

超高频电子管

(修訂本)

陆鍾祚編著

人民邮电出版社

超 高 頻 电 子 管

陆 钟 祚 編 著

(修訂本)

人 民 郵 電 出 版 社

超高频电子管 (修訂本)

編著者: 陆 钟 旂

出版者: 人 民 邮 电 出 版 社

北京东四六条13号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第〇四八号)

印刷者: 北 京 市 印 刷 一 厂

发行者: 新 华 书 店

开本 850×1168 1/32

印张 16 26/32 頁数 263

印刷字数 466,000 字

印数 14,581—18,930 册

1958 年 9 月北京第一版

1963 年 6 月北京第二版

1 9 6 3 年 6 月

北京第二版第一次印刷

統一书号: 15045·总782—无201

定价: (10) 2.90 元

內 容 提 要

本书共分六章，分別讲述各种类型的超高频电子管。全书着重說明超高频电子管的基本物理概念、工作原理和基础理論；并有許多图表、曲綫和計算关系式可供工程設計上应用。本书說理清楚，分析詳明，列举参数文献十分丰富，除可供高等学校电子器件专业作教学用书外，也可供研制超高频管的工程技术人员实际工作中参考。

序 言

超高频电子管是近代最新式的电子管，它的工作频率很高，目前世界各国在电子管制造和研究工作中，都集中了很大的力量从事于超高频电子管的研制；在高等学校里也都开设了超高频电子管及有关的超高频技术或雷达等课程。超高频电子管的重要已为各方所注意。

超高频电子管这门课在南京工学院无线电系电子器件专业已经开设了好几年，列为必修课程。它的预习课程是超高频技术，它的数学目的是使学生对各种类型超高频电子管有一巩固的理论基础、掌握一定的计算方法和初步设计能力、懂得怎样使用和测试，使他们离开学校后，在工作岗位上从事这方面工作时，能够继续自学和不断深入发展。本书是著者在南京工学院数年来的讲稿，经过补订编印而成，主要包括：(1) 绪论；(2) 静电控制超高频管；(3) 速调管；(4) 行波管；(5) 多腔磁控管；(6) 超高频气体放电开关等六章。这些都是为了达到教学目的所必需的内容，既有理论基础，也有实际技术知识，可以帮助读者正确地使用这些超高频管，发挥其应有的效能。

本书内容足供讲授 100 学时之用，第六章原为实验课的内容，不一定在课堂上详细讲。每章之末均附有练习题。本书除可作为电子器件专业超高频管课程教学用书外，也可供其他超高频技术方面工作者参考之用。

书中采用有理化实用单位 (RMKS) 制，这是国际协议单位之一，苏联科学院度量单位委员会也采用这一单位制。

由于超高频电子管是新兴的一门学科，超高频电子管的类型繁多，涉及的理论问题很多，文献资料虽不少，但教学用书却很少。在这样的条件下，本书难免尚希读者指正。

陆钟祥

1958

修訂版序言

本书第一版付印已三年有余。三年来超高频电子管的发展极为迅速，因而对许多较成熟的新型管种作了补充。其次，为了提供更多的教学参考资料，也补充和加强了基本理论分析并提出了各型管的计算步骤和方法。有些补充的内容以小号字排，系专供实际研制者参考，还增补了一些新的参考资料和文献。

修订版章数仍与第一版同，仅将“多腔磁控管”一章移至“行波管”一章之后，使“速调管”和“行波管”两章连续，便于阅读。

陆钟祚

1961年8月于南京

目 录

序言

修訂版序言

第一章 緒論	1
1.1 总述	1
1.2 超高频电子学及其領域中的物理特性	1
1.3 超高频电子管的发展过程	2
1.4 超高频工程在各方面的应用范围及頻率分段	4
1.5 超高频管的現有种类	6
1.6 超高频电子管和电子学的新发展	7
第二章 靜电控制超高频电子管	9
2.1 总述	9
2.2 直流和小信号二极管中的电子运动	11
2.3 小信号二极管在高頻率下的等值电路	25
2.4 罗威林——皮透生方程*	35
2.5 大信号二极管中的电子运动	47
2.6 三极管中电子飞越時間的影响和三极管的理論計算	52
2.7 靜电控制超高频电子管的現有类型与結構	69
2.8 靜电控制超高频电子管設計計算的尺度比例法	78
2.9 超高频振盪器原理	83
2.10 超高频振盪器	89
2.11 靜电控制超高频管的設計計算方法和步驟	102
第三章 速調管	106
3.1 总述	106
3.2 电子的速度調制和速調管的基本結構	107
3.3 直飞式速調管的速度調制	109
3.4 直飞式速調管初級工作原理的分析	111
3.5 速調管輸出的功率及效率	125
3.6 直飞式速調管工作原理的进一步分析	130

