



ELECTRON-OPTICS  
APPLICATION

# 电子光学应用

肖士璋 冉启钧 编

电子科技大学出版社

# 前 言

本书是为“物理电子与器件专业编写的本科生专业课教材，在正式出版以前，曾印发讲义并经三次修订、8届学生使用（也为有关专业研究生选用），得到历届学生的好评，取得了较好的教学效果。

本书是在《电子光学》的基础上，拓宽了电子光学应用的范围，系统地介绍电子光学在电子束器件和主要的电子光学仪器及装置（如透射式电子显微镜、扫描电子显微镜、电子束曝光机和离子束注入机及技术等）中的应用。在着重介绍有关器件、装置的基本原理和特性参量的同时，特别强调和介绍了它们在一些主要场合的应用。

全书共分9章，主要内容包括：第一章电子光学仪器与器件的基本部件；第二章显示用电子束管；第三章储存管；第四章变像管和像增强管；第五章摄像管；第六章透射式电子显微镜（TEM）；第七章扫描电子显微镜；第八章电子束技术和应用；第九章离子注入技术。作者多年从事摄像器件和LaB<sub>6</sub>阴极等科研工作，部分科研成果编入了有关章节，并介绍了有关领域的一些新进展和发展动向。

本书的编写分工如下：第一、二、三、六和七章由肖士璋编写；第四、五、八和九章由冉启钧编写。周敏副教授对本书的出版提出了许多宝贵的意见和建议。本书能正式出版还得感谢电子科技大学出版社社长向万成同志，他多次主动建议作者尽快出版本书，并在多方面给予大力的支持和帮助。在此一并对他们表示衷心地感谢。

本书可作为物理电子与器件专业的本科生和研究生教材，也可供其他从事电子真空器件、光电成像、电子材料研究与分析和半导体等有关领域的科技工作者和工程技术人员作参考书。

由于作者水平有限，加上时间仓促，书中难免还存在一些缺点或错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1995年1月

# 目 录

第一章 电子光学仪器与器件的基本部件	(1)
§ 1-1 电子光学仪器与器件的概况及简要工作原理	(1)
§ 1-2 电子枪	(4)
1.2.1 单透镜系统电子枪	(4)
1.2.2 双透镜系统电子枪	(5)
§ 1-3 电子枪的发射系统	(5)
1.3.1 发射系统的会聚作用	(5)
1.3.2 交叉点半径	(7)
1.3.3 交叉点截面上的电流密度分布	(8)
1.3.4 电子束发射角	(10)
1.3.5 截止电压	(12)
1.3.6 调制特性	(15)
1.3.7 阴极电流密度	(16)
§ 1-4 主透镜与辅助透镜	(17)
1.4.1 主透镜	(17)
1.4.2 辅助透镜	(18)
§ 1-5 显示用电子束管中电子枪的典型结构	(19)
1.5.1 磁聚焦电子枪	(19)
1.5.2 电聚焦电子枪	(19)
§ 1-6 电偏转系统	(22)
1.6.1 均匀电场偏转系统	(22)
1.6.2 倾斜板偏转系统	(24)
1.6.3 一次曲折板偏转系统	(25)
1.6.4 弯曲偏转板系统	(26)
1.6.5 径向偏转系统	(26)
1.6.6 电偏转系统的偏转像差	(28)
§ 1-7 磁偏转系统	(33)
1.7.1 偏转磁场的分布	(33)
1.7.2 磁场分布与线圈结构的关系	(35)
1.7.3 均匀偏转磁场的获得	(37)
1.7.4 均匀磁偏转系统	(37)
1.7.5 磁偏转系统的像差	(39)
§ 1-8 荧光屏	(43)
1.8.1 对荧光屏的要求和屏的特性参量	(43)

1.8.2	介质靶的二次发射特性和靶的平衡电位	(44)
1.8.3	电子束轰击介质靶面时的电流连续原理	(46)
<b>第二章</b>	<b>显示用电子束管</b>	(48)
§ 2-1	示波管	(48)
2.1.1	示波管的结构和原理	(48)
2.1.2	偏转后加速	(50)
2.1.3	偏转放大系统	(53)
2.1.4	普通示波管用于高频条件下出现的问题	(54)
§ 2-2	雷达定位管	(58)
2.2.1	雷达定位原理	(58)
2.2.2	几种典型的显示定位方式	(58)
2.2.3	定位管的特点	(60)
2.2.4	圆扫描补偿原理	(60)
§ 2-3	黑白显像管	(61)
2.3.1	电视传像原理	(61)
2.3.2	黑白显像管的原理和结构	(62)
2.3.3	晕光环和局外光的影响	(65)
§ 2-4	彩色显像管	(67)
2.4.1	三基色原理	(67)
2.4.2	彩色电视基本原理	(69)
2.4.3	彩色显像管的选色原理	(71)
2.4.4	三枪三束圆孔荫罩彩色显像管	(74)
2.4.5	自会聚彩色显像管	(86)
§ 2-5	计算机显示用的电子束管	(95)
2.5.1	偏转扫描方法	(96)
2.5.2	多重偏转式 CRT	(97)
2.5.3	偏转补偿和动态聚焦	(98)
2.5.4	CRT 中电子束的束流选通	(100)
2.5.5	飞点扫描管产生背景数据	(100)
2.5.6	CRT 单像管字符产生器	(101)
<b>第三章</b>	<b>储存管</b>	(102)
§ 3-1	储存管的一般原理和用途	(102)
§ 3-2	网垒式储存管	(103)
§ 3-3	直观式储存管	(105)
§ 3-4	存图管(电子激发导电式储存管)	(108)
<b>第四章</b>	<b>变像管和像增强管</b>	(111)
§ 4-1	变像管和像增强管的应用	(111)
§ 4-2	单级像增强管	(111)
4.2.1	典型结构和工作原理	(111)

