

# 微波集成电路

国防工业出版社

73.7556

703

02

# 微波集成电路

微波集成电路编译组 译

2K520/23

国防工业出版社

1972

**微波集成电路**

微波集成电路编译组 译

\*

**国防工业出版社** 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787 × 1092  $\frac{1}{32}$  印张 6  $\frac{11}{16}$  140 千字

1972年1月第一版 1972年1月第一次印刷

统一书号：15034·1246 定价：0.60元

02760

# 目 录

第一章 总论 .....	5
第二章 微波集成电路的构成要素和基础技术 .....	11
2.1 带状线 .....	11
2.2 电路元件 .....	19
2.3 半导体元件 .....	29
2.4 薄膜技术 .....	45
2.5 构成技术 .....	56
2.6 铁氧体元件 .....	65
2.7 基片 .....	72
2.8 甘氏二极管及IMPATT二极管的高效率工作 .....	80
2.9 介质表面负载的砷化镓体器件 .....	87
第三章 微波集成电路的设计和特性 .....	94
3.1 晶体管放大电路 .....	94
3.2 隧道二极管放大电路 .....	101
3.3 振荡电路 .....	110
3.4 变抗倍增·变换电路 .....	119
3.5 接收混频 .....	129
3.6 控制电路 .....	134
3.7 同步输入放大电路 .....	141
3.8 半导体行波放大器 .....	148
3.9 分布式放大变换电路 .....	154
3.10 带状线的设计方法 .....	160
3.11 平面电路 .....	168
3.12 由多带带状线构成的无源电路 .....	174
第四章 微波集成电路的应用和展望 .....	182
4.1 超多路通信 .....	182
4.2 高速逻辑电路 .....	187
4.3 电波应用 .....	197

## 毛主席语录

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。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

## 毛主席语录

外国有的，我们要有的，外国没有的，  
我们也要有的。

对于外国文化，排外主义的方针是  
错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，  
以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用  
的方针也是错误的，应当以中国人民的  
实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

## 译者说明

遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们翻译出版了这本《微波集成电路》，仅供读者了解国外微波集成电路发展概况时参考。

本书是从日本《电子通信学会杂志》1969年第11期翻译过来的。由于原文的作者是站在资产阶级的立场上，从争夺市场和追逐利润的观点出发来对待微波集成电路技术的发展，同时在对待解决技术问题上多吹嘘或强调困难的一面等等。我们对其中所散布的资产阶级毒素和反动观点尽可能作了删节。但为了照顾文章的完整性和系统性，在出版时基本上保留了原文的章节内容。希望读者在参阅时，遵照伟大领袖毛主席关于“对于外国文化，……应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化”的教导，对本书内容应批判地吸收。

由于译者水平所限，错误之处在所难免，欢迎批评指正。

09740

# 目 录

第一章 总论 .....	5
第二章 微波集成电路的构成要素和基础技术 .....	11
2.1 带状线 .....	11
2.2 电路元件 .....	19
2.3 半导体元件 .....	29
2.4 薄膜技术 .....	45
2.5 构成技术 .....	56
2.6 铁氧体元件 .....	65
2.7 基片 .....	72
2.8 甘氏二极管及IMPATT二极管的高效率工作 .....	80
2.9 介质表面负载的砷化镓体器件 .....	87
第三章 微波集成电路的设计和特性 .....	94
3.1 晶体管放大电路 .....	94
3.2 隧道二极管放大电路 .....	101
3.3 振荡电路 .....	110
3.4 变抗倍增·变换电路 .....	119
3.5 接收混频 .....	129
3.6 控制电路 .....	134
3.7 同步输入放大电路 .....	141
3.8 半导体行波放大器 .....	148
3.9 分布式放大变换电路 .....	154
3.10 带状线的设计方法 .....	160
3.11 平面电路 .....	168
3.12 由多带带状线构成的无源电路 .....	174
第四章 微波集成电路的应用和展望 .....	182
4.1 超多路通信 .....	182
4.2 高速逻辑电路 .....	187
4.3 电波应用 .....	197



