



高等学校
电子信息类

规划教材

电子束与离子束物理

唐天同 刘纯亮 编著



西安交通大学出版社

高等学校电子信息类规划教材

电子束与离子束物理

唐天同 刘纯亮 编著

西安交通大学出版社

·西安·

内容简介

本书论述利用电子束和离子束工作的器件、仪器及装置的基本原理与概念和带有共同性的分析方法,包括带电粒子运动的分析动力学、轨道理论、电子离子光学、空间电荷光学、相空间动力学与束流传输、电子束和离子束的统计动力学及其电子束和离子束的辐射及波动与不稳定性等。本书对电子束与离子束的几何性状、束内粒子间的长程与短程的相互作用以及束与电磁波的相互作用进行了比较系统和完整的论述,使读者对电子束和离子束的原理与应用有一个全面的理解,便于从较宽和较深的角度认识 and 解决问题。

本书共7章,其中第2和第5章由刘纯亮编著,其余各章均由唐天同编著。唐天同并对全书作了统编整理工作。

本书可用作高等学校工科电子类电子科学技术专业及工科与理科物理电子学学科研究生及本科生教材,约50个学时;也可供从事电子束器件、微波管与毫米波电子束功率源、电子显微镜与电子和离子微分析仪器与技术、质谱技术、电子能谱与核谱技术、电子与离子束曝光等微细加工技术,加速器与自由电子激光等领域的研究人员、技术人员及高等学校其他有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子束与离子束物理/唐天同,刘纯亮编著. —西安:
西安交通大学出版社,2001.2
ISBN 7-5605-1310-7

I. 电… II. ①唐… ②刘… III. ①电子光学-高等学校-教材 ②离子光学-高等学校-教材 IV. 0463

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 68357 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)2668316)
西安正华印刷厂印装
各地新华书店经销

*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:18 字数:431 千字
2001年2月第1版 2001年2月第1次印刷
印数:0001~3 000 定价:24.00 元

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)2668357,2667874

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社、各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996~2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办同各专指委、出版社协商后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神及特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需,尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

前 言

本书系按《1996~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由全国高校物理电子技术专业教学指导委员会征稿和推荐，经全国高等学校工科电子类专业教学指导委员会领导小组批准，作为国家重点教材出版。

本教材由西安交通大学唐天同教授任主编并编写本书第1、3、4、6和第7章；西安交通大学刘纯亮教授编写第2和第5章；清华大学应根裕教授任主审，责任编委为上海大学林立炜教授。

本课程的参考教学时数为40~60学时。

本书共分7章。第1章介绍电子束与离子束物理的基本概念、内容、意义和发展，提供背景知识，并简明地介绍了电子和离子源。第2章介绍了带电粒子运动的分析动力学基础，为学习本书提供必要的预备知识。第3章介绍单粒子轨道理论和几何电子离子光学。第4章则介绍了空间电荷效应和自洽空间电荷流理论。第5、6两章介绍了电子束与离子束作为多粒子体系的统计理论。其中，第5章为相空间动力学与束流传输理论和方法介绍；第6章介绍了电子离子统计分布及其演化，并重点讨论了随机库仑相互作用这一起伏效应；最后，在第7章里简要地介绍了电子束与离子束中的辐射、波动和电子离子束与电磁波的相互作用。这样，本书系统地介绍了电子束与离子束的基本概念、基本原理和主要分析、计算、处理方法，将分散于多种技术应用领域的各种物理现象做了统一的论述，并反映了与现代信息技术和基础研究密切相关的一些新技术和新发展。

本书可作为本科高年级学生和研究生教材，也可作为选读参考书，请有关任课教师和研究生指导教师对学习内容进行挑选和指导。

全国高校物理电子技术专业教学指导委员会的专家们对本书的取材和内容提出了许多宝贵意见，编著者们在此对他们的帮助表示感谢。

本书的出版还得到了西安交通大学面向21世纪教材建设基金的资助，得到了西安交通大学教务处、电子与信息工程学院及出版社有关领导和同志们的大力支持。在此，对他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切地希望广大读者和同行专家批评指正。

唐天同
2000年5月

目 录

第 1 章 绪论

| | |
|----------------------|------|
| 1.1 研究对象与主要内容 | (1) |
| 1.2 历史发展简述 | (3) |
| 1.3 电子源 | (7) |
| 1.4 离子源 | (10) |
| 第 1 章及全书一般参考文献 | (17) |

第 2 章 电子离子运动的粒子动力学基础

| | |
|-------------------------------|------|
| 2.1 电磁场基本方程 | (19) |
| 2.2 拉格朗日方程 | (20) |
| 2.3 能量守恒与加速电位 | (21) |
| 2.4 运动方程 | (23) |
| 2.5 轨迹方程 | (25) |
| 2.6 哈密顿变分原理 | (27) |
| 2.7 哈密顿正则方程 | (29) |
| 2.8 静态电磁场中的拉格朗日函数和哈密顿函数 | (31) |
| 2.9 哈密顿方程的李算子表述 | (32) |
| 2.10 李变换与传输映射 | (34) |
| 2.11 正则变换与哈密顿-雅可比方程 | (36) |
| 2.12 正则变换与相对运动 | (38) |
| 第 2 章参考文献 | (41) |

