



高 等 学 校 规 划 教 材  
工 科 电 子 类

# 微波器件原理

杨祥林 张兆镛 张祖舜 编著

电子工业出版社



# 微波器件原理

[6] I. Bahi, P. Bhordia, *Microwave Solid State circuit Des*

电子工业出版社

京 03.01 0001 0001

(京)新登字055号

### 内 容 提 要

本书共分八章。内容包括微波电子学基础与微波三、四极管、速调管、电磁慢波系统、行波管，正交均微波电子管、毫米波电真空器件微波半导体二极管和微波晶体管。每章末都附有习题和主要参考书目。

本书可供工科电子类微波及相关专业的教师和学生参考使用。

### 微 波 器 件 原 理

杨祥林 张兆镛 张祖舜 编著

责任编辑：洋溢

\*  
电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

冶金工业出版社 印刷厂印刷

\*  
开本：787×1092毫米 1/16 印张：28.625 字数：720千字

1994年1月第1版 1994年1月第1次印刷

印数：1000册 定价：13.20元

ISBN 7-5053-2234-6/TN·653

# 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，电子工业部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990年，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我公司所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

# 目 录

前言 .....	1
绪论 .....	3
§1 微波器件的发展简史 .....	3
§2 微波器件的应用 .....	6
第一章 微波电子学基础与三、四极管 .....	8
§1.1 真空电子管原理 .....	8
1.1-1 真空二极管 .....	8
1.1-2 真空三极管 .....	9
1.1-3 电子管的高频效应 .....	12
§1.2 电子渡越时间和渡越角 .....	14
1.2-1 电子渡越时间和渡越角 .....	14
1.2-2 电子运动时空图 .....	16
§1.3 微波器件中的感应电流原理 .....	18
1.3-1 自由电荷运动引起的感应电流 .....	18
1.3-2 拉姆定理 .....	21
1.3-3 稳定状态下电子流的感应电流 .....	22
1.3-4 密度调制电子流通过平板间隙时的感应电流 .....	22
§1.4 电子流与电场的能量交换 .....	24
1.4-1 电子流与电场间的能量转换 .....	24
1.4-2 作用电场的建立和能量摄取 .....	26
1.4-3 摄取电子注能量的高频耦合系统 .....	27
§1.5 小信号状态下的电子现象 .....	28
1.5-1 等效二极管和渡越角 .....	28
1.5-2 小信号条件下三极管的输入电导 .....	29
1.5-3 阴极发射能力引起的频率限制 .....	32
§1.6 微波三、四极管放大器和振荡器 .....	33
1.6-1 基本电路的选择 .....	33
1.6-2 微波三、四极管振荡器及放大器的结构 .....	35
1.6-3 高频运用对微波三、四极管结构设计的要求 .....	36
1.6-4 微波三、四极管的典型结构 .....	36
1.6-5 微波三、四极管的应用范围 .....	38
§1.7 真空微电子三极管 .....	39
1.7-1 真空微电子器件的基本结构和特点 .....	39
1.7-2 薄膜场发射阴极 .....	40
1.7-3 微波真空微电子三极管放大器 .....	41
习题 .....	45
主要参考书目 .....	46

