

一种 K 波段双桥电容式 RF MEMS 开关的设计与制作*

雷啸锋 刘泽文 宣云 韦嘉 李志坚 刘理天

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 介绍了一种 K 波段双桥结构的电容式 RF MEMS 开关. 该开关的结构特点是, 以共面波导上的悬空金属膜为双桥结构, 并且膜桥的支撑呈折叠弹簧结构. 使用 Agilent ADS 软件对该开关进行了设计和优化, 结果表明, 相比传统电容式单桥开关, 该开关隔离度性能得到了很大提高. 利用表面微机械工艺, 在高阻硅衬底上制备了开关样品. 双桥开关的在片测试结果表明: 驱动电压为 19.5V, “开”态的插入损耗约 1.6dB @19.6GHz, “关”态的隔离度约 46.0dB @19.6GHz.

关键词: RF MEMS; 开关; 双桥结构; 高隔离度

PACC: 2220; 2570; 3220D

中图分类号: TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)07-1442-06

1 引言

射频微机械开关在雷达、卫星通信、无线通信、测试仪器等系统中有很好的应用前景^[1]. RF MEMS 开关通常可分为电容耦合式^[2,3]和电阻接触式两大类^[4~6]. 一般来说, 电阻接触式开关适用于 1~10GHz 频段内, 为了获得较低的插入损耗, 要求开关接触部分的电阻须控制在 0.5 Ω 以内, 这使得开关的制作工艺变得复杂, 并且存在产生高压电弧等导致器件失效的可能因素^[7]. 另外, 电阻接触式开关在大功率传输上有一定的限制^[8].

电容耦合式开关具有良好的高频特性、寿命长、可靠性高, 而且制作工艺较为简单, 易于产品化. 传统桥式电容开关的隔离性能与“关”态电容密切相关, 高的“关”态电容可以获得高隔离度. 但大部分开关以氮化硅作为介质, 在 30GHz 以上才有较好的隔离性能. 近年来对以 BST, Ta₂O₅ 等高介电常数材料作开关介质的报道较多^[9], 开关性能较好, 但是工艺复杂、兼容性差.

本文主要讨论一种高性能双桥电容开关的设计和制作. 通过引入折叠弹簧结构, 采用双桥结构等方式, 使开关在相对较低的频率下具有良好的微波性

能.

图 1 为我们设计的双桥电容式开关的剖面示意图和俯视图. 开关由衬底、共面波导、介质层和最上层的悬空金属膜组成. “开”态时, 微波信号通过共面

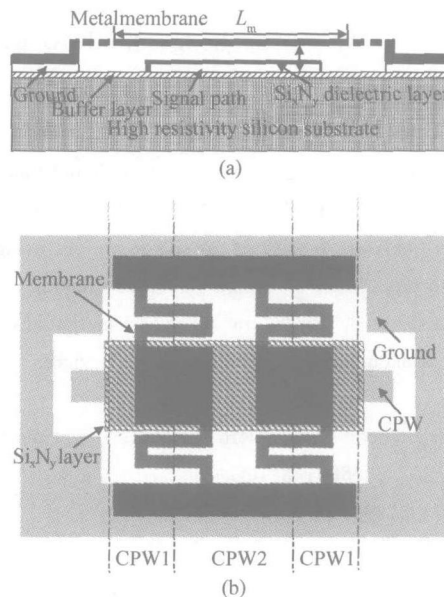


图 1 双桥折叠弹簧开关结构示意图 (a) 开关的横截面图; (b) 开关的俯视图

Fig.1 Schematic of the 2-bridge spring switch (a) Cross section; (b) Top view

*国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号: G1999033105)

雷啸锋 男, 博士研究生, 从事 RF MEMS 研究.

2004-11-04 收到, 2005-01-13 定稿

波导传播,从开关的一端进入,另一端输出.当信号线与地线之间叠加一个大于阈值电压的直流电压时,上金属膜会在静电力作用下,向下吸合在介质层上,使得信号线上的微波信号通过电容耦合到地,这时开关处于“关”态;如果撤掉直流电压,上金属膜在弹性回复力的作用下,回到原来的“开”态位置.

