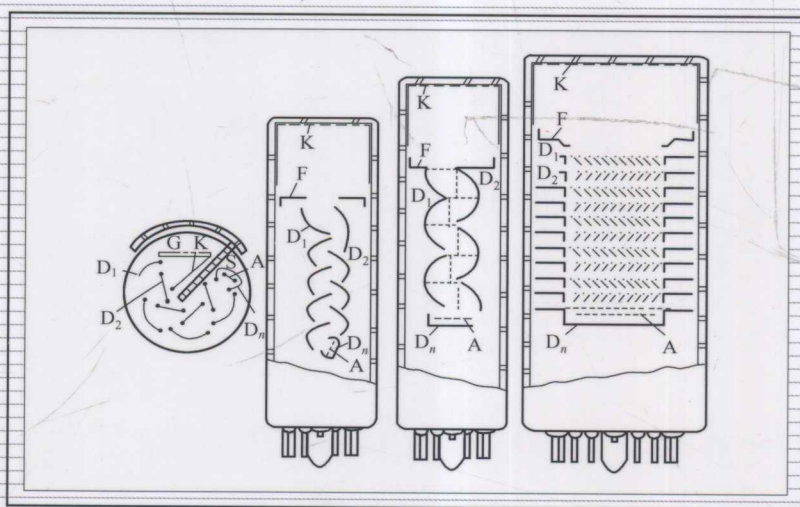


真空电子器件

Vacuum Electronic Devices

王文祥 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

真空电子器件

王文祥 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书对各类真空电子器件进行了全面的、基础性的介绍。部分应用领域已经被其他新技术所取代的一些真空电子器件,书中也对其目前应用情况及替代技术作了简单的介绍。

全书共分10章。第1章是真空电子器件基础,简单介绍了各种电子发射原理和相应的阴极,弱流电子光学基础知识;第2章是普通电子管,其中涉及到真空电子器件的一些基本概念;第3章至第5章讨论微波电子管,包括微波管基础知识、传统微波管和相对论新型微波管,这部分内容是本书的重点;第6章讨论电子束管,目前仍有部分电子束管发挥着重要作用,电子束的其他应用也十分广泛,这些内容在本章中作了相应介绍;第7章是光电器件,主要介绍光电倍增管和像管的工作原理及应用情况;第8章是气体放电管,主要讨论气体放电的物理过程,因为这不仅是放电管,也是电光源和计数管、天线开关管的工作基础;第9章全面介绍了各种电光源;最后一章补充介绍了其他一些真空电子器件,如天线开关管、计数管、X射线管和真空开关管。

本书可以作为物理电子学、真空电子技术及电子科学与技术和其他相关专业的本科生的专业课教材,也可以作为在真空电子器件领域相关工厂、研究所工作的工程技术人员,以及应用这些器件的有关人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

真空电子器件 / 王文祥编著. —北京:国防工业出版社,2012.9
ISBN 978-7-118-08312-5

I. ①真... II. ①王... III. ①电真空器件-基本知识
IV. ①TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第219402号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 26 1/4 字数 656 千字

2012年9月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 52.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776

发行业务:(010)88540717

前 言

自 1879 年爱迪生发明白炽灯泡以来,真空电子器件经历了 100 多年的辉煌发展时期,1906 年三极管的发明,更是开创了人类技术革命的新纪元,使人类的生产和生活进入了电子时代。但是,随着科学技术的发展,固体电子器件自 20 世纪中叶开始以更快的发展速度崛起,而且很快在众多应用领域取代了真空电子器件。然而,即便如此,真空电子器件仍然在相当广泛的领域应用,特别是在一些有特殊功能要求的领域中发挥着无可替代的作用,比如高频率大功率微波管、电子光学仪器和加工设备、光电倍增器件、电光源、X 射线管、计数管等。可以说,在今后相当长一段历史时期内,真空电子器件与固体电子器件必然会在各自的优势领域继续发展,互相补充、互相依存,以致互相渗透、互相结合,发展出更高、更新的技术学科。

遗憾的是,随着大批从事真空电子技术的专业研究人员纷纷转向固体电子器件领域的同时,对真空电子器件人才的培养也日趋萎缩;然而,真空电子器件仍然有大量应用需求,特别是国防电子装备的需求。这种应用需求与人才短缺的矛盾日益突出和严重,正因为如此,真空电子技术人才培养成为了当务之急。

