

微带电路

清华大学《微带电路》编写组



人民邮电出版社

微 带 电 路

清华大学《微带电路》编写组

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 简 介

本书共十四章，包括两大部分。第一部分介绍均匀微带线、耦合微带线的基本知识及滤波器、变阻器、电桥、定向耦合器、功率分配器等主要无源微带电路元件的原理和设计方法；第二部分介绍混频器、倍频器、固体控制电路、参量放大器、微波晶体管放大器等主要有源微带电路的原理和设计方法。另有专门一章，给出了书中许多公式的数学推导。全书各章均附有必要的设计表格和曲线。对重要内容并有实例说明。大部分材料都经过实际工作的检验，比较切合实用。

本书的主要对象为通信、雷达等大学专业的工农兵学员、教师、从事微波集成电路工作的工程技术人员和科学研究人员。可作为教学、设计和自学参考。

微 带 电 路

清华大学〈微带电路〉编写组

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店发行

限国内发行

开本： 787×1092 1/16 1976年9月 第 一 版
印张： 31 4/16 页数250 1976年9月河北第一次印刷
字数： 780千字 印数： 1—15,500册
统一书号： 15045· 总2081—无 616
定 价： 3.25 元

编写说明

微带线和微波固体器件结合起来构成的混合型微波集成电路，我们即简称为微带电路。它通常用于分米波段至毫米波段的频率范围。由于微波固体器件和微带线本身的限制，一般只应用于瓦量级以下的中、小功率。目前除了做成混频器、倍频器、移相器、调制器、放大器、振荡器、电控开关等单元电路以外，尚可做成微波信号源、微波集成接收机、相控阵雷达单元等微带组件。

微带线作为传输线和电路元件，其在微波电路中的作用，与波导、同轴线等传输线没有本质上的区别，因此基本电路原理有些是相同的。但是，由于微带线有它结构上的特点，使微带电路元件在类型、设计计算等方面又不同于其他微波传输线所构成的元件。这就要求我们微带电路工作者，既要理解一般微波电路的工作原理，又能掌握一些微带电路专门的分析与设计计算方法。为使本书内容不致过分庞大，在编写时主要着重于后面部分的内容，但为了便于较多的读者自学及参考起见，一般均采用深入浅出的讨论方式，只要读者对分布参数电路及电磁场的物理概念有些基础知识，绝大部分内容阅读起来并不困难。另一方面，为了突出重点，由于微带电路的分析、设计计算广泛应用微波网络的方法，书中不仅有专门一章对此进行详细讨论，并在其他章、节中用到网络方法时，也都加了必要的说明。

实用的有源微带电路都是微带线和微波固体器件相结合所构成。为了方便微带电路的设计与计算，在讨论有源电路的每一章中，均首先以一定的篇幅介绍了各种有关的微波固体器件的特性和相应的物理过程。在讲法上也以通俗易懂、切合需要为主。只要读者具有半导体器件的基本知识，阅读起来也并不困难。

微带电路是最近几年才发展起来的一门新技术，目前还处在继续探索与研究的阶段。对若干问题我们只能与读者共同探讨。尤其是有源部分，还需通过实践、认识、再实践等多次反复过程，方能使内容更加正确。对此，编写时均已分别具体指出。我们这样做，是希望有更多的人和我们一起来解决这些存在的问题，加快微带电路技术前进的步伐。

我们把难度较大、数学推导多的材料都集中在最后，自成一章，以供参考。

本书内容基本上分为两部分：第一部分为无源微带电路，包括均匀微带线、耦合微带线、微带不均匀性等基本知识，以及滤波器、变阻器、电桥、定向耦合器和功率分配器等常用无源元件的原理和设计计算方法，并各有实例说明；第二部分为有源微带电路，包括混频器、倍频器、参量放大器、微波晶体管放大器、固体控制电路等常用组件的原理和设计计算，也各附有说明实例。此外，还有“微带元件的构成”和“微带线和微带电路的测量”两章，分别介绍了这两方面的一些实用知识。对微带电路的工艺问题，本书未做介绍。

清华大学《微带电路》编写组

1975年7月

前 言

无产阶级文化大革命和批林批孔运动以来，在毛主席革命路线的指引下，我国无线电事业蓬勃发展，欣欣向荣。在微波领域里，我国无线电工业、教育和科研战线上的广大工人、战士、工农兵学员、革命教师和工程技术人员，破除迷信，解放思想，发扬**独立自主、自力更生**的革命精神，近几年来，在微波集成电路方面，也取得了新的成果，使无线电设备更趋向小型化、集成化和积木化，同时提高了无线电设备的可靠性、稳定性和重要的质量指标。

