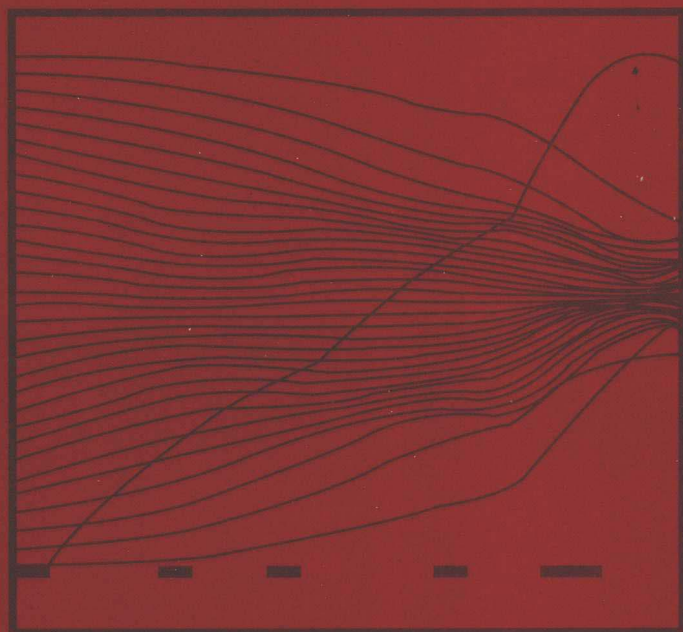




装备科技译著出版基金



[美]A.S.Gilmour, Jr 著
丁耀根 张兆传 等译
刘濮鲲 王 勇 等校

速调管、行波管、磁控管、 正交场放大器和回旋管

Klystrons,
Traveling Wave Tubes, Magnetrons,
Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons



国防工业出版社

National Defense Industry Press

速调管、行波管、磁控管、 正交场放大器和回旋管

Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons,
Crossed - Field Amplifiers and Gyrotrons

[美] A. S. Gilmour, Jr. 著

丁耀根 张兆传 等译

刘濮鲲 王 勇 等校



国防工业出版社

著作权合同登记 图字:军-2012-007号

图书在版编目(CIP)数据

速调管、行波管、磁控管、正交场放大器和回旋管/

(美) 吉尔摩 (Gilmour, A. S.) 著; 丁耀根等译.

—北京: 国防工业出版社, 2012. 12

书名原文: Klystrons, traveling wave tubes,

magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons

ISBN 978-7-118-08521-1

I. ①速... II. ①吉... ②丁... III. ①速调管—研究

②行波管—研究③磁控管—研究④正交场放大器—研究⑤

回旋管—研究 IV. ①TN12②TN722.5③TL62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 314095 号

Translation from the English language edition:

Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons,

Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons by Artech House

© Artech House, 2011.

All rights reserved.

本书简体中文版由 Artech House 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

速调管、行波管、磁控管、正交场放大器和回旋管

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京奥鑫印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16

印 张 36½

字 数 845 千字

版 印 次 2012 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—2000 册

定 价 185.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

译者序

由美国纽约州立大学教授 A. S. 小吉尔默博士撰写的本书,以速调管、行波管、磁控管、正交场放大器和回旋管 5 种典型的微波和毫米波真空电子器件为主线,系统论述了微波真空电子器件的理论基础和工作原理、研究和发展动态、主要性能和特点、共性和关键技术问题,同时还比较详细地描述和讨论了微波真空电子器件的应用情况和存在问题。

本书正文共 25 章,3 个附录。第 1 章为导论。从微波频谱入手,介绍微波管的应用范围和典型微波管的种类,并介绍全书的内容。第 2 章~第 4 章介绍与微波管相关的电子动力学。第 5 章~第 7 章介绍阴极和电子注形成的相关理论和实际。第 8 章~第 9 章介绍电子注在高频间隙中的相互作用和电子群聚。第 10 章~第 11 章介绍速调管的基本理论和特殊用途的速调管。第 12 章~第 16 章介绍行波管的基本理论,螺旋线和耦合腔行波管。第 17 章介绍收集极,包括收集极中电子能量分布、降压收集极和收集极的冷却。第 18 章~第 20 章介绍磁控管和正交场放大器的基本理论和基本特性。第 21 章介绍回旋管的基本理论、回旋管振荡器和各种类型回旋管放大器。第 22 章介绍微波管常用几种类型输能窗。第 23 章~第 25 章介绍噪声、非线性和畸变,击穿和保护等微波管共性问题。附录 A 给出常用的物理常数和变换关系;附录 B 为真空工艺;附录 C 给出与微波真空电子器件相关的磁学方面的知识。译著略去了原著索引表。

本书的主要内容是作者在美国的大学、微波真空电子器件的研制和生产单位,以及美国海军、空军和陆军等使用和管理部门作的讲课、讲座和报告的基础上整理而成的。对推动美国微波真空电子器件的发展起了重要作用。该书翻译出版,对我国微波真空电子器件的发展和应用将发挥重要作用。