4.2.2	像增强管的光放大系数 .....	(112)
4.2.3	像增强管中的宽电子束聚焦问题 .....	(113)
4.2.4	像增强管的特性参量和测试 .....	(114)
§ 4-3	串联式和级联式像增强管 .....	(118)
4.3.1	串联式像增强管 .....	(118)
4.3.2	级联式像增强管 .....	(119)
§ 4-4	微通道式像增强管 .....	(121)
4.4.1	结构特点和工作原理 .....	(121)
4.4.2	微通道管内的电子轨迹和电子增益 .....	(122)
§ 4-5	带有微通道板的像增强器 .....	(123)
4.5.1	倒像式微通道板像增强管 .....	(123)
4.5.2	像增强领域中的新进展——第三代薄片管 .....	(125)
<b>第五章</b>	<b>摄像管</b> .....	(127)
§ 5-1	摄像管的一般工作原理 .....	(127)
5.1.1	摄像管的作用和分类 .....	(127)
5.1.2	光学图像转变为电信号的原理 .....	(127)
5.1.3	慢电子束扫描时靶的平衡电位与慢电子扫描摄像管电子光学特点 .....	(128)
5.1.4	摄像管的原理性结构 .....	(134)
5.1.5	摄像管的特性参量 .....	(137)
§ 5-2	$Sb_2S_3$ 靶视像管 .....	(142)
5.2.1	$Sb_2S_3$ 靶视像管的典型结构 .....	(143)
5.2.2	视像管的工作原理 .....	(143)
5.2.3	视像管的特性参量 .....	(146)
§ 5-3	$PbO$ 靶视像管 .....	(147)
5.3.1	阻挡型光导靶的体电阻率和势垒高度 .....	(147)
5.3.2	$PbO$ 靶的靶面结构 .....	(148)
5.3.3	$PbO$ 靶视像管的特性参量 .....	(149)
§ 5-4	$Si$ 靶视像管 .....	(151)
5.4.1	靶面结构和 $Si$ 靶管的工作原理 .....	(151)
5.4.2	硅靶视像管的特性参量 .....	(152)
§ 5-5	微光摄像管 .....	(153)
5.5.1	微光电视的应用 .....	(153)
5.5.2	微光摄像管在黑夜摄像的理论基础 .....	(154)
5.5.3	硅靶电子倍增摄像管(SEM管) .....	(156)
5.5.4	二次电子导电摄像管(SEC管) .....	(157)
§ 5-6	单管彩色摄像管 .....	(160)
5.6.1	单管彩色摄像管的理论基础 .....	(160)
5.6.2	单管彩色摄像管的结构和特性 .....	(167)

§ 5-7 摄像管的发展动向 .....	(168)
<b>第六章 透射式电子显微镜(TEM) .....</b>	<b>(170)</b>
§ 6-1 光学显微镜分辨本领的理论极限 .....	(170)
§ 6-2 电子的波动性 .....	(173)
§ 6-3 透射式电子显微镜(TEM) .....	(175)
6.3.1 透射电镜与光学显微镜的对比 .....	(175)
6.3.2 透射电镜的简要工作原理和结构特点 .....	(175)
§ 6-4 磁透镜 .....	(177)
6.4.1 磁透镜的分类及其性质 .....	(177)
6.4.2 强磁透镜的理论计算 .....	(179)
6.4.3 磁透镜的设计 .....	(182)
6.4.4 磁透镜的像差 .....	(184)
§ 6-5 透射式电子显微镜的照明系统 .....	(187)
6.5.1 电子枪的亮度 .....	(187)
6.5.2 电子枪 .....	(191)
6.5.3 聚光系统 .....	(197)
6.5.4 照明系统合轴 .....	(199)
§ 6-6 透射式电子显微镜的成像系统 .....	(203)
6.6.1 成像系统的主要组成部件 .....	(204)
6.6.2 成像系统工作原理 .....	(206)
§ 6-7 电子透镜的景深、焦深和轴上像散 .....	(211)
§ 6-8 透射式电子显微镜中像的形成和衬度机理 .....	(214)
6.8.1 单个原子对入射电子的散射作用 .....	(214)
6.8.2 振幅衬度 .....	(215)
6.8.3 衍射衬度 .....	(216)
6.8.4 相位衬度 .....	(216)
§ 6-9 透射式电子显微镜的分辨本领 .....	(217)
6.9.1 分辨本领 .....	(217)
6.9.2 电子衍射所决定的分辨本领 .....	(218)
6.9.3 理论分辨本领 .....	(218)
6.9.4 各种像差对分辨本领的影响 .....	(219)
<b>第七章 扫描电子显微镜.....</b>	<b>(222)</b>
§ 7-1 扫描电子显微镜的简要工作原理 .....	(222)
§ 7-2 扫描电子显微镜中各种信息的产生 .....	(224)
§ 7-3 扫描电子显微镜的电子探针系统 .....	(228)
§ 7-4 扫描电子显微镜的偏转系统 .....	(231)
§ 7-5 二次电子探测器 .....	(232)
§ 7-6 电子探针系统的理论限制 .....	(235)
<b>第八章 电子束技术和应用.....</b>	<b>(242)</b>

