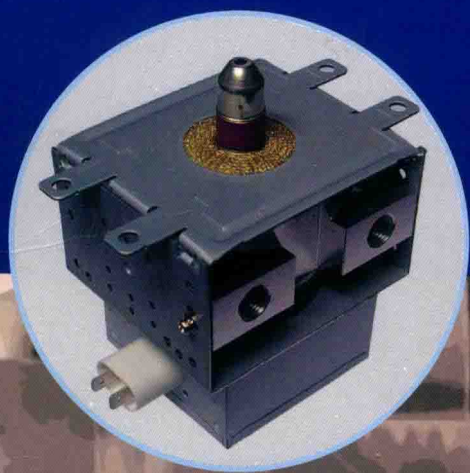
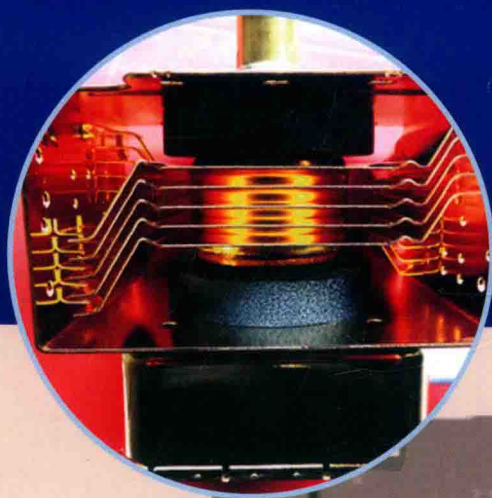


2018年度四川省重点出版项目专项资金补助项目

# 磁控管与 微波加热技术

MAGNETRONS AND  
MICROWAVE HEATING TECHNOLOGY

张兆镛 著



# 磁控管与微波加热技术

张兆镗 著



 电子科技大学出版社  
University of Electronic Science and Technology of China Press

图书在版编目(CIP)数据

磁控管与微波加热技术 / 张兆镗著. — 成都 : 电子科技大学出版社, 2018. 5

ISBN 978-7-5647-6116-5

I. ①磁… II. ①张… III. ①磁控管②微波加热  
IV. ①TN123②TM924.76

中国版本图书馆 CIP 数据核(2018)第 079283 号

**磁控管与微波加热技术**

CIKONGGUAN YU WEIBOJIAREJISHU

张兆镗 著

策划编辑 张 鹏

责任编辑 兰 凯 刘 凡

责任校对 魏 彬 汤云辉

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 [www.uestcp.com.cn](http://www.uestcp.com.cn)

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸 185mm×260mm

印 张 69

字 数 1900 千字

版 次 2018 年 5 月第 1 版

印 次 2018 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-6116-5

定 价 498.00 元

版权所有,侵权必究

## 作者简介

张兆镛,1935年11月出生于浙江省台州市,1953年考入上海交通大学电讯系通讯专业,1956年9月转入成都电讯工程学院电真空技术系学习,1957年7月成为成都电讯工程学院首届毕业生,毕业后留校分配至五系微波教研室任教,直至1996年退休。

毕业后立即赴南京电子管厂设计所参与我国首部雷达发射机中微波磁控管的研发工作,历时一年,制成我国第一只脉冲磁控管后返校。接着参与部分3厘米波段波导元件的设计试制工作,填补了国产微波波导元件的空白。在校曾担任微波技术、微波电子管、微波测量、微波天线、模拟电路、微波能应用、微波电子学基础、电介质的微波测量、非电量微波检测技术等多门课程的本科生与研究生的讲授与实验指导工作。先后独编与合编出版《微波电子管原理》《微波器件原理》《微波管高频系统的测量》《磁控管设计手册》《微波加热技术基础》《微波、激光的神奇应用》《从电子学到光子学》等教材与专著共8本,校内编印研究生讲义3本,申报了16个专利(其中一半为发明专利),发表了60余篇学术论文。



