

Gabriel M. Rebeiz and Guan-Leng Tan

1.1 RF MEMS 的起源

自 20 世纪 70 年代以来, MEMS (微机电系统) 的开发成果主要是压力传感器、温度传感器、加速度计、气相色谱仪等传感器。20 世纪 80 年代初期研制出了低频应用的 MEMS 开关, 但这种开关相当长一段时间停留在实验室。它实质上是通过机械移动来实现传输线的短路或开路的一种小型器件。在 1990—1991 年, 在 DARPA (美国国防预先研究计划署) 资助下, 位于加州 Malibu 的 Hughes 休斯实验室的 Larson 博士研制出微波控制的第一个 MEMS 开关 (和变容器)^[1]。但是, 与其他技术的发展一样, 这种开关远没有成熟, 并且成品率较低, 本质上也谈不上可靠性。然而, 它却证实了 50 GHz 范围内 MEMS 开关的优异性能, 比用 GaAs 器件实现的任何开关性能都要好得多。

Larson 的初期结果是杰出的, 它激起了美国一些研究小组的兴趣, 1995 年, Rockwell (罗克韦尔科学中心和 TI 德州仪器) 公司均研制出性能优异的 RF MEMS 开关。Rockwell 开关是金属—金属接触式的开关, 适合于 DC~60 GHz 应用, 而 TI 开关是电容式接触开关, 适合于 10~120 GHz 应用。1998 年, Michigan (密歇根) 大学、UC Berkeley (加州大学伯克利分校)、Northeastern (东北) 大学、MIT (麻省理工学院) 林肯实验室、Columbia (哥伦比亚) 大学、ADI (模拟器件) 公司、Northrup Grumman 公司等积极研究 RF MEMS 器件。到 2001 年, 30 多个公司都从事 RF MEMS 研究, 其中包括生产消费类电子产品的著名公司, 如 Motorola (摩托罗拉) 公司, Analog Devices (模拟器件) 公司, Samsung (三星) 公司, Omron (欧姆龙) 公司, NEC 公司和 ST 微电子 (意法半导体公司)。

RF MEMS 在民用和军用方面有着巨大的潜力, 因此近 10 年的研究投入惊人地增加。其原因在于: 1985—2000 年, GaAs HEMT (高电子迁移率晶体管) 和 Si CMOS (互补金属—氧化物—半导体) 晶体管的研究取得了巨大进展, 而半导体开关二极管却没什么发展。1980 年, Si CMOS 晶体管的截止频率在 500 MHz 左右, 而目前已达到 100 GHz 左右; 与此同时, 1980 年, GaAs HEMT 器件的截止频率是 10~20 GHz, 现在已超过 800 GHz。但 GaAs 或 InP PIN 二极管的截止频率在 1985 年约为 500 GHz, 到 2001 年才改善到 2 000 GHz。显然, 对于低损耗应用, 需

要一种新的技术将开关器件的截止频率发展到 40 000 GHz，而 RF MEMS 器件就可以达到这种目标。

RF MEMS 的研究能在四个不同领域得到应用（图 1.1）：

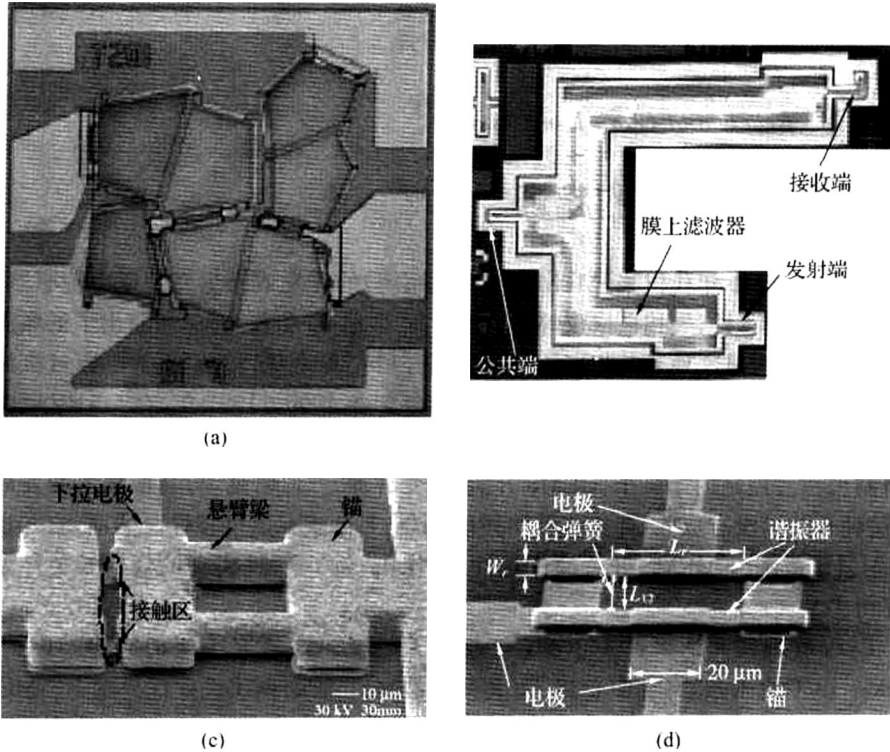


图 1.1 (a) Agilent 公司的 FBAR[3]; (b) Michigan 大学的微加工膜上的滤波器[2]; (c) Radant 的 MEMS 开关[5]; (d) 基于微机械谐振器的二极管 7MHz 滤波器[4]

- RF MEMS 开关、变容器和电感器：已表明它们可在 DC~120 GHz 范围工作，目前也是相对成熟的技术。除微加工电感外，RF MEMS 开关和变容器工作时可移动数个微米。
- 微加工传输线、高 Q 谐振器、滤波器和天线：适合于 12~200 GHz 范围工作。通常集成在薄绝缘介质上或使用体硅微机械加工技术制造，但是静止的，并不移动[2]。