§ 8-1 电子束曝光 .....	(242)
8.1.1 电子束曝光技术的发展 .....	(242)
8.1.2 几种电子束曝光的方法 .....	(244)
8.1.3 对电子束曝光机的要求 .....	(246)
§ 8-2 电子束曝光机的结构和特点 .....	(248)
8.2.1 电子束曝光机的结构 .....	(248)
8.2.2 电子束的偏转与扫描 .....	(250)
8.2.3 电子光柱体的类型 .....	(251)
8.2.4 电子束对准系统 .....	(254)
8.2.5 利用电子束偏转自动对准图形 .....	(254)
8.2.6 对电子敏感的聚合物——电子抗蚀剂 .....	(255)
8.2.7 电子束曝光的限制 .....	(256)
§ 8-3 电子束曝光机的应用 .....	(257)
8.3.1 光掩模版的制造 .....	(257)
8.3.2 利用电子束曝光和离子束掺杂制造微波开关 .....	(258)
§ 8-4 电子束加工 .....	(260)
8.4.1 电子束加工的特点 .....	(260)
8.4.2 电子束加工机的特点 .....	(261)
8.4.3 电子束加工机的应用 .....	(261)
<b>第九章 离子注入技术</b> .....	(264)
§ 9-1 离子注入技术及对离子注入机的要求 .....	(264)
9.1.1 离子注入技术简介 .....	(264)
9.1.2 离子注入技术的发展 .....	(264)
9.1.3 离子注入技术的特点 .....	(264)
9.1.4 对离子注入机的性能要求 .....	(265)
9.1.5 离子注入机的结构和类型 .....	(267)
§ 9-2 离子注入机 .....	(269)
9.2.1 离子源 .....	(269)
9.2.2 离子束的聚焦 .....	(283)
9.2.3 质量分析器 .....	(306)
9.2.4 离子注入机的真空系统和注入机的终端设备 .....	(314)
§ 9-3 离子注入技术在微电子学中的应用 .....	(321)
9.3.1 高频低噪声微波管 .....	(322)
9.3.2 用离子注入制备高电阻 .....	(323)
9.3.3 化合物半导体的离子注入 .....	(324)
9.3.4 用离子注入法制发光二极管 .....	(325)
9.3.5 离子注入技术在其他方面的应用 .....	(325)
§ 9-4 离子注入技术的发展 .....	(327)
<b>参考文献</b> .....	(329)

# 第一章 电子光学仪器与器件的基本部件

## § 1-1 电子光学仪器与器件的概况及简要工作原理

利用电子束或离子束来完成某一种(或数种)功能的设备叫做电子光学仪器或装置;利用电子束进行工作的器件则叫做电子束器件。随着科学技术的发展,电子光学仪器和装置在科研和生产中的作用越来越重要。例如现代的各种电子显微镜、衍射仪、电子能谱仪、电子束曝光机和离子注入机等都属于电子光学仪器或装置的范畴,由于这类仪器和装置的出现和不断地完善,使表面物理分析、材料科学、冶金学、生物医学和大规模集成电路等学科都得到了飞跃的发展。

电子束器件是利用电子束进行工作的一种电真空器件,按用途可分为如下几大类型:一种是光-电器件,它是将光信号转变成电信号的一类电真空器件,最有代表性的是各种电视摄像器件;另一种是显示器件,它是一种电-光的真空器件,其作用是将电信号变成光学图像,最具有代表性的器件如彩色显像管,示波管等;第三种是电-电器件,它是将电信号变成电信号的一种器件,具有代表性的是储存管;第四种是光-光器件,它是将某种波长的光学图像(也可以是不可见的红外光像)转变成并伴随有增强的另一种波长(如可见光)的光学图像,具有代表性的器件如变像管和像增强器。

由于电子波的波长很短,因此电子光学仪器或器件的分辨率都比较高,此外对带电粒子偏转和调制都十分方便,并且容易同计算机配合使用,所以这类仪器和装置多数具有多功能的性质,自动化程度比较高,并且有某些独特的性能。例如光学显微镜的放大倍数受衍射影响和限制,只能做到放大率  $M \leq 2000$ ,它对研究微观结构是不可能的。而电子显微镜的放大倍数已达  $M = 80$  万倍以上,随着科学的发展,直接观察原子的时代已为期不远了。又如俄歇电子谱仪,它是一种对被分析样品非破坏性的分析仪器,能定性和定量地分析表面的化学成分,若采用离子剥离技术,还可以逐层分析表面下基体元素的分布。所以它是一种性能优良的表面探针。

在大规模集成电路的研制和生产中,当采用电子束曝光,光刻时就可以不用掩模版。直接用电子束光刻图形相当灵活,其分辨率高达  $0.05\mu\text{m}$ ,而用一般光学曝光方法的分辨率好的也只有  $1\mu\text{m}$  左右。另外,用电子束曝光的图形精良、且焦深很大(约  $40\mu\text{m}$ ),因此它不受工件表面光洁度的影响。当配上计算机时,可以自动设计图形和对大规模集成电路进行选择布线,这是一般光学法根本无法实现的。

离子束掺杂机是利用高速的离子直接射入固体靶面内,形成一定厚度的掺杂表面层,以改变表面的韧性和化学特性。离子掺杂(或叫注入)能精确地控制注入原子的类型、浓度和深度。注入时不受平衡溶解度的限制。并且离子是垂直注入晶体内,不产生横向扩散现象,它对提高 MOS 电路和半导体器件的高频特性极为有利。离子注入时一般温度较低( $< 750^\circ\text{C}$ ),容易克服由于高温扩散所带来的一些不良影响,因此,离子注入技术显示出其他



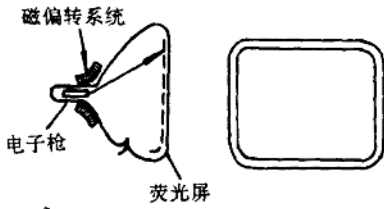


图 1-1 黑白显像管结构示意图

的玻壳内装有一只电子枪，在屏的内表面涂有荧光粉，荧光粉在高速电子的轰击下发光，玻壳内被抽成  $10^{-4}$ Pa 的真空。电子枪的作用是产生一束强度足够的且大小可调的电子束，并聚焦成像为一个很小的束点打上屏，玻壳颈部安放了一副磁偏转线圈，在 X 和 Y 偏转线圈内分别通入锯齿扫描电流，使电子束从左到右，从上到下地在屏面上进行扫描，并且与电视发送端的扫描同步。视频信号一般都是送到显像管的阴极，利用它去调制束流的大小，最后在荧光屏上显示出一幅与发送端相同的光学图像。