3.7 反射速調管	145
3.8 反射速調管振盪器	152
3.9 直飛式多腔速調管	166
(1) 韦柏斯脫电子运动学法	168
(2) 小信号空間电荷波法	176
(3) 小信号下电子运动和空間电荷波合并法	183
(4) 大信号分析的問題	190
3.10 速調管的結構及数据	192
3.11 速調管的測試	208
3.12 速調管的新发展和新結構	211
3.13 速調管的設計步驟和方法	216
第四章 行波管	221
4.1 总述	221
4.2 綫卷式慢波結構行波管	223
4.3 綫卷式行波管行波的增益	227
4.4 綫卷式慢波結構行波管的行波傳輸系数	234
4.5 綫卷式行波管的增益	248
4.6 行波管振盪的防止	252
4.7 电子注傳輸至綫卷行波的功率	257
4.8 綫卷行波管的飽和功率	261
4.9 无慢波电路結構的行波管	268
4.10 返波管	293
4.11 磁控行波管或磁控放大管	305
4.12 行波管的噪声及低噪声行波管	313
4.13 大信号行波管	330
4.14 現有行波管的一般种类和数据	336
4.15 行波管应用上应注意之点	341
4.16 行波管和返波管的設計步驟和方法	344
4.17 行波管參量的測試	346
第五章 多腔磁控管	360
5.1 总述	360
5.2 电子在电磁場中的运动	362

5.3 磁控管振荡器	372
5.4 行波多腔磁控管振荡器	376
5.5 行波多腔磁控管 π 模式振荡	383
5.6 多腔磁控管的其他振荡模式	385
5.7 多腔磁控管中旋转电子的相位聚焦	388
5.8 多腔磁控管 π 模式的工作情况分析	389
5.9 多腔磁控管工作中电子运动摆线特性的影响	400
5.10 多腔磁控管的效率	407
5.11 多腔磁控管的电流与电压的关系式	414
5.12 多腔磁控管阴阳二极的最佳半径比	419
5.13 多腔磁控管谐振腔系统的谐振频率	421
5.14 多腔磁控管振荡模式的分隔	424
5.15 多腔磁控管振荡模式的选定和转移的避免	429
5.16 多腔磁控管振荡器的等值电路	434
5.17 多腔磁控管的频率挽入、频率推出和长綫效应	441
5.18 多腔磁控管的调谐	444
5.19 多腔磁控管的新管种和新发展	446
5.20 多腔磁控管的测试	460
5.21 多腔磁控管的结构	465
5.22 多腔磁控管的尺度比例法和设计步骤	475
5.23 脉冲多腔磁控管在使用上应注意之点	479
第六章 超高频气体放电开关管	488
6.1 总述	488
6.2 气体放电开关的应用和装置	489
6.3 超高频气体放电的性质	493
6.4 高频率下气体放电的电导	495
6.5 高频气体放电天线开关管	498
6.6 高 Q 高频放电开关的类型	499
6.7 胞式 TR 管的谐振腔及其调谐	500
6.8 胞式 TR 管的温度补偿	502
6.9 胞式 TR 管的谐振腔耦合方法	503
6.10 连腔式 TR 管的结构及其调谐	504

6.11 低 Q 高频放电开关的类型	505
6.12 现代气体放电开关基本计算途径及实验的研究	509
6.13 气体放电天线开关的性质及充气的性质	510
6.14 波尖能量	512
6.15 放电漏过功率	513
6.16 还原时间	515
6.17 保活电极	516
6.18 TR管的寿命及含气的被清除	518
6.19 气体放电天线开关现有种类的参量	519
6.20 超高频气体放电开关的一些新品种	521
附录一	525
附录二	528
附录三	529

