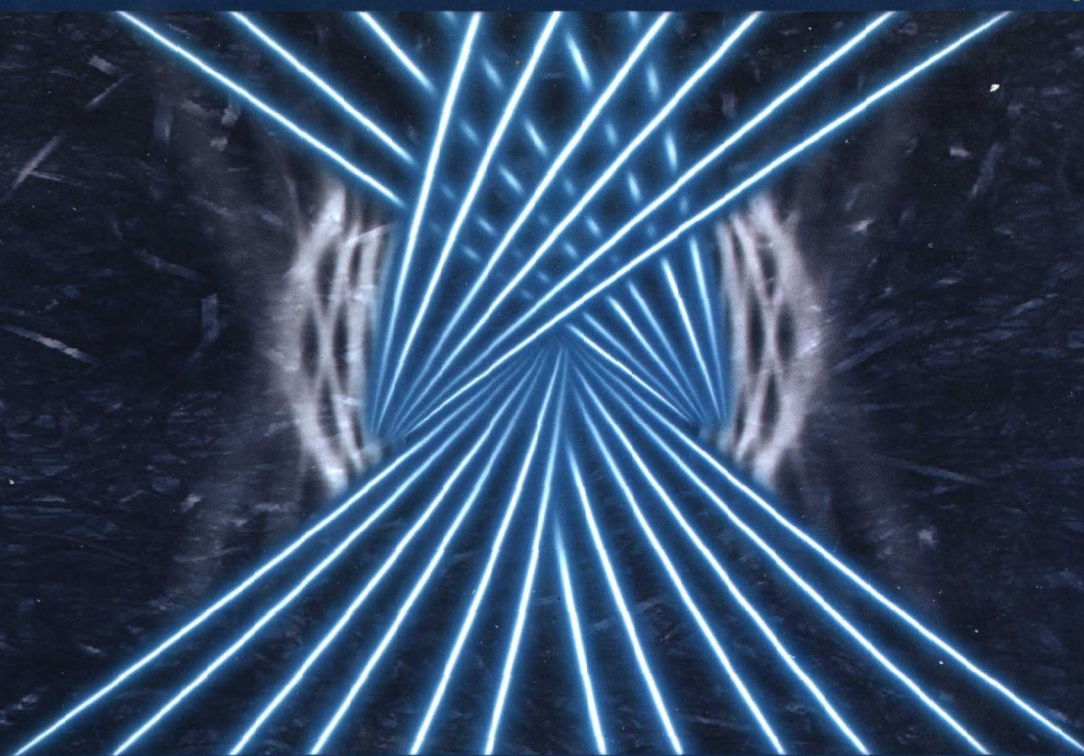



新世纪本科生系列教材

电子束离子束技术

赵玉清 编著



西安交通大学出版社

新世纪本科生系列教材

电子束离子束技术

赵玉清 编著

西安交通大学出版社

2002年3月

内 容 简 介

本书对有关电子束离子束的产生、引出、加速和偏转的工作原理,物理过程和主要部件进行了介绍(第1章,第2章,第3章和第4章),介绍了带电粒子束与固体表面相互作用的原理和产生的结果,以及电子束离子束技术在微电子领域的部分应用(第5章,第6章和第7章),最后介绍了最近几年发展十分迅速的、与纳米技术息息相关的扫描隧道显微镜技术(第8章)。

本书可供物理电子技术和光电子技术,微电子技术专业本科生,硕士生使用,对从事于电子束和离子束技术工作的工程技术人员也具有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电子束离子束技术/赵玉清编著. —西安:西安交通大学出版社,2002.3
ISBN 7-5605-1085-X

I. 电… II. 赵… III. ①电子束-高等学校-教材②离子束-高等学校-教材 IV. TL501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 005606 号

*

西安交通大学出版社出版发行
(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)
陕西省轻工印刷厂印装
各地新华书店经销

*

开本:727 mm×960 mm 1/16 印张:16.75 字数:268 千字
2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷
印数:0 001~2 000 定价:28.00 元

