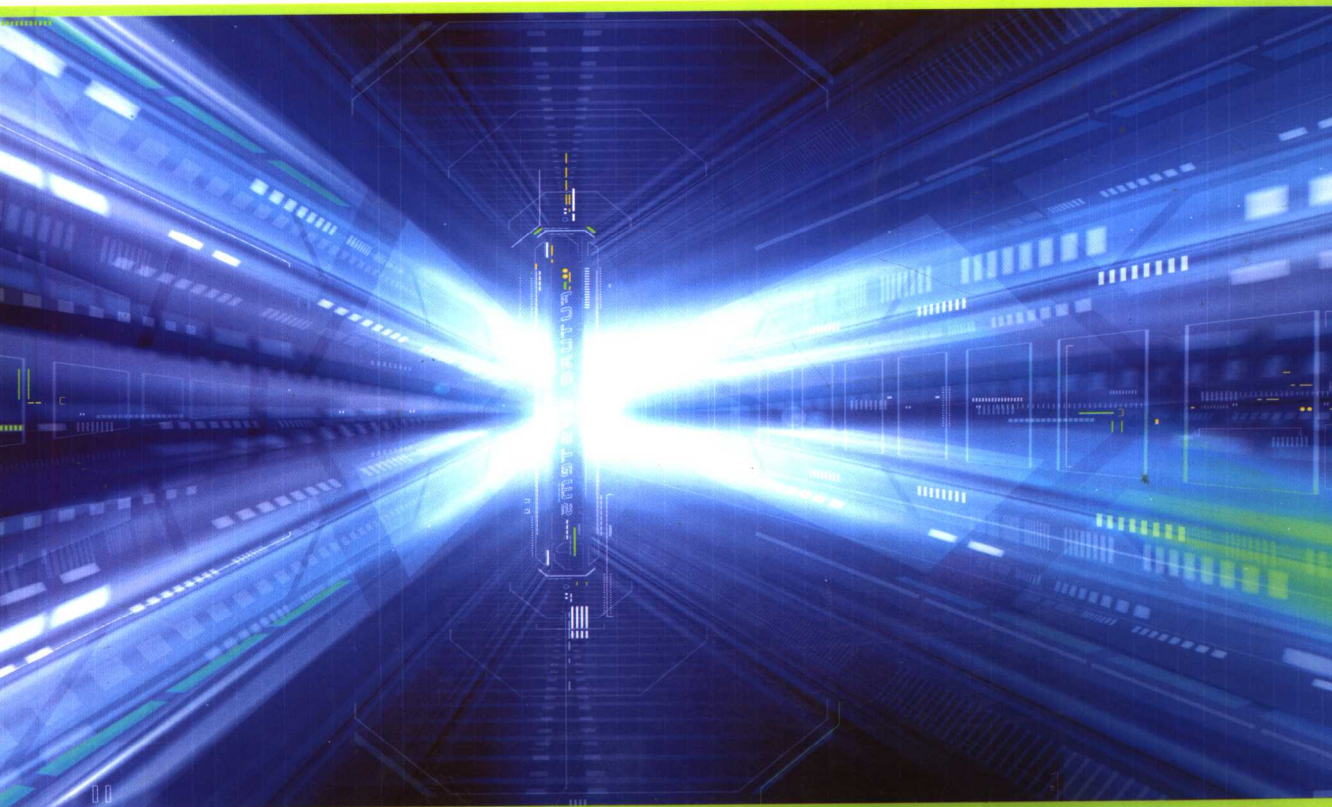


21世纪高等院校规划教材

微波电子线路

WEIBO DIANZI XIANLU

徐宝强 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

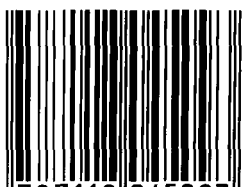
责任编辑: 丁福志 ding@ndip.cn
责任校对: 钱辉玲
封面设计: 王晓军 xjwang@ndip.cn