技术所不具备的突出优点，它为研制、生产优质半导体器件开辟了全新的道路。利用离子注入技术，还可以改善金属和合金表面的物理和化学性能（如超导性、耐蚀性和耐磨性等）。

从以上简单地介绍就可以看出，在科研和生产领域中，如果没有性能优良各类电子光学仪器和器件，科学技术的进一步发展将遇到极大的困难。

最常见的电子束器件，如图 1-1 所示的黑白显像管结构图，它是在一个密封

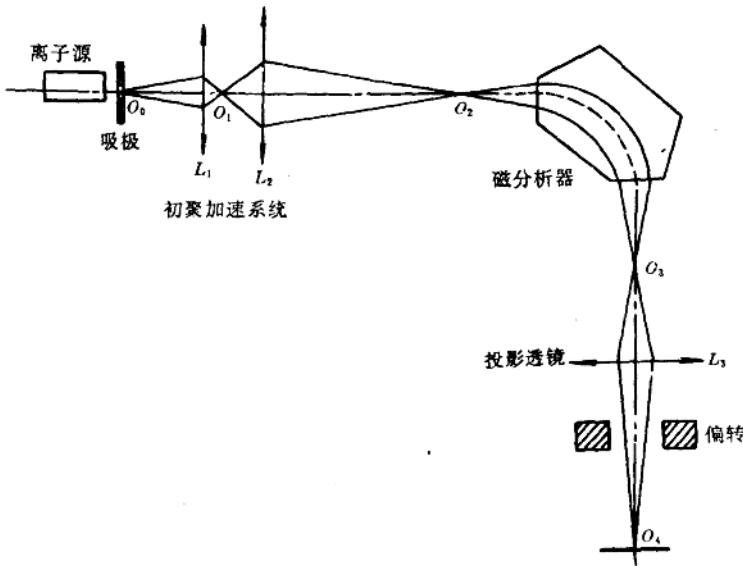


图 1-2 离子束掺杂机原理

图 1-2 表示一台典型的离子注入机的简要光路图。图中吸极的左面是离子源，它是利用放电的方法产生所需要的掺杂离子，这些离子由初聚焦加速系统聚焦在  $O_2$  点上，并由该点入射进入磁分析器中。因不同离子的荷质比不一样，它们在磁分析器磁场中的旋转半径不

相同，调节磁分析器的电流值，可将不同质量的离子聚焦在  $O_3$  点上（焦线），其余不需要的离子被电极截获，因此在  $O_3$  点得到了“纯净”的离子，利用投影镜将这些离子投射到靶片上（靶片安放在工作台上）。在投影镜与工作台之间还装有一对偏转系统，使离子束能沿靶面扫描。

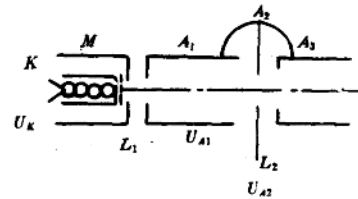
当改变离子源中的放电气体时，就可以产生不同的离子束，改变磁分析器中的电流，可以把需要的离子分离出来，以满足不同掺杂的要求。离子束入射到靶面的能量可在较大的范围内改变，这样离子束注入到靶片的深度也可以方便地得到控制。

当离子束被聚焦成微米数量级时，离子束的偏转用专用计算机来控制，那么就可以直接在基片上刻图掺杂，制作成所需要的电路，这样就可以省掉光刻工艺过程。

从以上所举的两个典型例子可以看出，电子光学仪器和器件基本上包括有三大部件，即电子枪、偏转系统和电子接收器（荧光屏或靶）。以后的章节里将要详细地讨论，这里只作扼要地说明。

电子枪（或离子聚束系统）是一切电子光学仪器的关键部件，它的作用是产生一个强度足够大的，并可在一定范围内可调的电子或离子流。根据需要，电子束的能量也应能在一定范围内变化。

在电子枪中有一个产生电子的阴极（或产生离子的离子源），阴极是浸没在阴极透镜场中，故阴极透镜又叫做浸没物镜，习惯上又称它为预聚焦透镜。该透镜由阴极  $K$ 、调制极  $M$  和加速极  $A_1$  所组成，如图 1-3 所示。各电极电位如下： $U_K = 0V$ ， $U_M$  为负几十伏， $U_{A1}$  为数百伏或数千伏。阴极透镜是一个很强的透镜，从阴极发出的电子受到透镜场的加速和会聚作用，使电子束在  $M-A_1$  之间形成一个比阴极发射面小得多的交叉截面，我们把它称为交叉点。交叉点的特点是电流



$L_1$  浸没物镜  $L_2$  投射透镜

图 1-3 电子枪

密度大，交叉点截面半径又小。所以在电子束器件和电子光学仪器中都把它作为投射透镜（或聚光镜系统）的物点。选择适当的投射透镜电压比，可使交叉点成像在荧光屏面上。当改变调制极电压时，由于阴极表面电场发生变化，从而改变了阴极发射电流的大小，使屏上光点的亮度发生相应的变化。

在图 1-3 中投射透镜是由  $A_1-A_2-A_3$  组成的电透镜，实际的各种电子束器件和仪器中，在阴极透镜后面有的采用一个或数个电磁透镜。

偏转系统通常分为两大类：一类是电偏转系统，另一类是磁偏转系统，它们的作用都是产生一横向的电场或磁场，使电子束（或离子束）沿着靶面扫描，以完成各种功能。

对偏转系统的要求是：偏转灵敏度高和偏转像差小，某些特殊的器件还要求偏转系统的频带宽。

电子接收器是受电子束（或离子束）轰击的靶面或工件。在显示器件中它就是荧光屏，在摄像器件中它是介质靶或光导体靶面。在电子光学仪器中，被分析观测或加工的工件就是电子接收器。电子束与工件相互作用，从工件中产生了大量的各种信息，通过各种灵敏

的检测系统去收集和分析这些信息，这样就可以方便地了解工件的形貌、结构、成分及各种元素的分布规律。

## § 1-2 电子枪

任何电子束器件和电子光学仪器至少有一个束流强度足够的电子束，投射到工件上的束斑尺寸应当很小（有的只有微米级），这就要求电子光学系统的聚焦性能良好，并能方便地调节束流大小，客观上还要求调节聚焦（又叫调焦）与调节束流大小（又叫调亮）互不影响。为了实现上述的要求，实际使用的电子枪中都有两个以上的电子透镜。