★1993年起享受国务院专家特殊津贴。

★曾获得电子部科技进步奖、电子部优秀教材奖、四川省优秀教学成果奖、教育部科技奖、四川省科协铜牛奖、电子科技大学优秀教学成果奖、研究生培养奖等十余项。

★1985—2007年担任中国电子学会微波能应用专委会副主任,后改任顾问至今。

★1985年起任电子部物理电子学教材编委会委员,后任物理电子学教学指导委员会顾问等。

★1987年率考察团前往波兰执行中波科技合作协定的微波应用考察。

★1994年受聘为西安交通大学“电子物理与器件”国家开放研究实验室学术委员会委员。

★1994年受聘为东南大学《电子器件》杂志编委会编委。

★1997年随考察团前往乌克兰和俄罗斯有关科研生产联合体及高校考察微波管的生产研发动态和科技合作事宜。

★2004年起受聘为美的集团微波电器事业部特聘专家。

★2006年起受聘为长沙隆泰微波热工有限公司技术顾问。

## 内容简介

本书是作者根据 60 年来从事微波磁控管和微波加热技术领域的工作,包括发表的论文、申报的专利、出版的教材与著作等方面的内容编著而成,内容包括磁控管的工作原理、磁控管的工程设计方法、磁控管的测试技术,以及微波加热技术基础及应用、微波等离子体技术及应用、家用微波炉等;同时,专门用一章介绍材料的物电特性特别是材料的介电特性的各种微波测试方法,这对从事微波加热技术的人来说是必需的。第 11、12 章收录了作者在上述两个技术领域中曾发表过的论文,在各种学术会议上的报告,给有关单位撰写的技术咨询报告,以及申报的各种专利,大部分均已授权,有些尚在审查中。

本书的最大特点是理论联系实际,可读性强,能将磁控管与微波炉及微波加热技术等领域中在设计、测试及应用上出现的问题提高到理论上加以分析,从而得出合理的解释,反过来指导生产实践,或提出改进意见或措施,完善设备技术性能。书末附录还提供了大量难得的技术资料供读者查阅。

本书的读者对象是微波磁控管和微波加热技术领域中的工程技术人员及管理人员,对大专院校相关专业(物理电子学、微波技术与工程、微波功率应用、微波测量与应用、无线电物理等)的大学生及研究生亦可作为教材或参考读物。

## 序 言

从 1981 年编写出版第一本全国统编教材《微波电子管原理》以来,作者先后主编与参编出版了 4 本统编教材、1 本设计手册、1 本科技专著及 3 本科普著作,近 20 年来,每年都到全国各地讲授有关“磁控管”“微波技术基础”“微波炉”“微波功率应用”“微波等离子体及其应用”“微波测量”等相关内容,留下了大量手稿与资料;此外,在从教 50 年及 55 年间,先后内部出版了两部《微波功率应用文集》,在文集中将在历届有关微波能应用学术会议上的报告及论文汇集其中。

1957 年秋,作者有幸参加了南京电子管厂设计所的微波磁控管的研发工作,历时一年,试制成功我国第一只雷达发射机用的脉冲磁控管(MI-26),从此与磁控管结下了不解之缘,先后对脉冲磁控管、连续波磁控管、捷变频磁控管及同轴磁控管等在设计、试制、测试及应用等领域投入了毕生的精力,在从事研究与开发的过程中取得了宝贵的经验。20 世纪 70 年代初以来,在我国蓬勃开展的微波功率应用中,磁控管是必不可少的微波功率源,由于磁控管品种及质量的不足,特别是可靠性及寿命的缺陷与问题,我国的微波功率应用与推广事业受到了极大的限制。近几十年来,我国在大功率连续波磁控管技术的开发中采取了“两条腿走路”的措施:一方面从国外引进整条微波炉用磁控管生产线,在消化吸收的基础上不断改进与提高,并逐年扩容,目前仅美的集团下属的磁控管公司就具有生产 4 000 万只磁控管的规模,几乎占了全球炉用磁控管产量的一半以上;另一方面,立足国内,自力更生,研发不同波段不同功率电平的大功率工业微波加热及微波医学应用的 CW 磁控管与脉冲磁控管,均取得了长足的进展,填补了国内的空白。因此,大大推动了我国微波功率应用事业的发展。在该领域内,目前涉及的交叉学科与行业,如轻工、食品、橡胶、木材加工、印染、烟草、陶瓷、建材、冶金、化工、治污、石油、家具、医疗、杀虫、灭菌、育种、农业、交通运输等均在正常的发展之中,而有些应用如微波烟梗膨梗技