本书由中国科学院电子学研究所丁耀根研究员和张兆传研究员主译,刘濮鲲研究员和王勇研究员主校。参加翻译和校对的人员还有:沈斌、肖刘、阴生毅、耿志辉、张永清、高冬平、韩冰、张瑞、范俊杰、袁广江、王小霞、朱方、陈之亮、李铮迪、王虎、史少辉、沈文渊、李飞、亢飞、刘青仑、张增波、祝佳、郭际、万晓声、韦宇祥、刘述清、刘洁、刘亚威、李秦龙等。

本书的翻译出版得到装备科技译著出版基金的支持。本书的翻译得到廖复疆研究员、郑新研究员、顾孟平研究员和刘铁山研究员等微波真空电子器件和微波电子系统方面的专家的关心、支持和帮助。在本书的翻译和校对过程中,新华社主任记者丁逸旻在疑难语句的翻译方面给予了很大帮助。

译者

2012 年 6 月

关于作者

A. S. 小吉尔默在康奈尔大学(Cornell University)获得了电机工程学士、硕士和博士学位。他在康奈尔大学电机工程系担任助理教授期间,收到来自纽约布法罗的康奈尔航空实验室的聘书,请他担任为期两年的教授职务。随后,他被任命为实验室波电子学分部的负责人。在接下来的两年里,他在纽约威廉斯维尔(Williamsville)的桑德斯公司(Sanders Associates)任电子学部经理。而后,他在布法罗的纽约州立大学任电气与计算机工程学院任教授。他在该学院担任了几年院长,现为名誉教授。

吉尔默博士积极投身于微波管的研究、设计、开发与应用五十多年。他在速调管和行波管方面的研究,导致了近乎完美的布里渊电子注的形成。他首次对布里渊电子注中高频电流和速度分布进行了详细测量。他参与了许多军用微波系统发射机的设计及改进工作,并帮助建立了美国宇航局/美国空军关于发展电子对抗系统用高效率行波管的研究计划。在过去的30年里,他与政府工作人员进行了广泛的合作,改进有缺陷的器件和系统设计,从而降低了器件的故障率,提高了器件的性能。

吉尔默博士有200多篇享有盛誉的出版物、报告和专利。其中最重要的是,他编辑出版的《功率调制器会议录》(5000多页),和出版的《微波管》和《行波管原理》方面的书籍。他的第一本书《微波管》取材于他在各种军事、工业和教育机构所开设的微波管5日课程。《行波管原理》一书取材于行波管8日课程,此课程在美国各大微波管公司和海军海面作战中心(Naval Surface Warfare Center)的克雷恩分部讲述了两三次。

吉尔默博士是第十四到二十届功率调制器研讨会程序委员会的成员,并在1988年担任主席。他负责主持了纽约布法罗举办的第十二届功率调制器研讨会。他在高压研讨会程序委员会任职近十年,并在1990年担任主席。他是空军研究委员会的脉冲功率源、工程装配、国家研究委员会和国家科学院的成员。他效力于国际脉冲源会议程序委员会十几年。

吉尔默博士是电气与电子工程师学会会员。他具有电磁兼容工程师证书,是纽约州资深工程师。

原著前言

本书取材于作者在各种场合所作的有关微波管的讲课、短期讲座和学术报告。作者在美国海军、空军、陆军和 NASA 的相关机构,瓦里安公司 (Varian, 现 CPI), 休斯公司 (Hughes, 现 L3) 电子动力学分部, 特立达因 (Teledyne) 电子技术, 利顿工业公司 (Litton, 现 L3), L3 防御系统部, 德州仪器, 法国国防部, 加利福尼亚大学洛杉矶分校, 布法罗地区大学和其它场合举办的讲课、短期讲座和学术报告共 100 多次。有 2000 多人参加了这些活动, 参加人员包括三级海军电子技师、微波管专家和一些首席科学家。

本书理论与实际相结合, 对于初涉微波管领域的新人、有经验的微波管技师、工程师和管理人员都有帮助。在很大程度上, 每章的内容都是建立在前面章节的基础上的, 所以, 对于初涉微波管领域的读者, 建议从头开始阅读; 对于微波管方面有经验的读者, 大部分章节可以单独阅读而不需要参考其它章节; 对于那些有兴趣进一步学习和研究的读者, 本书提供的参考文献, 涵盖了微波管发明至今 500 多位作者的研究工作, 它们将是非常有价值的。

很多方面对本书做出了贡献。首先, 海军海面作战中心 (Naval Surface Warfare Center) 怀尼米 (Hueneme) 港分部的托马斯·贝克 (Thomas Bekker) 支持我在 1982 年开设了第一个微波管 5 日课程, 并在 1986 年出版了《微波管》一书。而后, 在海军海面作战中心克雷恩 (Crane) 分部的尤金·多特克瓦斯基 (Eugene (Joe) Dutkowski) 的鼓励和帮助下, 开设了行波管 8 日课程, 并在 1994 年出版了《行波管原理》一书。后来, 我又开设了 8 日和 10 日课程, 它们包含了速调管、交叉场器件和行波管方面更深入的内容。最近我被邀准备有关快波器件方面的讲课材料。本书既包括速调管、交叉场器件和快波器件的一些新资料, 又涵盖了我对前 2 本书的修正材料。

