



华夏英才基金学术文库

谢文楷 著


带电粒子束的理论与设计



科学出版社

www.sciencep.com

21
3

 华夏英才基金学术文库

带电粒子束的理论与设计

谢文楷 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以新的视角阐释和总结了带电粒子束的基本理论,包括带电粒子动力学基础、带电粒子光学、空间电荷流线性束理论、带电粒子束的自洽理论、等离子体中的带电粒子束、强流电子枪、高功率脉冲电子和离子二极管等;较系统地阐述了带电粒子束的产生、成形和传输的基本理论;较深入地叙述了等离子体中的带电粒子束的物理和技术问题;同时给出典型带电粒子束器件和系统的理论设计方法。本书选材精炼、数据可靠、数学推导简明,物理阐述翔实,反映了带电粒子束物理的新进展和学术成果。

本书可作为从事电子科学与技术、物理学等学科领域,尤其是物理电子学、等离子体物理及加速器物理等相关专业的科研人员和工程技术人员的参考书,也可供以上专业的研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

带电粒子束的理论与设计 / 谢文楷著. —北京:科学出版社,2009
(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-023186-4

I. 带… II. 谢… III. 带电粒子—粒子束—研究 IV. TL501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 159630 号

责任编辑:余 丁 潘继敏 / 责任校对:曾 茹

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 2 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 2 月第一次印刷 印张: 19 1/2

印数: 1—2 500 字数: 381 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

带电粒子束包括电子束和离子束,是近代物理的重要研究领域,也是信息科学及相关工程技术的重要基础之一。目前带电粒子束已广泛应用于科学、工程和国民经济的许多领域。粒子加速器和储存环中的带电粒子束,是认识物质微观结构,尤其是基本粒子的构造与性质的有力武器;多种多样的电子显微镜已经成为了解材料和生物样品构造及其表面结构的最重要的工具;各种微波电子管(行波管、速调管、磁控管等)和自由电子器件可以产生或放大相干电磁波辐射,为开拓和占领电磁频谱做出了很大贡献。

带电粒子束物理的深入研究及带电粒子束应用的不断推动,使带电粒子束理论得到了长足的发展。表现为已有理论方法的不断完善,同时新的理论方法也应运而生。

随着电子显微镜、显像管、摄像管、阴极射线示波管、电子像变换器等带电粒子束器件与系统的出现,发展了几何电子光学,又称弱流电子光学,以研究带电粒子束的成形、聚焦、成像、放大以及像差、色差等问题。

随着真空电子管,尤其是行波管、速调管、磁控管等微波电子管的出现,发展了空间电荷流光学,又称为强流电子光学,以研究利用直线空间电荷流、曲线空间电荷流来产生、成形和传输电子束的各种强流电子枪。而新型自由电子器件,如电子回旋脉塞和回旋管的出现,又给强流电子光学带来了新的问题和更大的发展空间。

带电粒子加速器和强流脉冲相对论带电粒子束的出现,进一步发展了高能粒子动力学和束流传输理论,这需要考虑粒子的速度离散对带电粒子束整体性质的影响,相应地催生了相空间动力学及统计动力学。

强相对论电子束在高功率微波、高功率激光、离子集团加速及惯性约束聚变中有极重要的应用潜力,这使脉冲相对论带电粒子束在理论与实验两方面研究工作中都备受重视。与此同时,适量等离子体填充相对论微波器件和非相对论微波器件,都显示能提高原有器件的功率、效率和带宽,在某些情况下还能减小,甚至取消原有器件笨重的外加强磁场,这使得等离子体中的带电粒子束理论应运而生,并进而成为等离子体电子学的重要基础。

本书作者 30 年前开始涉足电子物理与器件专业的学习,一直从事微波电子学、相对论电子学和等离子体电子学的科学研究与人才培养,10 年前为电子科技大学高能电子学研究所的研究生开设了“带电粒子束物理”课程,近年来又为国内

“高功率微波理论与技术”高级培训班讲授“强流束物理”课程。国内外出版了多种电子光学或带电粒子束物理的著作,它们各有特色,对丰富和发展带电粒子束物理与技术做出了很大的贡献。然而,从科学和应用的发展来看,迫切需要一本以新的视角阐释和总结带电粒子束基本理论的著作。