第二章 速调管 .....	47
§ 2.1 电子流的动态控制原理 .....	47
§ 2.2 电子注的速度调制原理 .....	49
2.2-1 理想间隙的速度调制 .....	50
2.2-2 电子注耦合系数 .....	51
2.2-3 输入间隙的电子注负载 .....	53
§ 2.3 电子注的漂移群聚 .....	54
2.3-1 单段漂移空间的群聚 .....	54
2.3-2 群聚电流的谐波分析 .....	58
2.3-3 空间电荷效应 .....	59
§ 2.4 能量转换效率和双腔速调管放大器 .....	61
2.4-1 输出间隙中的能量转换 .....	61
2.4-2 双腔速调管放大器 .....	63
2.4-3 双腔速调管的其他用途 .....	69
2.4-4 双腔速调管的应用和典型参数 .....	75
§ 2.5 空间电荷波原理 .....	77
2.5-1 无界电子注中的空间电荷波方程 .....	77
2.5-2 空间电荷波的性质及分布 .....	80
2.5-3 漂移管对空间电荷波的影响 .....	83
§ 2.6 多腔速调管 .....	88
2.6-1 多级群聚的定性分析 .....	89
2.6-2 多腔速调管放大器增益的近似分析 .....	92
2.6-3 输出功率和幅值特性 .....	93
2.6-4 频宽 .....	94
2.6-5 多腔速调管的结构 .....	97
2.6-6 特种结构的多腔速调管 .....	102
2.6-7 多腔速调管的应用和典型参数 .....	103
习题 .....	106
主要参考书目 .....	107
第三章 电磁慢波系统 .....	108
§ 3.1 概述 .....	108
§ 3.2 慢波传播的条件 .....	108
§ 3.3 慢波系统的基本特性 .....	112
3.3-1 慢波系统的色散特性 .....	112
3.3-2 慢波系统的耦合阻抗 .....	114
3.3-3 慢波线的特性阻抗 .....	115
§ 3.4 周期结构慢波线的基本特性 .....	115
3.4-1 周期结构慢波线的基本性质 .....	115
3.4-2 周期慢波线的基本定理 .....	116
3.4-3 周期慢波线的通带与阻带 .....	119
§ 3.5 慢波线的场分析法 .....	120
3.5-1 螺旋线慢波系统 .....	121
3.5-2 梳形慢波系统 .....	128

3.5-3 盘荷圆柱波导系统	131
§ 3.6 慢波线的多导体传输线分析法	134
3.6-1 色散方程的求得	135
3.6-2 电磁储能与阻抗	138
3.6-3 几个典型例子	139
*3.6-4 特性导纳 $Y(\omega)$ 的计算	141
*3.6-5 双阶慢波线的分析	144
§ 3.7 慢波线的等效电路分析法	151
3.7-1 等效滤波网络的基本特性	151
3.7-2 密尔曼系统	154
3.7-3 对称电感耦合膜片加载圆波导	157
3.7-4 交叉耦合孔耦合腔慢波线	160
3.7-5 网络参量的计算	162
§ 3.8 小结	163
习题	164
主要参考书目	165
第四章 行波管	167
§ 4.1 行波管的基本原理和结构	167
§ 4.2 行波管的小信号理论	170
4.2-1 行波场对电子注的作用	171
4.2-2 电子注对行波场的作用	173
4.2-3 行波管的特征方程及其解答	176
4.2-4 行波管的小信号增益	177
§ 4.3 行波管小信号理论的进一步讨论	179
4.3-1 普遍情况下的特征方程	180
4.3-2 起始损耗和增益计算	184
§ 4.4 输出功率、效率和非线性现象	186
4.4-1 输出功率和效率	186
4.4-2 输入-输出幅值特性	187
4.4-3 提高效率的方法	190
4.4-4 非线性失真	192
§ 4.5 行波管的不稳定性	193
4.5-1 行波管的自激振荡条件	193
4.5-2 集中衰减器和高频切断	195
4.5-3 慢波线切断对增益和效率的影响	106
§ 4.6 返波管	197
4.6-1 电子注与返波的相互作用原理	198
4.6-2 返波管的小信号理论	200
§ 4.7 中小功率行波管的结构设计	204
4.7-1 电子枪	204
4.7-2 聚束系统	206
4.7-3 慢波线	207
4.7-4 螺旋线行波管的输入输出装置	209

