

现代电子信息技术丛书

真空电子技术

(第2版)

—— 信息化武器装备的心脏

主编 廖复疆 副主编 孙振鹏 闫铁昌



国防工业出版社
National Defense Industry Press

现代电子信息技术丛书

真空电子技术 (第2版)

——信息化武器装备的心脏

主编 廖复疆

副主编 孙振鹏 闫铁昌

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书着重论述真空电子技术在军事信息装备中的应用。主要内容有:真空电子技术概论;速调管;行波管;正交场微波管;高功率微波源;气体放电器件;阴极和热子组件;真空微电子学;微波管发射机;微波管发射机电源;脉冲调制器;微波管发射机的控制、保护和监测;军用微波系统等。

读者对象:从事军事电子系统和广播电视、卫星通信、计算机终端、工业加热等民用系统研究、制造、使用的有关人员、各级领导和计划管理人员。

图书在版编目(CIP)数据

真空电子技术 / 廖复疆主编. —2 版. —北京: 国防工业出版社, 2008. 7

(现代电子信息技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 05723 - 2

I. 真… II. 廖… III. 真空电子技术 IV. TN1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 068860 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 26 字数 640 千字

2008 年 7 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

《现代电子信息技术丛书》

编 审 委 员 会

名 誉 主 任	陈炳德					
主 任	李安东					
常务副主任	童志鹏	张 弛	王志刚			
副 主 任	刘成海	王小谟	熊群力	王 峰	许建峰	
	程洪彬					
委 员	蔡 镭	彭华良	王 政	毕克允	夏乃伟	
	张光义	刘 兴	雷 厉	张冬辰	黄月江	
	李 跃	胡爱民	范茂军	瞿兆荣	张学孝	
	李立功	梅遂生	廖复疆	程辉明	骆光明	
	汪继强	许西安	陈 洁			

总 编 委

总 编	童志鹏	
副 总 编	王晓光	
委 员	张雅丽	线珊珊

《真空电子技术》(第2版)

主 编 廖复疆

副主编 孙振鹏 闫铁昌

编著人员 (按姓氏笔画排序)

王 刚	冉繁福	冯进军	任 劲	闫肃秋
孙承革	邬显平	李 季	李文辉	李宏福
李泽普	苏奇才	何天水	汪 军	张 群
张建华	张益林	陈永浩	陈其略	陈隆华
周志伟	钟国俭	栾小燕	戴大富	

Preface

序

《现代电子信息技术丛书》(以下简称《丛书》)自1999年首次出版,至今已8年了。《丛书》综合地反映了20世纪90年代电子信息技术的发展,受到广大科技工作者、大专院校师生和部队官兵的欢迎。进入新世纪以来,鉴于国内外电子信息技术的飞速发展,世界与局部形势发生了许多新的变化,电子信息技术循着摩尔定律预计的发展速度得到了持续的增长与进步。我国电子信息技术不论在基础层次还是在系统层次也取得了许多世界先进的成果,例如突破了纳米级的金属氧化物场效应器件(MOSFET)的设计与制造技术,研制成功了数十万亿次运算速度的巨型计算机,实现了计算栅格的研制与试验,成功地开发出世界级的第三代数字蜂窝移动通信系统,研制出空中预警与控制机系统和区域级一体化综合电子信息系统等。国际上,美国等发达国家在电子信息技术发展上处于领先地位,成功地研制出45nm的微处理器并进行批量生产,正向20nm及以下迈进。美国启动了从工业时代到信息时代的军事转型,提出从平台中心战(PCW)向网络中心战(NCW)的转型,并以全球信息栅格(GIG)为基础。GIG是美国所构想的、正在研发的国防信息基础设施,预计在2015年可形成初始作战能力。它以面向服务的结构(SOA)为体系构架,向联网的实体提供成套的、安全的信息服务与电信服务,以加强信息共享、决策优势与异构协同。GIG包括多模态数据的传递媒介,如陆上电路、空间单元和无线电台等,其所组成的互联网络可动态地、透明地将信息从发源处路由至目的地。以GIG为依托,美国军队加速向网络中心化演进,如陆军的未来战斗系统(FCS),海军的兵力网(Forcenet),空军的指挥控制星座(C^2 constellation)等。这里涉及十分巨大(Herculean)的技术挑战,必须通过从基础到系统的多层次创新和突破,才能在未来有限的时间内实现超越前15年Web网发明以来的发展。凡此种种,都是我们在编著《丛书》第1版时只能预测而无法探知的。然而今日,这些高新技术的面貌已逐渐清晰并迅速渗入人们的生活和竞争。这使《丛书》的作者们意识到进行再一次创作的必要性;同时,热心的读者们也期盼我们能及时对第1版进行