第 3 章 单粒子轨道理论和电子离子光学

| | |
|----------------------------|------|
| 3.1 电场和磁场的对称与展开性质 | (42) |
| 3.2 旋转对称系统 | (47) |
| 3.3 高斯聚焦、成像与轨迹变换传递性质 | (52) |
| 3.4 圆透镜的像差 | (59) |
| 3.5 直轴多极场系统 | (64) |
| 3.6 柱透镜 | (71) |
| 3.7 直轴多极场系统的像差 | (73) |
| 3.8 周期聚焦系统 | (77) |
| 3.9 扫描偏转系统 | (83) |

| | |
|----------------------|------|
| 3.10 均匀磁场偏转分析器 | (88) |
| 第3章参考文献 | (94) |

第4章 自洽场与空间电荷光学

| | |
|--------------------------|-------|
| 4.1 自洽空间电荷场 | (95) |
| 4.2 层流旁轴方程 | (98) |
| 4.3 漂移空间圆形束的发散 | (101) |
| 4.4 均匀磁场聚焦 | (105) |
| 4.5 周期磁场聚焦 | (111) |
| 4.6 空间电荷限制电流 | (119) |
| 4.7 虚阴极形成与极限束流 | (126) |
| 4.8 层流直线流电子枪 | (130) |
| 4.9 交叉电磁场中的自洽空间电荷流 | (139) |
| 4.10 空间电荷中和效应 | (145) |
| 第4章参考文献 | (150) |

第5章 相空间动力学与束输运理论

| | |
|------------------------------|-------|
| 5.1 相空间与相图 | (152) |
| 5.2 刘维定理 | (153) |
| 5.3 踪迹空间 | (155) |
| 5.4 发射度和亮度 | (158) |
| 5.5 线性聚焦场与椭圆相图 | (159) |
| 5.6 六维相椭球及其线性变换理论 | (161) |
| 5.7 线性传输矩阵的 Twiss 参量表述 | (164) |
| 5.8 束包络线方程 | (166) |
| 5.9 束腰变换 | (168) |
| 5.10 束输运中的矩方法 | (172) |
| 5.11 空间电荷效应与 K-V 分布 | (175) |
| 第5章参考文献 | (179) |

第6章 电子束与离子束统计动力学

| | |
|------------------------------|-------|
| 6.1 统计分布,玻耳兹曼方程和符拉索夫方程 | (180) |
| 6.2 符拉索夫方程的自洽平衡解 | (185) |
| 6.3 电流密度分布的演化 | (191) |
| 6.4 随机库仑相互作用 | (194) |
| 6.5 福克尔-普朗克方程 | (203) |
| 6.6 玻尔希效应 | (207) |
| 6.7 粒子束冷却 | (213) |
| 6.8 非平衡束发射度的增长 | (215) |

| | |
|-----------|-------|
| 第 6 章参考文献 | (219) |
|-----------|-------|

第 7 章 电子束和离子束中的辐射与波

| | |
|----------------------|-------|
| 7.1 自由带电粒子的电磁辐射 | (221) |
| 7.2 电子和离子对电磁波的散射 | (225) |
| 7.3 切伦科夫辐射、渡越辐射和衍射辐射 | (230) |
| 7.4 空间电荷波 | (234) |
| 7.5 回旋波和同步波 | (241) |
| 7.6 等离子体中的波 | (244) |
| 7.7 电子束中的波与传输线波的耦合 | (250) |
| 7.8 电子回旋不稳定性与回旋管原理介绍 | (257) |
| 7.9 自由电子激光原理介绍 | (261) |
| 7.10 带电粒子束对带电粒子的加速作用 | (288) |
| 第 7 章参考文献 | (275) |

第1章 绪论

1.1 研究对象与主要内容

电子、离子是宏观物质的基本构成单元,我们的生活及各种工农业生产与科学技术中,几乎所有物理、化学,乃至生物与生命的现象,均与电子和离子的微观作用或过程有关。作为成束的带电粒子束,电子束与离子束还具有多种宏观与微观的电磁作用与效应。因而,电子束与离子束在科学技术、工农业和其他事业中具有非常广泛的应用。作为一个技术科学学科,电子束与离子束物理是与各种现代科学技术联系最密切的技术物理学科之一。正因为如此,过去对电子束和离子束性质的研究常分散到许多不同的学科领域进行,例如电子束显示与显像器件、变像与摄像器件、微波电子器件、毫米波及亚毫米波电子器件与自由电子激光器,电子显微镜与电子及离子微分析仪器与技术、表面分析仪器与技术,电子束与离子束曝光制版与集成电路电子束检测装置与技术、集成电路离子注入技术、质谱技术、电子能谱与核谱技术、加速器与储存环技术、离子推进技术、等离子体与核聚变技术、电子离子辐照与离子注入材料改性技术及电子束加工工艺技术等等。在这些不同的应用领域里,研究电子束及离子束时,使用的表象符号和所用的近似处理的方式非常多,对于束的物理性质如聚焦、成像、偏转与色散、发射度及束流控制等也各有不同的要求,这在某种程度上掩盖了它们之间的联系和共性。但是,作为成束的带电粒子群体,它们的电子、离子运动和作用的主要规律是共通的。近年来,这些不同领域的研究互相渗透与结合,正在形成统一的电子与离子束技术,带电粒子光学及带电离子束物理学科。

