

## Designs for a $K_\mu$ -Band Miniature MEMS Reconfigurable Antenna Based on Si Substrate\*

GUO Xing-long, CAI Miao, LIU Lei, LI Guo-dong, LAI Zong-sheng\*

(School of Information Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The dual-band 11.7 GHz and 12.7 GHz slot antenna on silicon was designed. This antenna is compact, efficient, CPW-fed and using IC technology. The antenna utilizes RF MEMS switches so that this can effectively change electrical length. It is important for the next generation wireless communications and integrated antenna system on the chip. The antenna return loss is 29.5 dB and 25 dB using 3D electromagnetic simulation HFSS®, at the lower and upper frequencies, respectively. Furthermore, the antenna radiation efficiency is good at the lower and the higher band.

**Key words:** re-configurable antenna; Si substrate; miniature; MEMS switches

EEACC:2575;5270

## $K_\mu$ 波段硅基 MEMS 可重构微型天线设计\*

郭兴龙, 蔡 描, 刘 蕾, 李国栋, 赖宗声\*

(华东师范大学信息科学技术学院, 上海 200062)

**摘 要:** 在硅衬底上设计了频率分别为 11.7 GHz 和 12.7 GHz 的双波段缝隙天线, 此设计利用 RF-MEMS 开关来实现天线的频率重构; 天线结构紧凑、共平面波导馈电, 采用 IC 工艺制作, 为下一代无线通讯和天线集成具有重要的参考价值。采用 3D 电磁模拟软件 HFSS<sub>R</sub> 模拟了天线在低频和高频的反射损失分别为 29.5 dB 和 25 dB; 并且天线在低频和高频都有较高的辐射效率。

**关键词:** 重构天线; 硅衬底; 微型; MEMS 开关

中图分类号: TN 911; TN4

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2006)06-2425-03

应用在高频卫星通信系统、低频通信系统、电子情报雷达、合成孔径雷达(SAR)、地面移动目标识别(GMTI)等诸多方面的可重构天线采用同一个天线或天线阵, 通过动态改变其物理结构或尺寸, 使其具有多个天线的功能, 相当于多个天线共用一个物理口径。并且可重构天线具有结构紧凑, 对于设计的各个频段有相似的辐射模式和增益, 以及实现良好的电磁兼容。可重构天线也能够解决通信系统小型化、低功耗、低成本、高性能、更便捷、射频模块微型

化等问题以及实现移动终端电小天线小型化、内置化、多频段、智能化。

由 Sengupta 和 Guney<sup>[1-4]</sup>等采用了变容二极管作为可调元件实现频率变化和别的方法制。作了可重构天线但是体积较大、反射损耗大, 功耗大等缺点。随着微电子机械开关(MEMS)的发展, 对可重构天线的研究才进一步深入。MEMS 开关具有理想的开关特性, 开关比非常高, 可实现从直流到高于 40 GHz 射频信号的隔离。同时, 具有功耗低, 重量

收稿日期: 2005-12-01

基金项目: 上海应用材料研究与发展基金项目资助(AM03010508); 上海市科委 AM 基金 2006 年度资助; 自然科学基金项目资助(60676047)

作者简介: 郭兴龙(1972-), 男, 在读博士生, 主要研究领域为微机电机械系统, 基于 MEMS 开关可重天线与硅基 MEMS 可重构微小天线的仿真设计和研究制作, rfmems@sohu.com;

赖宗声(1943-), 男, 终身教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 国家自然基金信息部评委专家, 主要从事微波与射频集成电路、无线通信和 RF MEMS 器件等研究工作, 享受政府特殊津贴, zslai@ee.ecnu.edu.cn.