FBAR（薄膜体声谐振器）和滤波器：利用薄膜的声波振动原理，3 GHz 都表现出优异的性能和高 Q 值(>2 000)。最近，用 FBAR 技术研制出无线应用的小型低损耗滤波器[3]。

- RF 微机械谐振器和滤波器：利用极小梁的机械振动，在 0.01~200 MHz 并在真空中完成高 Q 值谐振。这种情况下，机械移动在几十个 Å 的量级。利用

这种技术已制备出 200 MHz 范围的高 Q 值 ($>8\,000$) 谐振器, 但二极滤波器仅能工作到 10 MHz 范围。

因此小型化 0.1~3 GHz 滤波器的商业应用, 仍需要许多研究工作。而且, 它可能是参考时钟电路的优良解决方案。

本书仅集中介绍 RF MEMS 开关、变容器和电感器, 并不包括 RF MEMS 的其他内容。这能让我们有较多篇幅深入介绍相关器件。本书先从 RF MEMS 的机械和电学模型开始, 然后介绍制备工艺、可靠性和封装, 以及它们在高隔离开关电路、低损耗移相器、可调天线、滤波器和网络中的应用。

1.2 RF MEMS 的构造

RF MEMS 开关或变容器由两个不同的部分组成: 机械部分(执行)和电学部分(见表 1.1)。可用静电、静磁、压电或热原理为机械运动提供驱动力。与开关的设计有关, 它可以横向或纵向运动。到目前为止, 静电型热开关和静磁开关可用圆片级制造技术加工, 在 0.1~100 GHz 范围有较高的可靠性(达 $1 \times 10^8 \sim 6 \times 10^{10}$ 次循环)。开关的电学部分, 可以用串联或并联方式排列, 可以是金属—金属接触或电容式接触。这意味着使用不同的执行机制、接触方式和电路方案, 我们起码可构成 $32(2 \times 2 \times 2 \times 4)$ 种不同类型的开关。

由于静电执行开关具有许多优点: 零直流功耗、小的电极尺寸、较薄的薄层、相对短的开关时间、50~200 μN 的接触力, 以及可用高阻偏置线给开关施加偏压等, 所以静电执行是目前使用的最普遍的技术。但是, 在大多数情况下, 需要 30~80 V 的执行电压, 这就要求用 CMOS 向上变换器将 3~5 V 控制电压提升到执行电压水平。在许多设计中, 将热执行与静电(电压)维持相耦合, 或静磁执行(线圈中的电流)与永磁场相耦合。一旦开关执行, 这两种情况均可达到零功率消耗。而且, 在开关循环中它们需要较大的电流, 因此, 必须使用低阻(金或铝)引线进行偏置。由于低阻引线与微波传输线耦合, 因此必须仔细的设计以满足大量开关和偏置线构成的复杂开关网络。

表 1.1 MEMS 开关的构造

执行机制						
	电压 [V]	电流 [mA]	功耗 [mW]	尺寸	开关时间 [μs]	接触力 [μN]
静电	20~80 ^a	0	0	小	1~200	50~1 000
热	3~5	5~100	0~200 ^b	大 ^c	300~10 000	500~4 000
静磁	3~5	20~150	0~100 ^b	中	300~1 000	50~200
压电	3~20	0	0	中	50~500	50~200

续表 1.1

运动方式	
纵向	通常会导致较小尺寸的器件
横向	通常会导致较大尺寸的器件
接触类型(仅对开关)	
金属—金属	DC~60 GHz
电容 ^d	10~120 GHz
电路构成	
串联	用金属—金属接触,工作在 DC~50 GHz,有较低的 up 态电容 ^c 用电容式接触 ^d ,工作在 10~50 GHz,有较低的 up 态电容
并联	用金属—金属接触,工作在 DC~60 GHz,有较低的接地电感 用电容式接触 ^d ,工作在 10~200 GHz,有较低的接地电感

^a使用低弹簧常数设计,电压可降到 5 V,但会引起粘附及可靠性降低。

^b用静电或永磁场维持,本质上功率为零。

^c使用纵向设计,尺寸可做的相当小。

^d使用高 ϵ_r 介质,可以扩展到 2 GHz。

1.3 MEMS 开关和 GaAs PIN 二极管及晶体管开关比较

表 1.2 给出了静电 RF MEMS 开关和 GaAs PIN 二极管及晶体管开关的比较。由于二极管和晶体管的尺寸容易增加以适应高功率应用,因此,在较宽的 RF 功率范围作精确比较是困难的。而且增加尺寸对开关隔离度、插入损耗、开关速度和功耗有重要影响。显然,由于 MEMS 开关有极低的 up 态电容(串联式)和较高的电容比(电容接触式),因此,它在低到中功率应用中,远比用固体开关优越(图 1.2)。

表 1.2 FET、PIN 二极管和静电 RF MEMS 开关的比较

参数	RF MEMS	PIN	FET
电压[V]	20~80	±3~5	3~5
电流[mA]	0	3~20	0
功耗 ^a [mW]	0.05~0.1	5~100	0.05~0.1
开关时间	1~300 μ s	1~100 ns	1~100 ns

续表 1.2

参 数	RF MEMS	PIN	FET
C_{up} (串联)[fF]	1~6	40~80	70~140
R_s (串联)(ϵ_r)	0.5~2	2~4	4~6
电容比 ^b	40~500 ^b	10	n/a
截止频率[THz]	20~80	1~4	0.5~2
隔离度(1~10 GHz)	非常高	高	中
隔离度(10~40 GHz)	非常高	中	低
隔离度(60~100 GHz)	高	中	无
损耗(1~100 GHz)[dB]	0.05~0.2	0.3~1.2	0.4~2.5
功率处理能力[W]	<1	<10	<10
第三截距点[dBm]	+66~80	+27~45	+27~45