### 1.2.1 单透镜系统电子枪

由阴极、调制极和加速极（或阳极）组成的一个三极式的单透镜系统，其光路如图 1-4 所示，由拉格朗日公式得出

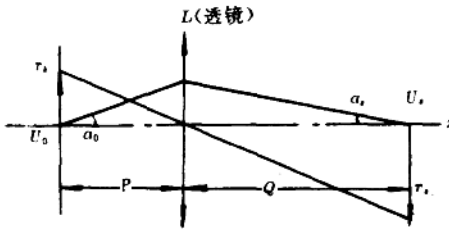


图 1-4 单透镜系统电子枪

$$r_a \alpha_0 \sqrt{U_0} = r_c \alpha_a \sqrt{U_a} \quad (1-1)$$

式中， $r_c$  为阴极发射半径； $\alpha_0$  为电子从阴极表面发射时的初始角； $r_a$  为荧光屏上像点的半径； $U_a$  为荧光屏电位； $U_0$  为电子的初始能量。

若以  $M$  表示透镜的横向放大率，由式(1-1)得出

$$M = \frac{r_a}{r_c} = \frac{\alpha_0}{\alpha_a} \sqrt{\frac{U_0}{U_a}} \approx \frac{Q}{P} \sqrt{\frac{U_0}{U_a}} \quad (1-2)$$

式中， $P$  为物距， $Q$  为像距。

为了在屏上得到尽可能小的光点，除了要求透镜的像差应当很小外，透镜的放大率应当小。由式(1-2)可以看出，电子的发散角  $\alpha_0$  不可能很小，因为电子从阴极面上发射时有一定的角度分布规律。而表征初能的  $U_0$  值与阴极温度成正比，为了获得足够的阴极发射电流，阴极温度不能太低，也即  $U_0$  值不能任意选择。因此靠降低  $U_0$  和  $\alpha_0$  来减小放大率受到阴极本身的限制。从式(1-2)中还可以看出，在  $\alpha_0$  一定的前提下，当物距一定时，增大  $\alpha_a$  值，即减小像距  $Q$  值可以使放大率下降。实际使用中， $Q$  值是不能太小的，特别在电子束器件中，在电子透镜后面还必须安放偏转系统，为了得到足够的偏转灵敏度，像距  $Q$  值反而大于物距  $P$  值。

增大像方空间电位  $U_a$ ，可以使放大率下降，在实际的电子束器件中，为了得到足够的亮度，像方空间电位选择得比较高，这对减小空间电荷效应、减小色差都是有利的。但是当亮度已达到要求时，进一步增大  $U_a$  值，会造成偏转灵敏度下降。另外电子速度太高，产生的 X 射线剂量会增大，这是不希望的。过高的电压还会带来绝缘等一系列其他问题。

采用单个透镜系统的电子枪时，调节透镜的焦距，会引起阴极表面电场的变化，导致阴极电流也发生变化，这时会出现调焦与调亮的矛盾。

综上所述，只采用单个透镜系统的电子枪是不可能满足对电子枪提出的各种要求的。如

果采用双透镜（或多透镜）系统的电子枪，上述矛盾就可以较好地解决。

### 1.2.2 双透镜系统电子枪

由两个电子透镜组成的电子枪叫做双透镜系统电子枪，如图 1-5 所示。第一个为阴极透镜，它的作用是将阴极发射出来的电子加速和聚焦，并在调制极  $M$  和阳极  $A_1$  之间形成最小交叉截面。第二个透镜是由  $A_1$ - $A_2$ - $A_3$  组成的单透镜。这个透镜从光路上来看，它是主聚焦透镜，又叫投射（或叫投影镜）透镜，它的作用是将交叉点成像在像平面上。

采用双透镜系统后，就可以把电子枪的两大功能——调亮和调焦分开，调亮由阴极透镜来完成，而调焦则由主透镜来完成。一般  $A_1$  电极都比较大，在此电极内出现等位空间，因此当调焦或调亮改变两个透镜的电场时，由于等位空间的隔离作用，透镜场不可能相互渗透，从而解决了调焦和调亮互相影响的问题。

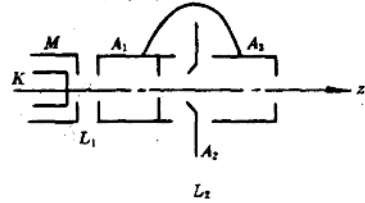


图 1-5 双透镜系统电子枪

当改变调制极电压来进行调亮时，严格地讲交叉点在  $z$  轴上的位置会有些

变化，这样将使主透镜的物距发生变化。结果导致像平面偏移，光点变大。但是由于阴极透镜是一个较强的透镜，当调制极电压变化时，交叉点位置的变化量  $\Delta z$  是很小的，它与主透镜的物距比较起来基本上可以忽略不计。因此调节亮度时不会引起聚焦变坏。当束流较大时，与小束流相比，屏上光点增大主要是空间电荷效应增大的结果。

## § 1-3 电子枪的发射系统

### 1.3.1 发射系统的会聚作用

电子枪中的阴极透镜又叫做发射系统，由于电子束器件和电子光学仪器对电子束提出了不同的要求，因此它们的发射系统是有差异的。在电子束器件中，要求电子束电流较大，束斑也可以大些，因此这种发射系统的阴极多采用平顶式端面氧化物阴极，整个发射系统由阴极  $K$ 、开孔调制极  $M$  和开孔阳极  $A$  组成，如图 1-6 所示。阴极是间热式加热。为了减小加热电流磁场对电子束的影响，加热丝采用双螺旋结构的加热子。若以阴极作为参考电位，即  $U_c = 0V$ ，调制极为负数十伏，阳极电压因管种不同可以从 100V 到 2000V 范围内变化。这种透镜的沿轴电位分布如图 1-7 所示。