作为研究成束的自由电子及离子的学科,电子束与离子束物理要面对和处理以下一些物理现象:

- (1) 电子和离子作为单个的经典带电粒子在外加电磁场中的运动;
- (2) 电子束与离子束作为大量的经典带电粒子群体的运动,各单个粒子相互间有着长程的(库仑)相互作用,这种作用力一般用某种自洽的宏观电磁场(空间电荷场)力来代表;
- (3) 电子束与离子束仍作为大量的经典带电粒子群体的运动,但应进一步考虑粒子体系热运动的统计性质及其起伏(即短程的相互作用);
- (4) 电子束与离子束的不稳定和辐射现象以及束与电磁波场的相互作用;
- (5) 束中电子和离子运动和相互作用的波动性质。

上面所列的第一项问题,是束中的电子离子作为单个的自由带电粒子,在外加电场和磁场中,受到电场和磁场力(洛伦兹力)的作用而运动。由于近似为单粒子的行为,没有考虑粒子间的相互作用,因此这一运动遵循质点动力学的规律。对于很多电子束与离子束器件和仪器装置,这一近似处理已能解决有关束的位形等主要性质的问题,这就是几何电子光学的研究对

象。在几何电子光学里,除要研究电场磁场的分布与场的展开——延拓规律及其解算方法外,更重要的是要研究电子离子的质点动力学的问题,重点研究粒子运动的轨迹及聚焦、成像、偏转和色散等与粒子及束的位形性质有关的问题。电子束与离子束系统大都具有相当高的加速电压,研究处理时常常需要考虑相对论效应。由于在很多场合中,要求对运动性质包括时变性质与轨迹性质作解析的或高度精确的数值描述,研究中要用到各种分析力学和光线光学的概念和方法,包括它们的一些现代进展。本书的第2章介绍带电粒子的质点动力学理论基础,包括质点动力学方程、变分原理与拉格朗日力学、光线光学比拟、哈密顿力学与带电粒子动力学的一些新概念和方法。第3章简要介绍几何电子光学的基本内容,即电子与离子束的聚焦、成像、偏转与色散等与束的形成和控制有关的问题。受限于有限的篇幅,讨论仅限于最常用的旋转对称系统(圆透镜)、以四极透镜为主的多极场聚焦系统、扫描偏转系统及偏转色散型分析器几方面。

在第2项问题中,电子离子束将作为大量带电粒子群体进行研究,但不具体研究束中粒子热运动造成的统计分布及短程相互作用导致的起伏现象。束中各个粒子间的相互作用,在低加速电压时,以库仑电相互作用力为主,在很高加速电压下,还要考虑带电粒子运动导致的磁场相互作用力。对于大多数问题,这些相互作用在束建立后会导致一种平衡状态,这时所有其他粒子对特定的某个单个粒子的作用可归结为一种自治的、束自身的电场和磁场,即空间电荷电场与磁场,运动中的带电粒子群体也被视为具有连续分布的空间电荷(云)。研究自治空间电荷场作用下电子离子束性状的学科,叫空间电荷流理论或空间电荷光学。本书第4章论述了空间电荷流理论,包括电子离子束中的空间电荷效应、自治空间电荷流及强流束的形成和聚焦。这一章将着重介绍类似流体运动的层流理论,而在第5章则将上述束内电子离子群体运动用相空间动力学方法处理,以进一步定量描述束的几何性状及传输性质。此章将重点论述在加速器和分析器(质谱、能谱和核谱仪)分析计算中,广泛使用的相图、发射度、束包络及束腰等概念及其分析计算方法的原理。

在第3项问题中,研究了束中大量的电子或离子随机的热运动所导致的物理现象和束的统计平均宏观性质。在已知的各种电子和离子源中,发射或产生的电子或离子都具有初始能量及速度的零散,并对应于一定的统计分布。为了较为精确地描述电子离子束的性状,需要研究在外电磁场及空间电荷场共同作用下形成这一统计分布及其演化发展的规律,这是一个统计系统及其输运的问题。一定的统计分布导致束的一些统计平均的宏观性质,所有的大量粒子体系,除了统计平均的性质以外,还表现出对于上述平均量值的起伏或涨落。在电子束与离子束里,这一起伏效应与粒子间的近程相互作用有关。在单个粒子附近较近的范围里,电荷和电场已不可能再视为连续分布的空间电荷云和空间电荷电场,已证实这一起伏或离散的空间电荷效应导致了一系列现象,如玻尔希效应(电子能量分布的反常展宽)、电子束的横向尺寸扩展及随机偏转等。这些效应对电子离子束的应用性能带来了一些原理上的限制,是现代电子物理学重要的前沿课题之一。本书第6章将对上述电子束与离子束统计动力学研究的基础理论,作一初步讨论与介绍。

第4项问题是电子和离子束中的不稳定性、波动和辐射现象。作为有电磁相互作用的大量带电粒子系统,电子束和离子束具有固有的振动与波动现象,并在一定条件下发生自发的电磁辐射。在一定的外来电磁波或周边媒质或特殊周边结构存在时,还会产生放大增益或出现受激辐射。这些现象在理论和应用两方面都具有很重大的意义。本书在第7章中将论述这方

