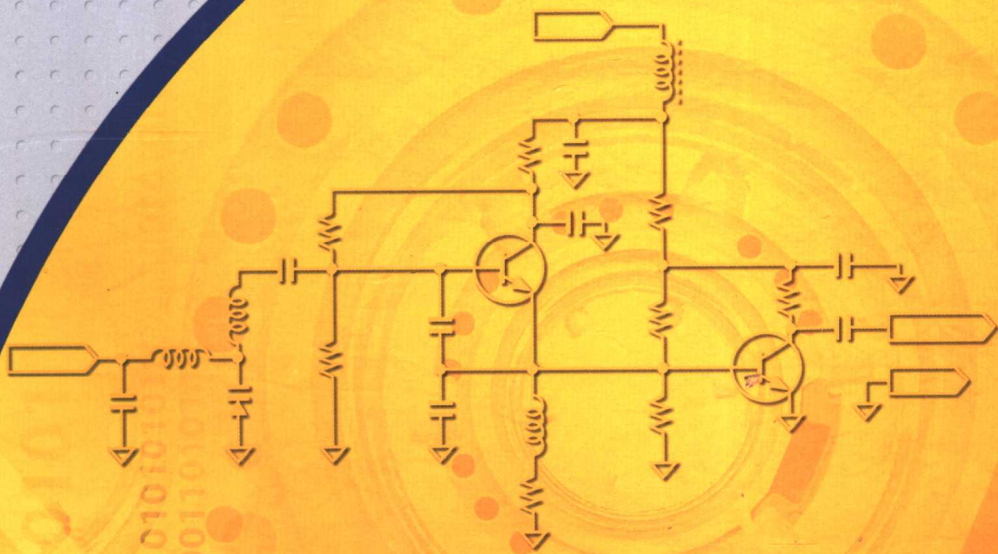


图解实用电子技术丛书

高频电路设计与制作

开关/放大器/检波器/混频器/振荡器的技巧详解

[日] 市川裕一 青木 胜 著
卓圣鹏 译
何希才 校



科学出版社

www.sciencep.com

图解实用电子技术丛书

高频电路设计与制作

开关/放大器/检波器/混频器/振荡器的技巧详解

〔日〕市川裕一 青木 胜 著
卓圣鹏 译
何希才 校

科学出版社

北京

图字: 01-2005-1166 号

内 容 简 介

本书是“图解实用电子技术丛书”之一。全书共分9章。本书首先对高频的基本知识加以介绍,然后在后续的篇章里,对开关、低噪声放大器、混频器、滤波器、检波电路、振荡电路、PLL的设计与制作等进行详细论述。本书全面地阐述了有关高频电路设计的基础理论及其实际制作,且配有大量的印制电路板图、仿真电路等,图文并茂,大大地提高了本书的参考阅读价值。

本书适合电子、通信及其相关领域的工程技术人员参考阅读,也可作为大专院校电子、通信专业学生的课外阅读资料。

图书在版编目(CIP)数据

高频电路设计与制作/(日)市川裕一,青木胜著;卓圣鹏译;何希才校。—北京:科学出版社,2006

(图解实用电子技术丛书)

ISBN 7-03-017369-4

I. 高… II. ①市…②青…③卓…④何… III. 高频电路-设计
IV. TN 710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 058116 号

责任编辑:赵方青 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面制作:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006年8月第一次印刷 印张: 18 1/4

印数: 1—4 000 字数: 271 000

定 价: 39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

译者序

对电路设计而言,高频电路是由具有丰富经验的技术人员进行设计的。所以,高频电路的设计工作重任往往肩负在前辈工程师的身上。

因为高频电路涉及的参数很多,设计时受周边电路的影响很大,不仅要考虑电路本身的设计,也要顾及所使用印制基板的材质、厚度和印制布线等。只要设计不当,就会产生寄生电容形成谐振电路,造成信号被衰减或产生噪声,导致无法满足设计要求。因此,高频电路设计人员需要有经验,所谓经验,就是设计时能事先避免一些不合常理的设计以及解决电路设计时所遇到的问题,一般初学者可能不具备这些能力。