修改以便与时俱进。

基于以上原因,在各级领导机关的大力支持下,《丛书》各分册的原作者与新分册的新作者们在从事繁重业务工作的同时,废寝忘食、辛勤耕耘,对《丛书》各分册进行了精心修订、编撰,为第2版的问世做出了卓越的贡献。我谨代表《丛书》编审委员会向他们致以衷心的感谢与感谢。

第2版承袭了第1版的编写宗旨、编写特色及服务对象。在维持原结构不变的基础上,对内容进行了大幅度更新,并明显加大了军事科技的比重,增、删了7个分册,总册数由17分册变为18分册,总字数由800万字增加到1400万字。新版《丛书》仍以先进的综合电子信息系统为龙头,分层次、全方位地介绍各项先进信息技术,具体包括以下分册:

系统性技术分册

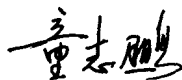
- 综合电子信息系统(第2版)
- 综合电子战(第2版)
- 侦察与监视
- 军事通信(第2版)
- 雷达与探测(第2版)
- 数据链
- 导航与定位(第2版)
- 计算机技术(第2版)
- 计算机软件技术(第2版)
- 信息安全与保密(第2版)

基础性技术分册

- 微电子技术(第2版)
- 光电子技术(第2版)
- 真空电子技术(第2版)
- 传感器技术
- 微声电子器件
- 化学与物理电源(第2版)
- 现代电子测试技术(第2版)
- 先进电子制造技术(第2版)

这两个系统分别从横向、纵向对众多先进的信息技术形成了有机的集成。

《丛书》的编写出版得到总装备部、中国电子科技集团公司及其有关研究所的领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及编辑们的积极推动与努力,谨对他们表示由衷的感谢。



2007年8月26日

Preface

第1版序

信息技术是一个复杂的多层次多专业的技术体系,粗略地可以分为系统和基础两个层次。属于系统层的一般按功能分,如信息获取、通信、处理、控制、对抗(简称为5C技术,即Collection, Communication, Computing, Control, Countermeasure五个词的第一个字母)等;基础层技术一般按专业分,如微电子、光电子、微波真空电子等。

信息技术革命的火炬是由微电子技术革命点燃的,它促进了计算机技术、通信技术及其他电子信息技术的更新换代,迄今,尚未有尽期。信息技术革命推动产业革命,使人类社会经历了农业、工业社会后进入了信息社会。

