.6 目前常用电镜的生产厂家、型号及性能	13
1.2 TEM 样品制备技术	15
1.2.1 概述	15
1.2.2 非金属材料薄膜样品的制备	17
1.3 透射电子显微镜电子的成像原理	20
1.3.1 成像操作	21
1.3.2 高分辨电子显微像	25
1.3.3 电子衍射谱	30
1.3.4 电子衍射花样的标定	42
1.4 透射电子显微镜在 LED 方面的应用	45
1.4.1 高分辨透射电子显微像及选区电子衍射花样成像	46
1.4.2 界面的失配位错、堆垛层错	46
1.4.3 明场像	47
参考文献	48
第 2 章 扫描电子显微镜	49
2.1 扫描电子显微镜	50
2.1.1 电子光学系统	50
2.1.2 信号检测放大系统	51
2.1.3 显示系统	52
2.1.4 真空系统	52
2.1.5 电源系统	52
2.2 扫描电子显微镜成像原理	53
2.2.1 扫描电子显微镜中的信号种类	53
2.2.2 扫描电子显微镜的成像原理	56

2.2.3 扫描电子显微镜像形成衬度原理	57
2.2.4 扫描电子显微镜的主要性能	63
2.3 扫描电子显微镜的样品制备	66
2.4 扫描电子显微镜的性能和特点	66
2.5 扫描电子显微镜的能谱仪	67
2.6 扫描电子显微镜在 LED 中的应用	67
参考文献	70

第 3 章 原子力显微镜

3.1 原子力显微镜的主要构件	71
3.2 原子力显微镜的结构	73
3.2.1 力检测部分	73
3.2.2 位置检测部分	73
3.2.3 反馈系统	73
3.3 原子力显微镜的原理及工作模式	74
3.3.1 原子力显微镜的原理	74
3.3.2 原子力显微镜的工作模式	76
3.4 原子力显微镜的分辨率	79
3.5 原子力显微镜的工作环境	80
3.6 激光检测原子力显微镜	81
3.7 原子力显微镜的功能	81
3.8 原子力显微镜样品的要求	82
3.9 原子力显微镜在 LED 方面的应用	82
参考文献	85

第 4 章 薄膜 X 射线衍射

4.1 X 射线衍射基本理论	87
4.1.1 发展和特点	87
4.1.2 X 射线的产生	88
4.1.3 X 射线谱	89
4.1.4 X 射线衍射原理	90
4.1.5 X 射线衍射实验	98
4.1.6 X 射线衍射分析基本应用	105
4.2 薄膜 X 射线衍射	108
4.2.1 原理	109
4.2.2 应用实例	130
4.3 D8-DISCOVER 型高分辨 X 射线衍射仪	143
4.3.1 仪器构造和原理	144
4.3.2 仪器功能与操作	150
参考文献	161

第 5 章 光致发光和电致发光	162
5.1 光致发光的理论基础	163
5.1.1 光致发光基本概念	163
5.1.2 辐射发光寿命和效率	164
5.1.3 半导体材料中的辐射复合	166
5.1.4 光致荧光谱	173
5.2 光致发光测试系统和样品	180
5.2.1 系统工作原理和构造	180
5.2.2 测试样品	182
5.2.3 光谱校正	182
5.3 光致荧光谱测试的应用和实例	183
5.3.1 杂质及其浓度的测量	183
5.3.2 化合物组分的测量	185
5.3.3 成分均匀性的测量	185
5.3.4 位错的测量和表征	186
5.3.5 晶体质量的表征	187
5.3.6 纳米半导体材料的测量	188
5.4 电致发光	191
5.4.1 电致发光的激发条件	191
5.4.2 光谱的测量	192
5.5 发光效率及其测量方法	192
5.5.1 光致发光材料的发光效率以及测量方法	192
5.5.2 电致发光效率的测量	195
参考文献	197
第 6 章 霍尔效应	199
6.1 基本理论	199
6.1.1 霍尔效应的基本原理	199
6.1.2 范德堡测试技术	202
6.2 霍尔效应的测试系统	203
6.2.1 霍尔效应测试仪的结构	203
6.2.2 霍尔效应仪的灵敏度	205
6.3 霍尔效应测试	205
6.3.1 霍尔效应测试的样品要求	205
6.3.2 霍尔效应测试的测准条件	207
6.3.3 霍尔效应测试步骤	208
6.4 霍尔效应测试的应用和实例	209
6.4.1 硅的杂质补偿度测量	209
6.4.2 ZnO 的载流子浓度、迁移率和补偿度测量	211