# 第一章 总 论

## 一、前言

第二次世界大战后的十几年间，微波技术无论在研究方面和实用方面都展现出一片灿烂的黄金时代，而在以后十年左右中就处于暂时的停滞状态。当然在最近的十年间，在微波领域里也发表了不少的有价值的研究成果，并且开辟了新的应用领域。可是就全面来看，微波技术要达到大体上成熟的程度，并且划时期地开辟新的实用领域，看来经济方面的困难还有很多。然而作者们据此意见预测到在不久的将来，将要出现微波技术的第二次黄金时代。可以看出，这一黄金时代的萌芽正在不断地发育壮大，因为我们所预测的时代是可以比较经济地使用小型、轻量、耗能少、可靠性高的微波机器的时代。作为使这样时代实现的一个手段，我想可以寄托于微波集成电路的进步。

## 二、微波电路的由来

在微波技术发展的初期，由于甚高频（VHF）波段技术的进展，对特高频（UHF）波段，超高频（SHF）波段的研究工作都投入了力量，可是由于波导和立体电路的出现以及把这两方面技术巧妙地结合起来的微波真空管的发展，一举跨进超高频（SHF）波段的实用阶段，至此以波导和立体电路为主体的微波电路技术大体上确立起来了。然而由于扩展频带和小型轻量化等方面的要求，按其用途多半逐渐转

到使用同轴线方面去了。并且带状线也开始被应用。伴随制造技术的进一步发展，在低频领域里多趋向于用集中参数电路，这些倾向正在逐渐地向高频方面发展。

其次，由于晶体管、晶体二极管等微波半导体元件开始被广泛使用，这些元件的阻抗比真空管低，所以连接这些元件的无源网路也是阻抗低的带状线和膜构造集中参数电路等，比阻抗高的立体电路更为方便。

### 三、微波集成电路简介

微波集成电路和一般集成电路一样，有半导体集成电路和混合集成电路两种形式，前一种是把有源元件和无源回路做在一个半导体基片上而形成的集成电路，后一种是无源网路做在陶瓷、石英、蓝宝石或者是铁氧体等电介质基板上，把晶体管等有源元件装配在上边而成的集成电路。

关于微波半导体集成电路，虽然也发表了几篇很有兴趣的成果，可是从广泛的实用方面来看，技术方面的难关还是不少的，目前微波集成电路的重点可能仍处于混合集成电路状态。但是由于甚高频（VHF）波段半导体集成电路技术的进步，半导体集成电路技术将逐渐地被采用于超高频（SHF）领域方面。另外毫米波段，由于用GaAs单晶（后面将谈到）基片反倒有可能集成化，元件间的连接又不产生损耗，使半导体集成电路的利用有了可能性。

一般来说，虽然在微波集成电路上采用集中参数电路，还有带状线当作无源电路元件，可是如果和立体电路相比，电路损耗增大了，谐振回路的 $Q$ 值降低了。特别是在半导体集成电路方面，基片上要做上有源元件，所以可以用来制作基片的材料就受到了限制。现在大量利用着的是硅基片，这

种情况下由于介质损耗大，因此电路特性显著地下降，尽管相互连接元件的导线对这种回路的损耗在可允许的范围内，但是组成一个谐振电路，无论是集中参数电路的情况还是带状线的情况，多半都达到不能允许的程度。

然而，如果频率非常高，导体损耗比电介质损耗加大，并且若把高电阻率的 GaAs ( $10^6$  欧姆·厘米以上) 的单晶作成基片，则电介质损耗相比于硅 (Si) 基片回路显著减少。因此采用前述的 GaAs 单晶基片的毫米波段半导体集成电路当然是要引起人们的重视。

