

电子管

(上册)

徐淦卿 陈德森 編著

上海科学技术出版社



电 子 管

上 册

徐 淦 卿 編 著
陈 德 森

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书分上、下两册,上册介绍电場理論,电子管中的物理現象和电子管的特性;詳述阴极的种类、結構、性能和測試方法等,并討論电子管內的噪声問題。

下册詳述各种接收放大和发射管的基本結構,現代各种接收放大、发射管的設計原理,并分別举例說明計算过程。

本书可作为高等学校电子器件专业教学用书,亦可供从事电子器件生产的工程技术人员参考。

电 子 管(上册)

徐淦卿 陈德森 編著

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可證出 093 号

商务印书館上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印張 11 22/32 排版字数 285,000

1965 年 7 月第 1 版 1965 年 6 月第 2 次印刷

印数 9,001—10,800

統一书号 13119·515 定价(科六) 1.30 元

序

本书是由編者在南京工学院几年来为“电子器件”专业讲授“电子管”課程所編写的讲义补訂而成，主要討論靜电控制电子管的理論和計算，包括电子管的理論基础、阴极和电子管的結構与計算三部分。

电子管理論部分系統地闡述电子管中发生的物理过程和基本規律；首先扼要討論靜电場和电子运动的基本規律，这对深入理解电子管工作原理将有很大的帮助。第二章中討論电子管中的主要物理現象和决定电子管中电流流通条件的一般規律。第三章綜合地叙述电子管的特性曲綫和参量。最后討論当运用頻率高到电子在电极間的飞越時間接近电子管电极上的电压的振蕩周期时电子管中的物理过程和基本規律。

阴极是电子器件的心脏，电子管的特性和寿命在很大程度上取决于阴极的性质，因此本书用相当多的篇幅来討論阴极。由于电子发射理論是“电真空物理”課程的內容，因而本书只限于討論阴极的特性、結構和一些影响它的发射和寿命的因素。目前电子器件大部分采用热阴极，因此本书討論的重点是热电子阴极，但也涉及电子管中的二次电子发射体和很有发展前途的自持电子发射极——氧化鎂冷阴极。最后还扼要叙述研究阴极的基本实验技术。

在第三部分电子管的結構与計算中，詳細討論各种接收放大管、发射管和靜电控制超高频管的結構特点，并介紹关于靜电控制电子管的最新成就。最后綜合討論电子管的設計和計算方法，包括参量的計算、电极尺寸的計算、热計算以及机械震动的計算等各

方面。

靜电控制电子管从两极管发明算起已有五十余年的历史，但它还是在不断地发展着。电子管的种类愈来愈多；有关的文献資料特别是最新发展的資料，常散見于各国期刊中，本书是一本教学用书，不可能搜罗无遺，因此讀者如需深入研究某些专题，还必须参閱有关的文献資料。