对本书作出特别有价值的技术贡献的有: 休斯公司 (Hughes, 现 L3 公司) 的乔恩·克里斯坦森 (Jon Christensen), 詹姆士·汉森 (James Hansen) 和伊福·特玛鲁 (Ivo Tammaru) 博士; 特立达因公司 (Teledyne) 的大卫·泽瓦迪尔 (David Zavidil), 菲尔·莱利 (Phil Lally) 和罗伯特·迪普尔 (Robert Dipple); 利顿公司 (Litton, 现 L3 公司) 的理查德·楚 (Richard True) 博士, 罗伯特·西蒙斯 (Robert Symons) 博士和罗德尼·沃恩 (Rodney Vaughan) 博士; 瓦里安公司 (Varian, 现 CPI 公司) 的乔治·法尼 (George Farney) 博士, 阿曼德·斯德博朗 (Armand Staprans) 博士和乔治·米兰 (George Miram); 斯坦利·凯塞 (Stanley Kaisel) 博士; 马文·柯多罗 (Marvin Chodorow) 博士。同时, 我非常感谢这些课程的参与者, 他们为我的课程和书籍推荐和贡献了很多资料。

最后, 我再一次感谢我的妻子的耐心与理解。

目 录

第1章 导论	1	5.4 寿命考虑	46
1.1 微波频谱	1	5.4.1 格兰特和费尔斯寿命 预测模型	48
1.2 微波管的应用范围	1	5.4.2 隆古寿命预估模型	49
1.3 经典微波管类型	2	5.5 扩散阴极表面物理	52
1.4 本书介绍	5	5.6 热子	55
参考文献	6	5.6.1 常用热子组件	55
第2章 电子产生的静态场	7	5.6.2 快速启动的热子	57
2.1 电场	7	5.6.3 热子试验	58
2.2 磁场	11	5.6.4 热子磁场的影响	58
第3章 静电场中的电子运动	12	参考文献	60
3.1 平行于场的运动	12	第6章 电子枪	62
3.2 相对论速度修正	13	6.1 皮尔斯电子枪	62
3.3 电透镜	14	6.1.1 形成平行电子流的 聚焦电极	63
3.4 通用电子注发散曲线	17	6.1.2 形成收敛电子流的 聚焦电极	65
第4章 磁场对电子运动的影响	20	6.1.3 阳极孔径的散焦效应	67
4.1 静磁场中的电子运动	20	6.1.4 最小电子注直径的形成	70
4.2 复合电场和磁场中的电子 运动	21	6.1.5 热速度效应	71
4.2.1 直角坐标系中的正交场	21	6.1.6 不均匀发射和阴极粗糙度 的影响	74
4.2.2 轴对称场	22	6.2 电子注控制技术	75
第5章 热阴极	25	6.2.1 阴极调制	75
5.1 发射机理	26	6.2.2 聚焦极控制	76
5.1.1 热发射	26	6.2.3 调制阳极	76
5.1.2 肖特基效应	29	6.2.4 栅极	77
5.1.3 场发射	30	6.2.5 电子注控制电极特性的 总结	86
5.1.4 空间电荷限制	31	参考文献	86
5.2 热阴极的演变	35	第7章 电子注	88
5.3 浸渍扩散阴极	39	7.1 均匀场聚焦的概述	88
5.3.1 制备	39		
5.3.2 阴极工作	40		
5.3.3 米兰姆曲线	41		
5.3.4 功函数分布	42		

7.1.1 布里渊流	89	参考文献	159
7.1.2 脉动	90	第 10 章 普通速调管及其工作	
7.1.3 限制流(浸没流)	92	原理	160
7.2 均匀场聚焦和层流	94	10.1 速调管的发明和基本	
7.2.1 电子注方程	94	工作原理	161
7.2.2 布里渊流	96	10.2 速调管谐振腔	165
7.2.3 限制流(浸没流)	99	10.2.1 谐振腔工作原理	165
7.3 均匀场聚焦和非层流		10.2.2 功率耦合	166
电子流	101	10.2.3 调谐器	167
7.4 永磁聚焦	103	10.2.4 等效电路及电路参数	168
7.4.1 概述	103	10.2.5 谐振腔的高频损耗	171
7.4.2 阴极处无磁场的层流		10.3 小信号工作	172
电子流	104	10.3.1 负载表示方法	172
7.4.3 阴极处存在磁场的层流		10.3.2 增益计算	173
电子流	109	10.4 功率输出特性	175
7.4.4 非层流电子流	111	10.4.1 普通速调管的调谐	176
7.5 电子注中的离子效应	115	10.4.2 传输特性	179
7.5.1 离子效应的实例	116	参考文献	180
7.5.2 气体源	118	第 11 章 特殊用途速调管	181
7.5.3 电离	120	11.1 高效率速调管	181
7.5.4 电子注中的电位降	121	11.2 高功率速调管	185
7.5.5 电离的稳态效应	123	11.2.1 电子注电压的限制	185
7.5.6 低频不稳定性	127	11.2.2 电子注电流的限制	187
7.5.7 高频不稳定性	128	11.2.3 可获得功率的估算	188
参考文献	132	11.3 宽带速调管	190
第 8 章 电子注与间隙的相互作用	134	11.3.1 激励段	191
8.1 电子注的调制	134	11.3.2 输出段	195
8.1.1 有栅(平面)间隙	134	11.4 多注速调管	200
8.1.2 无栅(非平面)间隙	136	11.5 分布作用速调管	207
8.2 感应电流	138	11.6 反射速调管	210
8.2.1 有栅(平面)间隙	138	参考文献	212
8.2.2 无栅(非平面)间隙	143	第 12 章 行波管	215
8.3 电子注负载	143	12.1 引言	215
参考文献	144	12.1.1 行波管的早期历史	215
第 9 章 间隙产生的电子群聚	146	12.1.2 行波管的基本工作	
9.1 弹道群聚	146	原理	217
9.2 考虑空间电荷力的电子		12.2 行波互作用	221
群聚	148	12.2.1 电子注中的高频电流	221
9.3 大信号效应	153	12.2.2 电路方程	221

