



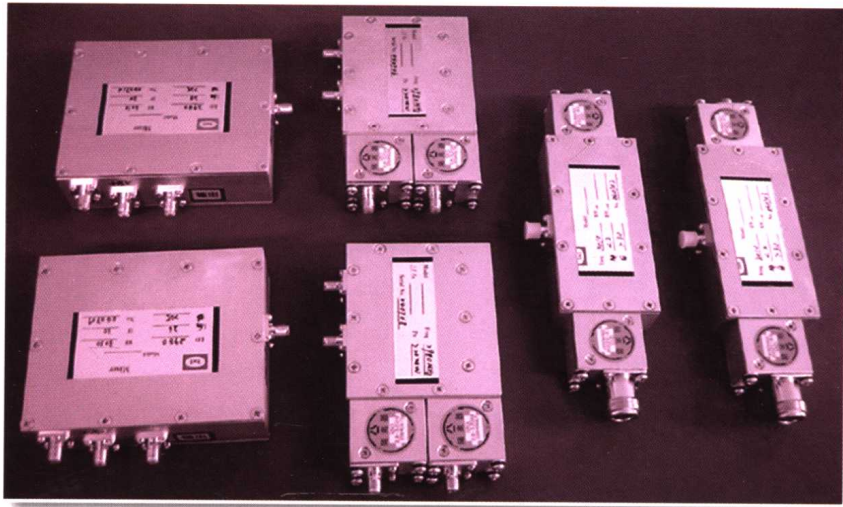
应用电子  
Application Electronics

微电子技术系列丛书

# 射频和微波 混合电路

## ——基础、材料和工艺

RF/MICROWAVE HYBRIDS: Basics, Materials and Processes



[美] Richard Brown 著 孙海等译 王瑞庭 审校



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

微电子技术系列丛书

RF/MICROWAVE HYBRIDS:  
Basics, Materials and Processes

# 射频和微波混合电路

## ——基础、材料和工艺

[美] Richard Brown 著  
孙海 等译  
王瑞庭 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

近年来,无线通信、汽车电子和国防电子的发展使电子行业对高频系统的需求快速增长。与单片微波集成电路(MMIC)的持续发展相呼应,混合微波集成电路(HMIC)的新材料和新工艺也有了很大发展。本书首先对射频微波的基本概念作了简要介绍,比较了单片微波集成电路和混合微波集成电路的特点,讲述了作为射频微波基础元件的传输线和混合电路工艺的“波导”结构;然后从射频微波应用的角度对基础材料(导体、介质和基片)及其性能进行了讨论,包括它们对于阻抗、电路高频性能的影响;最后探讨了混合微波集成电路的各种适用工艺。

本书适合从事混合微波集成电路(HMIC)研发的设计工程师、工艺工程师和材料工程师阅读,也适合作为高等学校电子工程、微电子和微波工程专业高年级大学生和研究生的教学参考书。

Translation from the English language edition:

RF/Microwave Hybrids-Basics, Materials and Processes By Richard Brown.

Copyright©2003 byKluwer Academic Publishers ,Boston/Dordrecht/London

Kluwer Academic Publishers,Boston/Dordrecht/London is a part of Springer Science + Business Media

All rights Reserved

本书中文简体专有翻译出版版权由美国 Kluwer Academic Publishers 授予电子工业出版社。该专有出版版权受法律保护。

版权贸易合同登记号:图字:01-2006-5238

### 图书在版编目(CIP)数据

射频和微波混合电路:基础、材料和工艺/(美)布朗(Brown,R.)著;孙海等译. —北京:电子工业出版社,2006.11

(微电子技术系列丛书)

书名原文:RF/Microwave Hybrids:Basics,Materials and Processes

ISBN 7-121-03357-7

I. 射... II. ①布... ②孙... III. ①射频电路 ②微波电路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 127938 号

责任编辑:刘海艳

印 刷:北京智力达印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×980 1/16 印张:20.25 字数:341.5 千字