可以将  $\phi(z)$  曲线分成三个区域来研究透镜的特性。在 I 区内电位是线性变化，电子从阴极发射出来后受到均匀电场加速，其轨迹是一小段抛物线，电子在  $z$  方向速度增大，速度零散性相对降低。在 II 区内  $\phi''(z) > 0$ ，电子受到很强的向轴会聚力。在 III 区内  $\phi''(z) < 0$ ，电子受到离轴力的作用。当电子束进入阳极孔内时，电子就作直线运动。在阴极透镜中，电子的平均速度比较小，会聚作用又比较强，因此在  $M$ - $A$  之间形成了一个最小交叉束截面——交叉点，电子束通过交叉点后，形成了有一定发射角的锥状电子束。

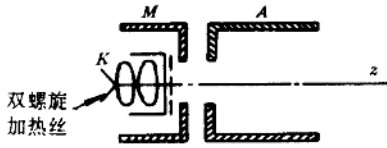


图 1-6 发射系统结构

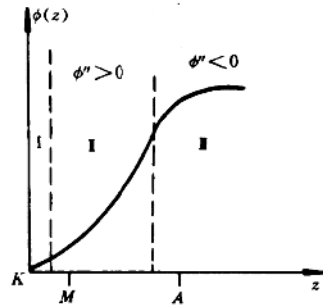


图 1-7 发射系统的沿轴电位

若不考虑透镜的像差和空间电荷效应的影响，根据透镜成像的性质，可以定性画出如图 1-8 所示的电子轨迹。垂直于阴极表面发射出来的所有电子都交于对称轴上的  $z=z_c$  点上，此点为交叉点的位置。所有从阴极发射出来的具有相同初始角的电子，都将会聚在  $z=z_c$  的焦平面同一点上。在交叉点处形成了最小截面，电子通过交叉点后，在  $z=z_i$  的平面上聚焦成像——阴极的放大像。从图中可以看出，交叉点处电流密度最大，因此在电子束器件与电子光学仪器中都把它作为下一级透镜的物点，以使在靶面或工件上得到一个锐利的光点。

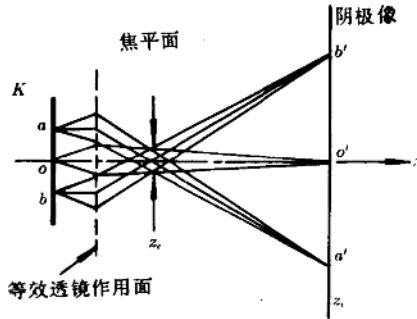


图 1-8 浸没物镜中的电子轨迹

上面仅定性地解释了阴极透镜的会聚作用，如果要比较严格地分析计算阴极透镜的电子轨迹，是相当繁杂的。因为在此透镜中电子速度低，空间电荷作用不能忽略，电场的分布规律将服从泊松方程，使得空间各点电位（尤其在对称轴附近）低于拉氏场分布对应点的电位，越接近阴极区，电子速度越低，拉氏场与泊松场的差异就越大，结果会使阴极发射电流下降，因电子互相排斥也使束径增大。

图 1-9 表示了考虑空间电荷以后的泊松场和拉氏场分布的差异。由于电子初速的零散性大，所以阴极透镜的色差也是不能忽略的。电子离开阴极的出射角的零散性也大，不能满足旁轴条件，所以几何像差也比较大。

综上所述,要严格地分析计算阴极透镜中的电子轨迹是相当困难的。随着科学技术的发展,现在利用计算机来设计电子光学系统,可以准确地计算阴极透镜的有关特性参量。

电子光学仪器中的发射系统,由于工作电压比较高,其结构与电子束器件中的发射系统有些不同,但多数仍采用三极式结构,如图 1-10 所示,在这种发射系统中也要形成交叉点,它的阴极常采用发夹式的直接加热式阴极,阴极用钨丝制成。当调制极上的电压改变时,束流大小发生变化。在电子光学仪器中,要求电子束的亮度大,即单位面积、单位立体角内的束流大。一般在改变调制极电压时,束流的大小和电子束发射角都要变化,但是当达到束流亮度最大时,总的束流并不很大。

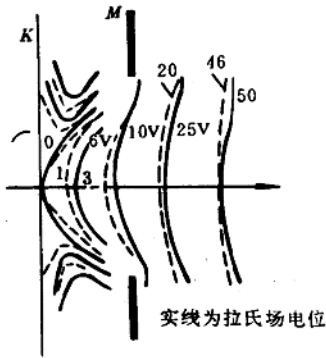


图 1-9 发射系统的拉氏场和泊松场

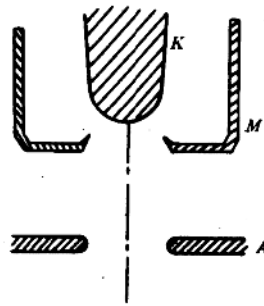


图 1-10 电子显微镜的发射系统

### 1.3.2 交叉点半径

在计算交叉点半径时,不考虑电子初速的零散和阴极透镜的像差,并且认为在交叉点以后的空间是等位空间,其电位与交叉点电位相同。

为了计算交叉点半径,可按图 1-11 所示光路,只考虑两条电子轨迹,一条是从对称轴上发出的倾角为  $\theta$  的电子束,其像点在  $z_1$  点;另一条是离轴距离  $r=r_K$  上发出的平行入射束,该束与  $z$  轴相交于  $z=z_c$  处,  $z_c$  即为交叉点所在位置。在  $z=z_c$  处,倾斜入射束的半径  $r=r_c$  即为交叉点半径。

根据拉格朗日公式有

$$n_1 r_K \sin \theta = n_2 r_c \sin \gamma$$

或  $\sqrt{\epsilon} r_K \sin \theta = \sqrt{\epsilon + U_c} r_c \sin \gamma$  (1-3)  
 式中,  $n_1$ 、 $n_2$  分别表示物方和像方空间折射率,  $\theta$  为电子的初始发射角,  $\gamma$  为电子束