12.2.3	特征方程	222	举例	283
12.2.4	同步工作	223	15.3 基波为返波电路的工作	
12.2.5	非同步工作	225	原理	289
12.2.6	电路损耗的影响	225	15.4 基波为前向波电路的	
12.2.7	空间电荷效应	226	工作原理	295
12.3	高电平互作用	228	15.5 终端与过渡	297
12.3.1	有关互作用的讨论	228	参考文献	300
12.3.2	最大效率的估算	230	第16章 收集极	302
12.3.3	计算机模拟的评述	231	16.1 功率耗散	302
12.3.4	速度渐变	231	16.2 功率回收	304
	参考文献	234	16.2.1 功率流	305
第13章 波速与色散		236	16.2.2 利用降压收集极回收	
13.1	群速与相速	236	功率	307
13.2	色散	237	16.2.3 电子能量分布	309
13.2.1	同轴传输线	238	16.2.4 剩余电子注功率	311
13.2.2	矩形波导	238	16.2.5 管体电流的影响	313
13.2.3	周期加载波导	243	16.2.6 多级降压收集极	313
第14章 螺旋线行波管		247	16.2.7 降压收集极中的次级	
14.1	带宽	247	电子	318
14.1.1	色散	249	16.3 收集极的冷却	320
14.1.2	色散控制	250	16.3.1 传导冷却	320
14.2	增益	253	16.3.2 对流冷却	320
14.2.1	过渡段	253	16.3.3 强迫风冷	320
14.2.2	衰减器和切断	255	16.3.4 强迫液冷	321
14.3	功率	257	16.3.5 汽相冷却	322
14.3.1	峰值功率	257	16.3.6 辐射冷却	323
14.3.2	平均功率	260	参考文献	324
14.4	效率	266	第17章 正交场管	325
14.5	双模工作	270	17.1 正交场管的基本结构	326
14.6	微波功率模块	271	17.2 无高频场的电子流	327
14.7	环杆和环圈行波管	273	参考文献	329
	参考文献	276	第18章 正交场管的阴极	330
第15章 耦合腔行波管		277	18.1 引言	330
15.1	基本工作原理	277	18.2 次级电子发射特性	331
15.2	耦合腔结构	279	18.2.1 初级电子的入射能量	331
15.2.1	波导近似	279	18.2.2 初级电子的入射角	332
15.2.2	柯诺—吉廷斯等效电路		18.2.3 表面次级电子的发射	
	近似	281	特性	333
15.2.3	柯诺—吉廷斯电路的应用		18.2.4 次级电子的能量分布	334

18.2.5 次级电子发射特性的 模拟	335	20.1.2 分布发射式正交场放 大器	377
18.3 正交场器件中阴极的工作 ..	336	20.2 正交场放大器的工作原理 ..	379
参考文献	337	20.2.1 电子发射和轮辐的 形成	379
第 19 章 磁控管	338	20.2.2 轮辐的形成和增长	381
19.1 磁控管的类型	338	20.3 正交场放大器的慢波电路 ..	383
19.1.1 回旋频率磁控管	338	20.4 正交场放大器的性能	385
19.1.2 负阻磁控管	339	20.4.1 前向波正交场放大器 ..	386
19.1.3 行波磁控管	339	20.4.2 返波正交场放大器	387
19.2 行波磁控管的工作原理	341	20.4.3 直流工作	389
19.2.1 轮辐的形成	342	20.4.4 增益和工作限制	390
19.2.2 哈特里电压	343	20.4.5 正交场放大器的相位 特性	392
19.2.3 轮辐的形成	346	20.4.6 质量和尺寸的考虑	395
19.2.4 高频电路的工作原理 ..	348	20.5 功率容量	395
19.3 跳模	351	20.6 热考虑	397
19.4 同轴磁控管	355	20.7 正交场放大器电源的 考虑	401
19.5 倒置磁控管	357	20.7.1 直流工作电源	401
19.6 磁控管的调谐	358	20.7.2 阴极脉冲电源	401
19.7 输出耦合器和变换器	359	参考文献	402
19.8 阴极和热子的工作	360	第 21 章 回旋管	403
19.9 性能	361	21.1 引言	403
19.9.1 电压—电流特性	361	21.2 基本相互作用机理	404
19.9.2 频率推移	361	21.3 磁控注入枪的结构及要求 ..	407
19.9.3 频率牵引	363	21.3.1 磁控注入枪的结构	408
19.9.4 热漂移	364	21.3.2 初始设计步骤	410
19.10 磁控管的应用	365	21.3.3 磁控注入枪的性能	413
19.10.1 普通磁控管	365	21.4 注波互作用	415
19.10.2 捷变频磁控管	365	21.4.1 中空谐振腔	415
19.10.3 信号注入磁控管	367	21.4.2 同轴谐振腔	417
19.10.4 信标磁控管	368	21.4.3 模式变换器	418
19.10.5 微波炉磁控管	369	21.4.4 谐波工作	420
19.10.6 工业加热磁控管	370	21.4.5 收集极	420
19.10.7 低噪声磁控管	371	21.5 回旋单腔管(振荡器)	421
19.10.8 相对论磁控管	373	21.5.1 高频输出的耦合	422
19.11 功率容量的概述	374	21.5.2 二次谐波回旋管	423
参考文献	375	21.5.3 永磁回旋管	423
第 20 章 正交场放大器	376		
20.1 引言	376		
20.1.1 注入式正交场放大器 ..	376		