第一章 緒 論

1.1 总 述

超高频电子管的迅速发展和广泛应用是近代科学的成就与无线电技术发展的需要所促成的。近代无线电技术继续不断开拓的领域就是应用超高频的领域。这就推动了人们对各式超高频电子管的制造与研究，使它们在这新的领域发挥巨大的作用。

今天超高频电子管的发展水平，已经使它们与许多科学研究及工程技术密切相关，因此与国防事业及国民经济均密切相关。

我们讲超高频电子管这一门课程的目的，是为了使读者学习它们的原理与结构、学习它们的量测技术和实际应用（实验工作）以及掌握从事超高频电子管制造所必需的基础概念和进行研究工作所必需的基础知识。在学习超高频电子管时，除了它本身的工作原理外，还应当注意这个频率领域中的特殊物理性质、特殊元件以及与电子管不能分割的电路问题。谈超高频管，既需谈电子管中的电子运动又需谈与电子管结合在一起的电路。这样，从事超高频管研究和制造的人就需要更广泛的无线电技术和超高频技术基础。在学习超高频管之前，应先自学自无线电基础上发展起来的超高频技术。

目前超高频已向毫米波段进军，它的实用范围正在继续向更高的频率扩展。因此为从事更短波领域的工作打下基础也是这门课的目标之一。

1.2 超高频电子学及其领域中的物理特性

超高频管是在普通低频率用静电控制的电子管的基础上发展起来的，至今超高频电子管中仍旧有一类是利用静电控制的原理。电子由阴极发射，然后在各电极之间受电场作用的力而运动，最后飞上阳极

或其他电极。由于电子具有慣性，虽然它异常微小，在管中的运动非常迅速（例如在普通收音放大管中由阴极飞到阳极的时间仅約 10^{-9} 秒），可是当工作頻率提高到数千兆赫时，这时间就可以与交变电压的周期相比甚或大于一个周期，因而电子的慣性作用就不能忽略。这是应当特别注意的物理性质之一。其次，即使工作頻率尚不太高，电子慣性作用并不严重，但是如果用普通电子管，它們各极引綫的电感和极間电容的阻碍作用已十分显著。这样，超高频管应有的物理特性就比低頻率电子管来得复杂。最后，由于頻率的提高，管子中的电流不仅有电子飞行所形成的分量，位移电流的分量也不能忽略甚至是主要的分量。因此討論超高频管中的电流，必須引用麦克斯韦的全电流概念。

除掉电子管本身外，我們还要注意与管子結合在一起的电路，它在超高频时也有特殊的物理特性。集中参数元件已不能应用，随着頻率的提高，分布参数的元件逐渐成为基本元件。这样，集中参数电路理論已不适用于超高频电路的分析，而分布参数元件的理論和麦克斯韦的电磁波理論則成为分析的基础。

分布参数元件，首先是用諧振綫。当頻率更高时，就使用波导管和諧振腔。因此在超高频工程中，元件的构造显然具有更多的机械生产上的技术問題和更高度的机械上的精密要求。随着电的性质和机械性质的提高，其他方面例如絕緣材料、化学材料、真空封閉、阴极发射等等均需同样提高。这样超高频就形成了一个新的重要的領域。

1.3 超高频电子管的发展过程

超高频电子管和无綫电工程发展之間的联系表现得非常清楚。无綫电工程自长波通信起經歷中波，一步一步地走入短波，人們对于无綫电波的性质逐漸掌握了，于是短波的研究乃获得长足的进步并推向超高频領域。无綫电工程之所以有如此的輝煌成績，是不能脫离电子管的。因此无綫电电子学，也可以认为是应用电子器件的无綫电工程。电子管的发展不能脫离无綫电工程；无綫电工程沒有电子管也就不能

达到今日的水平。

1887年赫芝证实麦克斯韦电磁波理論时所使用的頻率实系超短波。他用火花式发射机产生微弱的超高频并在实验室中证明了电磁波的反射、繞射等性质。1895年波波夫发明无线电。此后实用无线电通信却先走上了长波的途径，然后再发展到广播段及短波段，并逐渐向超高频发展。其所以如此，与工业能力的适应有关。該时电机工业已能造出几十千赫以上的高频发电机，因此才首先使用了长波通信。1908年三极电子管发明之后，才促使无线电通信有了新的局面，而电子工程亦由此正式萌芽。