§ 4.8 耦合腔行波管	214
4.8-1 基本工作原理	214
4.8-2 耦合腔慢波线	216
4.8-3 耦合腔行波管的寄生振荡	218
4.8-4 耦合腔行波管的结构	219
习题	223
主要参考书目	224
第五章 正交场微波电子管	225
§ 5.1 概述	225
§ 5.2 静态磁控管的基本特性	227
5.2-1 静态磁控管中的电子运动和截止特性	227
5.2-2 静态磁控管中的阳极电流	231
§ 5.3 磁控管中的谐振系统	235
5.3-1 磁控管谐振系统的谐振模式	235
5.3-2 谐振系统的谐振频率	237
5.3-3 相互作用空间内的高频场结构	241
5.3-4 电子与行波的同步空间谐波	243
§ 5.4 磁控管中振荡的自激	245
5.4-1 自激的产生	245
5.4-2 磁控管的等效电路	245
5.4-3 磁控管中的相位聚焦和电子挑选	248
5.4-4 磁控管的同步电压 阈值电压 工作电压	250
§ 5.5 磁控管振荡的稳定性	253
5.5-1 非 $\pi$ 模式振荡的不稳定性	254
5.5-2 振荡在非 $\pi$ 模式上的可能性	256
5.5-3 隔模带的作用	258
5.5-4 异腔式阳极块谐振系统	261
§ 5.6 磁控管的效率	263
5.6-1 最大电子效率	263
5.6-2 线路效率和总效率	266
§ 5.7 磁控管的工作特性和负载特性	268
5.7-1 激控管的工作特性	269
5.7-2 磁控管的负载特性	270
§ 5.8 磁控管的频率调谐	273
5.8-1 容性调谐	274
5.8-2 感性调谐	275
5.8-3 旋转调谐	277
5.8-4 耦合腔调谐	278
§ 5.9 同轴磁控管(CEM)	279
5.9-1 普通磁控管中存在的问题	279
5.9-2 同轴磁控管的基本原理和结构	280
5.9-3 同轴磁控管的特性	282
§ 5.10 正交场放大管	284



5.10-1 分布发射式正交场放大管	284
5.10-2 注入式正交场放大管	287
习题	290
主要参考书目	291
<b>第六章 毫米波电真空器件</b>	<b>292</b>
§ 6.1 概述	292
6.1-1 毫米波电子管的特点	292
6.1-2 传统微波管在毫米波段的现状与发展	293
§ 6.2 扩展相互作用速调管(EIA和 EIO)	294
§ 6.3 绕射辐射电子器件(奥罗管)	299
6.3-1 奥罗管简单工作原理	299
6.3-2 准光谱谐振腔	300
6.3-3 奥罗管的准光谱谐振系统	307
6.3-4 奥罗管的起振电流	310
6.3-5 奥罗管的特性	314
6.3-6 莱达管	317
6.3-7 绕射辐射电子器件的应用与发展	318
§ 6.4 回旋管	319
6.4-1 概述	319
6.4-2 回旋管的基本工作原理	320
6.4-3 回旋管的高频系统	323
6.4-4 回旋管中的电子运动	326
6.4-5 回旋管的起振电流	329
6.4-6 回旋管的其它特性	331
6.4-7 回旋行波管	334
§ 6.5 自由电子激光器简介	337
习题	340
主要参考书目	340
<b>第七章 微波半导体二极管</b>	<b>341</b>
§ 7.1 概述	341
§ 7.2 半导体物理基础与半导体结理论	342
7.2-1 半导体物理基础	342
7.2-2 半导体结理论	345
§ 7.3 微波非线性二极管	356
7.3-1 微波混频、检波管(变阻管)	357
7.3-2 变容管	358
7.3-3 PIN管	359
7.3-4 电路应用举例	361
§ 7.4 微波动态负阻二极管	369
7.4-1 雪崩管	369
7.4-2 势垒注入渡越时间二极管(Baritt)	385
7.4-3 转移电子器件(体效应管)	387
7.4-4 负阻器件的电路应用	401