微带电路是微波集成电路的一个重要方面。

我校与有关兄弟单位一起，在微带电路方面做过一些工作，试制过一些单元电路和微带组件。我们把摸索得到的一些不成熟经验和初步理解的一些理论知识，加以整理，编写了这本书，供广大无线电工作者参考，同时争取起一个抛砖引玉的作用，希望今后能有更多更好的这方面的书籍出版。书中有一部分材料是兄弟单位提供的。我们的理论水平不高，尤其是深入实际调查研究很不够，书中一定有很多不恰当的地方，诚恳地希望读者提出宝贵意见，以便改正。

清华大学《微带电路》编写组

目 录

前言

第一章 微带线基础	(1)
一、微带线的发展及其应用.....	(1)
二、微带线的构成.....	(3)
三、微带线的特性阻抗和相速.....	(6)
四、微带线的损耗.....	(9)
五、微带线的色散特性.....	(26)
六、其它形式的几种微带线.....	(29)
七、小结.....	(30)
第二章 微波网络基础	(31)
一、引言.....	(31)
二、矩阵的基本运算规则.....	(33)
三、微波网络的各种矩阵形式.....	(36)
四、基本电路单元的矩阵参量.....	(42)
五、参考面的问题.....	(45)
六、变压器网络(正切网络).....	(47)
七、二口网络的工作特性参量.....	(50)
八、信号源失配的影响.....	(53)
九、无损三口网络的特性.....	(56)
十、魔 T 的特性及其应用.....	(57)
十一、电桥、定向耦合器的特性和应用.....	(62)
十二、小结.....	(66)
附录、无损网络 S 参量特性的证明.....	(66)
第三章 耦合微带线	(69)
一、概述.....	(69)
二、均匀介质耦合微带线奇偶模激励下的微分方程.....	(71)
三、非均匀介质的耦合微带线.....	(74)
四、耦合微带线的奇偶模参量.....	(76)
五、耦合微带线单元的网络参量和等效电路.....	(80)
六、小结.....	(88)

第四章 微带线的不均匀性	(89)
一、概述.....	(89)
二、微带线截断端的等效电路.....	(90)
三、微带线间隙的等效电路.....	(92)
四、微带线的尺寸跳变.....	(93)
五、微带线直角折弯.....	(95)
六、微带线T接头.....	(96)
第五章 微带滤波器和变阻器	(100)
一、微带滤波器的一般介绍.....	(100)
二、集中参数低通原型滤波器.....	(103)
三、微带半集中参数低通滤波器.....	(111)
四、滤波器之间的变换关系(相对带宽较窄情况).....	(121)
五、滤波器中的倒置转换器.....	(125)
六、按低通原型设计的窄带宽带通滤波器.....	(130)
七、带阻滤波器.....	(136)
(一)频带较窄时的近似设计.....	(136)
(二)带阻滤波器的严格设计.....	(140)
八、元件损耗引起的影响.....	(143)
九、微带变阻器概述.....	(145)
十、指数渐变线.....	(145)
十一、四分之一波长多节变阻器.....	(148)
十二、变阻滤波器.....	(155)
十三、短节变阻器.....	(161)
十四、小结.....	(163)
第六章 微带线电桥、定向耦合器和分功率器	(171)
一、引言.....	(171)
二、耦合线定向耦合器.....	(172)
(一)基本原理.....	(172)
(二)奇、偶模的分析和计算公式.....	(174)
(三)微带耦合线定向耦合器的具体问题.....	(178)
三、分支线电桥和定向耦合器.....	(179)
(一)对称分支线定向耦合器及其中心频率设计公式.....	(180)
(二)对称分支线定向耦合器的频带特性及考虑频带宽度情况下的设计方法.....	(186)
(三)“结电抗”效应的影响及其修正.....	(191)
(四)不对称的分支电桥和定向耦合器.....	(201)
四、环形电桥和定向耦合器.....	(201)
(一)一般形式.....	(201)