带电粒子束的理论主要研究成束的自由电子和离子在电磁场中的运动规律。从物理模型和分析方法的观点来看,主要理论包括带电粒子光学、空间电荷流光学、带电粒子束的自洽理论以及新近发展起来并受到重视的等离子体中的带电粒子束理论,同时主要研究带电粒子束器件和系统的理论设计方法,典型的有带电粒子束的聚焦系统、强流电子枪以及高功率电子束和离子束二极管。它们是微波电子学、等离子体电子学以及高功率微波技术、加速器技术的重要组成部分,是近年来国际上十分活跃的研究领域。

本书共分8章。第1章,绪论;第2章,带电粒子动力学基础;第3章,带电粒子光学;第4章,空间电荷流线性束理论;第5章,带电粒子束的自洽理论;第6章,等离子体中的带电粒子束;第7章,强流电子枪;第8章,高功率脉冲电子和离子二极管。

本书的特点有:结构体系新颖,见解独到,为系统性理论著作;结合微波电子学、相对论电子学和等离子体电子学的科学研究,反映了带电粒子束物理的某些新进展和学术成果;数学推导简明,物理阐述翔实,语言表达流畅,具有可读性;选材精炼,数据可靠,理论设计方法较严密,具有可应用性。

本书系统而深入地阐述了带电粒子束的产生、成形和传输理论,较深入地叙述了等离子体中的带电粒子束的重要物理与技术问题,并给出了带电粒子束器件和系统的理论设计方法。本书可作为从事电子科学与技术、物理学等学科领域,尤其是物理电子学、等离子体物理及加速器物理等相关专业的研究人员和工程技术人员的参考书,也可供以上专业研究生选用。

作者要特别感谢在本书多年来的体系酝酿、材料遴选和写作过程中所有给以支持、鼓励和帮助的老师 and 同学们。

首先感谢电子科技大学高能电子学研究所为我提供的学习、教学和研究环境。特别要感谢刘盛纲院士、李宏福教授、倪志钧教授、林崇文研究员及高能电子学研究所的其他同仁,在我涉足电子物理与器件专业的学习中给我的鼓励和帮助,使我受益匪浅。

感谢杨中海教授、宫玉彬教授、钱光弟教授、蒙林教授、鄢杨教授、黎晓云高级工程师等对本书的提出的中肯评价和有益建议。作者与他们合作、共事多年,相互切磋,友谊难忘。

本书使用了作者及其辅导的研究生的部分研究成果。作者要感谢朱宏伟、陈

希、肖顺禄、王彬、高昕艳、陈硕、吴蕾蕾、庞晓贝、俞云华、饶疆、李貌、李阿红和谢荣祥等在带电粒子束领域的研究,特别要感谢王彬、高昕艳对绘制插图、校对文稿给予的帮助。

感谢华夏英才基金的资助。

最后也是最重要的,我要感谢我的爱妻林少辉、爱女谢晓辉、谢晓芳在本书写作和出版期间的支持和鼓励。

目 录

前言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 研究对象与主要内容	(1)
1.2 历史的发展与应用	(3)
1.3 带电粒子束源	(9)
1.4 高功率强流电子束的发射过程	(12)
1.5 束的发射度和亮度	(17)
第 2 章 带电粒子动力学基础	(22)
2.1 洛伦兹力和运动方程	(22)
2.2 洛伦兹力和运动方程的相对论形式	(25)
2.3 拉格朗日方程	(28)
2.3.1 哈密顿原理和拉格朗日方程	(28)
2.3.2 广义位和带电粒子在电磁场中运动的拉格朗日方程	(29)
2.4 哈密顿正则方程	(31)
2.4.1 广义动量与哈密顿正则方程	(31)
2.4.2 带电粒子的哈密顿量及某些守恒公式	(32)
2.5 欧拉轨迹方程	(35)
2.5.1 最小作用量原理和欧拉方程	(35)
2.5.2 在轴对称场中相对论欧拉方程	(37)
2.6 刘维尔(Liouville)定理	(37)
第 3 章 带电粒子光学	(40)
3.1 轴对称电场和磁场的级数表达	(40)
3.2 旁轴射线方程的推导	(41)
3.3 旁轴射线方程的解的一般特性	(47)
3.4 轴对称场作为透镜	(49)
3.4.1 透镜转移矩阵的普遍性质	(49)
3.4.2 像的形成和放大	(52)
3.5 静电透镜	(54)
3.6 螺线管磁透镜	(58)