为了适应这种形势需要,我校成立了真空电子技术(电子科学与技术)系,以期缓解真空电子器件人才青黄不接的矛盾。

但专业建立后面临的一大问题是对口教材的缺失。由于国内已 30 多年没有相应的专业设置,因此诸如真空电子器件、阴极电子学、电子光学等专业教材都只有 20 多年、甚至三四十年的老教材,远远不能适应现在的专业需求,本书正是在这种背景下编写出版,作为真空电子技术(电子科学与技术)专业学生用的一本教材。

本书包括 10 章。第 1 章为真空电子器件的基础知识;第 2 章介绍普通电子管,由于这类管子大部分已为固体器件所替代,所以该章内容仅作简要介绍;第 3~5 章讨论微波管,这部分内容与“微波管原理”课程内容基本类同,为了本书内容的完整性与系统性,也为了使没有选修“微波管原理”课程的同学对真空电子器件有一个全面了解,所以本书保留了这部分内容;第 6 章是电子束管,这类真空电子器件也已在相当程度为固体器件所取代,所以在该章中增加了作为电子束管特殊形式的电子光学仪器——电子显微镜和电子束曝光的内容;第 7 章为真空光电器件,这是目前仍然十分活跃、应用十分广泛的一类真空电子器件;第 8 章则以介绍气体放电原理为主,它不仅是在该章中学习的离子管的工作基础,也是第 9 章中的气体放电光源和第 10 章中的真空开关管、计数管的工作基础;第 9 章比较全面地介绍了与国民经济各部门和人们日常生活密切相关的各类电光源;第 10 章则对微波天线开关管、X 射线管、计数管和真空开关管(真空灭弧室)作了介绍。当然,真空电子器件是一个种类十分繁多的大家族,仅靠本书不多的篇幅不可能把所有器件全部包括进去,但可以说,主要的和基本的各类真空电子器件都已在本书中涉及。

既然是“真空电子器件”的教材,因此本书不涉及固体电子器件,仅仅在相关章节中作为真空电子器件的替代技术做了必要的介绍。

本书的编写得到了电子科技大学物理电子学院领导邬邵轶教授和教务科蔺梅芳老师及真空电子技术系领导曾葆青教授的大力支持,没有他们的关心支持,本书难以完成和付印,特别是真空电子技术系的殷勇老师,为本书的出版付出了辛勤劳动,本人向他们表示衷心的感谢。

本人要特别感谢研究生康新蕾同学,她在完成繁忙的学习任务的同时,利用大量业余时间打印了本书全部文稿。

本人还要诚挚感谢同事宫玉彬教授、魏彦玉教授、段兆云教授、巩华荣副教授、黄民智高工、赵国庆老师、唐涛老师、岳玲娜副教授、殷海荣副教授、徐进老师、路志刚副教授、王战亮老师、成永东高工、官晓玲老师,他们在本书编写过程中给予了大量帮助支持、提供了很多宝贵的意见和建议。

四川大学唐昌建教授、电子科技大学林祖伦教授、李斌教授、黄桃副教授等提供了部分宝贵的参考资料或照片,谨向他们表示衷心感谢。

在本书编写过程中参阅了大量文献资料,包括著作、论文、学位论文及网上材料,特别是书中所给出的照片大部分都来自百度网和谷歌网。限于网络资料和照片一般都没有给出原作者或原单位名称,因此除了书后列出了主要参考文献、一些照片在正文中给出了出处外,有部分文献资料及大部分照片都未能在正文或参考文献中给出原作者姓名或原单位名称,本人谨表示真诚的歉意!并向所有参考过的文献资料和引用的照片的作者或单位表示诚挚的感谢。

由于作者才疏学浅,在本书编写中难免有不少错漏之处,或表述不当之处,谨请专家学者不吝赐教。

作者

2012年5月于电子科技大学

目 录

第1章 真空电子器件基础	1
1.1 真空电子器件一般介绍	1
1.1.1 真空电子器件的定义与分类	1
1.1.2 真空电子器件的发展与应用	3
1.2 电子发射与热阴极	5
1.2.1 电子发射的物理基础	5
1.2.2 电子发射方式及阴极	8
1.2.3 热阴极	8
1.3 其他阴极	11
1.3.1 光电阴极	11
1.3.2 次级电子发射极	14
1.3.3 场致发射阴极	17
1.4 电子光学基础——电子在电磁场中的运动	22
1.4.1 电子光学简介	22
1.4.2 电子在均匀场中的运动	22
1.4.3 电子在轴对称电场中的运动	24
1.4.4 电子在轴对称磁场中的运动	27
1.4.5 轴对称复合电、磁场中的电子运动和聚焦成像性质	30
1.5 电子透镜与像差	31
1.5.1 电子光学与几何光学的比较	31
1.5.2 电子透镜	33
1.5.3 像差	41
第2章 普通电子管	46
2.1 普通电子管一般介绍	46
2.1.1 静态控制原理	46
2.1.2 电子管的基本结构	46
2.1.3 电子管发展简史	50
2.1.4 电子管的分类	51
2.2 二极管	52
2.2.1 二极管的基本工作原理	52
2.2.2 平板二极管的电流流通和极间电场	53
2.2.3 平板二极管的 $3/2$ 次方定律	58
2.2.4 阴极的工作状态与二极管的伏安特性	59
2.3 三极管	60

