

# 微波电子管原理

上册

南京工学院

杨祥林 徐淦卿 韦钰 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书介绍微波电子管的基本原理。包括七章：微波三、四极管，速调管，行波管，线形注微波管大信号分析，注入式正交场管，磁控管，分布发射式正交场管。重点讨论各类电子管中电子注与电磁场相互作用、转换能量的机理；对一些微波管的结构、特性也作了简单说明。全书分上、下两册出版，上册包括前四章。

本书是为高等学校电真空器件专业编写的教材。对于电子学和电子物理方面的其他专业的师生也有参考价值，亦可供从事微波电子管研究、设计和生产工作的研究人员及工程技术人员参考。

## 微波电子管原理

### 上 册

南京工学院

杨祥林 徐淦卿 韦 钰 编

\*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张15 344千字

1980年6月第一版 1980年6月第一次印刷 印数：0,001—8,200册

统一书号：15034·2009 定价：1.55元

# 前 言

本书系高等学校工科电子类电真空器件专业统编教材之一。全书分上、下两册出版。上册四章，55学时；下册三章，40学时。

本书的重点是阐述电子流或电子注与电磁场相互作用、转换能量的基本规律，这是近代各种微波管振荡器和放大器的理论基础。根据各校多年来的教学实践，全书内容和体系的安排，没有把各种相互作用原理的一般问题集中论述，而是从实际出发，结合各类具体微波管的分析，加以概括，提高到一般理论。在编排上，第一章为微波三、四极管，第二章为速调管，第三章为行波管，第四章为线形注微波管大信号分析，第五章为注入式正交场管，第六章为磁控管，第七章为分布发射式正交场管。整个内容体系的安排，贯穿了从静态控制到动态控制，从间断相互作用到连续相互作用，从驻波场到行波场，从小信号到大信号，由浅入深，由简到繁，由特殊到一般的原则。全书的重点始终集中在电子流或电子注与电磁场相互作用过程的物理概念和实现有效能量转换的分析上。

第一章的内容，是为不开设电子管课程但又需要学习电子管和微波三、四极管原理的基本知识的学校编写的，已设有电子管原理课的学校可以不必讲授。

本书与过去各校所用的教材相比，在内容的广度和深度上都有较大的变化。在管种类型方面，增加了耦合腔行波管、注入式和分布发射式正交场管。在基本理论方面，加强了微波三、四极管中大信号状态下电子过程的分析、空间电荷波理论、多腔速调管小信号增益及注入式和分布发射式正交场管的分析，并增加了线形注微波管大信号分析一章。在使用本书时，可根据各校具体情况，删节选用各章节内容，着重把基本理论、基本内容、基本管种学好，有些内容可作为学生自学或进一步学习时的参考。

本课程的先修课程主要有《电磁场理论》、《电子光学》、《微波技术》及《计算机原理和应用》等，学习本课程应具备有关这方面的基础知识。为了前后课程的衔接及教学上的方便，先修课程的有关内容在本书中亦作了适当和必要的阐述，例如第三章中慢波线，第五、六章中的电子运动等。在进行教学时，这些章节可以不讲或只作简单的复习性的讲解。

参加本书审稿工作的有：浙江大学周文（上册主审）、陈抗生、胡文豪，西安交通大学钱慰宗（下册主审）、林书铨、罗文麟，以及清华大学、北京大学、成都电讯工程学院、南京工学院、科学院电子所、四机部一四一二所的有关同志。编者对他们所提的宝贵建议和意见，谨表示深切的谢意。在全书的编写过程中，南京工学院和成都电讯工程学院电真空专业的许多同志，对书稿的修改和抄写等工作提供了不少有益的意见和帮助，在此一并表示感谢。

由于我们业务水平不高，时间短促，因此书中缺点、错误一定不少，希读者不吝指正。

编 者

# 目 录

绪论 .....	1	输入电导 .....	40
<b>第一章 微波三、四极管</b>		1.7-4 小信号状态下微波三、四极管 的跨导 .....	43
§ 1.1 概述 .....	4	§ 1.8 大信号状态下的电子现象 .....	43
1.1-1 普通结构电子管在超高频工作 时所遇到的问题 .....	4	1.8-1 电子在阴-栅间的运动 .....	44
1.1-2 微波三、四极管的发展和演变 .....	6	1.8-2 阴极发射电流 .....	46
§ 1.2 电子管中的空间电荷效应 .....	8	1.8-3 阴极回轰功率 .....	49
1.2-1 空间电荷效应 .....	9	1.8-4 栅极平面上的电子电流和 电子速度 .....	50
1.2-2 二分之三次方定律 .....	11	1.8-5 栅-阳空间中的电子现象 .....	51
§ 1.3 电子管的栅控原理 .....	14	1.8-6 微波四极管中的电子现象 .....	51
1.3-1 三极管中的静电场 .....	14	§ 1.9 微波三极管振荡器 .....	52
1.3-2 等效二极管 .....	16	1.9-1 三回路振荡器的振荡条件 .....	52
1.3-3 阳极电流的计算 .....	17	1.9-2 双回路振荡器 .....	54
1.3-4 三极管静态参量 .....	17	1.9-3 三极管振荡器起振和幅值 稳定的条件 .....	55
§ 1.4 电子渡越时间和渡越角 时-空图 .....	21	1.9-4 微波三极管振荡器的典型结构 .....	56
1.4-1 电子渡越时间和渡越角 .....	21	§ 1.10 微波三、四极管的极限频率 .....	57
1.4-2 时-空图 .....	25	1.10-1 微波三极管的电极结构尺寸与 极限频率的关系 .....	58
§ 1.5 感应电流 .....	26	1.10-2 小信号状态下微波三、四极管中阴 极发射能力对极限频率的影响 .....	59
1.5-1 电荷运动引起的感应电流 .....	26	1.10-3 大信号状态下微波三极管的 极限频率 .....	60
1.5-2 拉姆定律 .....	28	1.10-4 极限频率的近似估算 .....	62
1.5-3 管内电流分析 .....	29	§ 1.11 小结 .....	63
1.5-4 稳定状态下的感应电流 .....	29	<b>第二章 速调管</b>	
1.5-5 密度调制电子流通过平板间隙 时的感应电流 .....	30	§ 2.1 概述 .....	66
§ 1.6 电子流与电场的能量交换 .....	32	2.1-1 速调管的基本结构和工作原理 .....	66
1.6-1 电子流与直流电场的能量交换 .....	32	2.1-2 速调管的发展和类型 .....	67
1.6-2 电子流与交变电场的能量交换 .....	33	§ 2.2 电子注的速度调制 .....	69
1.6-3 电子流和交变电场相互作用 能量的计算 .....	34	2.2-1 理想间隙的速度调制 .....	69
§ 1.7 小信号状态下的电子现象 .....	35	2.2-2 电子注耦合系数 .....	70
1.7-1 小信号条件下二极管中的 电子现象 .....	36	2.2-3 输入间隙的电子注负载 .....	76
1.7-2 超高频下二极管中的电子电流 .....	39	§ 2.3 电子注的简单群聚理论 .....	77
1.7-3 小信号状态下三、四极管的			