发行科电话:(029)2668357,2667874

绪 论

电子束和离子束技术是一门综合性技术,最早与其发展相关的领域主要有摄像与显示器件、微波器件、电子显微镜等分析仪器和加速器等。经过几十年的发展,现在电子束离子束仪器和设备不仅已经成为高能物理、核物理、等离子体物理发展的重要实验手段,而且也成为微电子、光电子、冶金、航空和航天、医疗仪器、机械等工业领域不可缺少的加工工艺和设备。电子束和离子束技术也逐渐形成为一门独立的学科。

电子束技术、离子束技术和激光束技术统称为三束技术,电子束和离子束技术也称为带电粒子束技术。带电粒子束技术目前作为加工工艺和分析手段促进了许多高技术的发展。目前主要的应用包括:

1. 电子显微镜技术

自1932年第一台电子显微镜出现至今,显微镜已成为一个大家族。它包括了用于观察薄样品材料结构和组成的透射显微镜(TEM),用于研究和观察整体样品表面形貌和材料结构的扫描电子显微镜(SEM),具有更高分辨率的用于薄样品结构观察的扫描电显微镜(STEM),用于观察单个原子及其晶格点阵和研究表面性质的场电子和场离子显微镜,以及近年来发展十分迅速的用于纳米技术领域中,唯一可以进行单原子操作的扫描隧道显微镜等仪器。

2. 分析仪器

用于分离不同质量离子的仪器——质谱仪,用于测定样品表面元素和一些重要物理量的电子探针、低能电子衍射仪(LEED)、俄歇电子谱仪(AES)、光电子谱仪、X射线光电子谱仪、(XPS)和紫外线光电子谱仪(UPS)以及二次离子质谱仪(SIMS)等。

3. 微电子技术制备工艺

用于集成电路制作工艺的不同元素掺杂的离子注入机,用于集成电路图形制备的电子和离子束刻蚀,用于沉积金属层和金属引线以及介质的电子束和离子束镀膜机,用于亚微米超大规模集成电路制作工艺中膜板制备的电子束和离子束曝光机,用于集成电路检测的各种仪器等。

4. 加速器

用于各种电子离子加速器,同位素分离器,核粒子谱仪,自由电子激光,同步辐射 X 光源,电子束引爆可控核聚变及离子集体加速器等。

5. 工业加工

电子束焊接,电子束熔炼,电子束和离子束刻蚀,离子镀膜等。

电子束和离子束的发展不仅仅依靠电动力学、电子光学、等离子体物理、固体物理、热力学和统计物理、电子学、真空、核物理和高能物理等一些基础学科的发展,而且与微电子、光电子、冶金、航空航天等工业的发展有着紧密的联系,其涉及面十分广泛。尤其是微电子和光电子工业的发展与电子束和离子束的发展水平有着更为密切的关系。电子束和离子束技术是当今高科技领域中必不可少的一门关键技术。因此,加强和提高有关电子束和离子束技术教学内容,逐步形成一门完整的课程,使学生进一步掌握有关技术和应用,是电子物理学科教改的重要内容。

所谓电子束和离子束技术,从原理上可分为 4 部分:

- (1) 电子和离子的产生、引出;
- (2) 束流的形成、加速运动、偏转、聚焦和成像;
- (3) 实现电子和离子的产生、运动、偏转、聚焦等相关的电子技术、控制技术和计算机技术;
- (4) 电子与固体的相互作用信息的探测和分析等。

作为电子物理和加速器物理专业的学生,要掌握这些内容需要学习离子源物理,强流电子技术,加速器物理,显微分析技术,特殊电源技术,微细加工技术等几门课程。而目前的教学改革已在原来的基础上对专业课程的学时进行了大大压缩,要想在现有的学时中对学生进行系统全面的有关课程的教育是不可能的。因此,有必要对原有课程进行必要的压缩和系统化。本教材就是在这样的背景下编写出版的。在编写过程中,对西安交通大学电子物理专业原有的部分专业课教材进行了充分的参考和吸收,在此基础上,按照新的教学体系要求进行了重新整理和编写,并形成这本教材。