2.3.1	三极管的基本工作原理	60
2.3.2	等效二极管	61
2.3.3	三极管的伏安特性和参量	63
2.4	四极管、五极管和束射四极管	66
2.4.1	四极管	66
2.4.2	五极管	67
2.4.3	束射四极管	68
2.5	发射管、调制管和微波三、四极管	69
2.5.1	发射管	69
2.5.2	调制管	70
2.5.3	微波三、四极管	71
第3章	微波真空电子器件概述	74
3.1	微波管的动态控制原理与分类	74
3.1.1	微波电子管的动态控制原理	74
3.1.2	微波电子管的分类	76
3.1.3	微波电子管的发展方向	76
3.2	微波管的主要参量	78
3.2.1	增益	78
3.2.2	功率	78
3.2.3	带宽	80
3.2.4	效率	82
3.3	微波管的基本结构	83
3.3.1	微波管的主要组成部分	83
3.3.2	电子枪	83
3.3.3	高频系统	85
3.3.4	聚焦系统	86
3.3.5	收集极	88
3.3.6	输能装置	90
3.4	谐振腔型高频结构	91
3.4.1	速调管用重入式谐振腔	91
3.4.2	磁控管用多腔谐振系统	92
3.4.3	回旋管用开放式波导谐振腔	94
3.4.4	准光学谐振腔	95
3.5	慢波线型高频结构	97
3.5.1	慢波线的一般特性	97
3.5.2	周期性结构慢波线	99
3.5.3	螺旋线慢波系统	101
3.5.4	耦合腔慢波系统	106

3.5.5	新型全金属慢波系统	109
第4章	传统微波管	112
4.1	速调管的工作原理	112
4.1.1	速调管的基本结构和动态控制原理	112
4.1.2	电子注的速度调制	113
4.1.3	电子注的漂移群聚	115
4.1.4	电子注的能量转换	119
4.2	速调管的主要类型及应用	122
4.2.1	速调管的主要类型	122
4.2.2	速调管的特点与应用	125
4.3	行波管的工作原理	126
4.3.1	行波管的结构和工作原理	127
4.3.2	行波管的小信号理论	129
4.3.3	耦合腔行波管	134
4.4	行波管的工作特性及应用	134
4.4.1	行波管的输出功率和效率	134
4.4.2	行波管自激振荡的抑制	137
4.4.3	行波管的应用	139
4.4.4	行波管的发展	140
4.5	磁控管的工作原理	142
4.5.1	静态磁控管中的电子运动	142
4.5.2	磁控管中的相位聚焦和电子挑选	146
4.5.3	电子与高频场的能量交换	150
4.5.4	M型器件与O型器件的比较	151
4.6	磁控管振荡器和正交场放大器	151
4.6.1	磁控管的自激振荡	151
4.6.2	磁控管的工作状态	155
4.6.3	正交场放大管	157
4.6.4	正交场器件的特点与应用	161
第5章	新型微波管	162
5.1	回旋管	162
5.1.1	回旋管的基本结构及工作原理	162
5.1.2	其他回旋器件	168
5.1.3	回旋器件与O型器件的比较	172
5.2	绕射辐射振荡器(奥罗管)	173
5.2.1	奥罗管的基本工作原理	173
5.2.2	奥罗管的准光学谐振腔	175
5.3	相对论电子注器件(高功率微波器件)概述	177
5.3.1	相对论电子注器件	177
5.3.2	脉冲功率源	179

