

SP4T RF MEMS Switch with Low Actuation Voltage *

HU Guang-wei, LIU Ze-wen^{*}, HOU Zhi-hao, LI Zhi-jian
(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An electrostatic actuated SP4T (single-pole multi-throw) contact RF MEMS switch with low voltage is designed and fabricated. SiON (silicon oxynitride) with low initial stress is used as the functional material of the fixed-fixed bridge of the unit switch, and gold as the contact metal. The whole SP4T switch consists of coplanar waveguide which meets 50 Ω characteristic impedance match, an input port, four output ports, four static actuated bridges, and four control pads. Measurements show the actuation voltage is 18.8 V, insertion loss $S_{21} < 0.26$ dB @DC-3 GHz, $S_{31} < 0.46$ dB @DC-3 GHz, isolation $S_{21} > 69.5$ dB @DC-3 GHz, $S_{31} > 69.2$ dB @DC-3 GHz. The results indicate that four output ports present very similar isolation, and their insertion loss are enough small at low frequency band.

Key words: RF MEMS; switch; SPMT; contact

EEACC: 2180B; 0520D

一种低驱动电压的 SP4T RF MEMS 开关 *

胡光伟, 刘泽文^{*}, 侯智昊, 李志坚

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 设计并制备了一种低电压的静电驱动接触式单刀四掷 (SP4T) RF MEMS 开关。单元开关采用以低应力氮氧化硅 (SiON) 作为桥膜的双端固定桥式结构, 并利用附着的金层形成接触结构。整个 SP4T 开关包括与 50 Ω 特征阻抗相匹配的共面波导, 1 个输入端, 4 个输出端, 4 个静电驱动的侧拉桥, 以及 4 个驱动引出区 (pad)。测试数据表明, 开关驱动电压 18.8 V; 插入损耗 $S_{21} < 0.26$ dB @DC-3 GHz, $S_{31} < 0.46$ dB @DC-3 GHz; 隔离度 $S_{21} > 69.5$ dB @DC-3 GHz, $S_{31} > 69.2$ dB @DC-3 GHz。结果显示, 此开关的隔离度在所有输出端有很好的 consistency, 插损在 DC-3 GHz 的频段内均较小, 非常适合低频使用。

关键词: RF MEMS; 开关; 单刀多掷; 接触式

中图分类号: TN 385; TN62; TN305.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-1699(2008)04-0656-04

单刀多掷 (single-pole multi-throw, SPMT) 开关广泛应用于微波、毫米波通讯系统, 如多频段选择器、滤波器组^[1]、相移器、收发通路选择器、宽带调谐网络^[2]等。相比于传统的 PIN 和 MESFET 开关, RF (radio frequency) MEMS (microelectromechanical system) 开关具有低功耗、低插损、高隔离度、高线性度等优点^[3-4]。因此, 近年来各种类型的 MEMS SPMT 开关^[5-9] 日益成为研究热点, 其中以传统金属桥接触式开关^[10] 最为常见。然而, 此类开关高达数十伏的驱动电压^[11], 限制了它的应用范

围, 尤其是在移动通讯领域。

本文设计并制备了一种静电驱动的单刀四掷 (single-pole four-throw, SP4T) 接触式 RF MEMS 开关。它以低应力的氮氧化硅 (SiON) 介质作为桥膜功能材料, 降低开关的驱动电压, 并实现信号通路和控制电路的自然隔离。把接触金属和控制上电极都制备在桥膜下部, 以提高桥膜的机械可靠性。经测试, 开关下拉电压为 18.8 V; 在 0.1 W RF 功率下, 开关寿命为 5 百万次; 适合在 DC-3 GHz 频段应用。

基金项目: 国家自然科学基金资助 (60576048); 北京市科委项目基金资助 (GYK05070014)

收稿日期: 2007-09-30 **修改日期:** 2008-03-04

1 设计和制备

1.1 开关设计

设计的 SP4T MEMS 开关主体结构由共面波导、4 个单元开关和电极引出端组成,如图 1 所示。4 个通路设计为对称结构,尽可能保证输出信号的一致性。

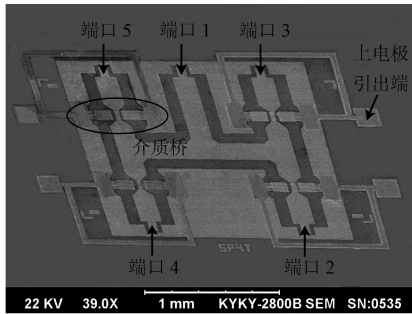


图 1 开关 SEM 照片

共面波导主要部分的尺寸为 $G/S/G = 120\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}$ 。假定衬底为高阻硅 ($900\ \Omega\cdot\text{cm}$),在 DC-10 GHz,由 ADS(Advanced Design System) 的 LineCalc 工具模拟得到的阻抗为 $50.4\ \Omega$,满足 $50\ \Omega$ 特征阻抗的匹配要求。