轻,高隔离度,接入电路中插入损耗小,而且采用与 IC 工艺制作,体积小,便于集成<sup>[5-6]</sup>。

## 1 设计过程

### 1.1 天线基本结构和特点

利用 HFSS<sup>®</sup> [7] 构造 3D 模型. 经过多次仿真调试后,得到天线结构和设计尺寸如图 1、图 2 所示,考虑到对于多单元天线,相邻天线之间的耦合也必须最小,用共平面波导反馈<sup>[8]</sup>的狭缝能够具有较大的带宽,好的阻抗匹配,较低的辐射损失和互相耦合,容易和微波单片集成电路集成一体等明显的优势. 再者,在现在的通讯系统中,需要利用开关提高接收能力和实现天线的重构. 因此要求采用具有理想的开关特性,即要求开关比非常高,高隔离度,接入电路中插入损耗小的微电子机械开关(MEMS Switch)加在主辐射缝隙的两端. 开关设置在天线的主辐射缝隙上,使用开关构成以 CPW 作为信号传输线,两端接地的金属膜悬挂在信号电极之上. 通过 MEMS 开关来对称地改变辐射缝隙长度以实现改变频率,对称加载 MEMS 开关对于天线馈点的选择相对比较容易,工作频率主要通过上面的狭缝决定. 由于对开关施加直流偏压,和天线信号共用一个输入端,从而天线的结构得到了优化.

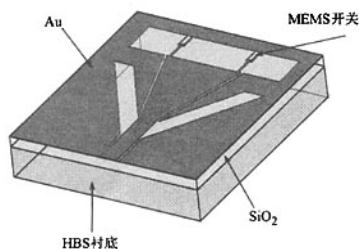


图 1 天线的立体图

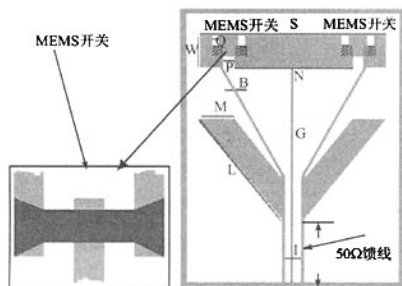


图 2 天线的顶视图

该天线通过缝隙 S 和下面的旁支缝隙 L 切断传导电流,产生位移电流激励场,对空间辐射电磁

波. 这种天线可以用分布在缝上的等效磁环流来分析<sup>[9]</sup>,天线顶部 S 缝产生线极化场,这种共面型微带缝隙天线的优点在于:能产生双向辐射;用宽缝作为辐射元带宽较宽;寄生辐射和表面波激励均较弱,对天线辐射效率减少影响;馈线和辐射缝可以在同一平面上. 整体形状呈三角形,这样做的目的主要考虑做得比较紧凑能够减少面积;为了获得宽的频带在主辐射狭缝下增加了旁支狭缝 L,反射频率主要由上面的狭缝长度 S 决定. 又式(1)决定天线的谐振频率<sup>[9]</sup>.

$$f_r = c/[2s(r)]^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $c$  为光速,  $\epsilon_r$  为有效介电常数,  $S$  为辐射谐振槽缝总长度. 设计过程以厚为  $350 \mu\text{m}$  的高电阻率( $\rho > 1000 \Omega \cdot \text{cm}$ )本征<111>抛光硅片衬底作为天线的基片. 采用硅片作为天线基底基于微电子加工平台,硅材料机械、散热性能好、工艺成熟简单,兼有加工精度高和 IC 集成的优势. 为了增加将要电镀的金和底片间等有很好的黏附性,对硅片进行氧化,在硅片表面形成很薄的约有  $1 \mu\text{m}$  厚的氧化层;然后磁控溅射 Ti 和 Au,由于磁控溅射 Au 太薄,再进行电镀 Au,然后腐蚀 Au 形成天线形状,加载 MEMS 开关.

