

文章编号:1005-6122(2008)02-0019-04

# 基于 MEMS 技术的共面耦合式圆极化 微带天线的设计与仿真\*

陈伟强 丁桂甫 黎滨洪

(上海交通大学微纳科学技术研究院 微米/纳米加工技术国家重点实验室,  
薄膜与微细加工技术教育部重点实验室,上海 200030)

**摘要:** 研究了一种工作在 Ka 波段, 基于 MEMS 微加工工艺的圆极化微带天线。采用微带馈线与贴片辐射单元非接触、共面临近耦合的馈电方式, 可以在不改变贴片与馈线本身的尺寸且无需额外增加匹配网络的情况下调节阻抗匹配, 有效地提高了馈线与辐射元的阻抗匹配度与可调性, 简化了天线结构。使用 3dB 电桥移相器实现圆极化, 结构规范, 圆极化效果好。使用有限元仿真软件 Ansoft HFSS 对其进行了仿真优化, 得出了一组较优参数, 此时天线中心频率为 35GHz, 增益为 6.86dB, 驻波比  $\leq 2$  时阻抗带宽为 4GHz(约 11.4%), 轴比  $< 3$ dB 时带宽约为 5.9GHz(约 16.9%)。

**关键词:** 微机电系统, 微带天线, 圆极化天线, 毫米波天线

## Design and Simulation of MEMS-Based Circularly Polarized Microstrip Antenna with Coplanar Coupling

CHEN Wei-qiang, DING Gui-fu, LI Bin-hong

(National Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology, Key Laboratory of Thin Film and Microfabrication of  
Ministry of Education, Institute of Micro and Nano Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** A circularly polarized microstrip antenna based on MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) micro-fabrication technology is discussed. The antenna is fed by a microstrip through coplanar coupling. The radiation efficiency and impedance matching are improved, while the coupling efficiency is not affected. Ansoft HFSS, a high frequency structure simulation software based on finite element method (FEM), is used to analyze the antenna performances. A set of optimized parameters is given after simulating different parameters and comparing and analyzing the simulation results, such as S11 and gain of the antenna. The antenna works at the center frequency of 3.5 GHz, the bandwidth is 4 GHz with VSWR  $\leq 2$ , and 5.9GHz with AR  $\leq 3$ dB, and the gain is 6.86dB.

**Key words:** Micro-electro-mechanical systems (MEMS), Microstrip antenna, Circularly polarized antenna, Millimeter wave antenna

## 引言

随着无线电频道的日益拥挤, 无线电技术朝越来越短的毫米波、亚毫米波方向发展。毫米波介于微波和光之间, 具有频带宽、分辨率高、能全天候工作、易集成化等优点, 因此在军事(雷达、制导、电子对抗等)、通信、安全(汽车、直升飞机防撞系统)等领域中有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。但是在毫米波段, 随着

频率的提高, 对加工精度的要求越来越高, 传统的机械加工已经不能满足要求, 必须借助于新的加工技术, 而 MEMS 微细加工技术正能满足加工精度的要求。它具有精度高、可控性好、可批量制造、与 IC 工艺相兼容等优点。目前已有将 MEMS 移相器用在相控阵天线中<sup>[2]</sup>, 可以提高相控阵雷达的反应速度, 降低其功耗。也有将 MEMS 开关用于辐射单元上, 形成可重构天线来调节天线的工作频率、方向图

\* 收稿日期:2006-09-28;定稿日期:2007-03-02

基金项目:教育部基础研究项目(A1420060154)

等天线参数<sup>[3]</sup>。

此外,天线辐射单元也必需重新设计,以满足毫米波系统小型化、集成化等要求。贴片天线是符合这一要求的形式之一,它具有体积小、重量轻、低剖面、增益高、便于与有源器件集成等优点<sup>[4]</sup>。并且贴片天线可以使用MEMS微加工技术加工,加工精度能够得到保证。但是传统的微带线边缘馈电的贴片天线也有缺点,比如微带馈线与贴片单元之间不易调节阻抗匹配,从而可能影响整个天线的性能。如果要调节到阻抗匹配,需要把微带馈线阻抗调节到与贴片单元的谐振阻抗相近(一般超过200Ω),而微带馈线的阻抗与微带宽度成反比,并受到微波衬底材料厚度与介电常数的影响,所以要调节天线阻抗匹配必须通过改变微带馈线的宽度和贴片单元的尺寸来进行调节。当微带馈线与贴片单元之间调节到匹配时,又可能与已经确定的外部电路阻抗不匹配,此时又需要额外增加匹配网络(如1/4波长变换器)进行调配,这将增加馈线复杂程度和设计难度,增加馈线寄生辐射。所以传统的微带直接接触边馈贴片天线,影响因素多,不易调节阻抗匹配。