但是,随着科技的进步,高频电路设计的门槛逐渐降低,高频电路/微波电路用的仿真软件也得到了快速的发展。不了解高频电路的人,只要使用高性能仿真软件,就能得到所需要的性能。因此,设计人员只要依照仿真电路,稍具备一些基本设计概念,就能够设计出高频电路。一般说来,虽能靠仿真软件来设计出所期望的电路,但是,最后还是靠人工去完成。因此,设计人员必须不断学习新知识、积累实际操作经验才能顺利地完成任务,而本书就是充实自己的一本好书。

本书是高频电路设计的入门书,其内容包括:高频的基础知识,开关、低噪声放大器、混频器、滤波器、检波电路、振荡电路以及PLL等的设计与制作。这些设计与制作都是最基本的概念,根据实际的图表加以说明,使初学者能很快进入高频电路设计领域,对一些有经验的设计者而言,本书也是一本不可或缺的参考书。

本书内容新颖,深入浅出地介绍了高频电路设计。由于时间仓促,立意虽宏,疏漏之处尚祈不吝指教。

前 言

直到最近,所谓“高频”是指在电气电路中一块特殊的领域。那里是“电子技术人员的世界”,尤其在微波电路的设计现场,反复使用小刀加工印制图案,完成焊接铜箔的作业。作者到现在仍然记得,在刚刚进入高频行业时,听公司的前辈说过,“成为一名合格的技术人员,需要花费 10 年的工夫”。

由于在高频领域常采用试探法,因此,也许从事数字电路或低频电路的专业人员看来,高频电路世界是不易接近的领域。然而,随着移动电话的迅速普及,蓝牙(Bluetooth)、无线 LAN 等无线数据通信设备的快速开发,高频电路技术越来越受到关注。直到今天,人们认为“高频、微波设备是面向防卫产业的特殊技术”,但随着时代的变迁成为最先进技术及通信革命中不可或缺的普遍技术。实际上,在以电气大厂家为中心的高频领域,各种行业不同厂家的加入,且此领域中高频电路技术人员难求的局面仍在延续。

与过去相比,现在高频电路设计门槛变低而容易进入。原因是根据用户的要求,高频电路/微波电路用的仿真软件在迅速发展。不了解高频电路的人,看看学学久而自通,对输入电路进行最佳化,就能简单设计出相应特性的电路。若使用最近高性能的仿真软件,如果是简单的无源电路,有时也能够实际得到趋近预测特性的性能。

但是,仿真软件毕竟是工具,是否能有效利用这种工具全凭使用者所具备的经验与理论基础。在实际的高频电路中,由于有仿真软件不能表现的许多电路要素;因此,实际上,一定要考虑肉眼看不见的电路要素,进行元件的配置,绘制印制图案。使用仿真软件的人,由于积累经验、具备知识的不同,完成的性能有很大差异。

常听说“在公司只能做确定工作,不能积累各种经验”。此时,最有效的工作方法是使用仿真软件。若使用仿真软件,就能验证工作中所处理电路的工作情况,并进行调整。若使用刊载于文献与书中的电路或仿真软件附属的样品电路,就能够简单处理各种

电路。若由仿真得到虚拟经验,并同时进行日常实用电路的设计与调整,就能极大地提高设计能力。

这里,作者最想说的是“要积累丰富的经验”,不仅要阅读文献、书籍,还要尽量多地接触电路,自己动手实际制作,并通过测试调整使电路稳定可靠地进行工作。若接触众多电路,即使要必须设计全新电路或无经验电路时,也会取得成功的。

本书是以晶体管技术 2000 年 11 月~2001 年 12 月的连载与 2000 年 6 月特刊内容作为蓝本,内容加以补充,而后编辑而成。第 2 章以必须理解的内容为最低限度,对设计高频电路时史密斯图的用法和匹配方法进行了说明。高频电路入门者阅读的图书一定是以电磁场理论为中心进行讲解,因此,本书尽量删除了一些难以理解的说明。第 3 章~第 9 章,是实际设计、试作并评价 2GHz 频带的各种高频电路。

本书所试作的电路还不是十分成熟的电路,有许多改善之处。

试作相同电路,无问题也正常动作,“成功啦!”由此感到很高兴,但这并不是结束,而是“经验”积累的开始,大家手脑并用,使这种电路具有更佳的特性。采用试探法过程中,或许大家有新的发现。这就是电路特性好过了头,反而会变坏,这也是“经验”。作为积累经验的题材若能利用本书,那是件高兴的事。