2 开关设计

一般来说,由于 MEMS 开关的尺寸约在 1mm 以下,而 30GHz 的电磁波波长的十分之一为 1mm,因此,在小于 30GHz 的频率范围内,可以采用集总参数的模型来表征 RF MEMS 的电学特性^[10],所带来的误差很小.

图 2 所示为双桥电容式开关的等效电路图,其中,CPW1 和 CPW2 均如图 1(b)所示.CPW1 代表信号入/出端面到单桥中心位置的共面波导,CPW2 代表两单桥中心位置之间的共面波导. C, L_s, R_s 分别代表单桥膜结构的等效电容,等效电感和等效电阻.对应于“开”“关”状态, C 分别有不同的值 C_{on} 和 C_{off} .

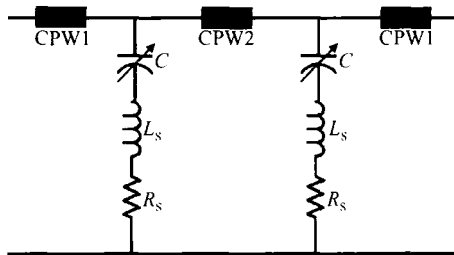


图 2 双桥折叠弹簧开关等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit model of the 2-bridge spring switch

为了阻抗匹配的需要,共面波导需设计成 50 Ω . 我们采用 Agilent ADS 软件的 Linecalc 工具,选用高阻硅作为衬底,Au 为材料,最终确定共面波导 CPW1 和 CPW2 的尺寸为:信号线宽度 196 μm ,信号线与地线间隔 120 μm .

$C_{on}, C_{off}, L_s, R_s$ 的值由开关的结构参数和材料参数决定.各参数的计算如下所示:

电容 C_{on} 的值可以用平行板电容公式结合边缘效应修正来计算:

$$C_{on} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{g_0 + t_d / \epsilon_d} (1 + \dots) \quad (1)$$

其中 S 是单桥结构上下电极的正对面积; ϵ_d 和 t_d 分别是介质层的介电常数和厚度; g_0 为桥膜与介质层之间的空气层厚度; ϵ_d 代表边缘效应 (fringing effect),一般取值为 0.2 ~ 0.6^[10].

电容 C_{off} 的值可以用平行板电容公式结合经验因子来计算:

$$C_{off} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{t_d} \quad (2)$$

其中 $\epsilon_0 \epsilon_r S / t_d$ 代表的是理想情况下的平行板电容,实际上,一定的工艺条件下造成介质层表面粗糙,牺牲层释放有微量残余,桥膜具有不均匀的应力分布,从而造成加电压时吸和不紧密等现象,这使得“关”态电容大大减小; k 代表了该工艺条件下,电容减小的经验因子,它是一个无量纲的常数.

等效电感 L_s 可以用 Ansoft HFSS 等软件对折叠弹簧开关结构进行仿真得到.

电阻 R_s 可以通过计算导体的趋肤效应得到的电阻 R_{cond} 加上由于制作工艺引起的金属之间的欧姆接触电阻 R 得到.

$$R_s = R_{cond} + R \quad (3)$$

$$R_{cond} = \frac{l}{w (1 - e^{-t/\delta})}, \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu}} \quad (4)$$

其中 δ 是金属的趋肤深度; ω 为角频率; μ 为磁导率; σ 为电导率; w 和 t 分别为导体的宽度和厚度.

在“开”状态, C_{on} 是影响开关插入损耗的关键因素.而(1)式反应了空气层的厚度 g_0 越大, C_{on} 越小,从而插入损耗越小.但是大的 g_0 意味着阈值电压的升高.结合制作工艺因素,优化后的 g_0 为 3 ~ 4 μm .

在“关”状态,理论分析表明^[10], C_{off}, L_s, R_s 对开关的隔离度都有较大的影响.较大的 C_{off} 和 L_s 有利于降低“关”态的谐振频率,而较小的 R_s 可以使得谐振点附近的隔离度明显提高.已经有人研制出单桥折叠弹簧结构的电容式开关^[11].图 3 所示为当 C_{off} 值不变时,不同的 L_s 和 R_s 对双桥开关“关”态隔离度影响的模拟结果.可以看出较大的 L_s 可以使“关”态谐振频率明显降低,从而实现开关在相对较低频段下工作.图 3 同时给出了 R_s 对“关”态隔离度的影响.在研究中我们通过增加金属桥膜的厚度来减小 R_s ,采用折叠弹簧结构增大 L_s ,以改善开关的隔离度.

