

(续)

版号	内容	套准关系	关键尺寸说明		关键层间最小覆盖、间距等说明	其它说明与注释
			最大	最小		
M4	桥膜形状(对浓硼掺杂Si膜的加工)	M4 \Rightarrow M2 (双面光刻)		10	桥膜应覆盖下方的金属电极免受随后的ICP刻蚀; 硅桥膜线条间距最细处为5 μ m	阳版
M5	玻璃衬底上的共面波导浅槽	M5 \Rightarrow M1 (键合对准)		30	横向钻蚀控制在2~4 μ m之间, 并过曝光	阴版(图形与M6相同, 互为阴阳版)
M6	玻璃衬底上的共面波导	M6 \Rightarrow M5		30	横向钻蚀控制在2~3 μ m之间, 以保证金属全部落在M5形成的浅槽内, 并过曝光	阳版
M7	备用——剥离玻璃衬底上的Ta ₂ O ₅ 等电介质材料	M7 \Rightarrow M5				阴版

版图单元尺寸(重复间距): 8×8mm;

三. 总的版图布置

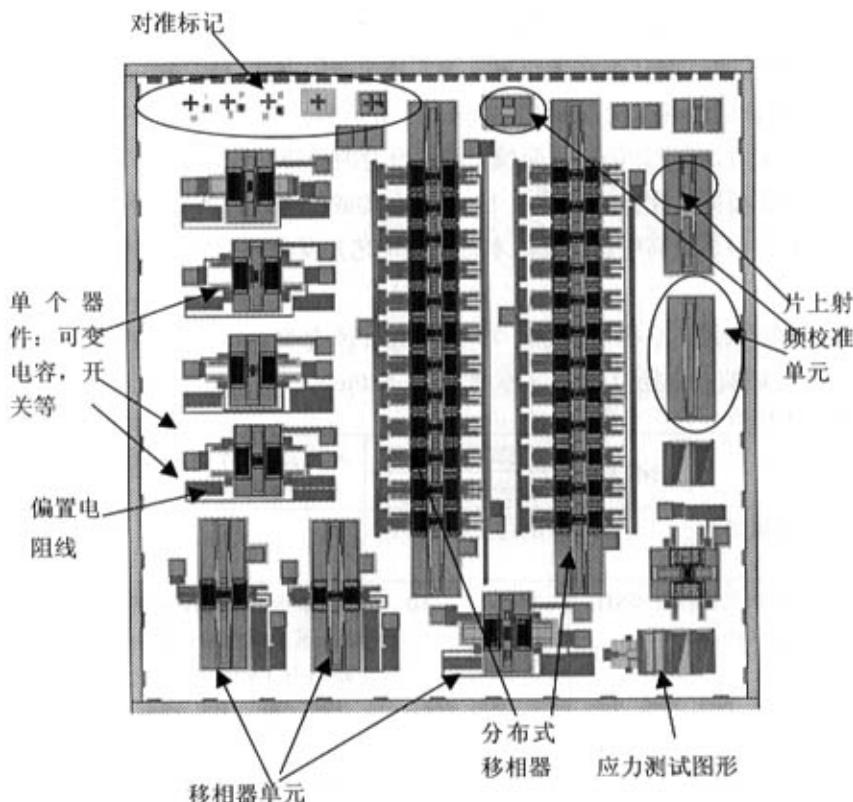
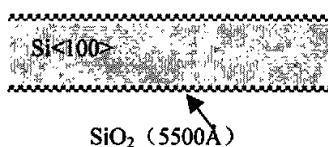
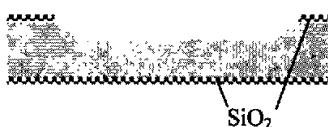
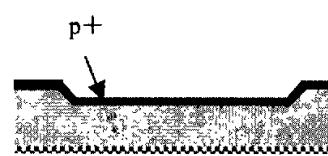
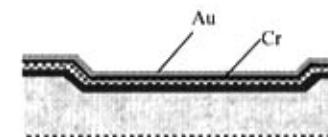
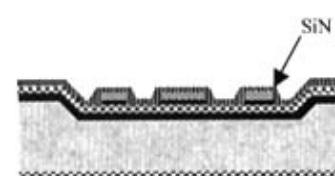
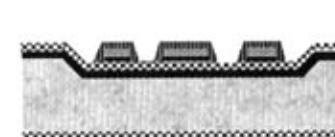
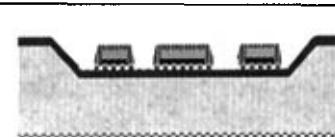
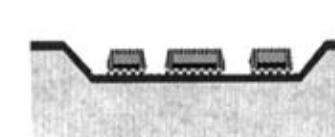
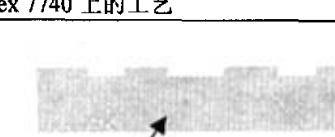
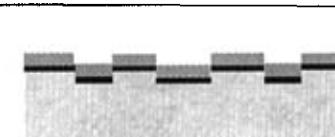
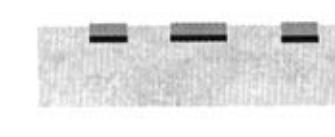


图 5.1 总的版图布置

四. 工艺流程

表 5.1 移相器和开关器件结构的加工工艺流程 (初步方案)

硅片上的工艺			
序号	说 明	截面图	备 注
A1	硅片清洗、干燥后湿氧 5300Å。		作为 KOH 腐蚀 (深度 3μm) 的掩膜。
A2	光刻掩膜版 M1, 以 RIE 刻蚀出浅槽图形。去胶后, 以 KOH 腐蚀浅槽, 深度为 3.0μm,		定义桥膜高度。
A3	用特殊夹具保护硅片正面, 在背面甩光刻胶作保护, 然后以 BHF 溶液除去正面 SiO2 层。		
A4	煮酸除去硅片背面光刻胶后, 进行去 K+ 处理		
A5	以固态硼源对硅片正表面进行浓硼扩散 (浓度 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), 深度 2~2.5μm。扩散后进行热氧化, 并用 BHF 除去表面生成的 BSG。		温度 1100°C, 扩散时间 2h。 硅片背面 SiO2 作为扩 散掩蔽层。
A6	硅片正表面通过 LPCVD 淀积 SiO2 2000Å		防止键合时 出现 Au/Si 共 熔。
A7	磁控溅射金属 Cr/Au 300/5700Å		桥膜金属层 沉积。

A8	光刻掩膜版 M2 (阳版)。湿法腐蚀 Cr/Au 金属图形。去胶。		桥膜金属层平面图形定义。
A9	利用 PECVD 方法淀积低应力 SiN 2000Å。		
A10	光刻掩膜版 M3 (阳版)。RIE 刻蚀 SiN 和部分 SiO ₂ 。去胶。		SiN 平面图形的定义。
A11	BHF 去除硅片表面残余的 SiO ₂ 。		除去键合区的 SiO ₂ 。
A12	硅片正面甩光刻胶作保护，用 BHF 除去背面的 SiO ₂ 。去胶。		
Pyrex 7740 上的工艺			
B1	甩胶，光刻掩膜版 M5 (阴版)。然后通过干法刻蚀出 6500 Å 浅槽。去胶。		
B2	溅射 Cr/Au—300/6700Å。		
B3	甩胶，光刻掩膜版 M6 (阳版)。通过湿法腐蚀定义出 CPW 图形。去胶。		CPW 图形的获得。M5 和 M6 图形相同。
键合与键合后工艺			

AB1	硅片和玻璃片图形对准, 进行阳极键合。条件为 380°C, 静电电压 1200V, N ₂ 气氛, 压力为 1atm。		
AB2	用 KOH 腐蚀键合片, 除去掺杂浓度较低的硅层。		
AB3	甩胶, 光刻掩膜版 M4 (阳版)。		
AB4	利用 ICP 刻蚀机刻蚀出桥膜平面图形, 实现结构的释放。		结构的释放。

5. 2 工艺流片中遇到的工艺问题与解决方案

从加工的角度来看, 分布式移相器和开关器件所采用的桥膜结构面积大而厚度较薄, 其制作有难度, 而要实现移相器的设计, 则需要制作出由 12 个完整桥膜构成的阵列, 这大大增加了加工的难度。另外, 作者制定工艺的初步方案时所参考的微机械开关工艺还在不断完善与提高中。因此, 针对本论文设计的工艺开发必然会遇到许多问题和困难。经过反复试验和多方努力, 在工艺流片中暴露的问题得到了较为圆满的解决。下面对其中较突出的几个问题及其解决方法进行介绍。

5. 2. 1 Au 上 SiN 电介质薄膜的生长

工艺流程中的重要一步是在 Au 表面上的 SiN 电介质的生长。该工艺是在英国 STS 公司 (Surface Technology Systems, www.stsystems.com) 的 PECVD (等离子增强化学气相沉积) 设备上完成的。该设备可以在多种衬底表面快速生长出最大厚度达 2~3 μm 的无定形 SiO₂、SiN 和 SiC 薄膜, 其等离子体在由 13.56MHz 的射频源激励的平行板电极间 (电容

耦合)产生。该设备可以淀积低应力 SiN, 方法是: 在反应极板间交替施加高频(13.56MHz)和低频(380kHz)射频功率, 分别生长出张应力和压应力的 SiN 薄膜, 使最终的薄膜表现出很低的内应力。由于不同频率射频源激励时淀积速率不同, 故各路射频源在生长过程中接通的时间需要通过反复试验来确定。该设备交货时提供的参考工艺条件为

- (a) 气体流量: SiH₄, 40sccm; NH₃, 40sccm; N₂, 1959 sccm;
- (b) 压力: 900mTorr;
- (c) 功率: 20W;
- (d) 淀积速率: 133.7Å/min;
- (e) 温度: 300°C (片台)。

利用 Gartner 楞偏仪进行的折射率测试和在电子 13 所进行的应力测试表明, 该条件能在 Si 衬底上生长出质量很好、均匀的低应力 SiN 薄膜 (应力<10MPa)。

在工艺初期以参考工艺条件生长 SiN 薄膜时, 发现了如下的问题 (a) SiN 薄膜表面粗糙, 在光学显微镜下能看到大量分布均匀的黑点, 直径约 1μm, 间距 1μm 左右; (b) 薄膜容易开裂。在 SiO₂ 的生长中也出现了类似的问题。

根据文献[3]的分析, 电介质薄膜的表面粗糙度对开关桥膜的 DOWN/UP 态的电容比有着重要的影响。另外, 用 HP4145 半导体测试仪对其 I-V 特性曲线进行的测试表明: 该薄膜抗击穿强度较低, 一般为 40~50V, 最高的仅达 70V 左右。因此, 所生长出的 SiN 很难保证所设计器件的性能。为了获得质量较好的 SiN 薄膜, 开展了一系列工艺试验。

从文献[4, 5]介绍的薄膜生长基本动力学过程出发, 我们考虑了如下几种可能的原因: (a) 交替生长的张应力和压应力薄层的厚度比例不合理; (b) 金属表面粗糙影响了薄膜上岛状结构间的结合与连续膜的形成; (c) Au 层对射频功率有一定的反射作用, 改变了等离子场中电场和离子基团的分布, 从而影响到材料在 Au 表面上的沉积和膜的连续性。

根据上述推断, 相应开展了一系列工艺试验, 对 SiH₄、NH₃、N₂ 等反应气体的流量、射频功率以及高频/低频射频功率的接通时间及其比值进行了各种调节, 并在 Al、Ti 等不同的衬底进行了生长。结果发现薄膜的表面并无显著改善, 有的甚至出现严重的开裂现象; 同时还发现, 同一衬底上除去 Au (露出下面的 LPCVD SiO₂) 的部位生长的 SiN 薄膜, 其表面粗糙度很低。图 5.2 示出了光学显微镜下观察到的 SiN 薄膜开裂的情况。

经过反复试验, 最终发现, 有可能是如下的原因造成了 SiN 的质量问题: SiN 淀积完成后, 需要一定的时间来从呈岛状的结构通过互相连通最终形成稳定且更为连续的薄膜结构; SiN 淀积时, 硅片置于温度始终为 300°C 的片台上, 而以前的工艺中总是在切断射频功率后就迅速将硅片取出至大气环境下观察; 由于硅片导热性好, Au 热膨胀系数较大且迅速以多个点为中心收缩, Au 上的各个 SiN “材料岛”之间的距离被拉大, 形成连续膜的过程被中断; Si 和 LPCVD SiO₂ 的热膨胀系数与 SiN 的相近, 这一问题并不严重, 故其上 SiN 成膜质量较好。Au 表面 SiN 上观察到的黑点应该为薄膜岛状结构间不连续的部位。该推断也能解释漏电流偏高的问题。

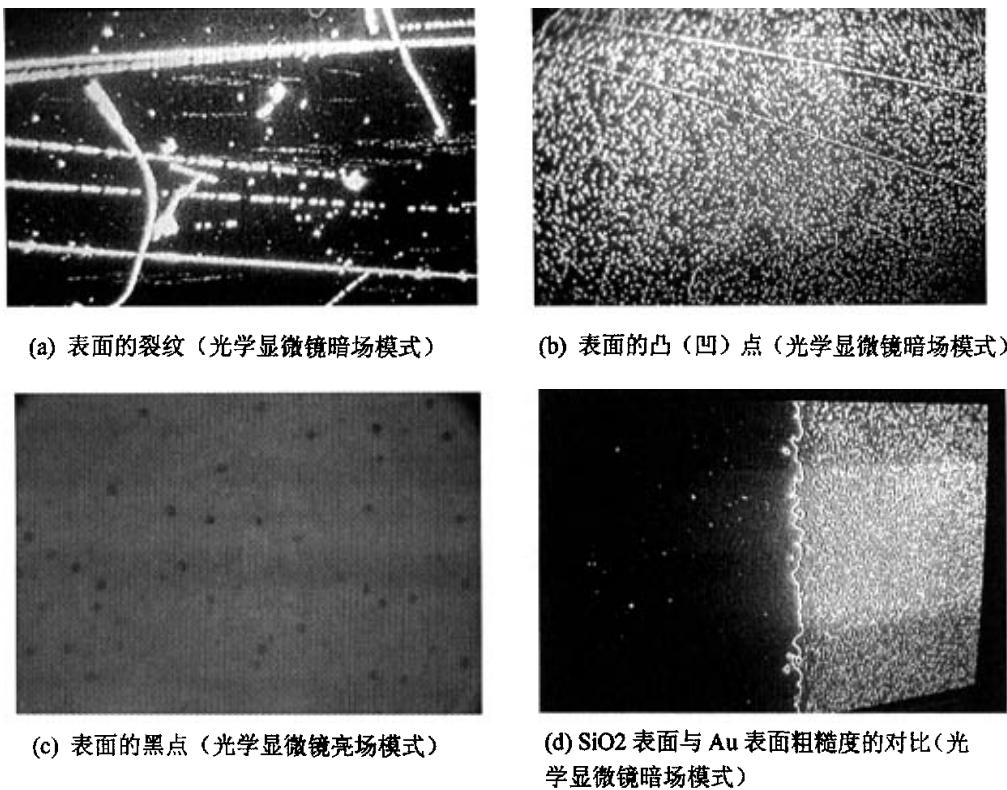
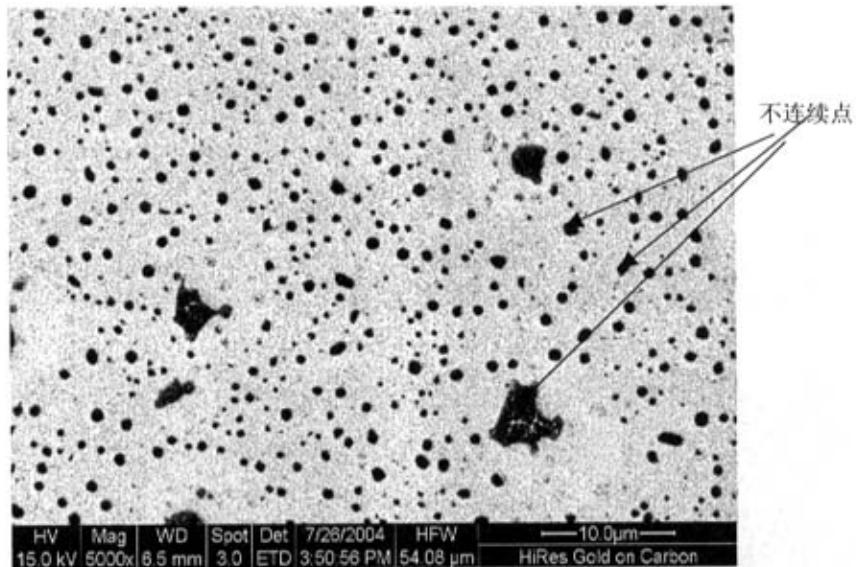
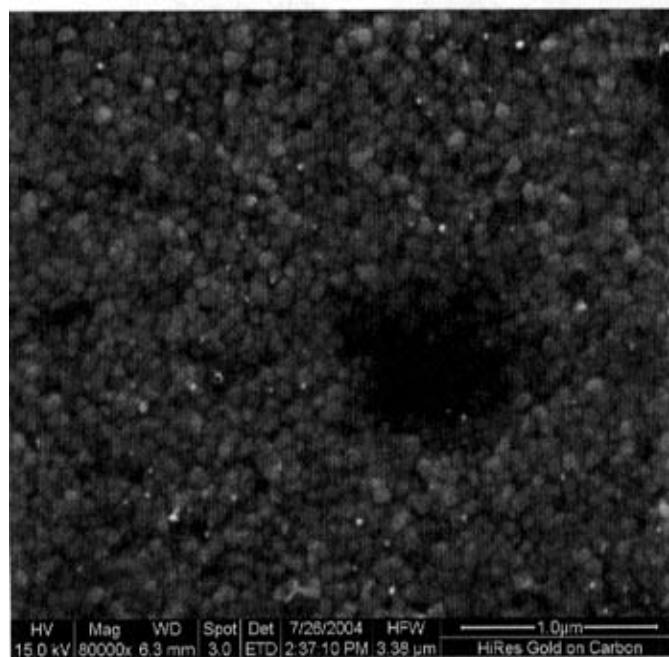


图 5.2 工艺开发之初，在 Au 上生长的 SiN 薄膜的粗糙度和开裂情况。其中，亮场模式下观察到的黑点为材料的凸起或凹陷，并对应于暗场模式下观察到的亮点。暗场模式下的亮线则代表薄膜上的裂纹。

为了验证这一推断并解决 SiN 生长中出现的问题。我们仍然采用前述的参考工艺淀积 SiN 膜，厚度为 2000Å，但改变在切断射频源后直接将硅片取出的做法，让其先在片台上停留 30min，然后在真空锁中停留 30min 以上，最后取出。在光学显微镜暗场模式下进行观察时发现，Au 上 SiN 的亮点数量和密度大为减少，仅略高于 SiO₂ 上的。为了进一步验证我们的推断和新的加工方法的有效性，在物理系新购进的 Quanta 200F 扫描电子显微镜上对采用以前生长的 SiN 和以新方法生长的 SiN 进行了观察(此前因为 SiN 导电性差而无法在其他扫描电镜中观察)，其结果分别如图 5.3 和图 5.4 所示。从图 5.3 中可以看出表面质量较差的膜由直接为 50nm 左右的颗粒组成，其中表面有大量凹坑(直径约为 1μm)，这很可能是造成漏电较大以及薄膜表面在光学显微镜(暗场)下呈现大量发亮颗粒的原因。图 5.4 表明，新方法大幅度提高了 SiN 膜的质量，其颗粒的尺寸大大减小，显得更为致密，凹坑也大为减少；这一方法在 LPCVD SiO₂ 和 Au 表面上能生长出质量相同的膜。图 5.5 示出的 I-V 曲线也表明，新方法制成的 SiN 膜具有更高的抗击穿性能。利用 Keithley 的 C-V 特性分析仪对采用新方法的 SiN 薄膜进行了测试，测试结果表明，其平均的介电常数为 7.52。因此，我们提出的这一新方法能获得所需的、具有高质量的 SiN 电介质薄膜。在此后的工艺中，均采用了这一方法。

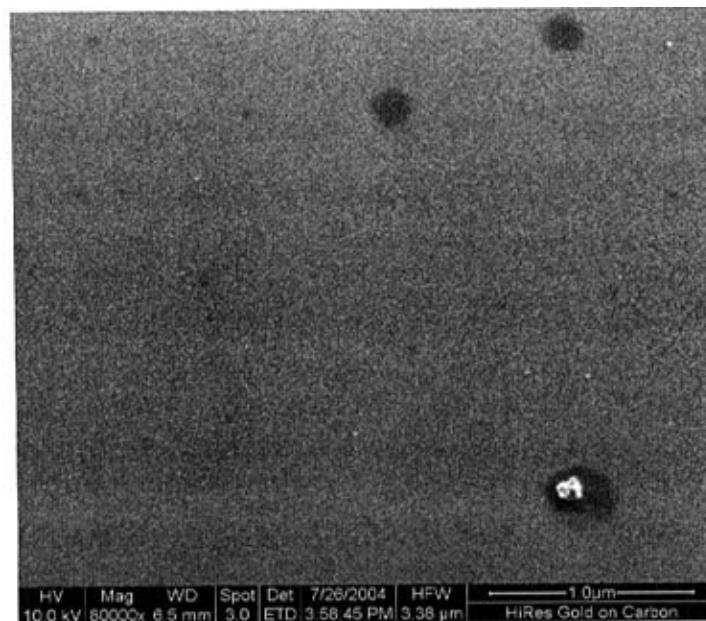


(a) 5000 倍下观察到的表面质量不好的 SiN 表面, 可以看出有大量材料不连续的区域。



(b) 80 000 倍下观察到的表面质量不好的 SiN, 不连续区域为凹坑。整个薄膜由大量直径约为 50nm 的颗粒构成。

图 5.3 在 Quanta 200F 扫描电子显微镜下观察到的、表面质量较差的 SiN 薄膜。



(c) 80 000 倍下观察到的表面质量很好的 SiN 薄膜。



(d) 80 000 倍下在 Au 层表面和 LPCVD SiO₂ 表面观察到的、表面质量很好的 SiN 薄膜。

图 5.4 在 Quanta 200F 扫描电子显微镜下观察到的表面质量较好的 SiN 薄膜。

Au 上生长的 SiN 应力目前没有较好的测试方法, Au 层带来的强反射使得硅片衬底的变形很难通过光学方法测出。我们曾除去部分最终加工出的器件上的 SiN 膜, 然后将这些器件的变形与带 SiN 膜的器件进行比较, 发现两种器件桥膜的变形几乎相同。因此, 可以认为我们生长出的 SiN 膜是低应力的。

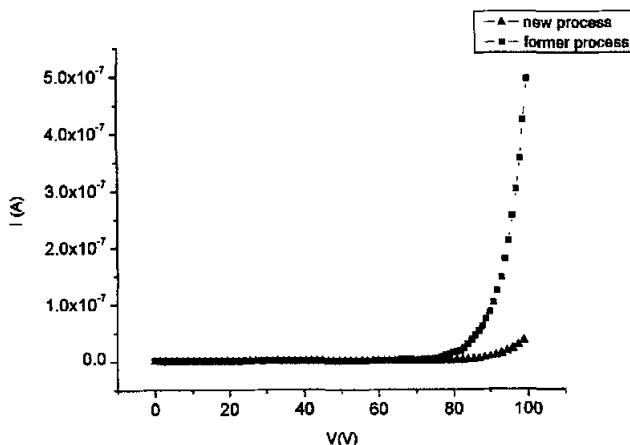


图 5.5 新、旧制备方法获得的 SiN 薄膜的 I-V 特性比较。

5. 2. 2 Pyrex 玻璃衬底上的浅槽刻蚀与腐蚀

Pyrex 上容纳 CPW 的浅槽图形深达 6500\AA 。我们在最初的加工中, 曾尝试用干法刻蚀的办法来获得这一浅槽, 所用设备是 STS 公司的 AOE (先进氧化物刻蚀) 设备。利用台阶仪进行的槽深测试表明, Pyrex 玻璃片中心处与边缘处槽深的差异接近 1000\AA , 这样在完成 CPW 图形定义后, 很难保证整个玻璃片上 Au 层高出玻璃片表面的高度差在 500\AA 以内, 键合将因此受到很大的影响。