大规模集成电路的集成度是微电子技术革命的重要标志,它遵循摩尔(Moore)定律,每18个月翻一番,预计可延伸到2010年。届时,每个芯片可包含100亿(10^{10})个元件,面积可达到 10cm^2 ,作为动态存储器的存储量可达64Gb(吉比特),接近理论极限 10^{11} 个元件和256Gb存储量。微处理器芯片的运算速度每5年提高一个数量级,到本世纪末,每个芯片运算速度可达10~100亿次每秒,有人认为,实现2000亿次的单片微处理器在技术上是可能的。与此相适应,每芯片比特存储量与每MIPS(兆指令每秒)运算量的成本将呈指数式下降,现在一个100兆指令/s专用数字信号处理芯片只售5美元。如果飞机的价格也像微电子那样呈指数式下降的话,70年代初买1块比萨饼的费用在90年代就可以买1架波音747客机。3年内1部电话机将只用1块芯片,5年内1台PC机的全部功能可在1个芯片上实现,6年内1部ATM交换机的核心功能也可用1个单片完成。由于微处理器芯片价格持续不断地下降,构成了它广泛应用的基础。现在,在一般家庭、汽车和办公室中,就有100多个微处理器在工作,不仅是PC机,而且在电话机、移动电话机、电视机、洗衣机、烘干机、立体声音响、家庭影院中也有。1辆高档汽车中包含20多种可编程微处理器,1架波音777客机含有100多万行的计算机程序代码。

通信技术的进步还得力于光子技术的进步。光通信速率(比

特每秒)每两年翻一番,现在实验室中已可做到 10^{12} b/s,即可将全世界可能传输的全部通信量于同一时刻内在 1 根光纤中传送,或相当于 1s 内传输 1000 份 30 卷的百科全书。通信速率的提高和通信容量的增大,使光通信成本也不断降低,与 80 年代相比,降低了两个数量级。

因特网是全球信息基础设施的雏形,其发展速度惊人。现在每 0.4s 增加一个用户,每 4min 增加一个网络。1996 年联网数大于 10 万,联网主机数大于 1000 万,用户数大于 7000 万(预计到本世纪末,将大于 2 亿),PC 机总量将达 5 亿,联网主机达 3000 万,信息量每 5 年翻一番。越来越多的公司、团体、机关、个人通过信息网络相互联接,其应用范围从单纯的电子函件通信扩大到远程合作(包括教育、诊断、办公、会议、协作等)、按需点播、多媒体文娱、电子商务、银行、支付等,人类社会生存与发展的另一维空间,即信息空间或称为赛博空间(Cyberspace)正在形成。如果说工业社会是建筑在汽车与高速公路上的话,信息社会则是建筑在信息与信息高速公路上的。政府、军队、经济、金融、电力、交通、电信等关键部门都要依赖于信息基础设施的正常运行。信息技术和信息产业的水平已成为综合国力的重要标志,也是国际竞争力的焦点与热点。

信息技术的飞跃发展及其渗透到各行各业的广泛应用,不仅推动了产业革命,而且也深刻地改变了人们的工作、学习和生活的方式。信息技术不仅扩展了人的视觉、听觉等感知能力,而且还渗透到思维领域,减轻或部分地替代人的脑力劳动,提高思维的效率和质量,实现人的思维能力的延伸,增强人的认知能力。信息作为事物的属性与相互关系的状态的表达是客观存在的,但不是显在的,很多是潜在的,有的是深埋的,有待挖掘与提炼。信息技术大大地丰富了信息采集的内容,提高了信息处理的能力,为人们对客观事物及其规律的认识提供了创新的工具,也为人们正确认识与有效改造主观世界和客观世界提供了源泉,将使社会的物质文明与精神文明建设得到极大的发展。

信息、能源与物质是人类社会赖以生存与发展的三大支柱。在信息社会中,信息是最重要的支柱和最重要的产业,它影响着其他两个支柱的健康发展,包括生产、传输、分配、运行、减少损耗、改善管理、提高效率、降低成本等等;同时,它还能不断地培育与发展新物质和新能源的发明与生产,不断地改善生态环境,从而使人类社会进入可持续发展的健康轨道。