6.4.3 硅超浅结中载流子浓度的深度分布测量	212
参考文献	214
第 7 章 LED 光电性能测试	215
7.1 LED 发光器件基本参数	215
7.1.1 LED 发光器件的光度学参数	215
7.1.2 LED 发光器件色度学参数	217
7.1.3 LED 发光器件的电性参数	221
7.2 LED 外延片的测试	223
7.2.1 光致发光谱测试	223
7.2.2 电致发光谱测试	226
7.3 LED 芯片的测试	229
7.3.1 光学参数测试	229
7.3.2 色度参数测量	238
7.3.3 电学性能测试	242
7.3.4 测量结果及分析	248
参考文献	249
第 8 章 太阳电池测试	250
8.1 太阳模拟器	250
8.1.1 概述	250
8.1.2 太阳辐射的基本特性	250
8.2 单体太阳电池测试	251
8.2.1 测试项目	252
8.2.2 电性能测试的一般规定	252
8.2.3 测量仪器与装置	252
8.2.4 基本测试方法	253
8.2.5 从非标准测试条件换算到标准测试条件	253
8.2.6 室外阳光下测试	253
8.2.7 太阳电池内部串联电阻的测量	254
8.2.8 太阳电池电流和电压温度系数的测量	254
8.3 非晶硅太阳电池电性能测试须知	255
8.3.1 校准辐照度	255
8.3.2 光源	255
8.3.3 光谱响应	255
8.4 太阳电流组件测试和环境试验方法	255
8.4.1 测试项目	255
8.4.2 组件电性能参数测量中所需的参考组件	255
8.4.3 太阳电池组件测试方法	256
8.5 地面用硅太阳电池组件环境试验概况	256

8.5.1	温度交变	257
8.5.2	高温贮存	257
8.5.3	低温贮存	257
8.5.4	恒定湿热贮存	257
8.5.5	振动、冲击	257
8.5.6	盐雾试验	257
8.5.7	冰雹试验	257
8.5.8	地面太阳光辐照试验	257
8.5.9	扭弯试验	258
参考文献		258

7.2.2	LED芯片封装	259
7.3	LED芯片封装	259
7.3.1	LED芯片封装	259
7.3.2	LED芯片封装	259
7.3.3	LED芯片封装	259
7.3.4	LED芯片封装	259
参考文献		259

第8章 太阳光模拟器

8.1	太阳光模拟器	260
8.1.1	太阳光模拟器	260
8.1.2	太阳光模拟器	260
8.2	太阳光模拟器	261
8.2.1	太阳光模拟器	261
8.2.2	太阳光模拟器	261
8.2.3	太阳光模拟器	261
8.2.4	太阳光模拟器	261
8.2.5	太阳光模拟器	261
8.2.6	太阳光模拟器	261
8.2.7	太阳光模拟器	261
8.2.8	太阳光模拟器	261
8.3	太阳光模拟器	262
8.3.1	太阳光模拟器	262
8.3.2	太阳光模拟器	262
8.3.3	太阳光模拟器	262
8.4	太阳光模拟器	262
8.4.1	太阳光模拟器	262
8.4.2	太阳光模拟器	262
8.4.3	太阳光模拟器	262
8.4.4	太阳光模拟器	262
8.4.5	太阳光模拟器	262
8.4.6	太阳光模拟器	262
8.4.7	太阳光模拟器	262
8.4.8	太阳光模拟器	262
8.4.9	太阳光模拟器	262
8.5	太阳光模拟器	262