习题 .....	405
主要参考书目 .....	406
<b>第八章 微波晶体管</b> .....	<b>407</b>
§ 8.1 前言 .....	407
§ 8.2 微波双极晶体管 .....	408
8.2-1 工作原理 .....	408
8.2-2 微波性能 .....	414
8.2-3 结构、材料和设计 .....	420
§ 8.3 微波场效应晶体管 .....	422
8.3-1 工作原理 .....	422
8.3-2 微波性能 .....	430
§ 8.4 异质结微波晶体管 .....	433
8.4-1 异质结 .....	433
8.4-2 异质结微波双极晶体管 .....	436
8.4-3 高电子迁移率微波场效应管 .....	437
§ 8.5 微波半导体器件与电路的新进展 .....	437
8.5-1 微波单片集成电路(MMIC) .....	437
8.5-2 光控微波半导体器件及电路的研究 .....	439
§ 8.6 微波晶体管的电路应用 .....	442
8.6-1 微波晶体管的散射参数和噪声参量 .....	442
8.6-2 微波晶体管放大器与振荡器 .....	444
习题 .....	446
主要参考书目 .....	447

# 前 言

本教材系机械电子工业部工科电子类专业“八五”编审出版规划教材之一，由电子物理与器件专业教材编审委员会审定和推荐出版。

本教材由东南大学杨祥林担任主编，西安交通大学钱慰宗担任主审。编审者均依据电子物理与器件编审委员制定的修订大纲进行编写和审阅。

本课程的参考学时数为80学时。全书内容包括微波电子学基础及当代科学技术和微波电子设备中广泛应用的各种微波器件。

本教材前一版自1985年出版以来，各校专业教学改革实践和微波电子科学技术都有了新的发展：本课程的前修课程微波技术已改成微波与光导波技术，毫米波技术与器件的发展愈来愈快，在电子科学技术和经济建设中的作用愈来愈重要，固态微波电子学与微波半导体器件的应用愈来愈广，真空微电子器件与电路的发展日益引人注目。为了适应这些发展和变化，本次修订本中都作了相应的改编。其中，第一章概述栅控电子管的原理，重点介绍微波电子学基础和微波三、四极管，删除了有关大信号状态下电子现象的分析，增编了近年来发展起来的真空微电子器件的内容。第二章分析电子流动态控制方法和速调管的基本原理，介绍速调管的结构参数，删除了前一版中有关反射速调管的分析。第三章电磁慢波系统为新增编的，系将前版《微波技术》和《微波器件原理》行波管章中有关内容抽出，独编成章，使全书的结构和系统性更臻完善。本章结合几种典型的电磁慢波系统，重点介绍电磁慢波系统的基本特性和分析方法。第四章行波管，重点讨论电子注与行波场的相互作用原理和行波管的基本特性，简要介绍行波管的结构参数和设计问题，删除了慢波系统和回旋行波管的有关内容，分别移至第三和第六章。第五章介绍正交场微波管的原理和结构特性，包括多腔磁控管和正交场放大管，删除了前一版中有关电压调谐磁控管的内容。为了加强发展中的毫米波器件的教学与研究，增编第六章毫米波电真空器件，重点介绍传统的扩展相互作用速调管放大器和振荡器及奥罗管、莱达管、回旋管和自由电子激光等新型毫米波电真空器件。为了加重得到广泛应用的微波半导体器件的教学份量，将本书前一版中有关内容扩编为两章，即第七和第八章，第七章重点介绍各种微波半导体非线性二极管和微波半导体动态负阻二极管，第八章重点介绍微波双极晶体管和场效应晶体管，对微波半导体器件的电路应用与未来发展亦作了简要介绍。

本修订版各章内容仍以分析各种微波器件中带电粒子流与电磁场间相互作用的物理概念物理过程及实现有效能量转换的方法和条件为重点，并紧密联系各种器件的结构和特性参数。

本教材由东南大学杨祥林编写第一、二、四章，电子科技大学张兆镛编写第三、五、六章，东南大学张祖舜编写第七、八章，并由杨祥林统编全书。本书由西安交通大学钱慰宗审阅第一到六章，齐鸣审阅第七、八章。在本书编审过程中，电子物理与器件编审组各