2.3-1 单级漂移空间的简单群聚 .....	77	3.2-4 行波管的小信号增益 .....	149
2.3-2 空间电荷效应 .....	82	§ 3.3 行波管小信号理论的进	
2.3-3 大信号非线性效应 .....	86	一步讨论 .....	151
§ 2.4 输出间隙中的能量转换和双腔		3.3-1 普遍情况下的特征方程 .....	151
速调管放大器 .....	89	3.3-2 传播常数的解 .....	152
2.4-1 输出间隙中的能量转换 .....	89	3.3-3 起始损耗和增益计算 .....	155
2.4-2 双腔速调管放大器 .....	93	§ 3.4 输出功率、效率和非线性现象 .....	157
§ 2.5 拒斥场中的电子群聚 .....	95	3.4-1 行波管的输出功率和效率 .....	157
2.5-1 拒斥场中的电子群聚 .....	96	3.4-2 提高行波管效率的方法 .....	159
2.5-2 反射速调管谐振腔间隙的		3.4-3 行波管的非线性失真 .....	161
电子导纳 .....	98	§ 3.5 集中衰减器和高频切断 .....	162
2.5-3 反射速调管振荡器 .....	100	3.5-1 行波管的自激振荡 .....	162
§ 2.6 空间电荷波 .....	103	3.5-2 自激振荡的防止 .....	164
2.6-1 无界电子注中的空间电荷波方程 .....	104	§ 3.6 螺旋线行波管 .....	166
2.6-2 空间电荷波的性质及分布 .....	107	3.6-1 螺旋慢波线的色散特性 .....	166
2.6-3 电子注的传输线类比 .....	111	3.6-2 螺旋慢波线的耦合阻抗 .....	171
2.6-4 圆柱形漂移管中电子注的		3.6-3 螺旋慢波线的功率限制及	
空间电荷波 .....	111	环杆慢波线 .....	173
§ 2.7 多腔速调管的小信号增益 .....	116	3.6-4 螺旋线行波管的实例 .....	175
2.7-1 多腔速调管的定性分析 .....	116	§ 3.7 高功率行波管 .....	178
2.7-2 多级群聚的空间电荷波分析 .....	117	3.7-1 耦合腔慢波线的色散特性和	
2.7-3 多腔速调管的小信号增益 .....	120	耦合阻抗 .....	178
§ 2.8 多腔速调管的输出功率、		3.7-2 耦合腔行波管的基本工作原理 .....	182
效率及频宽 .....	123	3.7-3 耦合腔行波管内的寄生振荡 .....	184
2.8-1 输出功率和效率 .....	123	3.7-4 实用耦合腔慢波线和耦合	
2.8-2 中间腔偏谐的影响 .....	124	腔行波管 .....	185
2.8-3 幅值特性 .....	126	§ 3.8 电子注和返波的相互作用 .....	188
2.8-4 频宽 .....	127	3.8-1 电子注与返波相互作用的	
§ 2.9 速调管的结构、特性与应用 .....	130	定性分析 .....	189
2.9-1 多腔速调管的结构 .....	130	3.8-2 返波管的特征方程 .....	190
2.9-2 多腔速调管的特性及应用 .....	134	§ 3.9 噪声 .....	193
§ 2.10 小结 .....	135	3.9-1 噪声的定义 .....	194
		3.9-2 行波管中的噪声来源 .....	195
		3.9-3 降低行波管噪声的方法 .....	197
		§ 3.10 小结 .....	197

### 第三章 行波管

§ 3.1 概述 .....	138
§ 3.2 行波管的小信号理论 .....	141
3.2-1 行波场对电子注的作用 .....	142
3.2-2 电子注交变电流对行波场的作用 .....	144
3.2-3 行波管的特征方程及其简化情况	
下的解 .....	147

### 第四章 线形注微波管的大信号分析

§ 4.1 概述 .....	200
§ 4.2 大信号条件下电子群聚的	
分析方法 .....	202
4.2-1 分析方法比较 .....	202

4.2-2 两种电子注变量体系.....	203	4.5-1 用格林函数求解空间电荷场.....	220
§ 4.3 漂移空间的电子群聚.....	204	4.5-2 圆柱坐标系统中的格林函数.....	222
4.3-1 归一化变量和电子运动的相轨迹.....	204	4.5-3 一维圆盘模型和田炳耕的空间 电荷场表达式.....	224
4.3-2 空间电荷场和非线性群聚 工作方程.....	206	§ 4.6 工作方程的数值解法及 其结果.....	226
4.3-3 群聚电流的计算.....	209	4.6-1 相互作用过程的初始条件.....	226
§ 4.4 电子注与行波场的相互 作用分析.....	212	4.6-2 工作方程的数值解法.....	228
4.4-1 分析模型和基本方程.....	212	4.6-3 行波管工作参量的计算.....	229
4.4-2 归一化变量.....	214	4.6-4 计算结果举例.....	230
4.4-3 行波管的工作方程.....	216	§ 4.7 小结.....	233
§ 4.5 空间电荷场.....	220	主要参考书目.....	234

## 绪 论

### 微波电子管的发展及《微波电子管原理》的研究对象

微波电子器件在现代无线电技术中起着极其重要的作用，目前这一科学技术领域正在稳步向前发展。广义的微波电子器件，包括在微波领域内应用的一切有源元件，例如各种电真空器件、微波声电器件以及激光器件等，门类很多。