編者学識有限，书中不妥之处还希学者随时指正。

編 者 于南京工学院 1962

上册目录

序

緒論	1
----	---

第一編 电子管的理論基础	7
--------------	---

第一章 关于电子管理論的基础知識	7
------------------	---

§ 1.1 靜电場的基本定律	7
----------------	---

§ 1.2 泊松方程和拉普拉斯方程及其解法	10
-----------------------	----

§ 1.3 电子在均匀电場中的运动	21
-------------------	----

§ 1.4 电子在不均匀电場中的运动——靜电透鏡	25
--------------------------	----

§ 1.5 电子在磁場中的运动	30
-----------------	----

第二章 电子管中的物理現象	34
---------------	----

§ 2.1 电子管中的电流——感应电流	34
---------------------	----

§ 2.2 电子管中空間电荷的作用	39
-------------------	----

§ 2.3 二分之三次方定律	43
----------------	----

§ 2.4 不包含阴极的两平面电极間的空間电荷效应	50
---------------------------	----

§ 2.5 电子管中的靜电場	57
----------------	----

§ 2.6 等效两极管和等效电压	63
------------------	----

§ 2.7 电子管中正电位电极間的电流分配	69
-----------------------	----

§ 2.8 相邻两正电位电极間的二次电子交換現象——負阻效应	80
--------------------------------	----

§ 2.9 电子管中各个柵极的用途和作用原理	82
------------------------	----

§ 2.10 正电位电极上发生的物理过程	83
----------------------	----

第二章习题	84
-------	----

第三章 电子管的特性和参量	86
---------------	----

§ 3.1 二分之三次方定律的修正	86
-------------------	----

§ 3.2 电子管的靜态特性曲綫	102
------------------	-----

§ 3.3 电子管的靜态参量	119
----------------	-----

§ 3.4 放大系数的計算	128
---------------	-----

第三章习题	151
第四章 静电控制电子管在超高频下的性质	153
§ 4.1 电子飞越时间和时空图	153
§ 4.2 小信号两极管在超高频下电流的性质	160
§ 4.3 小信号三极管在超高频下管内电流的性质	168
§ 4.4 超高频下阴极的发射	177
§ 4.5 大信号三极管中的电子运动	180
§ 4.6 超高频四极管中屏栅与阳极间的电子现象	192
第四章习题	193
第二編 电子管的阴极和管内噪声	195
第五章 阴极的分类和阴极的参量	195
§ 5.1 阴极的分类	195
§ 5.2 阴极的参量	195
第六章 純金属阴极和原子膜阴极	202
§ 6.1 純金属阴极的物理性质	202
§ 6.2 純金属阴极·鎢阴极	212
§ 6.3 原子膜阴极中的物理现象	215
§ 6.4 决定原子膜阴极工作状态下复盖度的因素	220
§ 6.5 原子膜阴极的中毒	222
§ 6.6 原子膜阴极的种类	225
第六章习题	237
第七章 氧化物阴极	238
§ 7.1 概述	238
§ 7.2 芯金属对发射的影响	240
§ 7.3 氧化物涂层对发射的影响	246
§ 7.4 氧化物涂层中平衡状态的建立	253
§ 7.5 中毒现象	255
§ 7.6 氧化物阴极的脉冲发射	260
§ 7.7 氧化物阴极的电导率	264
§ 7.8 反常蕭特基效应	266
§ 7.9 氧化物阴极的二次发射	267
§ 7.10 氧化物阴极的不良性质	268

§ 7.11 新型的氧化物阴极	273
第七章习题	282
第八章 其他类型热电子阴极	283
§ 8.1 硼化物阴极	283
§ 8.2 氧化钪阴极	287
§ 8.3 稀土金属氧化物阴极	288
§ 8.4 热电子阴极总结	289
第九章 二次电子发射体和自持电子发射阴极	294
§ 9.1 二次电子发射体	294
§ 9.2 自持电子发射的基本规律	298
§ 9.3 有效的自持电子发射阴极——氧化镁冷阴极	301
第十章 阴极的基本量测技术	304
§ 10.1 阴极温度的量测	304
§ 10.2 阴极发射电流的量测	312
§ 10.3 阴极激活物质蒸发率的量测	316
§ 10.4 氧化物阴极中间层电阻的量测	320
§ 10.5 氧化物阴极电导率的量测	323
§ 10.6 二次电子发射特性的量测	324
§ 10.7 自持电子发射阴极表面电位的量测	328
第十一章 电子管的噪声	332
§ 11.1 概述	332
§ 11.2 散粒效应	333
§ 11.3 闪烁效应	338
§ 11.4 在超高频下的感应噪声	340
§ 11.5 电流分配噪声	344
§ 11.6 二次发射噪声和电离噪声	346
§ 11.7 电子管内缺陷所引起的噪声	347
§ 11.8 噪声的表示法	350
§ 11.9 噪声同电子管的结构和运用状况的关系	352
第十一章习题	354
电子管上册主要参考书	355
参考文献	356

緒 論

一、靜电控制电子管发展簡史

凡是以利用在真空中或稀薄气体中发生的电現象作为运用基础的器件,通称为电真空器件。

电真空器件可分为两大类。第一类是不放电的电真空器件,在这类器件中,主要的电的变化只发生在处于真空中的金属导体里,例如白熾灯、热电偶等。第二类是放电的电真空器件,它們的作用是依靠在真空中或稀薄气体中自由电荷的运动而完成的。

靜电控制电子管是放电的电真空器件的一支,器件内部处于高真空(不大于 10^{-6} 毫米汞柱)状态,管内运动的自由电荷是阴极发射出来的电子。

从十九世紀末开始,对于物质构造的电子理論、电子和离子現象以及真空技术的研究,为电子管的发明和改进創造了理論上和技术上的先决条件。

1873 年俄国电气工程师拉德庚发明了白熾灯,这可认为是出現电真空器件的开始。

1883 年爱迪生发现在真空中电流能够从灼热的金属絲越過空間到达另一金属板上,这一現象經過实验上和理論上的研究,証实是金属加热时有帶負电荷的小质点——电子——从金属上发射出来。这一現象通常称为爱迪生效应。