术、微波烟叶松包技术、大米微波杀虫技术、家具甲醛消除技术等还是世界首创。

纵观 40 多年来我国微波功率应用的几次反复就很有说明问题,七十年代第一次高潮风起云涌,可以说是遍地开花,光上海、南京等华东沿海地区,几十家工厂都尝试采用微波功率来作为加热、干燥、脱水、烘干、固化、固色、煮白、灭菌、保鲜等手段来提高效能、降低成本、改善环保、减轻劳动强度……但由于当时的微波工业基础薄弱,CW 磁控管的生产刚刚起步,质量和可靠性得不到保证,微波测量手段落后,测试仪表不配套,加上微波功率应用部门都是例如轻纺、化工、烟草、食品、农林等非电子技术领域,相互了解和配合也成问题,这样的热闹场面没有维持多久就纷纷下马,能坚持下来的没有几家!改革开放后,凭借国外的先进技术,首先在橡胶硫化技术中充分利用微波加热的特点和优势,从国外引进了几十条微波硫化生产线,一时间,这一技术得到了前所未有的肯定和推广,国内的生产线也开始研发,形势一片大好,但微波源磁控管及环行器价格昂贵,寿命不长,致使微波设备的生产成本和维护成本居高难下,这就给微波功率的应用和推广无形中设置了重重障碍,无法超越。90 年代中期,我国的家用微波炉工业取得了突破性飞跃。近 20 年来,微波炉的产量从 80 年代年产不足 100 万台一下跳跃到 6 000 多万台,估计几年后国产微波炉会年产 8 000 多万台,成为世界上产能第一的大国。也正因为如此,由于廉价微波炉充斥市场,这就给微波设备制造厂商提供了廉价的磁控管及附属设备的机会。所以近几年来,我国的微波公司如雨后春笋般地出现,据不完全统计,总数已达一百多家,微波公司形成了微波功率应用的第三次高潮。但愿这次高潮能够持久地发展下去,做到技术上精益求精,售后服务上好上加好,并能在各行各业中推广应用开来,创制出具有我国特色的微波产品(包括微波加热设备,微波化学设备,微波烧结设备,微波等离子体设备及微波诊断设备和微波医疗设备等),使微波功率成为真正高效节能、无环境污染、绿色环保的高新技术,为我国的社会主义现代化服务。

由此可见,半个世纪以来,无论在磁控管生产领域,还是在微波功率应用领域,我国已取得的成就是巨大的,也是具有中国特色的。

本书中还收集了近 20 年来发表的论文及在学术会议上的报告,以及历年来申报的部分专利,其中绝大部分都是对科研生产领域中发现并提出的问题,有针对性地从事理论上加以分析,回头解决生产实际中存在的困惑,借以总结经验并加以推广。

本书中还收集了作者首次提出的“微波电子学”理论中的“双模磁控管及多基频特性”的学术新观点,以及“微波炉动态阻抗的测量”“多馈口微波炉动态阻抗的测量”“分布

参数电感线圈的多谐振回路”“磁控管中工作电流与非工作电流”等的新概念与新测量方法及新技术，解决了生产与实际应用中久未解决的难题。

现将上述有关内容编著成《磁控管与微波加热技术》一书，以飨读者。

本书共分 12 章，其中第 1 章“微波技术基础”的最大特点是尽量回避电磁理论及微波技术中高深烦琐的理论分析与推演，而用极为通俗易懂的科普语言对微波技术基础知识加以叙述与介绍，使微波工业界的非微波专业的工程技术人员对微波有一个入门的认识，并配有大量的图形与实物照片，使人一目了然，印象深刻。对微波技术有进一步深入了解需求的读者，也可从书末参考文献中选择自己喜欢的专著中寻找答案。第 2 至第 5 章分别对磁控管的工作原理，工程设计与方法，磁控管的测试，磁控管中若干理论与实际问题等做了较为全面的介绍与讨论。第 6 章论述了微波加热的物理基础及许多具体加热应用器的分析与设计。第 7 章中介绍了 40 多年来国内外特别是国内具有中国特色，并具有自主知识产权的很多实施案例，突出了我国在微波加热技术领域中的出色成就。第 8 章中详细回顾了微波炉从国外到国内再到国外的历史性突破的光辉历史，我国已成为当前执世界微波炉牛耳的产能大国，傲立于东方。第 9 章简要介绍微波等离子技术的情况及应用领域。第 10 章对材料的微波特性尤其是介电特性的测量做了重点的叙述，因为任何材料的介电特性都直接影响微波加热技术的成功应用与否。第 11 章将作者在不同场合的报告、论文并以论文形式集成成章。第 12 章摘选了作者多年以来申报的发明专利和实用新型专利，这些专利都直接与微波加热技术有关。书末还有许多具有实用价值的附录及参考文献可供读者查找相应资料。