微波电子管的发展已有五十多年的历史。目前已建立了一套系统的理论，研究和生产了各种类型的管子，内容丰富、品种繁多。但是，近代主要的微波电子管都分属于两大类：一类是静电控制微波电子管，另一类是动态控制微波电子管。最初的微波电子管都是属于第一类，它是在普通低频电子管基础上发展起来的。1904年发明的低频电子管，其基础是栅极静电控制。静电控制低频电子管，当工作频率提高后，由于引线电感、极间电容及渡越时间的影响，已不能满意地工作。通过缩小尺寸、改进结构，出现了小型管、橡实管、门钮管、灯塔管、圆盘管和谐振腔管等静电控制微波三、四极管，使电磁波谱频率扩展到了分米波和厘米波段。1921年发明的磁控管属于第二类微波电子管，即动态控制微波电子管。通过约廿年的研究，这种管子就发展成为一种大功率多腔磁控管振荡器，有力地推动了雷达技术的发展。电压调谐磁控管、泊管、同轴和反同轴磁控管以及各种快速调谐磁控管，都是在此基础上发展起来的正交场微波电子管，它们在雷达、电子对抗等技术领域正在起着巨大的作用。1939年发明的速调管是另一类动态控制微波电子管。这类管子的发展，可以分为以低功率、高功率和宽频带为主要特征的几个阶段。初期多限于反射速调管、双腔速调管等低功率管的研究。第二次世界大战后，高功率多腔速调管迅速发展起来。到五十年代中期，展宽频带的工作广泛开展，与此同时，毫米波速调管的研究工作亦迅速发展。所以，速调管在扩展电磁波谱范围和提高微波放大器的放大倍数及输出功率方面，都取得了重大的进展，起了重要的推动作用。1943年提出的行波管原理，在展宽微波放大器的频带方面起了转折作用。由于应用了非谐振式的慢波线代替谐振腔作为微波电路，使微波放大器的频带可以达到几个倍频程以上，成为微波领域无可匹敌的宽频带放大器。行波管问世以后，微波电子管的研究和应用工作进入了新的发展时期。在应用和理论研究的推动下，行波管原理与速调管和正交场微波管结合，产生了分布作用速调管、耦合腔行波管、行波速调管、注入式和分布发射式正交场放大管等许多新的微波电子管。在设计和生产方面，则朝着低噪声、高功率、高效率、宽频带、小型化、多功能、长寿命、高可靠方向发展。其中，行波管的发展尤为迅速，设计和生产了各种低噪声行波管、中小功率行波管、耦合腔行波管、栅控双模行波管和长寿命卫星行波管，对进一步发展雷达、通信、电子对抗和空间科学起了重要作用。

正交场管、速调管、行波管是三种主要的动态控制微波电子管，它们已使电磁波谱扩展到毫米波段，脉冲功率达到百兆瓦级。随着微波电子学理论研究工作的深入和日益增长的应用需要，人类对继续开拓电磁波谱的兴趣愈来愈浓，特别是对大功率短波长电磁波源

的需要更为迫切。由于速调管、行波管等经典微波电子管所产生的电磁波频率都受管子尺寸的限制，要按照这种经典微波电子管原理，靠自由电子来产生和放大毫米波、亚毫米波大功率电磁波是极其困难的。最近几年来的理论和实验研究，突破了过去旧观念的束缚，利用相对论性自由电子受激辐射原理，发展了各种大功率毫米波、亚毫米波和光激光器；回旋管、强相对论回旋脉泽和自由电子激光器就是其中的几个例子。从而使微波电子学又进入了一个新的发展阶段，也为无线电技术开辟了新的发展前景。

微波电子管的发展在内容上是非常广泛和丰富多采的。本书的主要任务是讨论微波三、四极管、速调管、行波管、磁控管和正交场放大管等的基本原理和结构特性。

## 微波电子管的应用

电子管的发明和发展，使电机工程发展产生了无线电工程，形成了无线电电子学这一新兴科学领域。微波电子管的发明和发展，使无线电工程改变了结构面貌，产生了微波技术和微波工程。微波电子管的应用和微波工程的发展，首先是从军事电子技术和空间科学开始的。雷达、导航、无线电制导、遥控遥测、电子对抗、卫星通信等，都是微波电子管应用的辉煌成果。微波电子管在散射通信、中继通信、电视广播等民用领域也有着极为重要的应用。

随着科学技术的发展，微波电子管在工业、农业、地质、海洋、天文、气象、医学、生物以及动力等各个领域也得到了愈来愈广泛的应用。例如，利用多光谱微波全息技术，可以测定地球表面的结构和地质特性，为开发地质资源提供科学资料；利用微波波谱学方法，可以测定海洋表面温度、海浪、流量分布、海水污染、淡水-海水边界、冰块分布及其运动情况，为开发海洋资源开辟道路；利用微波功率源推动加速器，可以产生高能粒子，对物质结构的基本研究提供重要手段；利用微波能量在人体内的衰减特性，可以研究人的生理现象；利用微波深入人体组织内的加热效应，可以消除病变；利用生物组织的微波波谱特性，可以测定机体组织的成分含量，进行微波诊断和医疗；利用微波透入物体后产生的热效应，还可以对农产品、木材、矿藏和各种工业品进行加工、消毒、杀菌；大功率的微波功率还可以进行空间传输、驱动车辆等等。所以，微波电子管在无线电技术、工农业生产及科学研究等各个领域，都有极其重要的应用。

## 《微波电子管原理》的基本内容

微波电子管的品种很多。各种不同类型的微波电子管，由于各自的功能不同，因此它们的构成和原理也各不相同。

微波三、四极管，速调管，行波管，磁控管，正交场放大管和回旋管是最重要的几种微波电子管。这些管子的功能都是产生和放大微波信号。为了完成微波信号的产生和放大，必须有一符合要求的电子注和微波电路。所以，电子注的形成、谐振腔或慢波系统以及电子注与电磁场间的相互作用三个问题，就成了微波电子学的三个基本内容。从设计和制造方面看，工艺、材料和测试等则是微波管工程的重要内容。本课程主要阐述电子注与电磁场间的能量转换，这是各种近代微波管振荡器和放大器的理论基础。