该教材共分为 8 章。第 1 章介绍了电子束的产生装置——电子枪,内容包括电子枪的原理、结构和应用;第 2 章介绍了离子束的产生装置——离子源,内容包括离子源的原理、结构、特性、较常用和新型的离子源类型和离子源的应用。第 1 章和第 2 章内容主要讲电子束和离子束技术的原理。第 3 章主要介绍带电粒子的加速原理。第 4 章主要介绍在电子束和离子束技术中需要的有关电子技术。第 5 章介绍电子束和离子束曝

光技术。第 6 章主要介绍带电粒子束与固体表面作用产生的各种信息的检测和成像原理,以及在微电子技术中的应用。第 7 章介绍了电子束离子束技术在显微分析中的应用。第 8 章介绍了扫描隧道显微镜 (STM) 技术及其应用。第 7 章和第 8 章主要讲电子束离子束技术在显微分析中的应用。

该教材在编写过程中得到唐天同教授的大力支持和帮助,从教材大纲到具体内容,唐天同教授都提出了许多宝贵的意见。该教材得到了全国电子与信息类电子物理专业教学指导委员会的大力支持,并列入西安交通大学 21 世纪规划教材,在正式出版过程中,得到学校出版社的大力支持。在此,作者一并表示诚挚的谢意。

作者
2002 年元月

目 录

绪论

第一章 电子束的产生装置——电子枪

1.1 引言	(1)
1.2 弱流电子枪	(1)
1.2.1 基本结构	(1)
1.2.2 作用原理	(4)
1.2.3 发射系统的调制特性及其性能参数	(4)
1.3 强流电子枪	(9)
1.3.1 强流电子枪基本结构	(9)
1.3.2 平行电子注皮尔斯枪	(10)
1.3.3 球形皮尔斯枪	(12)
1.3.4 圆柱形皮尔斯枪	(16)
1.4 一些特殊性能的电子枪	(16)
1.4.1 弱流层流枪	(16)
1.4.2 低能枪	(17)
1.4.3 场发射枪	(18)

第二章 离子束的产生装置——离子源

2.1 引言	(20)
2.2 离子源的基本概念和主要特性参量	(20)
2.2.1 离子源的分类	(20)
2.2.2 离子源的基本概念和主要特性参量	(21)
2.2.3 离子源的性能参数	(25)
2.2.4 离子源的基本结构	(30)
2.2.5 离子源的引出系统	(34)
2.2.6 离子源的附加设备	(38)
2.3 热阴极大电流离子源	(38)

2.3.1	考夫曼型离子源的结构	(39)
2.3.2	热阴极潘宁离子源	(43)
2.3.3	霍尔效应(Hall-effect)型离子源	(45)
2.4	冷阴极离子源	(47)
2.5	高频放电离子源(简称 RF 离子源)	(48)
2.6	等离子体阴极离子源(双等离子体离子源)	(50)
2.7	微波阴极离子源	(52)
2.7.1	ECR 离子源	(52)
2.7.2	非共振微波离子源	(55)
2.8	电子束激励离子源	(56)
2.8.1	电子束离子源	(56)
2.8.2	束—等离子体离子源(BPIS)	(57)
2.9	液态金属离子源	(61)
2.9.1	场蒸发机理模型	(62)
2.9.2	场蒸发及场电离	(64)
2.9.3	液态金属离子源中的亮度	(64)
2.9.4	小结	(66)
2.10	金属蒸发真空电弧(MVVA)离子源	(66)
2.10.1	基本结构及运行原理	(67)
2.10.2	荷电态离子的分布	(68)
2.10.3	磁场的影响	(68)

第三章 高能量电子束和离子束技术

3.1	引言	(69)
3.2	倍压加速技术	(69)
3.3	绝缘磁芯变压器	(71)
3.4	高频高压发生器	(71)
3.5	强脉冲电子束发生器	(72)
3.6	电子感应加速技术	(73)
3.6.1	带电粒子在电、磁场中的运动	(73)
3.6.2	轨道的曲率半径	(74)
3.6.3	回旋频率	(75)
3.6.4	感应加速原理	(75)
3.7	谐振加速方法	(76)

