

为了验证这种拉应力的存在，对直流电镀好的结构进行严格的冷阱释放，用无水乙醇，异丙醇，环己烷各浸泡 40min+40min，充分置换掉梁周围的水分，再用冷阱释升华掉固态的环己烷，排除掉水的表面张力产生的干扰。

释放后看到明显向上翘曲（图 2.26），可以说明离子补偿不及时引起严重析氢时带来的拉应力，这对 RF 开关是致命的。

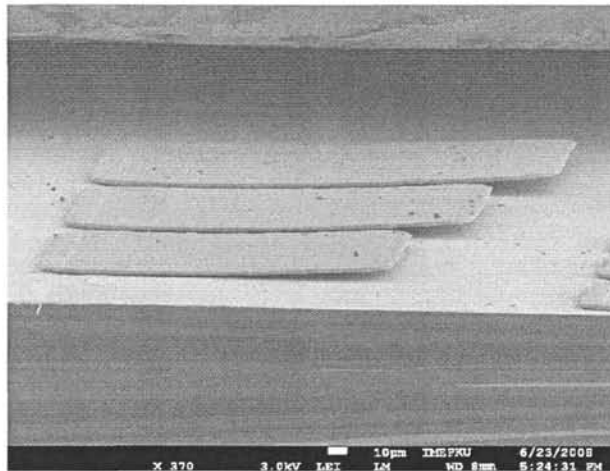


图 2.26 常温电镀时的残余应力

而不降温度，光刻胶做牺牲层时，虽然没有铜种子层内驻氢析氢的问题，但由于光刻胶的支撑性不够，释放后多为压应力。（如图 2.27）。

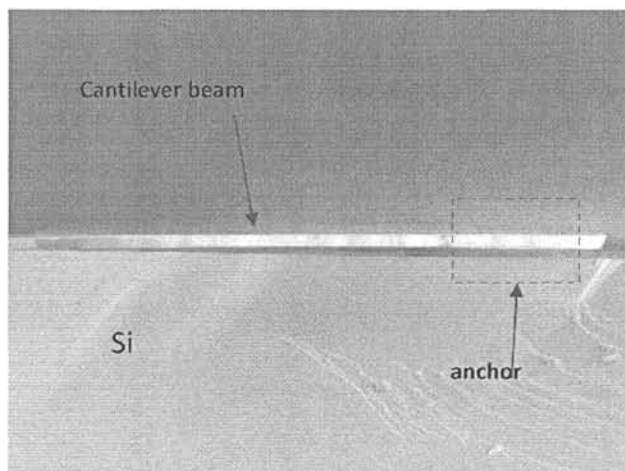


图 2.27 光刻胶做牺牲层时的粘连效应

2. 电镀速率下降。

降温导致的电流密度减小可以直接降低电镀速率。另一个潜在的影响是电解水的增加导致了电流效率的降低，同样的电流密度，实际得到电子的金属离子变少。这两个因素一起导致了电镀速率的下降。如表 1 为 25 摄氏度和 65 摄氏度时对面积较大悬臂梁测量台阶后得到的电镀速率。

表 1 温度对电镀速率的影响

温度 \ 电流密度	0.6 ASD	0.9 ASD	1.2 ASD
25℃	0.70um	0.87um	1.00um
65℃	0.75um	0.95um	1.10um

3. 镀液 PH 值下降。

KFC88 电镀液 ph 值在 65 摄氏度时为 7.5-8，此时光亮剂和金离子络合物的活性最好。而且弱碱性环境有助于抑制水解反应往氢离子方向移动。因此电解水后，氢分子更易形成，析氢明显。

4. 表面光泽度下降。

添加剂活性降低导致表面光亮度略有降低，电流密度的减小导致的成核速率减慢，晶粒变大，也会使表面形貌变差。

由此可见镀液温度降低带来的最大隐患是析氢加剧带来的残余应力，其次是表面的光亮度下降。

2.4.3.5. 降温引起的潜在问题的抑制

为了保证降温后的后遗症消除，最重要的是要消除降温后引起的以上四方面问题，其中最核心的是在保证电镀基材中的氢分子团不膨胀溢出的前提下，仍保证镀液中金离子的高迁移率，避免浓度极化导致的水解。

周期反向脉冲电镀理论上可以解决这个问题，以一个最简单的占空比 1:1 的脉冲来说明，由于脉冲的一个工作周期内有实际电流的加载区，也有无电流区，这样，在平均电流 0.6asd 的情况下，电镀瞬间电流可达到 1.0-1.2asd（考虑到畸变），这样在实际电镀的半周期内可以保证很高的结晶过电压，保证很高的成核速率，晶粒会很小。同时由于有电流的休整期，此时由于电镀半周期内导致的悬臂梁表面的浓度差会得到补偿，金离子有足够的时间来补充耗尽层如图 2.28，

避免了耗尽层内发生水解反应，这也就抑制了电镀层上析氢后的残余应力。

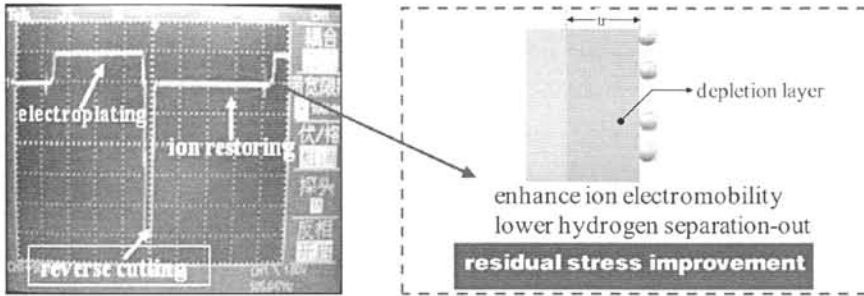


图 2.28 离子恢复

通过这种瞬间的高结晶过电位保证结晶速率，穿插离子浓度恢复期的方式，达到了抑制低位时水解过于严重的问题，改善了镀层应力。图 2.29 为实际使用的 dynax microstar 专用电镀电源，最高工作频率可达 1500HZ，电流精度为 10mA（此参数决定了被镀芯片的最小面积，电流精度不高会照成芯片的浪费，但是品质不高的电源会在微电流是波形失真），结合电镀的通过理论分析，结合 500Hz 是在的频率，如图 2.30 为释放后长宽比达到 100: 3 的悬臂梁的 SEM 照片，此厚度为 10 μ m，梁体笔直，无残余应力。