单元开关截面如图 2 所示。SiON 介质桥以聚酰亚胺 (polyimide, PI) 为支柱,横跨于波导上方,悬空部分尺寸为 $500\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 。接触金属和上电极都紧帖于介质桥下面,以提高桥膜的平整度,增加桥膜机械可靠性,并简化制备工艺。接触金属和上电极分断,以实现控制电路和信号通路的自然隔离。两个侧拉下电极分别与波导地线连通(图中未显示),电极上制备一层氮化硅 (SiN) 介质层,在介质桥下拉时,保证上下电极间的绝缘。波导信号线在接触区分断(图中未显示),并在分断处从 $120\ \mu\text{m}$ 窄缩为 $40\ \mu\text{m}$,以减小开关断路状态下的等效电容,提高开关隔离度。在信号线接触区域,制备系列 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ 的凸点,在开关通路状态下,保证接触金属和信号线之间的良好接触,减小插损。

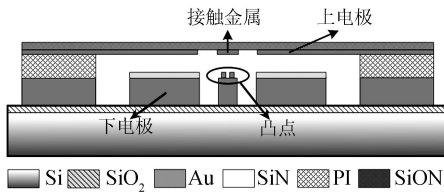


图 2 单元开关截面图

金 (Au) 具有良好的接触特性和较小的接触电阻,因此被用作开关接触区的金属材料。

工作时,在指定通路的电极引出端和地线间施加偏压,对应通路上桥膜下拉,接触金属和下方凸点

接触,该路导通,其他路隔断,不施加或撤消偏压,所有通路隔断。

1.2 低应力 SiON 制备

开关的驱动电压主要取决于桥膜的等效杨氏模量,而等效杨氏模量主要由开关结构和桥膜初始应力决定。研究表明,一定低值的张应力是桥膜的理想状态,它一方面能够降低驱动电压,另一方面能够保证桥膜在未加偏压或撤消偏压时不至于下塌(即不弹起)。

实验室用等离子体化学气相沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 设备制备的 SiN 膜一般具有数百 MPa 的张应力,二氧化硅 (SiO₂) 膜一般具有数百 MPa 的压应力。用 PECVD 制备 SiON 薄膜,并控制 N/O 比,可望得到理想的应力状态。在实验中,反复调节反应气体流量比,最终确定在 $10\% \text{SiH}_4 : \text{NH}_3 : \text{N}_2\text{O} = 32 : 12 : 8$ sccm (N₂ 标定),温度 $250\ ^\circ\text{C}$,功率 $180\ \text{W}$,频率 $13.56\ \text{MHz}$ 的工艺条件下,制备得到的 SiON 薄膜,用基底曲率法测得张应力为 $76.8\ \text{MPa}$,满足开关所需应力状态。

1.3 开关制备

设计的开关可采用与 CMOS 兼容的表面加工工艺完成,如图 3 所示。首先在高阻硅 ($900\ \Omega\cdot\text{cm}$, [100]晶向, $400\ \mu\text{m}$ 厚) 衬底上湿氧生成 SiO₂ 层,图

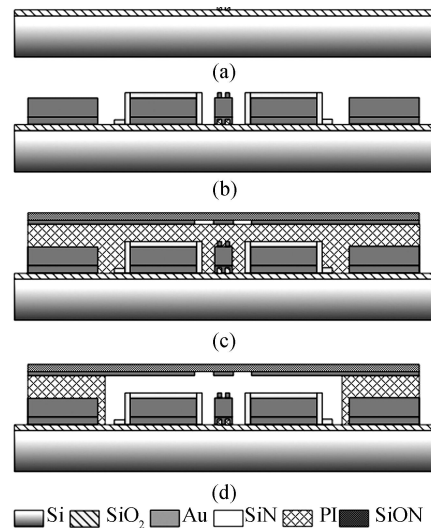


图 3 开关制备工艺流程

形化后部分减薄,得到 $0.3\ \mu\text{m}$ 高的凸点形状(见图 3(a));接着溅射 Au 种籽层,用 AZ4620 型光刻胶作模具,电镀并刻蚀多余种籽层,得到 $2\ \mu\text{m}$ 高的共面波导和下电极,信号线接触区的凸点可自然转移获得,再在下电极上 PECVD 一层 SiN 膜作为电极间隔离层(见图 (b));旋涂 PI 作为牺牲层,溅射一层 $0.3\ \mu\text{m}$ 的 Au 膜并图形化,制作接触金属和上电