^a 包括电压向上转换器或驱动电路。

^b 仅指电容开关, 采用高 ϵ_r 介质可达到 500 电容比。

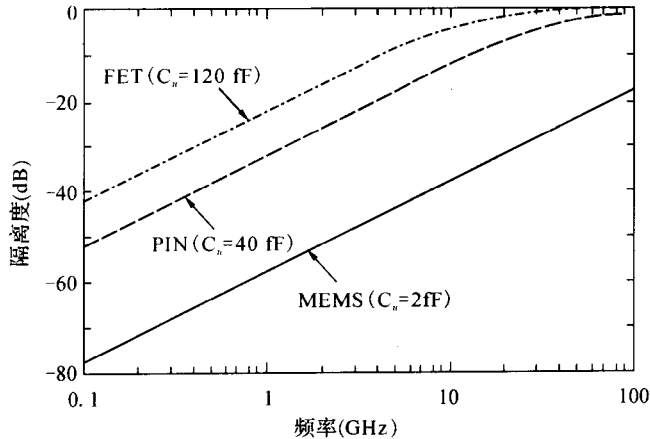


图 1.2 MEMS, PIN 和 FET 串联开关隔离度的模拟值

1.4 RF MEMS 的应用领域

问题是: RF MEMS 器件体积相对较小, 基本上无质量, 对加速度不敏感, 没有直流功耗, 可以在低成本的硅或玻璃衬底上制造, 又比 GaAs 工艺做出的任何器件的截止频率高 30~50 倍, 那么, 用这种器件可以做什么呢? 回答是: 许多。由于它在微波频率具有优异的隔离度和插入损耗, 因此可以代替蜂窝电话中的 GaAs 开关, 从而达到较低的直流功耗和较长的电池寿命。它同样可以用在移相器 (现代无

线电通讯所必需的)、汽车、国防;用在低损耗可调谐电路(匹配网络、滤波器等),以及高性能仪器系统中。表 1.3 总结了 RF MEMS 器件的应用领域以及所需的寿命和循环次数。表 1.3 同样列出了利用这种技术构成的系统和电路。

表 1.3 MEMS 开关、变容器和高 Q 值电感的应用领域

领 域	系 统	循环次数 (10^9)	年
相控阵	通信系统(地面)	1~10	2~10
	(空间)	10~100	2~10
	(机载)	10~100	2~10
相控阵	雷达系统(地面)	10~100	5~10
	(空间)	10~100	5~10
	(导弹)	0.2~10	1~5
	(机载)	1~100	5~10
	(汽车)	1~10	5~10
开关和可重构网络	无线通讯(便携)	0.01~4	2~3
	(基站)	0.1~100	5~10
	卫星(通讯和雷达)	0.1~1	2~10
	机载(通讯和雷达)	0.1~10	2~10
	仪器	10~100	10
低功率振荡器和放大器 (变容器、电感)	无线通讯(便携)	0.1	2~3
	卫星(通讯和雷达)	0.1~1	2~10
	机载(通讯和雷达)	0.1~10	2~10

RF MEMS 单元	开关、变容器、电感器
子系统	开关网络 ^a
	收/发开关
	高隔离度开关(仪器)
	可编程衰减器
	移相器(数字和模拟)
	可重构天线
	可重构匹配(或阻抗)网络
	可重构 Butler 矩阵(用于多束系统)
	可调谐滤波器
	开关滤波器组
	小型微波滤波器
	开关分集式天线、振荡器、放大器
	低相噪声振荡器(固定和可调)
	高效率网络(低功率系统)

^a SPST, SPDT, DPDT, SPNT, $N \times N$, 吸收和反射式设计。

1.5 RF MEMS 实例研究

本节介绍 RF MEMS 器件的一些应用实例：开关网络、便携式无线系统、相控阵、低噪声振荡器。显然，RF MEMS 可以容易应用到国防或高价值的商业系统（卫星系统、基站等），但是，由于 RF MEMS 开关和滤波器所要求的气密封装成本相对较高，所以，它们在低成本商业系统中的应用仍在研发之中。

1.5.1 实例 1 开关网络中的 RF MEMS

开关网络本质上使用在每个通讯系统中，它包括用于滤波器或放大器选择的 SPNT（单刀 N 掷）开关， $N \times N$ 开关矩阵，通用 SPDT（单刀双掷）和 DPDT（双刀双掷）通路选择开关。在卫星系统中，用同轴开关构造开关网络；而在基站系统中，除用在功率放大器之后，其它均使用 PIN 二极管实现开关网络。PIN 二极管开关比同轴开关的价格低得多，但需要输入输出放大器来补偿开关网络导致的损耗。由于在地面系统中容易使用 DC 电源，故它们仅用在地面系统中。

同轴开关有优异的隔离度和插入损耗，产生的互调分量非常低，并能处理较大的 RF 功率，因此在高性能或高功率应用中是优选开关（图 1.3）。但是，同轴开关质量较大（DPDT 有 100 g），成本较高（每个 5 000~7 000 美元）。与设计结构有关，典型的卫星系统有 100~300 个开关，因此，每个卫星的开关网络价值百万美元。表 1.4 给出了用同轴开关构成的 4×4 和 8×8 开关矩阵的性能。具有 $C_u = 2 \sim 4$ fF 的 RF MEMS 开关矩阵可以满足 $N \times N$ 开关矩阵隔离度的需求。但由 1Ω 接触电阻而造成 0.5 dB (4×4 开关) 和 1.0 dB (8×8 开关) 较高的插入损耗。然而，RF MEMS 开关会使系统更小更轻，这些对卫星应用是关键的。