5.3.3	高功率微波的应用	183
5.4	O型相对论电子注器件	186
5.4.1	相对论切伦柯夫器件	186
5.4.2	相对论速调管	191
5.5	M型相对论电子注器件	194
5.5.1	相对论磁控管	194
5.5.2	磁绝缘线振荡器	199
5.6	其他相对论电子注器件	201
5.6.1	相对论回旋管	201
5.6.2	虚阴极振荡器	203
5.6.3	自由电子激光	207
第6章	电子束管	213
6.1	电子束管的一般介绍	213
6.1.1	电子束管的基本结构	213
6.1.2	电子束管的分类与应用	219
6.2	示波管和定位管	220
6.2.1	示波管	220
6.2.2	雷达定位管	223
6.3	显像管	225
6.3.1	黑白显像管	225
6.3.2	彩色显像管	227
6.3.3	显像管的应用与现代显示技术的发展	231
6.4	摄像管	234
6.4.1	摄像管工作原理	234
6.4.2	真空摄像管和固体摄像器件	237
6.5	储存管	243
6.5.1	网垒式储存管	244
6.5.2	直观式储存管	246
6.5.3	存图管(电子激发导电式储存管)	248
6.6	电子束的其他应用	249
6.6.1	电子显微镜	249
6.6.2	电子束曝光	254
第7章	光电器件	258
7.1	光电管	258
7.1.1	真空光电管	258
7.1.2	充气光电管	261
7.1.3	光电管的应用	263
7.2	光电倍增管	263
7.2.1	光电倍增管的工作原理与结构	263
7.2.2	光电倍增管的基本参量	267

7.2.3	光电倍增管的应用	269
7.3	像管的一般介绍与红外变像管	272
7.3.1	像管的工作原理和结构	273
7.3.2	像管的主要特性参量	274
7.3.3	像管的应用	275
7.3.4	红外变像管	276
7.4	像增强器的发展	277
7.4.1	第一代微光像增强器	277
7.4.2	第二代微光像增强器(微通道板像增强器)	278
7.4.3	第三代微光像增强器(负电子亲和势阴极像增强器)	280
7.4.4	超级像管	281
7.5	X射线像增强器	282
第8章	气体放电管(离子管)	284
8.1	气体放电的基本物理过程	284
8.1.1	带电粒子的产生	284
8.1.2	带电粒子在气体中的运动	290
8.1.3	带电粒子的转化及消失	294
8.2	繁流放电与着火过程	298
8.2.1	气体放电的伏安特性与分类	298
8.2.2	电子繁流理论	300
8.2.3	气体放电的着火过程	304
8.3	气体放电的形式	307
8.3.1	辉光放电	307
8.3.2	弧光放电	313
8.3.3	其他类型气体放电	316
8.4	离子管	318
8.4.1	离子管的分类和用途	318
8.4.2	闸流管	319
8.4.3	稳压管	323
第9章	电光源	327
9.1	电光源的分类、特性和应用	327
9.1.1	电光源的分类	327
9.1.2	电光源的主要参数	328
9.1.3	电光源的用途	331
9.2	热辐射光源	334
9.2.1	白炽灯	334
9.2.2	卤钨灯(卤素灯)	337
9.3	低压气体放电光源——荧光灯	340
9.3.1	荧光灯	341
9.3.2	节能灯	343

9.3.3	特种荧光灯	346
9.3.4	无极荧光灯和微波硫灯	346
9.4	其他低压气体放电光源	351
9.4.1	低压辉光放电光源	351
9.4.2	低压钠灯	353
9.5	高压和超高压气体放电光源	355
9.5.1	高压汞灯	355
9.5.2	金属卤化物灯	357
9.5.3	高压钠灯	363
9.5.4	氙灯	366
第10章	其他真空电子器件	371
10.1	微波天线开关管	371
10.1.1	微波天线开关管的工作原理和应用	371
10.1.2	天线开关管的分类和主要参数	373
10.1.3	常用天线开关管及其改进	375
10.2	X射线管	379
10.2.1	X射线	379
10.2.2	X射线管的结构和特性	382
10.2.3	X射线的应用与防护	386
10.3	计数管	389
10.3.1	计数管的结构和工作原理	389
10.3.2	正比计数管	390
10.3.3	盖革计数管	392
10.3.4	闪烁计数器	394
10.4	真空开关管	395
10.4.1	真空开关管的结构	395
10.4.2	真空开关管的工作原理	396
10.4.3	真空开关管的触头	399
10.4.4	真空开关管的特点、分类与应用	402
附录		406
附录 I	一些物理常数	406
附录 II	真空度单位及换算关系	407
附录 III	电磁波波谱与可见光波谱	407
参考文献		408

第 1 章 真空电子器件基础

真空电子器件是以在真空(或充某种气体)中运动的电子(或离子)作为工作物质的一大类器件的总称,它包含有很多不同种类、不同工作原理、不同应用领域的电子或离子器件。它们都离不开电子(离子)和电子(离子)运动,因此它们也有共同的技术基础,比如电子发射电极(阴极)和电子光学系统。