在爱迪生效应的基础上,于 1904 年发明了第一个最簡單的两极管,它由一个灼热时能发射电子的阴极和一个收集电子的阳极构成。两极管的主要特性是单向导电性:电流在阳极电路中只能

单方向流通,就是在管内从阳极经过真空到阴极。这是由于只有阳极相对于阴极是处于正电位时,才能接收从阴极发射出来的电子。在两极管的发明初期,它虽然可以代替当时无线电技术中应用的晶体检波器,但是由于技术上有一些缺点,所以当时它的应用并不很广。

在 1906~1907 年制成了第一个具有三个电极的三极管,即在阴极和阳极之间加进一个栅网状的电极,称为栅极。

实验证明:改变栅极对阴极的电位能影响从阴极出来经过栅极流向阳极的电子流。当栅极较阴极的电位为负时,在这两个电极间的电场使阴极出来的运动电子减速,因此阳极电流减小。反之,如果栅极较阴极的电位为正,那么从阴极发射出来的电子将得到加速,阳极电流就增加。

这样,栅极电位的变化就引起了阳极电流的变化。当电极的结构适当时,栅极电位很小的变化就会使阳极电流发生很大的波动。这就是三极管可利用来放大电信号的原理基础。由于电子的质量非常小,惯性极微,电子可以从阴极非常快地飞到阳极。所以当频率不十分高时,可以认为三极管是无惯性的放大元件。

电子管的进一步发展是与无线电技术的发展密切相关的。三极管发明以后,很快就应用到无线电工程中去。1913 年制作成电子管再生式接收机,并且第一次用电子管振荡器得到了高频等幅振荡,成功地取代了当时的火花振荡器。从 1913~1920 年这一时期起,无线电技术逐步走上“电子管化”道路,直到现在。

电子管的发展使无线电技术在很短时期内取得很大的成就,另一方面,无线电技术的发展也影响着电子管的研究,要求有更完善的、能适应新的工作需要的电子管。这些要求推动着电真空器件工作者不断地推陈出新,制造出新颖的和品质更好的电子管。

例如,1920 年以后,广播事业开始蓬勃发展,并逐渐从长波过渡到中波和短波,即向更高的频率发展。由于三极管中有很大的

极間电容,在高频时不能得到良好的放大作用,因此就需要有比三极管更完善的电子管。

在1924年做成了有两个栅极的屏栅四极管。屏栅加在控制栅和阳极之間,利用屏栅极来减小控制栅和阳极間的电容。四极管中阳极和屏栅极相对于阴极都处于較高的正电位,因而阴极发射出来的电子打上时会引起二次电子发射。在一定的条件下,这些二次电子将在屏栅和阳极間轉移,严重地影响电子管的正常工作。

1932年在屏栅和阳极間加入了第三个栅极,制成了五极管。第三个栅极用来抑制二次电子的交换,故称为抑制栅。这样,阳极和控制栅的电容便减小了几千倍,成功地克服了三极管不能用在高频的缺点。

超外差接收方法的发明,引起了多栅混频管和变频管的出現(1934~1935年);此外还出現了很多种复合管,使无綫电接收机中的电子管数目大大减少。

无綫电电子学的进一步发展,特别是本世纪四十年代以来,雷达技术等的应用和迅速发展,使无綫电技术进入微波(超高频)波段。普通的电子管逐渐显出它的缺点:額定功率低落、工作不稳定、电路效率低等等,說明普通电子管已不能适用于超高频工程。

在超高频下,电极引綫的电感、电极間的电容已成为振荡回路中的重要部分,使放大級处于不利的相位关系,引起放大不稳定和产生自激的倾向,增大了栅极电路的激励功率,增大了介质損耗。由于频率的增高,电子在电极間的飞越時間逐渐接近信号的振荡周期,因而电子管已經不是一个无慣性元件。所有这些都使得放大級的增益随着频率的增高而减小。因此原来的三极管和四极管已不能运用。