通过优化设计和基于(1) ~ (4)式的计算,得到各个参数值为: $C_{on} = 0.1\text{pF}, C_{off} = 1.3\text{pF}, L_s =$

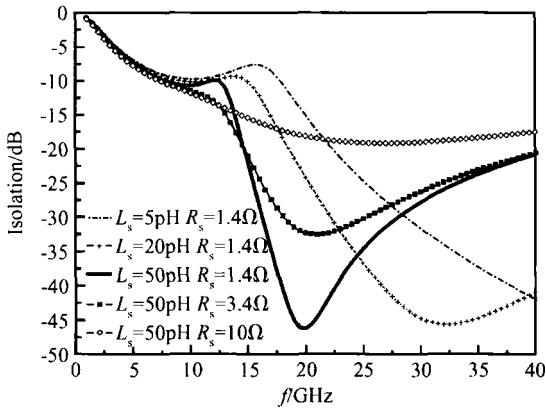


图 3 L_s 和 R_s 对双桥开关“关”态隔离度影响的模拟结果
 Fig. 3 Simulation result of isolation with different L_s and R_s

50pH, $R_s = 1.4 \Omega$. 将参数导入 ADS 软件进行仿真, 可以得到双桥折叠弹簧开关的微波性能仿真结果. 插入损耗仿真结果如图 4 所示.

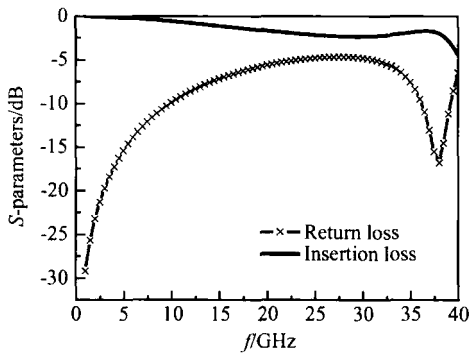


图 4 双桥折叠弹簧开关“开”态插入损耗仿真结果
 Fig. 4 Simulation result of “ON” state insertion loss of the 2-bridge spring switch

图 5 所示为双桥折叠弹簧式开关与传统单桥开关的隔离度性能比较. 从图中可以看出, 经过优化设计的开关, 由于具有双桥结构, 可双重隔离信号来提高隔离度. 同时, 开关的折叠弹簧结构能增加等效电感, 降低了开关的谐振频率. 在 17 ~ 31 GHz 频段, 隔离度性能远好于传统的单桥开关.

图 6 所示为双桥折叠弹簧结构开关与相同结构单桥开关的隔离度性能比较. 从图中可以看出, 与同结构单桥开关相比, 双桥折叠弹簧开关的谐振频率未变, 而谐振频率附近频段的隔离度却有了大于 20dB 的提高.

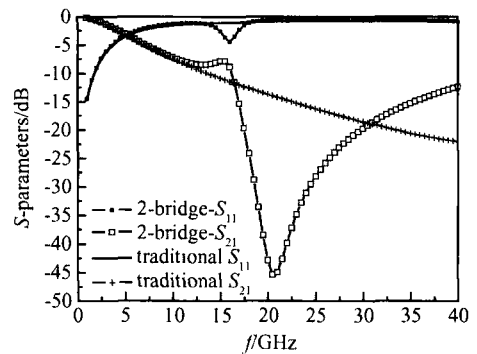


图 5 双桥折叠弹簧开关与传统单桥开关的隔离度比较
 Fig. 5 Isolation comparison of 2-bridge spring switch and traditional 1-bridge switch