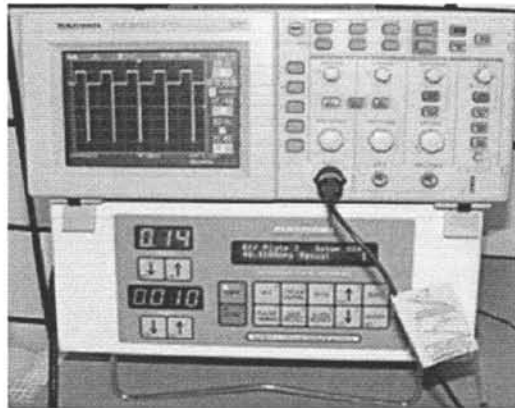


图 2.29 高精度电镀电源

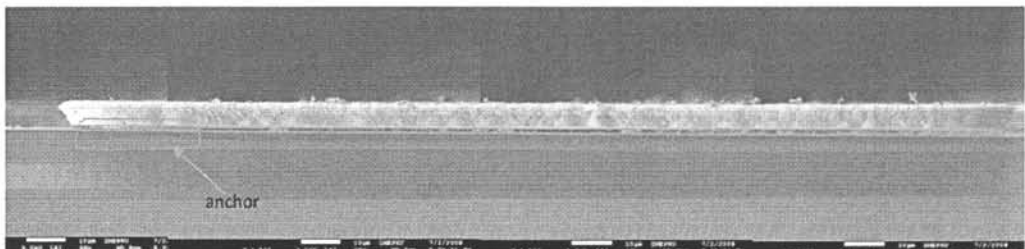


图 2.30 最终得到的长直梁体

2.4.3.6 周期反向脉冲电镀后对悬臂梁其他性能的影响

2.3.3.6.1 脉动扩散层电场对表面平整度的改善

由于使用脉冲电源，在被镀的悬臂梁表面，由于高频电场的存在，形成了周期性的浓度梯度，即脉动扩散层，此脉动扩散层的厚度取决于峰值电流的大小和电流源频率的高低。脉动扩散层的厚度决定了悬臂梁表面电场的分布模式。当脉动扩散层的厚度远大于悬臂梁表面的不平整度相比较时，会对镀液中的电场起到二次调整的作用，如图 2.31 下方脉动扩散层附加电场所示，在脉动扩散层的外边界处，由于离子的聚集，会重新形成一个电场，此电场的方向与原电场相同。当此脉动扩散层很厚时（与悬臂梁表面起伏相比较），此附加电场在被镀结构表面起伏处仍会畸变，使结构凸起部位电场强度变大，这种脉动扩散层的分布称为宏观分布，在此部位金属沉积速率变大，会使突起进一步放大。

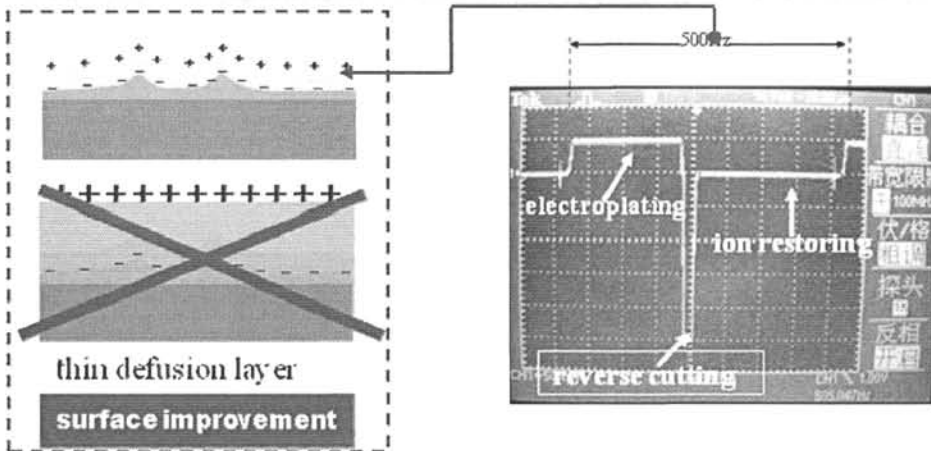


图 2.31 薄的脉动扩散层导致的离子微观分布

当脉动扩散层的厚度可以和悬臂梁表面的不平整度相比较时，会对镀液中的电场起到二次调整的作用。如图 2.31 上方脉动扩散层附加电场所示。浓度梯度导致的离子聚集面与悬臂梁表面的起伏有很好的跟随性，这样附加电场在悬臂梁表面的分步重新变得均匀，抑制了表面凸起部位上电场的积聚，可以有效的改善悬臂电场畸变引起的凸起放大。但这种薄的脉动扩散层的形成需要脉冲电源在保证很高频率的同时，脉冲波形的畸变要小。如图是 500Hz 时 microstar 电源的波形。