将自己的想法整理出来以文章的形式呈现给大家,这对于作者来说,也是一次很好的学习机会,并且也是积累经验的过程。本人能够承担本书编写工作,感到非常荣幸。

最后谨向在百忙之中很快完成了第 8 章和第 9 章的编写任务的 DST 公司的青木胜先生,以及为了使本书浅显易懂而做编辑工作的晶体管技术编辑部的寺前裕司先生致以深深的谢意。

2002 年冬 市川裕一

目 录

第 1 章 欢迎进入高频世界——成为高频工程师为	
目标	1
1.1 频带和电路.....	1
1.2 高频电路设计环境的变化.....	2
1.3 现在高频电路设计中广泛存在的弊端.....	4
第 2 章 高频的基础知识——为了更好地理解高频	
信号	7
2.1 信号的波长.....	7
2.2 高频电路看作分布常数的电路.....	9
2.3 高频中最重要的工作是传输线的设计	11
2.3.1 表示传输线电气特性的“特性阻抗”	11
2.3.2 高频使用的传输线	12
2.4 用分布常数与集中常数制作的高频电路	13
2.5 高频中功率比电压与电流更容易处理	16
2.5.1 S 参数的概要	16
2.5.2 实际高频元件数据表中记载的 S 参数	20
2.6 用史密斯图求阻抗	22
2.6.1 史密斯图	22
2.6.2 在史密斯图上描绘阻抗	25
2.6.3 元件与传输线路的增加以及史密斯图上的 阻抗轨迹	26
2.7 高效率地传输高频信号的技术——匹配	30
2.7.1 禁止使用电阻取得匹配	31
2.7.2 阻抗匹配实例 1	32
2.7.3 阻抗匹配实例 2	34
2.7.4 匹配电路构成的不同造成输入阻抗特性的 差异	38

2.7.5 使用实际元件的匹配电路	41
2.8 实际无源元件的高频阻抗	43
2.9 能发挥高频电路性能的印制基板的设计	46
2.9.1 高频电路用印制基板的基础知识	46
2.9.2 印制图案的精度与特性阻抗的偏差	47
2.9.3 印制图案“弯曲”对特性阻抗的影响	50
2.9.4 邻近接地图案对信号图案的影响	52
2.9.5 邻近信号图案的耦合会彼此影响	55

第3章 开关的设计与制作——控制信号流的技术

3.1 高频开关的作用与性能	57
3.1.1 开关的作用	57
3.1.2 开关要求的性能	58
3.2 开关的种类与选择	60
3.3 高频开关所使用的半导体元件	61
3.3.1 PIN 二极管	61
3.3.2 MESFET	63
3.4 PIN 二极管作为开关元件的特性实验	65
3.5 开关基本型——SPST 开关的种类与特性	71
3.5.1 两种 SPST 开关	71
3.5.2 SPST 开关的接入损耗与隔离特性	73
3.6 SPDT 开关的种类与动作	75
3.6.1 串联型与并联型的组合开关	75
3.6.2 两种串联型的组合开关	77
3.7 试作的 SPDT 开关特性的仿真分析	79
3.7.1 SPDT 开关的规格	79
3.7.2 试作 SPDT 开关的高频特性	80
3.7.3 隔离特性的改善	83
3.8 SPDT 开关的试作	87
3.9 试作 SPDT 开关基板的初始特性与调整	91
3.10 试作前仿真预测与评价结果不同的原因	95