(二)宽频带环形电桥·····	(207)
五、分功率器(功率分配器)·····	(209)
(一)二等分功率器·····	(210)
(二)不等分的二分支功率器·····	(212)
(三)宽频带等分功率器·····	(215)
(四)宽频带不等分功率器·····	(219)
六、小结·····	(225)
第七章 微带电路元件的构成 ·····	(227)
一、微带电路的结构及其重要性·····	(227)
二、屏蔽盒·····	(227)
三、同轴—微带转换接头·····	(230)
四、波导—微带转换接头·····	(233)
五、微带电路中固体器件的安装·····	(236)
(一)管壳固定在接地板(热沉)上·····	(237)
(二)梁式引线二极管·····	(238)
(三)管芯直接焊接法·····	(238)
(四)陶瓷片封装法·····	(239)
六、偏压电路和隔直流方法·····	(239)
第八章 微带固体控制电路 ·····	(243)
一、概述·····	(243)
二、PIN管·····	(244)
(一)基本原理·····	(244)
(二)PIN管的等效电路·····	(246)
(三)PIN管的参数·····	(248)
三、微带线开关·····	(251)
(一)单刀单掷开关(微波调制器)·····	(251)
(二)单刀双掷开关(微波换接器)·····	(256)
四、微带限幅器和可变衰减器·····	(260)
五、微带二极管数字移相器·····	(263)
(一)概述·····	(263)
(二)开关线移相器·····	(264)
(三)负载线移相器·····	(265)
(四)混合型移相器·····	(268)
(五)高通—低通型移相器·····	(274)
(六)小结·····	(275)
第九章 微带混频器 ·····	(276)
一、概述·····	(276)

二、表面势垒二极管	(276)
(一)基本原理	(276)
(二)等效电路及参量	(279)
(三)表面势垒二极管的结构	(280)
三、表面势垒二极管的噪声温度比和混频电导	(281)
(一)二极管的噪声温度比	(281)
(二)混频电导	(282)
四、二极管混频器	(283)
(一)基本原理	(283)
(二)二极管微带混频器	(286)
(三)镜像回收和镜像抑制	(292)
五、微带混频器的设计和调试	(295)
(一)方案考虑	(295)
(二)混频器微带电路的设计	(296)
(三)混频器电指标的估算	(298)
(四)混频器的性能及其测试	(299)
第十章 微带倍频器	(303)
一、概述	(303)
二、变容管的基本特性	(304)
三、变容管低次倍频器	(306)
(一)基本原理	(306)
(二)设计表格	(308)
四、微带变容管倍频器设计实例	(313)
五、阶跃恢复二极管的基本特性	(319)
六、阶跃管倍频器的工作过程及设计方法	(323)
(一)阶跃管脉冲发生器	(323)
(二)谐振电路	(328)
(三)输出带通滤波器	(330)
(四)偏压电路	(331)
(五)倍频效率	(332)
七、微带阶跃管倍频器的设计实例及调测	(333)
(一)400MHz—2000MHz五倍频器	(333)
(二)1000MHz—5000MHz五倍频器	(337)
八、小结	(339)
第十一章 微带参量放大器	(340)
一、概述	(340)
二、参量放大器的基本原理	(340)
(一)非线性电抗中的能量关系	(340)

(二)参放变容二极管·····	(342)
(三)非简并参放的等效电路·····	(345)
(四)参量放大器的增益·····	(347)
(五)参量放大器的通频带·····	(348)
(六)参放噪声系数·····	(349)
三、微带单回路参放设计·····	(351)
(一)基本设计原则·····	(351)
(二)微带参放电路设计·····	(352)
四、微带宽频带参量放大器·····	(357)
(一)展宽频带的物理概念·····	(357)
(二)宽频带参放电路原理·····	(358)
(三)宽频带参放设计·····	(361)
第十二章 微波晶体管放大器·····	(367)
一、前言·····	(367)
二、微波晶体管小信号等效电路·····	(369)
三、噪声系数·····	(373)
四、 S 参量分析·····	(381)
(一)定义和物理意义·····	(381)
(二)晶体管放大器的增益·····	(384)
(三)晶体管放大器的稳定性·····	(388)
五、小信号微波放大器的设计·····	(396)
(一)单向化设计·····	(396)
(二)绝对稳定情形下的设计·····	(399)
(三)潜在不稳定情形下的设计·····	(400)
六、小 结 ·····	(403)
附录一 微波晶体管小信号等效电路的解·····	(403)
附录二 s 参量与 y 、 h 、 z 参量转换公式·····	(405)
第十三章 微带参量及微带电路的测量·····	(407)
一、微带系统测量的特点·····	(407)
二、微带线的相速和特性阻抗的测量·····	(408)
三、微带线的损耗和微带电路 S 参量的测量·····	(411)
四、微带转换接头插入驻波比的测量·····	(415)
五、微带系统阻抗的测量·····	(418)
六、微带系统的相位测量问题·····	(421)
七、微带不均匀性的测量·····	(425)
(一)微带终端效应的测量·····	(425)
(二)微带弯曲参量的测量·····	(426)
(三)微带线结效应的测量·····	(428)