微波电子线路

— 上架建议: 电子技术 —

<http://www.ndip.cn>

ISBN 7-118-04509-8



9 787118 045093 >

ISBN 7-118-04509-8/TN · 714

定价: 32.00 元

21 世纪高等院校规划教材

微波电子线路

徐宝强 主编

童峥嵘 高凤友 姜德宁 夏靖 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

随着通信和电子信息产业的飞速发展,微波电子线路在军用、商用和家用电子设备中得到了广泛应用。本书各章由多所高校具有丰富和实践经验的专家、教授和学者共同编写。

本书主要介绍了各种器件的物理概念,还着重讨论了与器件相关的微波电路,尽量注意实际应用。

本书可作为高等院校电子信息类、通信类以及与高频技术相关专业的教材,也可供有关科技工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波电子线路/徐宝强主编. —北京:国防工业出版社,2006.8

21 世纪高等院校规划教材

ISBN 7-118-04509-8

I. 微... II. 徐... III. 微波电路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 036259 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)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 23 字数 532 千字

2006 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 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

前 言

本书作为高等院校电子信息类、通信类以及与高频技术相关专业的 21 世纪规划教材。

当今是电子信息时代,随着航空、航天、雷达、导航、遥控、遥测、移动通信、光纤通信、超大规模集成电路、超高速计算机技术、宽带网络和家电技术的发展,国内外有识之士都一致认为急需培养具有微波技术、微波电子线路知识的人才,于是我们几所院校合作编写了此书,以适应当前教学改革的需要。

本书主编徐宝强教授在 1982 年 4 月曾主持制定了航空工业部(三机部)“微波电子线路”教材编写大纲,并参加了编写工作;1986 年、1996 年两次赴西德不伦瑞克工业大学高频技术研究所,作为访问学者,在原欧洲微波学会主席,著名的微波通信、光纤通信专家 H·G·Unger 教授指导下工作和学习,取得了成绩。多年来,电子科技大学黄香馥教授,清华大学高葆新教授,西北工业大学陈国瑞教授,武国机、张凤贤两位老师给予了很多指导和帮助,为此一并表示衷心的感谢。

本书由天津理工大学徐宝强教授担任主编,并完成了绪论、第 8 章、第 9 章的编写工作和全书的统稿工作;童峥嵘完成了第 4 章~第 6 章的编写工作;高凤友完成了第 1 章、第 2 章的编写工作;姜德宁完成了第 3 章、第 10 章的编写工作;夏靖完成了第 7 章的编写工作。硕士研究生王志军、赵军发、孙云、龚元元、苏明皓在本书的插图过程中付出了辛勤的劳动。

由于编者水平有限,编写时间仓促,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

绪论	1
第 1 章 微波无源元件及等效电路	4
1.1 引言	4
1.2 微波电抗元件	4
1.2.1 电容膜片	4
1.2.2 电感膜片	5
1.2.3 谐振窗	5
1.2.4 销钉	6
1.2.5 螺钉匹配器	6
1.3 微波连接元件和终接元件	7
1.3.1 连接元件	7
1.3.2 终接元件	10
1.4 衰减器和移相器	11
1.4.1 衰减器	12
1.4.2 移相器	14
1.5 阻抗调配器和阻抗变换器	15
1.5.1 阻抗调配器	16
1.5.2 阻抗变换器	18
1.6 定向耦合器	19
1.6.1 定向耦合器的技术指标	20
1.6.2 波导型定向耦合器	21
1.6.3 平行耦合线定向耦合器	22
1.6.4 分支定向耦合器	23
1.7 波导的 T 形接头	25
1.7.1 E-T 接头	25
1.7.2 H-T 接头	26
1.7.3 双 T 接头和魔 T 接头	26
1.8 微波滤波器	27
1.8.1 微波滤波器的主要技术指标	28
1.8.2 滤波器特性的表征方式	28
1.8.3 滤波器的衰减特性	29
1.8.4 滤波器的微波实现	29