为了保证在整个玻璃片上槽深的均匀性, 对玻璃片的湿法腐蚀方法进行了研究。在微米/纳米国家重点实验室中, 已有的对玻璃片的湿法腐蚀方法采用 Shipley 6818 光刻胶($3\mu\text{m}$ 厚)作为掩膜, 所用的溶液为 BHF (缓冲氢氟酸), 所能获得的深度有限, 仅为 1500\AA 左右, 进一步的腐蚀会造成浮胶 (光刻胶掩膜大面积脱落)。

为了突破深度方面的限制, 曾考虑用 Al、Cr/Au 等金属作为掩膜, 但要彻底去除这些金属层、保证键合不受影响则较为困难。因此, 最后决定采用 Shipley 6112 作为掩膜。其制备条件为: 以 2000kpm 转速涂胶, 光刻图形后在真空烘箱中以较高的温度 (115°C) 坚膜 60s , 然后以 O_2 等离子体去底膜。试验中发现, 在 BHF 中腐蚀 10min 后, 即可获得 6500\AA 的槽深, 且无浮胶现象, 但图形边缘出现较大钻蚀, 横向最大钻蚀距离为 $5\mu\text{m}$ 。由于论文中移相器和开关的设计对浅槽图形并无严格要求, 因此, 这一工艺方法是可行的。

进一步的试验还表明, 浮胶现象发生在腐蚀 20min 时, 此时的最大槽深为 9500\AA 。

在以上述条件对整个玻璃片进行腐蚀后，以台阶仪测试出的全片槽深的差异在 300 Å 以内，这一指标可以满足随后键合工艺的需要。

5. 2. 3 键合问题

在工艺流程中将硅片组装到 Pyrex 玻璃衬底上是通过静电（阳极）键合手段实现的。键合工艺需要在较高的温度下完成，因此两种键合材料间会因热膨胀系数的不同而产生热应力。作为衬底的 Pyrex 7740 玻璃的热膨胀系数与硅材料的热膨胀系数比较一致，因此最终结构在很宽的温度范围内（如室温到键合温度）仅存在很小的热应力，这也保证了论文所设计器件在很宽温度范围内的可靠工作。

在最早的工艺流片中，键合片在显微镜下观察时未见异常，但在 KOH 溶液中减薄时，溶液沿 Si/玻璃界面的钻蚀严重。减薄到预定厚度时，出现了大部分硅层、甚至全部硅层脱落的问题。这表明键合强度不高。这一问题一度导致器件加工的中断。我们曾对 4 对硅/玻璃以不同的温度、键合电压和气压条件进行了试验，其最高温度达到了 420°C，最大电压为 1500V，大大超出实验室常用的条件，但都未能成功。经过思考，认为是器件浓硼层应力造成了键合的失败。其机理可以通过图 5.6 来说明：由于硅片表面的浓硼掺杂的浓度随深度增加而减少，浓硼层的掺杂引起的张应力也随之减小，于是，表面浓硼层的张应力和应力梯度会形成弯矩，使得硅片发生图中所示的弯曲；键合电压产生的静电力的相当一部分必须用于克服这一弯矩带来的变形，因此硅/玻璃间的接触力过低，界面处不能形成大面积分布的、可靠的化学键，键合质量得不到保证。

为了验证我们的推断，对工艺流程进行了改进。将浓硼掺杂硅层平面图形的 ICP 刻蚀（基于 STS 公司的 ASETM设备）提前至键合前完成，这样便可以尽量释放硅片表面的张力作用，消除其带来的不利影响。相应的，设计制作了一块新的光刻版 M8。试验结果表明，这一改进能确保键合的成功，而且键合温度仅为 380°C、键合电压仅为 1200V。在此后的加工中，所有的键合均成功完成。而且在 KOH 中减薄时未出现大面积钻蚀现象。

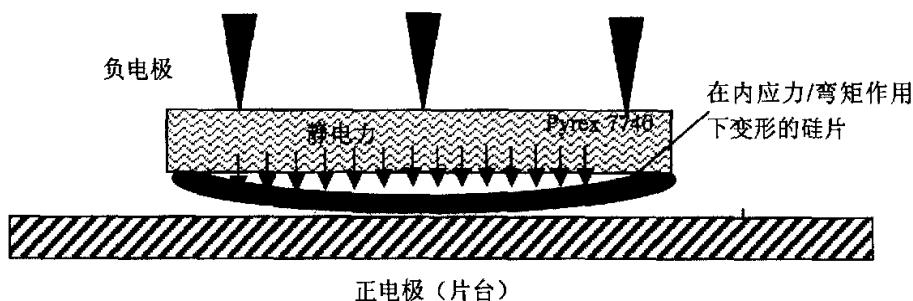


图 5.6 键合失效的原因推断

5. 2. 4 桥膜结构的最终获得

桥膜结构的最终获得, 是工艺流程中的最后一步, 也是最为困难的一步。在最初的工艺方案中(表 5.1), 键合片在 KOH 溶液中先进行腐蚀, 除去低掺杂的硅层, 留下浓硼掺杂层, 然后通过 ICP 干法刻蚀(STS 公司的 ASE 刻蚀设备)最终获得桥膜平面图形。我们发现在这一步中会出现甩胶和去 K⁺困难的问题; 另外, 悬空桥膜下方与玻璃衬底形成的空腔在键合(常压)时封存有部分空气, 而刻蚀反应室内部为较高的真空, 因此桥膜(键合片)内外存在一定的压力差, 这使得许多硅桥膜结构由于压力差而崩落。而真空键合也不能很好地解决硅结构崩落的问题。

在最终的工艺中, 将 ICP 工艺对硅片平面图形的刻蚀提前至键合前完成。这样桥膜结构的最终释放方式也将不同于最初提出的 ICP 刻蚀释放。事实上, 此时的释放是通过对硅

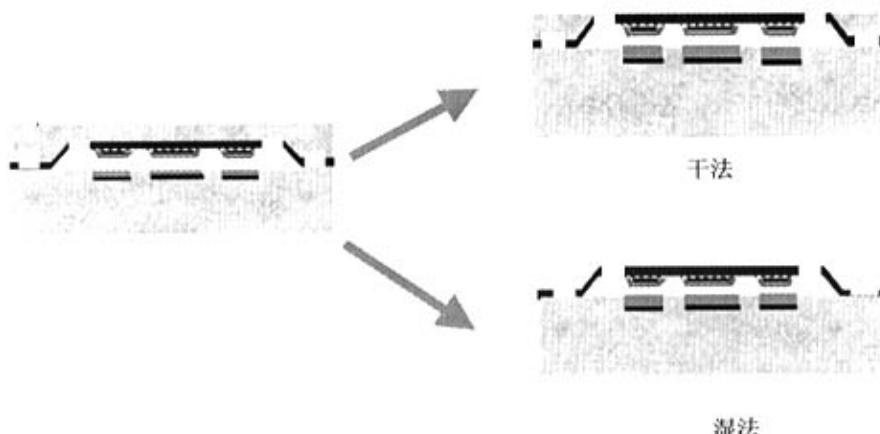


图 5.7 最终的桥膜结构释放方式

片背面进行的无掩膜的减薄(腐蚀或刻蚀), 使已经用 ICP 刻蚀出的平面图形最终暴露出来, 来获得最终的、可动的桥膜结构, 因此无需光刻和真空键合。下面对这些释放方法进行简要的讨论。

我们采用了两种释放方法(见图 5.7)。在释放前先将键合片减薄至硅层余 10μm, 并去 K⁺离子。

一. 湿法释放 湿法释放的均匀性和对膜厚的控制较好。在释放时以 KOH 溶液将低掺杂的硅层除去, 当观察到反应生成的气泡量大大减少而几乎消失时, 结束腐蚀。然后通过升华干燥法来防止在清洗后的干燥过程中桥膜粘附在衬底上。升华干燥法处理的具体步骤是: a) 将器件上的 KOH 用去离子水清洗干净; b) 用 IPA(异丙醇)反复漂洗器件, 将其中的去离子水全部置换为 IPA; c) 将器件移至环己烷液体中, 并反复漂洗, 将 IPA 全部置换为环己烷; d) 将器件置于-10℃的冷冻中并以 N₂ 气流吹器件, 此时环己烷全部变为固态, 在 N₂ 气流作用下直接升华, 完全升华后即可得到可动的器件桥膜。

二. 干法释放 在干法释放中, 在摄像头的监视下, 用 ICP 刻蚀的方法除去 6μm 以

上的硅层，当桥膜结构显露出来时，即停止刻蚀，从而得到所需的可动桥膜结构。这一方法实施中，ICP 设备反应室中的真空环境和硅桥膜部分与玻璃间的空腔内的压力势必形成压力差，但该压差不会使桥膜出现崩落的现象。其原因很可能是：桥膜结构的平面图形在键合前已被刻出，当干法释放中硅层不断减薄时，非桥膜部分因厚度较薄而提前崩落，空腔内的气体被释放，压力差得以消除。干法释放已成功制作出移相器的桥膜阵列和各开关器件。其缺点是：整个键合片上各点 ICP 的刻蚀速率有较大的差异，因此桥膜厚度的控制存在一定的困难。

由于干法释放的成功，我们还以未经 P+掺杂的 N 型 $<100>$ 硅片（ $2\sim4\Omega\cdot\text{cm}$ ）制作了移相器和开关型器件，相应桥膜的硅层的内应力和应力梯度很小，因此器件的变形与采用浓硼扩散时相比大为减小，变形可能是由于各层间的残余应力和应力的差异所造成的。

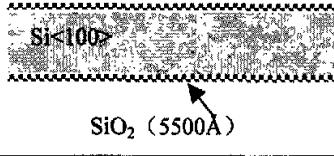
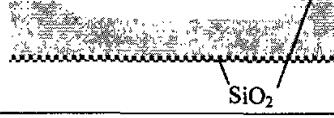
上述释放方法的提出，最终保证了器件桥膜结构及其阵列的完整获得。

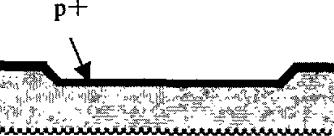
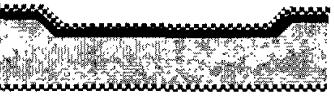
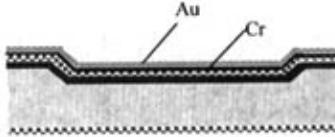
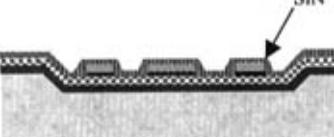
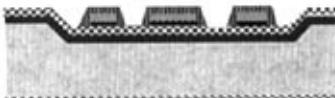
5. 3 最终的工艺流程及样品加工结果

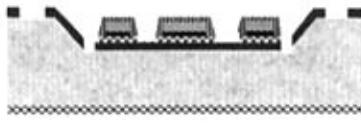
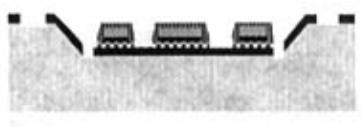
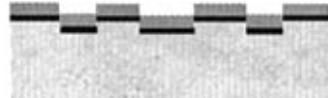
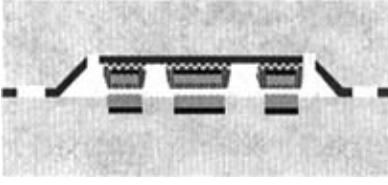
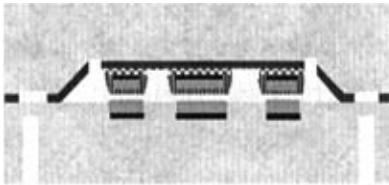
5. 3. 1 最终的工艺流程

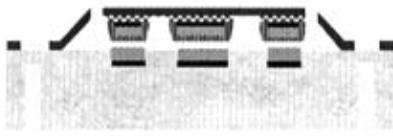
在 5.2 节所述工作的基础上，经过多次试验，最终确定了如表 5.2 所示的包括划片工艺在一整套较为完整的工艺流程，该工艺流程成功地制作出所设计的微机械分布式移相器的桥膜阵列和开关器件。新的工艺流程的 A1~A8 与表 5.1 所示的工艺流程相同，但考虑到整体性，故仍示于表 5.2 中。

表 5.2 移相器和开关器件结构的加工工艺流程（最终方案）

硅片上的工艺			
序号	说 明	截面图	备 注
A1	硅片清洗、干燥后湿氧（ 5300\AA ）。		作为 KOH 腐蚀（深度 $3\mu\text{m}$ ）的掩膜。
A2	光刻掩膜版 M1，以 RIE 刻蚀出浅槽图形。去胶后，以 KOH 腐蚀浅槽，深度为 $3.0\mu\text{m}$ ，		定义桥膜高度。
A3	以特殊夹具保护硅片正面，在背面甩光刻胶作保护。以 BHF 溶液除去正面 SiO_2 层。		

A4	煮酸除去硅片背面光刻胶后, 进行去 K+ 处理		
A5	以固态硼源对硅片正表面进行浓硼扩散 (浓度 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), 深度 2~2.5 μm 。 扩散后进行热氧化, 并用 BHF 除去表面生成的 BSG。		温度 1100°C, 扩散时间 2h。 硅片背面 SiO_2 作为扩 散掩蔽层。
A6	硅片正面通过 LPCVD 淀积 SiO_2 2000 \AA		防止键合时 出现 Au/Si 共 熔。
A7	磁控溅射 Cr/Au 300/5700 \AA		桥膜金属层 淀积。
A8	光刻 M2 (阳版)。湿法腐蚀 Au/Cr 金属图形。去胶。		桥膜金属层 平面图形定 义。
A9*	利用新的 PECVD 工艺条件淀积低应力 SiN 2000 \AA 。		
A10	光刻 M3 (阳版)。RIE 刻蚀 SiN 和部分 SiO_2 。(光刻胶未示出)		
A11	BHF 去除硅片表面残余的 SiO_2 。去胶。		除去键合区 的 SiO_2 。

A12*	甩胶, 光刻掩膜版 M8, 以 ICP 刻蚀定义浓硼掺杂层的平面图形。		图形与 M4 相似, 定义桥膜硅层的平面图形
A13	硅片正面甩光刻胶作保护, 用 BHF 除去背面的 SiO_2 。去胶。		
Pyrex 7740 上的工艺			
B1*	甩胶。光刻掩膜版 M5 (阴版)。高温坚膜。通过 BHF 腐蚀深度为 6500 \AA 的浅槽。		
B2	溅射 Cr/Au—— $300/6700\text{ \AA}$		
B3	甩胶, 光刻掩膜版 M6 (阳版)。通过湿法腐蚀定义出 CPW 图形。去胶。		M5 和 M6 图形相同。
键合与键合后工艺			
AB1	硅片和玻璃片图形对准, 进行阳极键合。条件为 380°C , 静电电压 1200V , N_2 气氛, 压力为 1 atm 。		
AB2*	在硅片背面甩胶保护, 从玻璃背面划片, 最终玻璃层余厚为 $100\sim120\mu\text{m}$ 。去胶后用 KOH 减薄至硅层余厚 $12\mu\text{m}$ 。去 K^+ 。		
桥膜结构的湿法释放			

AB3*	硅片用 KOH 腐蚀除去掺杂浓度较低的硅层, 使桥膜平面结构显露出来, 最终完成结构释放。		在样品完成清洗后要用升华干燥法进行处理, 以防止粘附。
桥膜结构的干法释放			
AB4*	利用 KOH 长时间腐蚀, 除去低掺杂的硅层, 至余厚 $12\mu\text{m}$ 。去 K^+ 。用 ICP 刻蚀除去 $6\mu\text{m}$ 以上的硅层, 使桥膜平面结构显露出来, 最终完成结构释放。		

注: *表示经过改进的工艺。

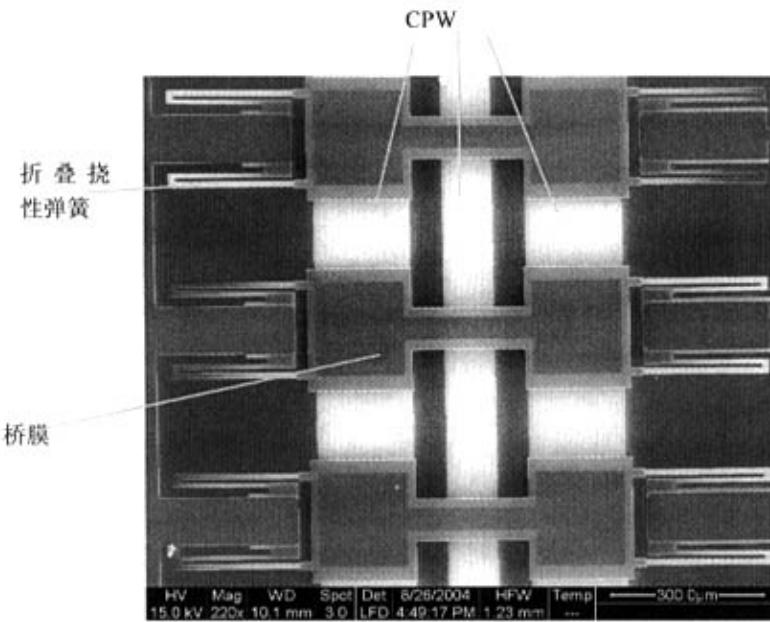
5. 3. 2 样品加工结果

利用表 5.2 示出的工艺, 成功地实现了全部所设计的器件结构和测试结构, 图 5.8 示出通过 KOH 腐蚀最终获得的, 基于浓硼硅层的 PSEQV 和 PSVAR 复合桥膜结构, 图 5.9 则示出基于相同工艺的串联开关。图 5.10 则示出通过干法刻蚀最终制成的基于浓硼层的移相器桥膜阵列结构。图 5.11 示出浓硼掺杂桥膜的表面, 可以看到其表面较为光滑, 而且出现浓硼掺杂层表面特有的布纹现象。图 5.12 则示出硅层未经浓硼掺杂的 PSVAR 型移相器和旁路开关。限于篇幅, 器件样品照片没有全部示出。

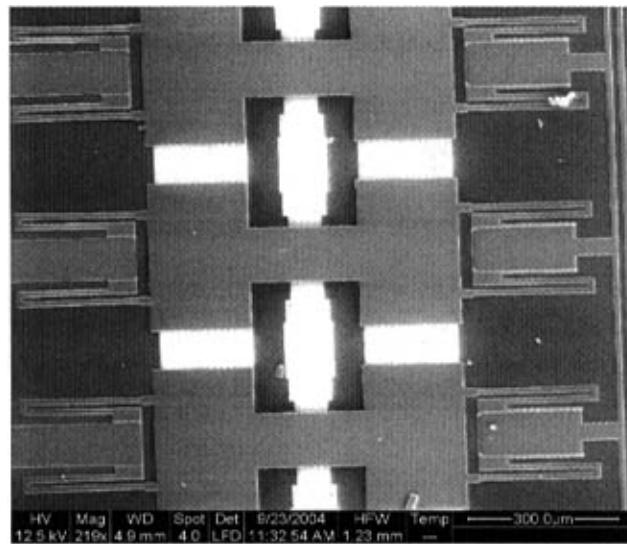
5. 3. 3 应力和悬空桥膜厚度的检测

由于 B 原子的直径 (0.88\AA) 小于 Si 的 (1.17\AA), 而 B 原子在 Si 晶格中又属于替位杂质, 故浓硼掺杂后的 Si 层将存在很大的张应力。这一应力一般会随着掺杂浓度的增加而上升^[6], 由于掺杂浓度随着距表面的深度增加而减少, 张应力在各层中呈不均匀分布, 即出现应力梯度。应力和应力梯度的存在将使得脱离衬底约束的浓硼掺杂硅层出现收缩应变和卷曲现象。由于桥膜的挠性悬挂弹簧设计均采用了折叠式的结构, 平行于衬底方向上的应力可以得到较好的释放, 但应力梯度将使桥膜发生卷曲。桥膜的结构采用对称的蝶形结构, 其中段变形小, 而两侧侧翼变形大。这一问题造成中段的高度大大超过 $2\mu\text{m}$ 的设计值, 移相器在模拟工作时的射频特性因此将偏离预定的设计。

为了检测应力和应力梯度, 本文设计了如图 5.13 所示的应力测试图形。由于版图面积的限制, 图形 (a) 仅制作在硅层上, 用于检测浓硼掺杂后的应力, 图形 (b) 为长度依次增加的悬臂梁和双端固支梁, 在一个芯片中出现两次, 分别对应与器件桥膜相同的是 $\text{SiN}/\text{Au}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ 复合膜结构和仅有硅膜的情形。



(a) PSEQV 型移相器 (STRATA-DB235 聚焦离子束设备拍摄)



(b) PSVAR 型移相器 (Quanta 200F 扫描电子显微镜拍摄)

图 5.8 通过湿法释放获得的、经过浓硼掺杂的 PSEQV 型和 PSVAR 型移相器的 SEM (扫描电子显微镜) 照片。

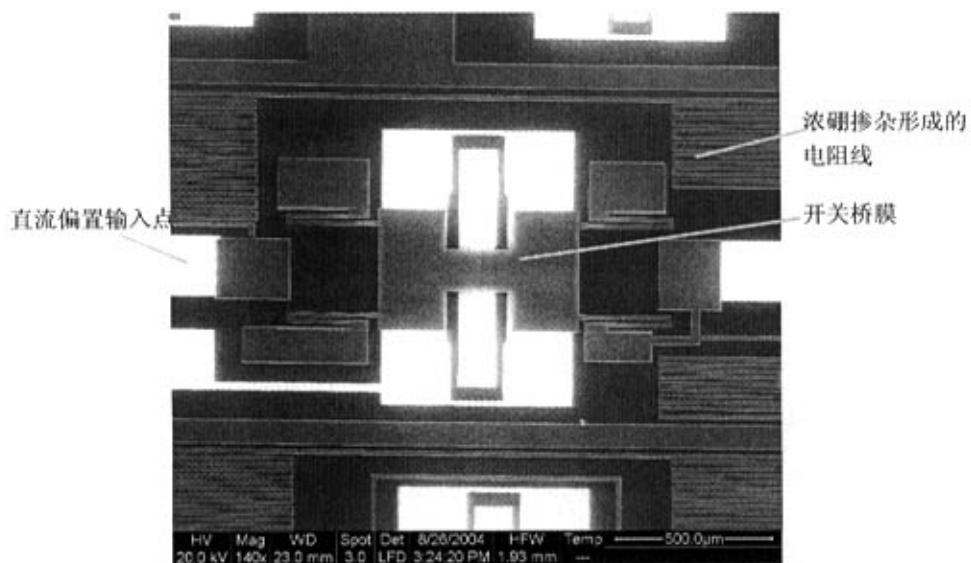


图 5.9 通过湿法释放得到的串联开关 (经浓硼掺杂)

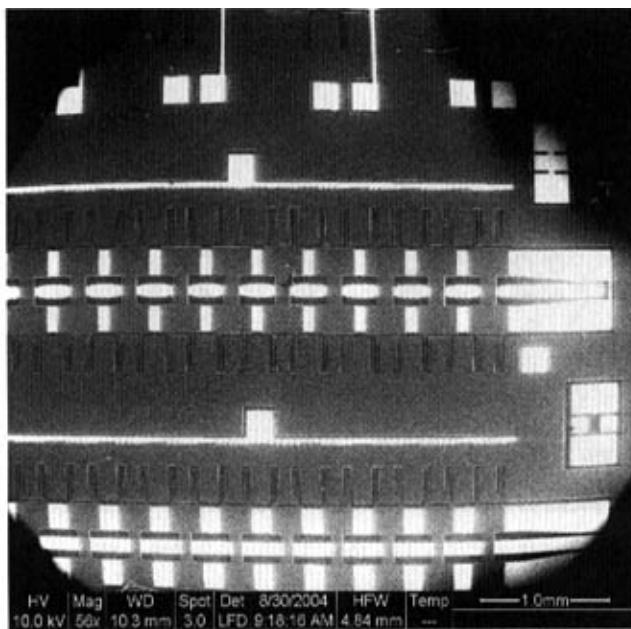


图 5.10 干法释放得到的桥膜阵列 (经浓硼掺杂)