电子注与高频场间的相互作用，是实现能量转换的中心问题。可以把这种相互作用过



程分成两个方面来加以研究，即电磁场对直流电子注作用产生交变电流和具有交变密度的电子注对高频场的反作用，激励电磁系统，将直流能量转换为微波能量。在不同的微波电子管中，相互作用的过程和形式是不完全相同的。在微波三、四极管中，栅极上的微波信号直接控制阴极的发射，得到交变电子流，交变电子流通过栅阳空间时，在谐振腔中产生感应电流，激励谐振腔，谐振腔就从电子流接收到能量。在速调管中，输入谐振腔中的微波电场对直流电子注作用，先产生速度调制，此后还需经过一段漂移，使速度调制电子注通过群聚才能转为密度调制电子注，密度调制电子注通过谐振腔间隙，激励谐振腔，输出微波能量。在此，三、四极管中栅极控制电子流密度的作用，分成了速度调制和由速度调制电子注经过漂移转换产生电子群聚两个过程。所以，速度调制、群聚、激励谐振腔是速调管中依次发生的三个基本物理过程。在行波管及正交场微波管等行波型微波电子管中，电子注与高频场间的相互作用过程与速调管中十分相似，但是也不完全相同。一方面，行波电磁场对电子注进行速度调制，与此同时，受调制的电子注又产生群聚。而当电子注刚刚出现了微弱的群聚，又立即激励慢波电路，将电子注的直流能量转换为微波能量，使微波信号得到增长。因此，调制、群聚、输出能量三个过程是同时进行的，是一种分布式的相互作用过程。本书的重点就是分析各种类型的相互作用过程的基本概念和基本规律，并运用这些基本理论去指导微波电子管的工程设计，解释微波电子管中出现的各种物理现象和基本特性。

分析电子注与电磁场间的相互作用，最普遍的方法是把电磁场方程和电子运动方程结合起来求解。但在实际微波管中，电子注与高频电路的形状、特性是多种多样的，而且比较复杂。为了简化分析过程，便于描述相互作用过程的物理图象，在全书的分析中，都采用了一些近似的等效电路模型，把全部微波谐振腔用等效集中参数谐振回路来代替，把全部慢波线用均匀的分布参数等效传输线或周期加载的集中参数电路来代替，把场的问题转为路的问题来分析。对于电子流或电子注，也都采用了一些近似的分析模型。例如，在线型注微波管中都采用均速一维电子注模型，在正交场管中则采用层流和薄电子注模型等。

采用不同的概念来处理电子注，可以得到不同的理论。若以考察电子的个体运动为基础来研究电子注与场的相互作用，则为运动学理论；若将电子注视作连续媒质，从波动的观点来描述电子注的运动过程和群聚状态，则为空间电荷波理论。运动学理论具有处理非线性群聚和超越现象的能力，是一种大信号非线性理论。空间电荷波理论则是一种小信号线性理论。对于不同的微波管或同一管子在不同的工作状态，可以用不同的理论方法来分析。

全书的讨论均未考虑相对论效应，这并不是说在所有微波管中这种影响都不重要。事实上，在高功率微波管中这种效应是必须加以考虑的。另外，由于微波管中电子能量都显著地超过系统的量子能，因而全书的分析都是以经典理论，而不是以量子论来进行。

书中所用物理量，除个别专门说明的以外，全部采用国际单位制。

# 第一章 微波三、四极管

## § 1.1 概 述

微波三、四极管是在普通三、四极管的基础上发展起来的。工作频率的不断提高,是无线电技术发展的一个重要趋向。随着工作频率的提高,会出现一些低频时可以忽视、而在高频时必须加以考虑,甚至成为主要考虑因素的现象。这些现象使一般电子管不适用于微波波段。频率的不断提高对电子管和回路设计提出了新的要求,也促进了微波电子管的发展。

### 1.1-1 普通结构电子管在超高频工作时所遇到的问题

在低频时有效地用来作为振荡、放大用的普通电子管,在微波波段应用时遇到了很大的困难。例如用作振荡器时,振荡功率随着频率的提高而急剧下降。几种电子管的输出功率和频率的关系如图 1-1 所示。当用作放大器时,输入信号源需要消耗相当大的功率。在更高的频率下,有的电子管就完全失去了振荡或放大作用而不能工作。

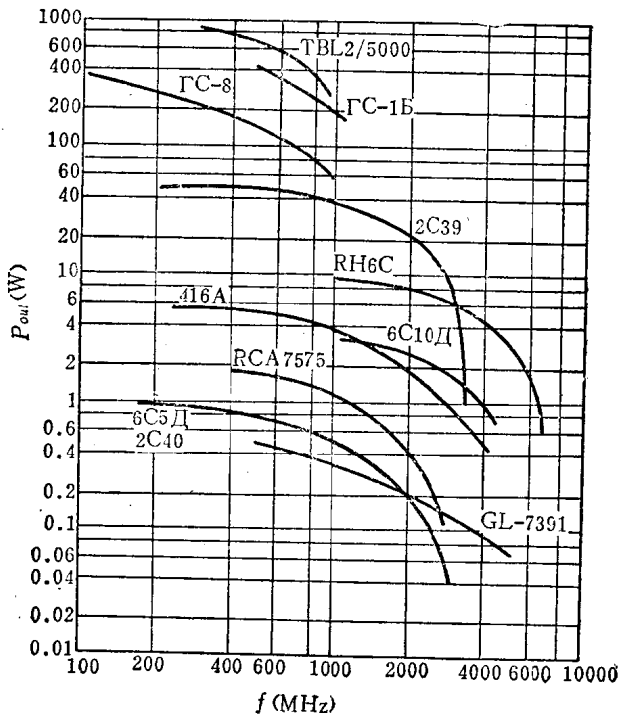


图1-1 几种电子管的输出功率和频率的关系曲线

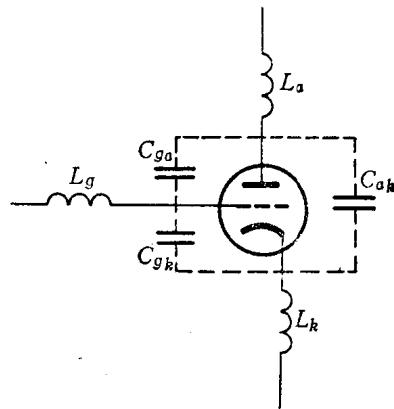


图1-2 考虑极间电容和引线电感的三极管等效电路

总的说来,普通电子管不能在超高频下工作,主要受两种因素的限制。一是电子管的电抗效应,二是电子惯性效应。对于米波和分米波的低频段来说,电子惯性效应尚不显著,一般可忽略,此时电抗效应是主要的。在分米波的高频段以及厘米波段,电子惯性效应就变得严重起来,必须加以适当的考虑。

