



中山大學  
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

# 微波技术与天线设计报告

微带圆环形天线制作

院	系：	<u>电子与信息工程学院</u>
专	业：	<u>通信工程</u>
撰 写	人：	_____
学	号：	_____
组	员：	_____
日	期：	_____

---

## 目录

1 微带天线的基本理论 .....	2
1.1 微带线的传输模式 .....	2
1.2 微带线的馈电方式 .....	2
1.3 微带天线的优点 .....	3
2 设计要求 .....	3
3 理论的计算和分析 .....	3
3.1 确定微带天线介质版厚度 .....	3
3.2 贴片天线的结构及内场分析 .....	4
3.3 馈线设计 .....	5
3.4 建模仿真优化 .....	6
4 实际测试 .....	9
5 设计总结和体会 .....	10
6 参考文献 .....	10

---

# 1 微带天线的基本理论

微带天线是在带有导体接地板的介质基片上贴加导体薄片而形成的天线。它利用微带线或同轴探针等对导体贴片进行馈电，在导体贴片与接地板之间激励起高频电磁场，并通过贴片四周与接地板间的缝隙向外辐射。因此，微带天线也可看作为一种缝隙天线。1972年，芒森和豪威尔等研制成功了第一批实用的微带天线，之后随着基片光刻技术和各种低损耗介质材料的出现，微带天线得到了迅速的发展。至今，如手机、LAN、蓝牙、卫星通讯、散射通信、多普勒雷达、无线指挥和导弹遥测遥控、便携装置、环境检测仪表和遥感、电子对抗、武器引信、医用微波辐射计等领域已经广泛应用到了微带天线。

## 1.1 微带线的传输模式

微带线由一条导体带和背面有导体接地板的介质基片构成。我们知道只有填充均匀媒质的传输线才能够传输单一的纯横向场-TEM 模。现在由于空气- 介质分界面的存在，使得微带中的传输模具有电场和磁场所有分量的混合模，不过在频率不是太高的情况下，如 12GHz 以下，基片的厚度远远小于工作的波长的情况下，能量大部分都集中在导体带下面的介质基带中，而且此区域的纵向长的分量很弱，因此沿着微带传输线的主模与 TEM 模非常的相似，故称为准 TEM 模。

## 1.2 微带线的馈电方式

馈电部分是微带天线的重要组成部分，选择一个恰当合理的馈电方式对压缩天线的整体尺寸、提高天线的辐射性能和工作带宽以及日后扩展成天线阵列都具有重要意义。特别是对于双频双极化天线，天线输入阻抗的匹配就可由选择恰当的馈电点位置来实现。选择馈电方式需要综合考虑多种因素，最重要的是使辐射结构与馈电结构之间能够有效地传输能量，即两者要阻抗匹配。恰当的馈电方式还有助于降低微带天线的伪辐射和表面波损耗，以及减少旁瓣电平和交叉极化电平。目前对微带天线单元进行馈电的基本方式主要有微带线馈电、同轴线馈电、临近耦合微带馈电、口径耦合微带馈电、共面波导馈电等馈电方式。这里我们介绍本次实验使用的微带线馈电。

微带线馈电是微带馈线与微带贴片共面的一种馈电结构。这种馈电结构具有制作简单方便的特点。但微带馈线本身也要引起辐射，从而干扰天线的方向图，降低增益。另外，条状微带馈线所引入的附加电容将会产生较大的电抗功率，进而减小天线的工作带宽。为此，一般要求微带馈线宽度  $w$  不能宽，希望  $w \ll \lambda$ ，这就要求微带天线的特性阻抗  $Z_c$  要高些或者基片厚度  $h$  相对较小，介电常数  $\epsilon_r$  大些。微带馈线可以和微带贴片直接相连，也可以通过伸入贴片内部以获得所需阻抗，天线输入阻抗与馈线特性阻抗的匹配可由选择恰当的馈电点位置来实现。馈点位置的改变将使馈线与天线间的耦合发生变化，因而会使谐振频率有一定的漂移，但方向图一般不会受影响，频率的漂移可通过改变微带贴片的尺寸来补偿。