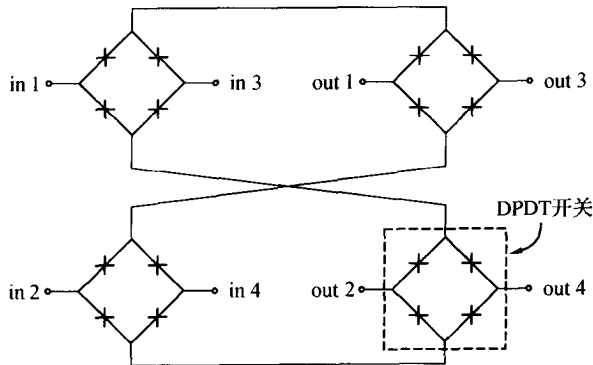


图 1.3 使用 4 个 DPDT 开关构成的 4×4 开关矩阵示意图

表 1.4 同轴 DPDT 开关和 $N \times N$ 开关网络的性能

频 率	12 GHz	
单个同轴 DPDT 开关的损耗[dB]	-0.2	
单个同轴 DPDT 开关的质量[g]	80~100	
开关矩阵	8×8	4×4
DPDT 开关的数量	20~25	4
总插入损耗[dB]	-1.5 ^a	-1.0 ^a
隔离度[dB]	70	70
尺寸[cm]	25×15×8	12×15×8
总质量[kg]	2.5	1.2

^a如果使用 PIN 二极管, 损耗分别为 -4.0~-5.0 dB(8×8), -2.5~-3.0 dB(4×4)

1.5.2 实例 2 : 低噪声低功耗电路中的 RF MEMS

RF MEMS 在低噪声低功耗电路中的应用相当明确, 因为使用低损耗开关和高 Q 值电感及变容器很重要, 许多不同的无源和有源电路基本上都需要高 Q 值器件。高 Q 值器件能大大降低振荡器和放大器的相噪声和功耗。同样, 它们会构造出低损耗的匹配网络和滤波器(表 1.5)。

通常, 使用 Si 或 GaAs 衬底容易制备出工作在 0.5~5 GHz、 Q 值为 60~100 的变容器, 在这些频率下, 振荡器和放大器的性能与电感的 Q 值有关。因此, 人们最近进行了大量的研究来开发高 Q 值微加工电感, 目的是取代昂贵的片外电感器。但是, 在 10~100 GHz 范围, 微加工电感用处不大, 因为使用低损耗传输线容易制造出电感, 而开发高 Q 值(>100)变容器非常重要。可调谐滤波器和匹配网络同样需要高 Q 值变容器。高 Q 值变容器会构造出低损耗可调谐前端系统。

表 1.5 Q 值对典型微波电路的影响

电 路	参 数	Q 值的影响
振荡器	相噪声 ^a	$1/Q^2$
振荡器	功耗 ^b	$1/Q$
放大器	增益 ^c	Q
放大器	功耗 ^d	$1/Q$
匹配网络	损耗 ^e	$1/Q$
滤波器	损耗 ^f	$1/Q$
系 统	噪声图 ^g	$1/Q$