#### (一) 电子管的电抗效应

所谓电抗效应就是电子管内极间电容、引线电感所引起的效应。

电子管的电极及其引线具有一定的电容和电感。例如在图 1-2 所示的三极管中,就具

有阴极引线电感  $L_k$ 、栅极引线电感  $L_g$ 、阳极引线电感  $L_a$  以及三个极间电容  $C_{ak}$ 、 $C_{gk}$  和  $C_{ga}$ 。这些电容和电感的数值都很小，但是在频率非常高时，它们与外接谐振电路的电感和电容就可以相比拟了。

集中参数谐振回路的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.1-1)$$

当波长等于 30 厘米时，如果电容为 1 微微法，电感只需 0.025 微亨；而直径为 1 毫米、长度约 3 厘米的一根金属导线就有这样大小的电感。

设想把所有各电极在管座处短路。令  $L$  为管内等效电感、 $C$  为管内等效电容，则按式 (1.1-1) 计算的频率将为电子管所能得到的最高振荡频率。显然，在这个频率工作时，电子管的输出功率和效率均等于零。根据三极管典型的极间电容和引线电感值计算的谐振波长是在分米波段，某些管子甚至在米波波段。在管外加上任何电感和电容，只能使振荡频率降低而不能使其增高。

现在来研究极间电容和引线电感对超高频工作的影响。

### (1) 引线电感对输入电导的影响

如图 1-3 所示，阴极引线电感  $L_k$  跨接在阳极电路和栅极电路中。在超高频下， $L_k$  造成两电路之间的耦合，结果出现输入电导而消耗信号功率。

设阴-栅间的交变电压为  $\dot{V}_g$ ，略去电子惯性效应，则阳极电流和栅极电压同相，即

$$\dot{i}_a = g_m \dot{V}_g \quad (1.1-2)$$

式中， $g_m$  是三极管的跨导； $\dot{i}_a$  和  $\dot{V}_g$  分别为阳极电流和栅极电压的复数幅值。

阳极电流流过阴极引线电感，在引线上产生电压降  $\dot{V}_{L_k}$ ，它领先于阳极电流  $90^\circ$ ，

$$\dot{V}_{L_k} = j\omega L_k \dot{i}_a \quad (1.1-3)$$

因此，输入端电压  $\dot{V}_{in}$  是  $\dot{V}_g$  和  $\dot{V}_{L_k}$  的矢量和，即

$$\dot{V}_{in} = \dot{V}_g + j\omega L_k \dot{i}_a \quad (1.1-4)$$

阴-栅间的电压  $\dot{V}_g$  是栅极电流流过极间电容  $C_{gk}$  所产生的电压降，因此

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{i}_g}{j\omega C_{gk}} \quad (1.1-5)$$

由式 (1.1-2)~(1.1-5) 可解得输入导纳

$$Y_{in} = \frac{\dot{i}_g}{\dot{V}_{in}} = \frac{j\omega C_{gk}}{1 + j\omega L_k g_m} \approx j\omega C_{gk} (1 - j\omega L_k g_m) = \omega^2 L_k C_{gk} g_m + j\omega C_{gk} \quad (1.1-6)$$

即由于阴极引线电感的作用，产生了输入电导

$$G_{in} = \omega^2 L_k C_{gk} g_m \quad (1.1-7)$$

由式 (1.1-7) 可见，随着工作频率的提高，由阴极引线电感引起的输入电导依频率平方关系增加，使电子管的工作状态恶化。

### (2) 极间电容对等效负载阻抗的影响

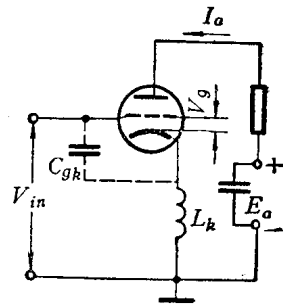


图 1-3 三极管考虑阴极引线电感影响的简化等效电路

阳极等效负载阻抗为

$$R_{oe} = \frac{L}{RC} = \frac{\omega L}{\omega RC} = \frac{Q}{\omega C} \quad (1.1-8)$$

当栅极激励电压  $V_g$  不变时,  $R_{oe}$  愈小, 则阳极效率愈低。显然, 当  $R_{oe}$  值趋近于零时, 输出功率和效率也趋近于零。当频率增加时, 式 (1.1-8) 中品质因数  $Q$  的数值下降,  $C$  值虽然可以调整, 但受极间电容的影响, 不可能无限减小。总之,  $R_{oe}$  的值势必随着频率的提高而减小, 结果使效率降低、阳极耗散增加。因为电子管最大阳极耗散功率是限定的, 这意味着, 当工作于较高频率时, 必须减小输入的直流功率, 也就是说, 要降低直流阳极电压使用。

## (二) 电子惯性效应

电子具有质量, 因而也有惯性。电子从阴极飞到阳极是需要时间的, 这个时间称为电子渡越时间。设有一平板二极管, 其极间距离为 1 毫米, 阳极电压为 10 伏, 则当电子在电极间作匀加速运动时, 其渡越时间约为  $10^{-9}$  秒。这相当于波长  $\lambda = 30$  厘米信号的周期。在长波、中波、短波波段以及米波和分米波的低频段内, 渡越时间小于或甚小于振荡周期, 因而电子惯性效应可以忽略。但是在更高频率的波段, 渡越时间与振荡周期可以比拟时, 电子惯性的作用将使电子管的正常工作受到很大影响。

由下面各节的分析, 我们将会看到, 电子渡越时间对电子管在超高频下工作的影响, 主要表现在下列几方面:

(1) 由于电子惯性, 出现输入电导。输入电导与频率平方成正比。毫无疑问, 这对放大器和振荡器都是不利的。

(2) 跨导变为复数, 它的幅值随频率增高而减小, 而阳极电流落后于栅极电压的相角随频率增高而增大。这就使电子管的输出功率减小, 效率下降。

(3) 由于频率增高, 电子在阴-栅间的渡越时间相对加长, 部分由阴极发射出来的电子便不能穿过栅极平面而返回阴极。于是, 阳极电流的幅值下降, 输出功率降低。而返回阴极的电子又吸取了高频电场的能量, 这不仅增加了对信号源的功率要求, 而且以高能量回轰阴极的电子也容易使阴极损坏。

(4) 电子在栅-阳间的渡越时间使阳极电流的基波分量减小, 这显然也使电子管的工作状态变坏。

此外, 一些在超高频下熟知的现象——辐射损耗、介质损耗, 也影响电子管在超高频下的工作。频率提高时, 集中参数谐振回路的品质因数也下降, 结果振荡幅值下降, 输出功率也就迅速降低。

因此, 利用静电控制原理的微波三、四极管, 不仅需要改变电子管的结构形式, 而且不能再应用集中参数的电路元件, 必须采用分布参数元件。微波三、四极管有时和电路元件结合为一个整体, 一个电子管本身就是一个微波放大器或微波振荡器。

### 1.1-2 微波三、四极管的发展和演变

由前节可知, 用于超高频的微波三、四极管, 应满足下列要求:

- (1) 渡越时间要短;
- (2) 极间电容要小;

(3) 引线电感要小;

(4) 对于应用于电视和调频系统的某些发射管来说, 电子管的负载阻抗要小。在电视和调频系统中, 工作频带很宽, 所以电路的 $Q$ 值要低。由式(1.1-8)可见, 这就要求电子管工作于较低的负载阻抗。

为了满足这四个要求, 在设计过程中会出现很多矛盾。让我们采用“提出要求, 揭露矛盾, 分清主次, 逐个解决”的方法来处理这些问题。

为了减小渡越时间, 可以采用两种办法: 一是增加电极上的电压使电子跑得快一些, 二是缩短极间距离使电子走的路程短一些。但是, 极间距离愈小愈不能用高压, 否则电子管就有被击穿的危险。这是矛盾之一。

为了减小极间电容, 也可以采用两种办法: 一是缩小各个电极的尺寸, 二是增加电极间距。增加极间距离会增加电子渡越时间, 这是矛盾之二; 而缩小电极尺寸会降低电子管的功率, 这是第三个矛盾。

为了减小引线电感, 引线长度愈短愈好。此外, 各引线间的距离愈小, 辐射损耗也愈小。但引线间距减小又会增加引线间的分布电容, 这是矛盾之四。

为了使电子管工作于较低的阻抗, 就要求电子管工作于较低的阳极电压和较大的阳极电流。较低的阳极电压意味着较长的电子渡越时间; 而较大的阳极电流需要较大的电极尺寸, 这意味着有较大的极间电容。这里又出现高频率和低阻抗的第五个矛盾。

要想在一个电子管中把这些矛盾全部加以解决是做不到的。问题的解决在于根据具体用途和具体要求, 抓住主要矛盾。在主要矛盾解决以后, 再适当考虑其他次要矛盾。

例如, 在设计工作于窄频带的小型微波三极管时, 可以不考虑功率和宽频带问题, 主要解决第一、第二两个矛盾。

要解决第一个矛盾, 我们宁肯采用缩短极间距离的方法, 因为小型管是不宜采用高压的。对于第二个矛盾, 我们既然已经决定缩短极间距离以减小渡越时间, 这样自然会增加极间电容, 因此必须缩小电极尺寸来补偿这一点。这样, 在不考虑功率的前提下, 第一和第二两个矛盾得到了统一, 即缩小极间距离和各个电极的尺寸。

这种设计思想导致了“橡实型”电子管的产生。图1-4是橡实管的结构图。实验证实, 尺寸缩小以后, 工作频率可以大大提高。橡实管的工作频率可提高到1000兆赫。

橡实管的主要缺点是功率小, 其结构设计除了尺寸小和各引线从玻壳四周引出外, 并没有什么新的概念。

微波三、四极管的进一步发展主要表现在采取减小引线电感的措施, 这就是所谓双引线管。其特征是每个电极用两条线在相反的方向引出。这样, 引线就可以看作传输线的一部分, 而用传输线代替集中参数元件构成谐振回路。用双引线代替单引线, 不但减少了辐射损耗(双线类似于传输线, 单线类似于天线), 而且有利于装配双线型的回路系统。

既然双线比单线好, 人们自然会想到, 同轴线比双线更好, 这样就产生了同轴腔管, 进一步发展到灯塔管。图1-5是灯塔管的结构。

灯塔管最主要的特点是用金属盘代替了引线。由于采用盘形电极, 引线电感实际上接近于零。这样就比较彻底地解决了引线电感问题。

从结构上看, 电子管的阴极和阳极采用圆柱形接头, 栅极采用盘片形接头, 这样能与

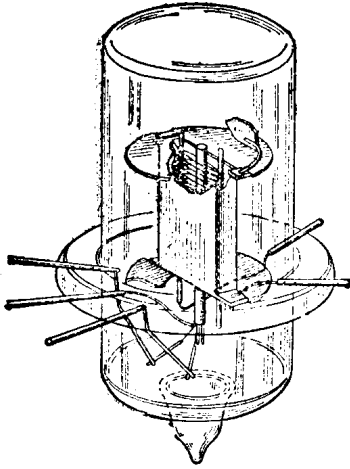


图1-4 橡胶管的结构

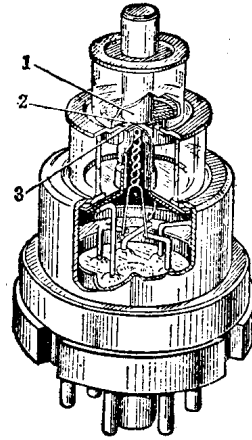


图1-5 灯塔管的结构

1—阳极；2—栅极；3—阴极。

同轴线很好地配合。电极的接头一个比一个小，叠成塔形，所以叫做灯塔管。

微波三、四极管的进一步发展是所谓金属陶瓷管。图1-6是一只平板型金属陶瓷微波三极管的结构。在原理上，它与灯塔管并没有什么区别，不同的是采用了高质量的陶瓷代替了玻璃，陶瓷间隔片的尺寸可以加工得很精确，这就保证了电极间可以有很小的间距，使工作频率得以进一步提高。此外，介质损耗也更小一些。