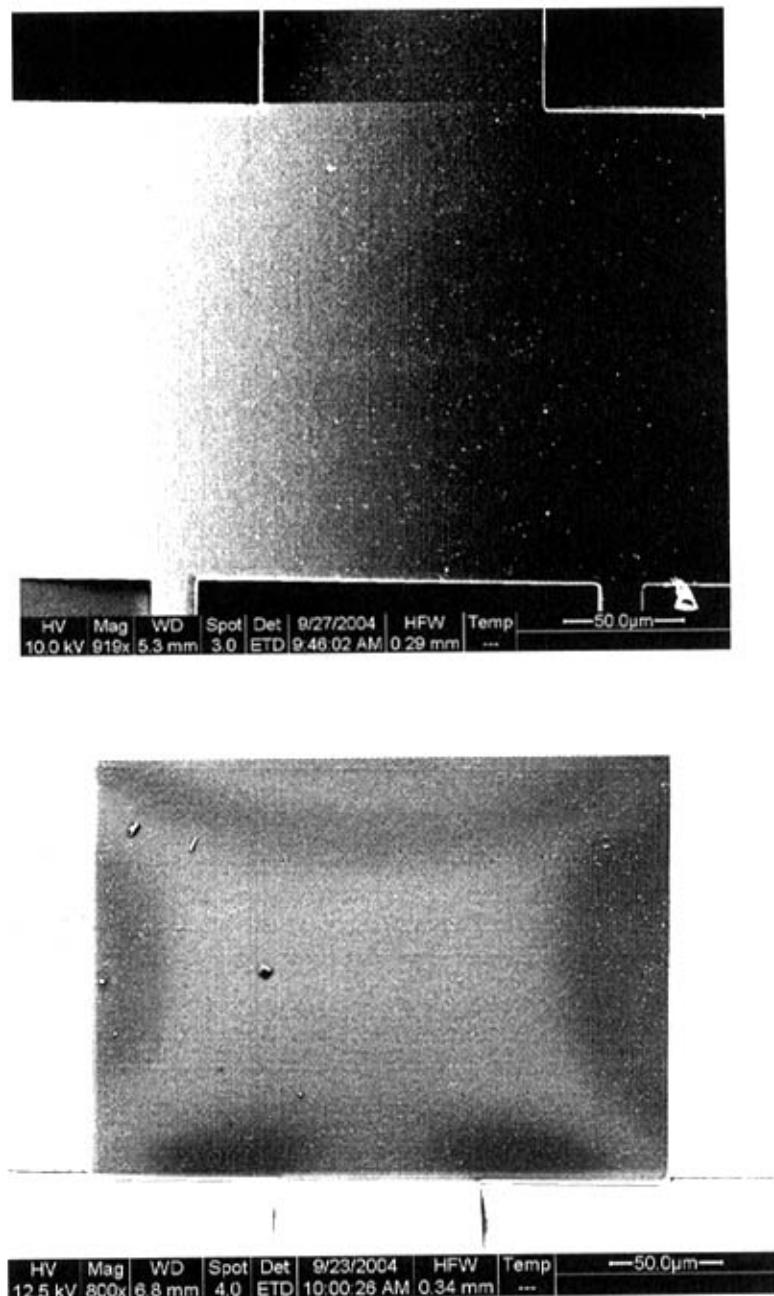
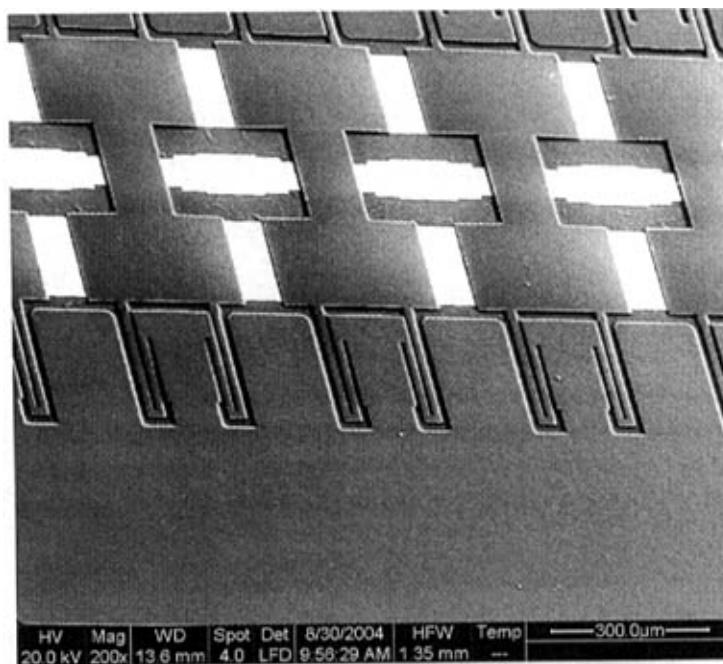
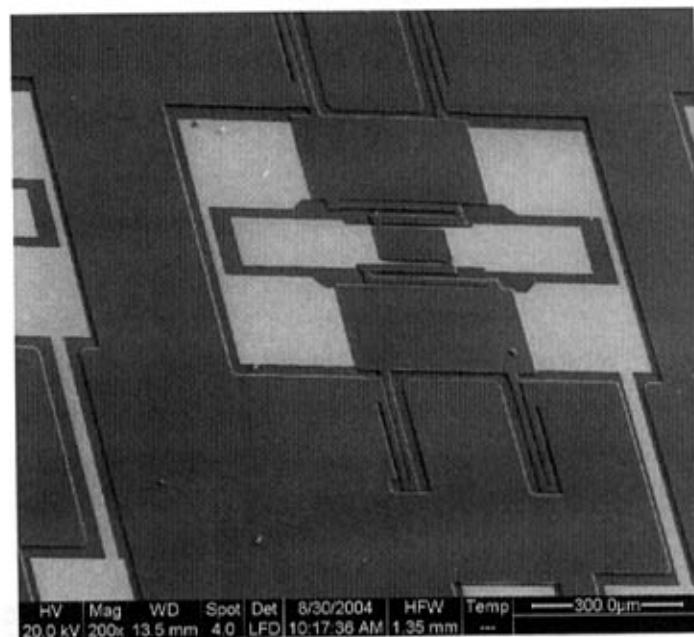


图 5.11 经过浓硼掺杂的桥膜的表面。可以看到浓硼层特有的“布纹”现象。上图为悬空桥膜。下图中，桥膜的四周粘附到衬底上，中间因应力梯度的存在而鼓起。



(a) 基于未浓硼掺杂桥膜的 PSVAR 移相器



(b) 基于未重掺杂硅层的旁路开关

图 5.12 未经浓硼掺杂的 PSVAR 移相器和旁路开关（干法释放）

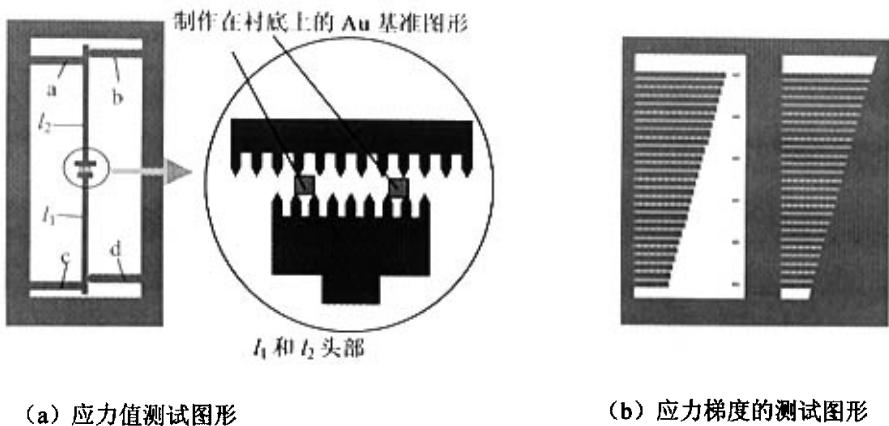


图 5.13 应力测试图形

在图形 (a) 中 a、b、c、d 段的变形将使得 l_1 、 l_2 段的尖部原先对齐的部位发生相对偏移，测量出这一相对偏移就可以得到与 c、d 段中应力有关的信息。尖齿部分采用了与游标卡尺类型的刻度原理，用于直接读出偏移的大小。在实际工艺流片中，由于尖齿部分在工艺中腐蚀严重，我们直接对 l_1 和 l_2 头部的两端相对于制作在衬底上的 Au 图形的坐标进行测量，取其算术平均值作为头部中心点的位置，从而最终得到 l_1 和 l_2 头部中心点的相对偏移 D_{off} 。之所以采用 D_{off} 而不是头部中心点的位置来衡量应力引入的变形，主要是考虑到键合时硅/玻璃片的对准偏差会引入误差。

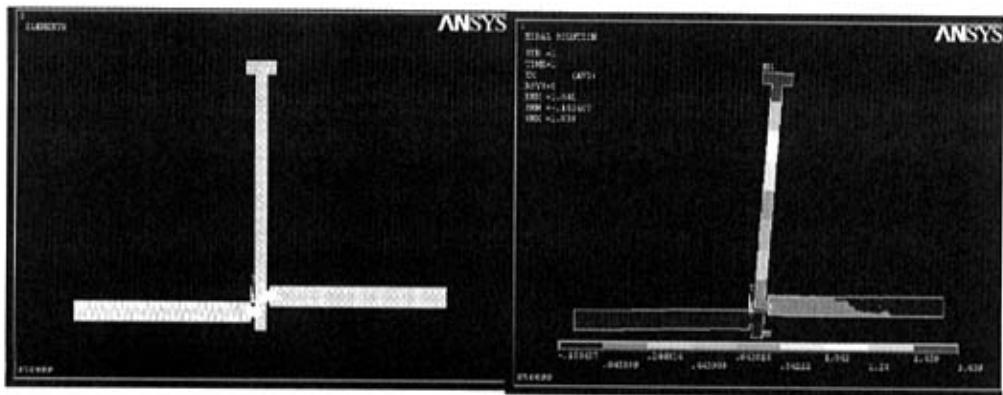


图 5.14 测试图形的有限元模型（左）和内应力为 100MPa 时的仿真结果（右）。

为了求出 a、b、c、d 段的内应力与 D_{off} 间的关系，利用 Ansys 软件对测试图形 (a) 进行了仿真，加载方式为内应力加载。仿真模型如图 5.14 所示。仿真的结果如图 5.15 所示，可以看出，内应力与 D_{off} 间存在线性关系。利用该结果，在测出偏移 D_{off} 后，可以通

过拟合的方法找出对应的应力。在实际工艺中，我们根据这一方法对浓硼掺杂的硅层和未浓硼掺杂的硅层进行了测试。由于测量时所用的显微镜 Olympus STM6 的最小读数为 $0.1\mu\text{m}$ 。故这种方法的分辨能力受到一定的影响，要提高分辨率必须增加 l_1/l_2 的长度。应力测量结果如表 5.3 所示，可以看出在加工完成后获得的浓硼层具有很高的张应力，经过一定的低温加热处理后，其内应力有所降低。未经浓硼掺杂的硅层的内应力很小。

表 5.3 测量到的应力测试图形尖部偏移 $1/2 D_{\text{off}}$ 与对应的内应力

硅层类型	$1/2 D_{\text{off}}$ (μm)	内应力 (MPa)
刚完成释放的浓硼层	1.3	73
经过长时间热处理 (250°C , 180h, 真空或 N_2 气氛) 后的浓硼层	1.0	50
未经过浓硼掺杂的硅层	0.6	10

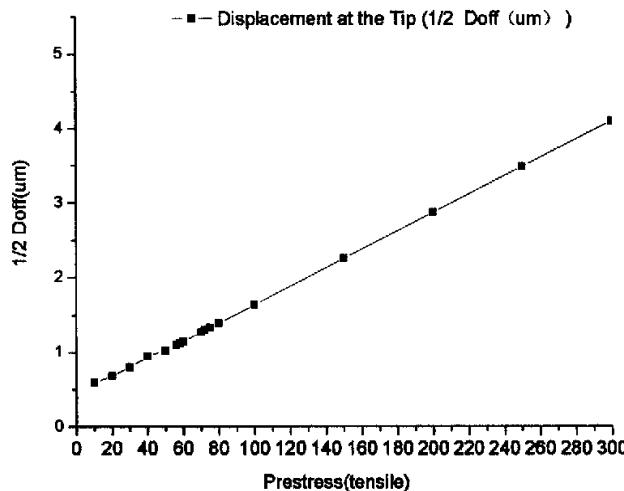
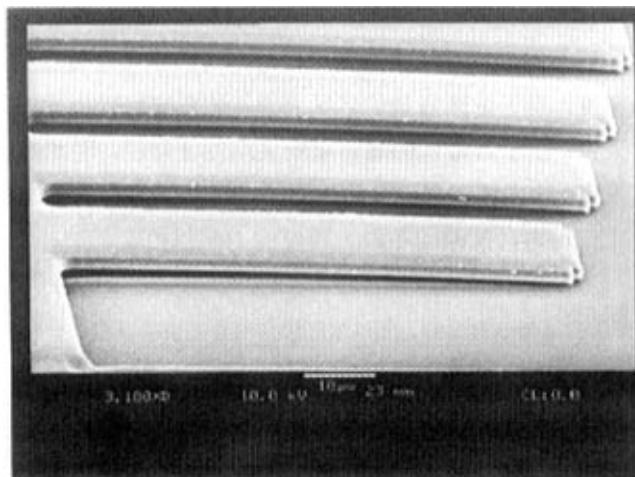


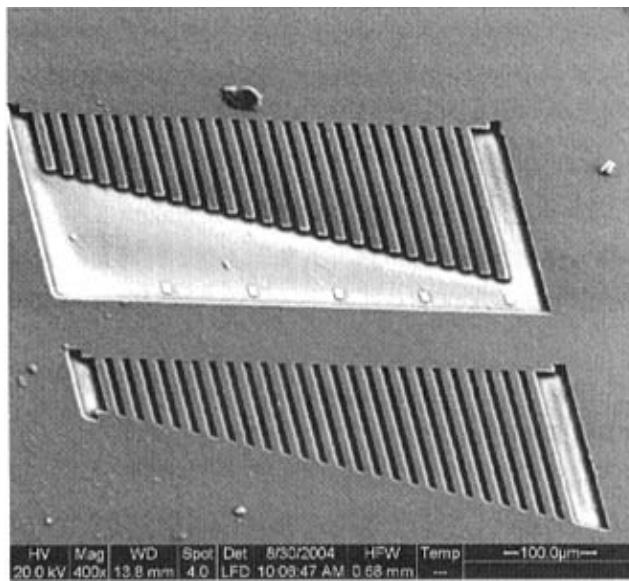
图 5.15 图 5.13 (a) 所示的应力测试图形中, l_1 尖部的偏移 ($1/2 D_{\text{off}}$) 与内应力的关系。

图 5.13 (b) 中的测试图形由长度从 75 到 $200\mu\text{m}$ 、宽度为 $15\mu\text{m}$ 的悬臂梁和双端固支梁组成，这两组梁各有 26 根。其根部距衬底的高度由表 5.2 中的工艺 A2 来保证，一般为 $2\mu\text{m}$ (多层复合梁) 和 $3\mu\text{m}$ (硅梁)。该值可以在 A2 工艺完成后通过台阶仪获得。

图 5.16 示出由浓硼掺杂的硅层构成的悬臂梁尖端 (未经过热处理的) 与未掺杂硅层的悬臂梁尖端的变形情况。由于垂直于衬底方向上几个 μm 的高度差很难直接观测到，我们最终是采用光学测量显微镜在跟踪模式下对桥膜形状进行逐点扫描的方法来测量其变形的，具体结果见第六章。



(a) 浓硼掺杂后的多层复合悬臂梁的变形。其中最短的悬臂梁 ($75\mu\text{m}$) 的尖端也已经贴附到衬底上。



(b) 未经浓硼掺杂的多层复合悬臂梁和双端固支梁的变形。仅长度最大的悬臂梁的尖端贴附到衬底上。

图 5.16 经过浓硼掺杂的多层复合悬臂梁和未经浓硼掺杂的多层复合悬臂梁及双端固支梁的变形。

除了可以用这些悬臂梁测试图形来近似观察应力梯度的大小外, 还可以通过对梁的尖端相对衬底的高度的测量来获得悬空桥膜的厚度。目前悬空膜的厚度的测量是一个难题, 往往要用到红外设备, 而且校准困难。对于本论文来说, 悬臂梁测试图形能很好地解决这一难题。其原理是: 在最长的悬臂梁的尖端处, 因为应力梯度的作用将有一段紧贴在衬底

上（测量显微镜和台阶仪的结果可以证明这一点），测出这一段的高度即可得到悬空膜的厚度。由于每个芯片的测试图形中有两组悬臂梁，分别对应于多层复合梁和硅梁的情形，故还可以获得硅层的厚度。对于浓硼掺杂的硅层来说，该方法可以很好的完成测量，但对于未浓硼掺杂的硅层来说，由于其最长的悬臂梁的尖端往往悬空，因此难以准确测量出所有悬空桥膜的厚度。表 5.4 给出通过台阶仪测量到的经过浓硼掺杂的悬空桥膜的厚度，可以看出复合桥膜厚度比较均匀，其波动在最大膜厚的 10% 以内。

表 5.4 通过悬臂梁尖端部分测出的、经过浓硼掺杂的悬空桥膜厚度（台阶仪测量）

样品	1	2	3	4	5	6	7	8	9
多层复合 梁厚度 (μm)	3.230	3.135	3.276	3.014	3.291	3.002	3.012	3.102	2.989
硅梁厚度 (μm)	2.170	2.103	2.115	2.303	2.012	2.115	2.050	2.201	2.037

5.4 小 结

本章介绍了作者结合北京大学微米/纳米加工技术国家重点实验室现有工艺流程和加工条件，借鉴金玉丰等人提出的一种微机械开关加工工艺，针对自己的器件结构设计开发出的一种体硅加工工艺流程。该工艺成功地制作出分布式微机械移相器和开关型器件的样品。

本章介绍了关键工艺的研究工作和有创新性的成果，包括

1. Au 层上生长高质量 SiN 薄膜的工艺。以常规工艺条件在 Au 上生长出的 SiN 表面粗糙，漏电流大，不能满足器件的要求。通过观察、分析和反复试验，找到了 SiN 薄膜表面黑点多、漏电流大的一种解释，并在此基础上提出了新的工艺条件。SEM、光学显微镜的观察结果以及对漏电流的测试，都证明新方法能保证 SiN 的成膜质量，薄膜的表面光亮、颗粒细密、漏电流小。
2. 玻璃衬底上较深浅槽的湿法腐蚀工艺。原有的湿法腐蚀工艺所能获得的槽深有限，而干法刻蚀的均匀性不好。通过改用新的光刻胶和涂胶、坚膜工艺条件，用 BHF 在 Pyrex7740 玻璃上腐蚀出 6500Å 的浅槽，其均匀性较好，从而保证了后续工艺的进行。
3. 硅 - 玻璃的键合强度的提高。在硅片 KOH 减薄过程中，发现硅结构大面积、甚至全部脱落的现象，这说明键合强度不高。经过分析，认为浓硼层的表面应力造成的硅片变形可能是造成键合质量不高的主要原因。为此对工艺流程进行了调整，将键合后进行的对浓硼层的 ICP 刻蚀提前到键合前完成，解决了硅片内应力过大、影响键合强度的问题，并保证了最终器件结构的获得。

4. 桥膜的释放方法。这是器件制作的关键性工艺。原有的工艺流程是通过对 KOH 腐蚀余下的桥膜浓硼掺杂层的刻蚀来实现桥膜结构释放的，该方法存在涂胶困难，刻蚀时结构容易崩落等问题，不能保证器件桥膜和阵列的完整。在新的工艺流程中，由于对桥膜硅层平面图形的刻蚀提前至键合前完成，因此，对桥膜的释放主要是一种无掩膜的、均匀的减薄过程。当已经用 ICP 刻蚀出的平面图形最终暴露出来时，停止减薄，就可以获得最终的、可动的桥膜结构。在此基础上形成了湿法和干法两种释放法。湿法释放能获得厚度均匀的桥膜，但在干燥时需要经过升华法处理以防止桥膜的粘附，干法释放避免了升华法处理的麻烦，而且实现了对未进行浓硼掺杂的硅片的加工，但厚度控制较为困难。

在解决上述关键工艺问题后，最终形成了一套包括划片在内的较为完整的加工工艺流程，成功地保证了由多个桥膜组成的分布式移相器桥膜阵列和开关器件的加工。

在应力和应力梯度检测方面，本论文还介绍了相应检测图形的设计、有限元分析和在此基础上测出的浓硼掺杂层应力，并给出了一种可以对本论文所用的悬空桥膜进行膜厚测量的简单方法。

第六章 器件测试结果与分析

本章首先介绍对加工出的移相器样品的桥膜变形情况的测量结果及分析,然后介绍对移相器样品的静态驱动特性及高频特性的测试情况,除了对测试结果进行描述外,还将对结果进行分析和讨论。

6. 1 移相器桥膜在应力作用下的变形测量

由于B原子的直径(0.88Å)小于Si的(1.17Å),而B原子在Si晶格中又属于替位杂质,故浓硼掺杂后的Si层将存在很大的张应力。这一应力一般会随着掺杂浓度的增加而增加^[6],由于掺杂浓度随着距表面的深度增加而减少,张应力在各层中呈不均匀分布,即出现应力梯度。应力和应力梯度的存在将使得脱离衬底约束的浓硼掺杂硅层出现收缩应变和卷曲现象。由于桥膜的挠性悬挂弹簧设计均采用了折叠式的结构,平行于衬底方向上的应力可以得到较好的释放,但应力梯度却使得桥膜发生卷曲。

6. 1. 1 桥膜的应力梯度测量

为了观察应力梯度的分布状况,曾设计出第5.3.3节示出的悬臂梁和双端固支梁应力梯度测试图形(参见图5.13)。该图形在版图上出现两次,分别对应SiN/Au/SiO₂/单晶硅复合梁和单晶硅梁。悬臂梁的弯曲可以指示复合桥膜和单晶硅的应力梯度造成的弯矩的方向,是目前研究应力梯度常用的一种结构。双端固支梁的采用主要是考虑到桥膜的多层复合结构表现出来的总的应力在工艺流片前无法确定,有可能为压应力。

利用Olympus STM 6光学测量显微镜在各梁上进行的逐点扫描测量显示,经过浓硼掺杂和未经浓硼掺杂的、复合的和单晶硅的双端固支梁,其高度基本没有变化,高度的波动在梁的上表面(测量时对准的面)距衬底的最大高度(约6.0μm)的10%以内,这表明此时各种双端固支梁的总内应力为张应力,而且应力梯度对双端固支梁的形状几乎没有影响。

对悬臂梁的测量表明,所有经过浓硼掺杂的复合和单晶硅悬臂梁(总共26根,长度从75~200μm,宽度为15μm)的尖端均接触到衬底上。从这一结果可以大致看出,浓硼层的应力梯度造成的弯矩很大。未经浓硼掺杂的复合和单晶硅悬臂梁的尖端均悬空,高度波动均在梁的上表面距衬底的最大高度(约6.0μm)的40%以内,但两种悬臂梁均出现了弯曲,而且弯曲方向与经过浓硼掺杂的悬臂梁一致。

到目前为止,要准确分析桥膜的应力梯度分布是较为困难的,不但需要从力学上对理论模型开展细致而深入的研究,而且必须进行多次工艺加工和测试,才有可能得出较为满意的结果。目前这一方面国内外的研究尚不成熟,没有可供参考的方法。另外,桥膜的复合结构也增加了分析的难度。目前,本论文所采用的图形只能大致反映应力梯度的方向和大小。

一种可能的应力梯度分布测量方法,是对同一样品进行分步刻蚀或腐蚀,并逐次记录

测试图形的变形情况, 其工作量较大, 而且对刻蚀的深度控制精度要求较高, 目前实验室中的条件尚不具备。

6. 1. 2 桥膜的变形测量

为了弄清桥膜的变形情况, 作者采用 Olympus STM6 光学测量显微镜在跟踪和自动聚焦模式下对经过浓硼掺杂的桥膜和未经浓硼掺杂的桥膜上表面各点的高度进行了逐点测量。测量的基准为衬底表面的 CPW 图形。测量时扫描的路径如图 6.1 所示, 测量出的经过浓硼掺杂的 PSEQV 和 PSVAR 两种桥膜的形状如图 6.2 和图 6.3 所示。