3.7.1	谐振加速原理	(76)
3.7.2	离子轨道的形状	(78)
3.7.3	加速间隙宽度对有效加速电压的影响	(78)
3.7.4	相移现象	(79)
3.7.5	电磁聚焦	(79)
3.8	直线加速	(83)
3.8.1	在直线加速中的加速电场的形式	(84)
3.8.2	慢波结构中的电磁场分布	(86)
3.8.3	慢波结构中加速间隙的加速作用	(88)
3.9	直线加速器中的相运动	(88)
3.9.1	自动稳相过程	(88)
3.9.2	相运动方程	(90)
3.9.3	相运动方程的分析	(92)
3.10	粒子的横向运动	(92)
3.11	小结	(92)

第四章 电子束和离子束技术中的电源技术

4.1	引言	(94)
4.2	直流稳压电源	(94)
4.2.1	开关电源的技术指标	(94)
4.2.2	开关电源的基本电路	(95)
4.2.3	晶体管开关型直流稳压电源	(103)
4.2.4	可控硅直流稳压电源	(106)
4.2.5	稳压电源中的过载保护	(107)
4.3	逆变型高压直流稳压电源	(113)
4.3.1	晶体管逆变器型直流稳压电源	(114)
4.3.2	稳压控制回路	(120)
4.3.3	功率晶体管驱动电路和设计	(122)
4.3.4	功率 MOSFET 场效应晶体管	(125)
4.3.5	可控硅逆变器型直流稳压电源	(130)
4.4	磁透镜和磁偏转用的直流稳流电源	(131)
4.4.1	直流稳流电源的基本结构	(131)
4.4.2	直流稳流电源的性能参数	(132)
4.5	电子束和离子束设备中的偏转和扫描技术	(133)

4.5.1 扫描电源	(133)
4.5.2 扫描稳流源	(138)

第五章 电子束和离子束曝光技术

5.1 引言	(141)
5.1.1 电子束曝光技术的分类	(141)
5.1.2 离子束曝光技术概述	(142)
5.2 电子束扫描曝光技术	(142)
5.2.1 电子枪	(143)
5.2.2 聚焦系统	(143)
5.2.3 偏转系统	(146)
5.2.4 电子光学柱体	(149)
5.2.5 图形扫描技术	(151)
5.3 电子束投影曝光技术	(152)
5.3.1 电子束缩小投影曝光	(152)
5.3.2 电子束原尺寸投影曝光	(153)
5.4 电子束曝光的特点	(156)
5.5 离子束扫描曝光技术	(156)
5.5.1 离子束扫描曝光系统的构成	(156)
5.6 离子束投影曝光技术	(160)
5.6.1 缩小投影曝光系统	(160)
5.6.2 原尺寸投影曝光系统	(160)
5.7 离子束曝光技术的特点	(162)
5.7.1 离子束曝光的特点	(162)
5.7.2 离子束曝光目前存在的问题	(164)

第六章 离子束刻蚀技术

6.1 离子束刻蚀的原理	(165)
6.1.1 高能离子与固体表面的相互作用	(165)
6.1.2 固体表面溅射	(166)
6.2 离子束刻蚀工艺	(172)
6.2.1 等离子体化学刻蚀	(172)
6.2.2 溅射刻蚀	(172)
6.2.3 反应离子刻蚀	(173)

6.3	离子束刻蚀	(173)
6.3.1	氩离子束刻蚀	(173)
6.3.2	离子束加强刻蚀	(174)
6.3.3	反应气体离子束刻蚀	(175)
6.4	离子束刻蚀的特点	(176)
6.5	离子束刻蚀的应用	(176)
6.5.1	半导体器件和大规模集成电路的图形刻蚀	(176)
6.5.2	磁泡存储器件的制造	(176)
6.5.3	晶体管的引线	(177)
6.5.4	晶体的削薄加工	(177)
6.5.5	器件制备	(177)
6.5.6	电镜试样制备	(177)
6.5.7	表面分析试样制备	(178)
6.5.8	医疗器械	(178)
6.6	离子束刻蚀装置	(178)