2.4.3.6.2 反向脉冲对表面平整度的改善

周期脉冲反向电源由两组独立的单脉冲电源构成，反向脉冲的应用，可有效的抑制悬臂梁表面的凸起。使用峰值很高的反向电流，可以通过两种途径减小表面的凸起：一是反向脉冲时的电场分布依然是凸起处电力线密集，在反向的时间内，悬臂梁相当于是牺牲阳极，电场密度大的地方自然牺牲速度快，这就会使不平整区自动整平如图 2.32 所示；二是对于表面尖峰很明显的凸起，尤其是由于电镀模具的物理挤压造成的凸起，反向瞬间的高电流会在尖峰处产生明显的能量聚集，导致尖峰在热作用下“熔化”。图 2.33 为光刻胶模具边缘的整平效应，左图为直流，右图为 0.9asd, 3mA 反向脉冲。可见整平效应很明显。当这种整平效应体现在微孔电镀时，即可抑制“狗骨”现象的发生。

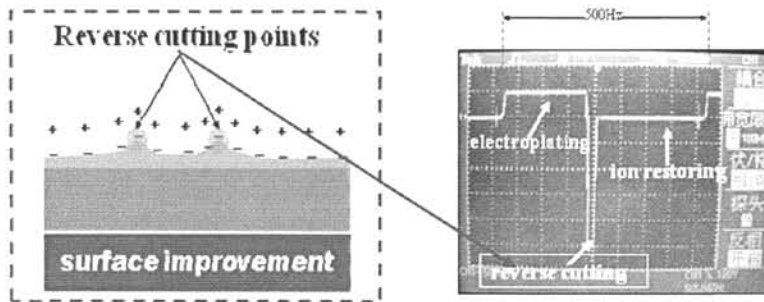


图 2.32 反向脉冲对尖峰的作用

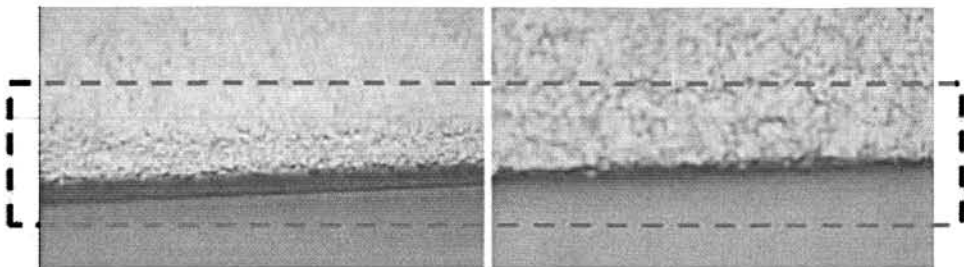


图 2.33 为光刻胶模具边缘的整平效应

2.4.3.6.3 脉冲电源对电镀晶粒的改变

电镀凝结核的行成有赖于结晶过电位，在极限电流以下，结晶过电位越高，形成晶核的速度越快，每个晶粒的体积就越小。但是一味的提高结晶过电位会导致电解水现象显著；甚至超过极限电流后镀层疏松。但是脉冲电源中由于有电流休止期可以有效的提高正向脉冲的峰值，如图 2.34 中的 0.9asd 的电流密度，正

向电流达到了 2.7asd。这样，在有效电流不变的情况下，瞬间的结晶过电位可以很高，如图 2.34 晶粒变小，表面就变光滑，同时镀层也更致密。

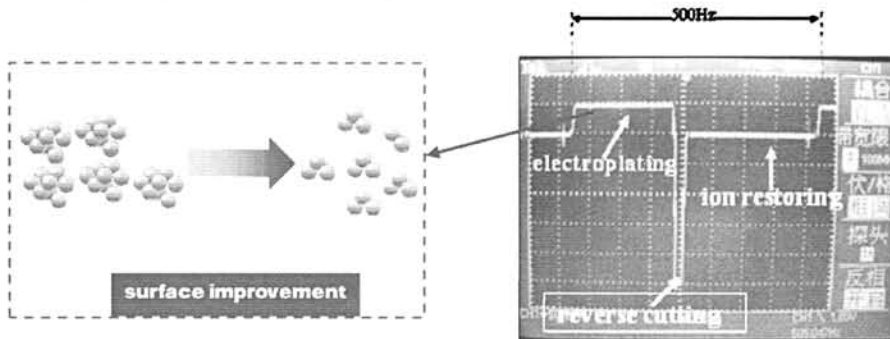


图 2.34 高结晶过电位导致的小晶粒

2.4.3.6.4 脉冲电源对镀层整体形貌的改变

脉冲周期反向电镀的高频、休眠期、反向脉冲、高结晶过电位四方面构成了对镀层表面的综合改善，与直流相比较的改善在宏观上表现的也较为明显，如图 2.35 所示。

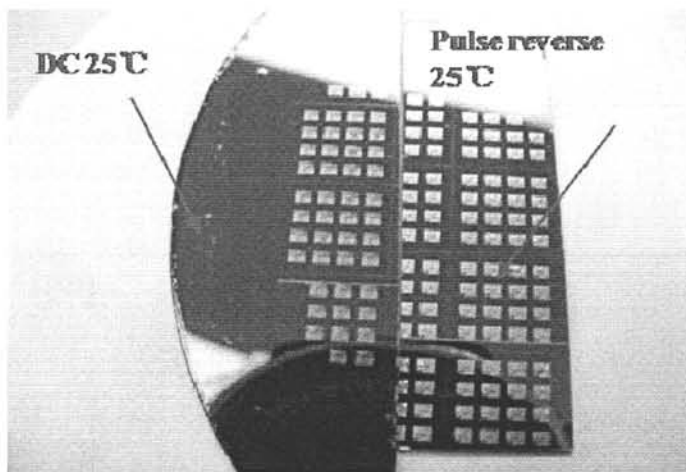


图 2.35 表面光泽对比

2.4.3.7 低温结合脉冲电镀的扩展应用

以上六节总结的突破金电镀液的推荐温度，用常温结合适当的脉冲参数电镀的方案，在另外一些无法容忍高温的电镀金方案中同样适用。比如，用干膜做模具的电镀，当用 KCF88 电镀液推荐的 65 摄氏电镀时，干膜很快就脱落，使整个模具失效，如图 2.36。直接降温使用直流电镀时，由于低的离子迁移率，导