3.7	透镜对迹空间椭圆和束包络的影响	(61)
第4章	空间电荷流线性束理论	(64)
4.1	考虑空间电荷的束的理论模型	(64)
4.2	漂移空间的轴对称束	(66)
4.2.1	具有均匀密度分布的层流束	(66)
4.2.2	漂移空间圆形束的发散	(70)
4.2.3	具有自身场和有限发射度的束的包络方程	(73)
4.2.4	均匀束模型的限制和极限电流	(74)
4.3	虚阴极形成与极限电流	(76)
4.4	具有外加场和自身场的轴对称束	(79)
4.4.1	具有自身场的旁轴射线方程	(79)
4.4.2	在均匀聚焦通道中的束传输	(80)
4.5	均匀磁场聚焦	(82)
4.5.1	轴对称电子束布里渊聚焦	(82)
4.5.2	屏蔽式聚焦电子束的外径波动	(86)
4.5.3	轴对称电子束非理想布里渊场过渡区中的聚焦	(87)
4.5.4	轴对称电子束部分屏蔽式聚焦	(89)
4.6	周期磁场聚焦	(92)
4.6.1	屏蔽式轴对称电子束周期磁场聚焦	(94)
4.6.2	部分屏蔽式轴对称电子束周期磁场聚焦	(97)
4.6.3	周期磁场聚焦电子束的大脉动数值计算	(99)
4.6.4	周期磁场聚焦电子束的稳定性	(101)
第5章	带电粒子束的自治理论	(103)
5.1	引言	(103)
5.2	在无限强磁场中的圆柱束	(104)
5.3	非相对论层流束平衡	(107)
5.4	相对论层流束平衡	(116)
5.5	在均匀磁场中失配层流束的分析	(122)
5.6	具有动量离散的束的伏拉索夫模型	(124)
5.7	卡普钦斯基-弗拉基米尔斯分布	(127)
5.8	麦克斯韦-玻尔兹曼分布	(131)
5.8.1	粒子和德拜鞘层之间的库仑碰撞	(131)
5.8.2	福克-普朗克方程	(134)
5.8.3	相对论粒子束的麦克斯韦-玻尔兹曼分布	(136)

第 6 章 等离子体中的带电粒子束	(140)
6.1 引言	(140)
6.2 等离子体介电张量	(142)
6.3 磁化等离子体中的电磁波	(143)
6.4 考虑电荷中和的轴对称束	(147)
6.5 电荷中和束的自聚焦	(150)
6.6 电子和离子束在几种气体中的电离截面	(151)
6.7 脉冲束电荷中和	(155)
6.7.1 电荷中和的线性束模型	(155)
6.7.2 强相对论电子束的电荷中和效应	(157)
6.8 等离子体透镜	(159)
6.9 等离子体对电子束的聚焦特性	(162)
6.9.1 均匀条件下电子束在等离子体中的传输	(162)
6.9.2 非均匀条件下磁自聚焦电子束的传输	(165)
6.10 离子通道的暂态特性	(168)
6.11 等离子体阴极电子枪	(171)
6.11.1 电子枪设计	(171)
6.11.2 电子枪实验	(174)
6.12 虚阴极振荡器	(176)
6.12.1 波导谐振腔中空间电荷极限电流	(176)
6.12.2 虚阴极时间相关行为的单荷电层分析	(183)
6.12.3 虚阴极高功率微波发生器的粒子模拟	(187)
6.13 电子束-等离子体-电磁波相互作用	(193)
6.13.1 等离子体通道中电子束的空间电荷波	(193)
6.13.2 等离子体加载波纹波导束-波相互作用的线性理论	(196)
6.13.3 等离子体加载波纹波导束-波相互作用的非线性分析	(199)
第 7 章 强流电子枪	(202)
7.1 前言	(202)
7.2 二极管中空间电荷流的流体力学模型	(204)
7.3 平行直线电子注的成形	(207)
7.4 锥形电子注的成形	(209)
7.5 低导流系数电子枪参量计算	(212)
7.6 电子热初速	(216)
7.6.1 横向热初速引起电子轨迹的偏离	(217)