电子管发明后，无线电通信得到了迅速的发展，应用的頻率逐渐提高，电子管額定功率也愈来愈大，并发现了天空的电离层，证明短波无线电非常适用于远距离通信。通信工作进入短波范围，电子管的工作仍非常满意。可是当使用的頻率超出短波范围之后，电子管便逐渐显出缺点，它的額定功率低落、工作不稳定、电路效率低、零作品质因数不高、絕緣材料不合要求等等，阻碍了普通电子管在超高频工程上的应用。

超高频管首先是在静电控制的普通电子管的基础上加以改进的。在这方面先后經小型管、橡实管、門鉗式管而做到灯塔管、元盘管及諧振腔管等，而工作頻率也发展到10,000兆赫。在其他方面的理論研究的指导下，又制出了調速管、多腔磁控管、行波管、电子注波管等的超高频管以及为满足雷达应用的脉冲电子管、气体天綫开关管及强电流气体放电脉冲管等，使得微波工程得以迅速的发展起来。

这許多超高频电子管的构造与应用技术均和波导管及諧振腔和周期性慢性电路有密切的关系。电子管与电路合成一个整体，所謂超高频管往往就是一个振盪器或是放大器。頻率愈高管子和电路的結合愈感需要。

由科学研究的发展史来看，理論与实验是互相推进的。常常因为实践上遇到困难，便进入理論研究，理論上得出結論，又指导实践。各种类型超高频管的发展几乎都如此。

目前微波电子管繼續朝着縮短波长和增大功率这两个最主要方面发展。在縮短波长上，各国均集中力量于毫米波与超毫米波的产生。这方面尚有許多工作沒有完成。照現在各个方面进行的方法和途径看来，将会产生許多新的方法而不仅是微波电子管的改进。例如量子电子学中的原子和分子振盪器、都卜勒效应的波盪器、契楞柯光效应振盪器、高能电子束通过波导管和高速粒子在介质中的运动以及鉄淦氧磁物的应用等等均有成功的希望。我們所以要进行毫米波和超毫米波的产生，主要是使雷达的分辨能力可以提高到电视的效果，其次是科学研究上已产生了新的微波頻譜学，它对物质的研究提供了新的有效的方法。至于增加功率的要求也是迫切的，因为提高功率是增加微波技术能力的重要問題之一。

1.4 超高频工程在各方面的 应用范围及频率分段

超高频及微波技术在下述各方面已有重要应用。

(甲) 军事方面

雷达、导航、导弹、軍用电视、接力通信等均為超高频技术所独占。超高频技术对于軍事的价值是不言而喻的。

(乙) 科学研究方面

超高频对科学研究也有巨大贡献。在原子能研究上脫離不了超高频技术的帮助，而粒子的綫性加速器更是超高频技术的直接产物。今日超高频技术已在科学研究上形成一門独立的研究項目，即微波頻譜学已与紅內綫紫外光及可見光光譜学并列互為相輔而行的学科，且微波頻譜学在量測的准确度上胜过其他光譜学的方法。

其次，超高频技术已应用到宇宙星际的观察，形成射电天文学，大大扩大人們观察天体的窗孔，发现了許多新的星球和宇宙星际的射頻輻射。人对太阳的研究也取得了新的成功，量得了太阳的射頻輻射是在几厘米到十几米。

又如将超高频技术应用到气象部門，則形成了微波气象学，改进

了气象的預測工作。这些都是有着特殊成效的方面，其他方面的应用是举不胜举而且是在不断开拓中的。

(丙) 无綫电通信和广播方面

在通信和广播上，微波波段的应用也日見重要并在不断开拓之中。微波中继接力通信早已实现，目前各国繼續大力研究的有鋼性波导管的微波接力通信(H_{01} 波)、散射通信和微波电视技术等。事实上，許多軍事应用項目，均便于移作民用。微波技术既对軍事上有巨大的价值，則对民用通信等工作的作用同样是巨大的。今日的通信和广播部門，对微波技术和超高频电子学已經不可忽視。

目前超高频频率的范围及频率分段約有如下情况：

頻 率 (兆 赫)	波 长 (米)
30—300	10—1.0
300—3,000	1.0—0.1
3,000—30,000	0.1—0.01
30,000—300,000	0.01—0.001
300,000—	0.001—