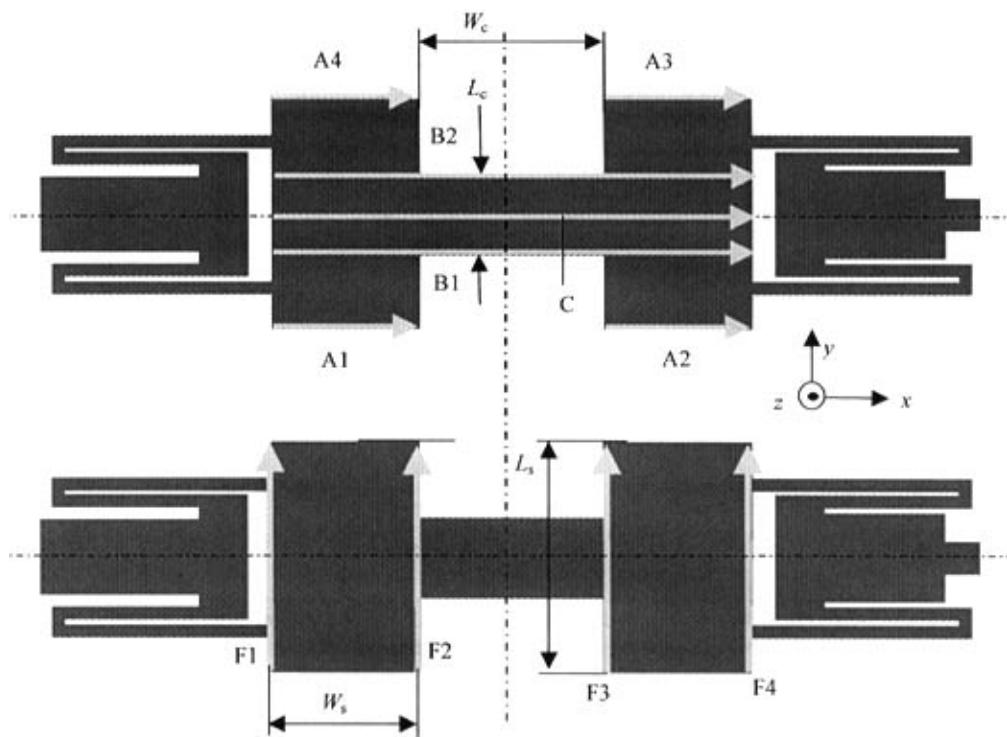


图 6.1 桥膜变形测量所用的扫描路径, 上下图为同一桥膜。

从图 6.2 可以看出, 对于 PSEQV 桥膜, 在应力梯度的作用下, 沿 y 轴看到的桥膜已呈拱形 (或可以近似视为梯形), 由于结构的对称, 桥膜中段较为平坦, 中段上各点距衬底的高度差在 $1\mu\text{m}$ 以内; 中段与扫描路径边缘处的高度差 ΔH_c 约为 $6.5\mu\text{m}$ 左右。沿 x 轴看到的桥膜侧翼呈梯形, 梯形的顶边长度与中段的宽度 L_c 近似相等, 梯形的高度为 ΔH_s , 而且同一个桥膜的边缘 $F1$ 和 $F2$ 所成梯形的高度近似相等。图 6.3 表明, PSVAR 桥膜的变形情况也类似。只要测出 ΔH_c 、 ΔH_s 就可以确定桥膜的变形情况。图 6.4 则示出了一个 PSVAR 桥膜侧翼的 SEM 照片, 从中可以大致看出桥膜的侧翼变形情况。图 6.5 示出由于桥膜变形而引起的挠性弹簧的变形。

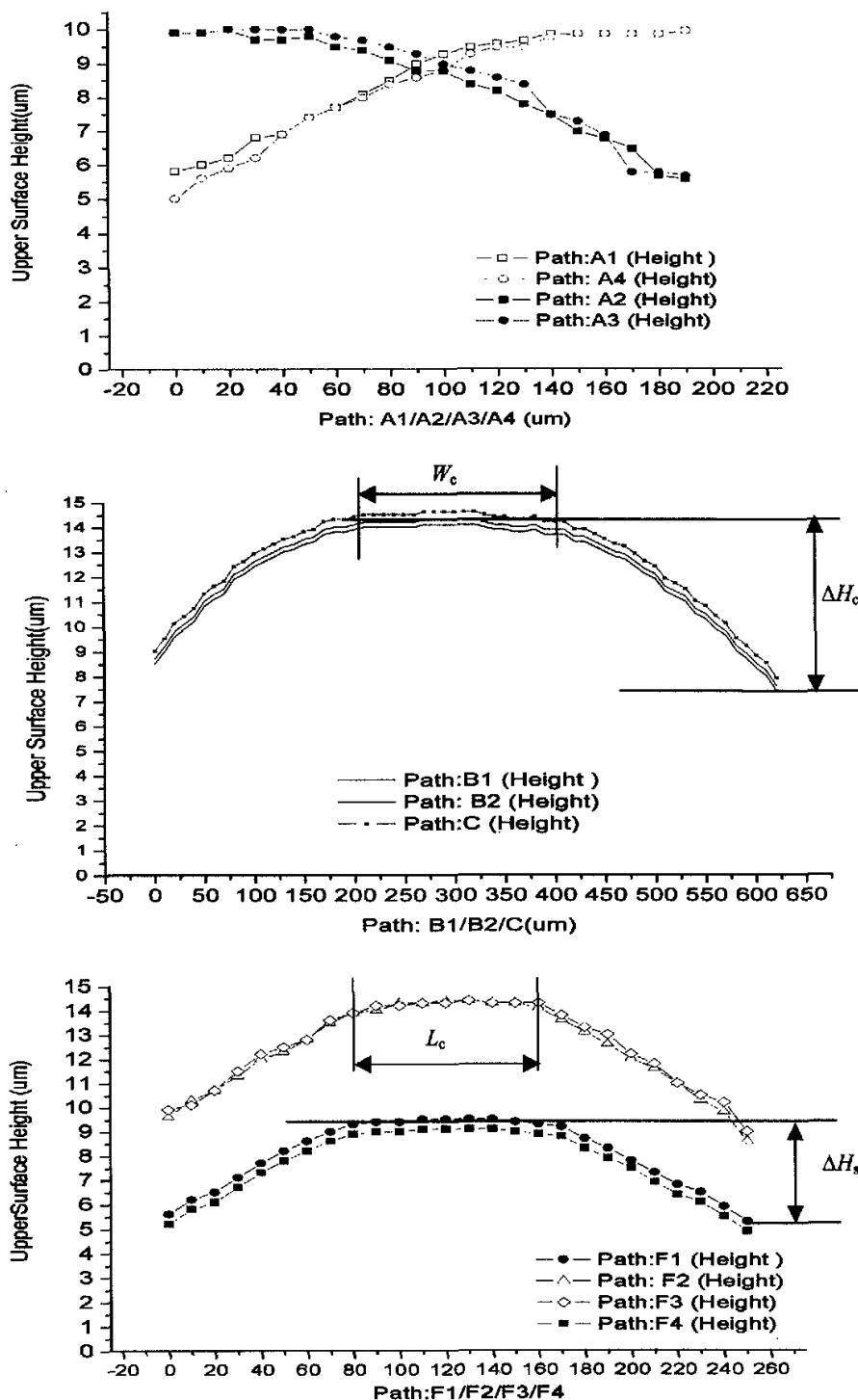


图 6.2 经过浓硼掺杂的 PSEQV 移相器桥膜的变形情况

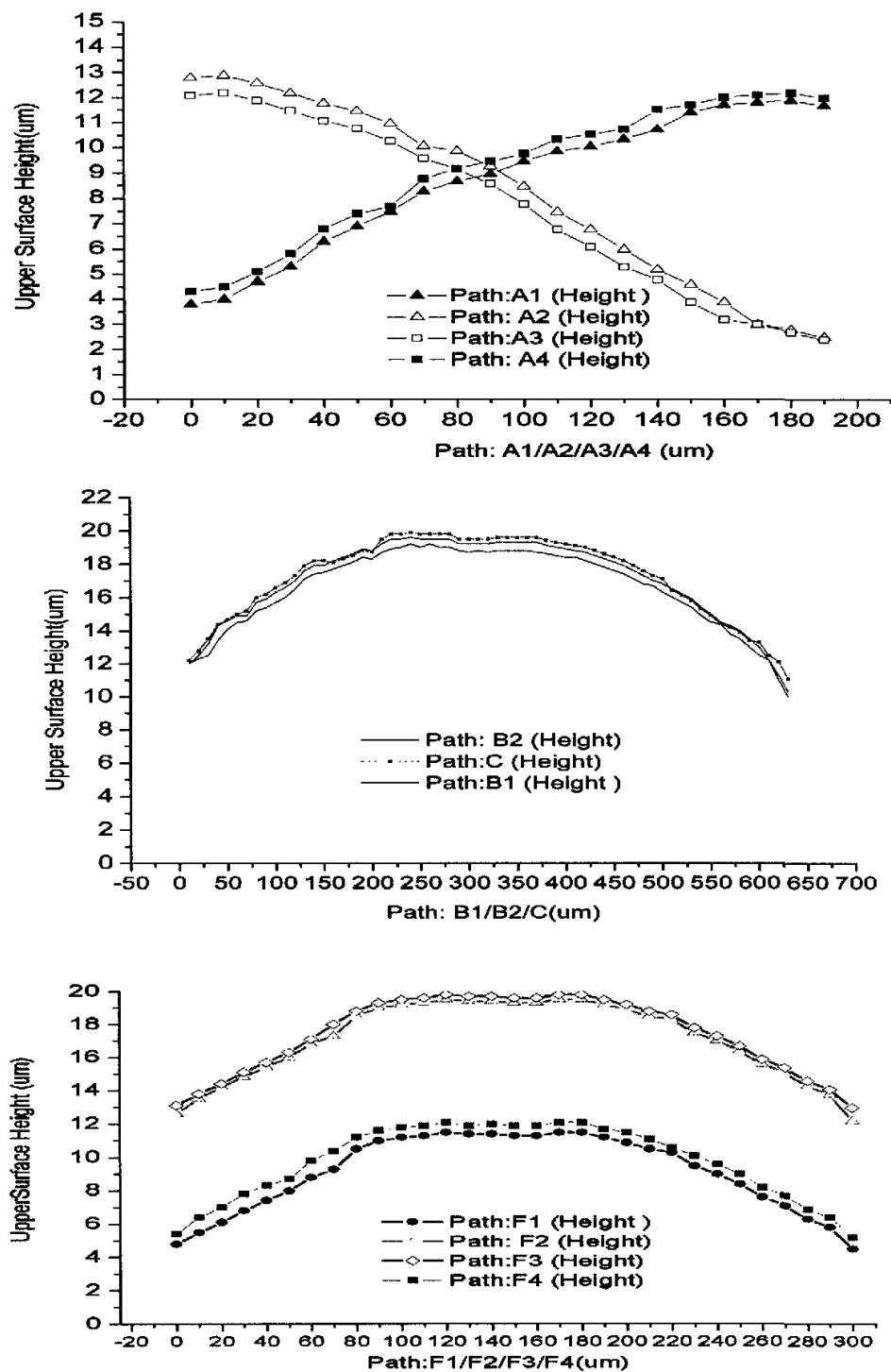


图 6.3 经过浓硼掺杂的 PSVAR 移相器桥膜的变形情况

表 6.1 示出利用测量显微镜对经过浓硼掺杂的桥膜和未经浓硼掺杂的 PSEQV 和 PSVAR 这四种桥膜的变形进行测量得到的结果。每种桥膜取不同芯片上的 10 个样品, 表中列出的值为各样品的测量值的平均值。从中可以看出, 经过浓硼掺杂的复合桥膜, 其变形较大, 而且桥膜面积较大的 PSVAR 的变形要大于桥膜面积较小的 PSEQV, 这样的变形势必影响到模拟驱动时的射频特性; 未经浓硼掺杂的复合桥膜, 其变形要明显小得多, 由于硅层未经浓硼掺杂, 内应力和应力梯度很小, 所以变形很有可能是多层膜的内应力方向或大小不同而造成的。我们还设法将部分未掺杂复合桥膜上的 SiN 除去, 发现桥膜的变形没有明显变化, 这说明 SiN 是低应力的, 而此时的变形可能主要是 SiO_2 和 Au 层的内应力间的差异造成的。

表 6.1 经过浓硼掺杂和未经浓硼掺杂的桥膜的变形测量值 (μm)

经过浓硼掺杂的 PSEQV	ΔH_c	6.5
	ΔH_s	4.0
经过浓硼掺杂的 PSVAR	ΔH_c	7.8
	ΔH_s	6.7
未经过浓硼掺杂的 PSEQV	ΔH_c	2.8
	ΔH_s	1.2
未经过浓硼掺杂的 PSVAR	ΔH_c	5.8
	ΔH_s	3.5

6. 2 微机械移相器的静态驱动特性测试

图 3.22 曾示出在光学显微镜下观察到的桥膜的连续驱动和数字驱动过程的示意图。我们发现当偏置电压加到 40V 左右时 PSEQV 出现第一次 Pull-in, 这是整个桥膜的 Pull-in, 此时桥膜侧翼的边缘 (即图 6.1 中的 A1~4 扫描路径) 紧贴到 CPW 的 GND 上, 桥膜的中段仍保持悬空, ΔH_c 减小。当偏置电压继续增加, 超过 60V 时, 阵列的某些桥膜的中段开始吸合到 CPW 的中心导体上, 此时发生第二次 Pull-in, 即桥膜中段的 Pull-in。要保证一个 PSEQV 移相器中所有桥膜的吸合一般需要 90~95V 电压。对于 PSVAR, 发生两次 Pull-in 的偏置电压分别为 60 和 80V, 但当偏置电压加到测试系统所允许的电压限 100V 时, 只有部分桥膜能发生第二次 Pull-in。PSVAR 移相器的两次 Pull-in 的电压之所以高于 PSEQV 的, 一方面是因为其面积较大, 因而桥膜变形较大, 另一方面是因为其沿 CPW 信号传输方向的尺寸大于 PSEQV 的, 桥膜绕 y 轴的刚度较大。

浓硼掺杂第一次 Pull-in 电压之所以高于解析解, 主要是因为桥膜变形的缘故。文献[2]曾提出等效初始桥膜 (气隙) 高度的概念, 其实质是用一个均匀、一致的气隙高度来代替实际桥膜上各点变化的初始气隙高度, 等效的原则是前者对应的对桥膜的总的静电引力等于后者的。根据文献[2]提出的这一概念, 我们从 PSEQV 移相器桥膜变形实测值求出等效

的初始气隙高度约为 $7\mu\text{m}$ ，从图 3.27 可以查出，此时的 Pull-in（第一次）电压为 33V。这说明桥膜变形是造成第一次 Pull-in 电压与解析解有较大差异的主要原因。

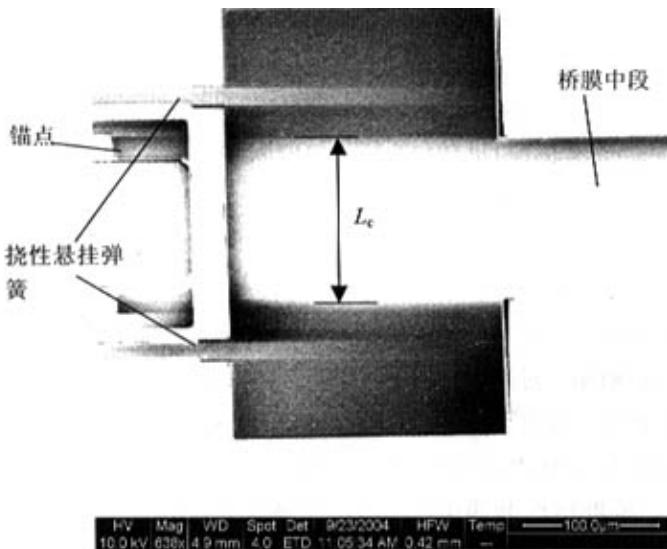


图 6.4 桥膜侧翼的变形

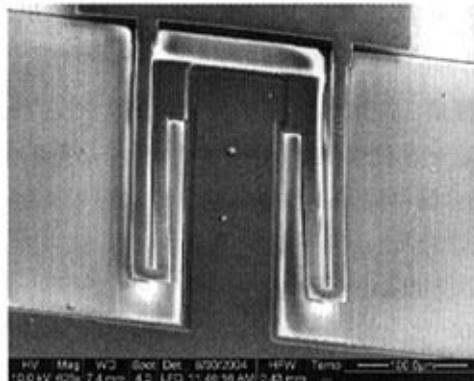


图 6.5 经过浓硼掺杂的复合桥膜的挠性弹簧发生的变形。

在第一次 Pull-in 前，器件处于模拟驱动状态，相移连续变化，因为桥膜两个侧翼面积之和远大于中段与 CPW S 导体交迭的面积，而且其高度又低于中段的，因此，CPW 的加载电容值 C_b 约等于桥膜中段与 S 导体间的电容 C_c 。由于桥膜变形后，中段距衬底的距离大大高于原设计值，因此 C_b 的量值、变化范围及器件移相量将大大低于设计值。

由于第二次 Pull-in 的出现和桥膜的变形，移相器可以实现数字式驱动，工作于数字调相模式。此时桥膜的 UP 状态和 DOWN 状态分别指未加偏置电压和桥膜中段发生 Pull-in 的状态。UP 态时，因侧翼面积很大，桥膜的等效加载电容 C_{bu} 约等于中段到 S 导体的电

容 C_{cu} 。第二次 Pull-in 前桥膜中段仍较为平坦，中段与 CPW S 导体间气隙高度与 ΔH_s 近似相等。桥膜中段被吸合到 CPW 中心的 S 导体上后，由于桥膜中段与 S 导体间的电容与第二次 Pull-in 前相比大大增加（当 ΔH_s 为 $2\mu\text{m}$ 时，这一电容比可以达到 76 以上），从图 3.7 给出的电路模型可知，此时桥膜中段电容 C_{cd} 与侧翼到 GND 间的电容 C_{sd} （达到最大值 C_{smax} ，见 3.4 节）相比很小，CPW 上总的加载电容近似等于 $2C_{sd}$ 。因此数字驱动时，CPW 上的桥膜加载电容在 DOWN 和 UP 的电容比就可以近似表示为 $2C_{sd}/C_{cu}$ 。

观察中还发现，第一次 Pull-in 后桥膜的侧翼形状基本不随偏置电压的增加而变化，这可能是因为侧翼形成了夹层型复合柱壳形结构，这种结构的刚度大，抗 z 方向的载荷能力强^[3-5]。另一方面，桥膜的中段两侧属于弹性固支，所以随着电压的增加可以产生足够的变形而出现吸合。图 6.6 示出一个在 150V 偏置电压下发生击穿并粘附于衬底上的 PSEQV 桥膜，以及利用 Olympus STM6 对其进行测量的结果。从中可以看出，桥膜中段吸合到 CPW 的 S 导体上，桥膜侧翼只发生了极小的变形， ΔH_s 变为 $3.6\mu\text{m}$ ，（表 6.1 中给出的测量值为 $4.0\mu\text{m}$ ）。作者曾参考文献[6]给出的双端固支桥膜的等效弹簧常数公式和平行板驱动的 Pull-in 电压表达式，对 PSEQV 桥膜中段吸合到 CPW S 导体上（第二次 Pull-in）的阈值电压进行了分析。此时双端固支桥膜的等效弹簧常数（包括了内应力的影响）为

$$k_{\text{eff}} = \frac{32Ewt^3}{l^3} \left(\frac{1}{2 - (2 - \frac{W_{\text{CPW,S}}}{l})(\frac{W_{\text{CPW,S}}}{l})^2} \right) + \frac{8\sigma(1-\nu)wt}{l} \left(\frac{1}{2 - \frac{W_{\text{CPW,S}}}{l}} \right) \quad (6.1)$$

式中， E 为桥膜的 Young's 模量， ν 为 Poisson 比， l 为桥膜中段的长度， w 为桥膜中段的宽度， t 为桥膜的厚度， $W_{\text{CPW,S}}$ 为 CPW 的信号导体的宽度， σ 为残余应力（ $=73\text{MPa}$ ，见表 5.3）。由于桥膜中段为复合膜结构，故利用材料分析软件 Laminator（基于经典迭合层复合材料模型）来求解其等效的 Young's 模量和 Poisson 比，结果为 164GPa ， $\nu=0.26$ 。基于式 (6.1)，可以求出第二次 pull-in 电压 $V_{\text{P12}}=170\text{V}$ （不包括第一次 Pull-in 的电压）。事实上，当总的偏置电压为 60V 以上时，就有桥膜中段吸合到 CPW S 导体上。解析解与测量结果之所以出现这样大的差异，主要是因为前者认为桥膜两端是固支的，而实际上桥膜中段两端与侧翼相接处可以发生一定程度的偏转，所以等效弹簧刚度要大大小于式 (6.1) 给出的值。要精确求解 V_{P12} 的数值，就必需考虑到这一偏转对等效弹簧刚度的影响。

图 6.7 示出经过浓硼掺杂的 PSEQV 和 PSVAR 移相器的相移随偏置电压变化的情况。从中可以看出两种移相器的相移的大小一开始随偏置电压的增加而缓慢上升，但当电压超过某个阈值时（对 PSEQV 约为 40V 、对 PSVAR 约为 60V ），相移的大小随电压的增加而迅速上升，这一阈值对应于第一次 Pull-in 的电压。偏置电压在 0V 和第一次 Pull-in 的阈值电压间变化时，器件的各个桥膜的高度发生连续的变化，此时器件处于模拟工作状态。由于桥膜发生变形，其相移与电压的关系将偏离图 3.29 示出的关系。另外，由于发生 pull-in 的点为不稳定平衡点，因此器件的实际模拟移相范围很难达到理论上给出的范围。