1.9 微波谐振器	30
1.9.1 微波谐振器的基本参量	31
1.9.2 同轴线谐振腔	32
1.9.3 矩形谐振腔	34
1.9.4 圆柱形谐振腔	35
1.10 微波铁氧体	38
1.10.1 正负圆极化波	38
1.10.2 圆极化波作用下铁氧体的重要特性	39
1.10.3 微波铁氧体元件	40
习题	41
第2章 微波传输线的基本理论	42
2.1 引言	42
2.1.1 传输线的种类	42
2.1.2 分布参数的概念及均匀传输线的等效	43
2.2 均匀传输线方程及其解	44
2.2.1 均匀传输线方程	44
2.2.2 均匀传输线方程的解	46
2.3 均匀传输线的传输特性及特性参数	48
2.3.1 传输特性	48
2.3.2 特性参数	49
2.4 均匀无耗传输线的3种工作状态	53
2.4.1 行波工作状态(无反射情况)	53
2.4.2 驻波工作状态(全反射情况)	54
2.4.3 行驻波工作状态(部分反射情况)	56
2.5 阻抗圆图及其应用	57
2.5.1 阻抗圆图	58
2.5.2 导纳圆图	63
2.5.3 阻抗圆图的应用举例	63
2.6 传输线阻抗匹配	65
2.6.1 阻抗匹配概念	65
2.6.2 阻抗匹配方法	65
习题	68
第3章 微波频率变换器	70
3.1 概述	70
3.2 微波混频器	70
3.2.1 金属半导体结二极管	71
3.2.2 微波混频器工作原理	73
3.2.3 微波混频器的技术指标	83
3.2.4 微波混频器的分析	85

3.2.5 微波混频器典型电路	88
3.3 微波倍频器	113
3.3.1 变容二极管及其参数	114
3.3.2 倍频器的技术指标	119
3.3.3 变容二极管倍频器	119
3.3.4 阶跃恢复二极管倍频器	129
3.4 微波功率上变频器	137
3.4.1 非线性电抗元件的能量关系	138
3.4.2 微波变容二极管上变频器	139
3.4.3 理论分析	140
3.5 谐波混频器	147
习题	149
第4章 微波晶体管放大器和振荡器	150
4.1 引言	150
4.2 微波晶体管及微波场效应晶体管	150
4.2.1 微波晶体管	150
4.2.2 微波场效应晶体管	153
4.3 微波晶体管的S参数	155
4.3.1 概述	155
4.3.2 S参数的物理意义	156
4.3.3 S与反射系数的关系	156
4.4 微波晶体管放大器的基本特性	157
4.4.1 微波晶体管放大器的功率增益	157
4.4.2 微波晶体管放大器的稳定性	158
4.4.3 绝对稳定判别准则	160
4.4.4 微波晶体管放大器的噪声系数	162
4.5 小信号微波晶体管放大器的设计	163
4.5.1 设计概要	164
4.5.2 单向化设计	164
4.5.3 非单向化双共轭匹配的设计	170
4.6 微波功率放大器	173
4.6.1 微波功率放大器简介	173
4.6.2 微波功率放大器设计	174
4.6.3 功率合成法	174
4.7 微波晶体管振荡器	175
4.7.1 微波晶体管振荡器简介	175
4.7.2 微波晶体管振荡器的设计	176
习题	177
第5章 微波半导体二极管振荡器	179