位编委、各有关高等院校的任课教师和同学，对本书的编审出版提出了许多建议和宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。由于编者水平所限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者

1992年10月



# 绪 论

## § 1 微波器件的发展简史

### 一、微波器件发展的基础

电子学和电子工业是沿着两条“生长线”发展起来的，一条是电子器件，一条是电磁波。电子器件的发明和发展已有一百多年历史了。早在1883年，美国大发明家爱迪生在研究白炽灯泡、观察到真空中的电子导电现象时就为电子器件的发明打下了基础。之后，在1904年弗莱明利用爱迪生效应，制成了第一个电子管——灵敏检波二极管。二年后，1906年美国德福雷斯特又发明了三极管，它能以极小的能量控制大的电能，打开了信号放大的大门，这是20世纪初最伟大的发明之一，是电子学发展中具有划时代意义的伟大事件，大大推动了电子技术的发展。在此后的半个世纪的时间内，电子器件得到了飞跃的发展，相继发明了四极管、五极管、束射功率管、闸流管、微波三、四极管等各种类型、各种结构和功能的电子器件，成为电子工业发展的重要支柱。

电磁波的发展历史要追溯到麦克斯韦和赫兹的时代。早在1864年，麦克斯韦就在研究电磁辐射的数学理论，1888年赫兹用实验证实了麦克斯韦关于存在无线电波的预言。八年后，马可尼和波波夫各自完成了无线电通信的实验，但初期的无线通信用特制的交流发电机发射，只能用于通报。电子器件的发明解决了信号的产生、放大、发送、传播和检波、接收等一系列基本技术，并依次开辟了中频和高频无线电通信。到了三十年代，又出现了甚高频，使用无线电传输电视成为可能。

### 二、微波电子学和微波器件的发展

无线电通信的发展，要求采用更高的频率，传输更多的信息。雷达是三十年代利用电磁波的又一重要发明。为了提高雷达的分辨能力，需要应用高频电磁波。电视和广播亦要求提高频率。电磁波的频率范围需要不断扩展，现在国际上电磁波频谱已经预分到400千兆赫。雷达的发明和应用推动了微波技术和传输线路的发展，相继出现了同轴电缆、波导等传输线路，并推动了微波中继通信的发展，六十年代又发明了光导纤维，现在又广泛采用光导纤维通信。所以，如何提高电磁波的频率，开拓新的电磁波谱，始终是电子学发展史上的一条重要脉络。

开拓电磁波谱的基本问题，是研究高频电磁波振荡的产生和放大。由低频电子学发展到微波电子学的历史，实际上可归结为高频振荡的产生和放大的发展史。在二十到三十年代，这个历史基本上沿着两条途径发展。一条是在普通静电控制低频电子管原理的基础上，从缩小管子尺寸、改进管子结构来提高工作频率，出现了指形管、灯塔管和谐振腔管等静电控制微波电子管，工作频率从2000兆赫一直提高10000兆赫，已接近静电控制微波

管的极限工作频率。另一条是利用电子“渡越现象”的动态控制原理，研制各种动态控制微波管，这一发展过程最早从二十年代初期研究单阳极磁控管开始，到三十年代发明速调管，三十年代末期发明多腔行波磁控管，四十年代初期发明行波管，四十年代末期发明大功率多腔速调管，五十到六十年代发明各种新型正交场振荡器和放大器，至今历时约七十多年，已研制成功各种类型的微波电子管，并在科学技术、军事装备和工业民用技术的发展中得到了广泛的应用。

### 三、微波器件的新发展

六十年代以后，利用动态控制原理制成的普通微波管的发展日趋成熟，科技、军事、工业和民间应用的要求愈来愈高，消费市场不断扩大，微波电子管工业仍在不断发展。此外，基础科学研究的发展和工艺技术的不断突破，新概念、新原理、新结构、新工艺、新管种不断出现，微波电子学和微波器件正向新的高度和新的领域迅速发展，这种发展集中表现在以下几个方面：