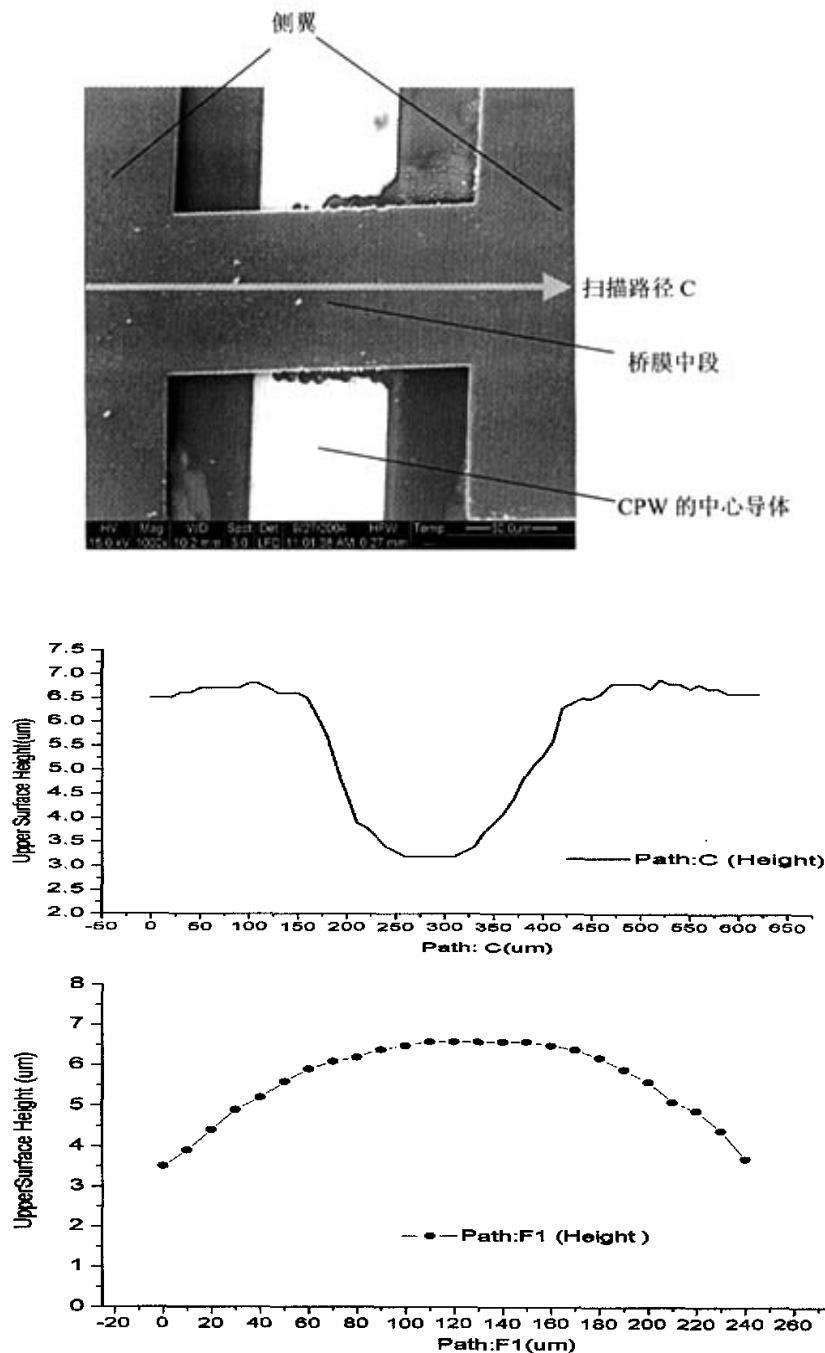


图 6.6 一个粘附在衬底上的 PSEQV 桥膜及其变形测量结果

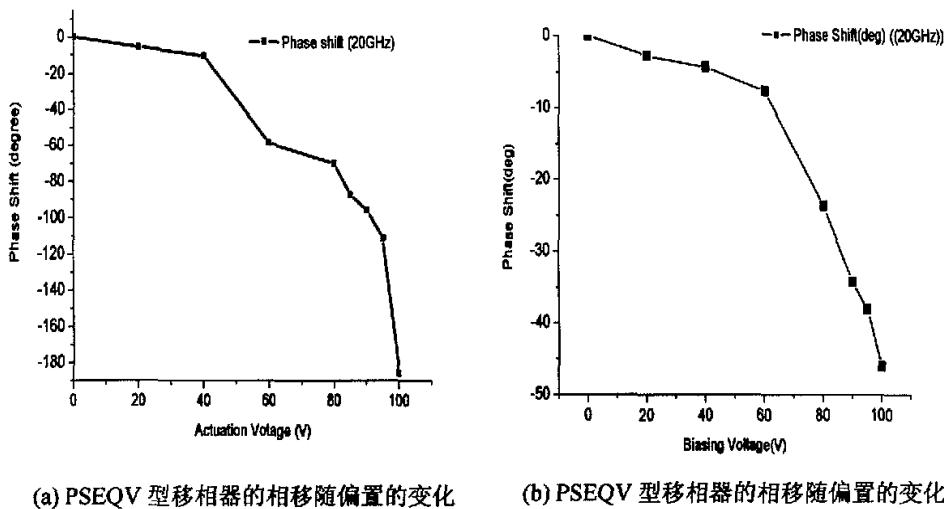


图 6.7 经过浓硼掺杂的 PSEQV 和 PSVAR 移相器的相移随偏置电压的变化

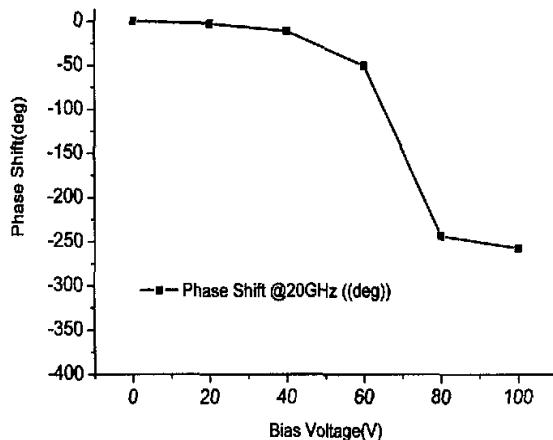


图 6.8 未经过浓硼掺杂的 PSEQV 型移相器的相移随偏置电压的变化

偏置电压超过 60V 时, 在显微镜下可看到, 在整个 PSEQV 移相器阵列中, 有的桥膜的中段开始吸合到 CPW 的 S 导体上, 当偏置电压超过 90V 时, 所有的桥膜的中段均吸合到 S 导体上, 此时相移达到最大值, 而该偏置电压可以被认为是移相器处于数字驱动工作模式时的阈值电压。在 PSVAR 型移相器中, 由于桥膜变形和刚度较大 (沿 y 轴方向的尺寸较大), 当偏置电压达到测试系统所容许的最大电压 100V 时, 仍无法让其所有桥膜的中段吸合, 故最终产生的相移量较小。

图 6.8 示出未经浓硼掺杂的 PSEQV 型移相器的相移随偏置电压变化的情况。从中可以看出两种移相器的相移的大小一开始随偏置电压的增加而缓慢上升, 但当电压超过某个阈值时 (约为 40V), 相移的大小随电压的增加而迅速上升, 这一阈值对应于第一次 Pull-in

的电压。未经浓硼掺杂的桥膜虽然变形小，等效初始桥膜高度小于经过浓硼掺杂的桥膜，但由于在加工中，硅层保留的厚度较大 ($3\sim3.5\mu\text{m}$)，挠性悬挂弹簧等效的弹簧常数较大，故第一次 Pull-in 电压与浓硼掺杂的桥膜大致相等。

偏置电压超过第一次 Pull-in 的阈值时，在显微镜下可看到，在整个未经浓硼掺杂的 PSEQV 移相器阵列中，有的桥膜的中段开始吸合到 CPW 的 S 导体上，当偏置电压超过 80V 时，所有桥膜的中段均吸合到 S 导体上，此时相移达到最大值，而该偏置电压可以被认为是器件处于数字式驱动工作模式时的阈值电压。未经浓硼掺杂的 PSEQV 型移相器数字工作时的这一阈值小于经过浓硼掺杂的 PSEQV 移相器，其原因是：前者的应力和应力梯度远远小于后者的，而且前者桥膜的气隙高度和变形要小于后者的。另外，当偏置电压达到测试系统所容许的最大电压 100V 时，相移量与 80V 时相比变化很小，变化量在 20GHz 和 26GHz 时分别为 13.9° 和 20.5° ，这说明，在偏置电压的一定变化范围内，侧翼桥膜的形状以及侧翼桥膜与 GND 形成的等效电容的变化均很小，可以保证器件的数字化工作。

6. 3 微机械移相器的高频特性测试

经过浓硼掺杂和未经浓硼掺杂的 PSEQV 和 PSVAR 型移相器在中科院微电子中心进行了高频测试，测试系统示于图 6.9 中，由 Cascade SummitTM 9000 微波片上测试台和 HP8510C 矢量网络分析仪（可 $1\sim26\text{GHz}$ 扫频）以及施加直流偏压的电源组成，两台设备间通过同轴电缆连接。测试前的校准采用 SOLT (Short-Open-Load-Tru) 方法。

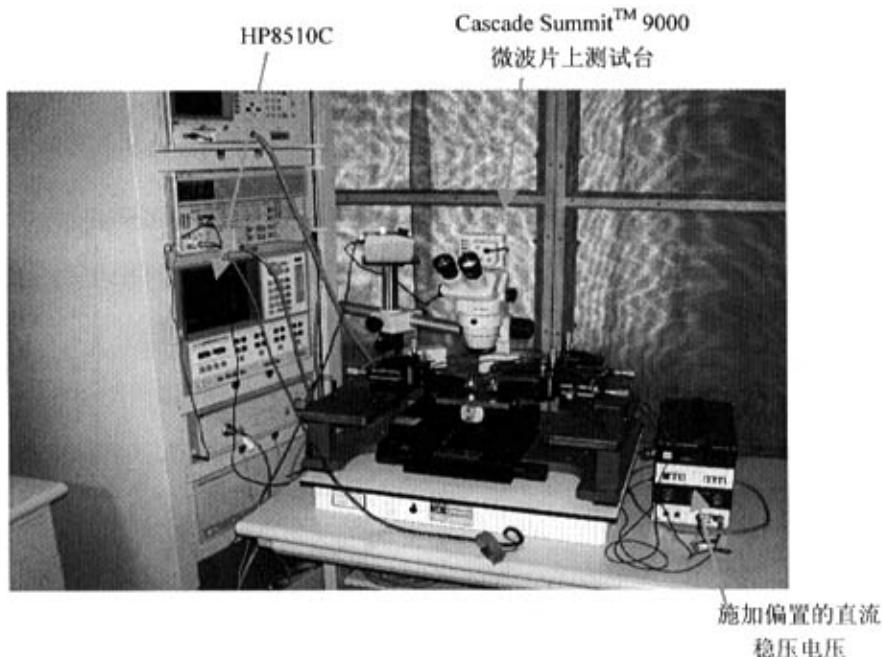


图 6.9 高频特性测试系统照片

6. 3. 1 经过浓硼掺杂样品的高频特性测试结果

一. 模拟驱动时的高频特性测试结果

图 6.10 和图 6.11 示出经过浓硼掺杂的 PSEQV 和 PSVAR 在模拟驱动时的射频特性。图中的测量值在 18GHz 以上出现抖动，这是因为连接片上测试台与网络分析仪的电缆在 18GHz 上的传输性能变坏，而且出现较大的衰减。与图 3.11 和 3.14 给出的基于电路模型的分析结果相比较，可以看出设计值均与实际测量值有较大的差异。在 20GHz 上，经过电路分析和高频结构仿真得到的 PSEQV 的模拟驱动时的最大相移量分别为 -28.137° 和 -25.78° ，而测量值为 -11.35° 。经过电路分析和高频结构仿真得到的 PSVAR 的相移量为 -27.25° 和 -31.017° ，而测量值为 -7.30° 。另外，PSEQV 和 PSVAR 的回波损耗测量值的上限分别为 -8dB 和 -7dB ，这一指标与设计值相比也出现了下降。测量值与设计值的偏差主要是因为桥膜发生的变形引起的。如果假设 PSEQV 桥膜仍为平板（忽略侧翼的变形），其高度根据实际测量值选取，则此时利用 Maxwell 3D 软件分析出的的无偏置电压和 Pull-in 时的 NDL 加载电容值从设计值的 29.01fF 和 40.48fF 下降到了 9.879fF 和 11.013fF ，这样，NDL 的等效特性阻抗和反射损耗必然大大上升，而相移量势必减小。将该电容值代入图 3.10 中的 Microwave Office 电路模型，计算出的模拟驱动的最大相移量和最大回波损耗分别为 -11.367° （20GHz）和 -10dB ，与实测值接近，这说明相移量的减少主要是由于桥膜在内应力作用下的变形引起的。

二. 数字驱动时的高频特性测试结果

在测试浓硼掺杂的移相器的数字工作特性时，给移相器分别施加 0V 和 95V 的偏置电压，并测试对应这两种电压的 S 参数。

PSEQV 移相器受到数字驱动时 UP 状态和 DOWN 状态 S 参数测量值和高频结构仿真结果

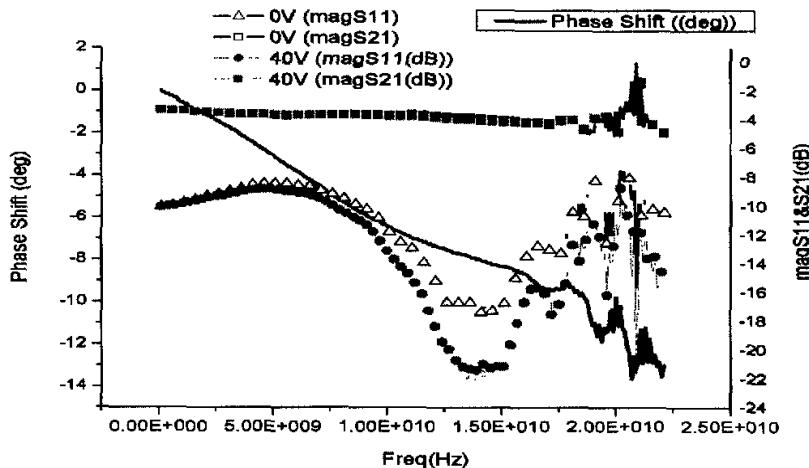


图 6.10 经过浓硼掺杂的 PSEQV 移相器模拟驱动时的高频特性

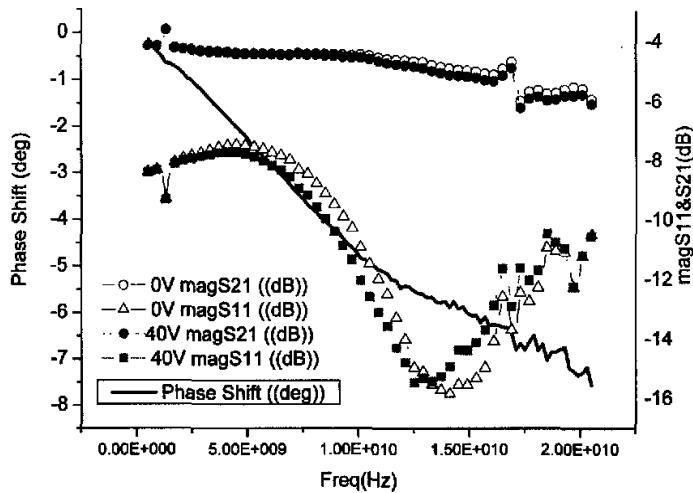


图 6.11 经过浓硼掺杂的 PSVAR 移相器模拟驱动时的高频特性

已示于图 3.24 中。相应的相移特性和在偏置分别为 0V 与 95V 的情况下的 S_{11} 和 S_{21} 参数的幅值示于图 6.12 中。测试结果表明, 移相器在 10GHz 和 20GHz 的移相量分别为 -95.95° 和 -184.8° , 该测量值与仿真值 (-91.5° 和 -179.8°) 符合得较好。如果不考虑因连接片上测试台与网络分析仪的电缆在 18GHz 上的传输性能变坏而引入的 S 参数幅值测量值的抖动, 则测量出的最大回波损耗 <-8 dB。测量出的插入损耗较大, 最大时达到了 -8.62 dB。仿真结果的插入相移 (insertion phase, 即 “Phase S21”) 与测试结果符合得较好。在 S_{11} 参数 (回波损耗) 的变化趋势方面, 仿真结果与测试结果也符合得较好, 但测试值要高于仿真的结果, 这主要是因为: (a) 测试时 SOLT 的校准方法本身存在一定的误差, (b) CPW 探针的针尖的间距为 $100\mu\text{m}$, 而原设计时所针对的探针针尖间距为 $120\mu\text{m}$, 因此所用的测试探针的针尖与器件测试点间必然因间距差异而存在一定的反射; (c) 仿真模型所取的材料参数与实际器件的参数存在一定差异。 S_{21} 参数的仿真值与测试值相比偏小, 这主要是因为: (a) 在仿真中将 Au 层的电阻率取为理想条件下的量值, 而没有计及工艺中 Au 层电阻率的升高; (b) 软件的缺省设置为不对金属层内部求解。如果考虑到 Cr/Au 互扩散引起的电阻率的升高而且强制软件对金属层内部求解, 将可以较好的反映出插入损耗的实际情况。

图 6.13 示出 PSVAR 移相器的相移特性和在偏置分别为 0V 与 95V 的情况下的 S_{11} 和 S_{21} 参数的幅值。测试结果表明, 移相器在 10GHz 和 20GHz 的移相量分别为 -46.04° 和 -31.56° , 如果不考虑因连接片上测试台与网络分析仪的电缆在 18GHz 上的传输性能变坏而引入的 S 参数幅值测量值的抖动, 则最大回波损耗 <-6 dB。其插入损耗较大, 最大时达到了 -8.59 dB。PSVAR 移相器工作于数字模式时, 其相移量之所以较小, 其原因是桥膜在内应力作用下的变形较大, 而且在 95V 的偏置电压下, 并非阵列中所有的桥膜的中段都能吸合到衬底上。

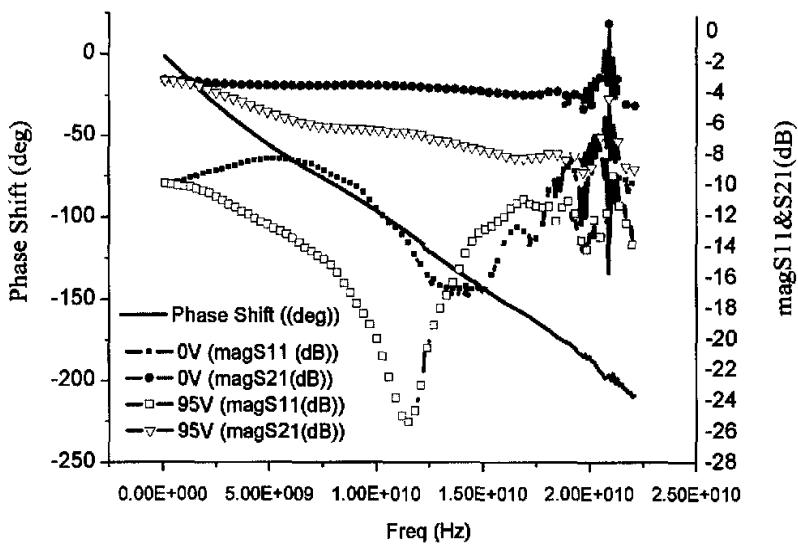


图 6.12 经过浓硼掺杂的 PSEQV 型移相器数字驱动时的相移特性和 S 参数幅值

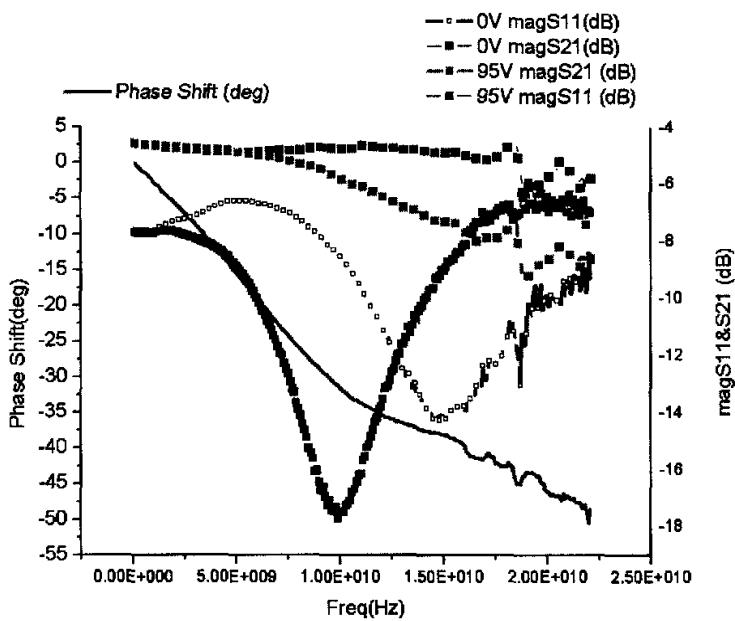


图 6.13 经过浓硼掺杂的 PSVAR 型移相器数字驱动时的相移特性和 S 参数幅值。

图 6.14 示出同一个 PSEQV 器件在两次测试时测量到的相移特性，其中 A、B、C 对应于第一次测试时器件 3 次动作时获得的相移，D、E、F 对应于第二次测试时器件 3 次动作时获得的相移。从该图可以看出，PSEQV 器件数字驱动时相移特性的重复性较好。

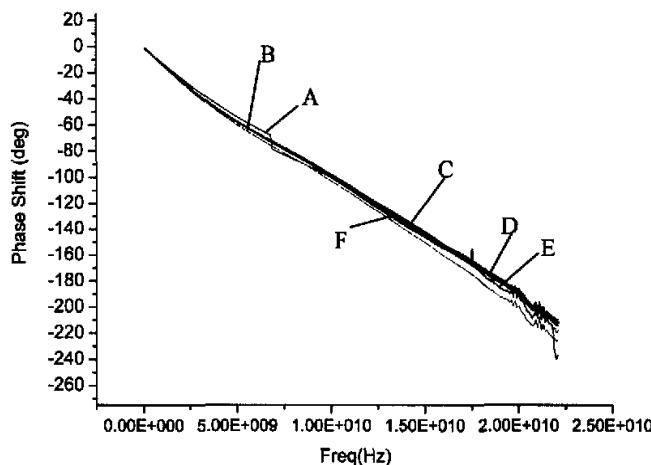


图 6.14 经过浓硼掺杂的 PSEQV 移相器以数字方式工作时相移特性的重复性。

6. 3. 2 未经浓硼掺杂样品的高频特性测试结果

一. 模拟驱动时的高频特性测试结果

图 6.15 示出未经浓硼掺杂的 PSEQV 移相器模拟工作时的射频特性。与图 3.11 和 3.14 给出的基于电路模型的分析结果相比较，可以看出器件的设计值均与实际测量值也存在有较大的差异。在 20GHz 上，经过电路分析和高频结构仿真得到的 PSEQV 的模拟驱动时的最大相移量分别为 -28.137° 和 -25.78° ，而测量值为 -11.53° ，与浓硼掺杂的 PSEQV 相比变化不大。回波损耗的测量值小于 -10dB ，这一指标与浓硼掺杂的 PSEQV 相比有一定的改善。回波损耗特性的改善很可能是由于器件的变形与浓硼掺杂时大为减小，CPW 的等效加载电容有所增加的缘故。器件插入损耗与浓硼掺杂器件相比平均改善了 1dB 以上。插入损耗特性的改善，主要是因为在该型器件测量时，CPW 微波探针采用了新购进的探针，另外，针台与网络分析仪间的连接电缆也得到了更换，其工作频段宽达 26GHz。

二. 数字驱动时的高频特性测试结果

在测试未经浓硼掺杂的移相器的数字工作特性时，分别给移相器施加 0V 和 80V (PSEQV) 或 95V (PSVAR) 的偏置电压，并测试对应这两种电压的 S 参数。

PSEQV 移相器的 S 参数测量值和高频结构仿真结果已示于图 6.16 中。从中可以看出，仿真结果的插入相移 (insertion phase, 即 “Phase S21”) 与测试结果符合得较好。在 S_{11} 参数的变化趋势方面，仿真结果与测试结果符合得较好，但具体的测试值偏离仿真的结果，这主要是因为：(a) 测试时 SOLT 的校准方法本身存在一定的误差，(b) CPW 探针的针

尖的间距为 $100\mu\text{m}$, 而原设计时所针对的探针针尖间距为 $120\mu\text{m}$, 因此测试探针的针尖与器件测试点间必然因间距差异而存在一定的反射; (c) 仿真模型所取的材料参数与实际器件存在一定差异。 S_{21} 参数的仿真值要大大优于实测值, 这主要是因为在仿真中将 Au 层的电阻率取为理想条件下的量值, 而没有计及工艺中 Au 层电阻率升高的缘故。如果考虑到 Cr/Au 互扩散引起的电阻率的升高而且强制软件对金属层内部求解, 将可以较好的反映出插入损耗的实际情况。图 6.17 示出 PSEQV 移相器的相移特性, 可以看出测量值与仿真值在整个扫频范围内都符合得较好。10GHz 时, 仿真得到的和实测的相移分别是 -133.144° 和 -128.43° ; 20GHz 时, 仿真得到的和实测的相移分别是 -253.91° 和 -251.86° 。