第1章 <<<

透射电子显微镜

人们要认识客观世界，就要从宏观和微观两个方面去观察它。但是人的视力是有限的，从微观来说，人眼只能分辨 0.2mm 左右，要想看到更小的物体，就要借助于光学显微镜了。但光学显微镜受光波波长的限制，仅比人眼的分辨本领提高了约 1000 倍。光学显微镜下无法看清小于 0.2 μm 的细微结构，这些结构称为亚显微结构 (submicroscopic structures) 或超微结构 (ultramicroscopic structures; ultrastructures)。要想看清这些结构，就必须选择波长更短的光源，以提高显微镜的分辨率。1932 年 Ruska 发明了以电子束为光源的透射电子显微镜 (Transmission electron microscopy, TEM)，简称透射电镜，是把经加速和聚集的电子束投射到非常薄的样品上，电子与样品中的原子碰撞而改变方向，从而产生立体角散射。散射角的大小与样品的密度、厚度相关，因此可以形成明暗不同的影像。通常，透射电子显微镜的分辨率为 0.1~0.2nm，放大倍数为几万至百万倍，适于观察超微结构。透射电子显微镜在材料科学、生物学上应用较多。由于电子易散射或被物体吸收，故穿透力低，样品的密度、厚度等都会影响到最后的成像质量，必须制备更薄的超薄切片，通常为 50~100nm。所以用透射电子显微镜观察时的样品需要处理得很薄。常用的方法有：超薄切片法、冷冻超薄切片法、冷冻蚀刻法、冷冻断裂法等^[1~3]。电子显微镜与光学显微镜的成像原理基本一样，所不同的是前者用电子束作光源，用电磁场作透镜。由电子照明系统、电磁透镜成像系统、真空系统、记录系统、电源系统等五部分构成。如果细分的话，主体部分是电子透镜和显像记录系统，由置于真空中的电子枪、聚光镜、物样室、物镜、衍射镜、中间镜、投影镜、荧光屏和照相机^[3]。电子显微镜是使用电子来展示物体的内部或表面的显微镜。高速电子的波长比可见光的波长短 (波粒二象性)，而显微镜的分辨率受其使用波长的限制，因此电子显微

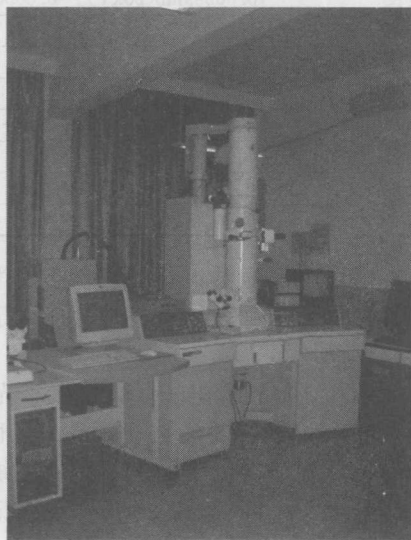


图 1-1 JEM-2010 高分辨透射电子显微镜

镜的分辨率(约 0.1nm) 远高于光学显微镜的分辨率(约 200nm)^[4]。

透射电子显微镜可以几种不同的形式出现,如高分辨透射电子显微镜 HRTEM (High resolution transmission electron microscopy),扫描透射电子显微镜 STEM (Scanning transmission electron microscopy),分析型电镜 AEM (Analytical electron microscopy) 等。入射电子束(照明束)也有两种主要形式:平行束和会聚束。前者用于 TEM 成像及衍射,后者用于 STEM 成像、微分析及微衍射^[2~5]。作为基础,这里首先介绍普通透射电子显微镜的工作原理、构造及其在平行束条件下的基本分析方法。图 1-1 是 JEM-2010 高分辨透射电子显微镜外形照片。

1.1 透射电子显微镜的结构与成像原理

透射电子显微镜在成像原理上与光学显微镜类似。它们的根本不同点在于光学显微镜以可见光作照明束,透射电子显微镜则以电子为照明束。在光学显微镜中将可见光聚焦成像的为玻璃透镜,在电子显微镜中相应的为磁透镜。由于电子波长极短,同时与物质作用遵从布拉格(Bragg)定律,产生衍射现象,使得透射电子显微镜自身在具有高的像分辨本领的同时兼有结构分析的功能^[6]。由电子枪发射出来的电子,在阳极加速电压(生物样品多采用 80~100kV,金属、陶瓷等多采用 120kV、200kV、300kV,超高压电镜则高达 1000~3000kV)的作用下,经过聚光镜(2~3 个电磁透镜)会聚为很细的电子束照明样品。由于电子的穿透能力很弱(比 X 射线弱很多),样品必须很薄(其厚度与样品成分、加速电压等有关,一般约小于 200nm)。穿过样品的透射电子携带了样品本身的结构信息,经物镜、中间镜和投影镜的接力聚焦放大,投射到荧光屏上,透射电子的强度分布转换为人眼直接可见的光强度分布,或由照相底片感光记录,最终得到具有一定衬度的电子显微图像或电子衍射谱,电子显微镜和光学显微镜的比较见表 1-1^[4~6]。

■ 表 1-1 电子显微镜和光学显微镜的比较

项 目	电子显微镜	光学显微镜
射线源	电子束	可见光
波长	0.00589nm(20kV)~0.000687nm(1MV)	大气
介质	真空	750nm(可见光)~200nm(紫外线)
透镜	磁透镜	玻璃透镜
孔径角	~35'	~70°
分辨本领	点分辨率 0.1~0.3nm,线分辨率 0.05~0.2nm	200nm(可见光),100nm(紫外线)
放大倍数	几十倍~300 万倍	数倍~2000 倍
聚焦方式	电磁控制、电子计算机控制	机械操作
衬度	质厚、衍射、相位、Z-衬度	吸收、反射衬度