5.1 引言	179
5.2 负阻振荡器的工作原理及基本电路	179
5.2.1 负阻及物理意义	179
5.2.2 负阻振荡器的工作原理	180
5.2.3 负阻振荡器的基本电路	183
5.3 微波负阻振荡器的频率调谐	185
5.3.1 变容管调谐负阻振荡器	185
5.3.2 YIG 调谐负阻振荡器	186
5.4 负阻振荡器的频率稳定度	187
5.4.1 高 Q 腔稳频的原理	188
5.4.2 注入锁相稳频的原理	188
5.5 雪崩渡越时间二极管	189
5.5.1 碰撞雪崩渡越时间模的基本工作原理	189
5.5.2 碰撞雪崩渡越时间二极管的等效电路和电路参量	191
5.5.3 雪崩管的噪声性能	193
5.5.4 雪崩管振荡器实例	193
5.5.5 崩越二极管的工作原理	194
5.6 转移电子器件	196
5.6.1 基本工作原理	196
5.6.2 振荡模式	199
5.6.3 转移电子器件振荡器实例	203
5.6.4 两种负阻器件的比较	203
习题	203
第 6 章 微波控制电路	204
6.1 引言	204
6.2 PIN 二极管	204
6.2.1 PIN 管的基本特性	204
6.2.2 直流偏压下的 PIN 管特性	205
6.2.3 交流偏压下的 PIN 管特性	205
6.2.4 微波信号与直流偏压下的 PIN 管特性	206
6.2.5 PIN 管的等效电路	207
6.2.6 PIN 管的主要参数	207
6.3 微波开关	208
6.3.1 单刀单掷开关	208
6.3.2 单刀多掷开关	213
6.4 PIN 管移相器	217
6.4.1 开关线型移相器	217
6.4.2 加载线型移相器	219
6.4.3 分支线定向耦合器型移相器	220

6.4.4 实用移相器电路	221
6.5 PIN 管电控衰减器和限幅器	222
6.5.1 电控衰减器	222
6.5.2 限幅器	224
习题	225
第7章 微波电路的非线性分析法	226
7.1 微波电路的非线性	226
7.2 新频率分量的产生	227
7.3 非线性现象	231
7.3.1 交调失真	231
7.3.2 饱和与钝化	231
7.3.3 互调	231
7.3.4 AM-to-AM 转变	232
7.3.5 AM-to-PM 转变	232
7.4 分析方法	233
7.4.1 负载牵引	233
7.4.2 大信号散射参数	233
7.4.3 时域(暂态)分析	233
7.4.4 频域分析	233
7.4.5 准静态假设	233
7.5 功率和增益	234
7.6 谐波平衡分析法	236
7.6.1 使用谐波平衡分析法的原因	236
7.6.2 谐波平衡分析法简介	236
7.6.3 单频调谐波平衡分析	238
7.6.4 多频调谐波平衡分析简介	251
7.6.5 CAD 软件中的谐波平衡分析法示例	252
7.7 幂级数分析法	253
7.7.1 幂级数模型和多频调响应	253
7.7.2 截点和功率的关系	257
7.8 伏特拉级数分析法	259
7.8.1 伏特拉级数	259
7.8.2 伏特拉泛函数和非线性传输函数	260
7.8.3 用谐波输入法确定非线性传输函数	262
7.8.4 应用非线性传输函数	266
7.8.5 非线性电流法	268
习题	271
第8章 微波电真空器件	273
8.1 引言	273

8.2	速调管放大器和振荡器	274
8.2.1	双腔速调管放大器	275
8.2.2	多腔速调管放大器	281
8.2.3	反射速调管振荡器	284
8.3	行波管放大器	288
8.3.1	行波管放大器的结构	289
8.3.2	行波管放大器的工作原理	292
8.3.3	行波管的小信号理论分析	293
8.3.4	行波管的主要特性	298
8.3.5	行波管的应用	301
8.4	多腔磁控管振荡器	302
8.4.1	多腔磁控管的结构	303
8.4.2	电子在恒定电磁场中的运动	304
8.4.3	多腔磁控管的谐振频率和振荡模式	308
8.4.4	多腔磁控管的工作原理与同步条件	311
8.4.5	多腔磁控管的工作特性和负载特性	315
8.4.6	磁控管的频率调谐	320
8.4.7	磁控管的使用和维护	322
8.4.8	磁控管的应用	325
8.4.9	磁控管的发展	330
	习题	334
第9章	微波集成电路简介	335
9.1	概述	335
9.2	单片微波集成电路	336
9.3	多层微波集成电路的典型示例	338
9.4	微波集成电路的加工工艺简介	342
第10章	微波系统	344
10.1	雷达微波系统	344
10.1.1	概述	344
10.1.2	双/多基地雷达	345
10.1.3	相控阵雷达	345
10.1.4	宽带/超宽带雷达	346
10.1.5	合成孔径雷达	346
10.1.6	毫米波雷达	346
10.1.7	单脉冲雷达	346
10.1.8	脉冲多普勒雷达	347
10.2	微波发信系统设备	347
10.2.1	设备构成	347
10.2.2	性能指标	348