^a 振荡器相噪声是基于等效的 LC 谐振器

^b 产生的相噪声和参考设计相同, 但是降低了电源的功率。

^c 增益正比于负载阻抗 ($x = j\omega L$), 因此正比于 Q

^d 产生的增益和参考设计相同, 但是降低了晶体管中的电流 (g_m)。

^e 匹配网络和传输线的损耗与元件 Q 值有关。

^f 滤波器的损耗与无负载谐振器 Q 值有关

^g 噪声图由滤波器损耗、传输线损耗和第一级放大器的增益决定

1.5.3 实例 3 便携式无线系统中的 RF MEMS

图 1.4 给出了基于 MEMS 的前端设计的三带无线电话系统。基于可调谐天线、低噪声可调谐振荡器、可调谐滤波器和可调谐匹配网络，RF MEMS 同样能够

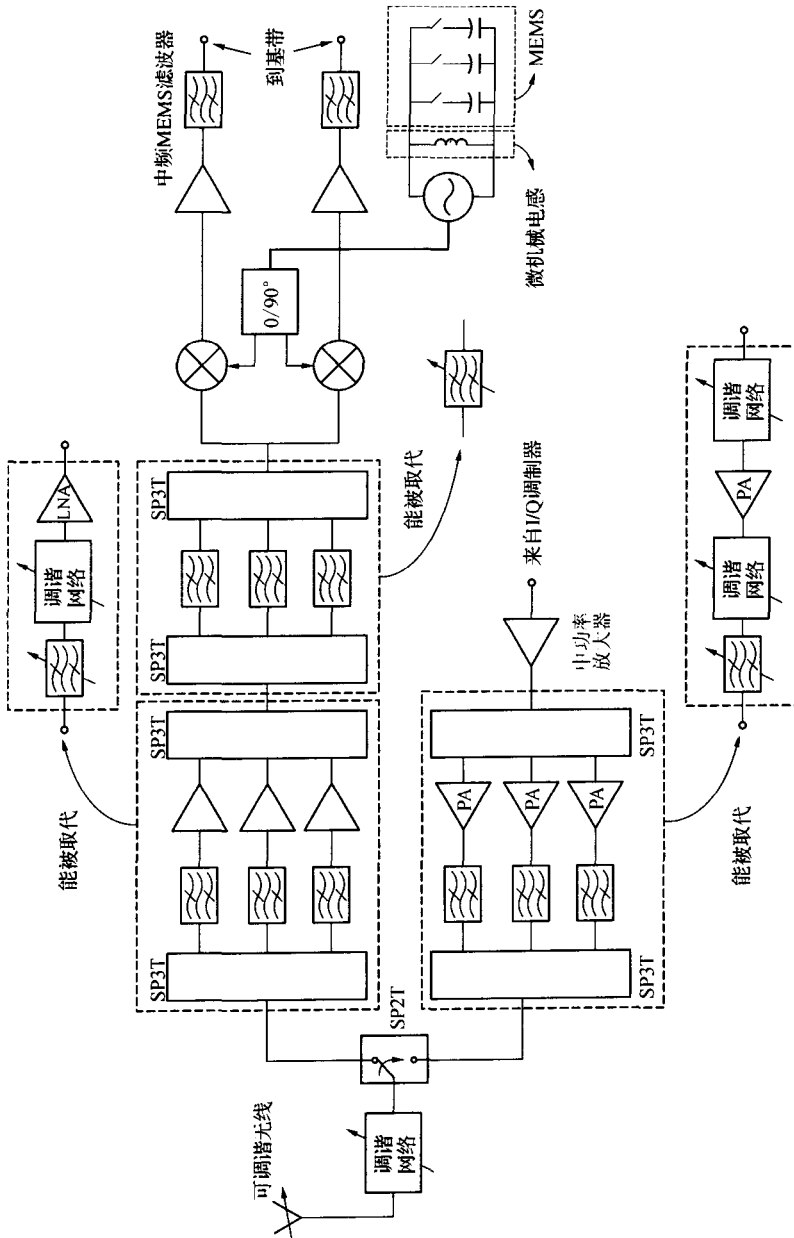


图 1.4 三带 MEMS 无线电话系统的前端设计

开发用于宽带（或多带）无线电的低功耗系统。最终的目的是将整个前端集成到一个芯片上，但作者认为未来 5 年，这还不可能。主要困难不是电感或开关，而是低损耗（高 Q 值）滤波器、双工器以及晶体基准。目前，利用 FBAR 技术的滤波器正在研究之中，MEMS 微机械谐振器有一天可能会替代晶体基准。同样，使用 RF MEMS 器件（开关、变容器和高 Q 值平面电感器），可以消除振荡电路中的片外电感，或可以把可调谐滤波器集成到硅芯片上（或玻璃或陶瓷载体上）。

我们需要记住，商业化应用中，每年需要 3~8 亿个单元，而任何一种新技术的切入与成本和可靠性问题密切相关。我们还不清楚是否能够生产每个 1~2 美元的气密封装 RF MEMS 开关和滤波器（表 1.6）。

表 1.6 无线系统中 RF MEMS 的置换策略

MEMS 元件	子系统	置换策略	原因
开关 (SPST, SPNT) (滤波器组)	接收机	可以	非常低的损耗 对低 RF 功率有较高的可靠性 必须将 SPST 和 SPNT 的成本降低到 1 美元左右
开关 (SPST, SPDT)	发射机	可以	使用到地的并联设计不能处理高 RF 功率 必须将 SPST 或 SPNT 的成本降低到 1 美元左右
开关 (SPNT, $N > 2$)	发射机	不久	用于滤波器组或功率放大器的 SPNT 开关要求串联开关 因此 不能处理高 RF 功率
开关	开关式天线	不久	必须能够处理天线上的高 RF 功率 (2~3 W)
电感	振荡器	可以	消除片外电感，低成本制造
电感	功率放大器	可以	对匹配网络仍需要较高 Q 值的 MEMS 电感
变容器	振荡器	不久 / 可以	SiGe 和 CMOS 变容器直到 5 GHz 的 $Q > 50$ 直接转换接收机中的布朗噪声问题 可以用在外差接收机或毫米波振荡器中
变容器	可调谐滤波器	可以	高 Q 值 MEMS 变容器会带来低损耗设计 使用 MEMS 变容器会有低的互调分量
变容器	可调谐匹配网络	不久 / 可以	对天线和功率放大器而言，必须能够处理高 RF 功率 可以在接收机中应用（低功率）
FBAR	滤波器	可以	消除片外滤波器 仍需要热稳定性和低成本封装 仍需要对长期高功率 (2~3 W) 处理能力进行研究
MEMS 滤波器	滤波器	即将	甚至 100 MHz 下，技术仍不成熟 需要真空封装
MEMS 谐振器	振荡器	可以	如果热稳定性解决，可以替代晶体谐振器 需要真空封装 必须降低成本，因晶体谐振器的成本仅 0.5 美元

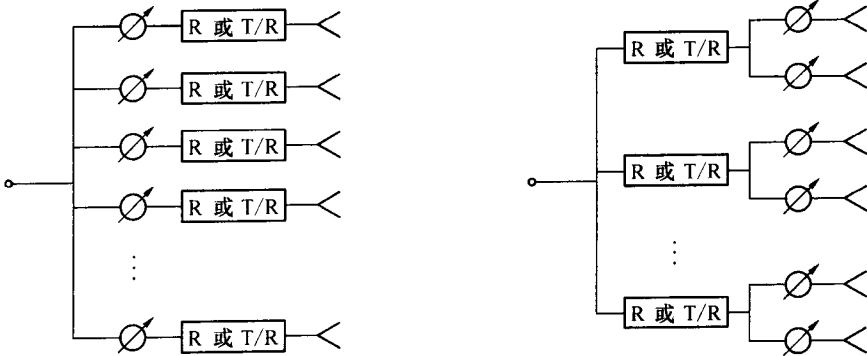
1.5.4 实例 4 相控阵中的 RF MEMS

RF MEMS 开关可以构成任何频率下（尤其从 8~120 GHz 范围）的低损耗移相器。目前,10~14 GHz,3位 MEMS 移相器的平均损耗是 -0.9 dB 比使用 GaAs FET 的圆片上设计的开关改善了 3~4 dB。在雷达或双工电信系统中会带来 6~8 dB 的改善。对 Ka 波段 (35 GHz),V 波段 (60 GHz)或 W 波段 (77 GHz,94 GHz)系统 改善相当高(见表 1.7)。因此在 T/R 链中 我们可以不使用放大级 并由此在 X~V 波段频率范围内 每单元降低 20~100 mW 的 DC 功率。这会大大降低空间、机载和低功率电信和雷达系统的 DC 功率。显然,RF MEMS 是一种低成本相控阵的使能技术,因此,美国政府斥巨资支持 RF MEMS 在电信和雷达应用方面的研究。