面的问题。但由于带电粒子束的不稳定性和辐射及束-波相互作用现象的复杂性,以及这一问题与微波、毫米波及亚毫米波放大与振荡管、自由电子激光器、加速器与同步辐射源等许多非常重要的现代技术密切相关,不可能在本书中对这一领域的物理现象和理论作完整的论述,而只能作为带电粒子束的物理现象作初步的讨论。

电子束与离子束物理作为一个学科,其主体属于经典物理学的范畴。作为成束的自由电子与离子,在大多数现象和过程中,粒子的波动性质都不起主要作用,经典的处理已足以阐明问题的实质,经典处理的计算结果与实验有很好的吻合。但是,从粒子的运动规律到粒子系统的统计平均宏观性质,从粒子的辐射到自由电子激光,都存在着波动或量子现象。在某些场合,如电子或离子的衍射现象和波像差对成像过程和分辨率的影响问题,以及在某种程度上对电子回旋脉塞与自由电子激光等电子和辐射场相互作用问题的较为完整的解决,都依赖于量子力学乃至量子电动力学的分析计算。这些已超出本书的范围而将不作论述,有兴趣的读者可参阅有关专著。

1.2 历史发展简述

电子束和离子束物理作为一个学科的历史发展,首先应提到了自由电子的发现和实验研究。早在19世纪,普鲁歇(Pluecher)、戈尔德斯通(Goldstone)、克鲁克斯(Crookes)、赫兹(Hertz)、勒纳(Lenard)和舒斯托尔(Schuster)等人便发现了气体放电产生的阴极射线,并对其进行了实验研究,用阴极射线构造了最初的阴极射线管即布劳恩(Braun)管。1883年,爱迪生(Edison)发现了灼热灯丝发射带负电粒子的现象即爱迪生效应。1897~1899年,汤姆孙(Thomson)的研究认定了阴极射线为带负电的粒子,他认为这种粒子即电子带有普遍性,并非阴极射线中特有,他还测定了电子的比荷,一般认为这标志着自由电子的发现。到了1906年,密立根(Millikan)测定了电子的电荷,即基本电荷的量值,这些工作可看作研究自由电子的里程碑。关于自由电子的其他历史性研究工作,还有1921~1927年戴维孙等人(Davison, Gerner和G. P. Thomson)的电子衍射研究,1924年德布罗意(DeBroglie)提出的物质波假定,1925~1926年泡利(Pauli)及以后狄拉克(Dirac)等人关于电子具有 $\pm \frac{1}{2}(\frac{h}{2\pi})$ 自旋角动量和磁矩的实验及理论工作等。这些研究工作都确立了自由电子的基本性质。

1901年,理查森(Richardson)的理论研究,以及继后肖脱基(Schottky 1919)、道舒曼(Dushman 1923)、诺尔德海姆(Nordheim 1929)等学者的的工作,确立了热电子发射的基本规律。20世纪初期,在热发射体即热电子阴极方面,进行了很多实验研究和探索,其重要标志是1904年维纳尔特(Wehnelt)描述的氧化物阴极,这种热阴极后来经改进成了真空电子器件的主要电子源。1911年,切尔德(Child)和1913年朗缪尔(Langmuir)完成了关于空间电荷限制电流($3/2$ 次方定律)的著名理论。1928年,否勒(Fowler)和诺尔德海姆首次提出了场致电子发射的理论。1931年,否勒等学者提出了光电子发射的基本理论。上述工作及以后的各种关于实用电子发射体即阴极的至今不衰的大量研究,提供了方便的、具有足够电流的自由电子及电子束源,使电子束的研究不单具有理论意义,而且发展成为一门重要的实用技术。

自由离子的研究与发现与气体放电的研究密切相关。早在1802年,彼特洛夫便发现了碳电极间的电弧现象。到19世纪中叶,人们已观察到稀薄气体中的辉光放电、弧光放电及火花

放电等多种放电形式。卡文迪什实验室汤姆森领导下的小组,尤其是汤森德(Townsend)和罗果夫斯基的关于电子繁流放电发展的理论工作,对继后的气体放电过程的研究起了奠基的作用。1913~1914年,弗兰克(Franck)和赫兹(Hertz)关于气体电离电位和激发电位的研究,将放电过程与原子物理结合起来。1923年,朗缪尔提出了气体放电等离子体的概念及其探针实验方法。气体放电和等离子体的研究为应用最为广泛的等离子体离子源的研究及研制奠定了基础。此外,1923年,朗缪尔等最初观察到的表面电离现象、同年萨哈(Saha)对热电离的研究、后来弥勒等(Mueller与Gomer)对场电离与场蒸发的研究,都对离子源和离子束技术的发展起到了推动作用。