10.3 微波收信系统设备.....	349
10.3.1 设备组成.....	349
10.3.2 性能指标.....	350
10.4 微波网络设备.....	351
10.4.1 扩频微波通信设备.....	352
10.4.2 应用范围.....	355
10.4.3 应用图例.....	356
习题	357
参考文献.....	358

绪 论

早在 1864 年,英国物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831—1879)提出了电和磁通过空间耦合导致电磁波的重要假设。1887 年,德国物理学家亨利希·鲁道夫·赫兹(Henirich Rudolf Hertz, 1857—1894)第一次通过实验证明了电磁波通过空气辐射和接收,高频能量由天线发射到空间。这一重大发现验证了电磁波的存在,促使无线通信和高频技术的迅速发展。20 世纪 20 年代出现了无线电广播,30 年代诞生了电视,40 年代研制出了磁控管,制造出 SCR-584 波长为 10cm 的炮瞄雷达,80 年代出现了个人移动电话,90 年代出现了全球卫星定位系统。今天人类社会已经进入了信息时代,高速、大容量、覆盖全球范围的信息传输更是依赖电磁波尤其是高频电磁波的产生、传播和处理;而这种高频能量的利用除了要依靠高频天线等装置外,更为核心的是依赖高频电路的设计、制造和应用。高频(微波)电子线路的产生和发展正是适应了无线通信的迅速发展,成为高频的微波技术及工程应用研究的一个重要方面,受到越来越密切的关注。为适应雷达、通信、导航、遥控、遥测等系统的需求,电子线路的工作频率逐渐提高,已经进入微波、毫米波、亚毫米波波段,原来采用的低频电路与系统的分析与设计理论受到极大挑战。当工作频率到达射频和微波波段时,由于电路分布参数的影响,基尔霍夫定律分析方法已经失效了,电磁波能量的传输居于主导地位,在电路结构组成和元器件上与低频系统大不一样。微波电子电路课程正是针对在高频和微波波段电子电路的组成、元器件的选用、电路性能的分析、功能部件的设计等诸多问题而设置的。

1. 微波波段划分

人们对电磁波谱进行过各种分类尝试(表 0-1,表 0-2),但是第一个被工业界和政府部门广泛接受的分类方法是在第二次世界大战后由美国国防部提出的。目前被广泛采用的分类方法是美国电气电子工程师协会(IEEE)提出、推广的,如表 0-1 所列。

表 0-1 电磁波谱分类(一)

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称
长波波段(LW)	1000m ~ 10000m	30kHz ~ 300kHz	低频(LF)
中波波段(MW)	100m ~ 1000m	300kHz ~ 3000kHz	中频(MF)
短波波段(SW)	10m ~ 100m	3MHz ~ 30MHz	高频(HF)
超短波波段(VSW)	1m ~ 10m	30MHz ~ 300MHz	甚高频(VHF)
分米波波段(USW)	10cm ~ 100cm	300MHz ~ 3000MHz	超高频(UHF)
厘米波波段(SSW)	1cm ~ 10cm	3GHz ~ 30GHz	特高频(SHF)
毫米波波段(ESW)	1mm ~ 10mm	30GHz ~ 300GHz	极高频(EHF)