第七章 电子束离子束显微分析技术在微电子技术领域中的应用

7.1	引言	(179)
7.1.1	用于对样品的表面形貌和物体结构组成进行观察的仪器	(179)
7.1.2	用于对样品的成分和结构进行分析的仪器	(179)
7.1.3	微细加工类	(179)
7.2	电子和离子与固体相互作用产生的多种带电粒子	(180)
7.2.1	背散射电子	(180)
7.2.2	二次电子	(182)
7.2.3	吸收电子	(182)
7.2.4	透射电子	(182)
7.2.5	电子束感生电流	(182)
7.2.6	阴极荧光	(183)
7.2.7	特征 X 射线	(183)
7.2.8	俄歇电子	(183)
7.3	供观察用的带电粒子的信息成像机理	(183)
7.3.1	二次电子成像	(184)
7.3.2	背散射电子成像	(189)

7.3.3	吸收电子成像	(189)
7.3.4	透射电子成像	(189)
7.3.5	电子通道花样	(189)
7.3.6	电荷收集成像(电子束感应电流 EBIC 成像)	(190)
7.3.7	磁成像或磁衬度	(193)
7.4	供分析用的带电粒子的信息	(198)
7.4.1	特征 X 射线的应用	(198)
7.4.2	俄歇电子的应用	(199)
7.4.3	二次溅射离子的应用	(202)
7.4.4	阴极发光的应用	(202)

第八章 扫描隧道显微镜(STM)技术及其应用

8.1	概论	(205)
8.2	STM 及其微细加工改性技术的发展及现状	(205)
8.2.1	各种物质表面结构的特性分析和研究	(206)
8.2.2	扫描探针表面改性技术与微细加工技术	(208)
8.3	STM 的隧道电流理论	(212)
8.4	反馈系统	(214)
8.5	反馈系统的稳态误差和响应	(216)
8.6	隔振理论和隔振系统	(222)
8.7	STM 系统的设计制作和调试	(229)
8.7.1	针尖	(229)
8.7.2	扫描器	(230)
8.7.3	微位移驱动器(爬行器)	(231)
8.7.4	电流放大器	(233)
8.7.5	反馈放大电路	(235)
8.7.6	扫描控制电路	(236)
8.7.7	爬行器控制电路	(236)
8.7.8	计算机接口板和数据采集	(236)
8.7.9	干扰和噪声的抑制	(237)
8.7.10	反馈振荡的控制	(239)
8.7.11	热漂移和压电滞后作用控制	(239)
8.8	图像处理与三维图形显示	(239)
8.8.1	图像数据的量化和存储	(240)

8.8.2 图像的伪颜色处理	(240)
8.8.3 图像的直方图处理	(241)
8.8.4 图形的三维显示	(245)
8.9 小结	(248)

参考文献

第一章

电子束的产生装置 ——电子枪

1.1 引言

电子束技术被广泛应用于高能物理、冶金工业、微电子工业、机械工业、航天与航空工业和医学卫生等各个领域,在国民经济和技术进步中起着非常重要的作用。利用电子束流完成各种加工和测量功能的装置,称为电子束设备。在电子束设备中,产生电子束的部件称为电子枪。若按产生电子束流的强弱划分电子枪的类别,则可分为强流电子枪和弱流电子枪两种。可以根据导流系数 $P = I/V^{3/2}$ 来确定空间电荷效应的强弱和电子枪发射电流的能力,式中 I 为电流, V 为阳极电压。当 I 的单位用安培(A), V 用伏(V)时, P 的单位为朴(P)。导流系数小于 $10^{-9} \text{A}/\text{V}^{3/2}$ 时,一般为弱流电子枪,在这种情况下,电子束内的空间电荷效应可以忽略;强流电子枪的导流系数一般大于 $10^8 - 10^{-7} \text{A}/\text{V}^{3/2}$ 。