研究自由电子在恒定和似稳的电磁场中运动规律的电子光学大约起源于20年代。1925年德布罗意提出“物质波”概念,1926年戴维孙(Davison)与革末(Germer)关于电子衍射的实验。上述研究揭示出了电子运动的二象性及其与光线传播规律的相似性。一年以后,在1927年,布希(H. Busch)研究了电子在具有旋转对称性的螺线管的磁场中的运动,并提出了电子轨迹可用几何光学的术语“焦距”来描述,将实物粒子的运动与光线的传播具体联系起来。不久,克诺尔(Knoll)通过实验证实了布许关于这种磁场的透镜性质的思想,并在1932年和鲁斯卡(Ruska)应用这种磁透镜构造了第一台电子显微镜。1934年,布鲁赫(Brueche)及合作者研制并使用了静电电子透镜。有关高真空技术和热电子发射阴极的技术进展,促进了电子显微镜和电子束管的研制与进展。30年代中期以后,电子显微镜的分辨率已超过了光学显微镜。1936年,缪勒等人研制了场发射电子显微镜,以及50年代他们进一步研制的场离子显微镜,可以用于拍摄金属表面的高倍率像甚至原子图像。阴极射线管(电子束管)的电子源改为热电子发射阴极,并应用了电子光学原理加以改进后,成为电信号波形研究的有效工具;以后并出现了电视摄像显像管、雷达显示管及电子像变换器等一系列电子束器件。

尽管30年代电子光学仪器及器件的研制取得了重大成功,但其电子图像的分辨率还远远达不到理论预测的水平。除了当时工艺技术条件方面的限制外,主要的实质性限制是电子光学像差,这实际上是带电粒子运动轨迹的非线性问题。对像差的研究,以格拉泽(W. Glaser)和谢尔赤(O. Scherzer)为代表,加上以后斯塔拉克(Sturrock)和洛斯(Rose)等学者的基础性研究工作,建立了电子光学像差的基本理论。这些理论标志着电子光学已发展成熟为一门系统的技术物理学科。电子显微镜、电子束管等仪器与器件得到了系统的理论指导,发展非常迅速。值得提出的重大发展,包括50年代初,麦克马兰(McMullan)在奥特勒(Oatley)指导下最先研制的扫描电子显微镜,60年代中叶出现的电子束曝光机,80年代出现的扫描隧道显微镜、真空微电子器件及与之相关的微电子束技术等等,都具有很大的技术上的重要突破。相应的在理论方面的研究,例如在多极场展开与多极场电子光学系统的研究、渐进像差研究、像差校正的研究、高阶像差的研究、高精度扫描偏转系统的研究以及浸没物镜和曲轴宽电子束系统的研究等,都是很活跃的研究领域。鉴于高阶像差分析计算的复杂繁冗性,70年代以来,出现了利用计算机自动推演理论及演算公式的计算机代数方法;80年代以后,出现了应用新型数学理论如李代数、微分代数的分析计算方法,并用以分析计算电子及离子束系统的任意高阶像差及非线性传输性质。

几何电子光学的另一个重要领域是被称为电子棱镜的带电粒子偏转器。早在20世纪初,汤姆森和维恩(Wien)便将其用于观察带电粒子束的性状。1919年,阿斯顿(Aston)创立了带电粒子的质量分析器。1935年,马陶赫(Mattauch)和赫尔左格(Herzog)制成了双聚焦质谱仪,

这标志着用作粒子束传输导向和分析的棱镜技术的成熟发展。带电粒子棱镜很快在质谱仪、二次离子谱仪、光电子谱仪和俄歇(Auger)谱仪等微分析和表面分析仪器,以及各种核粒子谱仪及加速器束引导器中获得了广泛应用。近来,还涌现了很多新型分析技术如射频四极场质谱、飞行时间质谱、电子自旋谱等等。

在解决了很多工艺技术问题以后,电子显微镜受限于像差的分辨率已提高到接近于理论分辨率。对电子显微镜中电子与样品物质的相互作用、晶体的电子衍射、电子图像的形成和处理等问题的进一步研究,促进了波动电子光学的发展。实际上,在格拉斐 1952 的经典著作^[25]中,已建立了自由电子运动的波动力学原理。70 年代以来,波动电子光学理论和电子显微镜图像的计算机处理方法研究的工作均有重大进展,为电子显微学莫立了更为坚实的理论基础。在信息光学进展的影响下,特别是在 1956 年莫仑斯特德(Moellenstedt)和敦克(Dueker)发明的静电双电子棱镜(biprism)及具有良好相干性能的场发射电子枪电子源出现以后,电子束干涉与电子束全息技术已取得了很多成果,离轴的电子全息图像已达到了原子级分辨率。

在几何电子和离子光学中,电子及离子的运动是按单个粒子做动力学研究的。在第二次世界大战期间及战后 50 年代以来,微波电子管如速调管、行波管等取得了很大的发展。在这些器件中,都要利用电流足够大的所谓强流电子束。在强流电子束中,束内电子相互间的作用即空间电荷散焦作用已成为束的聚焦和传输的主要问题。在这期间,以研究形成及维持(传输)具有足够电流的强流电子束为主要内容的强流电子光学或空间电荷光学得到了很快的发展。在很多研究工作中,强流束被看作具有电子空间电荷的流体。在对加速电场和交叉电磁场中的空间电荷流研究的基础上,建立了直线流电子枪(皮尔斯枪)和磁控电子枪(金诺枪)的理论,推动了实用强流电子枪的发展。同时,还出现了更一般的曲线空间电荷流及各种束聚焦,包括周期场聚焦的理论与设计计算方法。1931 年,由阿尔文(Alfvén)、并在 1959 年由劳孙(Lawson)进一步研讨了带电粒子束传播的极限电流问题;1971 年,波格丹克维奇(Bogdankevich)与鲁克哈泽(Rukhadze)导出了相对论电子束在漂移管传播的极限电流。在 60 年代以来,用于自由电子激光、回旋管及各种储存环和加速器对加速电压特高、脉冲电流特大的强流电子束与离子束提出了很高的要求,推动了有关的脉冲相对论电子束理论与实验研究工作的进展。