第十四章 分析微带参量的一些数学方法	(429)
一、绪言	(429)
二、横电磁波 (TEM 波) 的横向分布	(429)
三、用保角变换法求分布电容的一般原理	(431)
四、无厚度空气微带线特性阻抗略解	(435)
五、多角形变换	(439)
六、无厚度空气微带线特性阻抗 Z_0 的严格解	(444)
七、无厚度空气微带线特性阻抗的近似变换解法	(449)
八、有效介电常数	(454)
九、耦合微带线特性阻抗的保角变换解法	(457)
十、格林公式和部分镜象法	(464)
十一、用格林公式求微带线分布电容	(468)
十二、方块导体片的电容	(470)
十三、微带线截断端的等效电容	(473)
十四、微带线间隙的等效电容	(475)
十五、用格林公式求耦合微带线特性阻抗	(476)
附录、雅可必椭圆函数简述	(481)
1) 椭圆积分和全椭圆积分	(481)
2) 雅可必椭圆函数的定义	(482)
3) $E(u)$ 和 $Z(u)$	(482)
4) 转换公式	(483)
5) 函数值的分布	(483)
6) 函数值的曲线和表	(484)

第一章 微带线基础

一 微带线的发展及其应用

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。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

通过生产斗争和科学实验，人们对客观世界的认识不断深化，掌握了越来越多的改造客观世界的武器，因此各种新技术不断涌现。近年来迅速发展的微带线技术即是其中之一。

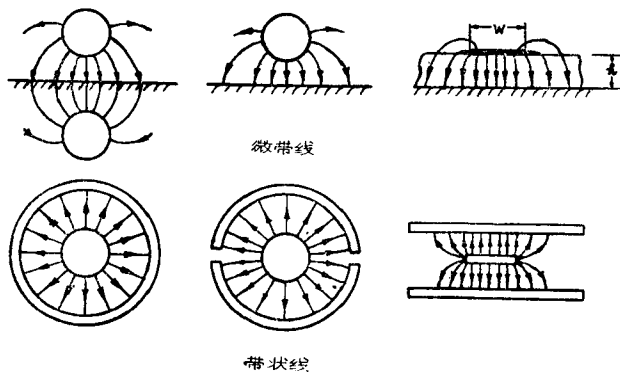
微带线是微波传输线的一种。作为微波传输线，有平行线、同轴线、波导、带状线和微带线等不同形式。它们的发展和演变，都来源于生产实践。最初形式的平行传输线，频率升高就有显著的辐射损耗，不适于作为很高频率（例如分米波、厘米波段）的传输线和电路元件，因此发展成为封闭结构的同轴线和波导，防止了辐射损耗，大大提高了工作性能，把微波技术推进到一个新的水平。但是，矛盾贯穿于一切过程的始终，旧的矛盾解决了，新的矛盾又会产生。同轴线和波导的最大缺点是体积、重量大。这个问题在过去并不突出。但随着空间电子技术（例如空用雷达和其它空用电子设备、卫星通信设备等）的发展，设备的体积和重量成为一个主要矛盾，必须予以解决；即使对一些地面电子设备，减轻体积、重量也成为一个重要问题，例如相控阵雷达，使用了成千上万个微波单元，包括收、发设备和微波电路系统，如仍沿用过去的元件，则整个系统也将很复杂笨重。此外，同轴线和波导作为传输线和电路元件还存在机械加工量大、成本高、调整不易等缺点。总之，为了适应现代无线电技术的发展，微波传输线必须相应地有个大的变革。

为了减轻整个无线电设备的体积和重量，增加其可靠性，首先在低频电路中有了很大发展：由电子管发展到晶体管，进而又发展到集成电路，为整机小型化开辟了道路。这个变革逐渐扩展到微波领域。近十几年来，发展起一大批微波固体器件，它们和电子管相比，体积、重量大为减小。但要真正做到微波整机的小型化，还必须要有电路部分与之配合。六十年代中期以后，将器件和电路结合起来解决小型化问题的微波集成电路发展起来，从而使微波设备的固体化、小型化成为可能，并大大改进了整机的指标。