#### 1. 高性能、高可靠和长寿命

在传统微波管方面，为了适应通信、广播、电视、雷达和电子对抗等各种要求，已研制和发展了许多品种系列，如各种频段、各种功率等级的金属陶瓷三、四极管、速调管、磁控管及行波管等系列。微波管发展初期，主要集中在提高功率、效率、增益、带宽和降低噪声方面，五十年代后，随着卫星、导弹、航天技术及家用微波设备的发展，微波管开始向长寿命、高可靠、小体积和轻量化方面发展。由于新型雷达体制的出现，又对微波管的频率、相位稳定性和功率放大管与振荡管的噪声等性能提出了新的要求，并发展了一批高性能的微波管。

#### 2. 固态微波电子学与微波固态器件

电子管发明四十多年后，1948年美国的巴丁等人发明半导体晶体管，大大加快了电子技术的发展速度，特别是七十年代大规模集成电路的迅速发展，使电子工业发生了根本的变革。目前，在低功率、低频率和低噪声放大与振荡等收讯器件方面，晶体管已取代电子管。在这种发展趋势的推动下，近三十年来，微波电子学与固体电子学工作者开始利用半导体和固体材料来研究产生微波的原理和方法。一种是利用低频晶体管原理，从改进结构、缩小尺寸等方面着眼来提高工作频率；另一种是根据固体材料的性质，采用新的原理来产生和放大高频电磁波。现在，作为混频、检波、振荡、放大、限幅、移相和开关用的各种微波固态器件都已研制成功，并已广泛用于通信和雷达接收机、微波测量仪器及低功率通信和雷达发射机中，今后还将得到更广泛的应用。

与微波电子管相比，微波固态器件的主要特点是：体积小、重量轻、电压低、功耗小、成本低，因此在小型电子设备中具有广泛的发展和应用前景。但是，固态器件由于工作尺寸小，容许最大场强低，耗散功率小，所以目前微波固态器件的单管功率电平还远远达不到高功率微波管的水平，一般要低三个数量级以上。

目前微波固态电子学发展的另一个趋向是：把微带传输线、微波元件和微波固态器件做在同一块衬底上，构成微波集成电路，可以大大缩小微波系统和设备的体积，提高系统和设备的可靠性，降低设备成本，具有广泛的发展前景。

#### 3. 毫米波与亚毫米波器件

毫米波和亚毫米波，介于光波与厘米波之间，与厘米波相比，具有方向性强、分辨率高、频带范围宽、信息容量大、对等离子体穿透能力强等特点；因而在七十年代以后，毫米波、亚毫米波技术进入蓬勃发展时期。发展毫米波、亚毫米波技术首先要寻求这一波段的功率源。最早从事毫米波、亚毫米波领域研究工作的是微波电子学工作者，在六十年代初期就利用圆波导中周期性电子注与快波相互作用，制成一种尤必管（Ubitron），工作频率达到55千兆赫，输出功率达150千瓦。之后，毫米波、亚毫米波功率源沿着四个方向发展：1）利用传统的微波电子管产生和放大毫米波、亚毫米波，如速调管、磁控管、行波管、返波管及扩展相互作用速调管放大器和振荡器，已经产生高达1000千兆赫的亚毫米波辐射；2）利用微波固态器件产生毫米波，其中碰撞雪崩渡越时间二极管已产生高达200千兆赫、约100毫瓦的毫米波输出；3）利用激光技术——光泵分子气体激光器和双频激光，通过非线性晶体的差频技术产生亚毫米波辐射，在30~2000微米之间，已产生了几百条亚毫米波谱线、毫瓦级功率输出，脉冲功率可达100千瓦；4）利用新原理产生大功率毫米波、亚毫米波辐射，如奥罗管（Orotron）、莱达管（Ledatron）、潘尼管（Penitron）、及各种回旋管（Gyrotron）和自由电子激光，这是微波电子学近二十多年来发展中的一项新的突破，并形成了一门新的相对论电子学，对毫米波、亚毫米波技术的发展将产生深远的影响。

