

顾其铮 项家桢 袁孝康编著

# 微波集成电路设计

Weibo Jicheng Dianlu Sheji

人民邮电出版社

## 内 容 提 要

本书比较详细地介绍了微波集成电路的各种传输线、基本构成元件、铁氧体器件、阻抗变换器、滤波器、耦合器、低噪声放大器、混频器、控制器、固态源等的设计。书中有大量的、适用于工程设计的公式、图表、曲线及数据表。对大部分微波集成电路都有设计举例。在附录中介绍了微波集成电路的一般工艺。本书可供从事微波技术工作的科研、教学、生产及使用单位人员参考。

## 微波集成电路设计

顾其诤 项家楨 袁孝康编著

\*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

\*

开本：787×1092 1/16 1978年5月北京第一版

印张：39 8/16 页数：316 1978年5月北京第一次印刷

字数：998千字 印数：1—16,500册

统一书号：15045·总2195-无641

定价：4.00元

## 前 言

微波集成电路是近十年来才发展起来的一门新技术。与以波导、同轴线等所组成的微波电路相比较，它具有体积小、重量轻、避免了复杂的机械加工、可以适应迅速发展起来的超小型微波固体器件、可靠性高、性能好、使用方便、成本低等优点。

毛主席教导我们：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”微波集成电路的出现和不断发展的过程，充分证明了毛主席这一精辟论断的正确性。

在毛主席“独立自主、自力更生”的伟大方针指引下，从事微波工作的广大干部、工人、技术人员，在我国社会主义建设事业蓬勃发展的大好形势下，在微波集成电路技术方面，从材料的研制、设备的制造、电路的设计和工艺流程的形成，到产品的研制、生产，都取得了新的成绩，积累了不少的经验，把我国的微波技术提高到了一个新的水平，显示出中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平的雄心壮志和创造能力。

本书是我们根据近几年来从事微波集成电路工作上的体会、并综合国内、外有关资料编写而成。书中以介绍微波集成电路的设计方法为重点。为了便于读者掌握这方面的设计方法，我们举了大量设计实例，有的例子还附有调整测试的实验结果。本书对一些微波网络和微波器件的基本理论讲得比较简略；对某些公式只写出了结果而省去了冗长的推导。我们希望，它对于微波集成电路设计工作者能起一本工具书的作用，有利于这门新技术的推广应用和发展。本书所讲的微波集成电路，是指在一个具有一定功能的微波有源电路中、把有源器件作为插件，并把无源器件完全制作在一个陶瓷、玻璃或铁氧体等材料基片上的平面型混合式微波集成电路；而未包括把有源及无源器件都制作在半导体材料基片上的半导体微波集成电路；也未包括具有集成作用的陶瓷波导或截止波导电路。

由于我们的理论水平有限，实践经验不足，书中会存在不少错误和缺点，诚恳地希望读者批评、指正。

编者

# 目 录

<b>第一章 微波集成电路传输线</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 微带传输线 .....	5
1.2-1 特性阻抗和有效介电常数 .....	5
1.2-2 衰减和品质因数 .....	15
1.2-3 导引波长和相对相速 .....	20
1.2-4 微带线的频率上限 .....	22
1.2-5 微带线的色散 .....	23
1.2-6 微带线至同轴线和波导的过渡 .....	25
1.3 悬置和倒置微带线 .....	28
1.3-1 特性阻抗和有效介电常数 .....	28
1.3-2 损耗、品质因数、导引波长和相速 .....	31
1.4 槽线 .....	31
1.4-1 槽线的主要参数 .....	32
1.4-2 槽线与微带线的比较 .....	37
1.4-3 其它传输线至槽线的过渡 .....	39
1.5 共面波导 .....	40
1.6 耦合微带线 .....	43
1.6-1 耦合微带线的参数 .....	45
1.6-2 耦合微带线的衰减和色散特性 .....	62
1.7 耦合共面波导 .....	63
1.8 传输线参数的测量 .....	65
1.8-1 基片介电常数的测定 .....	65
1.8-2 阻抗测定 .....	66
1.8-3 导引波长和色散特性测量 .....	66
1.8-4 传输线衰减的测量 .....	68
1.9 各类微带传输线主要参数计算方法汇总 .....	69
<b>第二章 微波集成电路的主要元件</b> .....	74
2.1 微带电路中的不连续性及其等效电路 .....	74
2.1-1 微带线开路 .....	74
2.1-2 微带线上的间隙 .....	76
2.1-3 微带线带条宽度的阶梯不连续 .....	78
2.1-4 带条的直角弯角 .....	79
2.1-5 带条的T型交接和十字型交接 .....	81
2.1-6 微带电路不连续性等效参数的测量 .....	84