7.6.2	横向热初速引起注截面上电流密度分布的不均匀	(219)
7.6.3	考虑热初速效应的低导枪设计曲线	(224)
7.7	高导强流电子枪设计	(226)
7.7.1	聚束极形状的修正和等效阳极曲率半径	(226)
7.7.2	高导电子枪(米勒枪)设计曲线	(228)
7.8	平面曲线电子注的成形	(232)
7.9	空间曲线电子注的成形	(240)
7.10	正交场中的空间电荷层流	(244)
第8章	高功率脉冲电子和离子二极管	(249)
8.1	引言	(249)
8.2	相对论查尔德-朗缪尔定律	(250)
8.3	电子在正交电磁场中的运动	(253)
8.4	箍缩电子束二极管	(258)
8.5	强外加磁场的电子束二极管	(266)
8.6	高功率传输线的磁隔离	(270)
8.7	等离子体尾融	(273)
8.8	反射三极管	(279)
8.9	低阻抗反射三极管	(283)
8.10	磁隔离离子二极管	(289)
参考文献		(298)
A.	主要参考著作	(298)
B.	主要参考期刊	(298)
C.	作者发表的与本书内容有关的部分论文	(299)

第 1 章 绪 论

1.1 研究对象与主要内容

自汤姆孙(Thomson)1897年发现了自由电子并测定出电子荷质比之后,一方面电子的基本属性,如电荷、质量、磁矩、自旋角动量、波-粒二象性等很快为人们所认识;另一方面,由于阴极射线管、电子二极管和电子三极管,以及气体放电等技术应用领域的需要,成束的带电粒子流的特性开始逐渐被人们所揭示。随着带电粒子束器件和装置的不断出现与发展,形成了带电粒子束理论这一新的学科。物理学和电子学工作者从各自领域的不同需求出发,丰富了带电粒子束的研究内容,推动了带电粒子束理论的深入发展。

带电粒子束理论,又可称为带电粒子束动力学,研究成束的自由电子及离子在电磁场中的运动规律。研究的基本问题包括:自由带电粒子在外加电场和磁场中的特性(单粒子动力学),以及当带电粒子束密度足够高,相互间的作用不可忽略时,由粒子分布和运动产生的集合场中的粒子特性(自身场效应)。气体放电和等离子体微观运动的许多方面也可归入带电粒子动力学。

原子或分子的电子壳层或晶体的周期势场(电子绕射)以及局域粒子物理(固态理论)中的自由粒子的相互作用在此范围之外。这些情况下的粒子特性由量子力学而不是由经典力学来给以描述。

电场和磁场可以是静态的,也可以是与时间相关的,粒子的动能可以是非相对论的,也可以是相对论的。一般处理粒子为经典点电荷。在本书中,一般不考虑粒子的量子力学效应,也不重点讨论加速带电粒子的电磁辐射。另外需要考虑集合效应,例如内束散射以及束粒子和气体分子之间的碰撞,这些效应在背景气体电离的电荷中和、热平衡分布的形成以及引起发射度增长中起了主要的作用。

当自身场被考虑时,带电粒子束类似于非中性等离子体,即一类特别的等离子体,这种带电粒子束具有远大于随机热速度的漂移速度,而且不满足在规则等离子体中由于相反电荷粒子引起的电中性等。带电粒子束可以认为是粒子沿直线或曲线路径运动的清晰的连续流动或群聚的流,运动方向通常定义为纵向,横向则被外加聚焦系统或由于相反电荷粒子的存在而引起的自聚焦所约束。横向速度分量和纵向速度的离散与束的平均纵向速度比较为小量。例如,在O型微波管、阴极射线管、电子显微镜和线性加速器中的直线束,在M型微波管、回旋加速器和同步加

速器中的曲线束。

本书系统地描述了带电粒子束的理论和设计。

第1章,绪论。介绍带电粒子束理论的研究对象、主要内容以及发展与应用简史;讨论典型带电粒子源的基本原理以及它对束的基本性能(导流系数、发射度、亮度等)的限制。

第2章,带电粒子动力学基础。介绍带电粒子动力学的经典方法,尤其是牛顿力学和分析力学的基本原理和公式,高速运动粒子的相对论力学;也介绍统计力学中的刘维尔定理。本书通常比其他著作中的简短讨论更为深入和广泛。

第3章,带电粒子光学。研究电磁场的分布与场的展开,带电粒子的质点动力学方程和轨迹方程。重点研究粒子运动的轨迹以及聚焦、成像、偏转和色散等与粒子及束的位形性质有关的问题。

