

ADI公司的革命性MEMS开关技术基本原理

作者: Eric Carty、Padraig Fitzgerald和Padraig McDaid
ADI公司

摘要

本文介绍ADI公司突破性的微机电系统(MEMS)开关技术。与传统机电继电器相比, ADI公司的MEMS开关技术使RF和DC开关性能、可靠性及小型化实现了跨越式发展。

简介

过去30年来, MEMS开关一直被标榜为性能有限的机电继电器的出色替代器件, 因为它易于使用, 尺寸很小, 能够以极小的损耗可靠地传送0 Hz/dc至数百GHz信号, 有望彻底改变电子系统的实现方式。这种性能优势会对大量不同的设备 and 应用产生重要影响。在MEMS开关技术的帮助下, 很多领域都将达到前所未有的性能水准和尺寸规格, 包括电气测试与测量系统、防务系统应用、医疗保健设备。

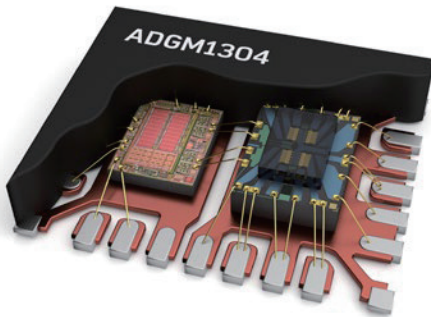


图1 ADI MEMS开关技术

目前的开关技术都或多或少存在缺点, 没有一种技术是理想解决方案。继电器的缺点包括带宽较窄、动作寿命有限、通道数有限以及封装尺寸较大。与继电器相比, MEMS技术一直就有实现最高水平RF开关性能的潜力, 其可靠性要高出好几个数量级, 而且尺寸很小。但是, 难以通过大规模生产来大批量提供可靠产品的挑战, 让许多试图开发MEMS开关技术的

公司停滞不前。Foxboro Company是最早开始MEMS开关研究的公司之一, 其于1984年申请了世界最早的机电开关专利之一。ADI公司自1990年开始通过一些学术项目涉足MEMS开关技术研究。到1998年, ADI公司终于开发出一种MEMS开关设计, 并根据该设计制作了一些早期原型产品。2011年, ADI公司大幅增加了MEMS开关项目投入, 从而推动了自有先进MEMS开关制造设施的建设。现在, ADI公司已能够满足业界一直以来的需求: 量产、可靠、高性能、小尺寸的MEMS开关取代衰老的继电器技术。

ADI公司与MEMS技术有着深厚的历史渊源。世界上第一款成功开发、制造并商用的MEMS加速度计是ADI公司于1991年发布的ADXL50加速度计。ADI公司于2002年发布第一款集成式MEMS陀螺仪ADXRS150。以此为开端, ADI公司建立了庞大的MEMS产品业务和无可匹敌的高可靠性、高性能MEMS产品制造商声誉。ADI公司已为汽车、工业和消费电子应用交付了逾10亿只惯性传感器。正是这种优良传统所带来的经验和信念将MEMS开关技术变为现实。

MEMS开关基本原理

ADI MEMS开关技术的关键是静电驱动的微加工悬臂梁开关元件概念。本质上可以将它视作微米尺度的机械开关, 其金属对金属触点通过静电驱动。

开关采用三端子配置进行连接。功能上可以将这些端子视为源极、栅极和漏极。图2是开关的简化示意图, 情况A表示开关处于断开位置。将一个直流电压施加于栅极时, 开关梁上就会产生一个静电下拉力。这种静电力与平行板电容的正负带电板之间的吸引力是相同的。当栅极电压斜升至足够高的值时, 它会产生足够大的吸引力(红色箭头)来克服开关梁的弹簧阻力, 开关梁开始向下移动, 直至触点接触漏极。该过程如图2中的情况B所示。因此, 源极和漏极之间的电路闭合, 开关现已接通。拉下开关梁所需的实际力大小与悬臂梁的弹簧常数及其对运动的阻力有关。注意: 即使在接通位置, 开关梁仍有上

拉开开关的弹簧力（蓝色箭头），但只要下拉静电力（红色箭头）更大，开关就会保持接通状态。最后，当移除栅极电压时（图2中的情况C），即栅极电极上为0 V时，静电吸引力消失，开关梁作为弹簧具有足够大的恢复力（蓝色箭头）来断开源极和漏极之间的连接，然后回到原始关断位置。