目前应用的微波集成电路有两种：第一种称为集中参数型集成电路，其特点是电感、电容、电阻等电路元件均为集中参数，尺寸远小于工作波长，借助于蒸发、淀积、光刻等工艺印制在介质基片上，和有源微波固体器件连接后即构成整个微波集成电路。第二种即分布参数型集成电路或微带集成电路（简称微带电路），电路元件由分布参数的微带线构成。它包含按设计图形印制在介质基片一面的导体带条和另一面的金属接地板，图形的尺寸可以和工作波长比拟，和微波固体器件连接后即构成整个微带电路。将两者进行比较：前者的工作频带宽，某些电路元件（如滤波器）特性理想，集成度也较高，但其工艺比较复杂，质量不易保证，并且由于电路元件的精度难于提高，从而使整个电路特性的一致性差；而对微带电路，只要保证精确的印制工艺（这是比较容易做到的），就可得到较高的电路质量，故目前

实际使用的大部分都是这种电路。

微带线可印制在很薄的介质基片上(可以薄到 1mm 以下),故其横截面尺寸比波导、同轴线小得多。其纵向尺寸虽和工作波长可以比拟,但因可采用高介电常数的介质基片,使线上的波长比自由空间波长小了几倍,同样可以减小。此外,整个微带电路元件共用接地板,只须由导体带条构成电路图形,使整个电路的结构大为紧凑。由于上述原因,微带电路较好地解决了小型化问题,与波导、同轴线元件相比,大大地减小了体积、重量。



图(1—1) 微带线和带状线

构成一对传输线。如果把导体柱体变为一带状扁条而敷在介质板的一面,介质板的另一面为接地板,即构成微带线。

图1—1的下部表示带状线的演变过程。一同轴线的外导体对半分开,然后把两半外导体分别向上、下方向展平,把内导体做成扁平带状,即构成带状线。

对比图1—1上、下部分的电力线结构,可知微带线的电力线分布只是左右对称,上下不对称;而带状线则上下、左右都对称。因此微带线有时又称为不对称带状线。

微带线和带状线之所以被提出作为一种新的传输线,主要是由于其下述特点:它们都由带状导体和面积很大的接地板构成,在组成各种微波电路时,可借助于印刷技术,因而使电路的结构和工艺大为简化。

在开始时,尽管对称结构的带状线得到广泛推广,而不对称结构的微带线却未见有很多实际应用,其原因主要在于:微带线的场结构和平行双线一样(相当于半个平行双线)属于半开放性,工作频率提高,将引起显著的辐射损耗;而且这种不对称的场结构除了主要的 TEM 型外,还会激励起其它波型,使工作特性变坏。为了避免上述缺点,可将微带线的横截面尺寸大大缩小,使之远小于波长,即使介质基片的厚度 h ,导体带条的宽度 W 均远小于波长。但这样又导致其导体损耗增大,而使微带传输线的损耗或 Q 值指标远逊于其它传输线。此外还由于当时的工艺水平差,小的尺寸难于保证其精度,又缺少一套较为精确的理论设计方法,因而各种微带电路元件也比较粗糙。这都是微带线最初不如带状线用得广泛的原因。

在六十年代以来,无线电技术对小型化的要求日趋迫切,改变以波导、同轴线为主体的微波系统已成为当务之急;同时在微波固体器件上已产生重大突破,要求有微波传输线与之配合。此时微带线遂登上重要地位,因为它的下述三个主要特点解决了微波电路小型化、集成化中的主要矛盾。

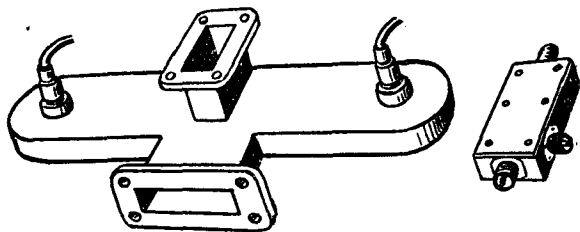
- 1) 可用印刷的方法做成平面电路,电路结构十分紧凑;
- 2) 传输线的尺寸,不仅线的横截面,而且在沿着线的方向,也因采用高介电常数的

介质基片缩短了线上的波长而可大为缩减;