目前微波三、四极管的最高频率已达20000兆赫，在这个频率下输出功率为毫瓦级。大部分微波三、四极管的工作频率在3000~6000兆赫之间，输出功率在脉冲状态可达几十千瓦。工作频率再低一些的微波三、四极管，脉冲输出功率为兆瓦级。

微波三、四极管和其他微波管相比，它的优点是：

- (1) 结构简单，尺寸较小，重量较轻；
- (2) 工作电压较低，对电源电压稳定度的要求不高；

(3) 无需复杂的聚焦系统。

其缺点是工作频率较低、带宽较窄、增益较低。

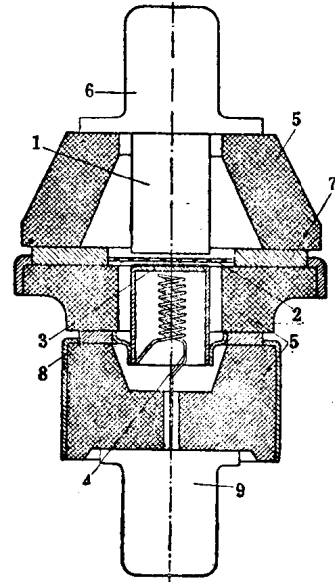


图1-6 平板型金属陶瓷微波三极管  
1—阳极；2—栅极；3—阴极；4—热丝；  
5—陶瓷；6—阳极引线；7—栅极引线；  
8—阴极引线；9—热丝引线。

## § 1.2 电子管中的空间电荷效应

我们用二极管来分析空间电荷效应。二极管是最简单的电子管，其中物理现象比较简单。但是，不论是微波三、四极管还是其他微波管，在阴极附近所发生的物理过程与二极管中所发生的物理过程非常相似。所以，详细研究二极管中电流流通的规律，可以说是研究一切电子管的基础。

### 1.2-1 空间电荷效应

把二极管接成图 1-7 所示的测量电路。如果我们在阳极上相对于阴极加上适当的正电压，然后逐步提高阴极加热电压，记录相应的阳极电流值，就可测得一条一定的阳极电压下阴极加热电压  $V_f$  对阳极电流  $I_a$  的关系曲线。改变阳极电压  $V_a$ ，又可测得另一条  $V_f-I_a$  曲线，如图 1-8 所示。从图上可以看出，当加热电压  $V_f$  比较低时，即阴极温度较低时，阳极电流随加热电压的增加而增加。当加热电压超过某一数值时，继续增加阴极加热电压，阳极电流不再增加。但不同阳极电压下所得到的阳极电流并不相同，阳极电压愈高，则阳极电流愈大。

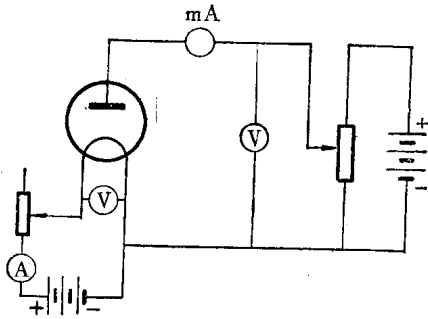


图1-7 测量二极管特性的电路

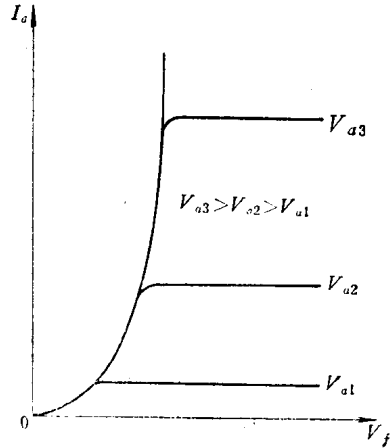


图1-8 二极管的  $V_f-I_a$  曲线

由热电子发射定律可知，在一定的阴极温度下，阴极有一定的发射电流。阴极温度愈高，则发射电流愈大。当阴极的加热电压足够高以后，增加阴极加热电压而阳极电流不变，这表明阴极的发射电流没有能全部到达阳极。

如果固定阴极加热电压，改变阳极电压，记录相应的阳极电流值，则可测得一条在一定加热电压下阳极电流对阳极电压的关系曲线。改变阴极加热电压，又可测得另一条曲线，测得的结果如图 1-9 所示。由图可见，当阳极电压较低时，阳极电流比较小，阳极电压增