图 6.18 示出 PSVAR 移相器在偏置分别为 0V (UP 状态) 与 95V (DOWN 状态) 的情况下的高频特性。10GHz 时, 仿真得到的和实测的相移分别是 -107.23° 和 -114.43° ; 20GHz 时, 仿真得到的和实测的相移分别是 -206.42° 和 -214.21° 。两者符合较好。实测的最大回波损耗 $<-8.5\text{dB}$ 。其插入损耗较大, 最差时达到了 -8.7dB 。仿真结果中, S_{11} 参数的变化趋势与测试结果符合得较好, 但具体的测试值偏离仿真的结果, 这主要是因为: (a) 测试时 SOLT 的校准方法本身存在一定的误差, (b) CPW 探针的针尖的间距为 $100\mu\text{m}$, 而原设计所针对的探针针尖间距为 $120\mu\text{m}$, 因此所用的测试探针的针尖与器件测试点间必然因间距差异而存在一定的反射; (c) 仿真模型所取的材料参数与实际器件存在一定的差异。 S_{21} 参数的仿真值要大大优于实测值, 这主要是因为在仿真中将 Au 层的电阻率取为理想条件下的量值, 而没有计及工艺中 Au 层电阻率升高的缘故。如果考虑到 Cr/Au 互扩散引起的电阻率的升高, 而且强制软件对金属层内部求解, 将可以较好的反映出插入损耗的实际情况。

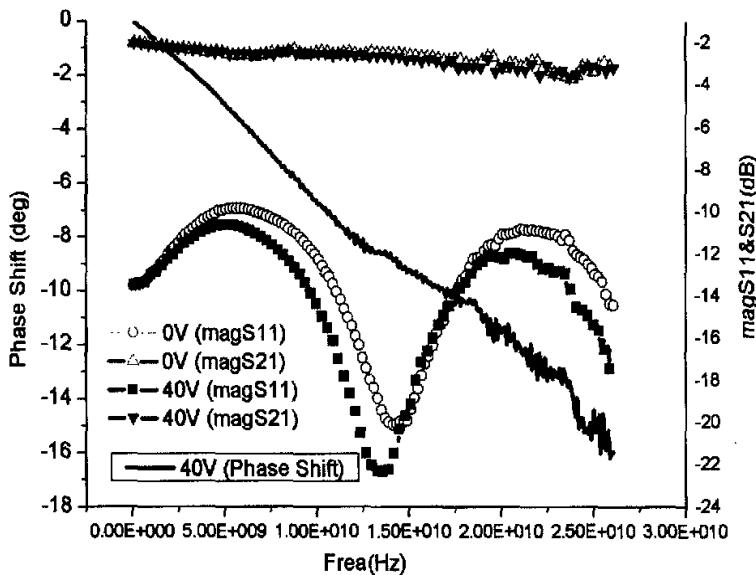


图 6.15 未经浓硼掺杂的 PSEQV 移相器处于模拟工作时的相移特性和 S 参数幅值。

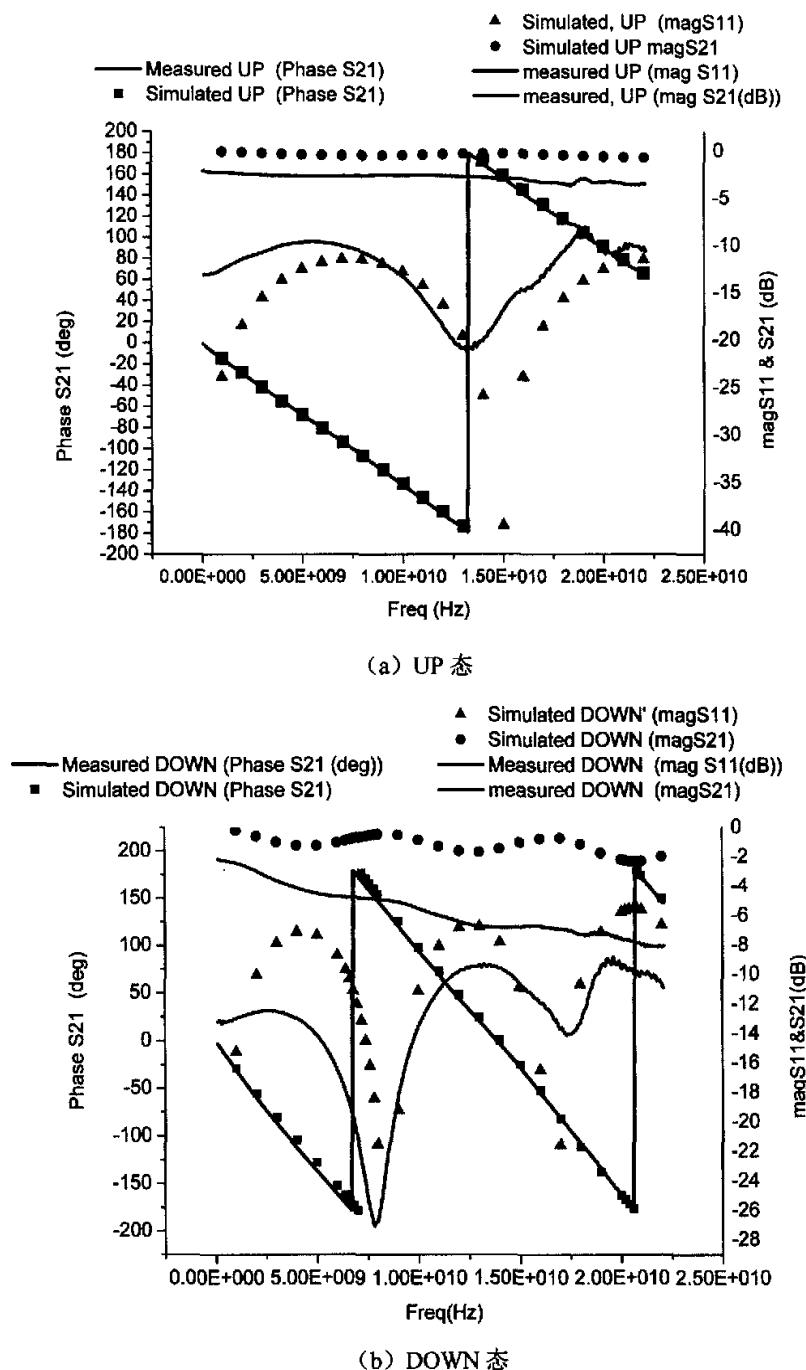


图 6.16 未经浓硼掺杂的 PSEQV 移相器在数字式工作时的射频特性。

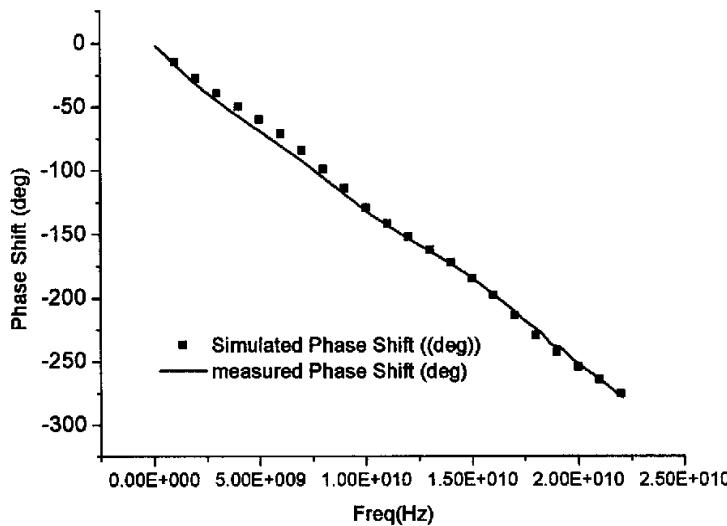


图 6.17 未经浓硼掺杂的 PSEQV 移相器在数字工作时的相移特性

6. 3. 3 插入损耗问题

从以上测量到的结果来看, 所有器件在 UP 和 DOWN 状态时的插损比较大, 在这两种状态下最坏的情况可以分别达到 -4dB 和 -8.8dB 。其原因有两个, 一是测试时探针磨损引入的误差, 二是 CPW 的欧姆损耗较大。

在测试中, 我们发现, 更换了新购进的探针后, 插入损耗的测量值就改善了 1dB 以上 (参见 6.3.2 节的第一部分), 这说明测试时探针的磨损引入了一定的插入损耗。

欧姆损耗是金属层过薄和键合导致的电阻率上升所造成的。由于工艺的限制, 目前我们只能通过磁控溅射的方法淀积 CPW 和桥膜的 Au 层, 其厚度很难超过 $1\mu\text{m}$, 一般为 $600\sim 700\text{nm}$, 这无法满足射频技术中金属层应大于 5 倍趋肤深度的要求。另外, 在加工中, 我们发现, 在 Pyrex 玻璃衬底上溅射完 Cr/Au 层后, 从衬底背面观察到的是 Cr 层的颜色, 即银灰色。而键合完毕后, 从 Pyrex 玻璃衬底看去, CPW 颜色已经变为淡黄色, 这说明 Cr/Au 间发生了某种反应。文献[7]和[8]指出, Cr/Au 虽是高频电路传输线常用的金属层材料, 但 Cr/Au 在 300°C 以上容易发生互扩散, 其中 Cr 的扩散可以延伸到 Au 的表面, 造成薄膜的岛状分布, 并形成 Cr_2O_3 , 有时会使电阻率上升一个数量级。我们利用直流探针对 EQV 型 CPW 的 S 导体的直流电阻率进行了测量, 测量值表明, 其直流电阻率约是纯 Au 材料的体电阻率的 6 倍。而且从图 6.19 示出的 CPW 的表面照片来看, CPW 表面出现了小丘, 局部还出现了凹坑。这些小丘和凹坑, 很可能是 Cr 的扩散造成的。因此, CPW 金属层存在互扩散和电阻率的上升的问题

为了测量 CPW 的欧姆损耗造成的插入损耗, 将 PSEQV 样品上的桥膜全部除去, 然

后用网络分析仪进行了测试。同时,利用高频结构仿真工具 HFSS 进行了仿真,在高频结构仿真中,以测量到的 Cr/Au 直流电阻率作为 CPW 的电阻率,并让程序对 CPW 内部的场分布求解。图 6.20 示出了此时测试出的插入损耗以及高频结构的仿真结果。从图中可以看出,仿真结果在低频段与测试值符合得较好,而在高频段则大于测试值,但总的来看能大致反映出插入损耗的变化趋势。测试结果表明,此时的插入损耗很可能主要是由导体的电阻损耗造成的。我们还发现,测量到的器件的 UP 态的插入损耗的变化,与图 6.20 无桥膜 CPW 的插入损耗接近,这说明器件在 UP 态的插入损耗主要是 CPW 的导体电阻损耗引起的。

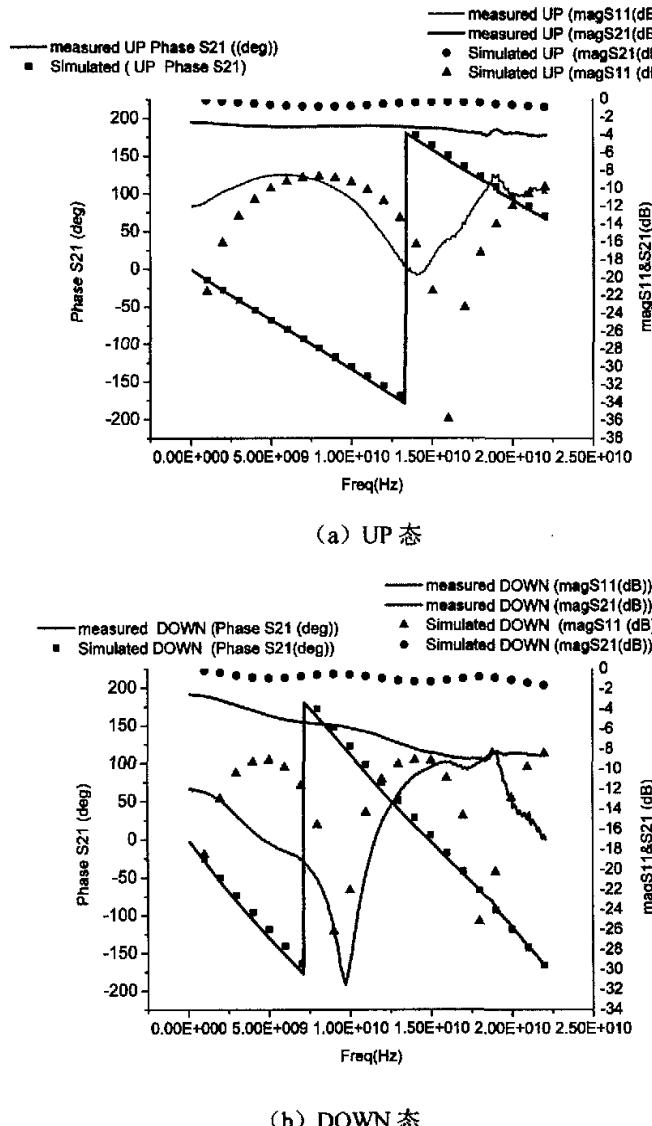


图 6.18 未经浓硼掺杂的 PSVAR 移相器在数字式工作时的射频特性

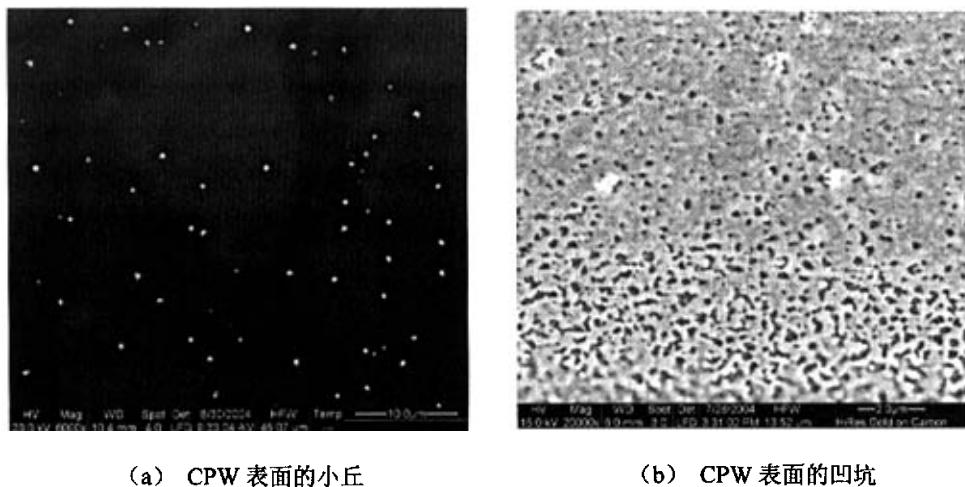


图 6.19 器件 CPW 表面的小丘和凹坑

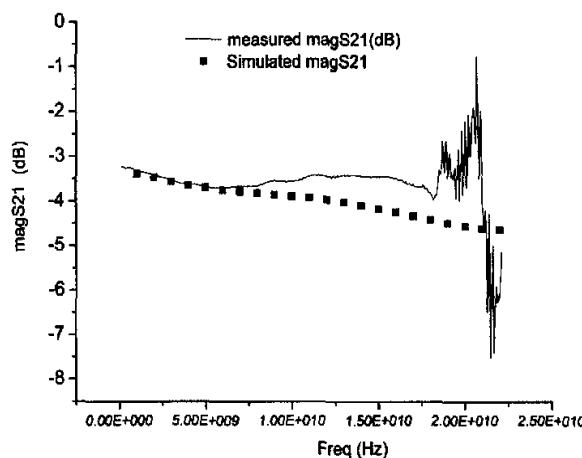


图 6.20 除去全部桥膜后 CPW 的插入损耗特性

2.2.2 节的分析表明, 如果略去表示传输线介质损耗的、单位长度上的并联导纳 G_{TL} 的话, 器件中信号的衰减常数反比于 NDL 的等效阻抗, 阻抗越小则信号衰减越大。因此, 器件 DOWN 态的插入损耗, 应包括电阻引入的损耗和 NDL 阻抗的降低带来的信号衰减。在对数字驱动的、处于 DOWN 态的浓硼掺杂 PSEQV 进行仿真时, 我们将高频结构仿真中的 CPW 和桥膜金属层的电阻率改为测量到的 Cr/Au 直流电阻率, 其仿真结果与测试结果符合得很好, 如图 6.21 所示。由于阻抗的变化是保证器件的相移范围所必须的, 因此要减小器件的损耗, 应该主要从加厚金属层并防止复合金属层的各层间的互扩散入手。

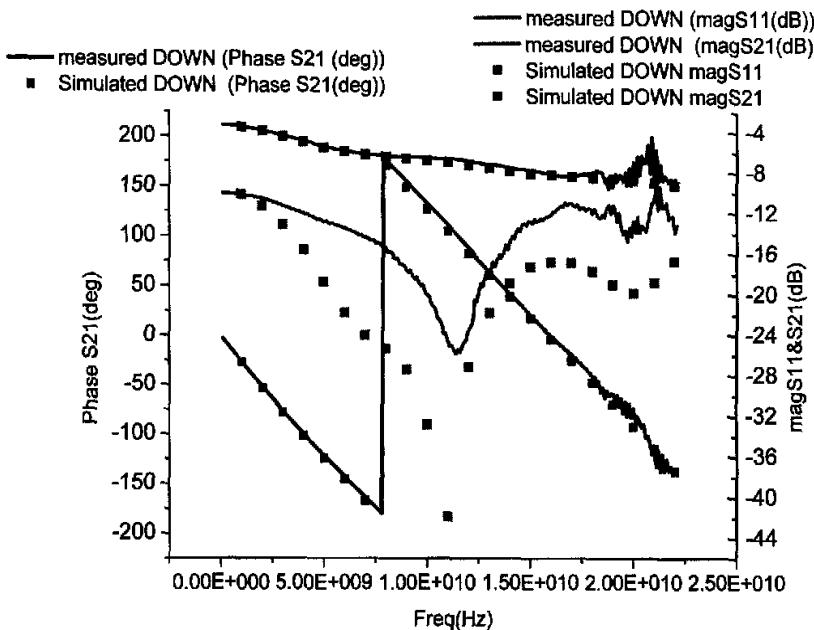


图 6.21 工作于数字方式的浓硼掺杂的 PSEQV DOWN 态的射频特性

6. 4 小 结

本章介绍了对加工出的移相器样品的桥膜变形情况以及静态驱动特性和高频特性的测试结果和分析。

1. 桥膜变形的测量与分析。测量结果表明：经过浓硼掺杂和未经浓硼掺杂的两种桥膜的形状类似，其中后者的变形要明显小于前者。分析表明：浓硼掺杂形成的应力梯度是造成桥膜变形的主要原因，但各层薄膜间的应力差异对桥膜变形的影响也不容忽视。

2. 移相器的静态驱动特性。对经过浓硼掺杂和未经浓硼掺杂的移相器的静态驱动特性（即相移与直流偏置间的关系）的测量表明：所设计的移相器在模拟工作时，最大的移相范围为 -11.35° (20GHz)；数字工作时，相移量可达 180° (20GHz) 以上。由于桥膜在应力梯度作用下发生了较大的变形，等效的加载电容值与原设计值有一定的偏差，而且桥膜与衬底间的静电场分布也发生了较大变化，故其模拟工作时的驱动特性偏离了理论分析结果。

3. 移相器的高频特性。利用矢量网络分析仪对移相器样品在模拟工作和数字工作模式下的相移量、回波损耗和插入损耗 (S 参数) 与信号频率的关系进行了测量。测量结果表明，移相器表现出基本的相移特性，其损耗在可接受的范围之内。其模拟工作时的相移量和损耗与仿真结果存在明显的偏差，这主要是桥膜存在较大的变形以及金属层电阻率较

高所致。

总的来看，本论文所设计的移相器已具备了一定的相移特性，但是要在实际系统中获得真正应用，还应该设法将插入损耗减小到 -4dB 以内，而且应该保证回波损耗小于 -10dB 。要保证良好的射频特性和器件的实用化，就必须对器件结构和工艺进行进一步优化，减小应力带来的影响，改善金属层的质量，扩大器件的相移量。

第七章 论文工作总结与展望

7. 1 论文工作总结

本论文在对国内外微机械移相器及开关器件的研究情况和应用背景进行充分调研和分析的基础上, 对基于体硅工艺的分布式移相器和可用于其他类型移相器的开关器件进行了研究。论文对分布式移相器的基本原理与模型进行了深入分析, 提出了以单晶硅层为骨架的蝶形加载复合桥膜结构, 并设计出了两种基于这一新型桥膜结构的分布式移相器以及基于相同工艺和桥膜结构的串连与旁路开关。作者利用北京大学微米/纳米加工技术国家重点实验室的技术条件, 开发出了一套较为完整的体硅加工工艺流程, 制作出所设计的、采用硅基复合薄膜的移相器和开关器件, 并完成了测试。具体说来, 论文主要完成了以下工作:

1. 从理论上系统地讨论了作为分布式移相器基础的 NDL 的工作原理和已有的电路模型, 并提出了基于合成传输线概念的移相器模型, 分析了影响分布式微机械移相器性能的各种参数。另外, 还讨论了平行板静电驱动的原理、串连和旁路开关的理论模型及影响其性能的各种因素、CPW 的原理以及高频测试方法。
2. 在对分布式移相器工作原理进行分析以及对现有各种桥膜加工方法进行比较的基础上, 提出了两种基于体硅工艺和单晶硅材料的蝶形移相器桥膜设计及相应的总体工艺方案。利用解析方法、电路仿真和高频仿真等方法对移相器在模拟式驱动和数字式驱动条件下的电路性能进行了分析和验证。分析和仿真结果表明: 所提出的 PSEQV 和 PSVAR 这两种设计有一定的模拟相移特性(在 20GHz 下的最大相移量可达到 -28.137° 和 -31.017°), 而且插入损耗和回波损耗性能良好。移相器还可以实现数字式工作, 此时可获得较大的相移。研究中, 提出了一种用于移相器高频结构电磁仿真的实体模型和仿真方法, 所建立的模型可以较为真实的反映器件的实际工作状况, 在此基础上首次实现了对分布式移相器的有限元全波仿真。通过解析与有限元手段相结合的方法对移相器的机械特性和静态驱动特性进行了仿真分析。
3. 在移相器加载桥膜结构设计的基础上, 完成了串连、并联微波开关的设计, 并利用高频有限元电磁仿真工具进行了分析、验证。在开关器件的研制的基础上, 可通过 CPW 的重新设计, 来实现加载线式、反射式和开关网络式等非分布式的移相器。
4. 在实验室现有的微机械开关加工工艺的基础上, 经过反复试验, 解决了工艺流片

中出现的一系列关键问题(如 Au 上 SiN 薄膜生长、键合强度的保证、器件结构的释放等),开发出包括划片在内的较为完整的加工流程,并成功制作出所设计的移相器和开关器件结构。利用光学测量手段,对器件的应力状况和桥膜厚度进行了测量。

5. 对桥膜的变形情况进行了测量和分析,指出应力梯度和各层薄膜间的应力差异是造成变形的主要原因。

6. 利用网络分析仪对移相器的高频特性和静态驱动特性进行了测试。模拟式工作时,浓硼掺杂的 PSEQV 移相器的移相范围达 -11.35° (20GHz), PSVAR 移相器的移相范围达 -7.30° (20GHz), 回波损耗分别为 $<-8\text{dB}$ 和 $<-7\text{dB}$; 未经浓硼掺杂的 PSEQV 移相器的移相范围与浓硼掺杂 PSEQV 移相器的移相范围相近,但回波损耗降低到 -10dB 以下。测试结果表明,所设计的 PSEQV 移相器已经初步具备了模拟式移相器的功能。相移量测量结果与设计值存在一定的差异,这些差异主要是由于桥膜的变形而引起的。

7. 对器件数字式驱动时的高频特性进行了仿真和测试。测试结果表明,数字工作时,在 20GHz 移相器可以实现 180° 以上的相移;回波损耗 $<-8\text{dB}$,在可接受的范围之内;插入损耗偏大,与传统的移相器相当。利用高频仿真和试验手段对器件插入损耗过大的原因进行了分析和讨论。为了实现可实用化的数字式移相器,还应该在减小应力变形的基础上,对侧翼进行优化设计,或者设计专用的 MAM 电容结构。

论文工作的创新性主要表现在如下几个方面:

1. 提出了一种用于描述分布式移相器的、基于“合成传输线”概念的电路模型,利用该模型可以快速地估算出分布式移相器相应的 S 参数。

2. 提出了一种以单晶硅层为骨架的蝶形复合加载桥膜结构。这种桥膜具有以下特点:

(a) 可以利用单晶硅材料优异的机械特性,而且硅材料与 Pyrex 玻璃衬底在热膨胀系数方面有良好的匹配性,硅结构不会因温度上升而出现较大的变形。桥膜的长期稳定性和动作的可靠性得到保证。