信息革命在带动产业革命的同时也带动军事革命,使得军事技术、武器装备、作战思想、作战方式、战争形态、军事原则、军事条令与部队编成等都将发生深刻的变化。如果农业社会是冷兵器时代,工业社会是热兵器时代,那么信息社会则是信息兵器时代。信息、信息系统与信息化平台、武器与弹药成为战场上的主战兵器。信息优势成为传统的陆地、海洋、空中、空间优势以外的新的争夺领域,并深刻地制约着传统领域的战斗胜负,从而构成信息化战争的新形态。在这种战争中,战争胜负决定于敌对双方掌握信息与信息技术的广度与深度。信息不仅是兵力倍增器,它本身就是武器和目标,是双方必争的制高点。1991 年初的海湾战争,被称为硅片战胜钢铁的战争,即源于这样的认识。它开启了赛博空间战、网络战、信息战等簇新的作战方式。

以信息优势为核心的军事革命是建筑在先进的指挥、控制、通信、计算机、情报、监视、侦察及其一体化的信息战能力的基础上的,这个众系之系(系统的系统)我国称为综合电子信息系统,与美军后来提出的 C^4 ISR/IW 相当,它由以下 6 部分组成。

1. 鲁棒的多探测器信息栅格网络。为作战部队提供作战空间感知优势。
2. 先进的指挥控制与作战管理栅格网络。为部队提供作战的先期规划、胜敌一筹的作战部署,执行作战指挥控制与一体化兵力管理能力。
3. 从探测器到射击器的栅格网络。为部队提供精确制导武器的动态目标管理、分配与

引导,协同作战,一体化防空,快速战损评估和再打击能力。

4. 联合的通信、导航与定位栅格网络。提供可靠、安全、大容量与高精度的信息,以支持部队的机动行动,确保全面优势。

5. 信息进攻能力。采取侵入、操纵与扰乱等手段,阻碍敌人作战空间感知、认知与有效用兵能力。

6. 信息防护能力。保证我方信息系统的安全,防护敌方对我信息网络的利用、干扰和破坏。

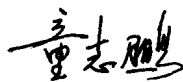
这个系统的系统涉及众多先进的信息技术的横向与纵向的有机集成,它包括雷达和光电的有源与无源探测技术、有线和无线及固定和移动通信技术、计算机硬件和软件技术、精确导航定位技术、航天航空测控技术、信息安全保密技术、电子战技术等横向专业技术的集成;也涉及微电子技术、光子与光电子技术、真空电子技术、压电与传感器技术等先进元器件技术,电子材料技术、电源技术、测试技术、先进制造技术等纵向基础技术的集成。当代军事革命要求在创新的军事思想指引下,发展有层次多专业的纵横集成的信息技术;同时,又要求在先进的信息技术驱动下,培育与发展新的军事思想,并在此基础上推动作战原则、军事条令与部队编成的变革,形成军事革命与信息革命的有机结合。

我们正处于世纪之交,党的第十五次代表大会的胜利召开,启动了有中国特色的社会主义事业在邓小平理论的指引下全面进入 21 世纪。我国的国防与军队现代化建设的跨世纪历史进程已经开始。为了适应军事革命环境下的高新技术军事斗争的需要,我军必须拥有信息优势,必须拥有以先进的综合电子信息系统为基础结构的性能优良的武器装备,必须提高部队素质,把人才培养推上新的台阶。

江泽民总书记非常重视人才的培养,他多次指示,要用高新技术知识武装全军头脑。在未来的信息化战场上,知识将成为战斗力的主导因素,敌对双方的较量将更突出地表现为高素质人才的较量。本丛书的编写出版就是为贯彻这个伟大号召提供系统基础知识。全书以先进的综合电子信息系统为龙头,多层次、全方位地介绍相关的各项先进信息技术,既包括系统技术,也包括基础技术,共 17 个方面,荟萃成 17 个分册。丛书的编写以普及先进信息技术知识为目标,以中专以上文化程度,从事军、民用电子信息技术有关业务的技术人员和管理干部为主要对象,努力做到深入浅出,雅俗共赏,图文并茂,引人入胜,文字简练,语言流畅,学术严谨,论述准确,使其具有可读性、可用性、先进性、系统性与权威性。参加丛书各分册撰写的作者都是长期从事现代信息技术研究与发展的专家,他们在繁重的业务工作的同时,废寝忘食,长期放弃节假日的休息,辛勤耕耘,鞠躬尽瘁,为本丛书做出了卓越的贡献。他们以自己的模范行动,“努力成为先进思想的传播者、科学技术的开拓者、‘四有’公民的培育者和优秀精神产品的生产者”。我谨代表总编委向他们致以衷心的敬意!