### 1.2 MEMS 开关的设计

开关的结构如图 3,在天线的结构制作形成基础上,采取常用可行的工艺制作<sup>[10-12]</sup>,MEMS 开关的桥由金做成,桥高  $2 \mu\text{m}$ 、厚度  $0.8 \mu\text{m}$ 、桥长  $250 \mu\text{m}$ 、桥宽  $80 \mu\text{m}$ ,开关的制作是在天线形成的基础上进行电镀  $1 \mu\text{m}$  的金作为桥墩,然后涂聚酰亚胺牺牲层,蒸金光刻得到 MEMS 桥,最后用反应离子刻蚀干法刻蚀去除牺牲层,以形成 MEMS 桥.

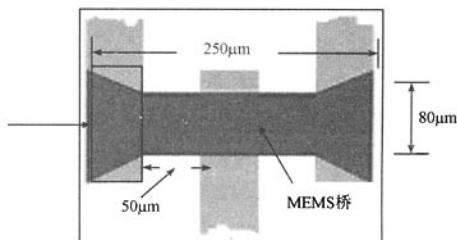


图 3 开关的具体尺寸

对 MEMS 开关构造效果使用 3D 电磁模拟软件 HFSS<sup>®</sup> 进行  $0 \sim 40 \text{ GHz}$  的散射参数模拟结果见图 4、图 5,天线设计用  $50 \Omega$  CPW 线作反馈. 此结构的 MEMS 开关的隔离度在  $1 \sim 5 \text{ GHz}$ , 优于  $25 \text{ dB}$ ,最大值为  $40 \text{ dB}$ ;插入损耗在  $50 \text{ MHz} \sim 40 \text{ GHz}$  范围内低于  $0.5 \text{ dB}$ ,获得良好的传输和隔离性能,能够满足可重构天线的要求.

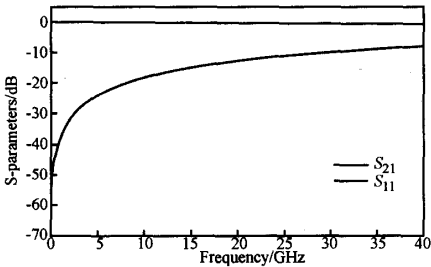


图 4 MEMS 开关关态时的模拟 S 参数

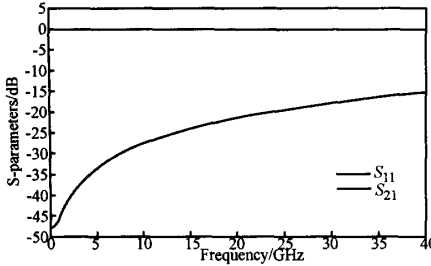


图 5 MEMS 开关开态时的模拟 S 参数

2 天线的结果和讨论

采用 Ansoft HFSS 天线设计软件来实现有限元算法,完成波导缝隙行波天线的仿真,这是非常有效的方法,能够获得满意的结果.可以计算由于材料和辐射带来的损耗,直接得到特性阻抗、传播系数、S 参数及电磁场、辐射场、天线方向图等结果.图 6 为仿真而进行的设计,利用 HFSS 本身建模;设置材料特性、定义端口、设置边界条件.强辐射区选在

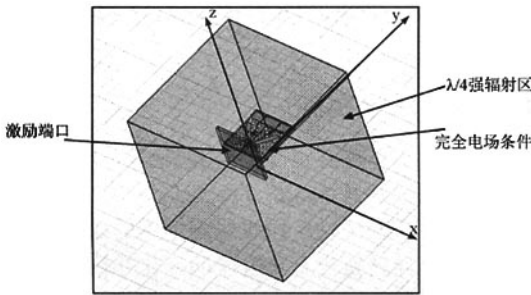
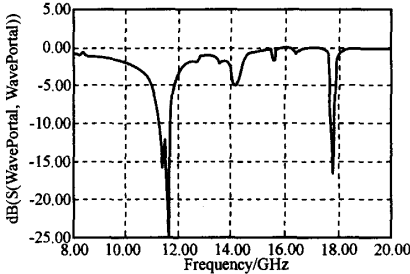
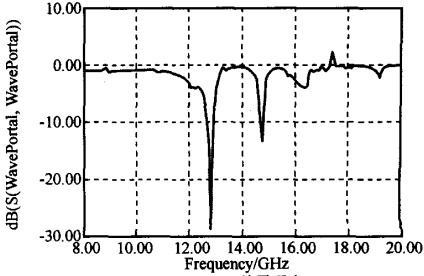