表 0-2 电磁波谱分类(二)

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称
	10000km ~ 1000km	30Hz ~ 300Hz	极低频(ELF)
	1000km ~ 100km	300Hz ~ 3000Hz	音频(VF)
超长波	100km ~ 10km	3kHz ~ 30kHz	甚低频(VLF)
长波	10km ~ 1km	30kHz ~ 300kHz	低频(LF)
中波	1000m ~ 100m	300kHz ~ 3000kHz	中频(MF)
短波	100m ~ 10m	3MHz ~ 30MHz	高频(HF)
超短波	10m ~ 1m	30MHz ~ 300MHz	甚高频(VHF)
微波	100cm ~ 10cm	300MHz ~ 3000MHz	超高频(UHF)
	10cm ~ 1cm	3GHz ~ 30GHz	特高频(SHF)
	10mm ~ 1mm	30GHz ~ 300GHz	极高频(EHF)
	1mm ~ 0.1mm	300GHz ~ 3000GHz	
红外线	0.75 μ m ~ 0.76 μ m		
可见光	0.76 μ m ~ 0.39 μ m		
紫外线	0.39 μ m ~ 0.005 μ m		
X射线	0.005 μ m ~ 10 ⁻⁸ μ m		
γ 射线	10 ⁻⁸ μ m 以下		

微波一般是指电磁波谱中频率从 300MHz ~ 3000GHz 的一段,对应的波长范围为 1m ~ 0.1mm。在雷达和通信等应用中还常用一些波段代号和习惯称谓来表达微波中一些特殊波段,如表 0-3 所列。

表 0-3 微波波谱

波段代号	习惯称谓	频率范围	波长范围
P 波段		0.23GHz ~ 1GHz	130cm ~ 30cm
L 波段		1GHz ~ 2GHz	30cm ~ 15cm
S 波段	10 cm 波段	2GHz ~ 4GHz	15cm ~ 7.5cm
C 波段	5 cm 波段	4GHz ~ 8GHz	7.5cm ~ 3.75cm
X 波段	3 cm 波段	8GHz ~ 12.5GHz	3.75cm ~ 2.4cm
Ku 波段	2 cm 波段	12.5GHz ~ 18GHz	2.4cm ~ 1.67cm
K 波段	1.3 cm 波段	18GHz ~ 26.5GHz	1.67cm ~ 1.13cm
Ka 波段	8 mm 波段	26.5GHz ~ 40GHz	1.13cm ~ 0.75cm
毫米波段		40GHz ~ 300GHz	7.5mm ~ 1mm
亚毫米波段		300GHz ~ 3000GHz	1mm ~ 0.1mm

2. 微波的应用

微波在广阔的军用和民用领域得到应用。由于微波波长短,容易通过聚束天线实现窄波可定向辐射,因而为无线电探测和定位提供了有效的手段。目前广泛采用的各种军事、民用雷达,远程和超远程警戒雷达,炮瞄雷达,火箭和导弹的制导雷达,精密测量雷达,飞机导航雷达,预警雷达,高度表,气象雷达,车辆防撞雷达,倒车雷达都工作在微波波段。

由于电子对抗和环境的需要,工作频率不断提高,如高速公路汽车防撞雷达由于只探测 200m 以内的目标,根据这一特点,工作频率选在 66GHz ~ 77GHz 为最合适。

随着移动通信的快速发展,手机已经普及到每个人,移动通信已从 GSM、CDMA、小灵通发展到 2.5G(GPRS),现在 3G 的能看电视画面的手机已经普及,工作频率也提升到 2.45GHz,蓝牙技术等新技术也都是采用这一频段。

在民用方面,微波灶(炉)在全世界进入每个家庭,采用的频率也是 2.45GHz。

由此看来,微波技术的应用前景是无限的。

3. 微波电子电路的内容

微波技术分析方法,可以从电磁场的角度去分析,但是比较复杂;也可以等效成电路去分析,这是人们比较习惯的。做一些等效和近似在工程上是允许的,不影响本质的分析,因此本书是采用电路的分析方法。