高能粒子加速器是另一个应用带电粒子束的重要领域。在以加速器为代表的高能束系统中,要求带电粒子束在很长的范围内,甚至在闭合的轨道上运动很多圈后仍保持一定的横向形态,这就要求研究束的束流传输问题。早在 20~30 年代,与加速器本身的发展相同步,电子光学就扩展到束流传输领域,形成了高能束粒子动力学。电子束和离子束是运动的大量带电粒子的群体,这些粒子的热运动自然影响着束的整体性质。在束的整体统计性质研究中,在高能束流传输研究中,广泛使用了相空间动力学的方法。在 40~50 年代,恩格(Enge)、布朗(Brown)和沃尔尼克(Wollnik)等学者建立了有关的一阶及二阶传递函数的理论。1958~1960 年,库朗特(Courant)、斯特勒布(Streib)等开发和发展的有关概念与数学的处理方法。60 年代以来,束流传输理论已建立了较完整的体系,成功地指导了加速器及各种谱仪和离子束装置的设计和研制工作。

束流传输的相空间动力学和相图理论并不是完整的统计理论,对带电粒子束统计性质的较完整的数学理论是符拉索夫(Vlasov)在 1945 年开创的。符拉索夫将统计力学的刘维定理、麦克斯韦方程与粒子运动动力学方程集成在一个自洽的粒子束理论模型里,这一模型在今

仍是电子束与离子束理论分析的有力工具。1959年,卡普钦斯基(Kapchinsky)与符拉基米尔斯基(Vladimirsky)得出了符拉索夫方程的一个特殊解析解,即K-V分布。带电粒子的统计力学研究和等离子体理论密切相联系,戴维孙(Davidson)和克拉尔(Krall)等人^[4,5]将带电粒子束看作非中性等离子体进行了系统的理论处理。带电粒子的统计动力学研究至今是电子束和离子束物理研究的重要课题。

1954年,玻尔希(Boersch)通过实验研究发现了以他名字命名的电子束中电子能量发散的反常增宽效应。继后的研究证实,这一效应来自束中电子间的随机库仑的相互作用,这是宏观空间电荷效应的一种起伏效应。以后还发现了其他类型的起伏效应,它们不单具有重要理论意义,而且造成了对束性质的一些原理性限制。这些统计的起伏效应,在统计力学里与玻耳兹曼方程的碰撞积分项相联系。70到80年代,洛斯(Rose)、克劳尔(Knauer)、齐默尔曼(Zimmermann)和简森(Janson)等分别提出了理论解释和计算方法。本书作者也提出了一个统计动力学理论,导出了描述这一效应的法卡尔-普朗克(Fokker-Planck)方程及其近似解析解。带电粒子束系统的非平衡态和起伏现象的理论和计算方法研究,与多种理论及实用技术问题有关,是现代电子离子束物理的重要研究课题之一。

应用电子束产生高功率的各种波段的电磁辐射,是电子束最重要的技术应用之一,也是自由电子器件相对于固态电子器件的主要特色。与其对立的一面则是应用电磁场力使带电粒子加速。本书主要围绕前者对应的束物理问题,来讨论电子束中的波动及辐射现象。

通过经典电磁理论中对运动电荷的场的研究,使人们很早就认识到,有加速度运动的自由电子产生电磁辐射,即轫制辐射的现象,及电磁波投射在自由电子上时,产生散射的辐射场(汤姆森散射场)的辐射现象。1934年,切伦可夫(Cerenkov)发现了自由电子运动速度超过周围介质中光速时产生的以他命名的辐射。1946年,金兹伯格(Ginzberg)和弗朗克(Franc)提出并研究了渡越辐射现象,即自由电子从一个介质过渡到另一介质时产生的电磁辐射。1953年,史密斯(Smith)和普塞耳(Purcell)发现了自由电子在光栅附近运动时产生的辐射。1976年,库尔马霍夫(Kurmahov)发现电子沿晶体沟道运动时的沟道辐射。80年代初以来,还进一步研究了强相对论性电子的尾(辐射)场(wake field)效应及其在加速器技术的可能应用。这些辐射效应都是非相干的自发辐射,通过理论和技术研究,这些效应可能被用来产生或放大相干的电磁波。除了这些单个自由电子的效应外,在第二次世界大战时期及战后,由于雷达、导航、通信、电视、电子对抗以及加速器技术等对高功率微波源及放大器的需求,大大促进了对微波电子管的研究。对微波管中电子束和电磁波相互作用的研究,导致了一系列的有关自由电子与波作用的群体效应的研究与发现。1939年,哈恩(Hahn)和拉莫(Ramo)在速调管研究中最先提出了电子束中的空间电荷波。1958年,特韦斯(Twiss)提出了电子回旋受激辐射的概念,继后有关回旋波和同步波的理论 and 实验研究得到了很大发展。1949年,阿希也泽尔(Ahiyezer)和费恩伯格(Fainberg)等最先通过理论研究,继后(1960年)实验发现了电子束-等离子体系统的不稳定性,开创了等离子体电子学的研究。电子束实际上可视为一种非中性等离子体。利用前述的各种带电粒子束中辐射现象的原理以及电子束的电磁波,传输线路的电磁波以及等离子体的电磁波相互耦合和作用现象,包括非线性相互作用现象的研究,已成为微波电子管、毫米波、亚毫米波及光波放大器与信号源包括奥罗管(Oratron)、回旋管(Gyrotron)和自由电子激光器(Free Electron Laser)等重要器件的主要理论基础之一。