极,再按上文所述工艺条件 PECVD 制备 $0.6\ \mu\text{m}$ 厚 SiON 膜,图形化并刻蚀得到带系列小孔的介质桥形状(见图(c));最后用氧等离子体刻蚀,释放 PI 牺牲层,完成制备(见图(d))。

2 测试结果和讨论

开关总体尺寸为 $3\ 580\ \mu\text{m} \times 2\ 740\ \mu\text{m}$,电子扫描显微镜(scanning electron microscope, SEM)照片如图 1 所示。

得益于接触金属和上电极都位于介质桥下面的设计结构,桥膜平整地横跨于波导上方,如图 4 所示。这种结构也提高了桥膜的机械可靠性。经测试,在 $0.1\ \text{W}$ RF 功率下,开关寿命达到了 5 百万次以上,在同类开关中处于先进水平。

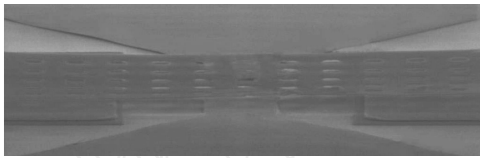


图 4 桥膜细节的 SEM 照片

开关的初始空气间距为 $2.2\ \mu\text{m}$,测得的下拉电压为 $18.8\ \text{V}$,在桥式开关中,处于领先水平。这主要是因为采用了低张应力值的 SiON 介质桥膜。在保持桥膜低应力的前提下,设计更小等效杨氏模量的桥膜结构,如 H 形桥,折叠弹簧支撑桥等,可以进一步降低驱动电压,这也是我们的后续研究工作。

事实上,开关的低驱动电压和高动作速度是一对矛盾,应该根据实际需要折衷考虑。本文制备的开关桥膜下拉速度为 $80\ \mu\text{s}$,桥膜释放直至稳定的时间为 $320\ \mu\text{s}$ 。

开关的 RF 性能通过 HP8722ES 网络分析仪和 SUSS PM5 探针台测试,结果如图 5 和图 6 所示。由于通路 1-2(端口 1-端口 2,下同)和通路 1-4,通路 1-3 和通路 1-5 的对称性,图中只画出了通路 1-2 及 1-3 的性能曲线。作为参考,图中同时给出了用 HFSS(High Frequency System Simulation)软件模拟得到的曲线。

在 DC-3 GHz 频段,测得的插入损耗 $S_{21} < 0.26\ \text{dB}$, $S_{31} < 0.46\ \text{dB}$,如图 5 所示。从理论上讲,由于通路 1-3 比 1-2 具有更大的共面波导传输拐角,插入损耗 S_{31} 大于 S_{21} ,这可以由图中模拟曲线和测试曲线得到验证。在 DC-3 GHz 频段,测得的隔离度 $S_{21} > 69.5\ \text{dB}$, $S_{31} > 69.2\ \text{dB}$,如图 6 所示。隔离度 S_{21} 和 S_{31} 差别很小,四个输出端的一致性好于 1%。图 5 显示,在插损方面测试结果和仿真结果符合较好,两曲线间的差异可能是由模型的简