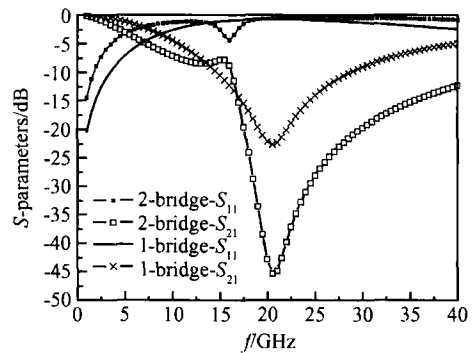


图 6 双桥折叠弹簧开关与单桥折叠弹簧开关的隔离度比较
 Fig. 6 Isolation comparison of 2-bridge spring switch and 1-bridge spring switch

3 双桥电容式开关的制作工艺

图 7 是双桥电容开关的制作工艺流程图, 主要制作步骤简述如下:

(1) 采用高阻硅片 (~900 cm) 作为衬底. 首先热生长一层 800nm ~ 1μm 的 SiO₂ 作为缓冲层; 然后溅射总厚度为 200nm 的 Au/ TiW, 作为电镀的种籽层; 接下来, 旋涂一层聚酰亚胺, 热处理后刻蚀聚酰亚胺, 以聚酰亚胺为电镀模具; 最后电镀厚 Au, 作为开关的共面波导, 如图 7(a) 所示.

(2) PECVD 一层 300nm 的 Si_xN_y 作为开关的介质层. 刻蚀 Si_xN_y, 然后旋涂第二层聚酰亚胺, 并进行热处理, 如图 7(b) 所示.

(3) 刻蚀两层聚酰亚胺, 余下的聚酰亚胺作为牺牲层, 如图 7(c) 所示.

(4) 溅射 Al 作为上层金属. 刻蚀 Al, 开小孔以利于牺牲层的释放. 刻蚀种籽层, 然后将样品进行合

金处理,如图 7(d)所示.

(5)采用 O₂ Plasma 刻蚀,将两层聚酰亚胺牺牲层完全去掉.释放后的开关结构如图 7(e)所示.

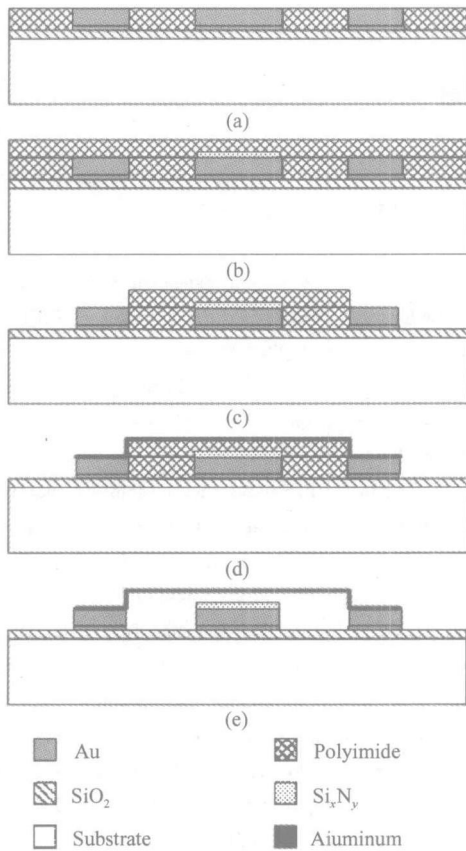


图 7 双桥折叠弹簧开关的主要工艺流程

Fig. 7 Fabrication process of 2-bridge spring switch

本工艺流程的特点是采用了两层聚酰亚胺作为牺牲层.第一层聚酰亚胺作为电镀模具,电镀完毕后并未马上去掉,而是保留作为牺牲层.并且电镀前,先用台阶仪测试模具的厚度,然后用较小的电流密度进行电镀 Au,以确保电镀完成后的 Au 波导和模具同高度,保证了硅片表面的平整,以利于后续工艺.最后,由于开关的上层金属膜很平整,成品率得到了显著提高.

而普通的做法是使用光刻胶作为电镀模具,电镀完毕后去掉模具.这种做法会使后续工艺,如旋涂牺牲层,受到硅片表面不平(电镀层一般厚度为几个微米)的影响,使得牺牲层有起伏,最终导致开关的上层金属膜不平整,影响整个开关的成品率和性能.

本工艺流程的另一特点是温度不超过 350 .