本丛书的编写出版得到原国防科工委与原电子工业部领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及责任编辑们的积极推动与努力,借此之机,向他们表示由衷的感谢!

中国工程院院士
原电子工业部科技委常务副主任



Preface

前言

本书自 1999 年出版以来,受到广大读者,特别是工作在第一线的工程技术人员和高等学校学生的欢迎。根据读者的要求和近几年来真空电子技术的发展,我们对第 1 版作了较大的修改和补充。修改主要遵循以下原则:①突出真空电子学在军事信息装备中的应用,特别是加强微波管发射机相关器件和电路的描述;②为了使初学者,包括从事器件研制的人员,从整体上把握真空电子器件的工作原理和应用,增加了信号调制、编码和传送等基础知识,微波管电源,调制器和控制系统的描述,也简要介绍了微波通信、雷达、电子战和制导系统的概况;③增加新技术进展的介绍,以扩展读者的视野。

真空电子器件对国防和军事信息装备的重要性,已经被近 10 年来世界上发生的历次高技术局部战争所证明。微波管的功率输出虽然可以达到兆瓦级和吉瓦级大功率输出水平,但近年来的发展主要集中在提高工作频率、降低电压、提高效率、减小体积和提高可靠性上。空间行波管的效率已达到 70% 以上,94GHz 输出功率达百瓦级的行波管和千瓦级的回旋速调管已有样管,工作在太赫频域的真空电子管也已经出现;与此同时,微型真空电子器件和场致发射阵列阴极正在迅速发展。这些进展表明真空电子器件新的工作原理和技术正在继续发展和深化,它必将给武器系统的发展带来深远影响。

真空电子器件和半导体器件、光电子器件的结合与渗透,是近年来发展的又一特点。微波功率模块是真空电子器件和半导体器件结合的一种新形式,微型真空电子器件和场致发射阵列阴极则是在更深层次上的结合;光电阴极和微波光学的发展,将使真空电子技术和光子学进一步结合与渗透。作为入门读物,本书力图将这些进展收集在内,供读者参考。

本书第 2 版包含 14 章,将第 1 版中的第七章、第八章、第九章删除,增加了第 7 章阴极和热子组件,第 8 章真空微电子学,第 9 章微波管发射机,第 10 章微波管发射机电源,第 11 章脉冲调制器,第 12

章微波管发射机的控制、保护和监测,第13章微波管发射机的其他重要部分,第14章军用微波系统。对第1版第七章、第八章、第九章有兴趣的读者请参阅原书。第2版的编写人员为:第1章、第14章由廖复疆编写;第2章由李泽普、张益林编写;第3章由邬显平编写;第4章由何天水、苏奇才、王刚编写;第5章由李宏福编写;第6章由任劲、栾小燕、孙承革、周志伟编写;第7章由李季、陈其略、闫肃秋、冉繁福、陈隆华编写;第8章由冯进军编写;第9章由李文辉、陈永浩编写;第10章由汪军、张群编写;第11章由张建华编写;第12章由戴大富编写;第13章由钟国俭编写。闫铁昌、黄绳武、邬显平、李泽普、苏奇才、王刚参加了本书的审校工作。廖复疆、孙振鹏、闫铁昌负责全书主编。尹泉、应文娟对全书进行了初步编辑。