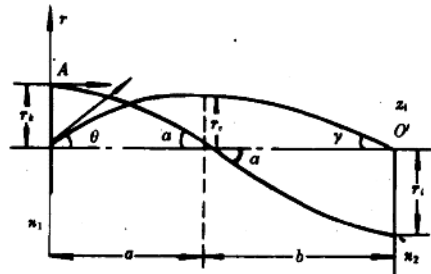


图 1-11 交叉点半径的形成

的会聚角。根据几何关系得出

$$b = \frac{r_c}{\operatorname{tg} \gamma} = \frac{r_i}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \text{或} \quad r_c = r_i \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (1-4)$$

当  $\alpha$  和  $\gamma$  角比较小时,  $r_c$  可用下式表示:

$$r_c = r_i \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} \quad (1-5)$$

将式(1-3)和式(1-5)联立后得出

$$r_c = \sqrt{\frac{\epsilon}{U_c + \epsilon}} r_k \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \quad (1-6)$$

式中,  $\epsilon$  为电子的初始能量。透镜确定以后,  $r_c$  随着电子出射角  $\theta$  的增大而增大。当  $\theta = \pi/2$  时, 由这条电子轨迹所决定的交叉点半径最大, 考虑到  $r_k/\sin \alpha = a$ , 因此式(1-6)可以简化为

$$r_c = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon + U_c}} a \quad (1-7)$$

上式表明初始能量为  $\epsilon$  的电子沿着阴极面发射出来 ( $\theta = \frac{\pi}{2}$ ), 由该射束确定了交叉点半径。当透镜的结构和电压确定后,  $a$  是一个常数。因此交叉点半径的大小只与电子的径向初速有关, 而与阴极的发射半径无关。也就是说阴极工作温度愈低, 交叉点的电位愈高, 交叉点的半径就愈小。式(1-7)是忽略了许多因素后得出的结果, 虽然具有近似性, 但该式仍然给我们指明了减小交叉点半径的一些途径。

若  $U_c = 1000\text{V}$ ,  $\epsilon = 0.1\text{V}$ ,  $r_k = 0.5\text{mm}$ ,  $\alpha = 30^\circ$  代入式(1-7)可得

$$r_c = \frac{0.5}{0.5} \sqrt{\frac{0.1}{1000}} = 0.01\text{mm}$$

以上结果表明: 交叉点半径远比阴极发射半径小。实际的交叉点半径比用式(1-7)计算出来的大得多, 而且交叉截面的边界并不明显, 这主要是因色差、空间电荷效应和几何像差影响的结果。

### 1.3.3 交叉点截面上的电流密度分布

为了能用解析式表示交叉点上电流密度的分布, 我们假定透镜是理想的; 不考虑空间电荷的影响, 并假定电子初速分布遵从麦克斯威尔分布定律; 电子的初始角度分布满足余弦定律。由余弦定律可知: 从面元  $A$  上发出的、处在单位立体角内的电流  $di$  与方向角  $\theta$  的余弦成正比, 若用  $d\omega$  表示立体角, 则有

$$di = AB \cos \theta d\omega \quad (1-8)$$

式中,  $B$  表示从单位面积上发射的、垂直于发射面的单位立体角内的电流。图 1-12 表示电子初始角分布的球坐标系, 其中  $r$  是半径,  $\phi$  表示方位角,  $\theta$  是方向角, 由图可以求出立体角元  $d\omega$  为

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{(r \sin \theta d\phi)(r d\theta)}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi \quad (1-9)$$

$dS$  为半径等于  $r$  时, 决定立体角  $d\omega$  所对应的面积元。将式(1-9)代入式(1-8), 并对方位角  $\phi$  求积分, 可得出环形图内所对应立体角内的电流  $dI$ 。

$$dI_e = AB\sin\theta\cos\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi$$

$$dI_e = 2\pi AB\sin\theta\cos\theta d\theta \quad (1-10)$$

由面元  $A$  发出的总电流为

$$I = \int_0^{\pi/2} 2\pi AB\sin\theta\cos\theta d\theta$$

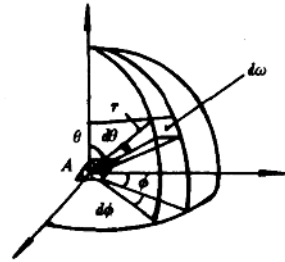
$$= \pi AB \quad (1-11)$$

若阴极发射出来的电流密度为

$$j_k = \frac{I}{A} = \pi B \quad (1-12)$$

与光学中的光度学相比可以知道, 上式中的  $B$  代表电子束的亮度。

图 1-12 电子初始角分布的球坐标



按照麦克斯威尔分布定律可知, 从单位面积上, 垂直于阴极表面的单位立体角内, 每秒钟内发出的初能在  $\epsilon$  到  $(\epsilon + d\epsilon)$  之间的电子数目为  $dN$

$$dN(\epsilon) = N_0 \exp\left(-\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right) d\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right) \quad (1-13)$$

式中,  $N_0$  为阴极单位面积上, 垂直于表面的单位立体角内, 每秒钟内发出的各种能量的电子数;  $\epsilon_0$  为最可几速度所对应的初能量, 且  $\epsilon_0 = kT/e$ ,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为阴极绝对温度,  $e$  为电子电荷。

将式(1-6)中的  $r_c$  对  $\theta$  求导后得

$$dr_c = \sqrt{\frac{\epsilon}{U_c + \epsilon}} r_k \frac{\cos\theta}{\sin\theta} d\theta \quad (1-14)$$

由式(1-10)可知, 通过交叉截面上半径为  $r_c$  与  $(r_c + dr_c)$  之间的环形区域, 方向角在  $\theta$  与  $(\theta + d\theta)$  之间的电流为

$$dI = 2\pi A B \sin\theta \cos\theta d\theta \quad (1-15)$$

式中,  $A = \pi r_k^2$  为阴极发射面积, 环形区面积为:  $dS = 2\pi r_c dr_c$ , 上述环形区内的电流密度为

$$j_{rc} = \frac{dI}{2\pi r_c dr_c} = AB \frac{\epsilon + U_c}{\epsilon} \frac{\sin^2\theta}{r_k^2} \quad (1-16)$$