致析氢严重，大量的气泡同样会导致干膜起泡，如图 2.37。



图 2.36 干膜遇热脱落

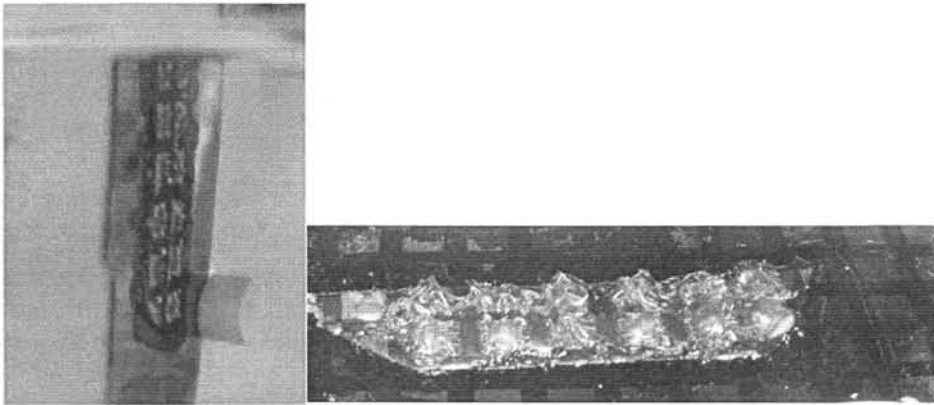


图 2.37 干膜因析氢而起泡

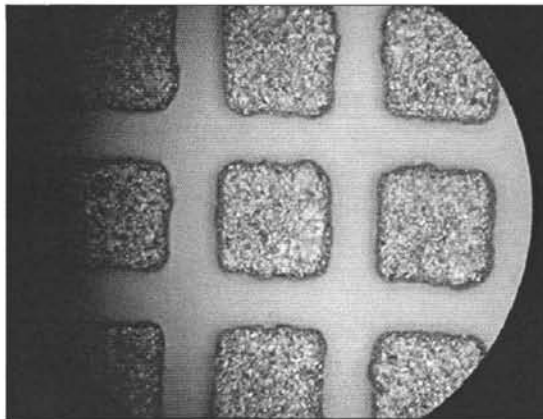


图 2.38 常温脉冲的良好结果

使用与抑制铜种子层上直接镀金起皱类似的工艺，可以既保证干膜不脱离，由保证无析氢的气泡，如图 2.38 为脉冲结合降温得到的干膜模具内电镀深孔的结果，电镀 55mins 后干膜模具依然完好无损，且电镀层光泽度很好。图 2.39 为电镀结构的剖面。

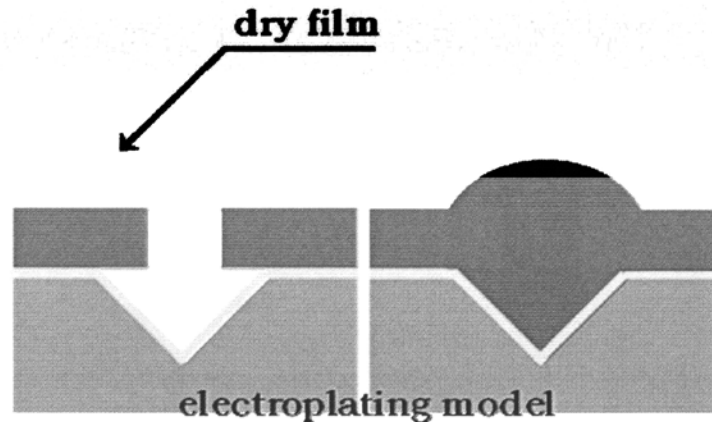


图 2.39 干膜电镀模具

2.5 铜牺牲层悬臂梁释放工艺对比研究

铜牺牲层的释放核心原理仍是铜的腐蚀，腐蚀方案在锚区开口的讨论中有了较为详尽的讨论，但在这步工艺中主要是关注 FeCl_3 , NH_4OH , HAC 各种腐蚀方案的横向腐蚀性，物理特性上对悬臂梁最小的伤害。在锚区开口方案中希望横钻越小越好，但是在释放时却要求横钻性能越高越好， FC13 方案和 $\text{NH}_4\text{OH}+\text{H}_2\text{O}_2$ 方案均横钻明显，故要优于冰醋酸加双氧水方案。同时又于氨水方案和冰醋酸方案均有双氧水参与反应，而双氧水的分解不可避免，因此会引入许多气泡，这会给悬臂梁引入较为明显的干扰。因此最终选用氯化高铁方案。既能保证梁下方无残留物，又能避免气泡的干扰。图 2.40 为氨水：双氧水：水（1：1：20）方案释放 30mins 时，同一部位的电镜照片和显微镜照片，可见悬臂梁组下的铜仍然存在，而其在水氧水分解的气泡作用下，悬臂梁的末梢已经有了翘曲。图 2.41 为氯化高铁加盐酸方案腐蚀 30mins 时冷阱释放的结果，从图 2.41 看到是悬臂梁的下方，可见对于很宽的（50um）的悬臂梁，铜牺牲层被反应的很干净，而且没有任何翘曲。图 2.42 和图 2.43 为整条样片的表面情况，可以明显看到图 2.42 的氨水方案溶液中，样片表面分布有许多气泡。图 2.43 的氯化高铁方案溶液中，没有任