本书修订过程中得到中国电子科学研究院、中国电子科技集团公司第十二研究所和第三十八研究所、电子科技大学、高功率真空电子学国家级重点实验室、真空电子技术杂志社等单位的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

廖复疆

Preface

第1版前言

本书是《现代电子信息技术》丛书的一个分册,向读者介绍信息技术的一个重要领域——真空电子技术的基础知识和最新发展概况。

真空电子学是一门发展历史悠久、技术成熟的学科,也是一门近年来发展迅速的科学技术。利用真空电子学原理做成的真空电子器件给人类打开了信息技术的大门,极大地推动了人类社会的进步和发展。今天,大功率三、四极管,速调管,行波管仍然是广播电台、电视台和卫星通信系统的发射源,也是航空管制和港口管制系统的发射源;在军事上,真空电子器件是雷达、电子战、通信和精密制导设备的核心;由彩色显像管做成的电视机和由磁控管做成的微波炉已进入千家万户,成为人民日常生活中不可缺少的学习、通信和娱乐的工具;X光管、像增强管、加速管和各种显示管在医疗和工业设备中得到广泛应用;真空开关管也已成为电力系统的重要工作器件。

随着现代科学技术的不断发展,真空电子学又开辟了新的研究和应用领域,它正处在巨大变革的前夜。新近产生的真空微电子学是真空电子学和微电子加工技术相结合的产物。真空微电子器件是微米级的真空电子管,它可以做成平板显示器、振荡器、放大器和各种传感器,成为21世纪最重要的电子器件之一。相对论电子学是真空电子学另一方向的发展,它采用了相对论电子注和全新的工作原理,使真空电子器件的输出功率和效率得到极大的提高。这些进展表明,真空电子学是一门重要的科学,对下一世纪的国防、科技、医疗、经济和人民生活将产生深远的影响。

真空电子器件发展的重要性还未得到普遍的认识,也许是由于人们对这种器件的工作原理不了解,特别是青年一代,他们生长在半导体器件正在发展的时期,以为半导体器件可完全代替真空电子器件。实际上,大功率、高频率、高速和耐恶劣环境的特性,三维、全金属结构,为真空电子器件进一步发展创造了优越的条件。为了普及真空电子器件方面的知识,让更多的人,包括非真空电子器件领

域工作的工程技术人员了解和应用真空电子器件的工作原理,我们编写了这本科学普及读物供各级领导、管理人员和工程技术人员参考。

全书分十章。第一章为概述,简要介绍真空电子器件发展历史和应用,对国防和经济建设的重要作用;第二章为大功率速调管;第三章为行波管;第四章为正交场微波管;第五章为高功率微波源;第六章为气体放电器件;第七章为真空显示器件;第八章为光电转换器件和成像器件;第九章为制造工艺与可靠性技术;第十章为真空微电子学。廖复疆负责第一、十两章的编写;张益林和李泽普负责第二章的编写;邹显平负责第三章的编写;何天水负责第四章的编写;李宏福负责第五章的编写;周志伟负责第六章的编写;严增濯、张受权、陶继贤、季旭东、倪正才负责第七章的编写;王秀浦、曹长南和纪福林负责第八章的编写;张扬富、高陇桥、刘万孝和吴固基负责第九章的编写;廖复疆、吴固基、康来鹏和肖安倩负责全书主编工作。

本书编写过程中得到原电子部电子科学研究院、电子部第十二研究所、电子科技大学、电子部第五十五研究所、国光电子管厂、华东电子管厂等单位的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