## 1 线极化天线结构

线极化天线单元结构如图1(a)所示,使用高纯度、低损耗的石英片作为衬底材料,其介电常数为3.78,厚为0.5mm。馈电方式采用微带馈线与贴片辐射单元非接触、共面缝隙耦合,不仅保留了传统微带线重量轻、剖面低、易于集成的特点,还具有改善阻抗匹配,低辐射损耗和色散小等优点<sup>[5]</sup>,适合于毫米波频段。

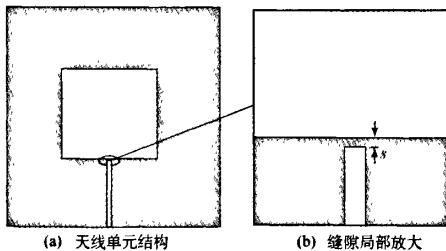


图1 线极化天线单元结构及缝隙局部放大图

微带馈线宽度相同时(阻抗为100Ω),直接接触与缝隙临近耦合方式的 $S_{11}$ 曲线变化对比如图2所示。可见直接接触时由于阻抗不匹配,谐振不明显(图2曲线b)。如果要调节到匹配,微带馈线阻抗需调节到与贴片单元的谐振阻抗相近,矩形贴片边缘阻抗一般超过200Ω,而微带馈线的阻抗与微带

宽度成反比,所以要调节天线阻抗匹配必须对微带馈线的宽度和贴片单元的尺寸进行调节。当微带馈线阻抗超过200Ω时,馈线宽度会变得极细,并需要增加1/4波导波长阻抗变换器来与外部电路匹配,所以传统的微带直接接触边馈贴片天线不易调节阻抗匹配。一种解决办法是使微带馈线伸入贴片内部一定距离,但是用于双馈圆极化的方形(或近似方形)贴片天线边长被谐振频率限定,并要求结构工整对称,不易通过调节贴片尺寸以及使微带馈线伸入贴片内部来实现阻抗匹配。而采用馈线与辐射贴片单元间非直接接触,缝隙临近耦合方式馈电时(如图1(b)),微带馈线宽度可以保持与外部电路相同或选取任意阻抗值,只需通过调节耦合缝隙宽度就可达到匹配目的。由图2曲线b可见使用缝隙临近耦合方式在原本直接接触不匹配的情况下实现了阻抗匹配,对阻抗匹配度有很大改善。

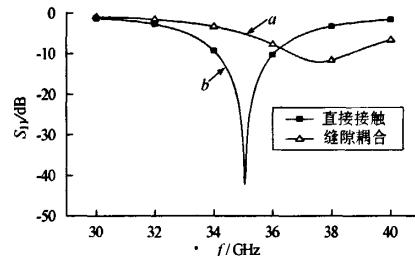


图2 相同宽度馈线直接接触与缝隙临近耦合的 $S_{11}$ 参数变化

图2中相同宽度馈线时,直接接触与缝隙临近耦合方式二者的谐振频率不同是由于各自引进的电抗值(按照微带不连续性分析)的不同而引起的。可见相同谐振频率的天线,使用缝隙临近耦合方式可有效减小天线尺寸。并且由于临近耦合馈电属于容性耦合,而直接接触馈电则是感性的,馈电机制的差异将显著影响阻抗带宽,理论上临近耦合馈电可获得更宽的带宽<sup>[6]</sup>。

为达到较好匹配,缝隙临近耦合方式馈电且贴片辐射单元尺寸一定时,由图3可见,耦合缝隙宽度s很大时,耦合效果差,谐振峰较浅,当耦合缝隙逐渐变小,耦合逐渐变好,在某一最优值时(如图3中s=0.02mm), $S_{11}$ 曲线有最深的谐振峰,天线可达到较好的阻抗匹配,之后耦合缝隙继续变小时,逐渐趋向于直接接触,耦合效果反而变差,谐振峰又逐渐变浅。由图3可见缝隙宽度对阻抗灵敏度很高,缝隙宽度几十微米的变化就可能会导致阻抗失配,所以对加工工艺有较高要求。