印 次:2006 年 11 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:42.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

## 译者序

随着单片半导体集成电路技术的突飞猛进,微电子封装和互连领域正在发生着革命性的进步和变化。混合集成电路作为一种高可靠、高性能、高集成度的互连封装形式,正在越来越受到人们的重视,应用日益广泛。

从应用的角度看,混合集成电路有三个发展方向:高频电路、大功率电路和高精度电路。从工艺技术的角度讲,将向着实现系统级集成的多芯片模块的方向发展。

本书名为《射频和微波混合电路——基础、材料和工艺》。顾名思义,本书侧重的是用混合电路技术制作射频微波电路时,特别值得注意的材料问题和工艺问题。虽然如原作者所述,本书是想用混合电路技术制作射频和微波模块的人员的入门性读物。但是,读者可以发现,作者对有些工艺描写得十分详尽,实用价值很高。

通过本书的推出,我们希望会对国内的混合集成电路行业在射频微波产品开发方面有所帮助。

译者在翻译的过程中,发现本书英文原版录入和编辑的错误较多,在译者能够发现的限度内,已经做出了更正。人非圣贤,谁都可能犯错误。所以我们建议读者阅读时多加思考,取其精华,去其糟粕。另外,考虑到工程技术人员的习惯及与原书一致,很多单位与现行标准不一致而未予以改动。

本书的翻译是合作的成果。孙海同志翻译了第1、2、3、4、5、14、15、16和17章,郭继华同志翻译了第6、7、8、9和10章,曹易同志翻译了第11、12、13章和附录。全书译稿完成后,由王瑞庭同志进行了全面认真的审校。

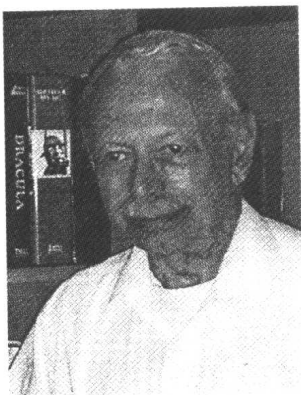
译者对电子工业出版社的领导和编辑们对本译著出版的支持表示感谢。

由于译者专业水平有限,难免存在错误,欢迎读者批评指正。

译者:孙海 郭继华 曹易

2006年7月10日于北京

## 作者简介



理查德·布朗(Richard Brown)是美国的混合电路技术和工程咨询专家,在薄厚膜、电镀和基板技术方面有 30 多年工作经验。他最初在贝尔电话实验室参加工作。1968 年加入美国无线电公司(RCA)固体电路部以后,于 1979 年转入位于普林斯顿的 RCA 微波技术中心。1991 年,布朗先生任 Alcoa 电子封装技术团队的项目经理,负责在多芯片模块(MCM)的高温共烧陶瓷表面制作薄膜。他著述颇多,曾为 1998 年 McGraw-Hill 出版社出版的《薄膜技术手册》撰写了“薄膜微波混合电路”一章。1995 年,国际混合微电子学会(ISHM)授予他盛誉——John A. Wagon, Jr. 技术成就奖。他开设了有关《射频和微波混合电路——基础、材料和工艺》的一日课程。1991 年他的文章《微波混合电路的材料和工艺》被设在弗吉尼亚州 Reston 的国际混合微电子学会(ISHM)发表。2002 年, Kluwer 教育出版社出版了本书《射频和微波混合电路——基础、材料和工艺》。

理查德·布朗先生的联系方法是:

Richard Brown Associates, Inc.