表 1.7 RF MEMS 和 GaAs FET 3 位移相器的平均片上功耗

频率[GHz]	RF MEMS 损耗[dB]	GaAs FET 损耗[dB]
X 波段(10)	-0.9 ~ -1.0(-0.3/位)	-3 ~ -4(-1.2/位)
Ka 波段(35)	-1.7 ~ -2.0(-0.6/位)	-6 ~ -7(-2.2/位)
V 波段(60)	-2.3 ~ -2.5(-0.8/位)	-8 ~ -9(-2.8/位)
W 波段(94)	-2.7 ~ -3.3(-1.0/位)	-9 ~ -11(-3.3/位)

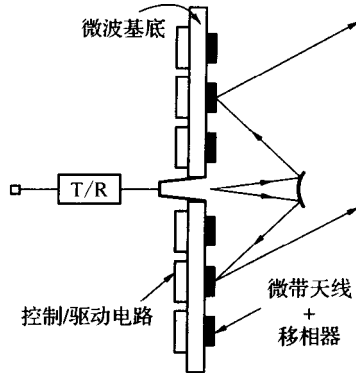
使用 RF MEMS 移相器同样可消除较大相控阵中 50%~75%的 T/R 组件(图 1.5)。确切的数量取决于雷达系统所要求的发射功率和范围以及通信系统的 G/T (增益/噪声)需要。对低损耗移相器,可用单 T/R 组件馈给 2~4 个单元,因此降低了系统的复杂性。计算表明,这种想法对 8 单元的子阵是不现实的,因为即使在 X 波段,8:1 功率组合的网络会有较大的附加损耗。对这种情况最好设计一



(a)

图 1.5 (a) 标准的相控阵;(b) 用两个单元放在一起构成子阵的 MEMS 相控阵

种无源反射阵（图 1.6）。



损耗贡献 [dB]	X 带 (10 GHz)	K 带 (24 GHz)	Ka 带 (35 GHz)	W 带 (94 GHz)
平面天线	-0.2	-0.3	-0.5	-0.8
3 位 P. S.	-0.9	-1.4	-1.8	-2.4
空间馈给	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
T-线/封装	-0.3	-0.5	-0.7	-1.1
总损耗	-2.4	-3.2	-4.0	-5.3

图 1.6 Cassegrain—馈给式 MEMS 相控阵。这是业已建立的反射式相控阵系统的理想设计，但用 MEMS 移相器替代了 GaAs FET 或 PIN 二极管移相器

在 X 到 W 波段频率，RF MEMS 移相器能使无源反射阵的设想成为可能。反射阵比标准的相控制便宜得多，而且为驱动和接收电路提供了足够的空间。由于是空间馈给式的，因此随着阵列尺寸增加，不能承受较高的传输线（全体馈给）损耗。图 1.6 给出了使用 RF MEMS 移相器构成的无源反射阵列的性能。可以看出在 X 波段到 K 波段频率可以得到 $-2.4 \sim -3.2$ dB 的单向系统损耗。即使放大器用在每一个单元，Ka 波段到 W 波段系统就是这种情况（反射阵不再是无源的），来自放大器所需的增益低得可用小 GaAs 芯片制造，从而消耗了较小的 DC 功耗，因此可以插入相控阵网络中而没有“不动产”问题。

在很多军事或卫星应用中移相器仅占系统总成本的很少一部分。RF MEMS 移相器的成本并不重要，而且使用 RF MEMS 而产生的 DC 功率的降低以及系统性能的改进可以控制主要价格。通常，3 或 4 位移相器需要很多 RF MEMS 开关，因此，成本主要受制造成品率的控制，同样也受封装技术的控制。在 X 波段到 Ka 波段每个封装好的 4 位移相器成本在 25 美元是合适的，1 000 个单元阵列，成本是 25 000 美元，这是系统总成本的较小一部分。对于商业应用，例如基于卫星的用户

终端,RF MEMS 移相器的成本必须降到 1~2 美元,由于 RF MEMS 开关需要气密封装,因此,还不清楚怎样才能达到这种目标。在毫米波频段 (>45 GHz)应用的可能解决方案是把天线和移相器一起集成到同一衬底上(可能用 8 个单元的子阵列方式),并把整个扫描阵列封装到气密玻璃载体内。

1.6 国际 RF MEMS 的研究状况

表 1.8~1.10 总结了国际上 RF MEMS 开关和变容器的研究进展。表中不包括过去几年中有产品发布但没有发表论文的公司。唯一的例外是 Northrup Grumman 公司,它开发了用于相控阵的 RF MEMS 这个公司较大(并相对保密),表中同样也不包括开展理论研究(分析、设计)但没有开发 RF MEMS 器件的研究机构(大学和政府实验室)。而且,对于一些较小的研究机构,它们发表了几篇论文但其工作是已经开发器件的改进,因此也不包括在表中。这些表后应该列出较长的参考文献清单;但为了不重复列出这些参考文献,读者可以参阅这些器件电学特性和机械特性的相应章节。各大学对开关的研究没有总结在表中是因为工业部门开发的开关在可靠性、寿命和制造成品率方面早已超过了大学。而且,一些大学的开关研究在书中其他章节也将详细介绍。