第 4 章 低噪声放大器的设计与制作——放大微弱信号的技术..... 99

- 4.1 LNA 的作用..... 99
- 4.2 噪声越小而增益越大越好..... 100
 - 4.2.1 表示噪声大小的参数——噪声指数..... 100
 - 4.2.2 LAN 的噪声指数对系统总体噪声特性有很大影响..... 101
 - 4.2.3 两个 LNA 串联时电路的总体噪声指数 102
- 4.3 LNA 设计时其他重要参数 103
 - 4.3.1 输入电平范围..... 103
 - 4.3.2 输入输出 VSWR 与噪声特性及稳定度之间的关系..... 105
 - 4.3.3 振荡的稳定性..... 107
- 4.4 LNA 使用的半导体元件 107
 - 4.4.1 MMIC MGA-87563 107
 - 4.4.2 EMT ATF-35143 110
- 4.5 LNA 的仿真进行特性分析 113
 - 4.5.1 使用 MGA-875635 构成 LNA 的仿真..... 113
 - 4.5.2 使用 ATF-35143 构成 LNA 的仿真 116
- 4.6 使用 MMIC MGA-87563 的 LNA 制作 121
 - 4.6.1 规格与电路的说明..... 121
 - 4.6.2 评价时的检测点..... 125
 - 4.6.3 初始性能..... 126
 - 4.6.4 特性的改善..... 127
 - 4.6.5 试作前仿真预测与评价结果的比较..... 131
- 4.7 使用 HEMT ATF-35143 制作的 LNA 132
 - 4.7.1 规格与电路的说明..... 133
 - 4.7.2 评价时的检测点..... 135
 - 4.7.3 初始性能..... 136
 - 4.7.4 特性的改善..... 137
 - 4.7.5 试作前仿真预测与评价结果的比较..... 142

第 5 章 混频器的设计与制作——升降频技术 147

- 5.1 混频器的作用..... 147
 - 5.1.1 发射信号电路中混频器的作用..... 147

5.1.2	接收信号电路中混频器的作用	148
5.1.3	转换频率的必要性	148
5.2	频率转换的原理与实际方法	149
5.2.1	频率不同的信号相乘就会产生其他频率成分	149
5.2.2	收发信号电路的工作情况	150
5.3	混频器的种类与特征	151
5.3.1	只用无源元件构成的无源混频器	151
5.3.2	用放大元件构成的有源混频器	154
5.4	DBM 的工作原理	155
5.5	由 DBM 进行降频转换的实验	158
5.5.1	将 LO 信号频率设定为 2200MHz 的场合	159
5.5.2	将 LO 信号频率设定为 2600MHz 的场合	161
5.5.3	实验观察	163
5.6	DBM 的升频转换实验	163
5.6.1	将 LO 信号频率设定为 2200MHz 的场合	164
5.6.2	将 LO 信号频率设定为 2600MHz 的场合	167
5.7	观察实际的有源混频器	168
5.8	放大器非线性工作进行频率转换	169
5.8.1	在输出失真的非线性区进行频率转换	169
5.8.2	放大器输出高次谐波的实验	170
5.9	有源混频器的实验	173
5.9.1	实验系统的概要	173
5.9.2	降频转换的实验	175
5.9.3	升频转换实验	177

第 6 章 滤波器的设计与制作——取出所期望频率

成分的技术 183

6.1	高频滤波器的种类与作用	183
6.1.1	接收电路中滤波器的作用	183
6.1.2	发射电路中滤波器的作用	184
6.1.3	滤波器的种类	184
6.2	BPF 基本上是谐振电路	187
6.3	用介质谐振器制作的 BPF	190
6.4	用微带线制作的 BPF	194

6.4.1	可用音叉的共鸣动作进行示意	194
6.4.2	印制图案的形状与传输特性	194
6.5	用介质谐振器制作的 BPF	196
6.5.1	介质 BPF 的设计	196
6.5.2	试作的步骤	199
6.5.3	特性评价与调整	201
6.6	LC 谐振电路制作的 BPF	201
6.6.1	使用软件工具进行简单设计	201
6.6.2	试作的步骤	203
6.6.3	特性评价与调整	205

第 7 章 检波电路的设计与制作——将调制信号

进行解调的技术 209

7.1	检波电路的主要元件——肖特基二极管	210
7.2	检波电路的种类	212
7.3	用 SBD 制作的检波电路	213
7.3.1	电路的说明	213
7.3.2	试作与特性评价	214

第 8 章 振荡电路的设计与制作——从振荡原理到

VCO 的制作 217

8.1	振荡电路的基础	218
8.1.1	产生振荡的原因	218
8.1.2	各种反馈电路	221
8.1.3	谐振电路的 Q 值越大,越能得到高稳定度与 纯正度	222
8.2	各种 LC 振荡电路	224
8.2.1	科耳皮兹振荡电路与哈特莱振荡电路	224
8.2.2	克拉普振荡电路	224
8.3	VCO 的基础知识	227
8.3.1	VCO 要求的特性	227
8.3.2	VCO 中主要元件——变容二极管	228
8.4	用 LC 谐振电路制作的 VCO	230
8.4.1	用空芯线圈制作的 VCO	230