同时,有关强流相对论带电粒子束的研究,及其波动与辐射现象的研究,也促进了各种新

型加速器的研究,出现了等离子体集体加速原理、尾场加速原理以及利用强流电子束的空间电荷波和回旋波加速原理的新型加速器。等离子体加热、带电粒子束惯性约束聚变,与带电粒子束武器等新兴技术的研究也取得了引人注目的进展,并可能发展为重要的实用技术。

1.3 电子源

虽然本书主要内容是关于电子束和离子束的研究,但对典型且常用的自由电子和离子源的基本原理和这些源给出的自由电子或离子的性能作一简要介绍,将有助于对本书的学习与理解。

现代电子束技术中广泛使用的电子源主要有两种情况:第一种从固体中发射出(自由)电子;第二种则是从等离子体中引出电子。从固体中发射电子的源按原理分也有许多类型,常用的是热(电子)发射和场致(电子)发射两种^[16~19]。

在凝聚态(固态和液态)的各种物质表面附近,体内的电子通常要受到一定力场的约束,不能脱离固体表面。或者说,存在着一个表面势垒,固体内电子必须具有高于这一势垒的运动能量,才可能逸出表面成为自由电子。为使固体内的一个电子克服此势垒必须具备的最小能量,称为逸出功。常见的电子发射体的逸出功见表 1.3.1。在固体内部,由于原子或离子互相靠近,形成微观的力场和势阱,体内电子的运动状态是量子化的,全体体内电子组成的系统,其能量分布服从费米-狄拉克分布。

表 1.3.1 一些物质的电子发射性质

| 材料 | 逸出功/eV | 发射常数 $A/\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ |
|-------------------------------|---------|---|
| 钨(多晶) | 4.52 | 75 |
| 钼 | 4.24 | 51 |
| 铌 | 4.01 | 30 |
| 铯 | 4.74 | 52 |
| 钍—钨阴极 | 2.6~2.7 | |
| 钡—钨阴极 | 1.7~2.0 | |
| 氧化物阴极(Ba, Sr, Ca)O | 1.0~1.2 | |
| 氧化钇(Y_2O_3) | 2.2 | 274 |
| 碳化锆(ZrC) | 3.8 | 134 |
| 硼化镧(LaB_6) | 2.68 | 73 |
| 钨酸盐阴极 | 1.43 | 3.52 |
| 铂 | 5.65 | 32 |
| 铯 | 5.27 | |
| 钨单晶[111] | 4.4 | 35 |
| [310] | 4.35 | |
| [100] | 4.59 | |
| [112] | 4.69 | 125 |
| [116] | 4.30 | 53 |
| 硅 | 4.85 | 1 685 |

$$dn = \frac{C\sqrt{E}dE}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (1.3.1)$$

式中： E 为电子能量； E_F 为费米能级能量； k 为玻耳兹曼常数； T 为固体电子体系的(绝对)温度。图 1.3.1 为金属中“自由”电子能的量分布示意图。

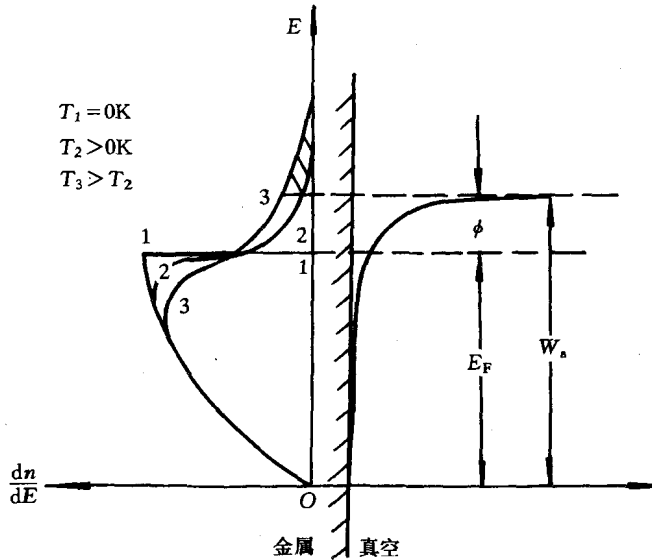


图 1.3.1 金属的表面势垒和内部电子的能量分布

当固体(阴极)受到加热,其内部电子体系温度升高后,如图 1.3.1 所示,在电子能量分布的上端尾部,有一部分电子的能量高于表面势垒而可能超越势垒逸出,这就是热电子发射。显然,热电子发射出的电子数量取决于阴极的温度和逸出功,温度越高,逸出功越低,则发射电流密度越大。定量的分析可得出,热电子发射电流密度 j 为