何气泡。这对梁的释放不会再引入任何外力干扰。

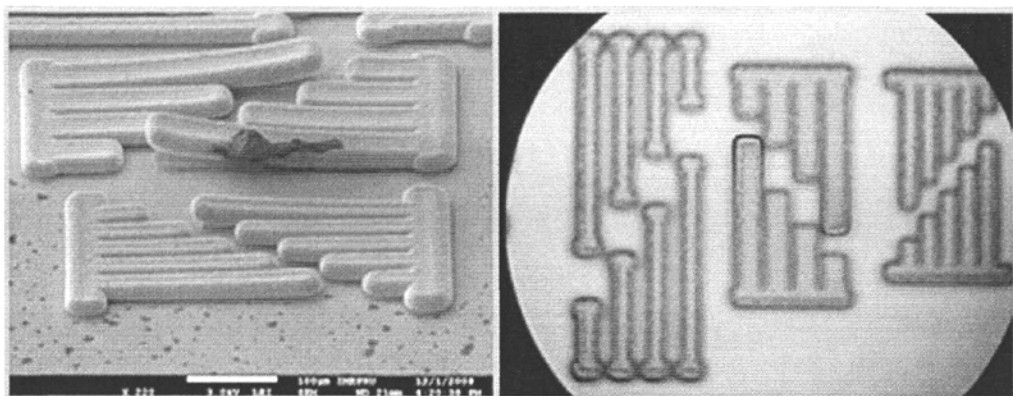


图 2.40 氨水：双氧水：水方案效率低、易翘曲

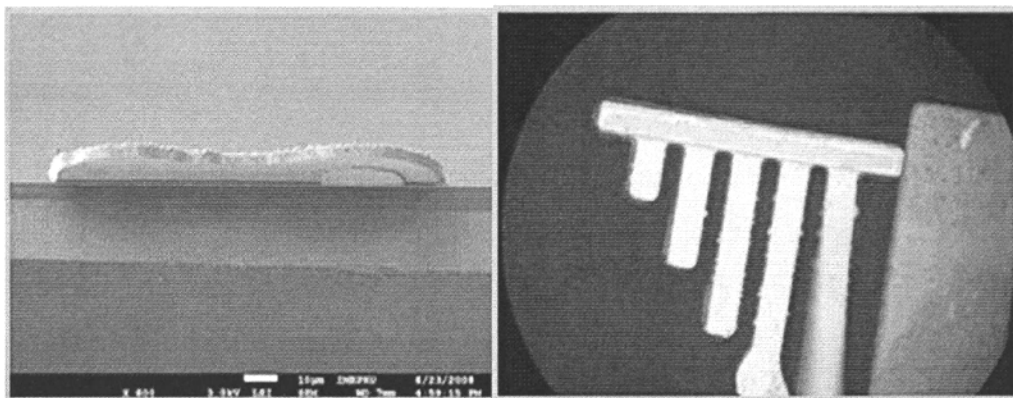


图 2.41 氯化高铁加盐酸方案速率快、无翘曲

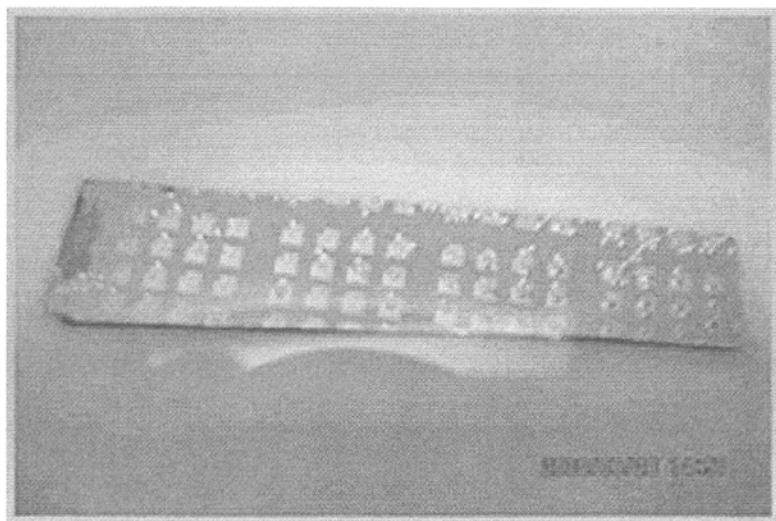


图 2.42 含双氧水方案表面积聚气泡

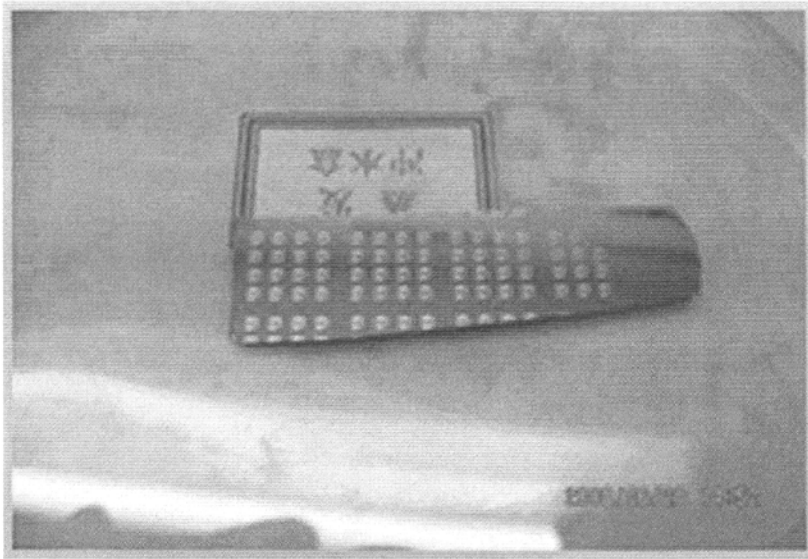


图 2.43 氯化高铁方案无气泡

第三章 悬臂梁接触点热分布仿真

除了梁体的物理与电学性能，悬臂梁开关另一个重要的部位在接触点，接触点的工作性能直接影响到开关的插入阻抗，开关的可靠性。同时开关的失效大部分的原因也是集中在接触点周围。其中最容易导致失效的是当射频开关通过较大功率时，由于局部电流密度大导致的发热熔融而失效。因此，对于接触点周围通过较大电流时的仿真，是寻找发热最明显，最容易失效部位的有效方式。下面是接触点仿真的建模、选材、加载载荷、仿真结果。