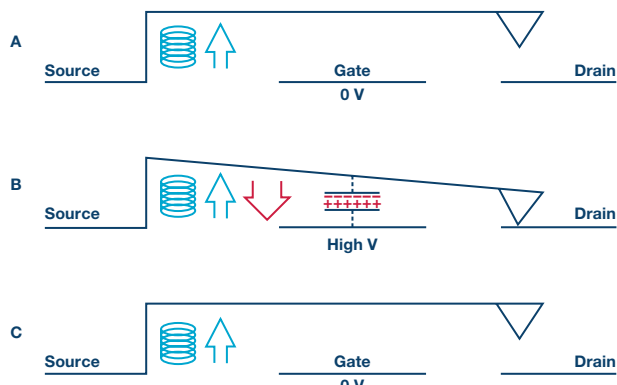


图2. MEMS开关动作过程，A和C表示开关关断，B表示开关接通

图3显示了利用MEMS技术制造开关的四个主要步骤。开关建构在一个高电阻率硅晶圆(1)上，晶圆上面沉积一层很厚的电介质，以便提供与下方衬底的优良电气隔离。利用标准后端CMOS互连工艺实现到MEMS开关的互连。低电阻率金属和多晶硅用于形成到MEMS开关的电气连接，并且嵌入到电介质层(2)中。标示为红色的金属过孔(2)用于提供到开关输入、输出和栅极电极的连接，以及焊芯片上其他位置的引线焊盘的连接。悬臂式MEMS开关本身利用牺牲层进行表面微加工，在悬臂梁下方产生气隙。悬臂式开关梁结构和焊盘(3)利用金形成。开关触点和栅极电极由低电阻率金属薄膜沉积在电介质表面而形成。

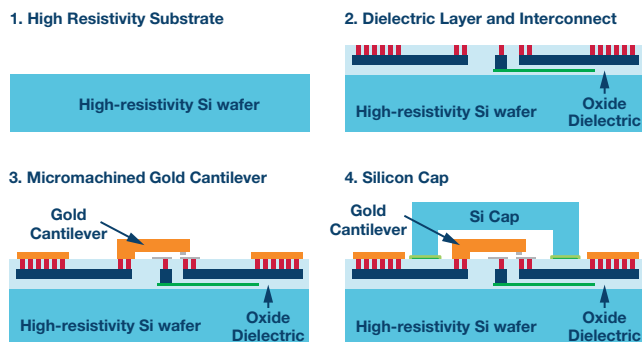


图3. MEMS开关制造概览

引线焊盘也是利用上述步骤制成。利用金线焊接将MEMS芯片连接到一个金属引线框，然后封装到塑料四方扁平无引线（QFN）封装中以便能轻松表贴在PCB上。芯片并不局限于任何一种封装技术。这是因为一个高电阻率硅帽(4)被焊接到MEMS芯片，在MEMS开关器件周围形成一个气密保护外壳。无论使用何种外部封装技术，这种气密外壳都能提高开关的环境鲁棒性和使用寿命。

图4为采用单刀四掷(ST4T)多路复用器配置四个MEMS开关的放大图。每个开关梁有五个并联阻性触点，用以降低开关闭合时的电阻并提高功率处理能力。

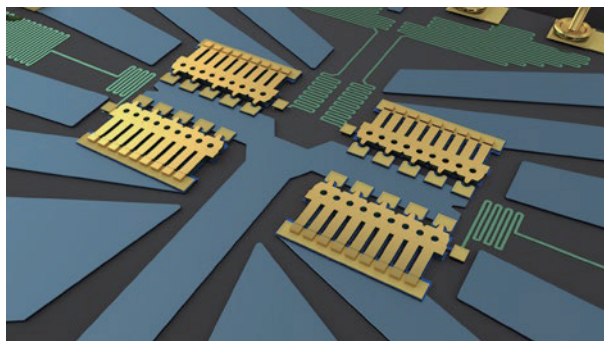


图4. 特写图显示了四个MEMS悬臂式开关梁（SP4T配置）

如开头所述，MEMS开关需要高直流驱动电压来以静电力驱动开关。为使器件尽可能容易使用并进一步保障性能，ADI公司设计了配套驱动器集成电路(IC)来产生高直流电压，其与MEMS开关共同封装于QFN规格尺寸中。此外，所产生的高驱动电压以受控方式施加于开关的栅极电极。它以微秒级时间斜升至高电压。斜升有助于控制开关梁的吸引和下拉，改善开关的动作性能、可靠性和使用寿命。图5显示了一个QFN封装中的驱动器IC和MEMS芯片实例。驱动器IC仅需要一个低电压、低电流电源，可与标准CMOS逻辑驱动电压兼容。这种一同封装的驱动器使得开关非常容易使用，并且其功耗要求非常低，大约在10 mW到20 mW范围内。