4 实验结果和讨论

图 8 是我们制作的开关样品扫描电镜照片.经测量,陪测单桥折叠弹簧开关的阈值电压为 12V 左右.考虑到双桥开关必须同时动作,而实际制作过程中的工艺误差会造成两个开关阈值电压偏差,因此要施加较高的驱动电压.测试结果表明,较高的电压(19.5V)可以保证双桥同时开关.

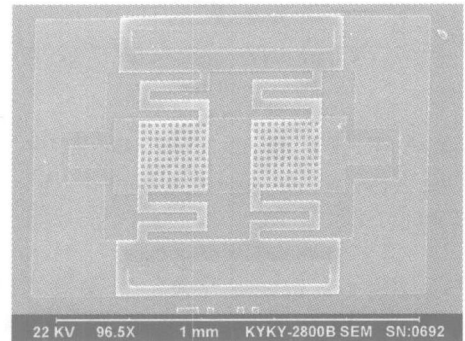


图 8 双桥折叠弹簧开关的 SEM 照片

Fig. 8 SEM photograph of 2-bridge spring switch

双桥折叠弹簧开关样品采用 Suss PM-5 型微波探针台和 HP 8722ES 矢量网络分析仪,在大气环境下进行在片测试,测试频段为 0.05 ~ 40 GHz.测试结果显示,在“开”状态,开关的插入损耗为 1.6dB @19.6 GHz,如图 9 所示;在“关”状态,开关的隔离度达到 46.0dB @19.6 GHz,如图 10 所示.插入损耗较大的原因主要来自以下两点:一是设计的上极板面积较大,这样虽然使得 C_{off} 较大有利于提高隔离度,但同时也造成 C_{on} 较大使得开关插损变坏;另一点是我们采用的衬底的电阻率不够高,仅为 900 .

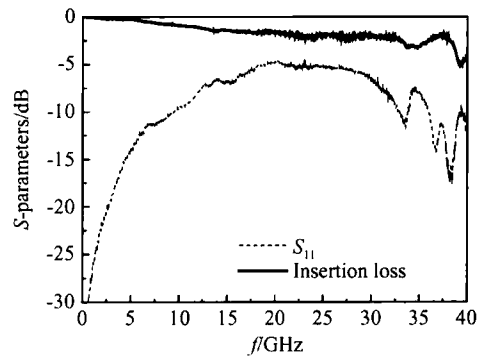


图 9 双桥折叠弹簧开关在“开”状态的插入损耗

Fig. 9 Insertion loss of 2-bridge spring switch in the “ON” state

cm,共面波导的损耗较大造成开关插损变坏.若加大上下电极之间的空气层高度,并采用更高电阻率的硅衬底,开关的插损将得到明显改善.

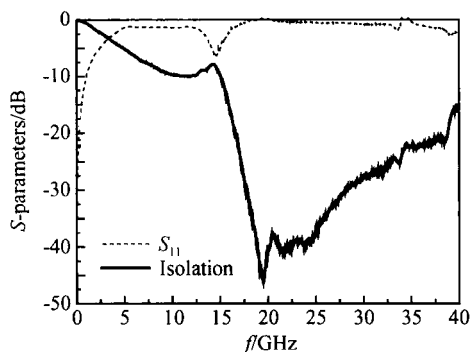


图 10 双桥折叠弹簧开关在“关”状态的隔离度

Fig. 10 Isolation of 2-bridge spring switch in the “OFF” state

图 11 给出了双桥电容开关的 S 参数测试结果和 ADS 模拟结果.从图中可以看出,测试结果与模拟结果吻合得很好.