透射电子显微镜一般由电子光学系统、真空系统和电源与控制系统三大部分组成。电子光学系统通常称为镜筒,是透射电子显微镜的核心,它又可以分为照明系统、成像系统和观察记录系统^[7]。

图 1-2 是透射电子显微镜电子光学系统的示意图,其中图 1-2(a)是透射电子显微镜的剖面图,图 1-2(b)是透射电子显微镜的示意图和光学显微镜的示意图对比。由图中可以看出,电子显微镜中的电子光学系统主要包括电子枪、聚光镜、试样台、物镜、物镜光阑、选区光阑、中间镜、投影镜和观察记录系统等几部分组成,其成像的光路与光学显微镜基本相同^[1~3]。

透射电子显微镜的电子光学系统中,一般将电子枪和聚光镜归为照明系统,将物镜、中

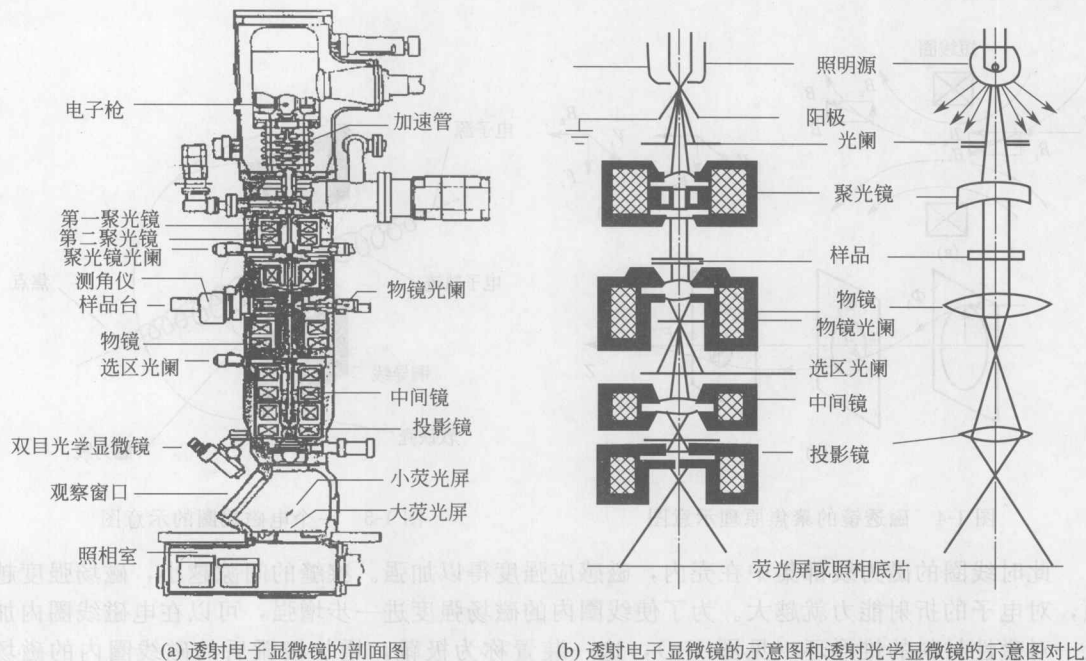


图 1-2 透射电子显微镜电子光学系统的示意图

间镜和投影镜归为成像系统，而观察记录系统则一般是荧光屏和照相机，现在的电镜往往还配有慢扫描 CCD 相机，主要用来记录高分辨像和一般的动态电子显微像。图 1-3 是透射电子显微镜电子光学系统的框架图。