PO Box 2286

Shelton, CT 06484, USA

Voice: 1 203 925-1065

E-mail: rbrown-consult@att.net

谨以本书献给：

**朱迪 (Judy)**

**Richard Brown**

## 致 谢

本书实际上是许多人贡献的结晶。虽然无法逐一承认每一个人做出的劝告和建议,然而,行业内的许多同事都无私地奉献他们的时间为本书的各专题做出了贡献。特别的感谢要给予 Kluwer 出版社的编辑们,感谢他们敬业和耐心。我还要感谢许多供应商,他们给我寄送产品目录并回答了我许多问题。这里我要对那些允许我在本书中使用他们的材料和图表的人表示感激。为此,对某些商业材料、设备和工艺在本书中说明了出处。它们的使用并不意味着本作者对其认可或推崇,同时也没有暗示或表达任何提到的材料、设备或工艺对相应的目的是最好的或是最适合的。

如果任何人被忽略,请原谅我不是故意的。作者愿意对所有的差错和疏漏承担全部责任。

Richard Brown

# 原著序言

1991年本作者基于在国际混合微电子学学会(ISHM)(现在更名为国际微电子和封装学会,IMAPS)学术年会上讲授微波混合电路材料和工艺技术的经验发表了一篇专题文章<sup>[1]</sup>。从那时起,本课程在该会议的平台上和许多工业部门和政府部门的现场多次讲授。为此,本课程的内容在不断地修订,以便反映材料和工艺领域里的许多进步和变化。

微波技术已经存在差不多 175 年了,但只是在第二次世界大战前发明了速调管之后,微波设计和制造才从几个幻想家的奇想变成我们今天看到的工业成长。仅就上个十年来讲,发生了各种高频电路爆炸性的应用浪潮,领域囊括军事、汽车、无线通信、计算机、电信和医疗行业。这些变化带来了对相关设计、材料、工艺和设备的强烈需求(这在十几年前是不可想像的),以便满足高可靠、小型化、高速和低成本的电路日益增长的要求。

微波电子电路是用单片微波集成电路(MMIC)或混合微波集成电路(HMIC)实现的。特别是计算机和无线通信行业的快速成长促进了这两种电路的批量生产。300 mm 硅(Si)和砷化镓(GaAs)圆片的批量制造正在展开。此外,人们正在努力使 Si 和 GaAs 完美化,制造无缺陷晶体,这促使了产品更高的性能水平。混合电路工艺师也做出回应,与 MMIC 的努力保持同步。过去的十年见证了许多领域的革命性进展,导致了各种新材料和新工艺的出现。其中包括用于可光刻厚膜浆料和光敏的厚膜浆料的新的粉末技术,使我们能够用厚膜制作以前只能用薄膜工艺制作的高频产品。具有改善的应用性能和敏感度的新一代液态、干膜的和电泳的光刻胶已经出现在市场上。用于先进的封装和互连的新的有机复合机板、有机包封胶、通孔技术、平面的和内埋的无源元件和技术(低温共烧和多芯片模块)正在付诸使用,使我们有可能充分地发挥单片技术进步的优势。

编写本书的目的是使技术经理、工程师和技术员(不管是富有经验的人员



还是刚入门的新手)熟悉制造高频电路所用的材料和工艺的能力和限制。它本质上是一本入门读物。可能的地方,公式尽量简化并保持最少。不幸的是,本书内测量单位和符号缺乏一致性。原因是我复制了许多其他作者出版的插图和表格,又总想尽量保持原貌,造成了这种情况。对此,本书的单位转换表(附录 B)或许会有些帮助。

本书一开始介绍了混合电路技术和基本的高频电路原理,接着讨论了主要形式的传输波导,然后考虑了电流流动和损耗方面的问题。随后的章节讨论了基板、厚薄膜沉积、聚合物、原图、掩模、光刻、减法工艺、加法工艺、半加法工艺、电镀、化学镀以及刻蚀。最后在工艺要求的限度内处理了无源元件和传输线元件。有了这个知识背景,本书转向工艺和材料对无源元件和传输线元件的影响。封装的讨论重点放在其电感效应上。本书还简要地介绍了超导元件的材料和工艺。