若根据电子发射方式划分类别,则可分为热发射枪和场发射枪两种。一般地说,当发射束流大于 10 mA 时,称为强流电子枪,这时应该考虑束内的空间电荷效应。当发射束流小于 20 μA 时,称为弱流电子枪,通常可以不考虑束内的空间电荷效应。强流电子枪通常用于电子束焊接、电子束熔炼、电子束蒸发、加速器和磁控管等大功率电子束设备中。弱流电子枪适用于电子显微镜、电子探针、电子谱仪和电子束曝光等微细电子束仪器中。

1.2 弱流电子枪

1.2.1 基本结构

弱流电子枪产生具有弱束流的细束电子枪,它的基本结构由发射系

统和聚焦系统两部分组成,发射系统的作用是产生、加速和引出电子束;聚焦系统的作用将发散的电子束聚焦成像。弱流电子枪一般采用3电极结构,即热阴极 K、控制极 M 和阳极 A。常用的短焦距3极电子枪如图 1-1所示:

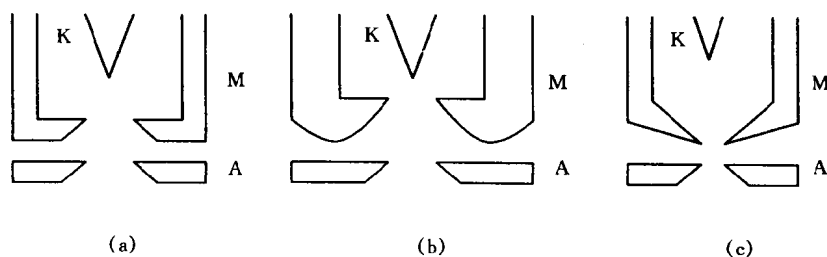


图 1-1 3 电极电子枪发射系统的结构

热阴极用来发射电子,要求具有发射电流大、发射稳定、熔点低和寿命长等优点。因此,必须选用逸出功低和化学稳定性好的材料,如可采用钨、钽和铯等材料,且将钨丝等材料制备成一定的形状,如发卡型、笔架型和螺旋型等。阴极发射电流密度 J 与阴极绝对温度 T 及阴极材料的逸出功 W_{ϕ} 之间有下列关系

$$J = AT^2 e^{-W_{\phi}/kT} \quad (1-1)$$

式中 A ——与材料有关的发射系数; k ——玻耳兹曼常数。

控制极(栅级)和阳极一般由不锈钢制成。控制极与阴极距离较近,做成罩式,控制极相对阴极加负电压,控制发射电子的大小,阳极加正电压用于加速电子,并使电子按一定的分布形式引出发射系统,所以阳极又称加速极或引出极。

在电子光学中,上述结构称为静电浸没透镜或阴极透镜。通常,阴极透镜后面连接主聚焦系统,主聚焦系统可以是静电透镜,也可以是磁透镜。在这些系统的联合作用下,可在靶上形成电子像。

有时,为了改善像点光斑边缘处的分辨率减小束张角,提高成像质量,可在阴极透镜与主透镜之间加一个预聚焦透镜,形成如图 1-2 所示的 4 电极结构。

图中 K, M 和 A_1 构成阴极透镜;3 个圆筒 V_1, V_2 和 V_1 组成的单电位透镜构成主聚焦系统(其中 A_2 和 V_1 是同电位);而在加速极 A_1 与主聚焦透镜(单电位透镜)的第一电极 V_1 (即 A_2) 之间形成电位差,构成一个双圆筒会聚透镜,此透镜叫预聚焦透镜。预聚焦透镜可以减小电子束