调节耦合缝隙宽度达到阻抗匹配时,耦合缝隙

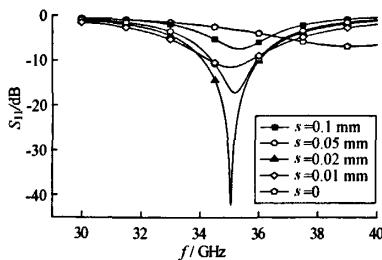


图3 微带阻抗 $100\Omega$ 时耦合缝隙宽度变化对 $S_{11}$ 的影响  
宽度与馈线阻抗大小成反比,典型参数见表1。

表1 缝隙宽度与馈线阻抗之间的关系

馈线阻抗( $\Omega$ )	缝隙宽度(mm)
50	0.13
75	0.05
100	0.02

从表1可以看出,馈线阻抗较小时,缝隙相对会宽些,若为了降低加工精度而加大缝隙宽度以满足传统加工的要求,则微带馈线宽度也会随之变宽。比如馈线阻抗为 $50\Omega$ 时,微带馈线宽度实际已超过1mm,能跟辐射贴片尺寸(约2mm)相比拟,馈线附加辐射明显,馈线成为辐射单元一部分。所以出于天线辐射性能的考虑,馈线阻抗一般不能取太低,因而耦合缝隙也会比较细,约为 $20\sim50\mu\text{m}$ 。这样的公差要求在通常的贴片天线加工技术中较难实现,但借助于MEMS微细加工技术则比较容易实现。

## 2 圆极化天线结构

在上述微带缝隙临近耦合馈电方式的基础上,利用3dB电桥移相器实现单元的双馈圆极化,其结构如图4所示。3dB电桥的基本特性是:1端口输入的功率在2、3端口平均分配输出(3dB特性),在4端口无功率输出(理论上);2端口和3端口输出之间有 $90^\circ$ 相位差,这就使贴片单元的两个正交(准)简并模式 $\text{TM}_{01}$ 和 $\text{TM}_{10}$ 之间有 $90^\circ$ 相位差,满足了产生圆极化辐射波的条件。实际上4端口仍然会有一定的功率输出,即有一定的损耗。所以除了可以通过调节微带馈线与贴片之间的耦合缝隙宽度来调节阻抗匹配外,还可通过调节调配枝4的长度来调节整个圆极化单元的阻抗匹配。由图5可见,端口4的长度 $L_4$ 在接近某一最优值时(如图5中 $L_4 \approx 0.7\text{mm}$ ), $S_{11}$ 曲线有最深的谐振峰,圆极化天线可达到较好的阻抗匹配。所以经过调节耦合缝隙宽度以及端口4调配枝长度的尺寸,两级调节圆极化天线的阻抗匹配,天线辐射性能明显提高,并减少了天线

的复杂程度与设计难度。

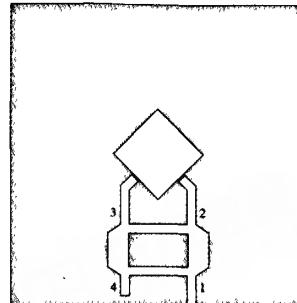


图4 双馈圆极化天线单元

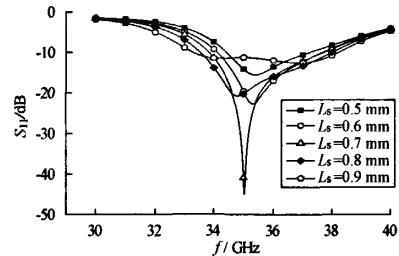


图5 调节调配枝4的长度 $L_4$ 对圆极化天线 $S_{11}$ 的影响

## 3 仿真结果

使用有限元仿真软件Ansoft-HFSS对给出的结构进行仿真,计算出天线系统的阻抗、 $S_{11}$ 、辐射方向图、增益、轴比等参数,并用CST微波工作室进行了验证。在衬底宽度 $A$ 、衬底厚度 $h$ 、辐射单元长度 $B_1$ 、宽度 $B_2$ 、微带馈线宽度 $W_1$ 、缝宽 $s$ 、3dB电桥移相器调配枝长度 $L_4$ 等一系列参数进行变化后,得到一组最佳参数: $A = 8\text{mm}$ , $h = 0.5\text{mm}$ , $B_1 = 1.64\text{mm}$ , $B_2 = 1.6\text{mm}$ , $W_1 = 0.24\text{mm}$ , $s = 0.02\text{mm}$ , $L_4 = 0.7\text{mm}$ ,此时天线中心频率为35GHz,增益6.86dB,驻波比为2时带宽为4GHz,轴比<3时带宽约为5.9GHz。

### 3.1 $S_{11}$ 参数

调节线极化天线缝隙宽度得到较优的阻抗匹配,Ansoft HFSS软件的 $S_{11}$ 仿真结果如图6曲线a所示,天线中心频率为35GHz,驻波比 $\leq 2$ 时带宽为2.2GHz。CST微波工作室仿真结果如图6曲线b所示,曲线基本吻合。以线极化单元为基础,增加3dB电桥移相器实现圆极化,并调节调配枝的长度实现阻抗匹配,圆极化天线的较优 $S_{11}$ 曲线如图7曲线a所示,天线中心频率为35GHz,驻波比 $\leq 2$ 时带宽约为4GHz。CST微波工作室仿真结果如图7曲线b所示,两结果基本吻合。可见圆极化天线较线极化单元阻抗带宽有了提高。这是因为双馈圆极化时使单元长宽略有公差, $\text{TM}_{10}$ 和 $\text{TM}_{01}$ 模的谐振峰会略有