本章将首先介绍真空电子器件的定义、分类、发展及应用,然后简单讨论真空电子器件的核心部件——阴极以及电子运动和控制的基本原理——电子光学系统。

1.1 真空电子器件一般介绍

1.1.1 真空电子器件的定义与分类

1. 真空电子器件的定义

真空电子器件是指借助于在真空或者特定气体中运动的电子(离子)的各种效应而实现将一种形式的信号(能量)转换成另一种形式的信号(能量)的器件。习惯上,真空电子器件往往称为电子管、真空管,它也可以叫做电真空器件,是电子器件中最重要的一个门类。

真空电子器件的功能可以是电信号(能量)与电信号(能量)的转换,比如将电子的直流能量转变成交流信号能量,或者把交流电能量转变成直流电能量;也可以是电能与光能的转换,比如将电子的直流能量转变成可见光,或者将可见光(红外光、紫外光等)转变成电信号;还可以是其他形式,比如电能与高能射线等的能量转换。

真空电子器件是电子设备和仪器的核心,是决定现代电子装备技术水平的关键。

真空电子器件一般由能维持真空或充气环境的外壳、能发射电子的阴极和接收电子的靶(阳极),以及控制电子注(束)形状和运动轨迹的其他电极构成,这样的结构组成也就决定了真空电子器件的基本特点。

(1) 真空电子器件都会有能维持真空或特定气体环境的管壳。电子只有在真空中才能快速自由运动,一些以离子作为工作介质的真空电子器件,也首先要被抽成真空,才能再充入符合要求(种类、压强等)的气体。而维持真空或保持特定气体都必须依赖于管壳。

(2) 真空电子器件必须有能产生和接收电子的电极。发射电子的电极称为阴极,真空电子器件之所以是一种“有源器件”,就是因为它自身就能产生电子。在离子器件中,离子的产生也一般是由电子在运动中与充入器件内的气体碰撞电离而得到的;有了电子发射,显然还应该接收电子的电极,称为阳极、靶、屏等。阴极和阳极(靶)是组成真空电子器件最基本的结构要素,也是形成器件内部电子流(离子流)的基本条件。

(3) 真空电子器件中往往还会有能控制电子(离子)运动的电极。为了达到真空电子器件的特定的功能要求,真空电子器件中必须要有能控制电流发射密度大小、电子束形状、速度

及运动轨迹的若干电极,这些电极一般称为电子光学系统。

2. 真空电子器件的分类

真空电子器件种类繁多,用途十分广泛,涉及应用领域广阔,它主要包括收信放大管、整流管、发射管、微波振荡管、微波放大管、示波管、摄像管、显像管、像增强管、光电倍增管、光敏管、气体放电管(离子管)、开关管、X射线管和电光源等。

1) 普通电子管

普通电子管是指基于静电控制原理工作的电子管,也可以说是利用空间电荷效应工作的电子管。在这类管子中,电子在极间的渡越时间远小于信号电压的变化周期,因而相对信号来说,电子在运动过程中所遇到的电场可以近似看成是静态场,即恒定场;从另一角度来说,在这类管子中,电子流的大小和分配是由阴极表面的静电场分布决定的,或者说是工作在空间电荷限制状态下(详见2.2节)的。

收信放大用二极管、三极管、四极管、五极管以及整流管、发射管、微波三极管、微波四极管等都属于普通电子管。

2) 微波电子管

基于动态控制原理,工作在微波波段的真空电子器件称为微波管。在微波波段,普通电子管已不能正常工作,因为电子的渡越时间已经与信号变化周期可以比拟甚至更短,电子运动过程中极间电场早已发生了改变,也就是说,不能再利用静态场控制原理。这时,必须放弃利用栅极或阳极直接对电子流的密度和速度进行调制(控制)的方式,而把对电子注的速度控制与密度控制分开,在电子运动过程中实现对电子注密度的调制,这就是微波电子管的动态控制原理。

最常用的微波电子管有速调管、行波管、磁控管、前向波放大器、回旋管及近年发展起来的一大批相对论电子注器件。

3) 电子束管

利用对电子束的聚焦和控制以实现光、电信号的记录、存储、转换和图像显示的真空电子器件,称为电子束管。在电子束管中,一般包括有产生和聚焦电子束的电子枪,控制电子束运动的偏转系统,接收电子束并实现光、电转换的靶面或荧光屏3部分。

示波管、雷达定位管、显像管、计算机显示管等都是将电信号转变成可见光信号电子束管,而摄像管则是将光信号转换成电信号的电子束管,存储管是对电信号进行存储和重现的一种电子束管。

4) 光敏管(光电管)

光敏管是利用材料的光电效应将光信号转变为电信号或光信号的一类真空电子器件,亦称为光电管。光信号变成电信号的光敏管有光电管、光电倍增管等,而光信号变光信号的光敏管则有变像管、像增强管、X射线增强管等。