21.6	回旋放大器	424	第 24 章 非线性和失真	460	
21.6.1	回旋速调管	425	24.1	饱和效应引起的失真	460
21.6.2	回旋行波速调管	426	24.1.1	调幅/调幅转换	460
21.6.3	回旋行波管	426	24.1.2	调幅/调相转换	461
21.7	太赫兹回旋管	430	24.1.3	谐波产生	462
	参考文献	430	24.1.4	交调乘积	463
第 22 章 高频窗		433	24.2	数字通信	468
22.1	背景	433	24.2.1	正交相位键控(QPSK) 和四进制正交幅度调制 (16QAM)	469
22.2	同轴窗	433	24.2.2	数据特性	470
22.3	波导窗	434	24.2.3	降低失真的放大器 设计	471
22.4	高频窗的缩尺	439	24.3	信号俘获	474
	参考文献	439	24.4	增益随频率的变化	475
第 23 章 噪声		441	24.4.1	宽带增益变化	475
23.1	热噪声	441	24.4.2	窄带增益变化	475
23.2	噪声系数的定义	442	24.4.3	相位非线性或时延 失真	476
23.3	噪声现象概述	442	24.5	推移和牵引	477
23.4	电子枪中的噪声	443	24.5.1	振幅推移	477
23.5	阴极上产生的噪声	444	24.5.2	相位推移	479
23.5.1	散粒噪声	444	24.5.3	牵引	481
23.5.2	速度噪声	445		参考文献	482
23.5.3	其它噪声的产生机理	445	第 25 章 击穿与保护	483	
23.6	空间电荷最小区	446	25.1	电场增强	484
23.6.1	瑞克噪声不变性	447	25.2	真空中的直流击穿	486
23.6.2	散粒噪声的减小	447	25.2.1	导致击穿的电极现象	487
23.6.3	其它噪声效应	449	25.2.2	击穿的预防	495
23.7	低速相关区域	449	25.2.3	真空放电	497
23.8	高压加速区域	450	25.3	绝缘体表面的直流击穿	500
23.8.1	噪声空间电荷波	450	25.4	真空中的高频击穿	502
23.8.2	低噪声管的阻抗变换	452	25.4.1	无磁场作用的双面二次电子 倍增	503
23.8.3	透镜效应	453	25.4.2	复合场作用下的双面二次 电子倍增效应	504
23.9	高频段的噪声现象	454	25.4.3	无磁场作用的单面二次电子 倍增效应	505
23.9.1	电路损耗	454	25.4.4	复合场作用下的单面二次	
23.9.2	电流分配噪声	455			
23.9.3	次级电子互作用	455			
23.9.4	噪声增长	456			
23.9.5	磁场抑制噪声	457			
23.10	其它噪声源	457			
23.11	行波管的最小噪声系数	458			
	参考文献	458			

电子倍增效应	506	B.6.3 涡轮分子泵	532
25.5 电子质的高频击穿	507	B.6.4 低温泵	532
25.6 气体中的直流击穿	508	B.6.5 非蒸散吸气剂	533
25.7 气体中的高频击穿	510	B.7 真空计	534
25.8 故障检测与微波管保护	517	B.7.1 热偶真空计	535
25.8.1 过量的管体电流	517	B.7.2 电离真空计	535
25.8.2 过量的高频反射功率	518	B.8 烘排	535
参考文献	518	B.9 微波管材料	536
附录	520	B.10 连接技术	537
附录 A 有用的常数和变换	520	B.10.1 钎焊	538
附录 B 真空工艺	520	B.10.2 焊接	540
B.1 测量单位	521	参考文献	542
B.2 工作范围	521	附录 C 磁学	543
B.3 气体来源	522	C.1 磁学量	543
B.3.1 返流	522	C.2 磁路	543
B.3.2 渗透	523	C.3 磁性材料	545
B.3.3 扩散	523	C.3.1 铁磁材料	546
B.3.4 解吸	524	C.3.2 正常和内禀磁滞	
B.3.5 蒸发	524	曲线	548
B.3.6 虚漏	524	C.3.3 磁能积	549
B.3.7 实漏	524	C.3.4 稀土永磁材料	550
B.4 真空系统	525	C.4 永磁系统	551
B.5 低真空泵	526	C.4.1 均匀场永磁系统	551
B.5.1 油式机械泵	526	C.4.2 周期永磁系统	551
B.5.2 涡旋泵	527	C.4.3 双周期和长周期	
B.5.3 吸附泵	527	聚焦	553
B.5.4 文丘里泵	528	C.5 极靴	554
B.6 高真空泵	528	C.6 电磁铁	557
B.6.1 扩散泵	529	参考文献	558
B.6.2 离子泵	530	附录 D 名词术语	559