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right) \quad (1.3.2)$$

(1.3.2)式称为理查森-道舒曼(Richardson-Dushman)公式,其中 ϕ 为逸出功, A 称为发射常数(见表 1.3.1)。在各种密封的电子管中,常用的氧化物阴极具有很低的逸出功,因而使用它可在较低的工作温度(约 1050 K)和较小的加热功耗下获得足够大的发射电流密度,尤其是获得很大的脉冲发射电流密度。但是,这种阴极有复杂的激活过程,其抗中毒及抗离子轰击能力均较差,不能应用在各种具有动态真空系统及较差的真空环境的电子束仪器与装置中。氧化物阴极的一些技术改进形式,如浸渍式钨钨阴极、钨酸盐浸渍阴极等在一定程度上克服了氧化物阴极的一些缺点,抗中毒能力较强,能提供较大的直流发射电流密度,而且工作寿命较长。但在使用动态真空系统的电子光学仪器与装置里,一般采用金属钨和硼化镧阴极。钨阴极发射稳定,可以工作在可拆卸的真空系统里,使用流程中可暴露于大气中;但它的逸出功高,因而工作温度相当高(2500~2700 K),加热功耗较大,而且受限于高温下钨的蒸发而使用寿命较短。

硼化镧是一种新型的优良热发射体,它也可工作于可拆卸动态真空系统中,但工作温度(1700~1850 K)和加热功耗均比钨阴极低得多,而且工作寿命较长。

热发射电子来源于固体内电子的费米分布的高端尾部,这一尾部的分布已近于经典的麦克斯韦分布。理论分析与实测均证实,热发射电子的初始横向动量分布为麦克斯韦分布,纵向动量为半麦克斯韦分布

$$dn = \frac{2}{h^3} \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) \exp\left[-\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2mkT}\right] dp_x dp_y dp_z \quad (1.3.3)$$

式中: m 为电子的质量; h 为普朗克常数; p_x, p_y, p_z 则代表初始动量的各分量。这意味着热发射电子的初始能量和速率也是麦克斯韦分布,而初始运动方向或发射方向按角度的分布则为余弦分布

$$dn = CE \exp\left(-\frac{E + \phi}{kT}\right) \cos\gamma d\Omega dE \quad (1.3.4)$$

式中: E 为发射电子的动能; γ 为发射方向与表面法线的夹角; $d\Omega$ 为立体角元,与(1.3.4)式分布对应的平均能量 \bar{E} 及能量分散(半峰值全宽度) ΔE 为

$$\bar{E} = 2kT \quad (1.3.5)$$

$$\Delta E = \sqrt{2}kT \quad (1.3.6)$$

应用较多的另一种电子发射形式是场致电子发射。近年来,场致电子发射由于能够提供很高的发射电流密度且无加热功耗,所以能应用于真空微电子系统,而很受注目。当导体表面有足够强的加速电场时,导体表面势垒将减窄,如图1.3.2所示。导带的电子将由于量子力学隧道效应而由隧道贯穿逸出,这就是场致电子发射。根据简化的理论,场致发射电子电流密度可表示为

$$j = j_0 \frac{\pi p}{\sin(\pi p)} \quad (1.3.7)$$

其中

$$j_0 = Bd^2 \exp\left(-\frac{b\phi}{d}\right) \quad (1.3.8)$$

$$B = 4\pi emh^{-3}, \quad p = \frac{kT}{d}, \quad b = \frac{2v}{3t} \quad (1.3.9)$$

$$d = \frac{ehE}{\pi t} \sqrt{em\phi} \quad (1.3.10)$$

在(1.3.7)~(1.3.10)式中, j_0 为绝对零度时的场发射电流密度, E 为加速电场强度, ϕ 仍为逸出功, T 仍为阴极温度。 v 和 t 是两个辅助参量即富勒-诺尔德海姆(Fowler-Nordheim)计算系数。当场强不是很强时,可近似取 $t \approx 1.0, v \approx 0.6$ 。由于场发射电子多数不是从能量分布的拖尾部,而是从费米能级附近发出的,因此场发射电子的能量分散比热发射电子要小得

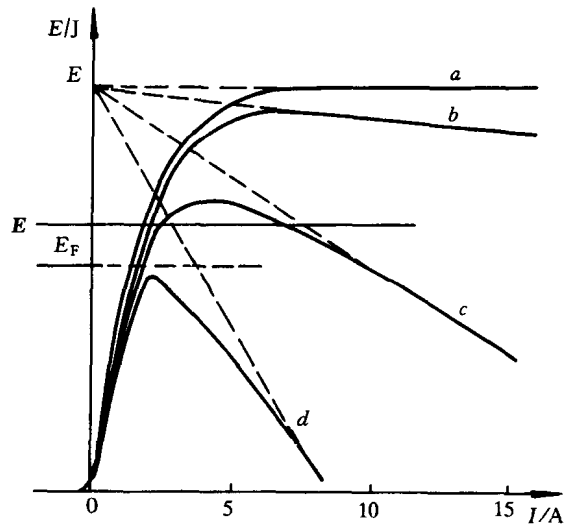


图1.3.2 场致电子发射隧道效应贯穿逸出过程示意图