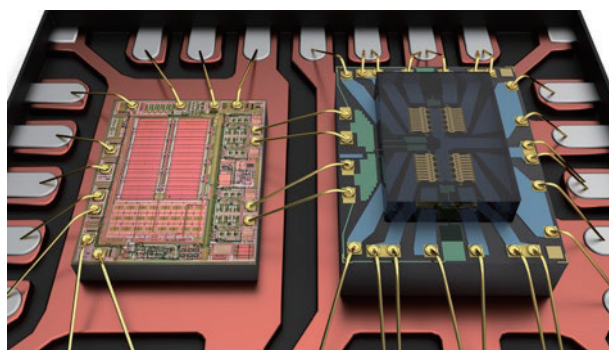


图5. 驱动器IC（左）和MEMS开关芯片（右）安装并线焊在金属引线框架上

可靠性

可靠性如何是所有新技术的主要“教义”之一，ADI公司对此极为关注。新型MEMS技术制造工艺是支持开发机械鲁棒、高性能开关设计的基础。它与气密性硅帽工艺相结合，是实现真正可靠的长寿命MEMS开关的关键。为将MEMS开关成功商业化，需要进行大量针对MEMS开关的特定可靠性测试，例如开关循环、寿命测试、机械冲击测试等。除了这种认证之外，为保证达到尽可能高的质量水准，还利用全部标准IC可靠性测试对器件进行了质量认证。表1是已进行的环境和机械测试总结。

表1. MEMS开关技术认证测试

测试名称	规范
HTOL 1 kHz, 10 亿次循环, 1000 小时	JESD22-A108
HTOL II, 在 +85°C 时开关持续接通, 1000 小时	JESD22-A108
ELF 5 kHz, 突发模式循环, 85°C, 48 小时	MIL-STD-883, M1015
HAST +130°C, 85% RH, 偏置, 96 小时	JESD22-A110
SHR MSL 3 预处理	J-STD-20
随机跌落	AEC-Q100 测试 G 5, 0.6 m
振动测试条件 B, 20 Hz 至 2000 Hz, 50 g	MIL-STD-883, M2007.3
机械冲击 1500 g 0.5 ms, 振动 50 g, 正弦扫描 20 Hz 至 2000 Hz, 加速度 30,000 g	D 组 Sub 4 MIL-STD-883, M5005
温度循环, 每小时循环一次, -40°C 至 +125°C, 1000 次循环	JESD22-A104
高温储存 +150°C, 1000 小时	JESD22-A103
高压釜 121°C, 相对湿度 100%, 96 小时	JESD22-A102

在RF仪器仪表应用中, 开关动作寿命长至关重要。相比于机电继电器, MEMS技术的循环寿命高出一个数量级。85°C时的高温工作寿命(HTOL I)测试和早期寿命故障(ELF)认证测试, 严格保证了器件的循环寿命。

持续导通寿命(COL)性能是MEMS开关技术的另一个重要参数。例如, RF仪器仪表开关使用情况各异, 某个开关可能长期保持接通状态。ADI公司已知晓这种情况, 并竭力让MEMS开关技术实现出色的COL性能以降低寿命风险。通过深入开发, COL性能已从最初的50°C下7年(平均失效前时间)提升到业界领先的85°C下10年。

MEMS开关技术经历了全面的机械鲁棒性认证测试。表1中共有5项测试用于确保MEMS开关的机械耐久性。MEMS开关元件的尺寸和惯性更小, 因此它的可靠性能比机电继电器有显著提高。

无与伦比的性能优势

MEMS开关的关键优势是它在一个非常小的表贴封装中实现了0 Hz/dc精密性能、宽带RF性能以及比继电器优越得多的可靠性。

任何开关技术最重要的品质因数之一是单个开关的导通电阻与关断电容的乘积。它通常被称为RonCoff乘积, 单位为飞秒(fs)。当RonCoff降低时, 开关的插入损耗也会降低, 关断隔离性能随之提高。