作 者

Contents

目 录

第 1 章 概论	1
❑ 1.1 微波真空电子器件	1
1.1.1 信息化武器装备的心脏	1
1.1.2 20 世纪最伟大的发明之一	2
1.1.3 真空电子器件过时了吗	4
1.1.4 制电磁权依赖于先进的微波电子管	6
1.1.5 用途广泛的真空电子器件家族	8
❑ 1.2 真空电子器件的应用	9
1.2.1 雷达系统的核心器件	9
1.2.2 电子对抗系统的威力来自大功率微波器件	10
1.2.3 现代通信系统的基础	11
1.2.4 微波定向能武器	14
1.2.5 适于夜战应用的光电成像与转换器件	15
1.2.6 清洁高效的工业能源	16
1.2.7 安全与健康的卫士——X 光管和加速管构成的系统	17
1.2.8 可控热核反应	19
❑ 1.3 真空电子器件基础	20
1.3.1 什么是电子	20
1.3.2 自由电子在静电场中的运动	20
1.3.3 电子在磁场中的运动	21
1.3.4 电子在复合电场和磁场中的运动	21
❑ 1.4 面向 21 世纪的真空电子器件	22
1.4.1 集成固态 / 真空电子微波功率模块	22
1.4.2 真空微电子学和微型真空电子器件	23
1.4.3 相对论电子学	25
1.4.4 等离子体显示器件	26

第2章 速调管	27
❖ 2.1 引言	27
❖ 2.2 双腔速调管	29
2.2.1 双腔速调管中电子注的密度调制	29
2.2.2 密度调制电子注与高频场的相互作用	30
2.2.3 多腔速调管的工作原理	31
2.2.4 速调管的结构	32
❖ 2.3 速调管的组成	33
2.3.1 电子枪	33
2.3.2 电子注的维持	34
2.3.3 谐振腔及其调谐机构	35
2.3.4 能量耦合装置	36
2.3.5 收集极	37
❖ 2.4 速调管的性能指标	37
2.4.1 主特性	37
2.4.2 副特性	38
❖ 2.5 速调管的发展	38
2.5.1 展宽速调管带宽的技术	38
2.5.2 多注速调管	42
2.5.3 速调四极管	44
❖ 2.6 速调管的应用	45
2.6.1 各种雷达系统的应用	45
2.6.2 加速器上的应用	46
2.6.3 电视、广播和通信上的应用	46
❖ 2.7 速调管的发展趋势	47
❖ 参考文献	47
第3章 行波管	48
❖ 3.1 引言	48
3.1.1 行波管的特点	48
3.1.2 行波管发展简史	49
3.1.3 行波管分类	50
❖ 3.2 行波管工作原理	51
3.2.1 行波管的结构	51
3.2.2 行波管的工作原理	52
3.2.3 行波管的主要特性	54

3.2.4	双模行波管	57
3.2.5	相位一致行波管	59
3.2.6	小型化行波管	59
	3.3 慢波结构	60
3.3.1	概述	60
3.3.2	螺旋线慢波结构	61
3.3.3	耦合腔慢波结构	63
3.3.4	新型慢波结构	65
	3.4 聚焦结构	66
3.4.1	概述	66
3.4.2	电磁聚焦结构	67
3.4.3	永磁聚焦结构	67
3.4.4	周期永磁聚焦结构	68
	3.5 收集极	68
3.5.1	总效率、电子效率和收集极效率	68
3.5.2	降压收集极	69
	3.6 谐波和非线性效应	70
3.6.1	引言	70
3.6.2	谐波	70
3.6.3	互调	71
	3.7 行波管的噪声	72
3.7.1	射频噪声	72
3.7.2	相位噪声	73
	3.8 行波管的使用与维护	73
3.8.1	行波管的用途	73
3.8.2	行波管对电源和调制器的要求	76
3.8.3	行波管的正确使用和维护	78
	3.9 行波管的发展趋势	79
3.9.1	向 T 赫兹波段发展	79
3.9.2	高导流系数电子枪	79
3.9.3	更好的材料、阴极和磁性材料	80
3.9.4	改进制造工艺, 提高行波管的一致性	80
3.9.5	改进行波管理论, 发展计算机模拟技术	80
	参考文献	80
第 4 章	正交场微波管	81
	4.1 引言	81