第1章 导 论

微波管是用于产生和放大微波频率范围高频信号的真空电子器件。一般认为,微波频率范围从 1GHz ~ 100GHz。毫米波频带是微波频带的一部分,通常从大约 30GHz ~ 300GHz。

1.1 微波频谱

微波频谱划分为若干个波段,图 1-1 给出了两种最常用的波段命名。其中,旧的波段命名是在第二次世界大战期间建立的,新建立的波段命名更符合逻辑,但还没有被广泛接受。在微波管工业中,旧波段体系应用最广泛,因此,将在本书应用。



图 1-1 微波波段的命名

1.2 微波管的应用范围

在固态器件发明以前,微波管是仅有的有源器件,它应用在整个微波波段和在所有的功率电平上。目前,如图 1-2 所示,真空器件(微波管)在高功率、高频率应用中占优势,而固态器件大多应用在较低频率和较低功率电平上。

微波管和固态器件的应用范围没有很清楚的分界线,其主要原因是:除了平均功率和频率的因素外,在大多数应用中,还需要考虑其它一些因素(相关讨论见参考文献[1])。这些因素如下。

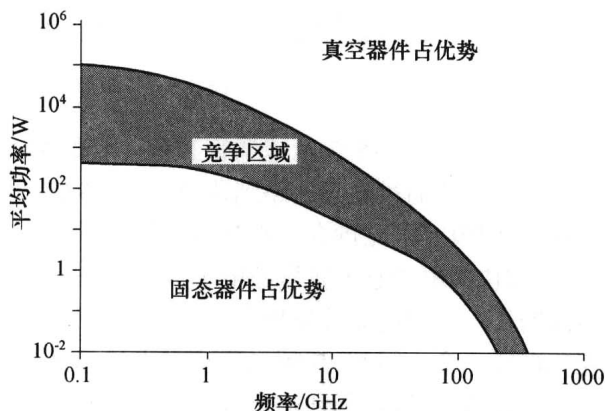


图 1-2 微波管和固态器件的应用范围

(1) 一般来说,微波管比固态器件更有效。采用适当的收集极技术,在有些情况下,管子的效率可以接近甚至超过 70%。

(2) 与固态器件相比,微波管可以工作在更高的温度。高工作温度和高效率相结合,意味着微波管可以比固态器件更小和更轻,而仍然能消除管子中剩余热量。

(3) 由于极高的可靠性,许多卫星应用中选择行波管作为放大器。

(4) 在许多应用中,宽频带对于某些微波管来说是一个非常重要的因素。对于某些螺旋线行波管(TWTs),其带宽可超过 2 个倍频程。

因此,即使在功率—频率图(见图 1-2)上有重叠部分,人们也可以选用微波管来获得系统要求的性能。

1.3 经典微波管类型

大多数微波管是在第二次世界大战以前发明的^[2-4]。由于雷达应用的需要,2 种类型微波管,即磁控管和反射速调管,在第二次世界大战期间得到了大力发展。在第二次世界大战期间和随后的年代,发明了多种类型和结构的微波管。由于效率和增益低、结构复杂等原因,其中大多数没有得到实际应用。目前,5 种类型微波管占了主导地位,其中 4 种是普通微波管,第 5 种是回旋管。本书的主题为以下 5 种类型的微波管:

- (1) 速调管;
- (2) 行波管;
- (3) 磁控管;
- (4) 正交场放大器;
- (5) 回旋管。

上述 5 种类型的微波管可以分为图 1-3 所示的 3 种类别,即线性注管、正交场管和快波管。如果考虑微波管的结构,以及其中的电场和磁场,则上述划分的缘由就十分清楚了。

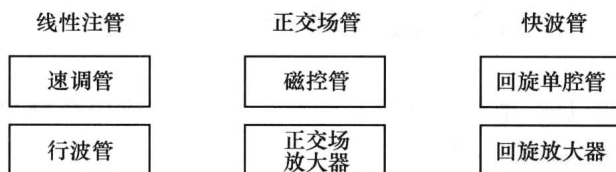


图 1-3 微波管的主要类别

图 1-4 和图 1-5 表示速调管和行波管的基本结构。在这 2 种管子中,由电子枪形成的电子注线性地通过高频电路到达收集极。在速调管中,高频电路是由若干个谐振腔组成的,谐振腔间没有电磁耦合。高频输入信号对电子注中的电子加速或减速。在电子注漂移过程中,较快的电子赶上较慢的电子,形成了电子群聚,电子注中的高频电流随电子注向前移动而增长。高频电流首先耦合到中间腔(图 1-4 中只表示出 1 个中间腔),然后耦合到输出腔。在每一个中间腔,高频电流感应出信号,转而产生增强电子注群聚过程的高频电场。最后,强的高频电流耦合到输出腔,产生高频输出功率。速调管的增益很高,可达 60dB 或更高,其带宽为百分之几至大约 10%,其输出功率电平可达几十 MW 或更高。