8.4.2	作为终端微带线制作的 VCO	233
8.4.3	用 $\lambda/4$ 阻抗反转电路制作的 VCO	234
8.4.4	用介质谐振器制作的 VCO	238
8.5	用 SAW 器件制作的 VCO	239

第 9 章 PLL 的设计与制作——得到稳定振荡信号的控制技术

245

9.1	PLL 为稳定度高的振荡器	245
9.2	PLL 核心部分环路滤波器的设计	247
9.2.1	开环传输特性	247
9.2.2	环路滤波器的增加与振荡稳定度	248
9.2.3	环路滤波器的常数设计	249
9.2.4	ω_n 、 ξ 与环路特性的关系	251
9.2.5	环路滤波器的两种电路方式	252
9.2.6	环路滤波器设计时三个要点	253
9.3	用 LMX2326TM 制作 2.1~2.3GHz 的 PLL	256
9.3.1	PLL IC LMX2326TM 内部等效电路	257
9.3.2	环路滤波器能用厂家免费提供的软件工具进行简单设计	260
9.3.3	LMX2326TM 参数的设定	261
9.3.4	相位噪声与基准信号泄漏的实测	262
9.3.5	改善特性与防止误动作的技术	263
9.4	环路滤波器的常数与 PLL 基本性能	267
9.4.1	用 PLL 仿真软件——“Genesis PLL 设计工具”进行验证	270
9.4.2	仿真时导出需要的参数	270
9.4.3	频率收敛时间、相位噪声、相位裕量的分析结果	271
9.4.4	环路滤波器的改进减小基准信号泄漏	273

参考文献	277
------------	-----

第 1 章

欢迎进入高频世界

——成为高频工程师为目标

1.1 频带和电路

“高频”是一个笼统的概念,并无严格定义。因此,在本书中把 300MHz~3GHz 频率认为是高频带(图 1.1),而将这种频带的电路定义为“高频电路”。

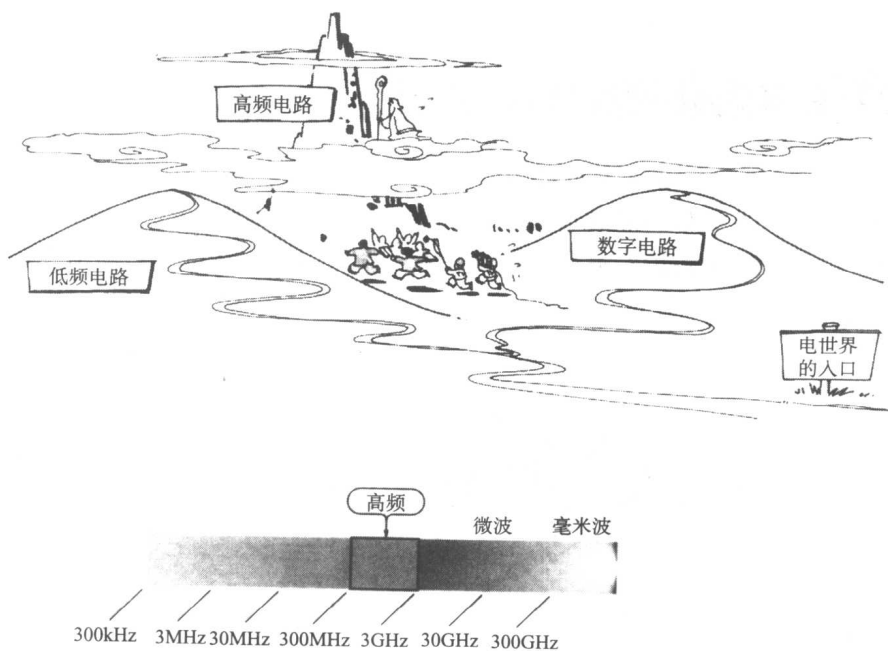


图 1.1 本书中的“高频”频带

例如,以正在加速开发的蓝牙 (Bluetooth)、无线 LAN 等无线数据通讯设备的 1~3GHz 频带电路 (图 1.2) 等。这是由单片元件构成的电路和由微带线等构成的电路混合组成的有趣的电路。对于单片元件,由于存在寄生成分,因此,其频率是偏离理想特性的频率。