---

### 1.3 微带天线的优点

- 体积小，重量轻，低剖面，能与载体(如飞行器)共形，且除了在馈电点处要开出引线孔外，不破坏载体的机械结构，这对于高速飞行器特别有利。
- 电性能多样化.不同设计的微带元，其最大辐射方向可以从边射到端射范围内调整，易于得到各种极化，特殊设计的微带元还可以在双频或多频工作。
- 能和有源器件、电路集成为统一的组件，因此适合大规模生产，简化了整体的制作和调试，大大降低了成本。

## 2 设计要求

采用材料为 FR4 厚度为 1.6mm 的双面覆铜板，设计一款工作在 2.4GHz 的微带天线，辐射贴片采用圆环形（外径和内径之比为 4: 1）的贴片，利用 50 欧姆的微带线进行馈电，利用四分之一波导波长微带匹配段对天线进行阻抗匹配(相关知识可参考教材或网上的资料)，要求天线的仿真实现谐振中心频率 2.48GHz，且仿真 S11 参数在谐振频率处小于-13dB。

## 3 理论的计算和分析

在腔模理论中，我们知道圆形微带天线的主模是 $TM_{11}$ 模。 $TM_{0n}$ 模实际上激励不起来。而在 $TM_{mn}$ 模中 $m \neq 0$ 只有 $TM_{11}$ 模在垂直于天线的平面的方向上有最大的辐射。而其他的模在该方向上的辐射是 0。

### 3.1 确定微带天线介质版厚度

介质基片的厚度和材料直接影响到微带天线的带宽、效率。因此，设计微带天线的第一步是选择合适的介质基片。根据腔模理论，微带贴片天线可等效为一漏波谐振腔，尽管有较强的辐射，但它依然是 值较高的谐振系统。对于辐射贴片，为了有效降低微带天线的 值，展宽工作频带，尽可能选择介电常数较低、厚度较厚的介质基片；对于馈电网络，选择较薄的基片将有效降低来自馈线的伪辐射，而且能增强介质对波的束缚作用，增大能量耦合效率。因此，在选取介质基片时根据具体应用首先要考虑基片的多个参数：如介电常数、介质厚度、损耗角正切等；其次要考虑介质基片的多种性质：如基片厚度的均匀性、基片随湿度和温度变化的稳定性、基片的抗化学性、拉伸强度及结构强度、柔韧性、抗冲击性、可粘合性等。

对基片的厚度而言，厚介质基片，可提高天线机械强度、增加辐射功率、减小导体损耗，展宽频带；但同时也会增加介质损耗，引起表面波的明显激励。对于一个最大工作频率 $f_m$ ，

根据微带电路理论，厚度应该满足：

$$h \leq \frac{c}{4f_m \sqrt{\epsilon_r - 1}}$$

式中：c 为光速； $f_m$ 为最大工作频率， $\epsilon_r$  为相对介电常数。经过计算我们选取的介质板FR4( $\epsilon_r = 4.4$ )的厚度  $h=1.6\text{mm}$  满足要求。

## 3.2 贴片天线的结构及内场分析

圆环形微带天线结构如图1所示。

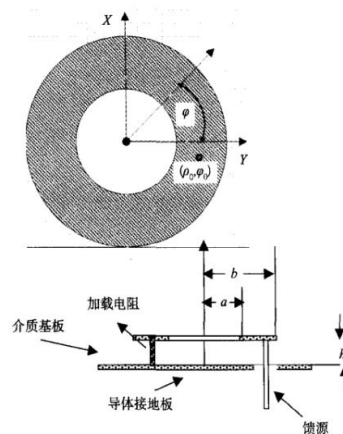


图1 圆环形微带天线

如图所示，贴片内半径为  $a$ ，外半径为  $b$ ，假定厚度  $h \ll \lambda_0$ ，其贴片与接地板间可以视为磁壁空腔。则  $TM_{nm}$  模的谐振频率的计算公式[1]为：

$$f_{nm} = \frac{\chi_{nm}}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r}}$$

该圆环形电阻加载天线2.4 GHz 频段按照  $TM_{11}$  模工作，所以  $n=m=1$ ，选用FR4作为介质基板，其相对介电常数  $\epsilon_r = 4.4$ ，损耗角正切值  $\tan\delta = 0.02$ ，令  $\tau = \frac{b}{a} = 4$ ，根据文献[2]中的  $\tau$  与  $\chi_{nm}$  值表(如下表所示)得  $\chi_{nm}=0.41112$ 。