表 1.8 国际上金属-金属接触式开关的研究进展

公 司	执行机制	电压,电流,功耗 [V, mA, mW]	开关时间 [μ s]	接触力 [μ N]	寿命 [10^9 循环]
Motorola	静电	40~50, 0, 0	4~6	100	>60 ^a
Radant MEMS	静电	70~80, 0, 0	3~6	100	>60 ^a
Omron	静电	17~20, 0, 0	300	1 000	>1 ^a
Cronos	热	5, 40, 200	10 000	2 000~3 000	>1
Rockwell	静电	60, 0, 0	8~10	50~100	>1
Samsung	静电	5~8, 0, 0	100	50~100	>0.5
HRL	静电	20~30, 0, 0	30~40	50~100	>0.1
Lincoln	静电	70, 0, 0	<1	50~100	>0.1
ST-微电子	热/静电	5, 4, 0	300	50~100	>0.5
Microlab	静磁+保持	5, 100, 0	500	50~150	>0.1
NEC	静电	30~50, 0, 0	30~40	50~100	--
大学	Northeastern, Michigan (Ann Arbor), California (Berkeley), Illinois (Urbana Champaign), Colorado (Boulder), Limoges (France), California (Davis), KAIST (Korea), Seoul National (Korea), National Taiwan (China)				

由于时间限制,测试中止,或在 2002 年 9 月仍在进行中。

表 1.9 国际上电容式开关（静电驱动）的研究进展

公 司	电 压 [V]	开关时间 [μ s]	寿命 [10^9 循环]
Raytheon	35~45	4~20 ^a	>25 ^b
Lincoln Lab	30	20	>60 ^b
Northrup Grumman	50~70	4~8	>10
Daimler Benz	35~50	10~20	—
Bosch	35~50	10~20	—
IMEC(比利时)	35~50	10~20	—
LG(韩国) ^c	10~20	30~40	>0.1
大学	Michigan (Ann Arbor), Limoges (France), Seoul National (Korea), California (Santa Barbara), Nanyang Technological (Singapore), National Taiwan (China).		

^a 已有低功率 1~10 mW, 4 μ s) 和中功率 200 mW, 20 μ s 的设计。

^b 由于时间限制，测试中止，或在 2002 年 9 月仍在进行中。

^c 由于使用了高 ϵ_r 介质，因此是低频电容式开关。

表 1.10 国际上变容器和开关电容器的研究进展（主要是静电激励）

公司/大学	电 压 [V]	零偏电容 [pF]	类 型	电 容 比	Q 值
Rockwell Scientific	5~20	0.5~1	叉指式	4~8	100(1 GHz 下 1 pF 电容)
Michigan 大学	10	1.15	叉指式	1.4	>100(2 GHz 下 1.2 pF 电容)
Michigan 大学	20	0.1~0.3	平行板	1.3, 1.9	>150(35 GHz 下 0.1 pF 电容)
Illinois 大学	5	0.04	平行板	1.6	N/A
Columbia 大学	6	1.5, 4	平行板	1.35, 1.9	20(1 GHz 下 1.5 pF)
UC Berkeley	5	2	平行板	1.3	60(1 GHz 下 2 pF)
Seoul National 大学	60	0.1	悬臂梁	1.25	>150(30 GHz 下 0.1 pF)
LG	5	0.1	PZT/平行板	3	N/A
Raytheon	45	0.4~3	开关电容	0.3~24	60(2 GHz 下 2.4 pF)
Michigan 大学	20	0.1	开关电容	3~25	>100(1 GHz 下 2.2 pF)
Michigan 大学	20	0.1	开关电容	2~3	>100(34 GHz 下 0.1 pF)
Colorado 大学	35	1	开关电容	3.5	140(0.7 GHz 下 2 pF)

1.7 RF MEMS 与 Si 或 GaAs 电路的集成

RF MEMS 器件通常用低温工艺制备，因此，与 CMOS 后处理、SiGe 或 GaAs 集成工艺兼容。事实上，因为大部分 MEMS 开关、变容器和电感器是用表面加工技术制造的，因此，它们亦可以制备到玻璃、石英和抛光的陶瓷基板上。到目前为止，只有 Rockwell Scientific 公司将 MEMS 开关网络与 GaAs 放大器集成在一起（见图 1.7）[6]。用二支晶体管来改善附加功率的效率，80 μm 器件在低功率水平（-10~5 dB）下开关，而 640 μm 器件则在中功率水平（5~10 dB）下开关。GaAs 放大器的性能在开关制备工艺后，性能没有降低，MEMS/GaAs 芯片实现了优异的性能。不久的将来，对小型化低功率应用，应该可以把放大器与 MEMS 移相器集成在一起。

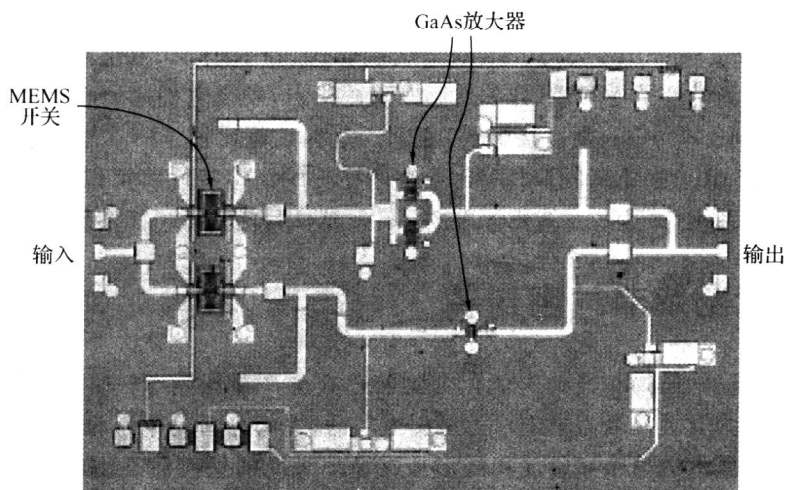


图 1.7 X 波段双路 MEMS/GaAs 放大器照片（IEEE 版权许可）

RF MEMS 可以与 CMOS 或 SiGe 电路集成而用于低功率无线前端系统。同样，用 CMOS 技术在 MEMS 开关附近开发电压向上变换电路是可行的，或在 MEMS 变容器附近将智能控制器集成，用于改善可调谐范围及温度稳定性。我们相信一旦 MEMS 器件的可靠性和封装达到成熟，那么在未来 5 年将开发出许多 Si/RF MEMS 电路。