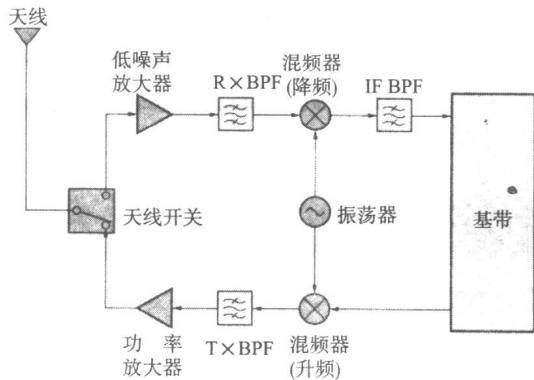


图 1.2 2GHz 频带收发信号系统的方框图

1.2 高频电路设计环境的变化

1. 最重要的是“经验”

随着高频电路和微波电路仿真软件的迅速发展,以及计算机的高性能化,高频电路设计者手中的工具已从电烙铁渐渐变成了键盘 (图 1.3)。

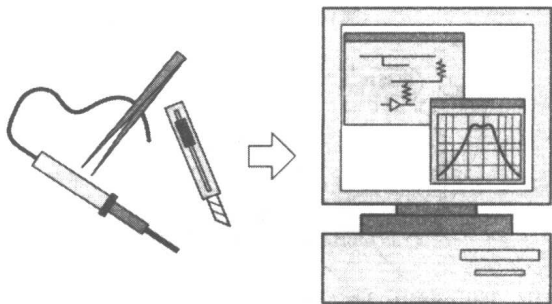


图 1.3 高频电路设计工具的变化

然而,即使设计者的工具改变了,但使用该工具的高频电路设计者所追求的目的没有变,这就是“经验”。

所谓必要的经验是什么?请考察以下情况。

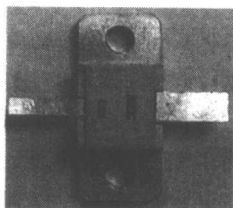
2. 过去的设计方式

首先回顾一下十几年前高频领域的状况。

当时,PC/AT兼容的个人计算机(IBM制)中使用的高频/微波电路仿真软件(Touchstone)逐渐上市,仿真软件的工作环境开始从大型计算机转到个人计算机。将由电子计算器和史密斯图所设计电路的节点清单(表示电路元件及其连接的清单)输入到高频/微波电路仿真软件(Touchstone)中,仿真结果和所预期的特性一样。

但是,由于当时个人计算机的性能较低,即使是对简单电路进行仿真也需要几分钟的时间。若想进行最佳分析,往往要花费数小时。由于在那个年代,只能依靠自己的头脑,使用文献资料、计算器、史密斯图来设计电路,在确认动作及验证时使用仿真软件。同时,Hewlett-Packard(HP)公司推出了矢量网络分析仪 HP8510,其性能、功能及操作性极佳。

当时,几乎没有高频 IC,设计者选定照片 1.1 所示的 MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor, 金属半导体百特基结场效应晶体管)与二极管等分立元件,使用史密斯图设计匹配电路,并用手绘制印制图案,有时还自己手工刻蚀来制造基板。



照片 1.1 高频 GaAs
MESFET(S 频带功率放
大用,日本电气(株)提供)

电路设计者本身有时也参与半导体的设计。对于不具有特定频率特性的 MESFET 如图 1.4 所示,无法由引线接合方式调整来覆盖间隙,从而构成早期 MESFET。因此为了得到所期望的特性,要决定引线接合的位置,再根据其结果制造 MESFET。