图 6 天线的建模及仿真需要的条件设置

$\lambda/4$  处,定义的完全电场条件、激励端口等见图 6.如图 7 所示,当 MEMS 开关断开即未加直流控制偏压时,天线的谐振频率为 11.7 GHz;当 MEMS 开关导通即加直流控制偏压时,天线的谐振频率变为 12.7 GHz.此谐振频率和由式(1)计算的频率基本一致,并且都具有较低的辐射损失.这样,天线就实现了在两个不同频段的工作.将 2 个开关的开态和关态组合,还可产生其他谐振频点.但开关模式切换带来一个棘手的问题是天线内部电联系的变化会导致一定



(a) MEMS 处于断开



(a) MEMS 处于开启

图 7 MEMS 开关不同状态下的 S<sub>11</sub> 仿真曲线

程度的阻抗失配.但是本天线设计中由于 MEMS 开关处于开关时带来了缝隙长度改变,这需要馈电点位置重新设置.本设计没有改变馈电点位置,也获得了好的结果,但是这也需要在设计中要注意在不同频点间折衷优化馈电点位置.

图 8 为当 MEMS 开关天线 E 面辐射方向图,虽然开关处于加载开态,但是天线的电场辐射为双向辐射,天线增益约为 2.2 dB.从仿真结果看天线还具有双频特性,这是由于在设计天线时加了旁支缝隙,利用简单的天线结构就实现了双频.

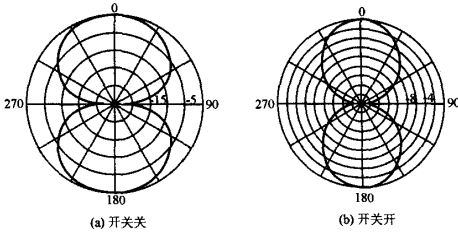


图 8 天线的 E 面辐射方向图

3 结 论

在硅衬底上研究和设计了一种在 K $\mu$  波段的共平面波导馈电的频率分别为 11.7 GHz 和 12.7 GHz 的双波段缝隙天线,此设计利用 RF-MEMS 开关来实现天线的频率重构;天线结构紧凑、共平面波导馈电;采用 3D 电磁模拟软件 HFSS® 模拟了天线在低频和高频的反射损失分别为 29.5 dB 和 25 dB;并且天线在低频和高频都有较高的辐射效率.本设计采

(下转第 2431 页)

性误差不超过 0.1%FS.

表 1 传感器全量程检定结果

正 向		反 向	
位置/mm	偏差/ $\mu\text{m}$	位置/mm	偏差/ $\mu\text{m}$
0.0	0.00	0.0	0.00
0.1	0.9	-0.1	0.7
0.2	1.6	-0.2	1.6
0.3	2.1	-0.3	2.1
0.4	2.5	-0.4	2.6
0.5	2.7	-0.5	2.8
0.6	2.5	-0.6	2.7
0.7	2.0	-0.7	2.4
0.8	1.0	-0.8	1.4
0.9	-1.6	-0.9	0.0
1.0	-2.8	-1.0	-2.0

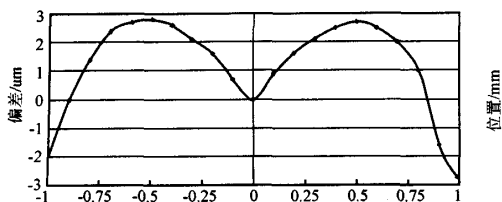


图 7 传感器非线性测试(不修正条件下)

## 7 结束语

本文提出一种半桥式电感传感器,采用集成信

号调理电路实现信号激励,采用 Delta-Sigma 型高速 ADC 实现信号转换,并将过信号采样和平均值滤波方法有机融合,在动态响应达 100Hz 条件下实现了实现深亚微米精度的位移测量精度,而且具有很好的稳定性.该方法通用性耗,成本较低,工作可靠,因此具有广泛的应用前景.