在本书写作过程中，美的集团威特真空电子制造有限公司、长沙隆泰微波热工有限公司、四川宏图普新微波科技有限公司、南京三乐微波技术发展有限公司、成都国光电气总公司、湖南中晟热能科技有限公司、成都纽曼和瑞微波技术有限公司、深圳麦格米特公司等单位提供了大量的设备照片及磁控管特性、参数等详细资料，在此谨向他们致以真挚的感谢！

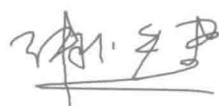
作者对电子科技大学物理电子学院院长蒙林教授在本书出版过程中所给予的支持与帮助深表感谢！同时也感谢“电子科技大学美的集团微波管技术与微波能应用联合实验室”主任曾葆青教授和副主任黎晓云高工多年来在上述领域内的合作与帮助，书中很多测试数据、曲线与结果都跟他们的协同实验有关，也曾多次与他们联合发表论文与申报专利或讨论问题。



书中采用了王文祥教授的《微波工程技术》一书中的一些图片、数据与特性,并就表面电阻与电阻率等问题进行过有益的讨论,获益良多。十多年前,还与王文祥教授等人联合申报了5个发明与实用新型专利,后来均已获得了授权。在本书出版过程中,得到了王文祥教授的关注、支持与帮助,在此一并致谢!

本书在出版过程中,得到电子科技大学出版社理工科教材分社社长张鹏,编辑兰凯、刘凡,封面设计姚德志,迪艺排版工作室张雪梅、唐琴琴等的大力支持与帮助;电子科大(威海)数字出版有限公司王洁、刘雅文精心绘制了本书中的大部分插图,没有他(她)们的辛勤劳动与努力,本书将无法高质量地呈献给读者,在此谨向他(她)们致以崇高的敬意和衷心的感谢。

作者于成都寓所逊敏斋



2016年10月

## 目 录

第 1 章 微波技术基础 .....	1
1.1 微波及其特点 .....	1
1.1.1 从微波炉说起 .....	1
1.1.2 何谓微波 .....	2
1.1.3 微波的特点 .....	3
1.2 微波传输线 .....	6
1.2.1 同轴线 .....	7
1.2.2 波导管 .....	8
1.3 微波谐振系统(谐振腔) .....	14
1.3.1 谐振腔的形成过程 .....	14
1.3.2 谐振腔的工作模式 .....	15
1.4 驻波与匹配 .....	19
1.4.1 驻波的形成 .....	19
1.4.2 阻抗与匹配 .....	20
1.4.3 阻抗圆图(史密斯 Smith 圆图) .....	22
1.4.4 导纳圆图 .....	24
1.5 微波天线 .....	26
1.5.1 天线的基本参数 .....	26
1.5.2 喇叭天线 .....	27
1.5.3 抛物面天线 .....	29
1.5.4 裂缝天线 .....	31
1.5.5 介质天线 .....	33
1.5.6 螺旋天线 .....	34
1.6 微波元件 .....	36
1.6.1 波导激励头 .....	36
1.6.2 波导定向耦合器 .....	37
1.6.3 环行器 .....	38