#### 4. 微波与光波结合技术及其应用

在微波基础上发展到光波，发明了光导纤维和光波通信，在相同的传输截面内，使信息传输容量比微波提高了 $10^7 \sim 10^9$ 倍，充分显示了光导波技术的先进性和优越性。现在，光波的优越性又促使人们利用光波来带动微波技术向新的高度和深度发展，开辟了一个微波与光波结合的新的领域。例如：1）采用相干光控制微波半导体器件有源层自由电子的产生和变化，可以研制成一类新的高频（毫米波和亚毫米波）、高速（ $10^{-12}$ 秒和 $10^{-15}$ 秒）电脉冲发生和放大器件、如光控崩越管（IMPATT）、俘越管（TRAPATT）、耗尽层型场效应管（MESFET）、转移电子器件（TED）和高电子迁移率晶体管（HEMT）等；2）利用 $10^{-12}$ 秒光电导效应还可以实现各种微波信号处理功能，做成各种光控微波元件，如光控开关、调制器、门电路、取样器、电子脉冲函数相关器、A/D变换器、检测器、DC到RF变换器及相干微波和毫米波发生器等；三、与上述过程相反，用微波控制半导体激光器有源层载流子的变化，可以实现半导体激光器的高速微波调制，对光载波进行频带分割，利用光载微波原理，实现密集频分复用光纤通信。也可利用光载微波原理，传输雷达的控制信号和目标信号，提高雷达系统的可靠性和机动性等等，具有重要和广阔的发展前景。

#### 5. 微波真空微电子器件和电路

半导体器件和集成电路的问世，使普通真空电子管的地位一落千丈，也使中小功率微波电真空器件面临严峻的挑战。但是，集成电路与微细加工技术的发展又为电真空器件的未来发展奠定了新的基础，使电真空器件的发展出现了新的生机。现在，利用微细加工技术，可以制造一种新型薄膜场发射阴极和各种微米级电极结构，可以做成各种高速（ $10^{-12}$ 秒级）、高频（毫米和亚毫米波长）和各种功率电平的新型电真空器件，如微波真空微电子三极管放大器、速调管、行波管、高功率吉赫管（GIGATRON）和真空荧光平面显示器等，还可以设计成真空集成电路。一种新的真空微电子器件概念已经形成，一类新型真

空微电子器件正在崛起。自然界有些现象有时是相克的，但有时又是相补的，问题在于如何发掘和利用。半导体技术和器件曾是电真空技术和器件的对手，现在又变成了帮手，而且由于载流子在固体中传输时漂移速度受声子和杂质影响的限制，以及由于能量守恒、载流子涨落和量子隧道效应对集成电路和器件最小尺寸的限制，使真空微电子器件和电路在速率、频率、功率容量及耐高温、抗辐射性能方面将比半导体器件和普通集成电路更胜一筹。

## §2 微波器件的应用

电子管的最初应用主要是无线电通信和广播。第二次世界大战期间，微波电子管得到较快发展，发明了速调管和磁控管，立即被雷达和防空技术所采用。五十年代以后，电视广播、微波通信和工业加热亦开始广泛采用微波器件。微波固态器件研制成功后，首先被用作微波信号源、雷达和通信接收机的本振和混频器以及低噪声放大器。随着微波工程的迅速发展，微波器件正得到越来越广泛的应用。目前微波器件主要用于如下一些科学技术领域：