3) 微带线带条的半边是自由空间(在带壮线条两侧和接地板之间, 均有介质填充), 连接微波固体器件十分方便。

微带线的损耗大诚然是一缺点, 但在精心选择介质基片材料, 不断改进工艺的过程中, 已可将其降低。在采用金属镀膜与光刻这一套工艺后, 电路的尺寸精度又大为提高。加以这方面的生产实践推动了有关理论研究工作的进展, 而计算微带线参量的电磁场问题和设计微带电路的网络问题都取得了研究成果后, 反过来也提高了这方面生产实践的水平。微带电路已由研制发展到实际应用, 特别是目前已由小块的单件而发展成大的微波功能块, 如微波固体接收机、微波相控阵单元固体模件等, 可以说是微波技术上的一次大的革新。总括起来, 由微带和微波固体器件组成的微波集成电路, 有下述一些优点:

1) 小型化、轻量化。图(1-2)示出了10cm波段波导平衡混频器和微带平衡混频器的比较, 可以看出明显地减小了尺寸。



图(1-2) 波导和微带平衡混频器的比较

2) 生产成本降低, 生产周期缩短, 这是由于把大量的机械加工变为微带印制工艺的缘故。

3) 提高了可靠性。

4) 提高了性能。

以上3)、4)两点也是由于用印制的平面电路, 代替结构复杂、调节部件繁多的波导与同轴线的立体电路; 同时也是由于采用了高性能的微波固体器件的结果。

目前这种微波集成电路的发展十分迅速, 已成为微波技术的发展方向之一。但是, 我们强调微带电路的优点, 也并非说波导、同轴线将完全被它所代替。微带电路目前还存在着缺点和局限性: 毕竟它的损耗大, Q 值约比同轴线低一个数量级, 比波导几乎低两个数量级, 因此在构成滤波器、谐振腔等一类电路元件时, 性能较差; 在构成整个微波功能块时, 有时其传输线损耗可高达几个 dB , 这在某些应用中也不允许; 由于微带线的尺寸小而不适于传输大功率, 只能应用于中小功率, 如固体接收机等。此外, 要发挥它的可靠性高、性能好等优点, 尚有待于继续改进它的生产工艺。

二、微带线的构成

前面已经讲过, 微带线系由介质基片以及其两边的导体带条和接地板所构成, 而带条图形系用印制技术敷在介质基片上。目前采用的基本构图方法有二: 其一是厚膜技术, 他借助于掩膜在介质基片上烧结以金属材料, 构成微带图形。另一为薄膜技术, 采用真空蒸发或溅射的方法, 在介质基片上淀积成金属薄膜, 再光刻腐蚀成图形, 最后以电镀把带条加厚至4—5个趋肤层深度为止, 以减小导体损耗。两种方法前者比较简便, 成本低, 但质量不如后者, 因为把金属材料烧结于基片之上, 基片表面须比较粗糙, 否则不易附着, 但这样引起损耗增加, 图形精度降低。后者采用真空淀积, 采取适当的工艺, 即使基片表面光洁度很高, 金属材料也能有效附着, 并且真空淀积金属膜的内部金相结构远比烧结膜均匀细致。结果用薄

膜技术所得的微带线，其损耗几乎比用厚膜技术的要低一倍。因此目前采用薄膜技术居多，在国内也不例外。

薄膜技术的主要工艺过程为：

1) 磨片。把介质基片毛坯通过粗磨和精磨几道手续，使其片子厚度、厚度的均匀度、表面光洁度均满足要求。一般采用的瓷(Al_2O_3)基片应保证厚度公差在 $\pm 0.01 - \pm 0.03 \text{ mm}$ 范围之内。表面光洁度在 1μ (微米)以下。

2) 蒸发。把磨好的基片置于真空镀膜机内蒸发金属材料。为使金属材料能牢固地附着于基片，往往先蒸发很薄的一层铬(约几十到几百埃($\text{\AA}$)的厚度， $1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$)作为底金属，因为它和基片比较能牢固附着。然后再在这层铬之上蒸发一层金，厚度约 $1\mu\text{m}$ 左右。做接地板也应先在基片表面淀积一层金属，再衬垫以铜板或铝板以保证电路精度，因此应在基片正反面分别蒸发一层金属，但向基片背面蒸发金属可在正面光刻腐蚀后再进行。