第4章,空间电荷流线性束理论。考虑带电粒子束中各个粒子间的相互作用,在低加速电压下,以库仑相互作用力为主,在很高的加速电压下,还要考虑带电粒子运动导致的磁相互作用力。这些相互作用在束建立后会达到一种平衡状态,这时所有其他粒子对特定的某个粒子的作用可归结为一种自洽的束自身的电场和磁场,即空间电荷电场和磁场。研究自洽空间电荷场作用下带电粒子性状的学科,称为空间电荷流理论。本章使用具有线性自身场的均匀密度束模型,该模型允许我们将第3章的线性束光学推广到包括空间电荷效应的线性束动力学方程,进而讨论强流束的均匀磁场聚焦和周期磁场聚焦,导出有用的设计公式。

第5章,带电粒子束的自洽理论。以在均匀磁场中的轴对称层流束稳态平衡的非相对论描述和相对论描述作为开始来分析束的自洽问题的基本物理问题。然后,在6维相空间中刘维尔定理、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中,导出单粒子的密度分布函数随时间、空间演化的玻尔兹曼方程或统计动力学方程。对于相当多的带电粒子束,相互作用项或“碰撞”项可以近似地看做远程的平滑的自洽场处理。这时玻尔兹曼方程中的相互作用项或“碰撞”项的作用已列入自洽空间电荷场中。动力学方程简化为伏拉索夫方程,它与麦克斯韦方程一起构成描述带电粒子束的一个完整的理论体系,一般称为具有动量离散的束的伏拉索夫模型。伏拉索夫方程允许我们处理非层流束,最著名的例子是K-V分布和麦克斯韦-玻尔兹曼分布。

第6章,等离子体中的带电粒子束。它既是等离子体物理的重要研究方向,同时又是等离子体微波电子学的重要理论基础。以推导双组分粒子等离子体介电张量和等离子体-腔通道中电磁波的解析解开始,然后讨论轴对称束的电荷中和效应,特别是电荷中和的线性束模型、强相对论电子束的电荷中和,以及等离子体透镜等。此外,还叙述了一类新型低电压、高电流等离子体阴极电子枪的设计与测

试。最后讨论虚阴极振荡器和电子束-等离子体-电磁波三体相互作用。

第7章,强流电子枪。强流电子枪成形问题的综合法是设计强流电子枪的核心内容。本章较详细地分别阐述了平行直线电子注、锥形电子注、平面曲线电子注以及空间曲线电子注的成形问题的综合法。根据给定的电子轨迹求解电子注内部的电位分布;并在电子注外部求解电极形状以满足边界上的电位分布。特别是重点讨论微波电子管常用的收敛型低导电子枪,收敛型高导电子枪的设计曲线和设计方法。

第8章,高功率脉冲电子和离子二极管。本章较详细地分别讨论了与高电流注入器相关的三个背景题目:电子在正交场中的运动、高功率传输线的磁隔离、等离子体尾融。重点阐述了箍缩电子束二极管和外加强磁场的电子束二极管的物理机制。最后给出典型离子束二极管,尤其是反射三极管和磁绝缘二极管的原理。

理论对带电粒子束设计的应用贯穿全书。书中的许多公式、定律以及图形和数表可以帮助带电粒子束器件和装置的实验者和设计者。然而,本书强调的是带电粒子束的物理和理论设计。仅仅对理解束的物理或理论分析和设计有关联的重要装置的特性进行必要的讨论。

作为有电磁相互作用的大量带电粒子体系,电子束和离子束具有固有的振动和波动现象,并在一定条件下发生自发的电磁辐射。在一定的外加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重大意义。利用多种带电粒子束中辐射现象的原理以及电子束中的电磁波、传输线路的电磁波以及等离子体中的电磁波相互耦合和相互作用的现象,已成为微波电子学、相对论电子学和等离子体电子学等学科的重要理论基础,本书一般不作重点讨论。

1.2 历史的发展与应用

带电粒子束理论是近代物理的重要研究方向,也是信息科学,尤其是电子学的重要基础。其先期的孕育发展与自由电子的发现、固体电子发射基本规律以及气体放电与自由离子的研究紧紧联系在一起。1858年,普鲁歇(Pluecher)根据真空放电发现阴极射线。1883年,爱迪生(Edison)发现灼热灯丝发射带负电粒子的现象,即爱迪生效应。1891年,斯通尼(Stoney)提出了电子的名称。1897年,汤姆孙(Thomson)确定阴极射线为带负电的粒子,即电子,电子具有普遍性,并非阴极射线特有,他还测定了电子的荷质比,一般认为这标志着自由电子的发现。1906年,密立根(Millikan)测定电子的电荷,即基本电荷的量值。1927年,戴维森(Davidson)进行电子衍射实验,证明了电子射线的波动性。1923年,德布洛意(de Broglie)提出物质波概念。1925~