表 1-10 不同  $\tau$  值的  $\chi_{nm} = k_{nm} a$  值  
 $n=1$

$m \backslash \tau$	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
1	0.805 09	0.677 34	0.584 71	0.513 62	0.411 12	0.341 02
2	6.376 52	3.282 47	2.263 64	1.757 77	1.251 12	0.992 17
3	12.612 87	6.353 24	4.273 30	3.236 11	2.202 08	1.686 61
4	18.880 53	9.471 33	6.339 24	4.774 94	3.212 74	
5	25.155 99	12.601 24	8.419 51	6.329 91	4.241 76	3.198 65

令  $f_m=2.48\text{GHz}$ ，然后由公式：

$$a = \frac{c\chi_{nm}}{2\pi f_{nm} \sqrt{\epsilon_r}}$$

用matlab解,代码如下:

```
1      %%% 天线设计 PXW
2      %%% 2019/5/14
3
4      c = 3*10^8;|
5      tao = 4 ; %b/a为外径比内径
6      %查表:
7      Xnm = 0.41112; %微带天线理论与应用.pdf (P53)
8      f = 2.48*10^9; %Hz
9      er = 4.4; %相对介电常数
10     Lambda_0_25 = c/f/4/sqrt(er) %1/4工作波长
11
12     %对圆环形
13     %%内径
14     a = c*Xnm/(2*pi*f*sqrt(er))
15
```

得 $\alpha = 3.8\text{mm}$

### 3.3 馈线设计

利用微带线计算工具我们可以得到如下的尺寸参数:

The image shows a software interface for microstrip design. On the left, a 3D model of a microstrip is shown with dimensions: width  $W=3$ , length  $L=15$ , substrate height  $H=1.6$ , and thickness  $T=0.03$ . The dielectric constant is  $\epsilon_r=4.4$ . On the right, a table of calculated parameters is displayed:

Calculate Z0 [F4]	
Z0 =	50.25 $\Omega$
Elect Length =	0.227 $\lambda$
Elect Length =	81.8 degrees
Elect Length =	27.477 mm (Air Line equiv.)
Delay =	91.654 ps
1.0 Wavelength =	65.992 mm
Vp =	0.546 fraction of c
$\epsilon_{eff}$ =	3.356
W/H =	1.875

图2 馈线设计

我们可以得到:  $W=3\text{mm}$ ,  $L=15\text{mm}$ , 理论上 $L$ 对微带线阻抗无关, 可随意设置。

### 3.4 建模仿真优化

1. 创建圆形形模型，圆心设置在坐标原点，半径设为  $R1$ ，使用这个设计变量以备后续优化
  2. 创建圆形形模型，圆心设置在坐标原点，半径设为  $4*R1$
  3. 将两者采用 Subtract 操作进行相减
  4. 创建 1/4 波长阻抗变换器：创建长方形模型，位置坐标  $3*R1, -L/2, 0\text{mm}$ ，长度为  $R1+L2$ ，宽度为  $L$
  5. 创建馈电线 FEED：创建长方形模型，设置馈电线的长度为 15，宽度为 3，位置坐标  $4*R1+L2, -1.5\text{mm}, 0\text{mm}$ ，
  6. 将三者采用 Unite 操作进行合并
  7. 创建地平面 GND：创建长方形状模型，位置坐标  $15\text{mm}+4*R1+L2, -15\text{mm}-4*R1, -1.6\text{mm}$ ，长为  $-15\text{mm}-L2-8*R1-15\text{mm}$ ，宽为  $30\text{mm}+8*R1$ 。
  8. 创建介质板 SUBSTRATE：创建长方体模型，位置坐标  $15\text{mm}+4*R1+L2, -15\text{mm}-4*R1, 0$ ，长为  $-15\text{mm}-L2-8*R1-15\text{mm}$ ，宽为  $30\text{mm}+8*R1$ ，高为  $-1.6\text{mm}$
  9. 创建空气盒：创建长方体模型，位置坐标设为  $15\text{mm}+L2+4*R1+30\text{mm}, -15\text{mm}-4*R1-30, 30\text{mm}$ ，长为  $-15\text{mm}-L2-8*R1-15\text{mm}-60\text{mm}$ ，宽为  $30\text{mm}+8*R1+60\text{mm}$ ，高为  $-61.6$ 。
- 创建馈电端口：创建长方形模型，将工作平面切换到 YZ 平面，设置位置坐标为  $15\text{mm}+L2+4*R1, -1.5\text{mm}, 0\text{mm}$ 。长为 3mm，宽为 1.6mm。