3.1 接触点的建模

图 3.1 为悬臂梁开关的版图，红圈部分为接触区域。图 3.2 为实际建模的形状，实际的悬臂梁用半圆球代替，梁下方的引线、氧化硅、硅层用圆柱形代替，以保证边界条件的均匀。

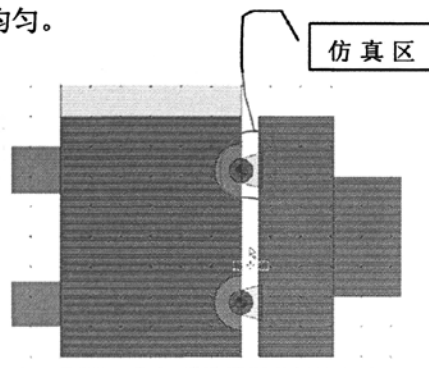


图 3.1 仿真部位

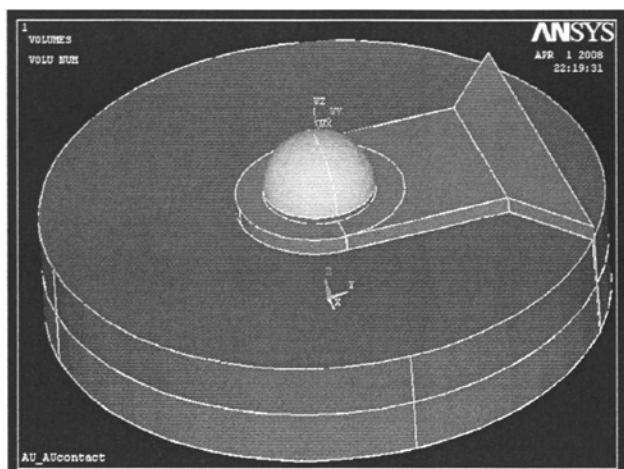


图 3.2 仿真模型

3.2 材料的选取

整个悬臂梁结构包括衬底的材料如图 3.3。触头与引线的衔接不可能是理想接触，故在接触点处增加了一种电导率低于金的膜材料，如图 3.4 细节所示。

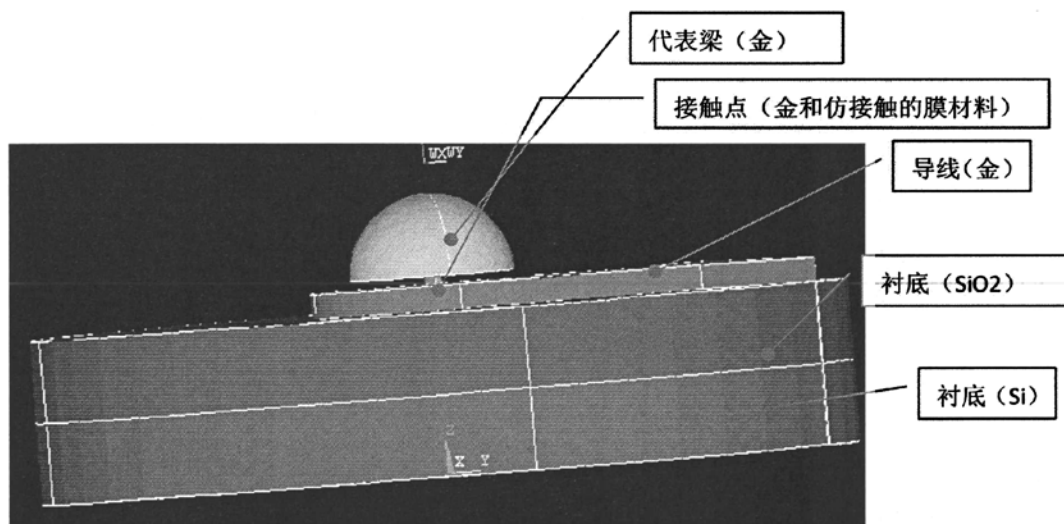


图 3.3 材料定义

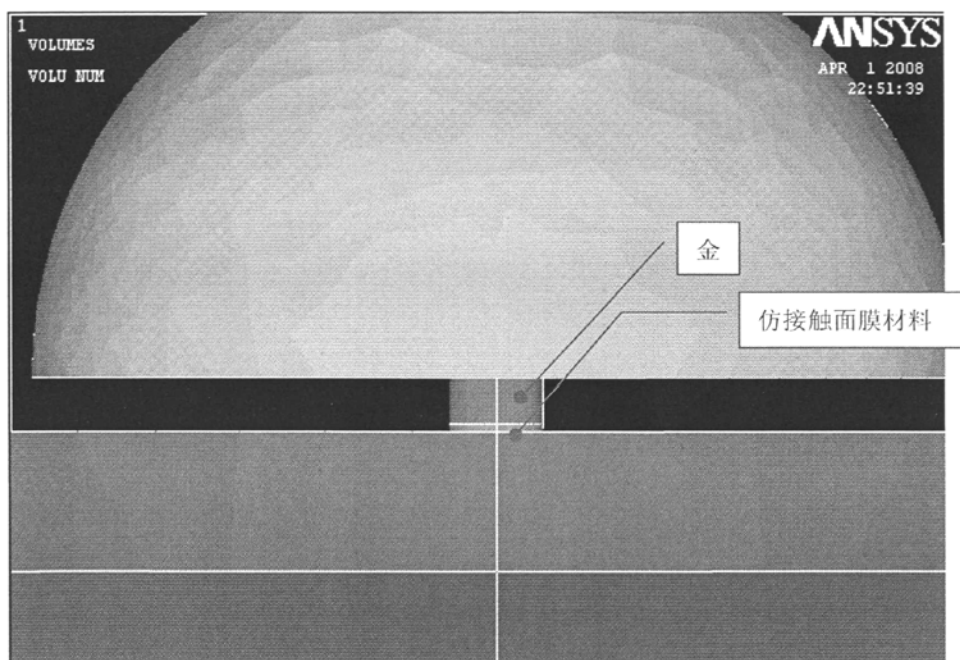


图 3.4 膜材料定义

各材料参数分别为：