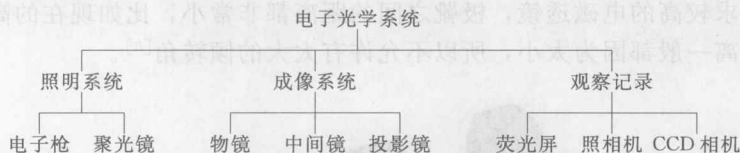


图 1-3 透射电子显微镜电子光学系统的框架图

1.1.1 电磁透镜

带负电的电子粒子，在静电场中会受到电场力的作用，使运动方向发生偏转，设计静电场的大小和形状可实现电子的聚焦和发散。由静电场制成的透镜称为静电透镜，在电子显微镜中，发射电子的电子枪就是利用静电透镜工作的。运动的电子在磁场中也会受磁场力的作用产生偏折，从而达到会聚和发散，由磁场制成的透镜称为磁透镜。用通电线圈产生的磁场来使电子波聚焦成像的装置叫电磁透镜。电子在磁场中运动，当电子运动方向与磁感应强度方向不平行时，将产生一个与运动方向垂直的力（洛伦兹力）使电子运动方向发生偏转。图 1-4 所示为磁透镜的聚焦原理示意图。当电子沿线圈轴线运动时，电子运动方向与磁感应强度方向一致，电子不受力，以直线运动通过线圈；当电子运动偏离轴线时，电子受磁场力的作用，运动方向发生偏转，最后会聚在轴线上的一点上。电子运动的轨迹是一个圆锥螺旋曲线。短线圈磁场中的电子运动显示了电磁透镜聚焦成像的基本原理。实际电磁透镜中为了增强磁感应强度，通常将线圈置于一个由软磁材料（纯铁或低碳钢）制成的具有内环形间隙的

壳子里 (见图 1-5)^[3~5]。

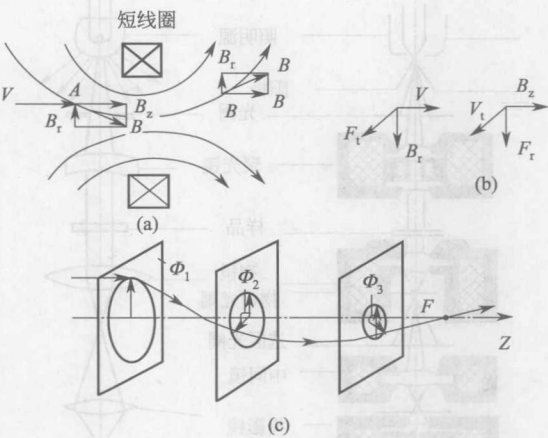


图 1-4 磁透镜的聚焦原理示意图

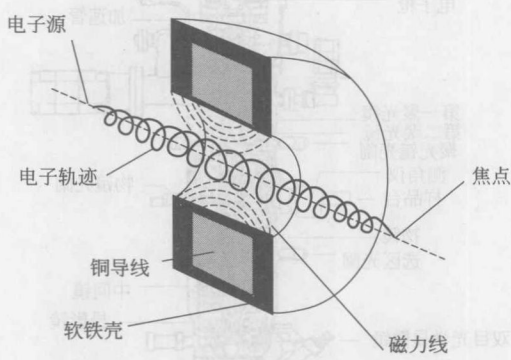


图 1-5 一个电磁线圈的示意图

此时线圈的磁力线都集中在壳内，磁感应强度得以加强。狭缝的间隙越小，磁场强度越强，对电子的折射能力就越大。为了使线圈内的磁场强度进一步增强，可以在电磁线圈内加上一对磁性材料的锥形环（见图 1-6），这一装置称为极靴。增加极靴后的磁线圈内的磁场强度可以有效地集中在狭缝周围几毫米的范围内。有极靴的透镜中，极靴使得磁场被聚焦在极靴上下的间隔内，间隔可以非常小。在如此小的区域内，磁场强度得到加强，透镜的球差〔亦称球面像差。轴上物点发出的光束，经光学系统以后，与光轴夹不同角度的光线交光轴于不同位置，因此，在像面上形成一个圆形弥散斑，这就是球差。一般是以实际光线在像方与光轴的交点相对于近轴光线与光轴交点（即高斯像点）的轴向距离来度量它。〕也大大减小，所以现在要求较高的电磁透镜，极靴之间的距离都非常小，比如现在的高分辨电镜，其物镜的极靴的距离一般都因为太小，所以不允许有太大的倾转角^[6]。