2.2	谐振器	87
2.2-1	终端开路或短路的微带线节谐振器	87
2.2-2	环形谐振器	91
2.2-3	圆形及椭圆形谐振器	93
2.2-4	介质谐振器	96
2.2-5	单晶铁氧体谐振器	101
2.3	耦合线节网络	105
2.3-1	耦合线节及开路和短路交指型耦合线节的等效电路	105
2.3-2	宽带隔直电路	109
2.4	集中和半集中电感和电容元件	110
2.4-1	集中元件	111
2.4-2	半集中元件	117
2.5	电阻元件和匹配终端	122
2.5-1	电阻元件	122
2.5-2	匹配终端	124
<b>第三章</b>	<b>微波集成电路的铁氧体器件</b>	<b>127</b>
3.1	铁氧体基片	127
3.2	微带铁氧体环行器	130
3.2-1	一般工作原理	130
3.2-2	嵌入式微带铁氧体环行器的结构	132
3.2-3	铁氧体薄膜环行器的结构	132
3.2-4	全铁氧体基片微带环行器的结构	134
3.2-5	边导波微带环行器的原理和结构	134
3.2-6	多端微带环行器的构成	135
3.2-7	自锁式微带环行器的结构	136
3.2-8	Y结型环行器的设计方法	137
3.2-9	微带环行器的设计例子	147
3.3	集中元件环行器	148
3.3-1	集中元件环行器的基本型式	148
3.3-2	薄膜集中元件环行器的结构	149
3.3-3	宽频带集中元件环行器的结构	150
3.3-4	集中元件环行器的其它型式	150
3.3-5	集中元件环行器的基本设计方程	152
3.3-6	集中元件环行器的设计例子	154
3.4	微带隔离器	156
3.4-1	终端环行器作为隔离器	156
3.4-2	谐振式隔离器	156
3.4-3	边导波隔离器(场移式隔离器)	156
3.5	微带铁氧体移相器	157
3.5-1	可逆铁氧体移相器	157
3.5-2	不可逆铁氧体移相器	160
3.6	微带单晶 YIG 器件	162

<b>第四章 微波集成电路的滤波器</b> .....	163
4.1 概述 .....	163
4.2 低通原型滤波器 .....	163
4.2-1 最平坦低通原型滤波器 .....	165
4.2-2 切比雪夫低通原型滤波器 .....	167
4.2-3 椭圆函数低通原型滤波器 .....	172
4.2-4 最平坦变换器低通原型滤波器 .....	174
4.2-5 切比雪夫变换器低通原型滤波器 .....	178
4.2-6 分布低通原型滤波器 .....	190
4.3 微波低通和高通滤波器的实现 .....	196
4.3-1 用集中元件实现微波低通滤波器 .....	196
4.3-2 用半集中元件实现微波低通滤波器 .....	202
4.3-3 分布低通原型滤波器的实现 .....	207
4.4 微波带通滤波器 .....	208
4.4-1 半波长谐振器平行耦合滤波器 .....	209
4.4-2 发夹线和混合发夹线滤波器 .....	214
4.4-3 直接耦合短截线带通滤波器之一 .....	218
4.4-4 直接耦合短截线带通滤波器之二 .....	223
4.4-5 应用介质谐振器的窄带带通滤波器 .....	226
4.5 微波带阻滤波器的设计 .....	233
<b>第五章 阻抗变换器、耦合器和功率分配器</b> .....	247
5.1 阶梯阻抗变换器 .....	247
5.1-1 多节四分之一波长阶梯阻抗变换器 .....	247
5.1-2 短阶梯阻抗变换器 .....	258
5.1-3 匹配复数阻抗的阶梯阻抗变换器 .....	265
5.2 渐变线阻抗变换器 .....	270
5.2-1 指数渐变线阻抗变换器 .....	270
5.2-2 切比雪夫渐变线阻抗变换器 .....	271
5.2-3 无不连续的近于最佳渐变线阻抗变换器 .....	273
5.2-4 线性渐变线阻抗变换器 .....	275
5.3 定向耦合器 .....	276
5.3-1 微带定向耦合器 .....	276
5.3-2 高方向性的微带定向耦合器 .....	279
5.3-3 紧耦合微带定向耦合器 .....	282
5.3-4 宽频带微带定向耦合器 .....	285
5.3-5 共面波导及槽线定向耦合器 .....	288
5.3-6 微带-槽线混合结构定向耦合器 .....	290
5.3-7 半集中和集中参数定向耦合器 .....	290
5.4 支线耦合器 .....	291
5.4-1 支线耦合器参数的设计计算公式 .....	291

5.4-2	阻抗变换支线耦合器	295
5.4-3	主线和支线交接不连续性对耦合器的影响	296
5.4-4	支线耦合器拐角对工作频率的影响	297
5.4-5	集中参数支线耦合器	298
5.4-6	混合型支线耦合器	299
5.5	混合环	302
5.5-1	混合环的设计计算公式	303
5.5-2	宽带3分贝混合环	306
5.5-3	支线交接不连续效应的影响	308
5.5-4	微带-槽线混合结构的宽带魔T	308
5.6	功率分配器	309
5.6-1	简单的功率分配器	309
5.6-2	功率均分的混合型N路功率分配器	310
5.6-3	任意分配比的混合型2路功率分配器	314
5.6-4	2路功率分配器级联使用的设计方法	317
5.6-5	采用渐变线变换节的混合型功率分配器	318
5.6-6	适用于复数负载阻抗的混合型2路功率分配器	320
<b>第六章</b>	<b>微波集成低噪声放大器</b>	<b>322</b>
6.1	低噪声微波晶体管放大器	322
6.1-1	微波晶体管放大器的优点和现状	322
6.1-2	微波晶体管的结构	322
6.1-3	微波晶体管的散射参数	323
6.1-4	微波晶体管的功率增益和稳定性	325
6.1-5	微波晶体管的噪声系数	327
6.1-6	微波晶体管散射参数的测量	327
6.1-7	按最佳噪声系数设计微波晶体管放大器	330
6.1-8	在多级放大器中获得平坦增益特性的简单方法	334
6.1-9	微波晶体管放大器的其他设计考虑和试制实例	336
6.1-10	微波晶体管放大器的简化设计方法	341
6.2	微波隧道二极管放大器	346
6.2-1	隧道二极管放大器的应用范围和优缺点	346
6.2-2	隧道二极管的电路特性	347
6.2-3	隧道二极管放大器的基本特性	350
6.2-4	隧道二极管放大器的设计考虑	352
6.2-5	集成的隧道二极管放大器的研制实例	354
6.2-6	集成的隧道二极管放大器的其他型式	357
6.3	微波参量放大器	361
6.3-1	参量放大器的特点和分类	361
6.3-2	变容二极管的基本特性	362
6.3-3	参量放大器的基本特性	364
6.3-4	参量放大器的一般设计考虑	370
6.3-5	集成的参量放大器的研制实例	370