1.6.4	匹配负载	40
1.6.5	阻抗调配器	41
1.6.6	各种弯波导	42
1.6.7	过渡波导	43
1.6.8	常用的波导法兰	44
1.6.9	几种常用的同轴元件	46
1.7	微波测量及仪器	47
1.7.1	微波网络分析仪	48
1.7.2	微波频谱分析仪	49
1.7.3	微波功率计	50
1.7.4	微波数字频率计	54
1.7.5	微波介质特性测试仪	54
1.7.6	微波综合测试仪	56
1.7.7	宽带合成扫频信号发生器	56
1.8	小结	56
第2章	磁控管的工作原理	57
2.1	磁控管的发展历史	57
2.1.1	回旋频率型磁控管	58
2.1.2	负阻型磁控管	60
2.1.3	行波型磁控管	62
2.1.4	磁控管的分类	64
2.2	静态磁控管中的电子运动	65
2.2.1	电子在平板系统复合场中的运动	65
2.2.2	电子在圆柱系统复合场中的运动	69
2.2.3	静态磁控管中的阳极电流	72
2.2.4	磁控管中的层流模型	74
2.3	磁控管中的谐振系统	77
2.3.1	磁控管谐振系统的谐振模式	77
2.3.2	磁控管谐振系统的谐振频率	78
2.3.3	相互作用空间内的高频场结构	86
2.3.4	相互作用空间内电子与行波的同步	89
2.3.5	谐振模式与空间谐波	90
2.4	磁控管中振荡的自激	91
2.4.1	自激的产生	91
2.4.2	磁控管的等效电路	92
2.4.3	磁控管中的相位聚焦和电子挑选	94
2.4.4	磁控管的同步电压	97
2.4.5	磁控管的门槛电压	98
2.4.6	磁控管的工作电压	101

2.5 磁控管振荡的稳定性	104
2.5.1 非 $\pi$ 模式振荡的不稳定性	104
2.5.2 振荡在非 $\pi$ 模式上的可能性	107
2.5.3 隔模带的应用	109
2.5.4 异腔式阳极块谐振系统	114
2.5.5 提高 $\pi$ 模式工作稳定性的其他措施	117
2.6 磁控管的效率	118
2.6.1 磁控管的最大电子效率	118
2.6.2 磁控管的线路效率与总效率	122
2.7 磁控管的工作特性和负载特性	125
2.7.1 磁控管的工作特性	125
2.7.2 磁控管的电子频率偏移	128
2.7.3 磁控管的负载特性	134
2.7.4 磁控管的频率牵引	135
2.8 磁控管的频率调谐	138
2.8.1 容性调谐	139
2.8.2 感性调谐	141
2.8.3 旋转调谐	143
2.8.4 耦合腔调谐	144
2.9 同轴磁控管(CEM)	147
2.9.1 普通磁控管中存在的问题	147
2.9.2 同轴磁控管的基本原理和结构	149
2.9.3 同轴磁控管的特性	152
2.10 电压调谐磁控管(VTM)	154
2.10.1 电调管的工作原理和结构	155
2.10.2 电调管的参量与特性	160
2.11 磁控管的分析与处理方法	163
2.12 CW 磁控管	164
2.12.1 CW 磁控管的历史沿革	164
2.12.2 CW 磁控管的生产及市场现状	165
2.12.3 炉用磁控管的发展动向	166
2.12.4 CW 磁控管的设计与结构特点	171
2.12.5 CW 磁控管中存在的主要问题	172
2.12.6 世界各国微波炉用 CW 磁控管产量情况	173
2.13 磁控管的应用与未来发展	173
2.13.1 磁控管的类型	175
2.13.2 微波炉用磁控管产量的稳健增长	175
2.13.3 微波工业应用领域	175
2.13.4 微波医疗应用领域	175

2.13.5 其他微波应用领域 .....	176
2.14 小结 .....	176
<b>第3章 磁控管的工程设计与方法</b> .....	<b>178</b>
3.1 磁控管设计的原则与步骤 .....	178
3.1.1 磁控管已知的条件与参数 .....	178
3.1.2 磁控管的设计要求 .....	178
3.1.3 磁控管需要设计的部件与系统有如下几类 .....	179
3.2 磁控管的一般设计程序 .....	180
3.2.1 互作用空间的设计 .....	180
3.2.2 谐振系统的设计 .....	181
3.2.3 阴极的设计 .....	181
3.2.4 能量输出器的设计 .....	181
3.2.5 磁路的设计 .....	181
3.3 互作用空间的设计 .....	181
3.3.1 谐振腔数目 $N$ 的选择 .....	181
3.3.2 阴阳极半径比 $\sigma$ 值的确定 .....	182
3.3.3 叶片厚度与槽缝宽度比值的确定 .....	183
3.4 阳极谐振系统的设计 .....	185
3.4.1 谐振腔的设计 .....	186
3.4.2 隔模带的设计 .....	189
3.4.3 关于互作用空间形状因子的选择 .....	193
3.5 阴极的设计 .....	194
3.5.1 用于磁控管中的阴极应具有的特性 .....	194
3.5.2 阴极设计的原始参数 .....	195
3.5.3 存在电子回轰时的功率平衡 .....	196
3.5.4 对阴极二次发射系数的要求 .....	198
3.5.5 热子的设计与结构 .....	199
3.5.6 阴极端帽设计 .....	200
3.5.7 热子及阴极引出结构 .....	201
3.5.8 热子及阴极引出线的抗流结构 .....	206
3.6 能量输出器的设计 .....	208
3.6.1 能量输出器的基本要求 .....	208
3.6.2 能量输出器与腔体的耦合方式与类型 .....	208
3.6.3 轴向天线能量输出器的设计 .....	214
3.7 输出窗的设计 .....	217
3.8 端部空间的设计 .....	218
3.8.1 端部空间的形成 .....	218
3.8.2 端部空间的危害性 .....	218
3.8.3 设计时的对策与措施 .....	218