光敏管与电子束管都具有光电转换功能,它们的不同之处在于:电子束管中的电子束是由热阴极发射的,光敏管中的电子则是由光照射具有光电效应的光电阴极产生光电发射而得到的。在这里将只是实现光信号到电信号的转换,而对信号没有放大的光敏管称为光电管,而将其他同样利用光电效应实现光电或光光转换的器件称为光敏管,其实这两种叫法并没有这样严格的区分,经常出现两种名称混用的情况。

5) 气体放电管(离子管)

气体放电管是一类利用气体电离放电特性工作的电子管,也称为离子管。由于气体放电

的过程十分复杂,不同气体种类在不同的条件和气压下会表现出不同的放电特征,利用这些不同特征,就可以制造出各种各样不同的气体放电器件。例如,气体放电前是绝缘的,放电后产生的离子就具有导电性,据此人们就可以制造出各种开关器件,如闸流管、天线开关管等;气体的辉光放电具有比较稳定的电压降,根据这一特性就可以制造出稳压管;而气体放电时伴随的发光现象更是各类光源或显示器件的工作基础,如氖灯、氙灯、等离子体显示器等。

6) X 射线管

利用高能电子轰击阳极而产生 X 射线的电子管称为 X 射线管,X 射线管根据用途不同也有多种不同类型,比如医学诊断用 X 射线管、治疗用 X 射线管、对材料进行探测用 X 射线管等。

7) 真空开关管

这是一种利用真空作灭弧和绝缘介质的断路器,称为真空开关管,也称为真空断路器;其任务是控制电力系统中能量的输送,一旦出现故障时能迅速切断线路,保护电力系统不受损伤,避免事故和意外发生。

8) 电光源

电光源是一种特殊的真空电子器件,它以热辐射或气体放电等方式得到光辐射,而不是直接由电子或离子的运动实现光辐射,之所以也将它归结为真空电子器件,是因为它也必须在密封管壳内抽真空或充气,在结构上、制造工艺上与真空电子器件有许多共同之处,所以本书将对它一起进行简单介绍。

真空电子器件还有很多。例如,测量真空度的真空规管,用于探测 α 、 β 粒子及 γ 、X 射线的辐射计数管等,这里不再一一列出。其中真空规管将在“微波管工艺”课程中介绍,不包括在本书之中。

1.1.2 真空电子器件的发展与应用

1. 真空电子器件的简单历史回顾

1879 年爱迪生发明白炽灯泡,开创了真空电子器件的发展历史。1904 年,英国电气工程师弗莱明(J. Fleming)发明了二极管,1906 年,美国工程师福雷斯特(D. Forest)发明了三极管,电子管开始成为推动世界技术革命的动力,标志着人类社会进入了无线电时代。在随后的半个多世纪中,电子管在广播、电视、通信、军事、工业自动化、科学研究,甚至人们日常生活等国民经济各个领域都得到了广泛应用,成为无可替代的角色,可以毫不夸张地说,电子管是 20 世纪最伟大的发明。

第一只电子束管是 1897 年制成的勃朗管,很快就出现了示波管。20 世纪 30 年代初期,美国开始研究电视技术,显像管和摄像管相继出现;1949 年,美国无线电公司首先研制成功了彩色显像管;1950 年美国开始彩色电视广播,由此电视成为传播思想、文化、科技、娱乐、商业广告等的最重要的工具,进入了千家万户;20 世纪 60 年代后期又出现了各种像增强管和微光摄像管。

德国物理学家赫兹于 1887 年发现了光电效应,从而奠定了光电器件的基础,1890 年第一只光电管就已经问世。随着更多高效光电材料的发现,各种类型和性能更好的光电器件也不断出现。

气体放电现象的发现最早可追溯到 1752 年富兰克林对雷电进行的实验研究,19 世纪人们发现了气体放电的各种形式,1802 年发现了电弧,不久又发现了辉光放电。1908 年发明了

水银整流管,随后出现了充气离子管,1930 年辉光放电稳压管得到应用,1937 年又出现了引燃管。

1895 年,德国物理学家伦琴(W. K. Rontgen)在作阴极射线实验时发现了一种未知射线,因为当时还不知道这是一种什么射线,所以就称它为 X 射线,也称伦琴射线。1913 年,第一只真空 X 射线管诞生,直到现在 X 射线技术仍在不断发展,出现了诸如旋转阳极 X 射线管、细聚焦 X 射线管等新管种。