在解决設計新的超高频三极管的問題上,苏联工程师杰維亞

特柯夫設計成了电极引出綫短而粗(后来采用盘形引出端)、极間距离很小的电子管。这种电子管可和同軸綫型諧振腔配合使用。利用这种电子管,在波长10厘米以下可得到50~150毫瓦的功率輸出,也可作为超高频接收机的前置放大級。目前盘形同軸綫型电子管应用頗广。此外还制成大功率的諧振腔四极管。

所有上述电子管具有一个共同的特征,就是管内电流的流通都取决于阴极表面的靜电場,因此称为靜电控制电子管。

为了满足日益向超高频发展的需要,还創造出依据新的工作原理工作的电子管——电流动态控制的电子管,因不属本书范围,就不加以討論了。

电子管随着无綫电电子学已經愈来愈广泛地深入到国民經济、国防建設和科学技术的各个領域中去。在无綫电定位、导航、电视、遙控、天文、气象、測量技术、計算技术、人造卫星、宇宙飞船等等領域內都使用着大量的电子管。

随着电子管应用面的推广,对它的要求也愈来愈高,电子管的类型結構也不断地发展着。

現代电子管的发展主要针对下列一些要求:能运用于新的无綫电波段,能在复杂的气候条件下工作,能耐受强烈的振动,大大延长使用寿命,提高工作的可靠性,縮小体积,增加有用功率等。

現在已制成了能工作在10000兆赫以上的超高频用三极管、耐冲击負載15000重力加速度的耐震电子管、預期寿命长达20年以上的长寿命管、体积仅有回形針大小的微小型电子管、能耐高温到 600°C 以上的耐高温电子管以及有用輸出功率达500千瓦以上的大功率电子管等。

1948年半导体三极管出現后,由于它能起某些电子管的作用,因此很快就引起了各方面的注意。近十余年来半导体器件已有了巨大的发展。和电子管相比,半导体器件的优点是消耗功率小、寿命长、体积小,能耐震等。但是它們在使用上也受到某些限制,如

輸出功率小，工作頻率低、噪声大、不耐高温和輻射等。因而半导体器件不能完全取代电子管。实际上，近年来电子管也获得了巨大的进展，这就充分說明了这一点。所以两者的关系并不是相互排挤，而是相互补充，配合发展。

二、靜电控制电子管的分类

电子管按其主要用途可分为：接收放大管、发射管、調制管、整流管等。

1. 接收放大管——主要是用在接收机和小功率放大器中放大交流信号。按照其应用的范围，接收放大管又可分为如下几类：

(1) 声頻电压放大管——用以放大声頻信号，主要是三极管和五极管；

(2) 高频电压放大管——用以放大一直到 30 兆赫的高頻信号，主要是五极管；

(3) 超高频电压放大管——用以放大超高频信号，主要是圓盘封接三极管；

(4) 低频功率放大管——用于接收放大设备的輸出端，放大低频功率，主要是电子注功率四极管；

(5) 檢波管——在接收机中作檢波用，主要是两极管；

(6) 变频管——在超外差式接收机中作改变接收信号頻率之用，主要是七极管、三极六极复合管和三极七极复合管；

(7) 特种管，如調諧指示管，二次发射管等。

2. 发射管和調制管——用在高频振蕩器和无线电通訊设备中放大高频功率。按其工作状态又可分为連續工作和脉冲工作两大类。

(1) 連續工作——功率从 500 千瓦到 50 毫瓦的大、中、小功率管采用不同结构的三极管、四极管和五极管。通常大功率管大多是三极管，因多极管不易冷却。大功率管一般采用水冷或风冷。

超高频波段小发射管大都是圆盘形三极管。

調制管的結構和发射管类似，但对其特性的要求不同。調制管的特性要具有良好的直綫性。

(2) 脉冲工作——不同脉冲寬度和不同脉冲功率的大、中、小功率电子管主要是三极管和四极管。大脉冲电子管的脉冲功率可达几十兆瓦。

3. 整流管——用以把交流电压轉变成直流电压，一般是两极管或双两极管。按其工作电压的高低又可分为低压和高压两类。

第 一 章

关于电子管理論的基础知識

电子管的工作是由真空中电子的运动来完成的。电子管中的物理現象和特性与管内电子的运动密切相关，而电子的运动則决定于管内的电磁場。因此为了透彻理解电子管内的物理現象，先來回顾一下决定靜电場的方法和电子在电磁場中运动的規律是有益的。