3.9	可调磁控管调谐装置及设计	219
3.10	磁路设计	219
3.11	冷却系统的设计	220
3.12	磁控管的缩尺设计法	220
3.13	小 结	222
<b>第 4 章</b>	<b>磁控管的测试</b>	<b>223</b>
4.1	磁控管测试的分类	223
4.2	磁控管的测试参数	223
4.2.1	冷参数	223
4.2.2	热参数	224
4.2.3	例行试验	225
4.2.4	寿命试验	225
4.3	CW 磁控管电参数测试规范	225
4.3.1	灯丝测试	226
4.3.2	绝缘电阻( $R_{\text{if}}$ )和击穿电压( $BV$ )测试	226
4.3.3	工作参数测试	226
4.3.4	微波辐射测试	228
4.3.5	磁控管工作特性测试	228
4.3.6	磁控管负载特性的测试	230
4.4	磁控管测试系统及方法	230
4.4.1	磁控管冷测系统及测量方法	230
4.4.2	磁控管的热测系统及测量方法	241
4.5	例行试验(适用于炉用 CW 磁控管,对其他磁控管也具有参考价值)	256
4.5.1	环境试验	256
4.5.2	振动试验	257
4.5.3	冲击试验	258
4.5.4	压力试验	258
4.5.5	冷却液泄漏试验	259
4.6	寿命试验	259
4.6.1	正常寿命试验	259
4.6.2	加速寿命试验	259
4.7	磁控管的自动测试	259
4.8	关于磁控管测试中存在若干问题的分析与解释	261
4.8.1	关于电源频率不同时造成的影响	261
4.8.2	关于磁控管冷热频差	261
4.8.3	关于测滤波组件和无屏蔽盒时阳极电流不稳定问题	263
4.8.4	关于超高效率管子稳定性问题	263
4.8.5	关于在微波炉工作时的阳极电压跳动问题	263
4.8.6	关于稳定性测试中的问题	263

4.8.7	关于充磁方向不同在两种系统中功率差异问题	263
4.8.8	关于磁控管作为电源负载时的性质	264
4.8.9	关于功率测量误差问题	264
4.9	小结	265
<b>第5章</b>	<b>磁控管中的若干理论与实际问题</b>	<b>266</b>
5.1	引言	266
5.2	“炉用”磁控管的特点和存在的问题	266
5.2.1	“炉用”磁控管的特点	266
5.2.2	“炉用”磁控管中存在的问题	267
5.2.3	如何解决存在的问题	272
5.3	微波炉用磁控管失效机理的探讨	272
5.4	CW 磁控管与脉冲磁控管效率的差异	275
5.4.1	概述	275
5.4.2	脉冲磁控管的效率	276
5.4.3	CW 磁控管的效率	277
5.4.4	效率差异初探	278
5.4.5	提高脉冲磁控管效率的可能途径	279
5.4.6	结语	279
5.5	磁控管中的阳极电压电流与输出频谱波形	280
5.5.1	半波倍压整流电源磁控管的阳极电压及电流与输出频谱波形	280
5.5.2	全波整流不滤波电源时电压电流及频谱波形	282
5.5.3	变频电源时磁控管的频谱特性	283
5.5.4	结论	283
5.5.5	磁控管 EMC 的未来发展方向	284
5.6	磁控管的起振稳定及功率输出与负载的关系	284
5.6.1	磁控管的起振与稳定条件	284
5.6.2	振荡功率的分配	286
5.6.3	磁控管的效率	287
5.6.4	CW 磁控管中的输出结构	288
5.6.5	磁控管的负载特性曲线	288
5.6.6	几个问题	290
5.7	双模磁控管	291
5.7.1	引言	291
5.7.2	双模磁控管的概念	292
5.7.3	炉用磁控管的非连续波性质	292
5.7.4	炉用磁控管工作于脉冲状态的可行性	295
5.7.5	双模及多模运用	296
5.7.6	磁控管全波倍压工作的可行性	297
5.8	磁控管阳极块加工公差对性能的影响	298