采用ADI MEMS开关技术的单个开关单元的RonCoff乘积小于8, 这保证了该技术是实现世界一流开关性能的不二选择。

利用这一根本优势和精心设计, 便可达到优异的RF性能水平。图6显示了一款QFN封装、单刀双掷(SPDT) MEMS原型开关

的实测插入损耗和关断隔离性能。26.5 GHz时的插入损耗仅为1 dB, QFN封装实现了32 GHz以上的带宽。

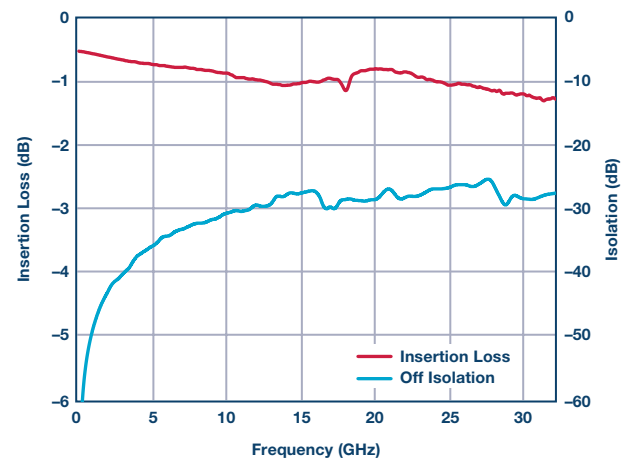


图6. SPDT MEMS开关性能, QFN封装

图7显示了在一款单刀双掷(SPST) MEMS原型开关管芯上利用探针测量测得的插入损耗和关断隔离性能的宽频扫描结果。40 GHz时的插入损耗为1 dB, 关断隔离约为-30 dB。

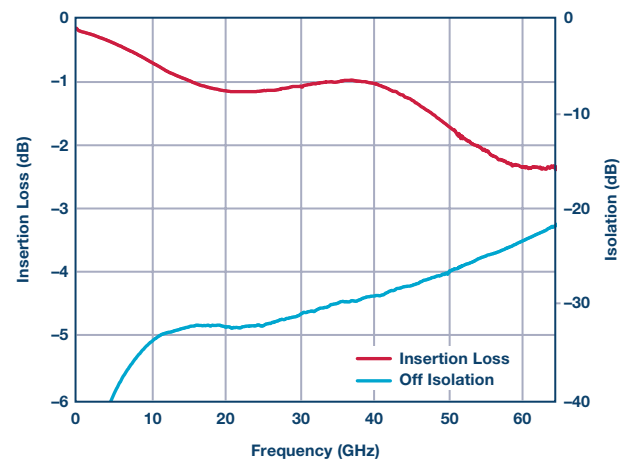


图7. SPST MEMS开关性能, 片上探针测量

此外, MEMS开关设计固有的超高性能表现在如下方面。

- 精密直流性能: 已实现 $<2 \Omega R_{ON}$ 、0.5 nA关断漏电流、-110 dBc总谐波失真(THD + N)的精密性能, 并且有能力通过梁和衬底优化全面提高性能水平。
- 线性度性能: 输入信号音为27 dBm时, 三阶交调截点(IP3)超过69 dBm。在全部工作频段上有提高到75 dBm以上的潜力。
- 动作寿命: 保证至少10亿次动作循环。这远远超过了当今市场上的任何机械继电器, 后者的额定循环次数通常少于1000万次。
- 功率处理(RF/dc): 已在全部工作频段上测试了40 dBm以上的功率, 在较低或较高频率时性能不下降。对于直流信号, 该开关技术允许200 mA以上的电流通过。

最后, 无论什么市场, 小尺寸解决方案通常都是一项关键要求。MEMS在这方面同样具有令人信服的优势。图8利用实物照片比较了封装后的ADI SP4T (四开关) MEMS开关设计和典型DPDT (四开关) 机电继电器的尺寸。MEMS开关节省了大量空间, 其体积仅相当于继电器的5%。这种超小尺寸显著节省了PCB板面积, 尤其是它使得PCB板的双面开发利用成为可能。这一优势对于迫切需要提高通道密度的自动测试设备制造商特别有价值。