微波电子电路一般泛指构成微波系统中各种功能模块的元器件与电路结构,也称为微波有源电路。为了照顾学习方便和知识的交流性,适当地增加了微波传输线理论和其他各种微波无源元器件组成的微波无源电路。

自 20 世纪 60 年代以来,微波半导体材料技术和工艺水平得到了飞速发展,先后出现了金属半导体二极管、硅双极晶体管、砷化镓—金属—半导体场效应管、雪崩二极管、耿氏二极管、PIN 管、阶跃恢复二极管、变容管等微波半导体器件,并在微波系统中获得了广泛的应用。这种以半导体管为核心组成的微波电子电路就称为微波固态电路。在微波半导体器件发展的同时,采用平面微波传输线(微带线)和薄膜淀积与光刻技术的微波混合集成电路(MIC)和单片微波集成电路(MMIC)也取得了迅速发展。利用单片集成工艺甚至可以将微波电路淀积在一个半导体芯片上,调整方便,成本低廉,便于大量生产。单片 GaAs 集成电路现在已经成熟,低噪声放大器已经研制成功,目前已经向着大规模和超大规模微波集成电路化迈进。

在研究功率合成的基础上,中功率以下的微波发射机也已经固态化,可以取代微波电真空器件和电路。然而大功率的微波振荡和放大还必需依靠微波电真空器件、行波管、速调管、磁控管,其在雷达、通信、导航、卫星地面站、卫星直播电视、卫星通信、广播电视、民用和工业应用上仍是不可取代的,特别是在特殊环境如核战的情况下,微波半导体器件将无法工作,而微波电真空器件因能抗辐射和干扰,会发挥特殊作用。

第 1 章 微波无源元件及等效电路

1.1 引言

在微波系统中,实现对微波信号的定向传输、衰减、隔离、滤波、相位控制、波形与极化变换、阻抗变换与调配等功能的元(器)件统称为微波元(器)件。

微波元件的类型和种类很多,其中有些与低频元件的作用相似。如在波导横截面中插入金属膜片或销钉,起类似低频中的电感、电容的作用;沿波导轴线放置适当长度的吸收片,可以起消耗电磁能量的作用,相当于低频中的衰减器;在 E 面或 H 面使波导分支,可以起类似于低频中的串联、并联作用等。将若干波导元件组合起来,可以得到各种重要组件。如在波导中将膜片或销钉放在适当位置,可以构成谐振腔;由适当组合的谐振腔,可以得到不同要求的微波滤波器等。

由于微波属于分布参数系统,因此绝大多数微波元件的分析和设计问题,严格地讲主要是电磁场边值问题。由于边界条件比较复杂,利用场的方法进行分析,涉及到复杂的电磁理论和应用数学问题,因此是十分繁杂困难的,只有少数几何形状比较简单的元件才能利用该方法进行严格的求解。目前,最实际的方法是以场的物理概念做指导,采用网络的方法(即等效电路法),场、路结合进行分析和综合,最后将所得结果用场结构元件去模拟,所以,等效电路法是研究微波元件的基本方法。

微波系统是由许多元件和均匀传输线组成的,应力求做到在连接处没有反射,亦即处于阻抗匹配状态。

鉴于微波元件种类繁多、性能各异,本章只选择其中最常用的无源微波元件,对其工作原理、基本结构、等效电路和主要用途做简要介绍。

1.2 微波电抗元件

1.2.1 电容膜片

在矩形波导的宽壁上横向放置一块金属膜片,在其上对称或不对称之处开一个与波导宽壁尺寸相同的窄长窗孔,如图 1-1(a)和图 1-1(b)所示。当波导宽壁上的轴向电流到达膜片时,要流进膜片;而电流到达膜片窗口时,传导电流被截断,在窗孔的边缘上积聚电荷而进行充放电,因此两膜片间就有电场的变化而储存电能。这相当于在横截面处并接一个电容器,故这种膜片称为电容膜片,其等效电路如图 1-1(c)所示。其中电纳的近似计算公式为

$$B = \frac{4b}{\lambda_g} Y_0 \ln\left(\cos \frac{\pi d}{2b}\right) \quad (1-1)$$