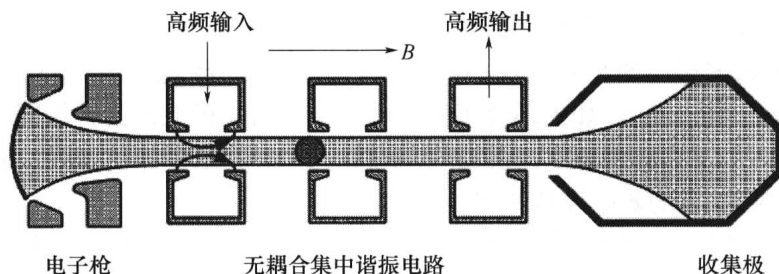


图 1-4 速调管的基本结构

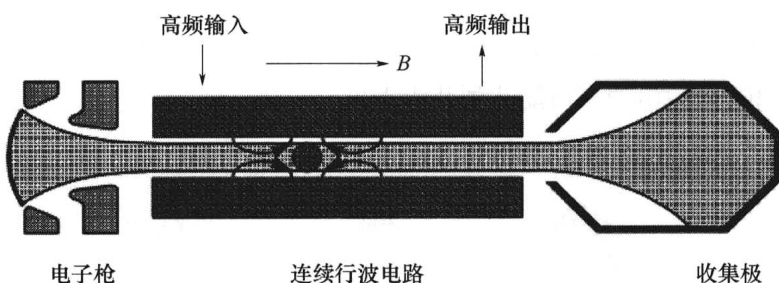


图 1-5 行波管的基本结构

在行波管中,高频电路是连续的,信号可以沿高频电路行进,很像它在传输线中传输一样。高频电路的设计使信号的速度接近通过电路的电子注速度。如图 1-5 所示,设计电路使信号在电路中产生的电场伸入到电子注中,高频电场使一些电子加速,另外一些电子减速,从而形成电子群聚。当这些电子群聚通过附近的电路时,在电路上感应高频电流,并使电路上的高频场幅度增加。增强的高频电场转而增加电子注的群聚作用,随着电子群聚和电路中高频场沿高频电路以相同速度移动时,电子注中的群聚作用增强。当电子群聚变得更强时,电子注中的高频电流和电路中的高频场将变得更大。最终,被放大的信号从电路中耦合出去。通常,行波管的增益在 30dB ~ 50dB 范围,带宽达 20% 到超过 2 个倍频程。对于极宽频带行波管,其输出功率电平为数十瓦,对于窄频带行波管,其输出功率电平为数百 kW 至 MW。

图 1-6 和图 1-7 表示磁控管和正交场放大器的基本结构。在这些器件中,阴极是位于中心的圆柱发射体。一般,电子流是沿径向向外移动到作为阳极的高频电路。由于外加磁场垂直于阴极-阳极间电场和电子流方向,因此,电子被迫环绕阴极运动。当高频场存在时,电子群聚,形成轮辐结构。

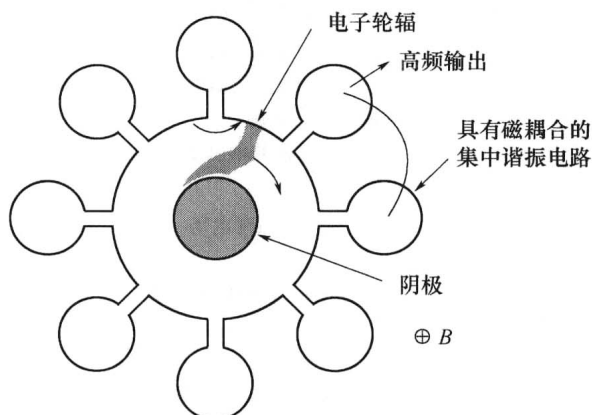


图 1-6 磁控管的基本结构

磁控管是振荡器,其高频电路是由谐振腔组成的。谐振腔的排列使每

一个谐振腔产生的高频磁场与相邻谐振腔耦合,在理想情况下,整个谐振腔结构谐振在一个相同频率,相邻谐振腔的高频电场的相位相差 180° 。高频场振荡时,在谐振腔间隙的高频场图像环绕阴极旋转。如果环绕阴极的电子轮辐与阳极上的旋转场同步,那么,轮辐可以在到达每一个谐振腔间隙时,在谐振腔中感应高频电流,使振荡增强。磁控管的输出功率可达数 MW,报导的效率高达 88%。

正交场放大器(CFA)的工作原理(见图 1-7)与行波管相似,设计高频电路使沿电路行进的信号与随之而来的电子同步。在行波管中,电子群聚是沿着行波移动方向形成的,在 CFA 中,形成电子轮辐,轮辐环绕阴极,且与电路中行进的波同步。电路波的电场增强了轮辐的群聚作用,由轮辐在高频电路上感应的电流增强了电场。电路上的波从输入到输出行进时增长。在某些 CFA 中,设计电路使返波作用发生,并产生放大。通常,CFA 的增益小于 20dB,而输出功率可能达到几十 MW。