1. 在无线电侦察、干扰与抗干扰等电子对抗技术中，应用各种波段的宽调谐行波管、返波管、宽带高效正交场放大管、大功率行波管、双模行波管、快速调频或捷变频磁控管等。

2. 雷达是一种广泛应用的电子装备，种类很多，需要采用从米波到毫米波的各种微波器件，包括半导体变阻和变容二极管，微波双极晶体管、场效应晶体管、雪崩二极管、微波三、四极管、磁控管、功率速调管、行波管、正交场放大管、行波速调管、多注速调管等各种低噪声、宽频带、大功率、高效率和高稳定性微波器件，作为雷达系统的检测、本振、混频、高放和输出发射管。

3. 导航与制导系统的发射机和接收机中亦采用各种微波器件，包括反射速调管、双腔速调管、漂移速调管、多腔速调管、静电聚焦速调管、普通磁控管和信标磁控管等微波电子器件。

4. 微波通信是近代通信技术发展的重要成就，其中有长距离中继通信、超视距电离层、同温层和对流层散射通信及卫星通信等各种通信方式。在各种微波通信设备中，都大量采用各种微波器件，包括中小功率微波三、四极管、反射速调管、行波管、大功率速调管、行波管、M型返波管及各种微波半导体二极管和微波晶体管。

5. 电视广播，包括地面电视广播和卫星电视广播，前者多应用470~960兆赫、几十千瓦功率的微波四极管和多腔速调管；后者多用L、C和X波段的行波管和多腔速调管。在地面接收站或接收机中，也要采用各种低功率、低噪声的微波接收器件。

6. 空间技术中环绕地球飞行的人造卫星及各种飞行器的电子系统，为了完成通信、气象、侦察、测地、科学考察等使命，必须具备传输电视信号、遥测数据、接收指令、导航、预警及传输有关设备状态的信息等功能，需要配置多套电子设备、应用各种行波管、微波三极管及微波半导体器件。

7. 在微波粒子加速器、千兆电子伏特正负电子对撞机和受控热核反应中，利用微波能量加速带电粒子来研究原子核和基本粒子结构。利用微波还可对各种化学反应和生物效应进行研究，对金属进行无损探伤。利用毫米波、亚毫米波进行等离子体诊断和等离子体



二次加热。在这些应用中要采用功率为1~30兆瓦，频率为600~9000兆赫、脉宽为1~30微秒的磁控管、泊管、速调管和功率为几百千瓦到几百兆瓦、频率为28~120千兆赫、脉宽为几毫秒到几秒的回旋管、自由电子激光、激光微波管(Lasertron)和吉赫管(Gigatron)等作为激励源。

8. 微波加热在工农业生产中已广泛采用，对纺织物、粮食、药品、纸张、皮革、胶卷、木材、塑料聚合物、水泥、食品、种子等分别进行脱水、烘干、消毒、杀菌和育种等处理。在饭店和家庭已普遍采用微波炉作为熟煮器，具有烹调时间短而色香味好的成效。在这些应用中将大量采用频率为915和2450兆赫、功率为几百瓦到几十千瓦的连续波磁控管。

9. 近二、三十年来，微波技术已广泛应用在医疗和生物生理研究中，例如用微波能治疗关节炎、扭伤、癌症等多种常见病，且有较好的疗效。还可利用微波与人体生理组织的相互作用进行诊断和治疗，研究组织特性和生理现象。

10. 其它科学研究方面的应用 近年来国内外正在研究将微波用于空间太阳能发电站和定向动力传输。微波遥感技术也已广泛应用于地质资源勘测、海洋学、气象学和天文学等科学领域。还有微波等离子推进、微波辐射武器、微波催化化学等等，在这些应用中都需要各种各样的微波器件。

微波器件的发展历史是丰富多彩的，微波电子学与微波器件的含义与学科领域已远远超越三十年代或五十年代的真空微波的范畴而更加广宽、水平更高了。微波器件的应用也远远超出发展初期的狭窄的领域，而变得更加广泛、更加普及，已渗透到科学技术的各个领域，并已进入寻常百姓之家。作为一本教科书及其教学过程，尽量反映微波电子学与微波器件发展的最新成就及当前与未来经济建设与社会发展的需求是十分重要的。