式中: d 为两膜片间距离; Y_0 为波导传输 TE_{10} 波时的等效导纳; λ_g 为波导中 TE_{10} 模的波导波长; b 为波导窄边的尺寸。

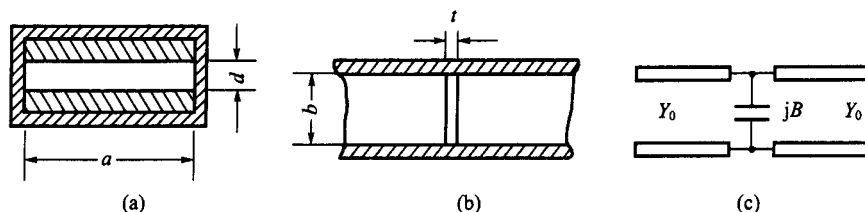


图 1-1 电容膜片及其等效电路

1.2.2 电感膜片

图 1-2 为矩形波导中的电感膜片及其等效电路。在波导横截面上沿左右窄边放置对称或不对称的金属膜片, 放置该膜片以后, 使波导宽壁上的轴向电流产生分流, 于是在膜片的附近必然会产生磁场, 并集中一部分磁能, 因此这种膜片称为电感膜片。电感膜片电纳的近似计算公式为

$$B = -\frac{\lambda_g}{a} Y_0 \cot^2\left(\frac{\pi d}{2a}\right) \quad (1-2)$$

式中: d 为两膜片间距离; Y_0 为波导传输 TE_{10} 波时的等效导纳; λ_g 为波导中 TE_{10} 模的相波长; a 为波导宽边的尺寸。

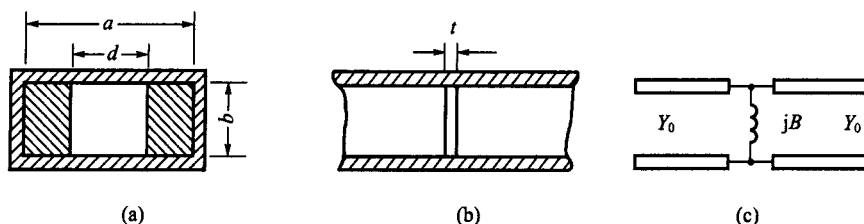


图 1-2 矩形波导中的电感膜片及其等效电路

1.2.3 谐振窗

将电感膜片(感性膜片)和电容膜片(容性膜片)组合在一起便得到如图 1-3(a)所示的具有矩形窗口形状的电影, 其等效电路如图 1-3(b)所示。它相当于低频的并联谐振电路, 所以称为谐振窗。当微波信号的频率正好等于其谐振频率时, 信号可以无反射地通过谐振窗。当信号的频率不等于其谐振频率时, 由于谐振窗具有电感性或电容性而产生反射。这种谐振窗常用于大功率波导系统中做充气用的密封窗, 也常用于微波电子器件中作为真空部分与非真空部分之间的隔离窗。

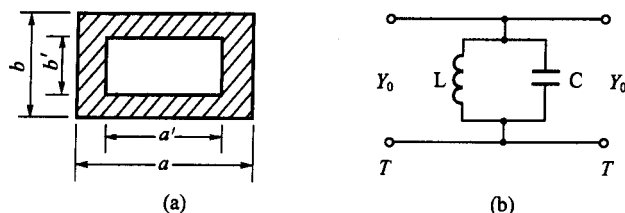


图 1-3 矩形谐振窗及其等效电路