## 参考文献:

- [1] 贾伯年,俞朴. 传感器技术[M]. 南京:东南大学出版社,2000.
- [2] 石成英,李忠科. 电感式微位移测量仪的设计与实现[J]. 自动化仪表,2005,3:10-12.
- [3] Analog Device Inc., Data Sheet, LVDT Signal Conditioner [S]. AD698.
- [4] 易韦韦,张杞,刘国福. 24 位 AD 转换芯片 ADS1210 测量精度的提高[J]. 测控技术与设备,2003,7:30-31.
- [5] 张道明,郝继飞,张兆中.  $\Sigma$ - $\Delta$  转换方法在职能仪表上的应用[J]. 现代电子技术,2004,7:89-91.
- [6] Burr-Brown Inc., Data Sheet, 22-bit Analog-to-Digital Converter[S]. ADS1212/1213.
- [7] 诸邦田. 电子电路实用抗干扰技术[M]. 北京:人民邮电出版社.
- [8] 李锂,高丽. 采用过采样和求平均值法实现对温度的精确测量[J]. 新技术新工艺,2005,3:25-26.

(上接第 2427 页)

用 IC 工艺制作,为下一代无线通讯和天线集成具有重要的参考价值.

## 参考文献:

- [1] Sengupta D L. Resonant Frequency of a Tunable Rectangular Patch Antenna[J]. Electron Letter, 1984,20(15): 614-615.
- [2] Guney K. Resonant frequency of a Tunable Rectangular Microstrip Patch Antenna[J]. Microwave Opt. Technology Letter. 1994,7(12):581-585.
- [3] Mishra R K, Pattnaik S S and Das N. Tuning of Microstrip Antenna on Ferrite Substrate [J]. IEEE trans. Antennas Propagation, 1993,41(2):230-233.
- [4] Dimitrios Peroulis, KamaL Sarabandi and Katehi Linda P B. Design of Reconfigurable Antennas[J]. IEEE trans. Antennas Propagation. 2005,53(2):645-654.
- [5] Brown E R. RF-MEMS Switches for Reconfigurable Integrated Circuits[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1998, 46(11): 1868-1880.
- [6] Bozler C, Drangmeister R, Duffy S, Gouker M, Knecht J,

Kushner L, Parr R, Rabe S, and Travis L. MEMS Microswitch Arrays for Reconfigurable Distributed Microwave Components[C]//Proc. 2000 IEEE Antennas Propagation Soc. Int. Symp, 2000, 2:587-591.

- [7] Ansoft Corporation, High Frequency Structure Simulator, version 9.1[S], Oct. 2003.
- [8] Bhobe A U, Holloway C L, Piket-May M, and Hall R. Coplanar Waveguide Fed Wideband Slotantenna[J]. IEEE Electronics Letters, 2000, 36(16):1340-1342.
- [9] I J 鲍尔, P. 布哈蒂亚, 微带天线[M]. 北京:电子工业出版社, 1985.
- [10] Muldavin J B and Rebeiz G M. All-Metal High Isolation Series and Series/Shunt MEMS Switches[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2001,11(9): 373-375.
- [11] Pacheco S, Katehi L P B, and Nguyen C T. Design of Low Actuation RF MEMS Switch[C]// IEEE Microwave Theory and Techniques Symp. Dig. 2000,1:165-170.
- [12] Gabriel M Rebeiz. RF MEMS Theory, Design, and Technology[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

## 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,一直致力和专注于微波、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>