3) 光刻腐蚀。把蒸好金属的基片上涂胶，然后在其上复以电路图形照片的底片，置于紫外光下光刻，再进行腐蚀，此时不感光部分被腐蚀，留下感光部分的图形。

4) 电镀。因为真空镀膜的厚度只有 1μ ，而为了保证电路损耗尽可能小，至少应使膜厚为金属材料趋肤深度的(3—5)倍，在 $X-L$ 波段($3\text{cm}-20\text{cm}$ 波长范围)，对于金，其趋肤深度约在 $0.7\mu-2\mu$ 左右，故通常带条厚度应为 10μ 左右，可以用电镀的方法加厚。带条材料用金居多，因它性能比较稳定，不易氧化，不受酸碱腐蚀，且导电性能亦较优良。但也可以先镀一层铜，再在表面镀一薄层金作为保护，这样可节省贵金属一金的消耗，又能降低电路损耗。

为何不在蒸发过程中一次加厚？主要原因一方面是节省贵金属，以免微带图形以外的很多金属在腐蚀中失去；另外膜厚了使得腐蚀时间加长，当底片的黑白对比度不够时，易产生废品。

对基片材料及电介质材料和淀积的金属材料都应当很好地加以选择，不仅要满足电性能要求，还应满足机械性能、加工性能、对环境的适应能力、低的生产成本等几方面要求。

对于基片材料，要求：

- 1) 较高的介电常数，使电路小型化；
- 2) 低的损耗($\text{tg}\delta$ 小，这里 δ 为材料损耗角)；
- 3) 在给定的频率和温度范围内，介电常数稳定；
- 4) 纯度高，片的性能一致性好；
- 5) 表面光洁度高；
- 6) 击穿强度高；
- 7) 导热性好，以适用于较大的功率；
- 8) 适应环境能力强。

目前应用的几种基片材料特性如表1—1所示：

从表中可见：不同材料各有优劣，也各有其特点，如金红石介电常数特别大而有利于小型化；氧化铍利于导热而能承受较大的功率；石英的表面光洁度高；蓝宝石的各方面综合性能好，但价格太贵。由于全面考虑了这些因素，目前使用最普遍的基片材料是瓷，其成分为 Al_2O_3 ，根据其不同的纯度百分比有96瓷，99瓷等，其中99瓷的性能最好，当前采用也最多。

当工作频率提高到毫米波段，减小尺寸就不是主要矛盾，反之尺寸太小则不易保证电路

表 1-1

基 片 材 料 的 特 性

材 料	项 目	主 要 成 分	介电常数	$\lg \delta$ (10GHz)	热传导率 $W/cm^{\circ}C$	表面光洁度 μ	机械加工度	耐化学性
石 英		SiO_2 99.9%	3.8	10^{-4}	0.01	< 0.1	良	良
瓷		Al_2O_3 96%	8.9	6×10^{-4}	0.35	< 2	不 能	良
		Al_2O_3 99.6%	9.5-9.6	2×10^{-4}	0.4	< 1	不 能	良
蓝 宝 石		Al_2O_3 100%	11	10^{-4}	0.4	< 0.1	不 能	良
氧 化 铍		BeO 95-99%	6	10^{-4}	2.5	< 2	差	良
金 红 石		TiO_2	100	4×10^{-4}	0.02	< 2	不 能	良
玻 璃			5	4×10^{-3}	0.01	良	不 能	差

的精度；而此时由于导体趋肤深度的减小，更要求基片表面光洁度高（因为淀积金属的表面光洁度取决于基片表面光洁度），在此种情况下，较多采用介电常数较低、而表面光洁度很高的石英。至于其它材料则只在特殊情况下使用。

对于金属材料，应有下列要求：

- 1) 高的导电率；
- 2) 低的电阻温度系数；
- 3) 对基片的附着性能好；
- 4) 好的刻蚀性和可焊接性；
- 5) 易于淀积和电镀。

常用的金属材料特性如表1-2所示。

表 1-2

各 种 金 属 材 料 的 特 性

材 料	电 阻 率 $\Omega \cdot cm$	趋肤深度 μ (在2000 MHz)	表面电阻率 $\Omega/cm^2 \times 10^{-7} \sqrt{f}$	热膨胀系数 $10^{-6}/^{\circ}C$	对基片的附着性
银	1.59×10^{-6}	1.4	2.5	21	差
铜	1.67×10^{-6}	1.5	2.6	18	很 差
金	2.35×10^{-6}	1.7	3.0	15	很 差
钼	2.65×10^{-6}	1.9	3.3	25	很 差
钨	5.34×10^{-6}	2.6	4.7	4.6	好
钼	5.5×10^{-6}	2.7	4.7	6.0	好
铬	12.7×10^{-6}	2.7	4.7	9.0	好
钽	15.2×10^{-6}	4.0	7.2	6.6	很 好