创建好的模型如下：

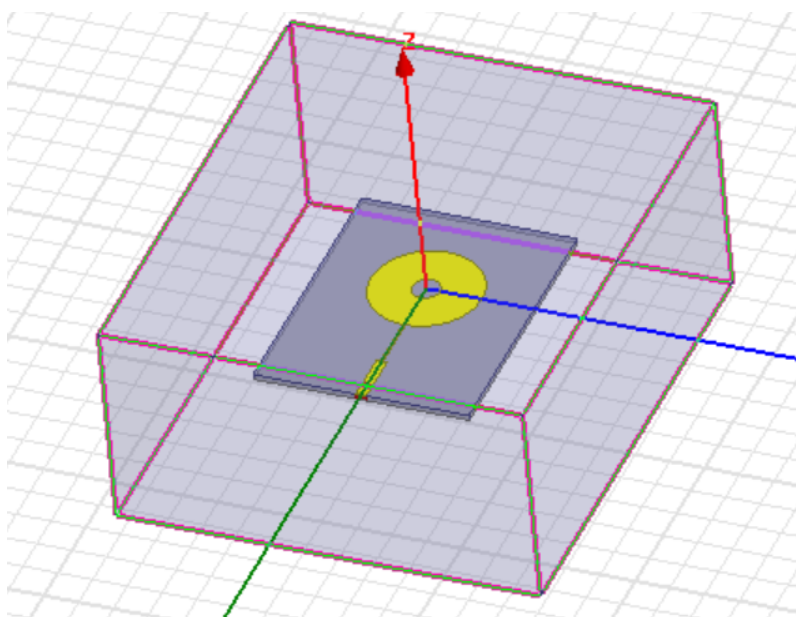


图 3 仿真模型

求解：

1. 边界条件：将顶层圆环形铁片、阻抗变换器、馈线设置为 perfect E 边界，底层地也设为 perfect E 边界，将空气盒设为辐射边界
2. 激励设置：设置集总端口 lump port，将端口名称设为 1
3. 添加求解设置和扫频设置：

在菜单栏中点击 HFSS-》analysis setup-》add Solution setup，将求解频率设置为 2.48GHz，同时添加 2.3-2.7GHz 扫描范围，步长为 0.005GHz，选择插值扫频，分析该扫频范围内的回波损耗；

## ①优化 R1 参数:

设置条件如下所示:

Sweep Definitions   Table   General   Calculations   Options		
Sync #	Variable	Description
	R1	Linear Step from 3.8mm to 4.1mm, step=0.05mm

对优化参数仿真得到的 S11 曲线如下图 4 所示:

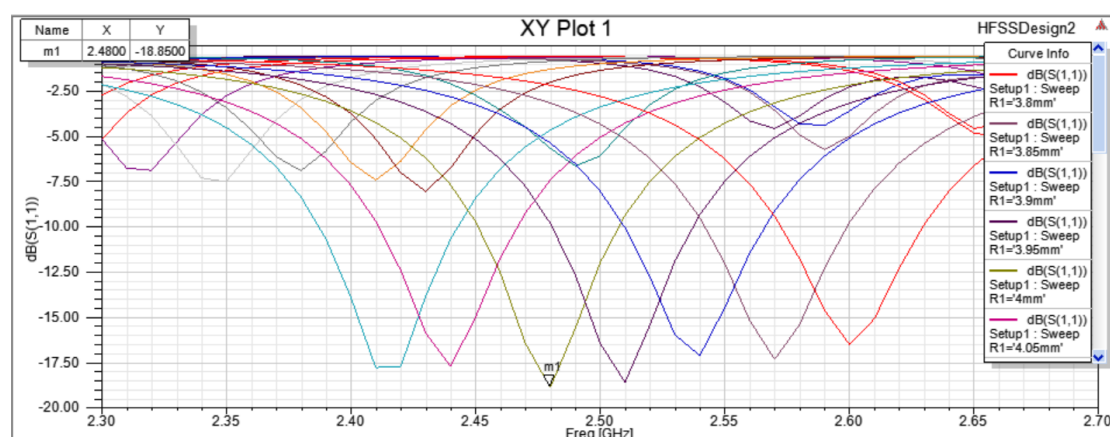


图 4 优化参数 R1

从图 4 可知，R1 影响的是中心频率，这从理论公式上也可以看出。当 R1=4mm 时，中心频率为 2.48GHz，满足设计要求。

## ②优化 L 参数（1/4 波长阻抗变换器的宽度）:

设置条件如下所示:

Sweep Definitions   Table   General   Calculations   Options		
Sync #	Variable	Description
	L	Linear Step from 0.7mm to 0.9mm, step=0.02mm

对优化参数仿真得到的 S11 曲线如下图 5 所示:



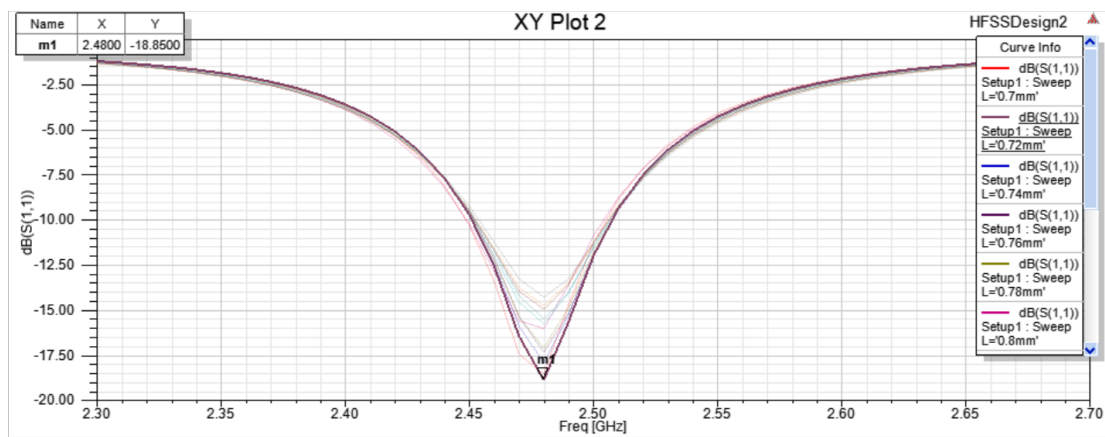


图 5 优化参数 L

从图 5 可知，阻抗变换器的宽度 L 影响的是回波损耗。当 L=0.72mm 时，回波损耗为 -18.85dB，满足设计要求 < -13dB。

### ③优化 L2 参数（1/4 波长阻抗变换器的长度）：

设置条件如下所示：

Sweep Definitions		
Table		
General		
Calculations		
Options		
Sync #	Variable	Description
	L2	Linear Step from 15mm to 17mm, step=0.2mm

对优化参数仿真得到的 S11 曲线如下图：

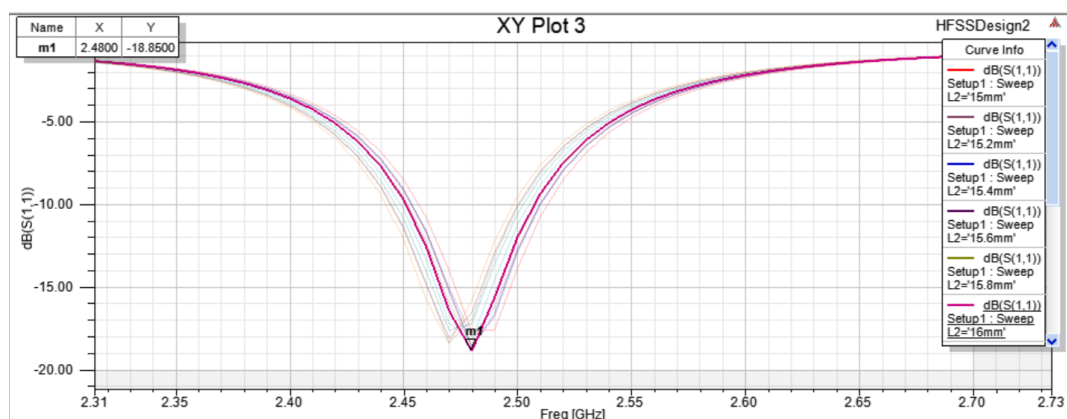


图 5 优化参数 L2

从图 5 可知，阻抗变换器的长度 L2 影响的是回波损耗，这是因为仿真的长度越接近 1/4 工作波长，阻抗匹配就越准确，仿真得到的回波损耗越小。当 L2=16mm 时，回波损耗为 -18.85dB，满足设计要求 < -13dB。