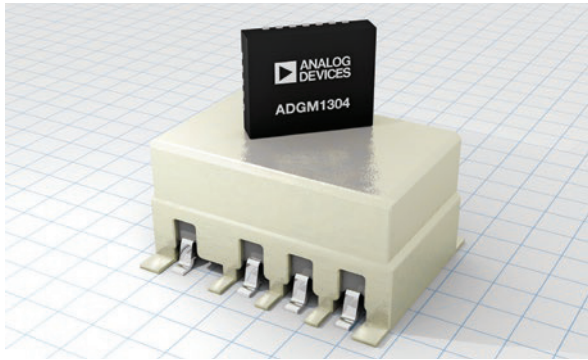


图8. ADI引线框芯片级封装MEMS开关 (四开关) 与典型机电式RF继电器 (四开关) 的尺寸比较

结语

ADI公司开发的MEMS开关技术使开关性能和尺寸缩减实现了大跨越。同类最佳的0 Hz/dc至Ka波段及以上的性能、比继电器高出若干数量级的循环寿命、出色的线性度、超低功耗要求以及芯片级封装, 使该MEMS开关技术成为ADI公司开关产品的革命性新突破。

最新MEMS开关产品

ADGM1304

集成驱动器的0 Hz/dc至14 GHz、SP4T MEMS开关

ADGM1004

集成驱动器的0 Hz/dc至13 GHz、2.5 kV HBM ESD SP4T MEMS开关

参考文献

Carty, E., Fitzgerald, P., Stenson, B., McDaid, P., Goggin, R.: “集成驱动器电路的DC至K波段超长导通寿命RF MEMS开关的开发”, 欧洲微波会议(EuMC), 欧洲微波协会(EuMA), 2016年10月4-6日。

Gabriel Rebeiz. “RF MEMS的理论、设计与技术”, Wiley, 2003年。

Goggin, R., Fitzgerald, P., Stenson, B., Carty, E., McDaid, P.: “集成驱动器电路、采用小型QFN封装、适合RF仪器仪表应用的可靠RF MEMS开关的商业化”, 国际微波研讨会(IMS), IEEE MTT-S国际大会, 2015年5月17-22日。

Goggin, R., Wong, J.E., Hecht, B., Fitzgerald, P., Schirmer, M.: “采用标准塑料封装的全集成式、高良品率、高可靠性直流接触MEMS开关技术与控制IC”, 2011 IEEE传感器研讨会, pp. 958、961, 2011年10月28-31日。

Maciel, J., Majumder, S., Lampen, J., Guthy, C.: “坚固可靠的阻性MEMS开关”, 微波研讨会文摘(MTT), IEEE MTT-S国际大会, 2012年6月17-22日。

Rebeiz G., Patel C., Han S., Ko Chih-Hsiang., Ho K.: “探寻可靠的MEMS开关”, IEEE微波杂志, 2013年一/二月号。

Stephen D. Senturia, “微系统设计”, Springer, 2000年。

作者简介

Eric Carty于1998年获得爱尔兰国立梅努斯大学实验物理硕士学位。加入ADI公司之前, 他担任了10年的RF无源器件设计工程师。2009年, 他成为ADI公司的高级应用工程师, 主要从事RF开关和MEMS技术的研发工作。他目前负责管理ADI公司的开关与多路复用器应用部门。

Padraig Fitzgerald 2002年毕业于爱尔兰利默里克大学, 获得电子工程学士学位。同年, 他加入ADI公司爱尔兰利默里克分公司, 担任固态开关评估工程师, 2007年转入开关设计领域。Padraig完成了科克理工学院关于MEMS开关可靠性的研究硕士课程。他目前是精密开关部的高级设计师兼MEMS开关器件设计师。

Padraig McDaid 1998年毕业于爱尔兰利默里克大学, 获得电子工程学士学位。Padraig负责管理ADI公司的开关与多路复用器市场营销部门, 重点关注MEMS技术研发。2009年加入ADI公司之前, Padraig曾在多家跨国公司和中小型企业从事过RF设计、应用和营销工作。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区, 与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答, 或参与讨论。

请访问ezchina.analog.com



全球总部
One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部
上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路2290号展想广场5楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司
深圳市福田区中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司
北京市海淀区西小口路66号
中关村东升科技园
B-6号楼A座一层
邮编: 100191
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司
湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路889号光谷国际广场
写字楼B座2403-2405室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA15236sc-1-11/16

analog.com/cn