6.3-6	集成参量放大器的其它电路形式	375
6.4	噪声系数的测量	377
6.4-1	噪声系数的一般概念	377
6.4-2	测量噪声系数的理论基础	378
6.4-3	测量噪声系数的一般方法	380
6.4-4	用温度已知的负载去测量接收机的噪声系数	380
6.4-5	用气体放电管去测量接收机的噪声系数	381
6.4-6	用噪声二极管去测量接收机的噪声系数	381
6.4-7	用信号发生器去测量接收机的噪声系数	382
6.4-8	测量噪声系数时的注意事项	383
<b>第七章</b>	<b>微波集成变频器</b>	<b>384</b>
7.1	混频器(下变频器)的工作原理和特性	385
7.1-1	混频器的工作原理	385
7.1-2	微波接收混频器的特性	386
7.2	微波混合集成混频器的设计	391
7.2-1	微波混合集成混频器的设计考虑	391
7.2-2	设计举例	399
7.3	微波集成混频器典型电路	404
7.3-1	单端混频器	404
7.3-2	几种平衡混频器的典型电路和性能	405
7.4	单边带接收混频器——镜像抑制混频器	414
7.4-1	镜像抑制混频器的工作原理	415
7.4-2	镜像抑制混频器的主要特性	417
7.4-3	电路设计	420
7.4-4	实用电路	422
7.5	低噪声接收混频器——镜像回收技术的应用	425
7.5-1	镜像回收技术和器件的关系	426
7.5-2	镜像回收试验	426
7.5-3	镜像回收混频器	427
7.5-4	具有电抗性镜像终端的混频器	429
7.6	集成双平衡混频器	432
7.6-1	双平衡混频器电路工作原理	432
7.6-2	微带双平衡混频器电路方案	433
7.6-3	典型电路结构	434
7.6-4	用双平衡混频器构成低噪声混频器	435
7.7	上变频器	436
7.7-1	环流器反射型参量上变频器	437
7.7-2	电桥反射型上变频器	439
7.7-3	滤波器型上变频器	443
7.7-4	单边带参量上变频器	445



<b>第八章 集成微波固态源</b> .....	448
8.1 概述 .....	448
8.2 集成微波晶体三极管振荡器 .....	449
8.2-1 晶体三极管振荡器的原理和形式 .....	449
8.2-2 微波晶体三极管振荡器的设计方法 .....	450
8.2-3 集成微波晶体三极管振荡器的一些具体电路形式 .....	463
8.3 微波集成二极管倍频器 .....	467
8.3-1 变容二极管倍频器的设计 .....	467
8.3-2 阶跃恢复二极管倍频器的设计 .....	481
8.3-3 倍频器的噪声和可能的不稳定性 .....	492
8.4 集成体效应振荡器 .....	494
8.4-1 体效应振荡器的工作原理 .....	494
8.4-2 体效应管阻抗的确定 .....	496
8.4-3 固定频率集成体效应振荡器的设计 .....	499
8.4-4 变容管调谐的体效应振荡器的设计 .....	502
8.4-5 YIG 小球调谐的集成体效应振荡器 .....	510
8.4-6 其他集成体效应振荡器 .....	511
8.5 集成雪崩二极管振荡器 .....	514
8.5-1 雪崩二极管振荡器工作原理 .....	514
8.5-2 雪崩二极管的阻抗 .....	516
8.5-3 集成碰撞雪崩渡越时间模式振荡器 .....	520
8.5-4 集成雪崩二极管高效模振荡器 .....	524
8.6 固态微波源的稳频方法 .....	529
8.6-1 微波鉴频稳频法 .....	530
8.6-2 注入锁相稳频法 .....	531
8.6-3 锁相环稳频法 .....	532
8.6-4 取样锁相稳频法 .....	533
<b>第九章 微波集成控制电路</b> .....	540
9.1 微波集成二极管开关 .....	540
9.1-1 PIN 二极管等效电路及其分析 .....	540
9.1-2 谐振式开关的构成原理、工作特性和设计方法 .....	544
9.1-3 宽频带微波开关的设计 .....	549
9.1-4 微波多路开关的电路结构 .....	551
9.1-5 开关速度 .....	553
9.2 微波集成二极管数字式移相器 .....	555
9.2-1 环流器反射型移相器 .....	556
9.2-2 耦合器型移相器 .....	558
9.2-3 路径选择型移相器 .....	565
9.2-4 加载线型移相器 .....	571
9.2-5 四种移相器电路的比较和级联 .....	586
9.3 微波集成模拟式移相器 .....	589