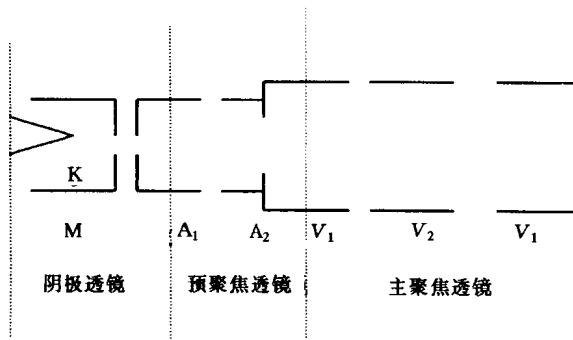


图 1-2 4 电极电子枪的结构

与轴之间的夹角,从而减少交叉截面的夹角,形成细束。具有预聚焦系统的电子枪发射系统称为 4 电极发射系统。一般显像管电子枪常用这种系统。

如果阴极透镜的加速极直接作为主透镜的第一电极,即不存在预聚焦系统的结构就称为 3 电极发射系统。对于在调制性要求不高的电子束管中(如示波管),一般采用这种结构。如图 1-3 所示(图中的主聚焦透镜可采用 3 个圆孔膜片组成的单电位透镜构成,也可采用由 3 圆筒电极构成的单电位透镜)。

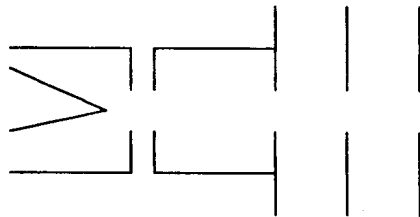


图 1-3 3 个圆孔膜片组成的电子枪

聚焦系统的作用是把从发射系统中引出的电子束聚焦成像于电子束管的终端。聚焦系统可以采用静电透镜,也可以采用磁透镜。为了减小体积,减轻重量,大多采用静电透镜。静电透镜可用双圆筒透镜或单电位透镜。如图 1-4(1)(2)所示。

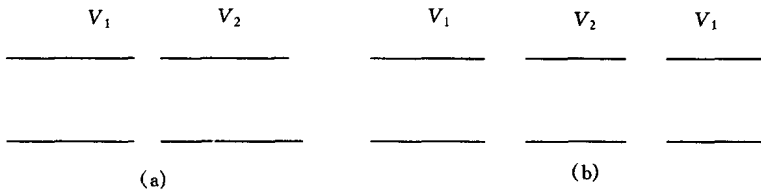


图 1-4 聚焦系统用透镜
(a)双圆筒透镜; (b)单电位透镜

1.2.2 作用原理

热阴极 K 通过外施电流加热,发射电子。该电子受阴极透镜会聚电场的作用,在控制极与加速极之间的区域内向轴收敛,收敛于轴线 C 处,形成交叉截面,通常称之为最小电子束截面。电子束离开交叉截面后,重新又形成一个发射的锥体,然后又经过主聚焦透镜的作用,再聚焦成像于屏上,如图 1-5 所示,若在聚焦透镜后面再增加一个偏转线圈,则可使像点偏移中心位置。像的亮度由电子束流的强度决定,该束流可通过控制极上加负电压的大小进行调节,用来调节束流强度的本领决定了电子枪的调制灵敏度。

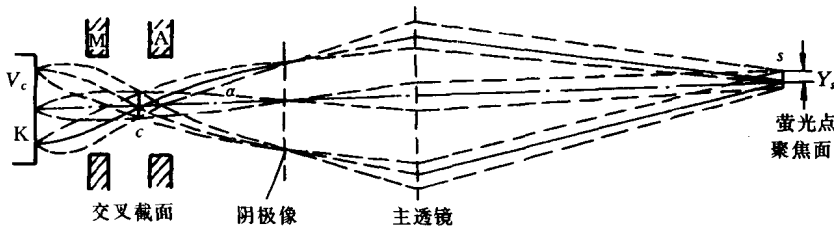


图 1-5 电子枪的电子轨迹和成像图

1.2.3 发射系统的调制特性及其性能参数

1. 发射系统承担着电子束产生和引出的作用。

因此,它是决定整个系统质量和性能的关键部件。一个好的发射系统应该具有电子束截面尺寸小和电流密度高的特性。

发射系统中,阴极电位一般为 0 电位,控制极为几百伏,加速极为几千伏。控制极对发射电子的调制作用可以从以下分析中看出。