综上：最优参数为：R1 = 4mm， L = 0.72mm L2 = 16mm

## 4 实际测试



图 6 实物图

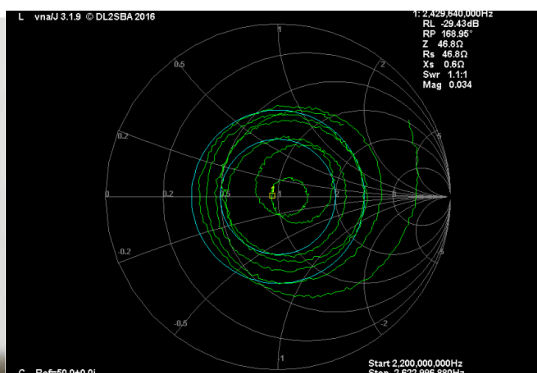


图 7 Smith 圆图

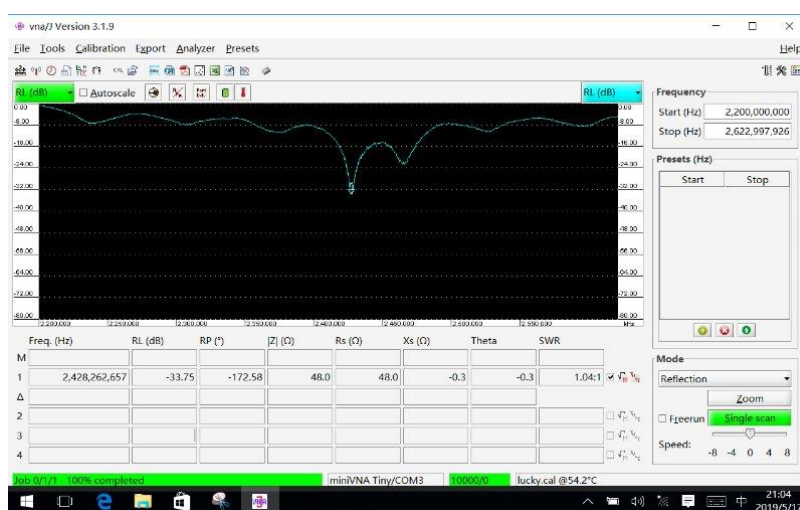


图 8 扫频结果

Freq (GHz)	RL (dB)	RP (°)	$ Z $ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\theta$	SWR
2.428	-33.75	172.50	48.0	48.0	-0.3	1.04:1

本次的实际制版的过程也是比较辛苦的一个过程。我们要求的中心频率是 2.48GHz，不过等到我们小组上板测试的时候，发现中心频率是 2.428MHz，比我们的中心频率偏差了 52MHz，RL=-33.75dB。中心频率有些偏差，于是我们思考为什么会出现这种情况？老师给我们指出我们的板子的圆环形天线旁边有很多小点没有腐蚀掉，这其实会影响到我们的中心频率。但在老师检查后给我们通过了，因此我们没有重新制作。

---

## 5 设计总结和体会

做完本次微波天线的实验,我的主要收获是利用自己已有的一些微波的基础知识可以深入到课本的理论学习和研究。比如说,在理论学习中,我查阅并且参考了一些关于微带线和微带天线的论文和书籍,很多东西是我以前没有接触到的。比如在圆环形天线中,虽然公式推导非常晦涩难懂,经过很多资料的查询才弄懂里面的参数比如 $\chi_{nm}$ 要查表才能获得。通过本次设计后,我了解到了这些基础知识。

这次实物天线制作也让我明白了一个小的错误很可能带来灾难性的后果。一点的偏差也会出现意想不到的错误,在本次实际的实验的制版和测试的过程中,自己也看到了很多同学包括自己的测量的偏差。明白了制作板子也是一个非常重要,不能出错的过程。制作过程中,包含了:画图→打印→光刻→显影→腐蚀→焊接→测试。在这个实验过程中,我们的板子制作出来后,由于腐蚀的不够,而影响到我们的中心频率点。这在今后应该要好好注意。

## 6 参考文献

- [1]. 张谦,王代华,张志杰,等. 2.4 GHz 圆环形电阻加载微带贴片天线的分析 [J]. 电视技术, 2012, 36(17).
- [2]. 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学 出版社,1991: 1-71.