9.3-1 环流器耦合模拟式移相器 .....	589
9.3-2 耦合器型模拟式移相器 .....	595
9.4 微波集成限幅器及调制器-衰减器 .....	596
9.4-1 微波限幅器的功能 .....	596
9.4-2 无源变容二极管限幅器 .....	597
9.4-3 PIN 二极管限幅器 .....	598
9.4-4 PIN 二极管——变容管限幅器 .....	599
9.4-5 双短截线限幅器 .....	599
9.4-6 匹配限幅器的结构 .....	601
9.4-7 PIN 二极管电控衰减器、调制器的功能 .....	602
9.4-8 反射型 PIN 二极管电控衰减器、调制器 .....	603
9.4-9 匹配型电控衰减器、调制器 .....	612
<b>附录</b> .....	<b>618</b>
附录 I 微波混合集成电路工艺简介 .....	618
附录 II 微波混合集成电路结构简介 .....	620
附录 III 微波波段划分及代号 .....	623

# 第一章 微波集成电路传输线

## 1.1 引言

微波传输线是微波集成电路的基础。微波传输线的发展，促进了微波集成电路的发展。目前可以用于微波集成电路的传输线种类很多，其中主要传输线的名称和截面结构，如图 1-1 所示。

用于微波集成电路的传输线的一个共同的特点是可在坚固的介质基片（也称为介质衬底，通常是氧化铝陶瓷和石英等）上、沉积薄膜导体来构成，它们的厚度很薄，因此，用它们构成的微波电路，属平面电路，具有如下的优点：

1) 整个电路无论其图形如何复杂，均可简便地用沉积和电化学方法，精确地复制在介质基片上，将基片固定于作为接地板的金属基座上就构成一完整的电路。这种电路的制造成本要比同功能的波导和同轴电路便宜得多。

2) 这种电路由于消除了许多接头，故电路制作的重复性好，性能优良。

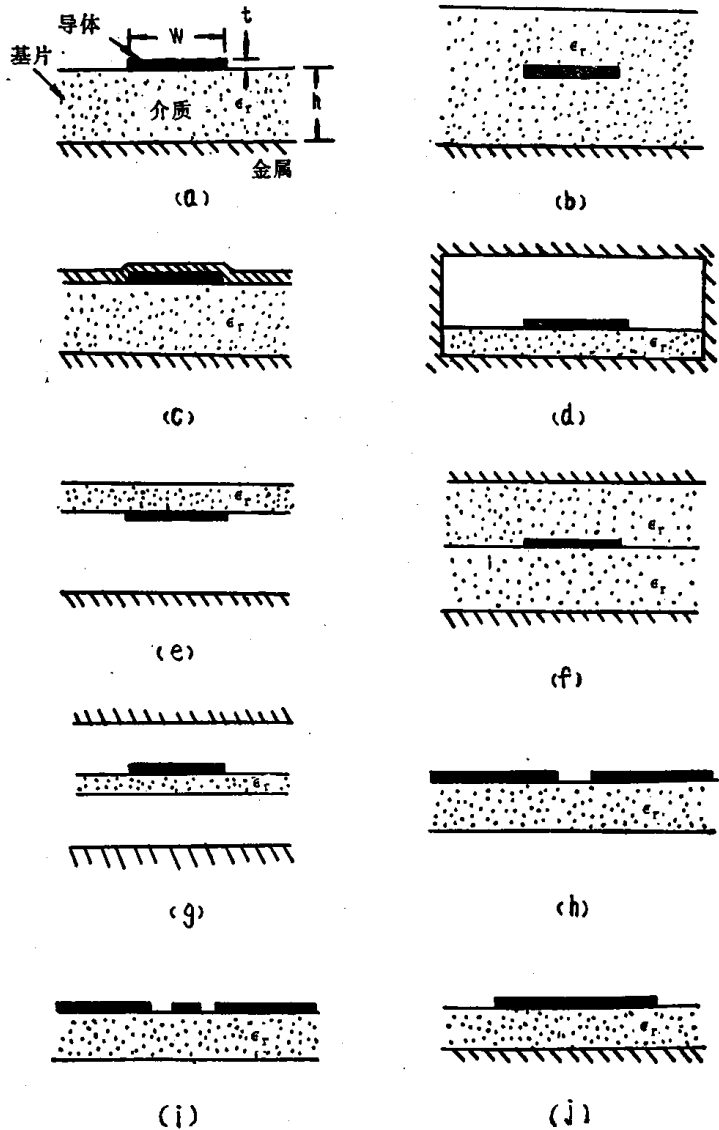
3) 便于与有源和无源器件连接，组成混合集成电路。

4) 由这种传输线构成的混合集成电路，大多数调整方便。

5) 体积小、重量轻、可靠性高。

微波集成电路中用的传输线，统称为微带线，而把其中有图 1.1-1 (a) 那种截面结构的称为标准微带线。我们今后简称标准形式的微带线为微带线，提到其余形式的传输线时，分别用图 1.1-1 附注中的名称。

上述这些传输线的结构不同、性能不同，故用途也不同。标准微带线是目前最常用的基



(a) 标准微带线；(b) 嵌入式微带线；(c) 有覆盖层的微带线；  
(d) 屏蔽的微带线；(e) 倒置微带线；(f) 夹层线；(g) 悬置微带线；(h) 槽线；(i) 共面线；(j) 微波导