1.8 线性度和互调分量

由于 RF MEMS 开关不含有半导体结，因此也没有指数的电流—电压关系，故

它是一种极好的线性器件。MEMS 开关和变容器可以设计成机械刚性结构（较大弹簧系数）可以承受较大的 RF 电容摆幅而不产生明显的互调分量，是可调谐滤波器 and 匹配网络的简单而又近理想的单元（图 1.8）。

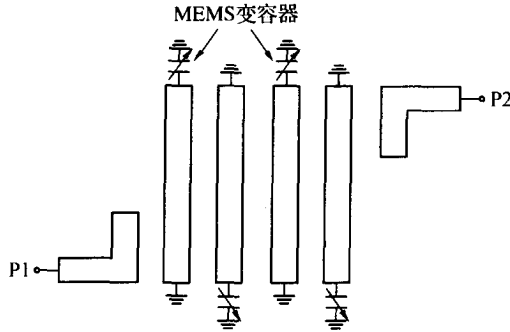


图 1.8 使用高线性度 MEMS 变容器的叉指滤波器

Rockwell Scientific 公司、HRL（金属接触式）和 Raytheon（电容接触式）公司分别独立地测量到了 MEMS 开关的第三阶截距点，发现它们起码在 +66 dBm（电容接触式）到 +80 dBm（金属接触式）之间。这些数值比用 PIN 二极管和 FET 开关高 25~35 dB。毫无疑问，MEMS 器件近完美的线性特性将可以设计出复杂的通讯和雷达系统，而这些系统用标准的 GaAs 器件目前是不可能实现的。

1.9 气密或非气密封装

水汽、氧、污染物和其他碳氢化合物的存在会严重影响 RF MEMS 器件的工作。这是因为开关接触力或上拉力是相当小的（大部分情况下为 50~500 μN ），没有简单而足够大的力来穿通淀积或形成在金属表面的任何污染物或介质，或克服电容接触处的水分子吸附力。正是这些原因，金属—金属接触式开关通常在开路时失效而电容开关在 down 态（粘附）失效。

因此，RF MEMS 器件在氮气及洁净条件下进行测试。这在实验室是可行的，而在商用中必须仔细地将 RF MEMS 器件封装。重要的问题是 RF MEMS 非气密封装的长期可靠性。选择气密封装或非气密封装是至关重要的，因为非气密封装便宜（每单元 0.2~0.5 美元），而气密封装需要高温以及非常平滑的表面，所以通常较为昂贵（每单元 2~50 美元）。这个问题的答案最终取决于 RF MEMS 器件的成本和应用领域。读者可以参考第 6 章有关论述。

1.10 功率处理能力和可靠性

第7章将详细讨论 MEMS 开关的失效机制、可靠性和功率处理特性。到 2002 年 9 月,许多金属—金属(DC)接触式开关和电容式开关在低功率条件下($0.5\sim 5\text{ mW}$)已经达到 6×10^{10} 次循环。而 Raytheon 公司电容开关在 100 mW 、 10 GHz 下测试大于 25×10^9 次循环,所有测试均在氮气氛及洁净条件下进行。失效机制是复杂的,而且电容式和 DC 接触式开关的失效机制是不同的。同样,失效的机制与所使用的 RF 功率有关,可能是由于热问题、介质击穿问题、自执行和阈值电流密度问题引起的。笔者的观点是一旦开关能超过 1×10^{10} 次循环就容易达到 1×10^{11} 次,因为失效机制(介质充电、点蚀、硬化、介质形成等)通常会在将 10^{10} 次循环中表现出来。

由于电容式开关有较大的接触面积,能比金属—金属接触式开关处理更大的 RF 功率,因此对于 $100\sim 500\text{ mW}$ 的 RF 功率应用,它是优选的开关。但是,由于大部分电容式开关相对较小的 down 态电容($2\sim 5\text{ pF}$)因此,它们在 6 GHz 以上工作性能较好,而 DC 接触开关在 $0.1\sim 6\text{ GHz}$ 范围是较好的选择。金属—金属接触开关的寿命强烈依赖于所使用的 RF 功率,且大部分静电执行开关在 $10\sim 100\text{ mW}$ 功率范围仅达到 $10^7\sim 10^9$ 次循环。这是由于静电执行机制所能达到的接触力小($50\sim 200\text{ }\mu\text{N}$)及接触面积小。另一方面,热执行开关有较大的接触力($2\sim 3\text{ mN}$),已经证明在 350 mA 的 RF 电流条件下(在 $50\text{ }\Omega$ 系统中,等效于 6 W 的 RF 功率),可达到大于 50×10^6 次循环。但是,热执行机制会消耗较大的 DC 功率($50\sim 200\text{ mW}$),因此并不适合大部分情况应用。

随着接触合金、热分析、高质量介质材料、应力控制和机械设计各方面的研究的深入。作者相信电容式开关和 DC 接触开关在低功率条件下可以达到 100×10^9 次循环;在中到高功率条件下,可以达到 10^9 次循环。

参考文献

- [1] L. E. Larson, R. H. Hackett, M. A. Melendes, and R. F. Lohr, Micromachined microwave actuator (MIMAC) technology—a new tuning approach for microwave integrated circuits, in *Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium Digest*, Boston, MA, June 1991, pp. 27~30.
- [2] A. R. Brown and G. M. Rebeiz, A high-performance integrated K-band diplexer, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 47, No. 8, pp. 1477~1481, August 1999.
- [3] R. C. Ruby, A. Barfknecht, C. Han, Y. Desai, F. Geefay, G. Gan, M. Gat, and T. Verhoeven, High-Q FBAR filters in a wafer-level chip-scale package, in *IEEE Interna-*