为了满足技术发展的需求,各种类型、各种型号的真空电子器件在 20 世纪上半叶大量涌现并在国民经济的各个领域广泛应用,极大地推动了工业、农业、文化、教育、国防、科技、医疗等技术的发展,为人类文明进步建立了不朽功勋。但是,随着新技术的不断出现和应用,尤其是半导体技术、液晶显示技术等的发展,真空电子器件面临着越来越严峻的挑战和竞争,并在相当程度上已被替代。即使如此,在大功率、高频率信号的放大和振荡方面,在有特殊要求的显示器件方面,在其他特殊电子束管和光电器件、气体放电管、X 射线管及电光源等方面,真空电子器件仍然占据着主导甚至统治地位。

2. 真空电子器件与固体器件的比较

1) 真空电子器件的缺点

在固体器件未得到广泛应用之前的半个多世纪中,真空电子器件在无线电技术领域扮演着独一无二的角色,但是,随着技术的不断进步,真空电子器件的不足也越来越明显,它非常脆弱而且寿命短,体积和重量大,工作电压高,耗电多,成品率低,成本高等。

另外,半导体器件的出现和发展,在越来越多领域已经打破真空电子器件一统天下的局面,甚至完全取代了真空电子器件,这是因为,半导体器件工作电压低,功耗少,体积、重量十分小,尤其是能够大规模生产,因而生产成本低,而且易于集成,寿命长,可靠性高,噪声低,抗辐射等,比真空电子器件具有明显的优越性。

2) 真空电子器件的优势

半导体器件的工作依赖于电子在固体中的运动,而真空电子器件的功能则是由电子在真空中的运动来完成的,电子在接近真空的器件内部的运动速度是在固体中运动速度的 1000 倍以上,因此真空电子器件具有快速转换的功能;限制工作频率提高的电子渡越时间比固体器件极大地降低,工作频率相应得到提高,使真空电子器件可以工作在更高的频率上,特别随着新技术的发展和电子注与电磁场相互作用新机理的出现,微波管的工作频率越来越高,目前已经推进到了太赫兹(THz)频段,为固体器件所望尘莫及。

另外,真空电子器件的真空条件使得它可以工作在很高的电压和很大的电流下,因而可以获得很高的输出功率,而半导体器件只能工作在低电压下,尽管其工作电流有时也可以很大,但总的功率输出就远不如真空电子器件。平均来说,半导体器件的功率容量在 1GHz 频率时,约为 100W;在 10GHz 频率下,只有 10W 左右;而到 100GHz 频率,就只有不到 1W 了。到 20 世纪 90 年代,在 1GHz,真空电子器件(速调管)的功率电平可以达到固体器件的 1 万倍;而在 100GHz,则前者(回旋管)的输出功率大约是后者的 10 万倍。由此可见,在输出功率电平上,固体器件在目前还远远不能与真空电子器件相比拟。

更何况,还有相当一部分真空电子器件,是目前固体器件根本无法替代的,如光敏器件、气体放电器件、X 射线管及电光源等。

3. 真空电子器件的应用

(1) 普通电子管尽管在绝大多数领域已被固体器件所取代,但在高保真音响设备中仍有

大量应用,而陶瓷发射管和微波三、四极管更在广播和电视发射机中占据着主导地位,大量工业用高频感应加热设备都离不开发射管,调制管在一些高压脉冲电源中也还有应用。国内亦保留了少量工厂继续生产收信放大管,还有不少工厂,特别是民营企业在生产陶瓷发射管和微波三、四极管,以满足用户需求。

(2) 在中、小功率,低频率和低噪声方面,微波电真空器件已经失去了自己的领地,但在大功率,高频率领域,半导体器件还无法与真空微波管竞争。在可预见的将来,速调管、行波管、磁控管、前向波器件等在雷达、通信、电子对抗、微波加热等军用和民用应用领域仍将具有不可替代的位置。特别是微波管本身技术的进一步发展,新型毫米波、亚毫米波甚至 THz 器件水平的不断提高,以及相对论电子注器件性能的不断完善和实用化,将在毫米波、亚毫米波应用,微波武器,微波探测和科学研究等领域的应用取得更大突破,这些对固体器件来说,更是无法与真空电子器件相比拟。

(3) 在显示技术方面,尽管传统示波管、显像管在相当程度上已经被液晶显示(LCD)、等离子体显示(PDP)、有机发光二极管显示(OLED)、发光二极管显示(LED)等新型显示技术所取代,但是彩色显像管在我国彩色电视机生产中仍占有一定市场份额,更是我国出口大项。就是等离子体显示技术中,也离不开电真空技术和气体放电技术,在国防和一些特殊要求的仪器仪表中,示波管、雷达定位管、显像管还继续得到应用,而微光摄像管、存储管、像增强管等电子束器件目前仍在军事、公安、工业、医疗、电视、科学研究等领域大量应用。