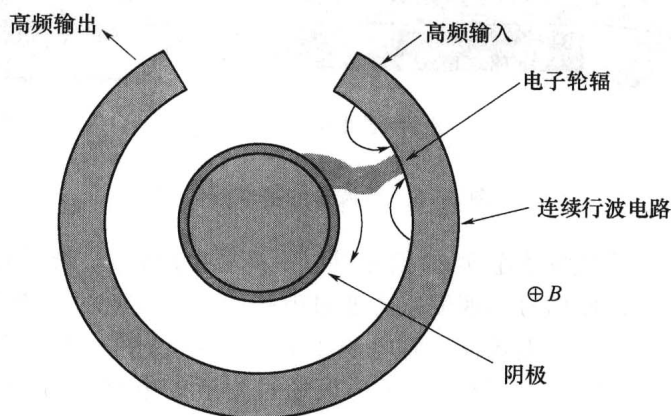


图 1-7 正交场放大器的基本结构

快波器件的注—波相互作用机理与线性注器件正交场器件完全不同。如图 1-8 所示,在线性注器件和正交场器件中,其工作频率是由高频电路确定的,因此电路尺寸与波长成比例,随着频率增加,功率容量减小。在回旋器件中,工作频率与电路尺寸无关,是由回旋频率和磁场决定的。因此,在很高的频率,也可产生很高的功率。

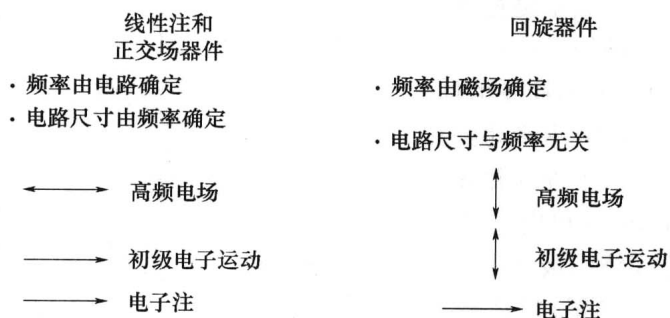


图 1-8 线性注器件和正交场器件与回旋器件中高频场结构和电子运动的比较

如图 1-9 所示,在回旋器件中,电子注是空心的,电子注中的电子围绕磁通量线作螺旋运动,并与横向高频电场接近同步。通常,电子的横向速度为轴向速度的 1.5 倍 ~ 2

倍,用于放大电场的正是电子的横向能量。

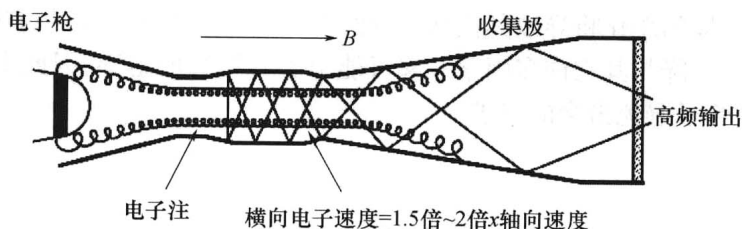


图 1-9 回旋振荡器的基本结构

根据上述讨论,很显然,所有微波管的基本工作原理是相同的,电子注通过包含电磁场的高频电路,电子注与高频场相互作用,产生放大或振荡。

在这种最简单的描述背后,隐含着微波管极其复杂的性质。例如,采用电子注就意味着必须将微波管内部抽真空,使其气压在大气压以下 11 个数量级。为了在微波管寿命期间保持这样的压强,必须使用特殊的材料和制造技术。

作为另外一个例子,由于电子注中的电流密度很高,大多数微波管的电子源和电子注具有复杂的结构。当进一步考察微波管工作时,我们会发现,其结构和工作的几乎每一个方面都是极其复杂的。

1.4 本书介绍

在选择本书的内容时,作者试图将理解微波管工作的所有相关技术包括进去,材料次序的安排使得读者从开始通读本书,按逻辑顺序,发展到理解微波管工作的相关知识。

在论述电子动力学后,讨论阴极和形成线性电子注的电极,随后,分析受到局部高频电场作用后的电子注的行为。紧接着讨论速调管的工作,分析电子注与行进中高频电场的相互作用。也许,上述分析的最重要结果是表明行进的高频场和电子注的相对速度对于高频场放大的重要性。该论述直接导致了速度随行波管电路的高频频率而变化(色散)的一般讨论和分析。有了对色散特性重要性的理解,有可能详细分析螺旋线行波管和耦合腔行波管。

许多新型速调管和行波管采用复杂的电子注收集极来增加效率,而不直接影响电子注与电路的相互作用。由于该主题的重要性,第 16 章全章均讨论收集极技术。

虽然磁控管的发展先于线性注器件,但是,正交场器件至今仍然没有像线性注器件那样被很好地理解,在第 18 章,第 19 章和第 20 章中,我们试图描述这些器件最重要的方面。先详细讨论在正交场器件中阴极和二次电子发射过程,然后描述磁控管和正交场放大器。

回旋管是 1964 年在俄罗斯发明的,在微波管领域,它也是比较新型的器件(速调管和磁控管在 20 世纪 30 年代发明,行波管在 1940 年发明)。回旋管有许多种结构(回旋振荡器、回旋速调管、回旋行波速调管和回旋行波管),本书描述了回旋管和它的应用。

本书的其余部分所述及的主题,与发生在微波管中的电磁作用并无直接关系,但是,对理解管子的全部工作是非常重要的。例如,所有的微波管均采用输出窗,从而使微波