(b) 整个工艺流程简单,不涉及牺牲层的腐蚀,桥膜的形状和 CPW 的厚度不受牺牲层的影响。

(c) 偏置电阻线无需穿过 CPW 的 GND 导体与 S 导体连通,而且当移相器串联起来以获得移相量更大的移相器时,各段间无需添加隔直电容,从而可以减少相应的损耗和工艺难度。CPW 中心的导体也可以用于传输较小的直流电压,方便了在同一 CPW 上分布的有源器件的偏置。

(d) 桥膜的侧翼的尺寸可以很大,以提高静电引力,从而降低模拟调相时的模拟驱动电压和数字驱动时的 Pull-in 电压。

(e) 能够通过延长扩散时间的方法获得较厚的硅结构层, 从而制作出能承受大功率的器件。

(f) 以重掺杂的单晶硅层作为偏置电阻, 在对单晶硅层的刻蚀过程中同时实现偏置电阻线的加工, 避免了采用合金电阻线时所需的工艺, 整个加工流程得到进一步简化。

3. 针对微机械分布式移相器提出了一种用于高频结构电磁仿真的实体模型和仿真方法, 所建立的模型可以较为真实的反映器件的实际工作状况, 在此基础上首次实现了对分布式移相器的有限元全波仿真。这种方法也可以推广到开关器件和其他类型的移相器的仿真中。

4. 提出了一种 VAR CPW, 其特点是 CPW 中心导体在桥膜下方部分的宽度小于其他部分的宽度, 这种 CPW 可以减小每个移相器单元的插入和回波损耗。

5. 经过反复试验和改进, 找到了 Au 上 SiN 生长、玻璃衬底浅槽腐蚀、键合以及桥膜结构释放等关键工艺的新工艺条件或实现方法, 在此基础上提出了一套较为完整的体硅加工工艺流程, 实现了分布式移相器桥膜阵列和开关器件的加工。该流程还可以用于非分布式移相器的加工。

7. 2 未来的工作

本论文的工作在微机械分布式移相器和可用于其他类型移相器的开关式器件方面取得了一定的成果, 但是在如下几个方面尚有待深入和提高:

1. 从结构和工艺上减小桥膜在应力作用下的变形, 以保证器件设计性能的实现。
2. 由于电介质制作在桥膜上, 驱动的动态性能势必受到一定的影响。在下一步工作中, 为了提高驱动的动态性能, 一方面将从工艺上确保能在玻璃上生长出大面积的、高质量的电介质薄膜, 另一方面加强平行板压膜阻尼的研究和对结构动态特性的优化。
3. 在 VAR 型 CPW 和相应的移相器桥膜设计方面, 目前对各种尺寸参数对器件性能的影响的研究尚不充分, 在下一步的工作中, 应该对这方面的影响展开充分的分析和仿真, 摸清这种新型传输线结构及移相器的适用范围。
4. 目前所设计器件的功率特性尚未得到测试。如何获取其功率特性(包括功率承受能力、大信号下的各项非线性特性参数), 并在设计中设法保证所需的指标, 将是下一步工作中的一项重要而富有挑战性的研究内容。

总体来看, 基于体硅工艺和硅基复合桥膜的移相器和开关型器件具有一系列优点, 可望在国防等领域得到的应用。下一步应针对相关应用, 对器件的结构和参数进行进一步的改进和优化。另外, 还可以在已完成的原理探索、器件设计及工艺研究的基础上对可调谐滤波器等新型射频器件开展研究, 从而拓宽 RF MEMS 所能服务的领域。

参考文献

第一章

[1] Richard P. Feynman; “*There's plenty of Room at the Bottom*”, reprinted in *Journal of Microelectromechanical System*, Vol. 1, No.1, 1992

[2] Yoshio Nishi, Robert Doering (edited by); “*Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*”, New York, Marcel Dekker, Inc., 2000

[3] 张兴, 郝一龙, 李志宏, 王阳元; “跨世纪的新技术——微机电系统(MEMS)”, 电子科技导报, 1999年第4期, pp.2—6

[4] Marc J. Madou; “*Fundamentals of Microfabrication: the Science of Minifabrication*”, Second Edition, London, New York, Washington D. C., CRC Press, 2002

[5] 张兴, 黄如, 刘晓彦 编著; “微电子学概论”, 北京, 北京大学出版社, 2000年1月

[6] T. Fukuda and W. Menz (Edited by), “*Micro Mechanical Systems: Principles and Technology*”, Elsevier Science B.V., 1998

[7] Hiroyuki Fujita, “*Microactuators and Micromachines*”, Proceedings of the IEEE, Vol.86, No.8, Aug., 1998, pp.1721-1732

[8] 苑伟政, 马炳和; “微机械与微细加工技术”, 西安, 西北工业大学出版社, 2000

[9] P. Rai-Choudhury; “*Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication (Volume 2)*”, SPIE Press and IEE, 1997

[10] William C. Tang, “*MEMS Programs at DRAPA*” (ppt file), <http://www.darpa.mil/MTO/MEMS>, 2000

[11] 魏悦广; “机械微型化所面临的科学难题——尺度效应”, 世界科技研究与发展, Vol.22, No.2, 2000, pp.57-60

[12] 车录锋, 徐志农, 周晓军, 程耀东; “微型机械设计中某些理论问题的探讨”, 工程设计, 1998年第2期, pp.23-25

[13] Chih- Ming Ho, Yu- Chong Tai (原著); “微电子机械系统和流体流动”, 力学进展, Vol. 28, No. 2, 1998, pp.250-264

[14] 温诗铸, 丁建宁; “微型机械设计基础研究”, 机械工程学报, 第36卷第7期, 2000, pp.39-42

[15] 温诗铸, 李娜; “微型机械与纳米机械学研究”, 中国机械工程, 1996年第7卷第2期, pp.17-21

[16] 李育林, 傅晓理; 微光学, 光学精密工程, Vol.2, No.1, 1994, pp.1-8

[17] Kurte E. Peterson, “*Silicon as a Mechanical Material*”, Proceedings of IEEE, Vol.70, No.5, May 1982, pp. 420-457

[18] 王寿荣 编著; 硅微型惯性器件理论及应用, 南京, 东南大学出版社, 2000

[19] 刘广玉 等编著; 新型传感器技术及应用, 北京, 北京航空航天大学出版社, 1995

[20] Gregory T.A. Kovacs, “*Micromachined Transducers Sourcebook*”, McGraw-Hill. 1998, 2

[21] Gregory T. A. Kovacs et al, “*Bulk Micromachining of Silicon*”, Proceedings of the IEEE, Vol.86, No.8,

Aug.1998, pp.1536-1551

[22] 黄庆安 编著; “硅微机械加工技术”, 北京, 科学出版社, 1996

[23] James M. Bustillo et al.; “*Surface Micromachining for Microelectromechanical System*”, Proceedings of the IEEE, Vol.86, No.8, Aug.1998, pp.1552-1573

[24] M. Elwenspoek, H. V. Jansen, “*Silicon Micromachining*”, Cambridge, Cambridge University Press, 1998

[25] 黄庆安等; “微电子机械系统计算机辅助设计”, 电子科技导报, 1999 年第 10 期, pp.32~35

[26] Stephen D. Senturia; “*CAD Challenges for Microsensors, Microactuators and Microsystems*”, Proceedings of the IEEE, Vol.86, No.8, Aug.1998, pp.1611~1626

[27] Patric Salomon; “*Towards Dedicated Design Tools for Microsystems*”, MST News, No. 5, 2000

[28] <http://www.coventor.com/coventorware/>

[29] NEXUS Task Force Market Analysis, “*Microsystems World Market Analysis 2000 – 2005*”, available from www.wtc-consult.de

[30] 闫润卿, 李英惠 编; “微波技术基础”, 北京, 北京理工大学出版社, 第2版, 1997年

[31] Matthew M. Radmanesh, “*Radio Frequency and Microwave Electronics Illustrated*”, Pearson Education North Asia Limited, 2002

[32] 薛良金 编著; “毫米波工程基础”, 北京, 国防工业出版社, 1998 年

[33] Osso, Rafael, “*Handbook of communications technology : the next decade*”, CRC Press LLC, 2000

[34] Theodore S. Rappaport, “*Wireless Communications——Principles & Practice*”, Prentice Hall, 1998

[35] 丁鹭飞, 耿富录; “雷达原理”, 西安, 西安电子科技大学出版社, 第2版, 1995年

[36] Ferril Losee, “*RF Systems, Components, and Circuits Handbook*”, Artech House, London, 1997

[37] 廖复疆; “真空电子技术——信息设备的心脏”, 北京, 国防工业出版社, 1999 年 10 月

[38] Lal Chand Godara; “*Handbook of Antennas in Wireless Communications*”, Boca Raton London New York Washington, D.C., CRC Press, 2002

[39] Ed. Kornel Terplan, Patricia Morreale; “*The Telecommunications Handbook*”, Boca Raton London New York Washington, D.C., CRC Press, 2000

[40] Golio, Mike; “*The RF and Microwave Handbook*” Boca Raton: CRC Press LLC, 2001

[41] Linda P. B. Katehi, Gabriel M. Rebeiz, Clark T.-C. Nguyen; “*MEMS and Si-Micromachined Components for Low-Power, High-Frequency Communications Systems*” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998, pp. 331-333.

[42] Clark T.-C Nguyen et. al., “*Micromachined Devices for Wireless Communications*”, Proceedings of the IEEE, Vol.86, No.8, Aug.1998, pp.1756-1767

[43] Randy J. Richards, Hector J. de Los Santos, “*MEMS for RF/Microwave Wireless Application: The Next Wave*”, Microwave Journal, No.3, 2001

[44] Stephen Cass; “*Large Jobs for Little Devices*”, IEEE Spectrum, Jan. 2001

[45] 刘泽文 李志坚 刘理天; “用于通信领域中的 MEMS 器件”, 电子科技导报, 1999 年第 7 期, pp.23-27

[46] John Elmike et al; “*RF MEMS devices: a brave new world for RF technology, Emerging Technologies*

Symposium: Broadband, Wireless Internet Access", 2000 IEEE , 2000 pp. 1 –4

[47] Hector J. de Los Santos; "*Introduction to Microelectromechanical(MEM) Microwave Systems*", Artech House, London, 1999

[48] Vijay K. Varadan, K.J. Vinoy, K.A. Jose; "*RF MEMS and Their Applications*", West Sussex PO19 8SQ, England, John Wiley & Sons Ltd, 2003

[49] Gabriel. M. Rebeiz; "*RF MEMS: Theory, Design, and Technology*", New Jersey, John Wiley & Sons Ltd, 2003

[50] Chang Liu, "*Micro Electromechanical Systems (MEMS): Technology and Future Applications in Circuits*", IEEE, 1998.

[51] Gabrial M. Rebeiz, Jeremy B. Muldavin. "*RF MEMS Switches and Switch Circuits*," IEEE Microwave Magazine, December 2001, pp. 59-71,

[52] C. Goldsmith, J. Randall, S. Eshelman, T. H. Lin, D. Dennistor, S. Chen, and B. Norvell, "*Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies*", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, San Francisco, CA, June 1996, pp. 1141–1144.

[53] C. L. Goldsmith, Z. Yao, S. Eshelman, and D. Denniston; "*Performance of lowloss RF MEMS capacitive switches*", IEEE Microwave Guided Wave Lett., Vol. 8, No. 8, 1998, pp. 269–271

[54] Z. J. Yao, S. Chen, S. Eshelman, D. Denniston, and C. L. Goldsmith; "*Micromachined low-loss microwave switches*", IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 8, June 1999, pp. 129–134,

[55] S. Pacheco, C. T. Nguyen, and L. P. B. Katehi; "*Micromechanical electrostatic K-band switches*" , IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, June 1998, pp. 1569–1572.

[56] J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz; "*Inline capacitive and DC-contact MEMS shunt switches*", IEEE Microwave Wireless Comp. Lett., Vol. 11, No. 8, August 2001, pp. 334–336.,

[57] S.-C. Shen, D. Caruth, and M. Feng; "*Broadband low actuation voltage RF MEM switches*", in Proceedings, IEEE GaAs IC Symposium, Seattle, WA, November 2000, pp. 161–164.

[58] R. E. Mihailovich, M. Kim, J. B. Hacker, E. A. Sovero, J. Studer, J. A. Higgins, and J. F. DeNatale, "*MEM relay for recongurable RF circuits*", IEEE Microwave Wireless Comp. Lett., Vol. 11, No. 2, February 2001, pp. 53 –55

[59] P. M. Zavracky, N. E. McGruer, R. H. Morrison, and D. Potter; "*Microswitches and microrelays with a view toward microwave applications*", Int. J. RF Microwave CAE, Vol. 9, No. 4, 1999, pp. 338–347

[60] C. Bozler, R. Drangmeister, S. Dudy, M. Gouker, J. Knecht, L. Kushner, R. Parr, S. Rabe, and L. Travis; "*MEMS microswitch arrays for recongurable distributed microwave components*", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, MA, June 2000, pp. 153–156

[61] Y. Wang, Z. Li, D. T. McCormick, and N. C. Tien; "*Low-voltage lateral-contact microrelays for RF applications*", 15th IEEE International Conference on Micro- Electro-Mechanical Systems, January 2002, pp. 645 –648.

[62] Bahl, I. J.; "*Lumped elements for RF and microwave circuits*", Norwood, MA, Artech House, Inc., 2003.

[63] Young, D. J. and B. E. Boser, “*A Micromachined Variable Capacitor for Monolithic Low -Noise VCOs*”, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, SC, June 7-11,1998

[64] Aleksander Dec and Ken Suyama, “*Micromachined Electro-Mechanically Tunable Capacitors and their Applications to RF IC's*”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 46, No. 12, December 1998.

[65] R. L. Borwick, P. A. Stupar, J. DeNatale, R. Anderson, C. Tsai, and K. Garrett; “*A high-Q, large tuning range, tunable capacitor for RF applications*”, in IEEE International Conference on Microelectromechanical Systems, January, 2002, pp. 669-672.

[66] J.-B. Yoon and C. T. Nguyen; “*high-Q tunable microelectromechanical capacitor with movable dielectric for RF applications*” in IEEE International Electron Devices Meeting, Technical Digest, December 2000, pp. 489-492.

[67] J. Brank, J. Yao, M. Eberly, A. Malczewski, K. Varian, and C. L. Goldsmith, “*RF MEMS-based tunable filters*”, Int. J. RF Microwave CAE, Vol. 11, pp. 276-284, September 2001.

[68] H. Jiang et al, “*Fabrication of high-performance on-chip suspended spiral inductors by micromachining and electroless copper plating*”, IEEE MTT-S Digest, 2000, pp279-282

[69] J. R. Clark, Wan-Thai Hsu, Clark T.-C. Nguyen; “*High-Q VHF Micromechanical Contour-Mode Disk Resonators*”, IEDM Technical Digest, 2000, pp.493-496

[70] C. T.-C. Nguyen and R. T. Howe, “*CMOS micromechanical resonator oscillator*” in “Tech. Dig. IEEE Int. Electron Devices Meeting”, Washington, DC, Dec. 5-8, 1993, pp. 199-202.

[71] <http://www.radiantmems.com/radiantmems/index.html>

[72] <http://www.smalltimes.com>

[73] <http://www.darpa.mil>

[74] Wicht Technologie Consultin, “*Report on The Market for RF MEMS 2002 – 2007*” www.wtc-consult.de

[75] 张光义 著; 相控阵雷达系统, 北京, 国防工业出版社, 1994

[76] Robert J. Mailloux; “*Phased Array Antenna Handbook*”, Norwood MA, Artech House, Inc., 1994

[77] Don Parker, and David C. Zimmermann; “*Phased Arrays—Part I: Theory and Architectures*”, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 50, NO. 3, MARCH 2002, pp. 678-687

[78] Don Parker, and David C. Zimmermann; “*Phased Arrays—Part II: Implementations, Applications, and Future Trends*”, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 50, NO. 3, MARCH 2002, pp. 688-698

[79] 胡捍英, 杨峰义 编著; “第三代移动通信系统”, 北京, 人民邮电出版社, 第1版, 2001年8月

[80] 李世鹤; “TD—SCDMA第三代移动通信系统标准”, 北京, 人民邮电出版社, 2003年10月

[81] Shiban Koul, Barathi Bhat; “*Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters*”, Artech House, Boston, 1991

[82] Huantong Zhang, Alexander Laws, K. C. Gupta, Y. C. Lee, Victor M. Bright; “*MEMS Variable-Capacitor Phase Shifters Part I: Loaded-Line Phase Shifter*”, published on-line in Wiley InterScience (www.interscience.

wiley.com). DOI 10.1002/mmce.10089

[83] Baki Acikel, Yu Liu, Amit S. Nagra et al., “*Phase shifters using (Ba, Sr)TiO₃ thin films on sapphire and glass substrate*”, MTT-S Digest, 2001, pp.1191~1194

[84] B. Pillans et al, “*Ka-Band RF MEMS Phase Shifters*”, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol.9. No12, Dec. 1999, pp.520~522

[85] B. Pillans et al, “*Ka-Band RF MEMS Phase Shifters for Phased Array Applications*”, IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2000, pp195~198

[86] G. L. Tan, R. E. Mihailovich, J. B. Hacker, J. F. DeNatale, and G. M. Rebeiz; “*A very-low-loss 2-bit X-band RF MEMS phase shifter*”, in IEEE International Microwave Symposium Digest, Seattle, WA, June 2002,

[87] G. L. Tan, R. E. Mihailovich, J. B. Hacker, J. F. DeNatale, and G. M. Rebeiz; “*Low-Loss 2- and 4-Bit TTD MEMS Phase Shifters Based on SP4T Switches*”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 51, No. 1, January 2003, pp. 297~304.

[88] A. Malczewski, S. Eshelman, B. Pillans, J. Ehmke, and C. L. Goldsmith, “*X-Band RF MEMS phase shifters for phased array applications*”, IEEE Microwave Guided Wave Lett., Vol. 9, No. 12, December 1999, pp. 517~519

[89] Zhu Jian, Zhou Bailing, Lin Jinting, Yu Yuanwei, Lu Le; “*A 4-bit Digital MEMS Phase Shifter*”, Proceedings of SPIE Vol. 5116 (2003) © 2003 SPIE

[90] R. Landauer; “*Shock Waves in Nonlinear Transmission Lines and Their Effect on Parametric Amplification*”, IBM Journal, October, 1960, pp.391~401

[91] M. J. W. Rodwell, M. Kamegawa, R. Yu, M. Case, E. Carman, and K. S. Giboney, “*GaAs nonlinear transmission lines for picosecond pulse generation and millimeter-wave sampling*,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 39, July 1991, pp. 1194~1204

[92] M. J. W. Rodwell, S. T. Allen, R. Y. Yu, M. G. Case, U. Bhattacharya, M. Reddy, E. Carman, M. Kamegawa, Y. Konishi, J. Pusl, R. Pullela, and J. Esch, “*Active and nonlinear wave propagation devices in ultrafast electronics and optoelectronics*,” Proc. IEEE, vol. 82, July 1994, pp. 1035~1059.

[93] W. M. Zhang, R. P. Hsia, C. Liang, G. Song, C. W. Domier, and N. C. Luhmann, Jr., “*Novel low-loss delay line for broadband phased antenna array applications*”, IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 6, Nov. 1996, pp. 395~397,

[94] A. S. Nagra and R. A. York, “*Monolithic GaAs phase shifter with low insertion loss and continuous 0~360° phase shift at 20 GHz*,” IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 9, Jan. 1999, pp. 31~33

[95] N. S. Barker and G. M. Rebeiz, “*Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wideband switches*”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 46, No. 11, November 1998, pp. 1881~1890,

[96] N. S. Barker and G. M. Rebeiz, “*Optimization of distributed MEMS transmission line phase shifters—U-band and W-band designs*”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 48, No. 11, pp. 1957~1966, November 2000.

[97] Joseph S. Hayden and Gabriel M. Rebeiz, “*Low-Loss Cascadable MEMS Distributed X-Band Phase*

Shifter” , IEEE Microwave and Guided Wave Letters, VOL. 10, NO. 4, APRIL 2000, pp.142~144

[98] Yu Liu, Andrea Borgioli, Amit S. Nagra, and Robert A. Yorks, “*K-Band 3-Bit Low-Loss Distributed MEMS Phase Shifter*”, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, VOL. 10, NO. 10, Oct. 2000, pp.415-417

[99] J. S. Hayden and G. M. Rebeiz; “*A low-loss Ka-band distributed MEMS 2-bit phase shifter using metal-air-metal capacitors*” , in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Seattle, WA, June 2002, pp. 337-340.

[100] J. S. Hayden and G. M. Rebeiz; “*Very low loss distributed X-band and Ka-band MEMS phase shifters using metal-air-metal capacitors*” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 51, No. 1, January 2003, pp. 309-314

[101] Hong-Teuk Kim, Jae-Hyoug Park, Yong-Kweon Kim and Youngwoo Kwon; “*V-Band Low-Loss and Low-Voltage Distributed MEMS Digital Phase Shifter Using Metal-Air-Metal Capacitors*” , in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Seattle, WA, June 2002, pp. 341-344

[102] Fangmin Guo, Zongsheng Lai, Guanlong Wu, et al, “*Millimeter wave phase shifters with periodically spaced MEMS bridges loaded*”, Proceeding of 2001 6th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Oct.22-25, 2001, Shanghai, pp.769-772

[103] Zhu Shouzheng ,Guo Fangmin, Huang Le,Zeng Ying et al; “*Design and Fabrication of MEMS Millimeter Wave Phase Shifter*”, Technical Digest of Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies, Xiamen, July, 2002, pp.777~780

[104] J. S. Hayden, A. Malczewski, J. Kleber, C. L. Goldsmith, and G. M. Rebeiz; “*2 and 4-bit DC-18 GHz microstrip MEMS distributed phase shifters*”, in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Phoenix, AZ, May 2001, pp. 219-222.

[105] Isom, R.; Hawkins, M.; Richins, J.; McEwan, S.; Iskabder, M.; Grow, R.; “*Comparative evaluation of MEMS and ferroelectric technologies in phase shifter design*” Antennas and Propagation Society International Symposium, 2000. IEEE, pp. 808 -811

第二章

[1] R. Landauer; “*Shock Waves in Nonlinear Transmission Lines and Their Effect on Parametric Amplification*”, IBM Journal, October, 1960, pp.391~401

[2] M. J. W. Rodwell, M. Kamegawa, R. Yu, M. Case, E. Carman, and K. S. Giboney, “*GaAs nonlinear transmission lines for picosecond pulse generation and millimeter-wave sampling*,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 39, July 1991, pp. 1194-1204

[3] M. J. W. Rodwell, S. T. Allen, R. Y. Yu, M. G. Case, U. Bhattacharya, M. Reddy, E. Carman, M. Kamegawa, Y. Konishi, J. Pusl, R. Pullola, and J. Esch, “*Active and nonlinear wave propagation devices in ultrafast electronics and optoelectronics*,” Proc. IEEE, vol. 82, July 1994, pp. 1035-1059

[4] David M. Pozar, “*Microwave Engineering*”, Second Edition, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1998

[5] W. M. Zhang, R. P. Hsia, C. Liang, G. Song, C. W. Domier, and N. C. Luhmann, Jr., “*Novel low-loss delay line for broadband phased antenna array applications*,” IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 6, Nov. 1996,

pp. 395-397

[6] R. P. Hsia, W. M. Zhang, C. W. Domier, and N. C. Luhmann, Jr., "A hybrid nonlinear delay line-based broad-band phased antenna array system," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 8, May 1998, pp. 182-184.

[7] A. S. Nagra and R. A. York, "Monolithic GaAs phase shifter with low insertion loss and continuous 0-360° phase shift at 20 GHz," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 9, Jan. 1999, pp. 31-33.

[8] Shiban Koul, Barathi Bhat; "Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters", Artech House, Boston, 1991

[9] N. S. Barker and G. M. Rebeiz, "Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wideband switches", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 46, No. 11, pp. 1881-1890, November 1998.

[10] N. S. Barker and G. M. Rebeiz, "Optimization of distributed MEMS transmission line phase shifters—U-band and W-band designs", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 48, No. 11, November 2000, pp. 1957-1966.