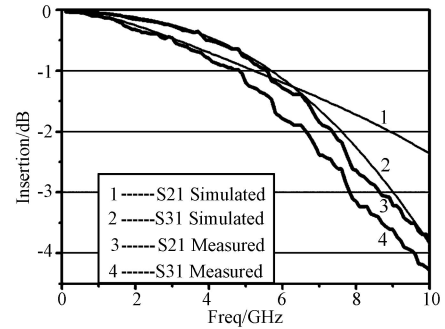


图 5 插入损耗

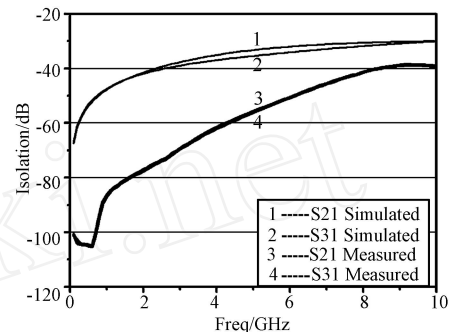


图 6 隔离度

化和工艺误差造成的。但是在图 6 中我们发现两者的差别较大,这是因为开关在开态时的实际结构参数和仿真所使用的理想参数有较大的不同而造成的。

设计的 SP4T 开关适用于 DC-3 GHz 的低频段,满足现代民用无线通信系统的需要。

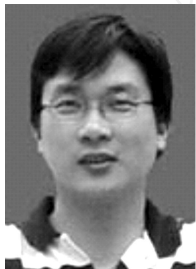
3 结论

SPMT MEMS 开关在现代无线通讯领域中有着广泛的应用前景。本文设计并制备了一种介质桥接触式 SP4T 开关。通过控制 PECVD 工艺中反应气体的流量比,得到低张应力的 SiON 薄膜。将其应用作为介质桥材料,降低了开关的驱动电压。在初始空气间距为 $2.2\ \mu\text{m}$ 的情况下,测得驱动电压为 $18.8\ \text{V}$,达到同类开关领先水平。把接触金属和上电极都制备于介质桥下面,提高了桥膜的平整度,增加了开关的机械可靠性。在 $0.1\ \text{W}$ RF 功率测试条件下,开关寿命 5 百万次以上。开关速度为下拉 $80\ \mu\text{s}$,释放 $420\ \mu\text{s}$ 。RF 性能测试表明,在 DC-3 GHz 的低频段,开关具有良好的插损和隔离度,满足现代民用无线通讯系统的要求。

参考文献:

- [1] Jaewoo Lee, Chang Han Je, Kang Sungweon, et al. A Low-Loss Single-Pole Six-Throw Switch Based on Compact RF MEMS Switches[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(11): 3335-3344.

- [2] Tang M, Palei W, Goh W L, et al. A Single-Pole Double-Throw (SPDT) Circuit Using Deep Etching Lateral Metal-Contact Switches [J]. Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International, 2004, 2: 581-584.
- [3] Yao J J. RF MEMS from a Device Perspective[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2000, 10: R9-R38.
- [4] Lucyszyn S. Review of Radio Frequency Microelectromechanical Systems Technology[J]. Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings, 2004, 151(2): 93-103.
- [5] Park Jae-Hyoung, Lee Sanghyo, Kim Jug-Mu, et al. A 35-60 GHz Single-Pole Double-Throw (SPDT) Switching Circuit Using Direct Contact MEMS Switches and Double Resonance Technique[C]// The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, 2003: 1796-1799.
- [6] Oberhammer J, Tang M, Liu A Q, et al. Mechanically Tri-stable In-line Single-Pole-Double-Throw All-Metal Switch [C]// MEMS 2006, Istanbul, Turkey, 2006: 898-901.
- [7] Suneat Pranonsatit, Andrew S. Holmes, Ian D. Robertson, et al. Single-Pole Eight-Throw RF MEMS Rotary Switch[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2006, 15(6): 1735-1744.
- [8] Liu A Q, Palei W, Tang M, et al. Single-Pole-Four-Throw Switch Using High-aspect-ratio Lateral Switches [J]. Electronics Letters, 2004, 40(18): 1125-1126.
- [9] Mojgan Daneshmand, Winter D. Yan, Raafat. R. Mansour. Thermally Actuated Multiport RF MEMS Switches and Their Performance in a Vacuumed Environment [J]. IEEE Transactions on Microwave and Techniques, 2007, 55(6): 1229-1236.
- [10] Lee Jaewoo, Je Chang-Han, Kang Seongweon, et al. A Single-Pole 6-Throw (SP6T) Antenna Switch Using Metal-Contact RF MEMS Switches for Multi-Band Applications [J]. Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International, 2005: 931-934.
- [11] Lee Seong-Dae, Jun Byoung-Chul, Kim San-Dong, et al. A Novel Pull-Up Type RF MEMS Switch with Low Actuation Voltage[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(12): 856-858.



胡光伟(1979-),男,博士研究生,主要从事 RF MEMS 开关和天线的研究, huguangwei.th@gmail.com.



刘泽文(1960-),男,教授,主要从事 MEMS 和微电子技术研究,liuzw@tsinghua.edu.cn.