1927年,泡利(Pauli)和狄拉克(Dirac)提出了电子具有自旋角动量和自旋磁矩。这些工作揭示了电子的基本属性。

1914年,理查孙(Richardson)发现固体热电子发射规律。其后,维拉尔特(Wehnelt)发明了氧化物阴极,福勒(Fowler)和诺尔德海姆(Nordheim)提出了场发射理论,福勒提出了光电子发射理论。固体电子发射的基本规律的研究导致阴极电子学的产生,是自由电子和电子束源的理论基础。

另外,汤森德(Townsend)和罗果夫斯基(Rogowshki)提出了电子繁流放电理论,弗兰克(Franck)和赫兹(Hentz)研究气体电离电位和激发电位,朗缪尔(Langmuir)提出了气体放电等离子体的概念和探针实验方法,朗缪尔发现表面放电电离现象,萨哈(Saha)对热电离的研究,米勒(Müller)对场电离和场蒸发的研究。这些方面的发展导致气体电子学的产生,是自由离子和离子束源的理论基础。

历史上带电粒子动力学首次和最重要的应用领域是电子光学。电子光学的诞生可以追溯到1926年。当时,布希(Busch)证明短的轴对称磁场对电子射线的作用类似于玻璃透镜对光线的作用,提出“焦距”的概念。然后,1931~1932年,戴维森(Davidson)和卡尔布瑞克(Calbrick),布鲁赫(Brüche)和乔哈孙(Johannson)认识到这种情况对轴对称电场也是存在的。磁透镜的首次使用是克诺尔(Knoll)和鲁斯卡(Ruscka)于1931年构造了第一台电子显微镜。而电透镜的首次使用是布鲁赫(Brüche)及其合作者实现的。直到1939年,由于强有力的工业需要,尤其是电子显微镜、阴极射线管和电视的激励,电子光学经历了迅速的发展。这一发展势头持续于第二次世界大战中,由于战争的需要,雷达用阴极射线管、红外摄影的像变换管等一系列电子束器件,使几何电子光学受到新的推动。格拉泽(Glaser)、谢尔赤(Scherzer)以及斯塔拉克(Sturrock)建立了电子光学像差的基本理论,处理带电粒子运动轨迹的非线性问题。开展的理论研究工作还包括多极场展开与多极场电子光学系统的研究、渐进像差研究、像差校正研究、高阶像差研究、高精度扫描偏转系统研究、浸没物镜及曲轴宽电子束系统的研究、带电粒子的电子棱镜偏转器的研究等。同时发展了利用计算机自动推理理论及演算公式的计算机代数方法、应用李代数、微分代数的分析计算方法等电子光学计算方法。

在波动电子光学方面,典型的工作包括:格拉泽(Glaser)建立了自由电子运动的波动力学原理,莫伦斯特德(Moellenstedt)和敦克(Dueker)发明了静电双电子棱镜及具有良好相干性能的场发射电子枪电子源,以及电子束干涉及电子束全息技术等。

电子学的发展正方兴未艾。1904年,弗莱明(Fleming)发明了作为检波器的二极管,这是电子管出现的开始。1906年,特福雷斯特(Forest)发明了三极电子管,诞生了非线性有源器件,开启了无线电电子学的新时代。此后的20年间,以静电控制的普通电子管为标志,无线电波的波长在1m以上。栅极静电控制的普通电子管

在更高频率时,不再具有放大作用。这种限制主要表现在两个方面,一是电子的惯性变得不可忽略,也就是使电子在电极之间的渡越时间和高频周期可以相比拟了;二是电极本身及其引线的分布阻抗和外电路的阻抗也变得可以比较了。因此需要提出新的原理。1938~1948年,这10年间由于战争的需要,引起科学技术上的一系列突破。在电子学方面,最重要的是出现了以动态控制的微波电子管,微波电子学则应运而生。由于微波的突破而出现了雷达、通信、电子对抗等技术领域。