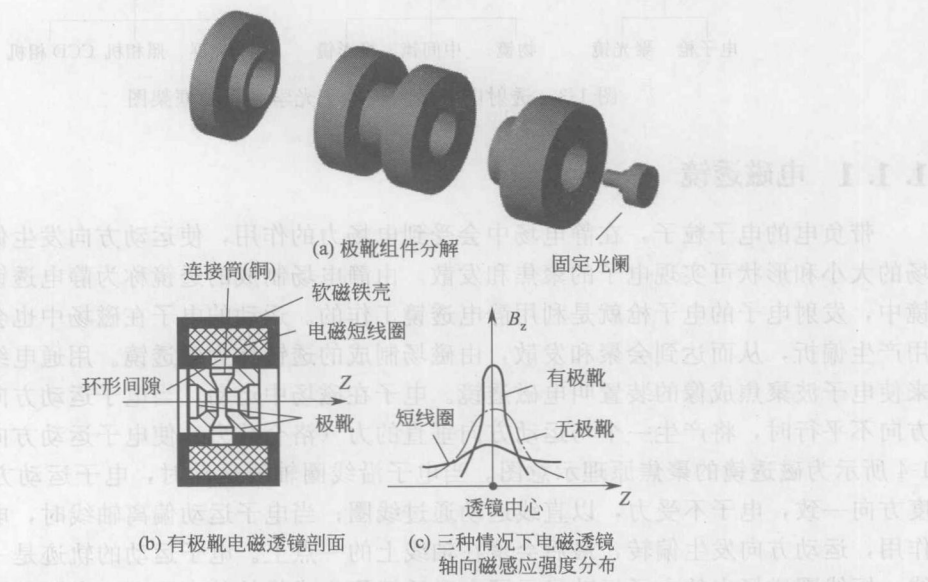


图 1-6 有极靴的电磁透镜

电磁透镜也存在缺陷,使得实际分辨距离远小于理论分辨距离,对电镜分辨本领起作用的像差有几何像差(球差、像散等)和色差。①几何像差是因为透镜磁场几何形状上的缺陷而造成的;②色差是由于电子波的波长或能量发生一定幅度的改变而造成的^[3]。

1.1.2 照明系统

照明系统的作用是提供亮度高、相干性好、束流稳定的照明电子束。它主要由发射并使电子加速的电子枪和会聚电子束的聚光镜组成。电子显微镜使用的电子源有两类:一类为热电子源,即通过将金属丝加热,使电子获得足够能量,从而逸出表面,发射电子;另一类为场发射源,是利用强电场的作用(约 10^{10} V/m),而使电子脱离针尖,产生电子。为了控制由电子源产生的电子束,并将其导入照明系统,须将电子源安装在电子枪的特定装置内。对热电子源和场发射源,电子枪的设计不同。目前绝大多数透射电子显微镜仍使用热电子发射源,所用灯丝多为钨丝(W)或六硼化镧(LaB₆)灯丝。照明系统由电子枪、聚光镜以及相应的平移、倾转和对中等调节装置组成,其作用是提供一束亮度高、照明孔径半角小、平行度好、束流稳定的照明源。为了满足明场成像(在电子显微镜中,用透明样品的非散射电子以及在物镜孔径角区域内的散射电子的电子束对样品所形成的像)和暗场成像(在电子显微镜中,仅利用透过样品的散射电子束对样品所形成的像)的需要,照明束可以在 5° 范围内倾转^[3,4]。

(1) 电子枪

电子枪是电子显微镜的“光源”。常见的电子枪构造如图 1-7 所示。底部穿孔的圆筒状金属板(栅极帽)内有一 V 形的灯丝(以钨丝为例)作为阴极,其尖端正对着栅极帽的小孔。在栅极帽的下方另有中间穿孔的金属板(阳极)。电流通过钨丝使它达到炙热程度时,它就会放出电子。温度越高则放出的电子就越多,钨丝放出的电子受外围阴极负电荷的排斥以及阳极正电荷的吸引,于是聚集成束,均匀地通过阳极中间的小孔。所以,电子枪的功用就是放出一窄束的电子束以很快的速度朝一定方向前进,由于电子在空气中很快就会和空气分子相碰撞,电子在空气中只能移动很短的距离。因此,电子显微镜的内部必须抽成高真空才能产生成束的电子束。为了改善阴极发射电子的稳定性,通常采用自偏压方法,即在栅极上施加比阴极负几百至几千伏的偏压,以限制阴极尖端发射电子的区域。这种三极(阴极、栅极、阳极)电子枪对阴极发射的电子束还起着一定的聚集作用^[5]。

在电子枪的下面还有一个或两个聚光镜。聚光镜用来会聚电子枪发射的电子束,以提高电流密度,缩小电子束截面,减小样品照射面积,它还能减小电子束照射到样品上的入射孔径角,获得近似平行的电子束。一般地,高性能透射电子显微镜都采用双聚光镜系统^[8]。

电子枪可分为热阴极电子枪和场发射电子枪。热阴极电子枪的材料主要有钨丝和六硼化镧灯丝。场发射电子枪又可以分为热场发射、冷场发射和 Schottky(肖特基)场发射, Schottky 场发射也可归到热场发射。场发射电子枪的材料必须是高强度材料,一般采用的是单晶钨,但现在有采用六硼化镧(LaB₆)的趋势。下一代场发射电子枪的材料极有可能是碳纳米管^[6~9]。