偏离,有时甚至出现小双峰,合成后带宽自然变宽。

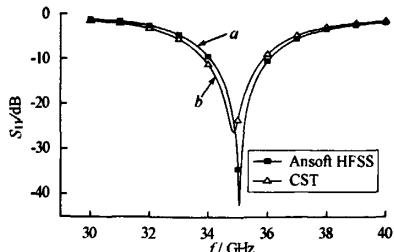


图6 Ansoft HFSS与CST微波工作室的线极化天线  $S_{11}$  仿真结果对比

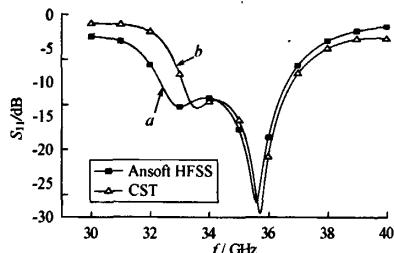


图7 Ansoft HFSS与CST微波工作室的圆极化天线  $S_{11}$  仿真结果对比

### 3.2 天线方向图

圆极化天线最大辐射方向基本出现在正Z方向,增益为6.86dB,仿真方向图如图8所示。由于微带馈线的寄生辐射,可见天线方向图有一定的前冲成分。

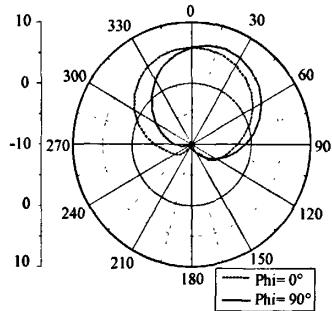


图8 圆极化天线仿真方向图

### 3.3 圆极化轴比

3dB电桥移相器调配枝长度  $L_s = 0.7\text{mm}$  时,不同频率的轴比如图9,轴比小于3dB时带宽约为5.9GHz。

## 4 结论

本文所研究的基于MEMS微加工工艺的圆极化微带天线可在不改变贴片与馈线本身的尺寸且无需额外增加匹配网络的情况下,通过调节耦合缝隙

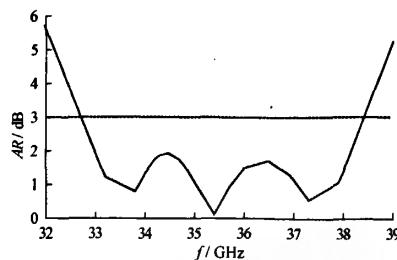


图9 轴比随频率变化

宽度及3dB电桥移相器端口调配枝4的长度,两级调节圆极化天线的阻抗匹配,显著改善了辐射单元与微带馈线的阻抗匹配度与可调性,结构简单,圆极化效果好。用有限元仿真软件Ansoft HFSS对其进行仿真,在进行了一系列不同参数仿真后,得出一组较优参数,此时天线中心频率为35GHz,增益为6.86dB,驻波比 $\leq 2$ 时阻抗带宽为4GHz(约为11.4%),轴比 $< 3\text{dB}$ 时带宽约为5.9GHz(约为16.9%)。并使用CST微波工作室对最终所得天线进行了验证性仿真,两个软件仿真结果一致。

## 参考文献

- [1] Varadan Vijay K, Vinoy K J, Jose K A. RF MEMS and Their Applications. John Wiley and Sons, 2003. 343
- [2] Joerg Schoebel, Thomas Buck, et al. Design considerations and technology assessment of phased-array antenna systems with RF MEMS for automotive radar applications. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(6): 1968 ~ 1975
- [3] Chio I M, DeLisio M, Lin L Y. MEMS reconfigurable vee antenna, IEEE Microwave Theory and Techniques Symposium, Digest, 1999. 1515 ~ 1518
- [4] 张钩,刘克诚,等.微带天线理论与工程.国防工业出版社,1988. 2 ~ 3
- [5] Steven Mestdagh, Walter De Raedt, et al. CPW-Fed Stacked Microstrip Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(1): 74 ~ 83
- [6] Lal Chand Godara. 无线通信天线手册.北京:国防工业出版社,2004. 149 ~ 168
- [7] 林昌禄,聂在平.天线工程手册.北京:电子工业出版社,2002. 463 ~ 525

陈伟强 男,1982生,硕士,主要从事微波电磁场与天线的设计与研究。

E-mail:nju2sjtu@yahoo.com.cn

丁桂甫 男,1963生,教授,博士生导师,长期从事射频MEMS器件设计和微细加工技术的研究。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>