在混合集成电路方面，可以作无源回路基片的材料很容易选取。如果考虑到微波集成电路方面的特点，则要求基片具有：介电质损失少、有适当的介电常数，其介电常数不能由于频率和温度影响变化过大、导热率大、绝缘电阻大、表面光滑、化学性能要稳定、机械性能要强等各种特点。考虑到这些条件，使用涂釉氧化铝和合成蓝宝石等材料，可以得到大体上实用的电路特性。有时把有铁氧体元件的电路，作为混合集成电路的一个组成部分。这种情况下，可利用把铁氧体板装在介电质基片上的形式，把介电质损耗少的铁磁性材料钇铁石榴石 (YIG) 用来作微波集成电路介电质基片，正在利用这一点试做将非倒向电路和倒向电路装在一块基片上工作。

由于晶体三极管和晶体二极管等微波半导体元件的发展，它们可以取代真空管进行微波振荡放大等。使用集成电路，可以做到把微波振荡、放大、混频、倍频等电路组合成一体。特别是由于 IMPATT 二极管和所谓的甘氏二极管的研究，使振荡回路的集成化更容易实现了。其次，由于肖特

晶体管二极管的进步促进了接收机混频电路的一体化。

#### 四、微波集成电路的问题

一般来说，集成电路具有下述几个特点：1) 进一步降低价格；2) 提高可靠性；3) 便于应用；4) 提高性能；5) 小型化、轻量化。关于降低成本不仅仅是考虑元件的价格和装配生产等方面的生产费用问题，由于使用过程中的故障和电力消耗而用去的维修使用费，也应该考虑进去。而小型化、轻量化也就是便于应用，它又是提高性能，以上各项都是互相关连的，本节就以上几点大致地探讨一下微波集成电路存在的问题。

原来的微波机器，大多是使用频带宽，以传递处理多量情报为目的的机器，因此即便一部机器价格很贵，而每个情报量的价格并不太高，所以即便生产成本高，一般也是容许的。另外它同低频机器相比，技术方面困难也多。前种机器大量使用的不多，同一个电路多数使用的情况也不多，由于不可能成批生产，所以通常存在着提高产量的问题。对于这样的微波机器采用集成电路，期望由于集成电路的批量生产（这是集成电路的特点之一）来降低生产成本这是不容易实现的。所以，很难通过微波回路的集成化来实现降低成本目的。然而如果着眼于经济方面，还应该从未来对微波机器的需求情况来考虑微波集成电路的前途问题。

其次，谈一谈可靠性问题，以前微波机器上所用的立体电路那是一种极其稳定，可靠性很高的电路。

如前所述，在微波技术发展的初期，由于引入立体电路，开始出现了微波技术划时代的普及，当时在微波频段方面曾在实验室里获得了优异的成果，一旦拿来实用，就显得稳定性

差,可靠性不够。可是由于立体电路的发展,在高频方面,可以使用比较大尺寸的电路元件,制造稳定的可靠性好的机器才有了可能,当然后来由于技术的进步,在今天已经可以用尺寸小的集中参数电路和带状线制造出相当稳定的电路。然而由于利用了集成电路,其电路尺寸比之立体电路要小得多,所以在制造时尺寸方面的精度要求是不言而喻的。在介电质或者半导体基片上形成导体,如果我们考虑到由于温度上升,导体尺寸的变化以及时效变化,要想制作出不亚于立体电路的稳定集成电路,就必须作出特别的努力,这一点是显而易见的。

虽然如此,由于微波集成电路中有关的有源元件都制造在集成电路中,生产过程自动化和以前的微波真空管和半导体元件相比较,元件本身的可靠性提高了,同时由于各元件间的连接部分减少了,由连接部分而引起的故障减少了,就全体来说,我们可以期望,它的可靠性增高。