图 1.1-1 用于微波集成电路的主要传输线的结构形式

本传输线，它有不少优点，但也有一定的缺点，例如损耗较大；空气-介质界面附近会激起平面-捕获表面波等。采用夹层线，可克服这些缺点，但它也有不足之处，譬如安装半导体器件和调整电路都比较困难。嵌入式微带线是使空气-介质界面移至远场区的微带线，它能制止平面-捕获表面波，并可采用低介电常数的介质作基片。有覆盖层的微带线，一般用于半导体基片的场合，表面覆盖一层介质薄膜可以保护半导体表面不为大气染污。屏蔽的微带线，可防止射频辐射和干扰。实际上，任何一种形式的传输线，在使用中都要加屏蔽外壳。图 1.1-1(e)和(g)的形式，并联安装半导体器件比较方便；也便于安放铁氧体，构成环行器或隔离器，或者安放介质谐振腔，制成滤波器。这类传输线由于有空气间隙，故它们的有效介电常数小，损耗小，电路的品质因数高。槽线和共面波导都具有椭圆极化磁场，适于作含有铁氧体的不可逆器件；同时由于它们的接地面和导电带条是在同一平面上，故元件在电路中并联连接极为方便。最后，微波导的外形结构虽类似于微带线，但它的带条导体的宽度比微带线的要宽得多。它几乎具备微带线的全部优点，同时还有较低的损耗和辐射及有较高的功率容量等特点，适用于 10 千兆赫以上频率的电路作滤波器和其它电路元件。

图 1.1-1 所示的各种结构形式的传输线，除了槽线和微波导之外，主要传播的是横电磁波(TEM)或者准 TEM 波\*。只要假定它们是无耗的，它们的特性阻抗  $Z_0$  均可用单位长度的静电电容  $C$  (法拉/米) 和相速  $v_p$  (米/秒) 来表示：

$$Z_0 = \frac{1}{v_p \cdot C} \quad (1.1-1)$$

若传输线以相对介电常数为  $\epsilon_r$  的介质均匀填充，则  $v_p$  和  $C$  分别为：

$$v_p = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.1-2)$$

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (1.1-3)$$

这里  $v_0$  是真空中电磁波速度； $C_0$  是以空气作介质时传输线单位长度的电容量。当传输线有数种介质填充时，要引入有效介电常数  $\epsilon_e$  的概念，此时

$$v_p = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (1.1-4)$$

$$C = \epsilon_e C_0 \quad (1.1-5)$$

用了有效介电常数后，就可把这种传输线看作介电常数等于  $\epsilon_e$  的介质均匀填充的传输线。

由 (1.1-5) 式可知：

$$\epsilon_e = \frac{C}{C_0}$$

或

$$= \left( \frac{Z'_0}{Z_0} \right)^2 \quad (1.1-6)$$

这里  $Z_0$  是所研究传输线的实际特性阻抗； $Z'_0$  是同样结构的传输线其填充介质仅为空气的特性阻抗。

微带线上的导引波长  $\lambda_g^{**}$  与自由空间中的波长  $\lambda_0$  有如下的关系：

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (1.1-7)$$

\* TEM 波有时也称为 TEM 模。

\*\* 波导波长  $\lambda_g$ ，系指传输线上的相波长。有的资料中也称之为波导波长。

由上述这些单根线构成的耦合线，实际上也是组成微波集成电路的基本单元，如定向耦合器、滤波器等，往往需采用耦合传输线节。

耦合传输线通常是应用所谓奇、偶模理论进行分析的。这就是将耦合传输线上的电磁传输过程，看成是一反相等幅（奇模）电压和一同相等幅（偶模）电压激励耦合线所引起的电磁传输过程的叠加。耦合微带线上奇、偶模电场分布的情形如图 1.1-2 所示。耦合传输线在奇模和偶模激励下的各条传输线的特性阻抗分别称为奇模阻抗  $Z_{oo}$  和偶模阻抗  $Z_{oe}$ 。它们与传输线上的奇、偶模相速  $v_{po}$  及  $v_{pe}$  和单位长度的奇、偶模电容  $C_{oo}$  及  $C_{oe}$  有如下关系：

$$Z_{oo} = \frac{1}{v_{po} C_{oo}(\epsilon_r)} \quad (1.1-8 a)$$

$$Z_{oe} = \frac{1}{v_{pe} C_{oe}(\epsilon_r)} \quad (1.1-8 b)$$

式中， $C_{oo}$  和  $C_{oe}$  是  $\epsilon_r$  的函数。不均匀介质填充的耦合传输线上  $v_{po}$  及  $v_{pe}$  与真空中电磁波速度  $v_0$  间的关系为

$$v_{po} = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_{eo}}} \quad (1.1-9 a)$$

$$v_{pe} = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_{ee}}} \quad (1.1-9 b)$$

这里  $\epsilon_{eo}$  和  $\epsilon_{ee}$  分别是奇模和偶模有效介电常数。它们与传输线有和无介质填充时的单位长度电容量之比有如下关系：

$$\epsilon_{eo} = \frac{C_{oo}(\epsilon_r)}{C_{oo}(1)} \quad (1.1-10 a)$$

$$\epsilon_{ee} = \frac{C_{oe}(\epsilon_r)}{C_{oe}(1)} \quad (1.1-10 b)$$

式中  $C_{oo}(\epsilon_r)$  和  $C_{oe}(\epsilon_r)$  的含义与 (1.1-8) 式的相同； $C_{oo}(1)$  和  $C_{oe}(1)$  是同样结构的空气介质耦合传输线在奇、偶模激励下单位长度的电容量。

不均匀介质填充的耦合传输线上奇、偶模波的导引波长  $\lambda_{go}$  及  $\lambda_{ge}$  与自由空间波长  $\lambda_0$  有下述关系：