5.8.1	磁控管阳极块制造公差的确 定	298
5.8.2	阳极叶片倒圆的公差	300
5.8.3	阳极块表面处理对性能的影响	300
5.8.4	关于谐振腔系统的强化方法	301
5.9	负载对磁控管振荡稳定性的影响	302
5.9.1	闭合传输线分析法	302
5.9.2	级联四端网络分析法	304
5.10	长阳极磁控管的工作机理与设计特点	309
5.10.1	概 述	309
5.10.2	长阳极磁控管的由来	309
5.10.3	长阳极磁控管的结构	310
5.10.4	工作原理简介	311
5.10.5	实 例	314
5.10.6	结构改进	314
5.10.7	管子 的基本特性	318
5.10.8	主要应用	319
5.10.9	结 语	320
5.11	阴极的电子回轰与二次发射	320
5.12	炉用磁控管中的浪涌电压与浪涌电流	324
5.13	小 结	327
<b>第 6 章</b>	<b>微波加热技术基础</b>	<b>328</b>
6.1	概 述	328
6.2	电介质的基本属性	330
6.2.1	电介质的分类	330
6.2.2	介质的极化	331
6.2.3	材料的复介电常数	331
6.2.4	水的介电特性	332
6.2.5	损耗机理	335
6.2.6	常用材料的介质特性	337
6.2.7	介电常数 $\epsilon''$ 与湿度的关系	340
6.2.8	介电常数 $\epsilon''$ 与温度的关系	345
6.2.9	介电常数 $\epsilon''$ 与频率的关系	351
6.2.10	$Q$ 值与湿度的关系	353
6.2.11	关于介质特性数据的讨论	355
6.2.12	触媒与媒介	357
6.3	微波加热的物理基础	358
6.3.1	概 述	358
6.3.2	耗散功率	358
6.3.3	传播因子和渗透深度	365



6.3.4	比热	369
6.3.5	温度上升率	371
6.3.6	电场强度	371
6.3.7	热和质量的转移现象	374
6.3.8	集肤深度	377
6.3.9	壁损耗	379
6.4	行波加热器	381
6.4.1	概述	381
6.4.2	平面波	381
6.4.3	导波	382
6.4.4	阻抗匹配	385
6.4.5	电压驻波比	386
6.4.6	行波加热器	388
6.5	多模炉式加热器	401
6.5.1	概述	401
6.5.2	多模加热器的理论概述	403
6.5.3	场分布和加热的均匀性	406
6.5.4	插入介质时的Q值	408
6.5.5	场强和壁电流	412
6.5.6	功率密度	414
6.5.7	炉壁材料的选择	415
6.5.8	炉门及其密封	415
6.5.9	多振荡器馈源	417
6.6	单模谐振腔加热器	418
6.6.1	概述	418
6.6.2	谐振腔的模式和Q值	419
6.6.3	阻抗匹配	420
6.6.4	用反射功率测量	421
6.6.5	用传输功率测量	430
6.6.6	TE <sub>10n</sub> 矩形腔体	431
6.6.7	圆柱腔	444
6.6.8	耦合孔	458
6.6.9	传入谐振腔加热器中的功率	461
6.6.10	谐振腔加热器的效率	462
6.7	特殊的加热器结构	463
6.7.1	概述	463
6.7.2	一种改进的TE <sub>10n</sub> 双腔谐振型干燥器	463
6.7.3	接近截止的TE <sub>10n</sub> 加热器	466
6.7.4	周期性结构加热器	468