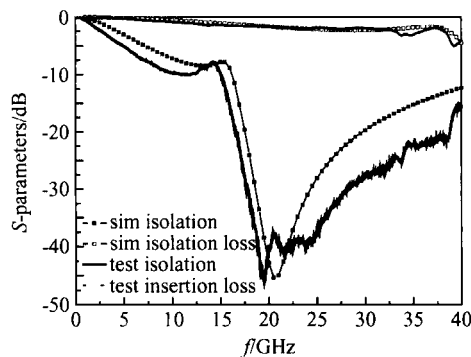


图 11 开关 S 参数测试结果和模拟结果的对比

Fig. 11 S parameters comparison of test results and simulation results

5 结论

本文设计和制作了一种高性能的 RF MEMS 开关.与传统的电容式 MEMS 开关不同,该开关采用双桥结构,并且膜桥的支撑为折叠弹簧结构,不仅降低了开关的阈值电压,而且提高了开关隔离度,降低了开关的“关”态谐振频率.在制作工艺上,该开关采用常规的 Si_xN_y 作为介质层,整个工艺中流程温

度不超过 350 .所研制的开关样品性能为:驱动电压为 19.5V,插入损耗为 1.6dB @19.6GHz,隔离度为 46.0dB @19.6GHz.开关的插入损耗可以进一步降低,例如改善衬底材料,增加上下电极之间的空气层厚度等.

参考文献

- [1] Brown E R. RF MEMS switches for reconfigurable integrated circuits. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1998, 46 (11) : 1868
- [2] Goldsmith C L, Yao Zhimin, Eshelman S, et al. Performance of low-loss RF MEMS capacitive switches. *IEEE Microw Guided Wave Lett*, 1998, 8(8) :269
- [3] Zhang Zhengyuan, Wen Zhiyu, Xu Shiliu, et al. RF MEMS switch on poly-silicon substrate. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(8) :798
- [4] Yao J J, Chang M F. Surface micromachined miniature switch for telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4GHz. *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Proceedings*, 1995:384
- [5] Zhu Jian, Lin Jinting, Lin Liqiang. DC-20GHz RF MEMS switch. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(6) :706
- [6] Guo Fangmin, Lai Zongsheng, Zhu Ziqiang, et al. Design of micro electro mechanical system RF switch. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(11) :1190 (in Chinese) [郭方敏, 赖宗声, 朱自强, 等. 悬臂式 RF MEMS 开关的设计与研制. *半导体学报*, 2003, 24(11) :1190]
- [7] Hu Xiaodong, Pan Jing, Lu Miao, et al. Failure mechanisms of a micro fabricated relay. *International Journal of Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2002, 3(3/4) :361
- [8] Lu Miao, Zhao Zhengping, Lou Jianzhong, et al. Thermal effects and RF power handling of DC ~ 5 GHz MEMS switch. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(7) :749
- [9] Lei Xiaofeng, Liu Zewen, Xuan Yun, et al. Fabrication of RF MEMS switch using high k materials as dielectric layer. *Measurement and Control Technology*, 2004, 23(3) :7 (in Chinese) [雷啸锋, 刘泽文, 宣云, 等. 高介电常数介质 RF MEMS 开关的制作研究. *测控技术*, 2004, 23(3) :7]
- [10] Muldavin J B, Rebeiz G M. High-isolation CPW MEMS shunt switches-part 1: modeling. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2000, 48(6) :1045
- [11] Park J Y, Kim G H, Chung K, et al. Electroplated RF MEMS capacitive switches. *Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2000 :639

Design and Fabrication of K-Band Double Bridge Capacitive MEMS Switches *

Lei Xiaofeng, Liu Zewen, Xuan Yun, Wei Jia, Li Zhijian, and Liu Litian

(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract : Design and fabrication of a novel K-band capacitive RF MEMS switch are reported. The switch consists of two suspended metallic membranes supported by a serpentine flexible spring over a coplanar waveguide. The design, which is realized with commercial EDA tools, is optimized based on a series of simulations. The simulations show that the proposed switch structure presents improved isolation in a relatively low RF frequency (K band). This switch is made using a silicon surface micromachining process. On wafer measurement is carried out. The threshold voltage is less than 19.5V, the insertion loss is 1.6dB @ 19.6GHz, and the isolation is 46.0dB @ 19.6GHz.

Key words : RF MEMS; switch; double bridge; high isolation

PACC : 2220; 2570; 3220D

Article ID : 0253-4177(2005)07-1442-06

* Project supported by the State Key Program for Basic Research of China (No. G1999033105)

Lei Xiaofeng male, PhD candidate. He is engaged in research on RF MEMS.

Received 4 November 2004, revised manuscript received 13 January 2005