从式(1-6)可知, 交叉点半径与电子的初能量  $\epsilon$  有关, 若  $r$  方向的初能量为  $\epsilon_r$ , 则  $\sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{\epsilon} \sin\theta$ , 因此当  $\theta = \pi/2$  时, 电子在  $r$  方向的能量最大, 在某一  $\epsilon$  值时, 式(1-6)确定的  $r_c$  也必然是最大, 初能量小于  $\epsilon$  的电子, 由它们形成的交叉点半径一定小于  $r_c$  值, 因此, 在  $r$  与  $(r + dr)$  环内通过的电子初能量必须要大于某一最小值  $\epsilon_{min}$ 。当  $\theta = \pi/2$  时, 由式(1-6)可求得这一最小值为

$$\epsilon_{min} = U_c \frac{\left(\frac{r_c}{r_k}\right)^2 \sin^2\theta}{1 - \left(\frac{r_c}{r_k}\right)^2 \sin^2\theta} \quad (1-17)$$

为了求出  $J_{rc}$ , 可以将式(1-16)对所有初能大于  $\epsilon_{min}$  的电子积分得出

$$J_{rc} = \frac{A \sin^2\theta}{r_k^2} \int_{\epsilon_{min}}^{\infty} \frac{\epsilon + U_c}{\epsilon} B(\epsilon) d\epsilon \quad (1-18)$$

将式(1-18)与(1-13)比较得出,  $B(\epsilon)d\epsilon$  与  $dN(\epsilon)$  相当, 二者之间只差一个比例常数  $e$ , 若将式



(1-13) 中的  $N_0$  用  $B_0$  代替, 即  $B_0 = N_0 e$ , 再把式(1-13)代入式(1-18)积分后得

$$\begin{aligned}
 J_{rc} &= \frac{AB_0 \sin^2 \alpha}{r_k^2} \int_{r_{min}}^{\infty} \left( \frac{e + U_c}{e} \right) \left( \frac{e}{e_0} \right) \exp\left(-\frac{e}{e_0}\right) d\left(\frac{e}{e_0}\right) \\
 &= \frac{AB_0 \sin^2 \alpha}{r_k^2} \left[ 1 + \frac{U_c}{e_0} \left( 1 + \frac{\left(\frac{r_c}{r_k}\right)^2 \sin^2 \alpha}{1 - \left(\frac{r_c}{r_k}\right)^2 \sin^2 \alpha} \right) \right] \\
 &\quad \cdot \exp\left[ -\frac{\frac{U_c}{e_0} \frac{r_c^2}{r_k^2} \sin^2 \alpha}{1 - \left(\frac{r_c}{r_k}\right)^2 \sin^2 \alpha} \right] \quad (1-19)
 \end{aligned}$$

因为  $\frac{U_c}{e_0} = \frac{eU_c}{kT}$ , 又考虑到  $\frac{eU_c}{kT} \gg 1$ ,  $\frac{r_c^2 \sin^2 \alpha}{r_k^2} \ll 1$ , 可将式(1-19)简化为

$$J_{rc} = AB_0 \frac{\sin^2 \alpha}{r_k^2} \frac{eU_c}{kT} \exp\left(-\frac{eU_c}{kT} \frac{\sin^2 \alpha}{r_k^2} r_c^2\right) \quad (1-20)$$

由式(1-12)可得阴极的电流密度为  $j_k = \pi B_0$ , 则有

$$B_0 = \frac{j_k}{\pi} \quad j_0 = \frac{A j_k}{\pi r_k^2} \quad (1-21)$$

因为  $A = \pi r_k^2$ , 将式(1-21)代入式(1-20)后得出

$$J_{rc} = j_0 \frac{eU_c}{kT} \sin^2 \alpha \exp\left(-\frac{eU_c}{kT} \frac{\sin^2 \alpha}{r_k^2} r_c^2\right)$$

或

$$J_{rc} = J_{max} \exp\left(-\frac{eU_c}{kT} \frac{\sin^2 \alpha}{r_k^2} r_c^2\right) \quad (1-22)$$

当  $r_c = 0$ , 电流密度最大, 即

$$J_{max} = j_0 \frac{eU_c}{kT} \sin^2 \alpha \quad (1-23)$$

由式(1-22)可以看出, 交叉点截面上电流密度分布变化满足于高斯分布规律。要想在屏上得到锐利的光点, 必须增大  $J_{max}$  的值, 即增大阴极发射电流密度, 增大交叉点电位值和降低阴极工作温度。为了得到边界清晰的光点, 要求电流密度随着  $r_c$  增大而迅速下降, 必须使指数函数的系数  $K$  尽可能的大, 因为

$$K = \frac{eU_c}{kT} \frac{\sin^2 \alpha}{r_k^2} \approx \frac{eU_c}{kT} \frac{1}{a^2}$$

式中,  $a$  为交叉点至阴极的距离 (即发射系统的焦距)。所以增大  $K$  值与增大  $J_{max}$  值可采用相同方法。

式(1-22)能很好地反映交叉点截面上电流密度分布规律, 但实际的电流密度比理论值小得多, 仅有理论值的 10~20%。只有当阴极电流很小时, 加上电子束的发射角  $\alpha$  也很小时, 实际的电流密度才接近理论值。出现差异的主要原因是: 透镜中存在像差和空间电荷, 同时阴极发射的电流密度  $j_k$  也不均匀。

### 1.3.4 电子束发射角

电子在浸没物镜中受到很强的会聚力, 在  $M-A$  之间形成了交叉点, 电子通过交叉点以后, 则形成圆锥束发散开来, 发散电子束的半锥角为  $\alpha$ , 根据莫斯 (H. MOSS) 的实验结果,