3. 目前的设计方式

随着个人计算机和仿真器的高性能化与多功能化的实现,可在一台个人计算机上完成从电路到印制图案的设计。也就是说,其设计方式从纸上变为在个人计算机上的设计。

对应的高频无源元件,例如,单片电容器与电感器等品种是非常丰富的。这是源于高频半导体快速发展的结果,高频电路的设

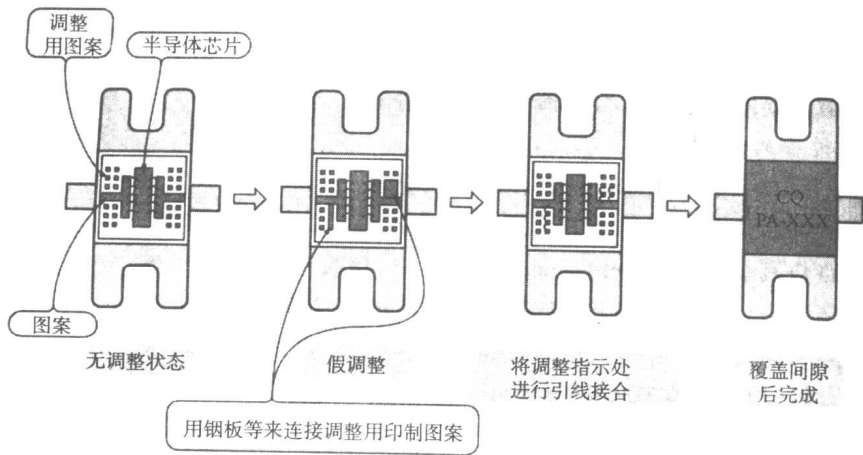


图 1.4 使用 MESFET 内的调整用垫来调整频率特性

计也随之变得非常容易。

在改善高频设计环境的同时,很快也进行了如下的设计分工。

① 单一功能电路的设计。

滤波器和放大器等单一功能电路模块的设计人员,尤其是元件厂商的工程技术人员负责。

② 高频装置的设计。

将高频模块与 IC 组合,设计高频装置的人员,尤其是制品厂商的工程技术人员负责。

元件厂商集中于特定电路的设计,而制品厂商集中于将其元件组合为装置的工作。因此,加快了设计速度。

1.3 现在高频电路设计中广泛存在的弊端

也许有人认为“高频电路设计环境的完好,对应各种高频元件的不断出现,分工细化的结果,电路设计变得很容易,设计速度也加快了,难道说还有弊端吗?”

1. 即使能操作仿真软件也不能进行电路设计

随着高性能的个人计算机和高性能、高功能仿真软件的出现,也许有人会产生“只要有高频/微波电路仿真软件,就能设计出高频电路”的错觉。

的确,即使不了解高频电路的人,只要将电路输入到个人计算

机中进行最优化,就能设计出具有极好特性的电路。尤其是滤波器、无源电路,也许能实际制作其特性接近由仿真所得特性的电路。

然而,在电路调整之前不能如此简单地进行这项工作。当改善性能时,完全看不清到底调整何处较好,这样会是摸不着头绪的盲目调整。特别是有源电路,有时也会通过仿真不能了解电路性能、发生预想不到的现象,进而出现无法收拾的局面。

这样一来,操作高频/微波电路仿真软件与使用仿真软件来设计电路这两项工作完全不同。前者只是知道仿真软件的使用方法而已。

当用仿真软件来设计电路时,由于仿真器只是一种工具,因此,大前提是必须理解高频电路的工作原理。能否在高频或微波电路设计中有效地使用这种不可或缺的仿真软件,全靠使用者的经验和知识。

2. 分工细化导致电路设计者能力的下降

分工细化的结果,使各设计人员对于所熟知的设计电路的范围迅速变窄。

IC 和模块的组合以及匹配电路的设计成为工作的重心。对于某单一功能电路或与模块有关性能了解得非常详细,但对于其他电路,由于没有经验不甚了解,而完全无法进行设计的人员在增多。而且,不能在真正意义上使用分立元件进行电路设计的人员也在增多。因此,也许像初期那样只能以 IC 数据表及应用说明中所记载的应用电路进行原样设计人员才有一些增加。

3. 关于经验

目前,支撑日本高频业界的是在“专业人员的世界”中操练本领的设计人员。这些设计人员在进行自己工作的同时,还需要积累各种电路的设计经验。但下一代将如何呢?

作者认为,只有尝试着连接多种电路,自己动手制作、接触并调试,从而积累出设计制作电路的经验很重要。