(4) 光电管现在还是在不断发展和得到广泛应用的一类真空电子器件,它主要用于各种光电探测,在自动化控制、光纤通信、太阳能利用、快速光电辐射探测、军事、防伪及科学研究等方面都离不开光电器件。

气体放电管则在化工、冶金、石油、矿山、交通、机械、水电等工业领域以及国防、医疗和科学研究等方面都有着广泛的用途。

X 射线管不仅是医学上十分重要的诊断和治疗手段,而且还可用于无损检测、结构分析、光谱分析、海关检查等方面。

电光源更是与人们的日常生活密不可分的一种真空电子器件,在工业、农业、国防、科学研究等国民经济各个领域都离不开电光源。

1.2 电子发射与热阴极

在真空电子器件中,最重要的部件是阴极,它常常被称为是电子管的“心脏”,因为阴极的质量直接影响到电子管的性能,而且在一般情况下,电子管的寿命往往就是由阴极寿命所决定的。阴极的作用是发射电子,不同的电子发射方式就形成了不同的阴极,甚至产生不同的器件,因此,必须先对不同的电子发射及相应的阴极有一个了解。由于深入讨论不同阴极的电子发射机理是“阴极电子学”这门课程的内容,所以在这里只是作一个最基本的介绍,以便对基于不同电子发射方式而形成的不同器件有更好的理解。

1.2.1 电子发射的物理基础

1. 价电子与自由电子

1) 价电子

任何物体都是由原子核和绕核旋转的电子组成的,带负电的电子受带正电的原子核的束

缚而绕核旋转,因而电子具有势能。稳态原子的电子首先从最低能态填充起,然后按能级高低依次填充其他高能级,由于越靠近原子核,电子的势能越小,因此电子将按能量从小到大分布在原子核周围从近到远的不同能级上,或者说不同层次的轨道上。而每层轨道上能容纳的电子数目是有限制的,为 $2n^2$ 个, n 为从离原子核最近的轨道起始计算的层数,即第一层2个电子、第二层8个电子等等。但最外层轨道受每个原子所拥有的总电子数的限制,一般都不可能达到 $2n^2$ 个电子,显然,在这一轨道上的电子势能最高,受原子核束缚最小,这一层的电子称为价电子。

2) 自由电子

如果电子受到外力激发而吸收能量,提高了自己的势能,就会从低能级轨道跃迁到高能级轨道。如果电子吸收的能量足够多,就甚至可能脱离原子核的束缚成为自由电子,而剩下的电子与原子核一起就成为带正电的离子。显然,价电子本来受束缚最小,因而最容易受激发而成为自由电子。

金属中的价电子在相邻原子核的正电荷影响下,在无外力作用下,也可能成为自由电子,而失去价电子的离子形成规则排列的晶格,正离子所在位置即晶格节点,自由电子可以在晶格间自由运动,但还不能脱离金属体跑到空间中去。金属中有大量自由电子存在,这些自由电子正是金属具有良好导电性和导热性的基础。

2. 费米能级和逸出功

1). 费米能级

金属中的自由电子所具有的能量是不同的,或者说所处状态是不同的。在绝对零度时,电子的能量最小,即电子在晶体中将处于可能的最低能级上,但是,根据泡利(W. Pauli)不相容原理,每一个量子态只能容下一个电子,因此电子必须从最低能级开始向高能级逐级填充,直到所有电子都占据了对应的能级位置。所有电子最终的能量分布将符合费米统计规律,其中能量最高的能级 E_F 被称为费米能级。

费米分布的表达式是

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right] + 1} \tag{1.1}$$

式中, $f(E)$ 为电子占据 E 能级的概率; E 为电子能量; E_F 为费米能级对应的能量; k 为玻耳兹曼常数; T 为物体的绝对温度。

式(1.1)可画成图1-1所示的曲线,由图1-1中曲线1可见,当 $kT=0$ 时,电子全部处于 $E \leq E_F$ 的能级上,而 $E > E_F$ 的能级都没有电子。图1-1中曲线2、3则表示,随着温度的升高,

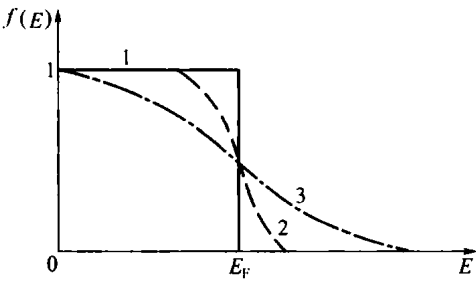


图1-1 自由电子能量的费米分布