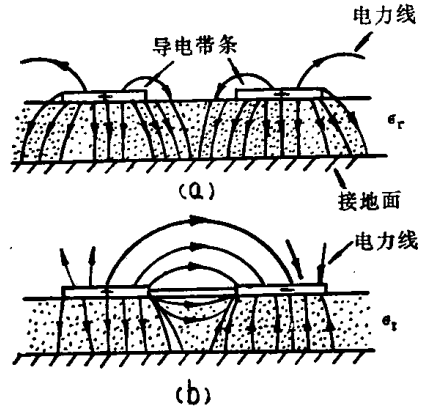
$$\lambda_{go} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eo}}} \quad (1.1-11 a)$$

$$\lambda_{ge} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{ee}}} \quad (1.1-11 b)$$

在详细研究上述各种传输线之前，先讨论一下微波集成电路所用的基片材料和导电材料。

微波集成电路的理想基片材料应具有下列特性：

- 1) 高的介电常数；
- 2) 低的损耗因子；
- 3) 介电常数在工作的频率和温度范围内应保持恒值；



(a) 偶模激励  
(b) 奇模激励

图 1.1-2 耦合微带传输线奇、偶模电场分布示意图

- 4) 高的纯度, 均匀的特性;
- 5) 表面光洁度高;
- 6) 热传导性好。

目前常用于微波混合集成的基片材料及其主要特性见表 1.1-1。

表 1.1-1 基片材料特性

材 料	纯 度 %	表面粗糙度 (微米)	介 电 常 数		损 耗 正 切 $\tan\delta$		导 热 系 数 (卡/厘米 <sup>2</sup> 秒·°C)	应 用
			10千兆赫	25千兆赫	10千兆赫	25千兆赫		
氧化铝	96	0.62	8.9	8.7	$6 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-4}$	0.043~0.084	微带, 悬置微带, 夹层线, 槽线和共面波导等
氧化铝	99.5	0.2~0.5	9.5	9.0	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	0.058~0.084	同上
氧化铝	99.9	0.05~2.87	9.9	—	$0.25 \times 10^{-4}$	—	—	同上
氧化铍	99.5	0.45	6.1	6.0	$10^{-4}$	$4 \times 10^{-3}$	0.55~0.6	大功率器件用, 制成合成基片
硼酸玻璃	无砷	0.006 以下	5.74	—	$2 \times 10^{-4}$	—	0.003	集中元件
石英	99.9	0.006 以下	3.78	3.78	$1 \times 10^{-4}$	—	0.0034	微带, 悬置微带, 夹层线等
合成蓝宝石	99.9以上	0.005	C轴方向切割 10.55 (11.55)	—	$1 \times 10^{-4}$	—	0.0079	微带, 悬置微带, 夹层线等集中元件
			垂直C轴方向切割 8.6(9.5)	—				
金红石	—	—	100	—	$4 \times 10^{-4}$	—	0.084	微带, 共面波导等
铁氧体/石榴石	—	—	13~16	—	$2 \times 10^{-4}$	—	0.13	微带, 槽线, 共面波导。制成合成基片
聚四氟乙烯	—	—	2.1	—	$3.7 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-4}$	—	带状线
聚苯乙烯	—	—	2.55	2.54	$4.3 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$	—	带状线
玻璃纤维强化聚四氟乙烯	—	—	2.6~2.7	—	$18 \times 10^{-4}$	—	—	微带线带状线
石英纤维强化聚四氟乙烯	—	—	2.44~2.59	—	$8 \times 10^{-4}$	—	—	微带, 带状线

如果电路的环境温度变化较大, 则必须注意不能用居里点低的材料作基片, 否则温度将对材料、从而对电路的特性有强烈的影响。从这个角度出发, 选蓝宝石作基片比金红石要好。

选择基片厚度  $h$  时, 应对导体损耗和基片最大许可热阻折中考虑。当基片的接地面与散热器有良好的热接触时, 尺寸为  $w$  的方形电路的热阻的一级近似式为

$$R_{th} \cong \frac{h}{kw^2}$$

式中  $k$  是波尔兹曼常数。因此基片越厚, 热阻越大, 散热就越差, 故从散热的角度考虑, 基片应取得薄些。但是微带线的导体衰减系数  $\alpha_c \sim \frac{1}{h}$ , 基片太薄, 导体的衰减太大, 相应的  $Q$  值很低。故从损耗的角度看, 基片厚度不宜选得太薄。目前微波混合集成电路常用的氧化铝和石英等基片的厚度, 多数选在 0.5 至 0.8 毫米之间。

用于微波集成电路的理想导电材料应有如下特性:

- 1) 高的导电率;

- 2) 低的电阻温度系数;
- 3) 对基片应具有牢固的附着力;
- 4) 便于刻蚀和焊接;
- 5) 易于沉积和电镀。

集成电路中常用的导电材料有银、铜、金和铬等。银、铜和金等金属材料主要作为电路的导电导体，而铬因为与许多基片介质有很好的粘附性，一般作为使良导电材料铜、金等沉积于基片上的中间过渡层。由于铬的导电性差，铬层厚度应该薄些，通常控制在 0.1 微米以下。主要导电层的厚度应大于三倍趋肤深度，约在 5 微米以上。表 1.1-2 中列出了一些常用金属的导电率和归一化趋肤深度，供选择导电材料时参考。