1. R. Brown. *Materials and Processes for Microwave Hybrids*. International Microelectronics and Packaging Society. ISHM, Reston, VA., (1991)

Richard Brown

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可,复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为;歪曲、篡改、剽窃本作品的行为,均违反《中华人民共和国著作权法》,其行为人应承担相应的民事责任和行政责任,构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序,保护权利人的合法权益,我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为,本社将奖励举报有功人员,并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话:(010)88254396;(010)88258888

传 真:(010)88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址:北京市万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编:100036

# 目 录

第 1 章 混合微波集成电路与单片微波集成电路 .....	1
参考文献 .....	5
第 2 章 基本概念 .....	6
2.1 引言 .....	6
2.2 麦克斯韦定律 .....	7
2.3 介电常数与磁导率 .....	8
2.4 自由空间波长 .....	9
2.5 传播速度 .....	11
2.6 分贝(dB) .....	11
2.7 Q 值测量 .....	12
2.8 小信号(S 参数) .....	13
参考文献 .....	14
第 3 章 平面波导 .....	15
3.1 阻抗 .....	15
3.2 微带 .....	17
3.2.1 波导波长( $\lambda_g$ ) .....	20
3.3 共面波导 .....	23
3.4 带状线 .....	27
参考文献 .....	29
第 4 章 电流及损耗 .....	30
4.1 介质损耗 .....	30
4.1.1 $\tan\delta$ .....	31
4.1.2 各向异性 .....	32
4.2 导体损耗 .....	36

4.2.1	波导波长损耗 .....	37
4.2.2	衰减 .....	37
4.2.3	回波损耗 .....	39
4.2.4	电压驻波比(VSWR) .....	40
4.2.5	趋肤深度 .....	41
4.2.6	附着层 .....	48
4.2.7	表面粗糙度 .....	52
	参考文献 .....	56
<b>第 5 章</b>	<b>基片</b> .....	<b>58</b>
5.1	玻璃 .....	59
5.2	单晶 .....	60
5.3	多晶陶瓷 .....	61
5.3.1	制造 .....	61
5.3.2	基片的特性 .....	68
5.4	低温共烧陶瓷(LTCC) .....	75
5.5	覆铜板材料 .....	78
5.5.1	玻璃转化温度 $T_g$ .....	78
5.5.2	材料性能 .....	78
5.5.3	制造 .....	87
5.5.4	机械刻图 .....	92
5.6	清洗 .....	94
5.6.1	湿法清洗工艺 .....	95
5.6.2	干法清洗工艺 .....	95
5.7	安全事项 .....	97
	参考文献 .....	98
<b>第 6 章</b>	<b>厚膜</b> .....	<b>101</b>
6.1	丝网印刷 .....	101

6.2	金属箔掩模 .....	107
6.3	光刻厚膜 .....	111
6.3.1	光刻厚膜 .....	111
6.3.2	光敏厚膜 .....	111
6.4	加法工艺 .....	115
6.4.1	金属有机物 .....	115
6.4.2	直接绘图 .....	117
6.4.3	直接键铜(DBCu) .....	119
	参考文献 .....	121
<b>第7章</b>	<b>薄膜 .....</b>	<b>123</b>
7.1	物理气相沉积 .....	123
7.1.1	蒸发沉积 .....	123
7.1.2	溅射 .....	126
	参考文献 .....	131
<b>第8章</b>	<b>介质沉积 .....</b>	<b>132</b>
8.1	等离子增强低压化学气相沉积(PELPCVD) .....	132
8.2	阳极化 .....	133
	参考文献 .....	136
<b>第9章</b>	<b>聚合物 .....</b>	<b>137</b>
9.1	材料性能 .....	139
9.1.1	吸湿性 .....	139
9.1.2	机械性能 .....	139
9.1.3	玻璃转化温度( $T_g$ ) .....	141
9.1.4	平坦化 .....	141
9.2	沉积 .....	142
9.2.1	旋涂 .....	142
9.2.2	喷涂 .....	144