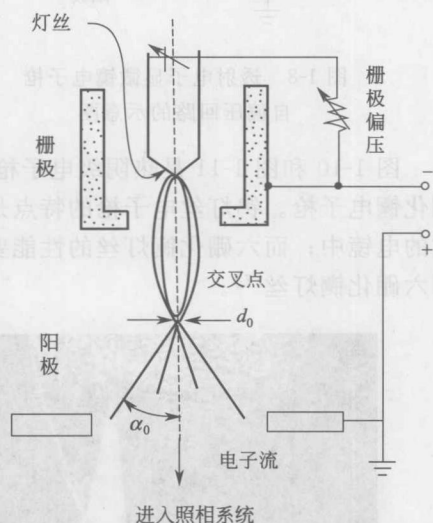


图 1-7 电子枪构造示意图

① 热阴极电子枪。热阴极电子枪由灯丝（阴极）、栅极帽、阳极组成。常用灯丝为钨丝（如 H-800）、LaB₆（如 JEM-3010）。图 1-8 和图 1-9 为热阴极电子枪的示意图。其中图 1-8 是电子枪自偏压回路的示意图，图 1-9 是电子枪中等电压面的示意图。

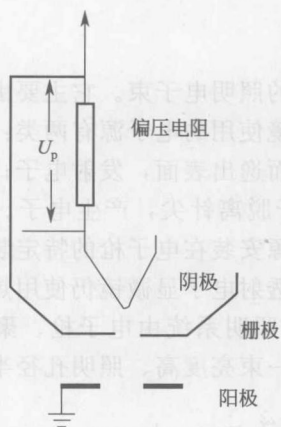


图 1-8 透射电子显微镜电子枪自偏压回路的示意图

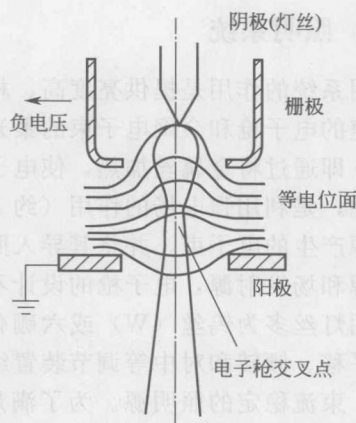


图 1-9 透射电子显微镜电子枪中等电压面的示意图

图 1-10 和图 1-11 是热阴极电子枪的实图，其中图 1-10 是钨灯丝电子枪，图 1-11 是六硼化镧电子枪。钨灯丝电子枪的特点是价格便宜，对真空系统的要求不高，一般用在比较老式的电镜中；而六硼化镧灯丝的性能要优于钨灯丝，在现在的电镜中，热阴极电子枪一般采用六硼化镧灯丝^[7]。

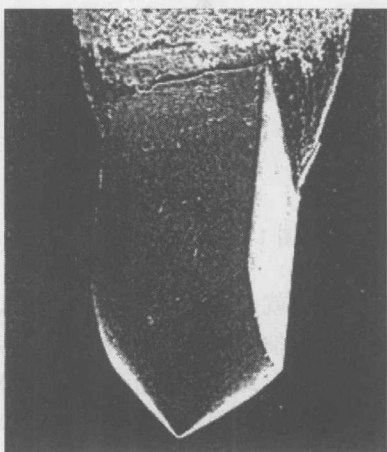


图 1-10 钨灯丝电子枪

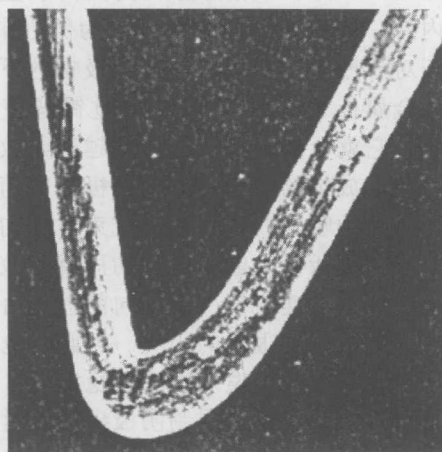


图 1-11 六硼化镧电子枪

② 场发射电子枪。场发射电子枪没有栅极，由阴极和两个阳极构成。第一个阳极主要使电子发射，第二个阳极使电子加速和会聚^[7]。

场发射电子枪可以分成三种：冷场发射（Cold Field Emission, FE），热场发射（Thermal Field Emission, FT）和肖特基发射（Schottky Emission, SE）。场发射电子枪所选用的阴极材料必须是高强度材料，以便能承受高电场所加之于阴极尖端的高机械应力，钨由于具有高的强度而成为较佳的阴极材料。场发射对真空的要求较高，所以一般来说其价格较