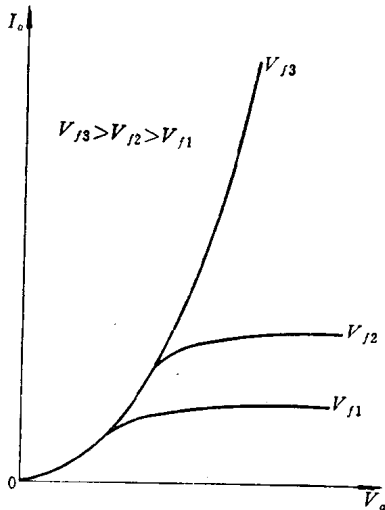


图1-9 二极管的  $V_a-I_a$  曲线

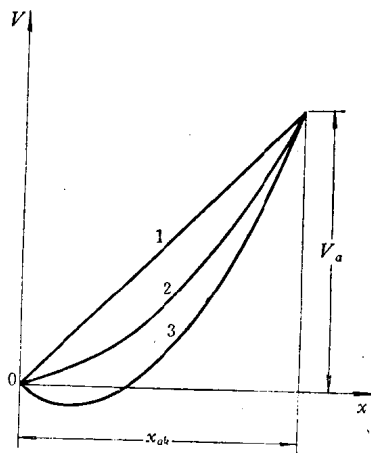


图1-10 二极管中的电位分布曲线

加, 电流增大。但是当阳极电压很高时, 阳极电流几乎不随阳极电压变化。阴极加热电压愈高, 即阴极温度愈高, 则所能获得的最大阳极电流愈大。

阳极电压很高时, 阳极电流不随阳极电压变化, 这说明阴极发射出来的电流已全部到达阳极。阳极电压较低时, 阳极电流较小, 这表明阴极的发射电流没有全部到达阳极。

为什么阴极温度较高、阳极电压较低时, 不是所有的阴极发射电流都能到达阳极呢? 这是由于电极间空间电荷的作用。

从阴极发射出来的电子向阳极运动, 因此在阴极与阳极间充满了飞向阳极的电子。由于电子具有负电荷, 所以充满在空间中的电子就形成了负的空间电荷。

设阴极和阳极是两块相互平行的平板, 电极间的距离比电极的线度小得多, 则在两极板上加有电位差时, 电极间的电场可以认为是均匀的。当阴极未加热、空间无电子时, 电极间的电位分布是一条直线, 如图 1-10 中曲线 1 所示。阴极加热以后, 阴极开始发射电子, 电子在阳极电压的吸引下飞向阳极。由于空间电荷的存在, 空间中每一点的电位都要下降, 这时极间的电位分布曲线变成图中的曲线 2。当阴极温度还不很高, 阴极发射的电子还不很多时, 阴极与阳极间各点的电位虽然下降, 但还都是正值。整个空间还存在加速电场, 阴极发射出来的电子在电场的作用下都能飞到阳极。

由曲线 2 可见, 由于空间电荷的作用, 阴极表面的电位梯度减小, 而阳极表面的电位梯度却增加了。因为阴极表面的电子除了受阳极加速电场的吸引以外, 还受到前面空间电荷的拒斥作用, 因此电子所受的力较没有空间电荷时小, 即电位梯度减小。而在阳极表面的电子, 除了受阳极加速电场的吸引以外, 还受到后面电子的推力, 故电位梯度增大。

提高阴极温度, 空间电荷的密度增加, 各点电位进一步下降。在某一个阴极温度下, 由于空间电荷的作用, 可使阴极表面电位梯度下降到零。这表示这时空间电荷在阴极表面所产生的拒斥场恰好等于阳极电压所产生的加速场, 阴极表面的电子不再受力的作用。

电子自阴极逸出具有一定的初速度, 即使阴极表面电位梯度下降到零, 继续提高阴极温度, 空间电荷密度仍能增大。这时, 阴极表面电位梯度变为负值, 如图 1-10 中曲线 3 所示。在离开阴极表面不远的地方, 产生一个电位最低点。在最低电位的左边各点上, 电位梯度为负值。在阴极表面附近, 空间电荷的拒斥场大于阳极电压所产生的加速场。

阴极发射出来的电子, 其初速按麦克斯韦分布, 电子具有各不相同的初速度。因此, 不是所有的电子, 而仅仅是那些在  $x$  轴方向上的初动能 (以电子伏计) 大于最低电位位能的电子, 才能克服阴极表面附近的拒斥场而越过最低电位, 进入加速场而飞向阳极。而那些初动能比较小的电子, 当它们在拒斥场中运动时, 还未到达最低电位点就耗尽了它们的能量, 然后在空间电荷力的作用下, 飞回阴极。在平衡状态下, 单位时间内离开空间跑上阳极的电子数加上跑回阴极的电子数, 等于阴极发射进入空间的电子数。继续增高阴极温度, 则由于阴极发射的增加, 空间电荷的密度也增大, 加强了阴极表面附近的拒斥场 (即最低电位更低), 受拒斥场作用而返回阴极的电子数也增加, 跑到阳极的电子数却增加得很微小。

以上说明了阴极加热电压对阳极电流的关系曲线。在阴极加热电压较低时, 阴极发射的电流都能到达阳极。这时阳极电流的大小受阴极发射的限制, 称为电流受阴极温度限制。当加热电压较高时, 阳极电流受空间电荷的限制, 这种情况称电流受空间电荷限制。



对阳极电流和阳极电压的关系曲线可作同样的解释。阳极电压很低时，阳极电压所产生的加速场很弱，阴极表面附近空间电荷拒斥场很强，因此到达阳极的电子数很少。阳极电压增加，阴极表面附近的拒斥场减弱，有更多的电子可越过最低电位到达阳极，阳极电流增加。当阳极电压很高时，阴极发射的电子不足以使阴极表面电位梯度变为负值，所有阴极发射的电子全部到达阳极。再增加阳极电压，阳极电流就不再增加了，因此，阳极电流对阳极电压的关系曲线，其起始上升部分受空间电荷限制，而水平部分则受阴极温度的限制。

### 1.2-2 二分之三次方定律

由以上分析可知，阳极电流受空间电荷限制时，二极管中阳极电流的大小与阳极电压有关。下面进一步分析这个关系。

#### (一) 平板二极管

设阴极和阳极为两块互相平行的平板，电极间的距离  $x_{ak}$  远小于电极的线度。因此，可以认为两极板之间有电位差时，极间电场是均匀的，而且处处垂直于电极表面。这种情况为一维问题，电位的泊松方程为

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.2-1)$$

式中， $\rho$  为电极间的空间电荷密度， $\epsilon_0$  为真空的介电系数。

设阴极的电位为零，阳极的电位为  $V_a$ 。由于最低电位的数值  $V_{\min}$  通常只有十分之几伏，而最低电位离阴极的距离  $x_m$  比  $x_{ak}$  小得多，因此在分析中可以假定  $V_{\min} = 0$  和  $x_m = 0$ 。这样，在空间电荷限制下，有下列边界条件：

$$\begin{aligned} x = 0 \text{ 处, } V &= 0 \\ x = 0 \text{ 处, } \frac{dV}{dx} &= 0 \end{aligned}$$

如果忽略电子初速，则电极间任一点上电子的速度  $v$  和电位  $V$  的关系是

$$\frac{1}{2} mv^2 = eV \quad (1.2-2)$$

根据电流密度的定义，有

$$J = \rho v \quad (1.2-3)$$

由以上三式，泊松方程可重写为

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{J}{\epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m} V}}$$

以  $2 \frac{dV}{dx} dx$  乘上式左右两边并进行积分，得

$$\left( \frac{dV}{dx} \right)^2 = \frac{4}{\epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}}} J \sqrt{V} + C_1$$

式中  $C_1$  是积分常数，可由边界条件决定：