由表可知，导电性能较好的金属，如铜、银、金等附着性能很差；反之，导电性能差的钨、铬、钽等的附着性能却很良好。为此，在基片上淀积导电性能良好的金属之前，可以先蒸一薄层的钨、钼等金属作为媒介，再把导电良好的金属附着于媒介金属上，此时，媒介金属虽然导电率差，但因其蒸发厚度只有几十——几百埃的数量级，比其趋肤深度要小得多，因此电流的分布，可以完全穿透此薄层，而主要分布在导电良好的主金属上，故对微带线损耗的影响极微。

除了以薄膜技术在介质基片上形成电路图形以外，也有一部分微带电路仿照低频印刷板

的方法，在一敷铜箔的介质板上，按照电路照相底片的图形，将不需要的铜箔进行腐蚀而除去，留下部分即构成微带电路。介质板通常采用充填纤维的聚四氟乙烯（ $\epsilon_r \approx 2.55 \sim 2.6$ ），或环氧玻璃纤维板（ $\epsilon_r \approx 3 \sim 5$ ），它们的 $tg\delta$ 较小，介电常数较低。如取较大的板厚，则电路图形也比较大，其尺寸的精度就较易得到保证。其功率容量、损耗等参数均较小尺寸的瓷基片薄膜电路为优，并且介质基片的加工性能与铜箔的机械强度也比较好。因此，在对电路小型化的要求不高的场合，也可用上述敷铜箔的介质板来构成微带电路。

三、微带线的特性阻抗和相速

特性阻抗和相速是任何微波传输线的最主要两个参量。前者与阻抗匹配有关，后者决定传输线电长度和其几何长度的关系*。研究微带线的各种特性，首先是从这两个参量出发。

必须指出：传输线的特性阻抗及相速，均系对一定的波型而言。例如对同轴线，一般指 TEM 型（即横电磁波）；对于一般矩形波导，通常指 H_{10} 型，其它的波型称为杂型或高次型，应设法加以抑制。微带线虽系由平行双线演变而来，但因导体之间夹入了介质基片，使情况复杂化。用电磁场原理可以证明：这时微带线传输的电磁波不是纯粹的横电磁波，而会出现各种杂型波。但如尽量缩小微带横截面尺寸，使带条宽度 W 和基片高度 h 均远小于 $\frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_r}}$ （其中 λ 为工作波长， ϵ_r 为基片材料对真空的相对介电常数），则杂型波极小，可以近似地看成为 TEM 波。由于它和同轴线均匀介质中的 TEM 波略有差别，故称为准 TEM 波，但可近似地认为其横截面电力线分布大致如图（1-1）所示。

对于 TEM 波，根据长线方程，传输线的特性阻抗 Z_0 和相速 v_φ 分别为：

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1-1)$$

$$v_\varphi = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (1-2)$$

其中 L_0 和 C_0 分别为传输线的分布电感和分布电容。特性阻抗为传输线上行波电压和行波电流，或入射波电压对入射波电流之比；相速则表示电磁波在传输线上的行进速度。由于波的速度系以等相位点向前移动的速度表示，故又称为相速。当传输线的分布电感与分布电容求得后，即可根据上式分别求出 Z_0 和 v_φ 。

根据 TEM 波的特性，其横截面上某一瞬间电场和磁场的分布和该传输线无限长、无限均匀时的静电场与静磁场分布完全一致，故 C_0 和 L_0 可分别按静电场和恒定电流磁场来计算。

由（1-1）式和（1-2）式，得：

$$Z_0 = \frac{1}{v_\varphi C_0} \quad (1-3)$$

即已知分布电容和相速后，也可直接求得线的特性阻抗。

当传输线全部处在空气或真空中时， $v_\varphi = c = 3 \times 10^8$ 米/秒。当传输线全部处于相对介电常数为 ϵ_r 的介质中时，则 $v_\varphi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ 。微带线的部分电场在介质中，部分在空气中，空气和介

*在微带电路中，电长度均以微带线上的波长 λ_g 计，而 $\lambda_g = \frac{v_\varphi}{f}$ ，其中 v_φ 为微带线相速， f 为工作频率，微带电路中各部分几何尺寸的确定均以 λ_g 为标准。