昂贵。品种规格繁多，价格昂贵，而且使用寿命短，约 1 万小时，因而使用成本较高。

冷场发射的优点是电子束直径小、亮度高、能量散布小，但为了避免针尖被外来气体吸附，必须在 10^{-10} Torr (托， $1\text{Torr}=\frac{1}{760}\text{atm}=133.3224\text{Pa}$) 的真空中操作，而且需要定时将针尖加热至 2500K，以去除吸附气体原子，它的另一缺点是发射的总电流较小。

热场发射电子枪在 1800K 下工作，不需要定时去除吸附气体原子。其电流稳定性较佳，所要求的真空度为 10^{-9} (Torr)，要低于冷场发射，但其能量散布比冷场发射要大 3~5 倍。

肖特基发射电子枪的工作温度也是 1800K，它是在钨单晶上镀 ZrO 层，从而将纯钨的功函数从 4.5eV 除至 2.8eV，使得电子能够很容易以热能的方式逃出针尖表面，所需真空度与热场发射接近。其发射的电流稳定性好，发射的电流也大，而且其能量散布很小，只稍逊于冷场发射。其电子束斑直径也要大于冷场发射^[7]。各种电子枪的特性比较见表 1-2。

■ 表 1-2 各种电子枪的特性比较

枪 源	热电子发射		场发射		
	W	LaB6	热阴极 FEG		冷阴极 FEG
			ZrO/W(100)	W (100)	W (310)
亮度 200kV/(A/Sr·cm ²)	~5×10 ⁵	~5×10 ⁶	~5×10 ⁸	~5×10 ⁸	~5×10 ⁸
光源尺寸/nm	50000	10000	100~1000	10~100	10~100
能量发散度/eV	2.3	1.5	0.6~0.8	0.6~0.8	0.3~0.5
真空度/Pa	10 ⁻³	10 ⁻⁵	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
使用条件 温度/K	2800	1800	1800	1600	300
电流/μA	~100	~20	~100	20~100	20~100
发射	短时间稳定度	1%	1%	7%	5%
	长时间稳定度	1%/h	1%/h	6%/h	5%/15min
	电流效率	100%	10%	10%	1%
维修	无需	无需	安装时稍费时间	更换时要安装数次	每隔数小时必须进行一次闪光处理
价格/操作性	便宜/简单	便宜/简单	贵/容易	贵/容易	贵/复杂

(2) 聚光镜

聚光镜用来会聚电子枪射出的电子束，以最小的损失照明样品，调节照明强度、孔径角和束斑大小。一般都采用双聚光镜系统，如图 1-12 所示。第一聚光镜是强激磁透镜，束斑缩小率为 10~50 倍，将电子枪第一交叉点束斑缩小为 1~5μm；而第二聚光镜是弱激磁透镜，适焦时放大倍数为 2 倍左右。结果在样品平面上可获得 2~10μm 的照明电子束斑^[8]。

一般电镜至少采用双聚光镜，对于较新的电镜，很多采用二聚光镜加一个迷你聚光镜的模式；甚至有采用三聚光镜加一个迷你聚光镜的情况。

当采用双聚光镜时，第一聚光镜一般是短焦距强激磁透镜，作用是将电子枪得到的光斑尽量缩小，第二聚光镜是长焦距弱透镜，它将第一聚光镜得到的光源会聚到试样上，一般来说，该透镜对光源起放大作用。采用双聚光镜的优点在于：扩大了光斑尺寸的变化范围，在不同的模式下，可以通过改变第一聚光镜的电流，选择所需要的光斑尺寸；可以减小试样的照射面积，减少试样的温升；观察时可以通过改变第二

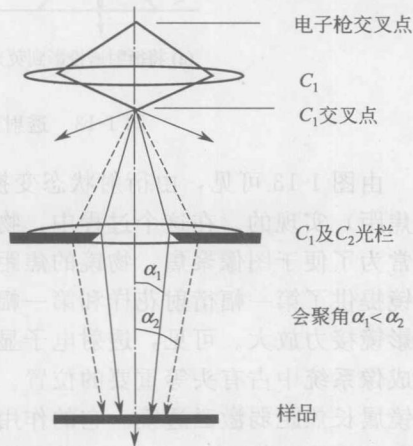


图 1-12 聚光镜结构示意图