§ 1.1 靜电場的基本定律

在均匀的电介质中，两个靜止的点电荷之間的相互作用力可用庫侖定律来表达：

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r^2} \quad (1.1)$$

如果力 F 的单位用牛頓，点电荷 q_1 和 q_2 的单位用庫侖，点电荷之間的距离 r 用米表示，則上式中真空介电系数

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \times 10^9} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ 法/米}$$

而相对介电系数 ϵ_r 則是无量綱的常数。

按照場論的观点，庫侖定律可以解釋如下：由于点电荷 q_1 所在的位置有另一点电荷 q_2 的电場，所以有式(1.1)所决定的力 F 作用于点电荷 q_1 上。

电荷 q 在电场中所受的力与电荷的量成正比, 这个力的相对值

$$E = \frac{F}{q} \quad (1.2)$$

可以作为电场强弱程度的量度, 称为电场强度。

比較(1.1)式和(1.2)式, 可以求出点电荷 q 的电场强度

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \quad (1.3)$$

电场强度的方向与力的方向一致。

根据迭加原理, 几个点电荷所产生的合成电场强度, 等于各个点电荷单独存在时所产生的电场强度的矢量和:

$$E_n = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_n \frac{q_n}{r_n^2} \quad (1.4)$$

在静电场中某一点的电位, 在数值上等于电场力把单位正电荷从該点移动到零电位点所作的功。这个功的大小只与电荷的最初和最后的位置有关, 而与电荷移动的路径无关。将无限远点作为零电位点, 则可求得距离点电荷 q 为 r 的点的电位

$$U = \int_r^\infty F dr = - \int_\infty^r \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon r} \quad (1.5)$$

根据迭加原理, 对于任意数目的点电荷,

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_n \frac{q_n}{r_n} \quad (1.6)$$

按照电位的定义, 在电场力的作用下, 单位正电荷移动 dl 的距离所作的功等于电位的降低量, 即

$$-dU = E_l dl$$

因此

$$E_l = - \frac{\partial U}{\partial l}$$

即电场强度沿 l 方向的分量等于电位对变量坐标的偏导数加以負号, 也就是說, 电场强度等于电位梯度的負值, 即

$$E_l = - \text{grad } U = - \frac{\partial U}{\partial l} \quad (1.7)$$

当应用直角坐标时, $U=U(x, y, z)$ 而

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}$$

具有相同电位的面 ($U=\text{常量}$) 称为等位面。任意的面与等位面相交得到的綫称为等位綫。因而, 对于一个点电荷, 半径为 r 的球的表面是等位面; 而用一个通过点电荷的面与点电荷的电場相截, 則等位綫是一个圓。

如果在平面上画出等位綫以表示电場的图象, 并使每相邻两等位綫間的电位差相等, 即可看出, 等位綫愈密的地方电場强度愈强, 而电位差除以綫間距离即等于該处电場强度的平均值。

假如在图上画出电力綫或电感应綫, 則电場的图象就更为清楚; 电力綫由正电荷出发終止在負电荷上。电力綫与等位綫正交, 綫上每一点的切綫与电場一致。按合理化的 M. K. S. 单位制, 电感应强度(电位移)和面电荷密度相等, 而电感应强度 D 和电場强度之間有下列关系:

$$D = \epsilon E \quad (1.8)$$

穿过一閉合面的电感应强度矢量的通量和該閉合面內所包含的电荷量之間的关系, 服从高斯定律。

設在一球中心放一点电荷 q , 則穿过球面上 dS 面的电感应强度矢量的通量为 $D \cdot dS$, 而穿过球面的总电通量

$$\oint D \cdot dS = \oint \epsilon E dS = \epsilon \frac{q}{4\pi \epsilon r^2} \cdot 4\pi r^2 = q$$

由此可見, 穿过球面的电感应强度矢量的通量决定于球內的电荷量, 与球的半径則无关。因此, 对于內中包含很多点电荷的任意形状的閉合面, 这关系式同样成立, 即穿过任意閉合面的电感应强度矢量的通量等于該閉合面內所含的电荷总量:

$$\oint D \cdot dS = \sum_n q_n = \int_V \rho dV \quad (1.9)$$

式中: ρ ——电荷的体密度; V ——閉合面所包含的体积。