再次,谈一谈使用方面的问题,一般来说,在集成电路中几乎都没有调整部件,发生故障也不可能进行局部的修理工作,只能把全体换掉,所以我们可以预想,采用微波集成电路的机器将是一种外行人也可以操作的便于应用的机器。原来的微波电路,制造以后要进行调整的工作还很多,调整点过于少的机器不能够发挥其最高的性能,将来的方向,采用计算机的方法,进行电路参数的严密计算,造出没有调整点的电路来。在目前的技术水平下,实现无调整电路,困难还是很多的,所以为了微波电路集成化,就要做各种各样的努力探索,引入电子可调铁氧体或者采用平衡式之类的特殊电路补偿元件的不平衡。

由于做成集成电路,有源元件和无源电路成为一体,连

接部分减少了，所以有可能提高电路的高频特性和使频带加宽。这样一来，在老的立体电路不能充分发挥性能的高频方面，由于采用了集成电路，才有了发挥其良好性能的先例。但是应该考虑到，由于其电路损耗比立体电路大，所以仍有使性能劣化的危险。

最后，谈一谈微波集成电路带来了小型轻量化。这是一个显而易见的問題。此外，和电子管的微波电路相比耗能少，电源电压低也是其特征之一。这个問題对于微波的特殊用途是不可缺少的。例如对于卫星上用的微波机器来说，这个性能是不可少的。还有今后需要研究低功率的民用微波机器（如直接接收从卫星上发来信号的电视机）的时候。微波集成电路可以充分发挥这方面的优点。

现在的微波半导体元件有一个缺点，就是比电子管输出功率小，可是根据用途情况，利用多个半导体元件的办法，有可能克服这个缺点。有可能是多个 IMPATT 二极管和甘氏二极管之类并联使用。还有如相控阵雷达那样，将多个半导体元件和天线串连，利用控制各个元件相位的办法，实现功率的合成和天线方向性的控制。并且出现了元件故障率增大而整个系统的可靠性却提高了的实例。

## 五、结束语

关于微波集成电路，大概的谈了现在的情况，谈的是个人的看法。有关每个电路细节請参看以下各章。

在微波集成电路方面，困难的問題仍然很多，解决了这些困难一定将开辟出无限广阔的前途。微波集成电路的发展快慢，当然要由今后的需求情况而定。决定今后需求的关键又是微波集成电路技术的发展情况。

## 第二章 微波集成电路的构成要素和 基础技术

### 2.1 带状线

#### 一、前言

微波频段的有源元件几乎都是采用微小半导体片作成的二端或三端元件，这些都是可按集中参数处理的元件。而对于无源元件，随着形状的微小型化，制作精度下降，导体损耗增加，因而也采用分布参数的电路。试行作微波电路集成化时，在集中参数的有源元件与无源元件的连接上，或者在无源分布参数电路的构成上，采用带状线电路，这是因为在连接处所引入的杂散电抗小，在超高频（SHF）频段以下的易与半导体元件匹配的微小型电路比较容易制作的原故。

关于微波带状线性质的概述在日本电子通信学会杂志1969年9~10两期已介绍过本文就与微波集成电路关系较密切的各种遗留问题进行说明。

#### 二、带状线的特性

图1是较容易理解其性质的带状线断面图，图1(a)表示利用均匀介质的带状线基本结构，如图所示的单一中心导体的情况，以及有两个以上中心导体的耦合线路，对这些线路的性质是众所周知的了。

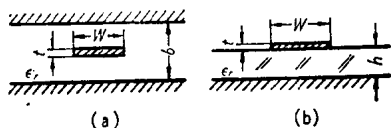


图1 带状线的基本构造

图 1 (b) 表示所谓微带的构造, 这是利用非均匀介质的基本的线路结构。

图 2 是表示在微波集成电路中所采用的陶瓷基片线路, 对特定的线路结构参量做了分析。见图 2, 对  $g = 120$  密耳,  $d = 24$  密耳,  $\epsilon_r = 8.0$  (氧化铝, 陶瓷)。利用缓和法进行数值解析的结果。