根据雷达上的应用，上述频率范围有如下的波段划分：

波 段 符 号	中 心 波 长 (厘米)	波 段 范 围	波 段 寬 (百分数)
V		0.535—0.652厘米	
Q	0.86	0.652—0.833 "	
K	1.25	0.833—1.65 "	
J		1.65—2.72 "	
κ_S	3.23	3.13—3.33 "	12
κ_L	3.43	3.33—3.53 "	
S_{w1}	8.285	3550—3700兆赫	8.45
S_{w2}	8.640	3400—3500 "	
S_{A1}	9.020	3250—3400 "	9.23
S_{A2}	9.455	3100—3250 "	

波 段 符 号	中 心 波 长 (厘米)	波 段 范 围	波 段 宽 (百分数)
S_{S1}	9.840	3000—3100 "	6.67
S_{S2}	10.170	2900—3000 "	
S_{G1}	10.515	2800—2900 "	7.14
S_{G2}	10.900	2700—2800 "	
C	7.5	3500—6500 "	
L		19.3—76.9厘米	

1.5 超高频管的现有种类

(甲) 静电控制超高频管

1. 小型管；2. 橡实管；3. 门扭式管；4. 灯塔管及元盘管；5. 谐振腔管。

(乙) 速调管

1. 反射速调管；2. 直射式速调管；3. 减速场管；4. 多次反射速调管。

(丙) 多腔磁控管

1. 固定频率式；2. 调谐式；3. 调制频率及调制幅度式；4. 泊管；5. 电压调谐磁控管；6. 同轴磁控管。

(丁) 行波管

1. 电压放大行波管；2. 功率放大行波管；3. 返波管；4. 电荷波管(电子注波管)；5. 磁控行波管；6. 低噪声行波管；7. 电子注参量放大管；8. 螺旋管及旋束管。

(戊) 集射管

(己) 气体天线开关

1. 高Q式；2. 低Q式。

上述各种超高频管中某几种管的功率及频率范围以及进展情况如图1.1所示。图1.1是指等幅波工作的情况，如作脉冲应用，则输出功率尚可增大千百倍。

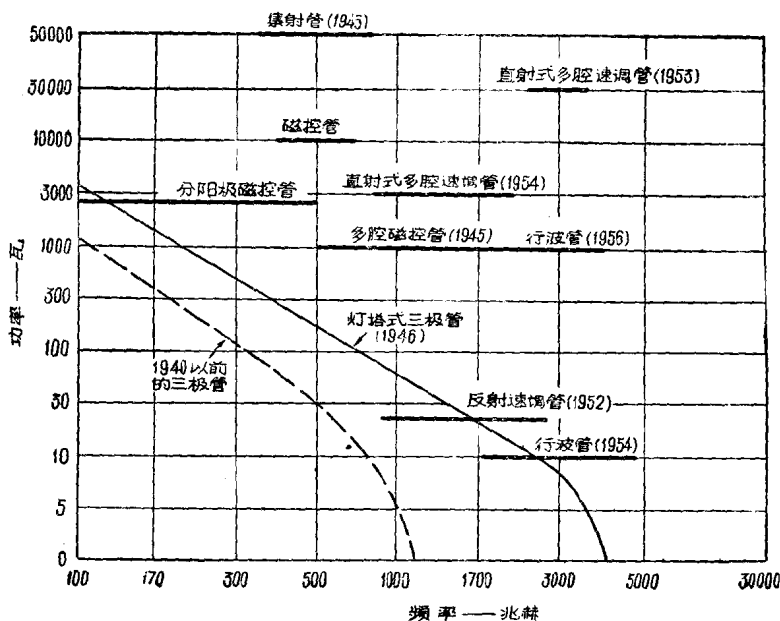


图 1.1 超高频管的等幅波振荡的输出功率

集射管输出功率很大，它是二次世界大战中反雷达用的超高频管，但是它的工作频率仅可达到一千兆赫以下，目前反雷达中的效果已小而在功率上言又有其他种类的超高频管逐渐追上，因此在本书中将集射管略去未谈。

1.6 超高频电子管和电子学的新发展

近十年来超高频电子管和电子学的新发展是迅速而巨大的。超高频管的发展集中在量的增长、质的改进和应用范围的扩大上，在以下几个方面均有了重大的研究和显著的成果：

甲、提高工作频率，以进入毫米波、亚毫米波直到和红外线接壤的区域。

乙、降低噪声系数，以解决低噪声器件和微弱信号的接收和放