第二次世界大战中,各国在极度保密的情况下积极研制可供雷达用的微波管。1939年,兰德尔(Randel)和波特(Boot)研制出微波大功率振荡器——多腔磁控管,使雷达在1943年达到了实用化程度。由它派生出电压调谐磁控管、泊管、同轴磁控管等正交场微波器件。同年,瓦里安(Varian)兄弟研制双腔速调管,用于早期的脉冲雷达发射机。此后发展了反射速调管和多腔速调管,围绕提高功率,展宽频带进行了许多理论和实验研究。速调管和磁控管中的微波电路都是谐振腔型,有一个共同的特点:瞬时频带很窄。1943年,康福纳尔(Kampfner)发现用行波电磁场和电子注相互作用也能对微波电磁场放大的行波管放大器工作原理,研制了第一只行波管,工作频率3.5GHz,工作电压1830V,电流0.18mA。1946年,贝尔实验室的皮尔斯(Pierce)等研制螺旋线行波管。标准电话和电缆公司的罗杰斯(Rogers)研制第一批付之使用的行波管,中心频率4GHz,带宽20%,功率2W,增益25dB。1948~1950年,皮尔斯对行波管理论作出详细的论述,构成了行波管设计的理论基础之一。由于宽频带和大功率的要求,行波管由螺旋线中小功率行波管、返波管发展到大功率耦合腔行波管。以“动态控制”原理为基础迅速发展的微波管大体上分成两类:O型器件和M型器件。O型器件和M型器件名称的来源取自法文TPO(Tube's \dot{o} propagating des Onders)和TMOM(Tubés \dot{o} propagating des ondes \dot{o} champs Magnetique)的字母O和M,原意是行波管及磁控的行波管,是行波管的分类,后来这个词被推广,将速调管也包括进O型管,磁控管等称为M型管。按一般习惯,速调管、行波管、返波管等属于O型器件,其特点是电子束的横方向没有静电磁场,也称线性注管或直型管。M型器件是指磁控管、泊管、前向波放大器等,其特点是直流电场和磁场互相垂直,而且又与电子束方向垂直,所以称为交叉场器件。

正交场管、速调管、行波管是三种重要的动态控制微波电子管,它们已使电磁波谱扩展到分米波和厘米波(甚至毫米波),脉冲功率达到几百兆瓦,对进一步发展雷达、通信、电子对抗和空间科学起着巨大的作用。强流电子枪是微波电子管的重要组成部分,用来形成具有一定几何形状、电子能量和电流强度的定向电子束。这方面研究的目的是在空间电荷自身场作用下形成并维持(传输)具有足够电流的强流电子束,包括对加速电场和交叉电磁场中的空间电荷流、直线流通电子枪(皮尔

斯枪)、磁控电子枪(Kino 枪),更一般的曲线空间电荷流、多种束聚焦(包括周期场聚焦)、二极管的空间电荷限制发射、漂移空间束流传输的极限电流等的研究。这些方面的研究导致强流电子光学或空间电荷流理论的发展,对带电粒子束动力学的发展起到了极大的推动作用。

另一个推动带电粒子束动力学发展的重要因素来自高能粒子加速器的开发。这一发展过程起源于一系列加速器的发明和诞生,如 1928 年的电子加速器、1930 年的线性加速器、1931 年的回旋加速器以及 1931~1932 年的静电加速器等。现在,粒子加速器中的束动力学已成为带电粒子动力学的一个主要分支。电子和离子光学扩展到包括环形加速器中的束聚焦,诸如四极透镜、扇形磁场边缘聚焦、交替倾斜度聚焦等新型聚焦系统相继被发明,导致开发出稳定增加能量和改善装置特性的加速器。粒子动力学的新兴趣也来自于空间科学、电子-离子束装置的工业应用(焊接、微机械、离子注入、带电粒子束平板印刷术)以及可控热核聚变。

1965~1975 年这 10 年间,开发了两种产生高峰值功率和短脉冲长度电子束的新型加速器,它们是强流脉冲电子束加速器(相对论二极管)和线性感应加速器。前者产生强流相对论电子束(IREB),峰值电流从千安培到兆安培,能量从几百 keV 到 10MeV。当短的高电压脉冲从所谓 Marx 发生器或脉冲形成线加于二极管上时,产生如上所述参量的强流电子束。相应的高电场引起阴极的场发射和等离子体形成。等离子体膨胀导致间隙闭合,它反过来限制脉冲宽度在 10~100ns。这些脉冲功率 IREB 发生器已经得到广泛应用。例如,X-射线源,正离子被强流电子束关联的电场的集合加速,以及高功率微波(high power microwave, HPM)发生器和自由电子激光(free electron laser, FEL)。更新的脉冲二极管开发目标是产生聚变研究所需要的高功率粒子束。