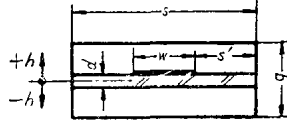


图 2 带状线电路构造的一例

表 1 结构参数对于图 2  $Z_0, v/v_0$  的影响

标准  $\epsilon_r = 8.0$ ,  $g = 120$  密耳,  $d = 24$  密耳,  $s' \geq 2g$

$w$	密耳	72	120	192	
$Z_0$	欧	63.5	48.5	36.0	
$v/v_0$	—	0.811	0.773	0.734	
$\Delta\epsilon_r$	$\frac{\Delta Z_0}{Z_0} / \frac{\Delta\epsilon_r}{\epsilon_r}$	—	—	0.15	
	$\frac{\Delta v}{v_0} / \frac{\Delta\epsilon_r}{\epsilon_r}$	—	—	0.14	
$\Delta g$	$\Delta Z_0 / \Delta g$	欧/密耳	0.38	0.31	0.27
	$\frac{\Delta v}{v_0} \Delta g$	/密耳	可以忽略		
$h$	$Z_{0\max}$	欧	$h = -6$ 密耳时 $Z_0 = Z_{0\max}$		
			64.0	49.0	36.5
	$\frac{\Delta v}{v_0} / h$	/密耳	0.0017	0.0021	0.0023
$\Delta d$	$\Delta Z_0 / \Delta d$	欧/密耳	0.39	0.32	0.19
	$\frac{\Delta v}{v_0} / \Delta d$	/密耳	0.0046	0.0051	0.0043



当  $s' = 1.5W$  时, 屏蔽侧壁的影响可以忽略, 特性阻抗  $Z_0$ , 相速  $v/v_0$  ( $v_0$ 、 $v$  分别是真空中的光速和线路的传输速度) 与  $W$  的关系如图3所示。还有线路的各种结构参数对于线路的  $Z_0$ ,  $v/v_0$  的影响, 可得出表1的结果。

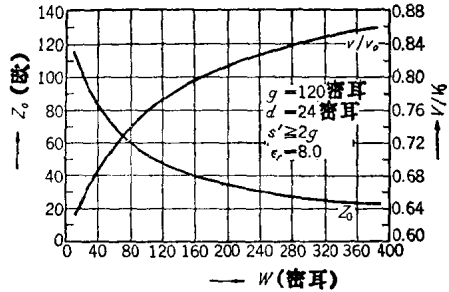


图3 图2的线路的特性阻抗和相速

### 三、带状线结构的高次模

由于带状线所使用的传输模是交直流都能够传输的基本模(近似于TEM模), 所以, 具有有限截止波长的传输模, 就成为不需要的高次模。不需要的传输模不仅限于与在输入输出端或电路中的阻抗元件进行直接耦合, 还往往形成具有高Q的副谐振电路, 在谐振频率上将引起电路传输特性的显著恶化(例如大的衰耗和相位旋转及间隙辐射等), 因此高次模的产生和传输必须尽力防止。

在图1(a)结构的线路中, 必须注意图4(a)、(b)电场分布的高次模。图4(a)是屏蔽导体内波导管的传输模, 它类似于矩形波导管  $TE_{10}$  模的电场分布。这是由于中心导体的位置偏移和联接的集中参数元件所激励的。屏蔽导体的等宽度如果取为

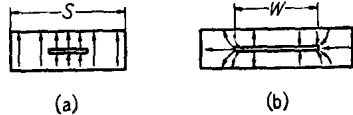


图4 带状线的高次模

$S$ , 截止波长为  $\lambda_c = 2S$ , 截止频率则  $f_c = 3 \times 10^8$  (米/秒) /  $(\sqrt{\epsilon_r} \lambda_c)$ 。图4(b)是表示以高于中心导体的横方向的谐