表 1.1-2 常用金属的导电率和趋肤深度

金 属	导 电 率 $\sigma$ (欧/米)	归一化趋肤深度 $\delta\sqrt{F}$ (千兆赫) (微米)
银 Ag	$6.17 \times 10^7$	2.03
铜 Cu	$5.8 \times 10^7$	2.09
金 Au	$4.09 \times 10^7$	2.49
铝 Al	$3.72 \times 10^7$	2.61
钨 W	$1.78 \times 10^7$	3.76
钼 Mo	$1.76 \times 10^7$	3.8
铂 Pt	$0.94 \times 10^7$	5.2
铬 Cr	$0.77 \times 10^7$	5.75
钽 Ta	$0.64 \times 10^7$	6.26

下面就分别详细介绍微波集成电路中常用的几种传输线和耦合传输线。微波导目前很少应用，就不介绍了。

## 1.2 微带传输线

近年来，标准微带线（参看图 1.2-1）受到人们的重视。以前研究这种传输线，主要是以低介电常数（大约 2 左右）作基片，因其辐射损耗较大，未引起重视。近年来由于好些高介电常数、低损耗材料已研制成功，同时又迫切要把微波电路小型化，人们才重新研究微带线。现在不仅在理论上得到了很大的发展，并且已付之实用，成为微波集成电路中一种最基本的传输线。

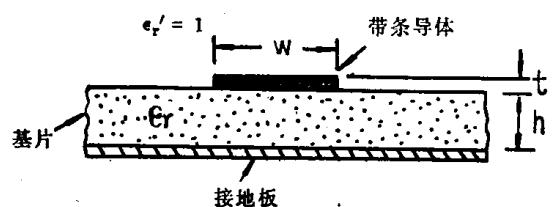


图 1.2-1 微带线的截面结构

### 1.2-1 特性阻抗和有效介电常数

分析与计算微带线的特性阻抗时，一般假设：(i) 微带线是一种不均匀介质填充的传输线，它虽不能传播真正的 TEM 模，但它实际传输的模式与 TEM 模又十分相似，故假设它即为“TEM”模；(ii) 目前微带电路中导电带条的厚度  $t$  一般在 5 至 10 微米之间。因此就假设  $t=0$ 。

基于此，分析计算的方法之一是先分析计算  $\epsilon_r = \epsilon_r' = 1$  的零厚度、“单一介质微带线”的



特性阻抗  $Z'_0$ ，然后再求此微带线的有效介电常数  $\epsilon_e$ ，这样即可按下式计算它的特性阻抗  $Z_0$ ：

$$Z_0 = \frac{Z'_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (1.2-1)$$

可以证明，单一介质的微带线的特性阻抗的计算公式为：

$$Z'_0 = 60 \pi \frac{K'(k)}{K(k)} \quad (\text{欧}) \quad (1.2-2)$$

$$d_n^2(2\alpha K(k)) = \frac{E(k)}{K(k)} \quad (1.2-3)$$

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \frac{\partial}{\partial \alpha} \ln \mathcal{P}_4\left(\alpha, \frac{K'}{K}\right) \quad (1.2-4)$$

这里， $E(k)$ 是第二类完全椭圆积分； $d_n$ 是雅柯毕椭圆函数； $\mathcal{P}_4$ 为赛塔(theta)函数； $\alpha$ 为参数量。从这些精确公式可以导出两个实用的近似公式：

$$Z'_0 = 60 \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right) \quad (\text{欧}) \quad w/h \leq 1 \quad (1.2-5)$$

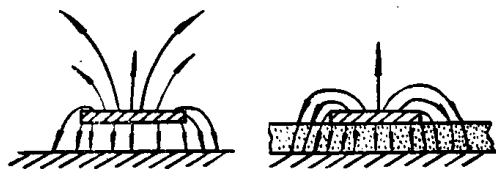
$$Z'_0 = \frac{120 \pi}{\frac{w}{h} + 2.42 - 0.44 \frac{h}{w} + \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6} \quad (\text{欧}) \quad w/h \geq 1 \quad (1.2-6)$$

在  $0 < w/h < 10$  范围内，这两个公式的精度为  $\pm 0.25\%$ 。 $w/h > 10$  时，(1.2-6) 式的精度为  $\pm 1\%$ 。当微带线的带条导体非常窄 ( $w \ll h$ ) 和非常宽 ( $w \gg h$ ) 时，可更简单地写为：

$$Z'_0 = 60 \ln \frac{8h}{w} \quad (\text{欧}) \quad w \ll h \quad (1.2-7)$$

$$Z'_0 = \frac{120 \pi h}{w} \quad (\text{欧}) \quad w \gg h \quad (1.2-8)$$

单一介质微带线的辐射损耗大，实践中很少使用，尤其是  $\epsilon_r = \epsilon'_r = 1$  的情形，可以说没有实用价值。比较图 1.2-2 单一和双重介质微带线的电场分布示意图可以看出，双介质微带线呈“场集中”效应，因此它的辐射损耗小。算出了  $Z'_0$  后，若再算出  $\epsilon_e$ ，则双介质微带线的特性阻抗  $Z_0$  可由公式 (1.2-1) 计算。图 1.2-1 形式的微带线，当  $\epsilon'_r = 1$  时，它的  $\epsilon_e$  满足下列不等式：