9.2.3	丝网印刷 .....	144
9.2.4	其他沉积方法 .....	145
9.3	图形化 .....	145
9.3.1	湿法刻蚀 .....	145
9.3.2	干法刻蚀 .....	146
9.3.3	光敏聚合物 .....	147
	参考文献 .....	150
<b>第 10 章</b>	<b>加工方法</b> .....	<b>151</b>
<b>第 11 章</b>	<b>光刻</b> .....	<b>153</b>
11.1	光刻胶 .....	153
11.1.1	旋涂 .....	157
11.1.2	喷涂 .....	160
11.1.3	辊涂 .....	160
11.1.4	半月涂覆 .....	161
11.1.5	电沉积 .....	161
11.1.6	干膜 .....	162
11.1.7	浸涂 .....	166
11.2	原图和掩模 .....	167
11.3	曝光 .....	173
11.3.1	非准直光光源 .....	173
11.3.2	大泛光光源 .....	173
11.3.3	短泛光光源 .....	174
11.3.4	准直光光源 .....	175
11.3.5	激光曝光 .....	177
	参考文献 .....	180
<b>第 12 章</b>	<b>电镀</b> .....	<b>181</b>
12.1	综述 .....	181

12.2	无机添加剂 .....	184
12.3	有机添加剂 .....	185
12.4	波形 .....	187
12.4.1	非均衡直流 .....	189
12.4.2	脉冲 .....	189
12.5	电场密度 .....	195
12.6	化学镀 .....	197
	参考文献 .....	199
<b>第 13 章</b>	<b>刻蚀</b> .....	<b>200</b>
13.1	湿法刻蚀 .....	200
13.2	干法刻蚀 .....	203
13.2.1	溅射刻蚀 .....	203
13.2.2	离子束研磨 .....	203
13.2.3	反应刻蚀技术 .....	207
13.3	刻蚀对阻抗的影响 .....	208
	参考文献 .....	210
<b>第 14 章</b>	<b>元件</b> .....	<b>211</b>
14.1	无源元件 .....	211
14.1.1	电阻 .....	211
14.1.2	衰减器 .....	220
14.1.3	电容器 .....	222
14.1.4	电感器 .....	236
14.2	传输线元件 .....	239
14.2.1	互易功分器/功合器 .....	239
14.2.2	滤波器 .....	243
	参考文献 .....	246
<b>第 15 章</b>	<b>封装</b> .....	<b>249</b>

15.1	集成化	251
15.2	互连	252
15.2.1	圆线	253
15.2.2	条带	257
15.2.3	修正的载带自动键合(TAB)	259
15.2.4	集成的跨接线	261
15.2.5	外壳	261
15.2.6	热膨胀	263
15.2.7	基板贴装	264
15.2.8	接地	266
15.2.9	通孔	267
15.2.10	可电镀性	274
15.2.11	时域反射计(TDR)	275
	参考文献	278
<b>第 16 章</b>	<b>超导</b>	<b>280</b>
16.1	高转变温度( $T_c$ )材料的性质	282
16.2	材料因素	284
16.3	基板材料	285
16.4	膨胀系数	286
16.5	缓冲(阻挡)层	286
16.6	膜的形成	287
16.6.1	偏轴(off-axis)溅射	287
16.6.2	脉冲激光沉积	288
16.6.3	蒸发	289
16.6.4	有机金属化学气相沉积(MOCVD)	289
16.7	图形制作	290
16.7.1	湿法刻蚀	290



16.7.2 干法刻蚀 .....	291
参考文献 .....	292
第 17 章 微机电系统 (MEMS) .....	294
参考文献 .....	295
附录 A 符号定义 .....	297
附录 B 公司名录 .....	299
附录 C 单位换算 .....	302
附录 D 对微带的 $w/h$ 和 $\epsilon_{\text{eff}}$ 的图解评估 .....	303