[11] Joseph S. Hayden and Gabriel M. Rebeiz, "Low-Loss Cascadable MEMS Distributed X-Band Phase Shifter", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, VOL. 10, NO. 4, APRIL 2000, pp.142~144

[12] Yu Liu, Andrea Borgioli, Amit S. Nagra, and Robert A. Yorks, "K-Band 3-Bit Low-Loss Distributed MEMS Phase Shifter", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, VOL. 10, NO. 10, Oct. 2000, pp.415-417

[13] B. A. Saleh and M. C. Teich; "Fundamentals of Photonics", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.

[14] 黄志洵, 王晓金; "微波传输线理论与实用技术", 北京, 科学出版社, 1996.

[15] Gabriel. M. Rebeiz; "RF MEMS: Theory, Design, and Technology", New Jersey, John Wiley & Sons Ltd, 2003

[16] 闫润卿, 李英惠 编; "微波技术基础", 北京, 北京理工大学出版社, 第2版, 1997年

[17] R. L. Borwick, P. A. Stupar, J. DeNatale, R. Anderson, C. Tsai, and K. Garrett; "A high-Q, large tuning range, tunable capacitor for RF applications", in IEEE International Conference on Microelectromechanical Systems, January, 2002, pp. 669-672.

[18] Min-hang Bao; "Micro Mechanical Transducers—Pressure Sensors, Accelerometers, and Gyroscopes", Volume I, Elsevier Science, 2000

[19] E. S. Hung and S. D. Senturia, "Extending the travel range of analog-tuned electrostatic actuators", J. Microelectromech. Syst., vol. 8, Dec. 1999, pp. 497-505.

[20] Gregory T.A. Kovacs, "Micromachined Transducers Sourcebook", McGraw-Hill. 1998,2

[21] T. Akiyama and H. Fujita; "A quantitative analysis of scratch drive actuator using buckling motion" , Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Amsterdam, Netherlands, 1995, pp. 310-15.

[22] Yael Nemirovsky, and Ofir Bochobza-Degani, "A Methodology and Model for the Pull-In Parameters of Electrostatic Actuators", J. Microelectromech. Syst. Vol. 10, NO. 4, Dec. 2001, pp. 601-605

[23] P. M. Osterberg and S. D. Senturia, "M-TEST: a test chip for MEMS material property measurements using electrostatically actuated test structures," J. of Microelectromech. Syst. Vol.6, June, 1997, pp. 107-118

[24] 冯慈璋 编著; 静态电磁场, 西安, 西安交通大学出版社, 1985年

[25] Rob Legtenberg, John Gilbert, Stephen D. Senturia, and Miko Elwenspoek; "Electrostatic Curved Electrode

Actuators", J. Microelectromechanical Syst. Vol. 6, NO. 3, SEPTEMBER 1997 pp. 257-265

[26] D M. Burns and V. M. Bright; "Nonlinear flexures for stable deflection of an electrostatically actuated micromirrior", Proceedings of SPIE, Vol. 3226, 1997, pp. 125-136.

[27] E. K. Chan and R. W. Dutton; "Electrostatic micromechanical actuator with extended range of travel", J. Microelectromechanical Syst., Vol.9, No.3, Sept. 2000, pp.321-328

[28] J. L. Seeger and S. B. Crary; "Stabilization of electrostatically actuated mechanical devices", International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, IL, June, 1997, pp. 1133-1136

[29] Michael Shiang-Cheng Lu; "Parallel-Plate Micro Servo for Probe-Based Data Storage", Ph.D. Dissertation, Carnegie Institute of Technology of the Carnegie Mellon University, 2002

[30] T. Veijola, H. Kuisma, and J. Lahdenpera, "Model for gas film damping in a silicon accelerometer" , in International Conference on Solid-State Sensors Actuators, Vol. 4, June 1997, pp. 1097 - 1100.

[31] J. Bergqvist, F. Rudolf, J. Maisana, F. Parodi, and M. Rossi, "A silicon condensor microphone with a highly perforated backplate" , in International Conference on Solid-State Sensors & Actuators Digest, New York, 1991, pp. 266-269.

[32] "IE3D Release 5", Zeland Software, Freemont, CA, 1998, www.zeland.com

[33] "Sonnet 6. 0 a", Sonnet Software Inc., Liverpool, NY, www.sonnetusa.com

[34] "ANSYS Release 8.0", ANSYS Incorporated, Pittsburgh, www.ansys.com

[35] C. P. Wen; "Coplanar waveguide: a surface strip transmission line for nonreciprocal gyromagnetic device application", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1087, Dec. 1969.

[36] DiPaolo, Franco; "Networks and Devices Using Planar Transmission Lines", Boca Raton: CRC Press LLC, 2000,

[37] Rainee N. Simons; "Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems", John Wiley & Sons, Inc, 2001

[38] George L. Mathael, Kursad Kiziloglu, Nadir Dagli, Stephen I. Long; "The Nature of the Charges, Currents, and Fields in and About Conductors Having Cross-Sectional Dimensions of the Order of a Skin Depth", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 38, No. 8, August 1990, pp.1031-1036

[39] W. Heinrich; "Quasi-TEM Description of MMIC Coplanar Lines Including Conductor-Loss Effects" , IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 41, No. 1, Jan. 1993, pp. 45—52

[40] G. E. Ponchak, M. Matloubian, and L. P. B. Katehi; "A Measurement-Based Design Equation for the Attenuation of MMIC-Compatible Coplanar Waveguides", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 47, No. 2, Feb. 1999, pp. 241—243

[41] Microwave Office 2002, Applied Wave Research, Inc., <http://www.mwoffice.com>

[42] Golio, Mike; "The RF and Microwave Handbook" Boca Raton: CRC Press LLC, 2001

[43] Jeffrey Arendt Jargon; "Measurement-based Modelling of Vector Network Analyzer Calibration Standards and Nonlinear Microwave Devices Using Artificial Neural Networks", Ph.D. dissertation, University of Colorado, 2003

第三章

[1] Gabriel. M. Rebeiz; “*RF MEMS: Theory, Design, and Technology*”, New Jersey, John Wiley & Sons Ltd, 2003

[2] Z. J. Yao, S. Chen, S. Eshelman, D. Denniston, and C. L. Goldsmith, “*Micromachined low-loss microwave switches*”, IEEE J. Microelectromech. Systems, Vol. 8, pp. 129–134, June 1999.

[3] P. M. Zavracky, N. E. McGruer, R. H. Morrison, and D. Potter, “*Microswitches and microrelays with a view toward microwave applications*”, Int. J. RF Microwave CAE, Vol. 9, No. 4, pp. 338–347, 1999.

[4] Y. Wang, Z. Li, D. T. McCormick, and N. C. Tien, “*Low-voltage lateral-contact microrelays for RF applications*”, in 15th IEEE International Conference on Micro-Electro-Mechanical Systems, January 2002, pp. 645–648.

[5] Zhang Huantong; “*Design, Fabrication, and Characterization of RF MEMS Variable- capacitor Phase Shifters and Prestressed-beam Switches*”, Ph. D Dissertation, University of Colorado at Boulder, 2003

[6] M. Sakata, Y. Komura, T. Seki, K. Kobayashi, K. Sano, and S. Horike; “*Micromachined relay which utilizes single crystal silicon electrostatic actuator*”, 12th IEEE International Conference on Microelectromechanical Systems, pp. 21–24, 1999.

[7] 金玉丰, 张锦文, 郝一龙, 张大成, 王阳元; “*硅、金属、介质膜桥射频微机电系统开关*”, 发明专利, 专利号: ZL01102116.0

[8] Jinwen Zhang, Yufeng Jin, Yilong Hao, Ying Wang, Yangyuan Wang; “*A Novel Capacitive RF MEMS Switch Fabricated by Bulk Micromachining*”, Proceedings of Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies, June 2002, pp.781-784

[9] Lu Miao, Zhao zhengping et al; “*Testing and Analysis of Lifetime of a Vertical Bulk MEMS Switch*”, 6th International Conference on Solid-state and Integrated Circuit Technology (ICSICT 2001) Proceedings, Oct. 2001, pp.765-768

[10] P. A. Flinn, D. S. Gardner, and w. D. Nix; “*Measurement and interpretation of stress in Aluminum-based metallization as a function of thermal history,*” IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-34, Mar. 1987, pp. 689-699.

[11] R. P. Vinci and J. C. Bravman; “*Mechanical testing of thin films,*” in Dig. Tech. Papers Transducer’91, Int. Conf. Solid State Sensors and Actuators, 1991, pp.943-948

[12] R. Venkatraman, J. C. Bravman, W. D. Nix, P. W. Davies, et al; “*Mechanical properties and microstructural characterization of Al -, 5% Cu thin films*”, J. Electron. Material, Vol. 19, No.11,1990, pp. 1231-1237.

[13] M. Elwenspoek, H. V. Jansen, “*Silicon Micromachining*”, Cambridge, Cambridge University Press, 1998

[14] Ferril Losee, “*RF Systems, Components, and Circuits Handbook*”, Artech House, London, 1997

[15] www.darpa.mil

[16] 薛良金 编著; “*毫米波工程基础*”, 北京, 国防工业出版社, 1998年

[17] DiPaolo, Franco; “*Networks and Devices Using Planar Transmission Lines*”, Boca Raton: CRC Press LLC,

2000,

[18] www.abrisa.com

[19] Joseph S. Hayden and Gabriel M. Rebeiz, “*Low-Loss Cascadable MEMS Distributed X -Band Phase Shifter*”, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, VOL. 10, NO. 4, APRIL 2000, pp.142~144

[20] Yu Liu, Andrea Borgioli, Amit S. Nagra, and Robert A. Yorks, “*K-Band 3-Bit Low-Loss Distributed MEMS Phase Shifter*”, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, VOL. 10, NO. 10, Oct. 2000, pp.415-417

[21] J. S. Hayden and G. M. Rebeiz; “*A low-loss Ka-band distributed MEMS 2-bit phase shifter using metal-air-metal capacitors*”, in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Seattle, WA, June 2002, pp. 337-340.

[22] J. S. Hayden and G. M. Rebeiz; “*Very low loss distributed X-band and Ka-band MEMS phase shifters using metal-air-metal capacitors*” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 51, No. 1, January 2003, pp. 309-314

[23] Hong-Teuk Kim, Jae-Hyoug Park, Yong-Kweon Kim and Youngwoo Kwon; “*V -Band Low -Loss and Low -Voltage Distributed MEMS Digital Phase Shifter Using Metal -Air -Metal Capacitors*”, in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Seattle, WA, June 2002, pp. 341-344

[24] 闫润卿, 李英惠 编; “*微波技术基础*”, 北京, 北京理工大学出版社, 第2版, 1997年

[25] A. S. Nagra and R. A. York, “*Monolithic GaAs phase shifter with low insertion loss and continuous 0_-360_- phase shift at 20 GHz*,” IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 9, Jan. 1999, pp. 31-33

[26] Shiban Koul, Barathi Bhat; “*Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters*”, Artech House, Boston, 1991

[27] Barker, N.S.; Rebeiz, G.M., “*Distributed MEMS transmission-line BPSK modulator*”, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Volume: 10 , Issue: 5 , May 2000, pp. 198 – 200

[28] Microwave Office 2002, Applied Wave Research, Inc., <http://www.mwoffice.com>

[29] Maxwell 3D 6.0, www.ansoft.com

[30] Daniel G. Swanson, Jr., Wolfgang J. R. Hoefer; “*Microwave Circuit Modeling Using Electromagnetic Field Simulation*”, 2003 ARTECH HOUSE, INC., 685 Canton Street, Norwood, MA 02062, 2003

[31] Cleopatra Cabuz, Keisuke Fukatsu, Toru Kurabayashi et al; “*Microphysical Investigations on Mechanical Structures Realized in p+ Silicon*”, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 4, No.3, September 1995, pp. 109-118

[32] Warren C. Young, Richard G. Budynas; “*Roark's Formulas for Stress and Strain*” (Seventh Edition), McGraw-Hill Companies, Inc., 2002.

第四章

[1] Shiban Koul, Barathi Bhat; “*Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters*”, Artech House, Boston, 1991

[2] Gabriel. M. Rebeiz; “*RF MEMS: Theory, Design, and Technology*”, New Jersey, John Wiley & Sons Ltd, 2003

第五章

- [1] 金玉丰, 张锦文, 郝一龙, 张大成, 王阳元; “硅、金属、介质膜桥射频微机电系统开关”, 发明专利, 专利号: ZL01102116.0
- [2] Jinwen Zhang, Yufeng Jin, Yilong Hao, Ying Wang, Yangyuan Wang; “A Novel Capacitive RF MEMS Switch Fabricated by Bulk Micromachining”, Proceedings of Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies, June 2002, pp.781-784
- [3] Gabriel. M. Rebeiz; “RF MEMS: Theory, Design, and Technology”, New Jersey, John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [4] 薛增泉, 吴全德、李浩 编著; “薄膜物理”, 北京, 电子工业出版社, 1991年。
- [5] 田民波、刘德令 编译; “薄膜科学与技术手册” (上、下), 北京, 机械工业出版社, 1991年
- [6] Cleopatra Cabuz, Keisuke Fukatsu, Toru Kurabayashi et al; “Microphysical Investigations on Mechanical Structures Realized in p^+ Silicon”, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 4, No.3, September 1995, pp. 109-118

第六章

- [1] Cleopatra Cabuz, Keisuke Fukatsu, Toru Kurabayashi et al; “Microphysical Investigations on Mechanical Structures Realized in p^+ Silicon”, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 4, No.3, September 1995, pp. 109-118
- [2] Raj K. Gupta; “Electrostatic Pull-in Test Structure Design for In-situ Mechanical Property Measurements of Microelectromechanical System (MEMS)”, Ph.D. Dissertation, at the Massachusetts Institute of Technology, June 1997
- [3] 黄克智, 夏之熙 等; “板壳理论”, 北京, 清华大学出版社, 1987
- [4] S. 铁摩辛柯, S. 沃诺斯基 著; 《板壳理论》翻译组 译: “板壳理论”, 北京, 科学出版社, 1977
- [5] 中国科学院北京力学研究所, 固体力学研究室板壳组 著; “夹层板壳的弯曲稳定和振动”, 北京, 科学出版社, 1977
- [6] Gabriel. M. Rebeiz; “RF MEMS: Theory, Design, and Technology”, New Jersey, John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [7] 曲喜新, 杨邦朝、姜节俭、张怀武 编著; “电子薄膜材料”, 北京, 科学出版社, 1996。
- [8] 李言荣, 恽正中 主编; “电子材料导论”, 北京, 清华大学出版社, 2001年。

按发表或申请的时间排序

在期刊上发表的论文 (按发表时间排序):

1. 缪旻, 金玉丰, 武国英; “RF MEMS 器件的研究”, 压电与声光, 2001 年, Vol.23, No.5, pp.7-12
2. Miao Min, Wu Guoying, “The investigation of the detection mechanism for micromachined accelerometers with gaseous proof mass”, Chinese Journal of Electronics, 2002, Vol.11, No.3, pp. 311-314. (SCI、EI 收录)
3. Miao M, Wu GY, Jin YF, Hao YL, Xiao ZY; “Design and analysis of a micromachined capacitive RF shunt switch with composite membrane”, International of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation”, Vol. 3, No.3-4, 2002, pp 375-378 (SCI 收录)
4. 缪旻, 肖志勇, 武国英, 金玉丰, 郝一龙; “一种用于 RF MEMS 移相器及开关可变电容的复合微桥结构”, 微纳电子技术, 2003 年, Vol. 40, 7/8, pp.371-374

在会议上发表的论文 (按发表时间排序):

1. Miao Min, Zhang Fuxue, Wu Guoying; “The investigation of the detection mechanism for micromachined accelerometers with gaseous proof mass”, 6th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology(IEEE), Proceedings, Shanghai, Oct. 2001, pp. 808-811. (ISTP 收录)
2. Jin YF, Zhang HX, Miao M, Tang K, Li ZH; “Micromachined tunable RF capacitor with comb structure”, SPIE Conference on Micromachining and Microfabrication Process Technology and Devices, Nanjing, CHINA, Nov 07-09, 2001, Vol. 4601 pp.8-13 (EI、ISTP 收录)
3. Yan Guizhen, Chan, Philip C.H., Miao Min, Johnny K.O.; Hsing I-Ming; “The Investigation of an Integrated Gas Sensor Array”, Proceedings of First IEEE International Conference on Sensors (IEEE Sensors), Orlando, FL, United States, Vol.1 No.1, 2002, p243-246. (EI 收录)
4. Miao Min, Xiao Zhiyong, Yan Guizheng, Wu Guoying, Jin Yufeng, Hao Yilong; “Design and Analysis of a Capacitive RF MEMS Switch with Metal/Dielectric Beam”, Proceedings of Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies, Xiamen, China, July 22-12, 2002, pp.797-800
5. Zhang Haixia, Xiao Zhiyong, Zhang Jinwen, Miao Min, Jin Yufeng; “Simulation and Optimization of RF MEMS Switch, Proceedings of Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies, Xiamen, China, July 22-12, 2002, pp.785-788-
6. Jin Yufeng, Zhang Jinwen, Zhao Lei, Miao Min, Zhang Luping, Hao Yilong; “The Investigation of a Getter Film Used in Vacuum Packaging and Maintenance for MEMS Application”, Proceedings of Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies, Xiamen, China, July 22-12, 2002, pp. 235-238
7. Miao M, Xiao ZY, Wu GY, Hao YL, Zhang HX; “Capacitive RF MEMS switch with composite beam”, SPIE Conference on MEMS/MOEMS Technologies and Applications, Shanghai, China, OCT 17-18, 2002, Vol. 4928, pp.248-255 (ISTP 收录)
8. Jin YF, Wang ZP, Wang ZF, Shi XQ, Lim PC, Miao M, Shan XC; “A dual-function leak detector for MEMS devices”, SPIE Conference on Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS II, SAN JOSE, CALIFORNIA, JAN 27-29, 2003, Vol.4980. pp. 301-308 (EI、ISTP 收录)
9. Miao Min, Jin Yufeng, Zhang Jinwen, Wu Guoying, Hao Yilong, Zhang Haixia; “Fabrication and Characterization of a Novel Bulk Si Micromachined Distributed Microwave Phase Shifter”, Proceedings of 3rd International Symposium on Instrumentation Science and Technology, Aug. 18-22, 2004, Xi'an, China, pp.3-0286~3-0289.
10. Miao Min, Wu Guoying, Hao Yilong, Zhang Jinwen, Jin Yufeng; “The Prestress Induced by P+ Doping in a Bulk Si Micromachined Microbridge and a MEMS Distributed Digital Phase Shifter Based on the Prestress-curved Metal-Air-Metal Capacitor”, Sixth World Congress on computational Mechanics, Beijing, China, Sep. 2004. pp.21

11. Miao Min, Wu Guoying, Jin Yufeng, Zhang Jinwen, Hao Yilong; "A Bulk Micromachined Distributed Digital Phase Shifter for Micorwave Phassed Array Applications", 7th International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology Proceedings (IEEE press), Oct. 18-21, 2004, pp.1691-1694

申请的专利 (按时间排序):

1. 微机电系统器件的真空封装方法; 发明人: 金玉丰, 张锦文, 缪昱, 郝一龙; 申请号: 02100469.2; 申请日: 2002年2月1日。
2. 微机械微波移相器; 发明人: 缪昱, 张锦文, 武国英, 金玉丰, 郝一龙; 申请号: 200410028883.3; 申请日: 2004年2月16日。

在读期间参与科研项目情况 (项目名称、来源、在项目中的贡献: 参与、主要成员、主持)

项目名称: RF-MEMS 开关制造技术;

来源: 国防预研;

在项目中的贡献: 主要完成人

项目名称: RF 可变电容结构设计及工艺基础研究;

来源: 微米/纳米加工技术国防科技重点实验室;

在项目中的贡献: 主要完成人

项目名称: RF MEMS 开关;

来源: 863 计划;

在项目中的贡献: 主要成员

致 谢

在这篇博士论文完成之际，我深深地感到，有必要在此对许多曾经指导和帮助过我的老师和同学表达我诚挚的谢意。

首先要感谢我的导师武国英教授。在攻读学位期间，武老师对我的论文工作给予了悉心、细致的指导。我的每一步前进，都离不开他的导引。在论文工作中，他严谨的学风、前瞻性的眼光和在学术上的不懈追求都深深地影响着我，他的谆谆教导和在关键时刻的鼓励更令我终生难忘。这位长者渊博的学识、敏锐的洞察力和达观的人生态度，都不禁让我对他充满了深深的敬意。

我也要感谢另一位导师金玉丰副教授，是他建议我开展了移相器方面的研究，并在工作初期资料十分匮乏时从国外帮我搜集到了重要的文献。他时刻关心我的研究工作进展，并对我的新的想法都给予了很好的建议，而且在经费和试验条件上给予了巨大的支持。

感谢郝一龙教授，他在肩负繁重的科研工作和管理的同时，仍对我的工作和生活给予了极大的关心和支持。他讲授的课程使我能够迅速走入MEMS这一全新的领域。在当我遇到困难请教时，他总是耐心地予以解答。与他的讨论使我的工作避免了很多弯路，亦得到很大的启发。他乐观向上的态度也深深地感染和鼓舞着我和同学们。

感谢闫桂珍教授，她在繁忙的科研工作中，总是设法抽空与我一起讨论在工艺上遇到的难题。她丰富的经验和创新精神曾给予我极大的帮助与启发。

感谢张锦文老师在工作上的帮助和生活上的关心。与她的合作，使我学到了不少宝贵的知识，也得到了不少启发。

感谢微米/纳米国家重点实验室的张大成教授、李婷高工、田大宇高工、王颖工程师、商静怡、张美丽、刘春梅以及实验室里其他的各工艺负责人和操作员。他们为我的工艺试验和样品加工提供了极大的帮助，对我的各种问题给予了耐心的解答，而且帮助我掌握了多项工艺的操作和仪器的测试方法。田大宇、李婷和王颖等老师在繁忙的工作中还和我一起努力，以他们的经验和耐心帮助我解决了多项难题。能够与他们合作，实在让我受益非浅。

感谢组里张海霞副教授、吴文刚副教授、冯亚林博士、刘俊博士和周劲博士在学习上和生活中的极大关心和多方面的帮助。

感谢李志宏教授对我论文工作的关心和建议。正是1999年与他的相遇，才使我有机会能参加到MEMS组这个充满朝气、活力、积极向上的集体中，并得到了极大的锻炼和提高。

感谢杨振川、郝跃国、徐嘉佳、肖志勇、董海峰、朱泳、周荣春、李铁、王成伟、石进杰、陈庆华、周健、范杰、王煜、郭辉、刘雪松等同学在学习和生活中给我的帮助，与他们的讨论曾经给予我多方面的启发，与他们的交往也使我攻读学位的时光变得充满乐趣。

在MEMS组这个集体中，不仅有学术上的热烈讨论和勤奋的工作，也不乏各种欢乐和情趣。闲暇时的聚会和远游、同学们多才多艺的展示和自己积极参与其中的乐趣都将成为我深深的回忆。

感谢美国的C. P. Wen 博士, CPW的发明人。他在北大工作期间, 虽年事已高, 但仍在指导微电子所科研教学工作。他曾和我对课题中的一些问题进行过细致的讨论, 并不厌其烦地回答了我许多现在看来很幼稚的问题, 甚至与我一起推导一些公式。从这位微波技术界前辈的身上, 我不但学到了很多宝贵的知识, 而且也学到不少了治学的方法。

感谢电子55所的朱健研究员、电子13所的吕苗、王文军高工在工艺和射频问题上的帮助。感谢中科院微电子所武锦工程师在高频测试方面的大力帮助。

最后, 我要对我的家人表示发自心底的感激, 他们对我给予全力支持和不断的鼓励, 使我能全心于研究工作中, 努力完成论文的工作。我还要感谢我的女友韩波的理解, 给予的精神上的支持和在生活上的悉心照料。正是他们的关爱, 使我能以好的心情和笑容去面对工作和生活中的挑战。在此我也要表达因任务繁忙而对他们疏于关心的内疚之情。