类似于电子加速器,线性感应加速器使用磁芯中时变流产生的感应电场,这些电场加在序列间隙上以加速脉冲带电粒子束。带电粒子仅在磁流变化的时间间隙内渡越间隙,因此电压下垂穿过间隙出现。与射频谐振加速器比较,感应加速器可以加速非常高的峰值电流,其范围典型的从几百安培到几千安培。这类加速器最大的是在劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的“ATA”,它加速 10kA、70ns 电子束到 47MeV 能量。原则上感应加速器加速相对短的电子束(10~100ns),目前已用于电子和离子束的长脉冲(μ s)。长脉冲的最好例子是在劳伦斯·伯克利实验室开发的离子感应线性加速器,设计用于加速高电流重离子束,使用它们的目的是作为驱动器——类似于激光器——以便点火未来聚变反应器中的燃料小丸。重离子聚变驱动系统将需要重离子(质量数 >100)束电流在 20~30kA 之间,能量在 5~10GeV 之间以及脉冲长度大约 10ns。

传统的射频线性加速器也在开发高功率应用。例如,重离子聚变、高能物理的

电子-质子线性对撞机以及其他目的。1970年,由卡普钦斯基(Kapchinsky)和特普里亚科夫(Teplyakov)发明的低能射频四极(RFQ)加速器已使离子束射频加速器取得革命性进展。今天全世界的主要实验室和工业应用的所有射频加速器均使用RFQ作为注入器。

带电粒子束动力学的另一个当前发展包括使用强流相对论电子束作为更高频率的电磁辐射源。在高频区域微波电子管用来选择振荡频率的高频结构(谐振腔)的尺寸是与它所产生的辐射的波长同数量级的。要想产生更高频率的相干辐射,沿用同样的概念,不断缩小高频结构(谐振腔)的尺寸在光频段遇到不可克服的困难。因此寻求新途径来产生更高频率的相干辐射就成为电子学的重要课题,从20世纪五六十年代开始,在向短毫米波、亚毫米波推进时,人们就在寻求新的工作原理。其中,自由电子回旋谐振受激辐射,自由电子和电磁波碰撞时引起受激散射,自由电子沿光栅表面运动时引起的绕射辐射以及相对论切仑科夫辐射等,可能是最重要的。在这些新的物理原理中,相对论效应起着非常重要的作用。而当波长进一步缩短时,量子效应也可能会起重要作用。在这些物理机理研究的基础上导致许多新型短毫米波、亚毫米波器件的产生。

1958年,特威斯(Twiss)发现相对论性自由电子在磁场作用下的回旋辐射,可以对电磁波产生放大作用。1959年,施耐德(Schneider)和卡巴诺夫(Gaponov)分别用量子理论和经典方法,独立地计算出了相对论性自由电子在磁场中的受激辐射。1964年,赫希菲尔德(Hichfield)用实验证实了这些理论,并将相应器件正式命名为电子回旋脉塞(electron cyclotron maser, ECM)。根据真空电子器件命名惯例,通常又称为回旋管(gyrottron)。

早在1951年,莫茨(Motz)和拉卡马拉(Nakamana)预言相对论性自由电子进入交错安排的磁场(称为Wiggler或Undulator磁场),可以使信号电磁波得到放大。1960年,菲利普(Phillips)设计了一种被称为Ubitron的装置,把弱相对论性电子注入波导腔,在Wiggler磁场和纵向导引磁场作用下产生电磁辐射。1971年,麦迪(Madey)系统地研究了相对论性自由电子进入Wiggler磁场的自发辐射和有光学谐振腔情况下的受激辐射,并正式命名为自由电子激光(free electron laser, FEL)。1976年,埃利斯(Elias)和麦迪(Madey)等用加速器产生的高能量低密度电子束,成功地验证了自由电子激光原理。1984年,奥特格(Ortege)及埃利米(Elleauime)等利用储存环中的强相对论电子注作成自由电子激光振荡器,工作在 $0.6\mu\text{m}$ 的可见光波长。从此自由电子激光器得到了人们的确认和关注。

上述两个基于相对论性电子注的研究主流,即回旋脉塞和回旋管,以及包括自由电子激光器在内的受激相干散射,已经发展成为电子学的一个重要的新领域,即高能电子学或称为相对论电子学,这个领域所表现的活跃程度和潜力引起电子学