(a)单一介质

(b)双重介质

图 1.2-2 单一和双重介质微带线中的电场分布示意图

可由公式 (1.2-1) 计算。图 1.2-1 形式的微带线，当  $\epsilon'_r = 1$  时，它的  $\epsilon_e$  满足下列不等式：

$$\frac{\epsilon_r + 1}{2} \leq \epsilon_e \leq \epsilon_r$$

根据此不等式，可以证明，微带线的  $\epsilon_e$  可表示为：

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} F\left(\epsilon_r, \frac{w}{h}\right) \quad (1.2-9)$$

上式中的函数  $F\left(\epsilon_r, \frac{w}{h}\right)$  可近似地表示为：

$$F\left(\epsilon_r, \frac{w}{h}\right) = \left(1 + \frac{10h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.2-10)$$

故

$$\epsilon_e \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.2-11)$$

用此式计算的  $\epsilon_e$  的精度为  $\pm 2\%$ ， $(\epsilon_e)^{\frac{1}{2}}$  的精度为  $\pm 1\%$ 。以基片的  $\epsilon_r$  为参量的。 $(\epsilon_e)^{\frac{1}{2}}$  与

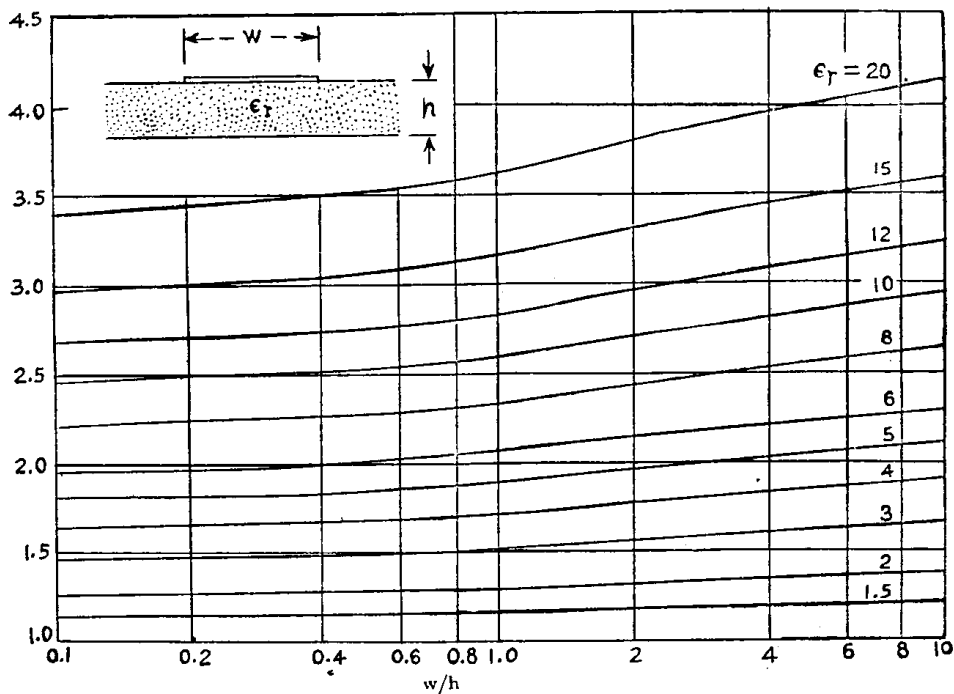


图 1.2-3 微带线的  $(\epsilon_e)^{1/2}$  与宽高比  $(\frac{w}{h})$  的关系曲线，图中曲线以  $\epsilon_r$  为参量。

$(\frac{w}{h})$  的关系，如图 1.2-3 所示。

微带线特性阻抗  $Z_0$  计算公式可归纳为：

$$\left. \begin{aligned}
 Z_0 &= \frac{Z'_0}{\sqrt{\epsilon_e}} & (a) \\
 Z'_0 &= 60 \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{h}\right) & \text{当 } \frac{w}{h} \leq 1 \quad (b) \\
 Z'_0 &= \frac{120\pi}{\frac{w}{h} + 2.42 - 0.44\frac{h}{w} + \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6} & \text{当 } \frac{w}{h} \geq 1 \quad (c) \\
 \epsilon_e &= \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} & (d)
 \end{aligned} \right\} (1.2-12)$$

用这些公式，由已知的宽高比  $\frac{w}{h}$  和  $\epsilon_r$ ，容易求微带线的  $Z_0$  和  $\epsilon_e$ 。然而，实际问题往往相反，是由给定的  $Z_0$  来确定  $w/h$ 。这时，可按下述方法来运用(1.2-12)式：

1) 首先，根据  $Z_0$  和所选基片的  $\epsilon_r$ ，由(a)式计算  $Z'_0$  值， $(Z'_0)_1 = \sqrt{\epsilon_r} \cdot Z_0$ 。注意，这一步计算中公式(a)里的  $\epsilon_e$  用基片的  $\epsilon_r$  代替。

2) 将算得的  $(Z'_0)_1$  值代入(b)或(c)式，可求得  $(\frac{w}{h})_1$ 。

3) 把  $(\frac{w}{h})_1$  值和所选的  $\epsilon_r$  代入(d)式，算出  $(\epsilon_e)_1$ 。

4) 再将此  $(\epsilon_e)_1$  值和  $Z_0$  代入(a)式重新计算  $Z'_0$ ，令计算结果为  $(Z'_0)_2$ 。

5) 利用这次算出的  $(Z'_0)_2$ ，重复步骤 2) 和 3)，又可算得一个新的  $(\epsilon_e)_2$ 。

6) 然后，再按照步骤 5)、2) 和 3)，重复计算下去，直至相邻二次算出的  $\epsilon_e$  值之差在 1% 以内为止。