金：密度：19.3 g/cm³ 比热：129 J/kg·°C（其他的单位按照这个改过来） 热导率：318 w/cm*k 电阻率：2.4Ω*m

赛贝克系数：-4.8e-5 v/c

Si：密度：2.328 g/cm³ 比热：700 j/kg*c 热导率：150 w/cm*k 电阻率：2.14e7Ω*m

SiO₂：密度：3.1 g/cm³ 比热：745 j/kg*c 热导率：14 w/cm*k 电阻率：2.14e12Ω*m

仿接触膜材料：密度：19.3 g/cm³ 比热：100 j/kg*c 热导率：140 w/cm*k 电阻率：3Ω*m

赛贝克系数：-2.4e-5 v/c

3.3 载荷加载：

有限元分割后如图 3.5 所示，solid 226 自由网格划分，所有和空气的接触面都用均布载荷 23 摄氏度，电流加载方向如红色箭头所指，从接触到导线。

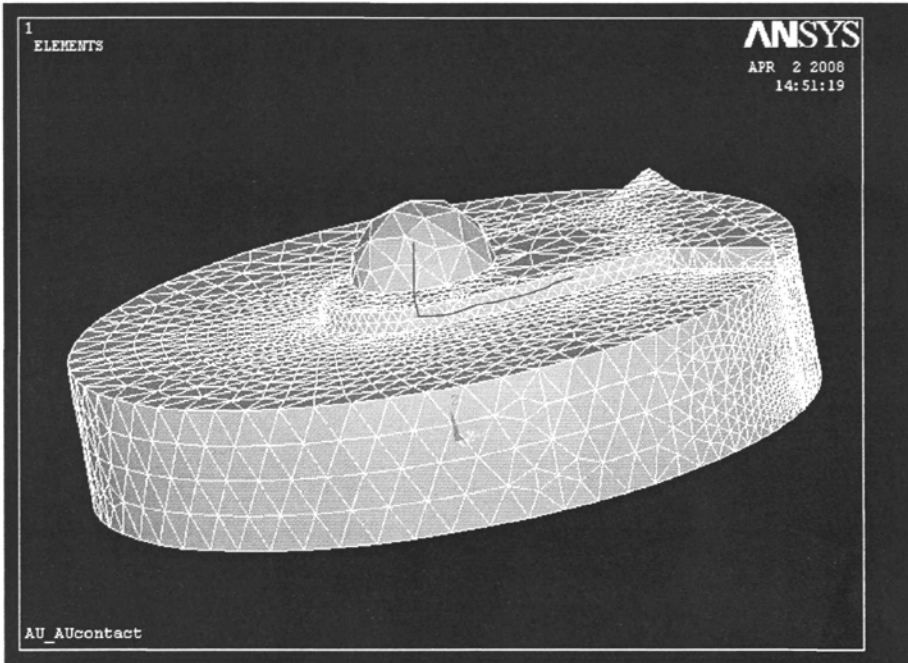


图 3.5 网格划分

3.4 仿真结果:

用电-热耦合的模型，当电流加载后，温度场的分布为如图 3.6-3.9 所示。

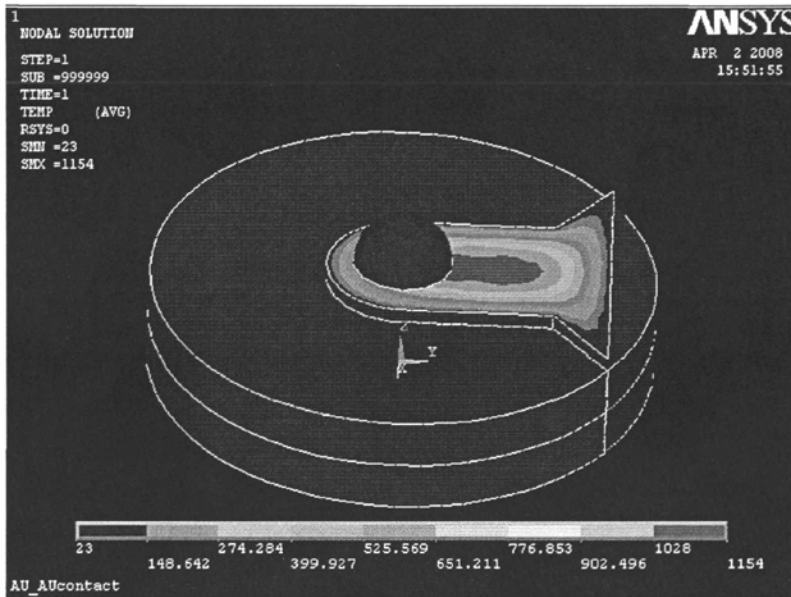


图 3.6 加载电流后温度分布

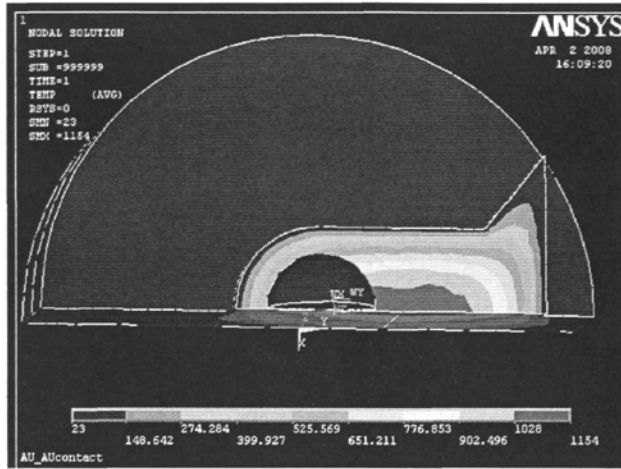


图 3.7 温度分部剖面

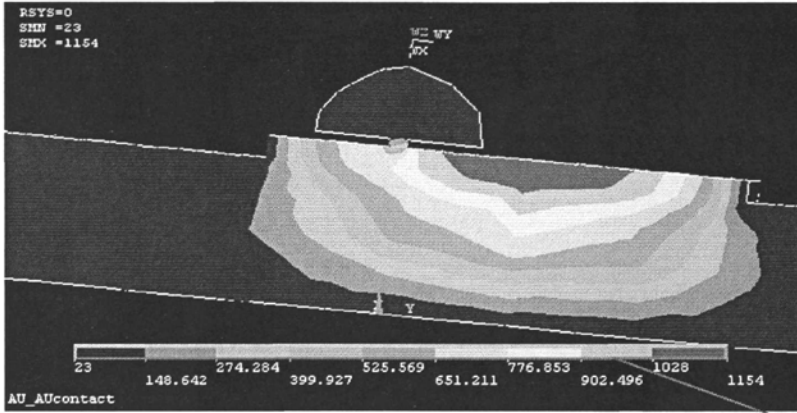


图 3.8 最热点追踪

温度

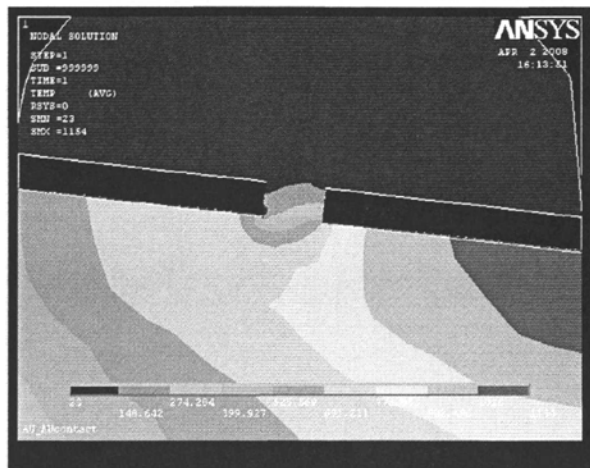


图 3.9 触点热分布

从剖面图 3.8 和 3.9 可以看出悬臂梁开关加载电流后温度最高的点并不在接触电阻较大的触点部位,而是在触点下方偏离引线引出端方向,也就是这个部位更容易因热聚集而失效。这与实际开关失效的 SEM 照片相吻合,如图 3.10。

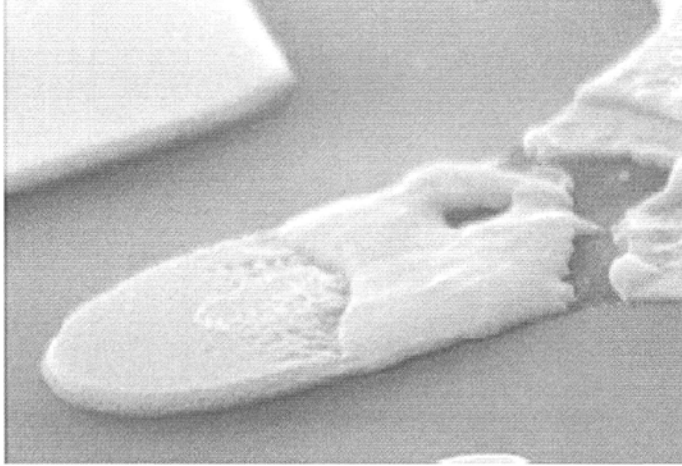


图 3.10 实验结果对照

第四章 结论

针对铜直接做牺牲层时锚区腐蚀方案做了全面的分析对比,结合后续工艺的要求从速率、横钻效应、中间产物、对光刻胶模具的影响等方面全面考察了氨水+双氧水、冰醋酸+双氧水方案、氯化高铁+盐酸方案,得出最佳的腐蚀方案。

对微米级结构的贵金属电镀方案做了系统研究,摸索了电流波形、电流密度、温度、加热方式、极板布置方式、搅拌速率和方向、添加剂和光亮剂对电镀层的形貌和力学性能的影响。

针对铜既做牺牲层又直接做种子层时的电镀起皱现象,排查各种可能因素,整理出由温度为诱因结合水解而引发起皱的逻辑链,同时提供了初始的解决方案。

对起皱初始解决方案引发的一系列副作用,通过以离子迁移率为核心的解决思路,综合分析温度、脉冲时间、电流密度之间的耦合,得出了既能抑制起皱又能解决潜在问题的全面的解决方案。

通过改进周期脉冲反向脉冲抑制残余应力、“狗骨”现象等副作用。最终得到了一系列平整、笔直、释放彻底的悬臂梁。

对起皱敏感区做出仿真,合理的验证起皱逻辑链的合理性,预测影响悬臂梁性能的敏感部位。

对悬臂梁开关的接触点的电-热性能进行仿真,找到最容易导致失效的热点位置,与实际热失效的点有较好的吻合,指导版图设计。

参考文献

- [1] Sumit Majumder¹, N. E. McGruer, George G. Adams, P. M. Zavracky, Richard H. Morrison, and Jacqueline Krim, STUDY OF CONTACTS IN AN ELECTROSTATICALLY ACTUATED MICROSWITCH, Proceedings of the IEEE.
- [2] Brian McCarthy, George G. Adams, David Potter, A Dynamic Model, Including Contact Bounce, of an Electrostatically Actuated Microswitc.
- [3] Chang-Wook Baek, Yong-Kweon Kim, Chul-Ho Cho and Yoomin Ahn Residual Stress Measurement of Micro Gold Electroplated Structure, A International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 3, No. 2, April 2002.
- [4] Eva Pellicer, Elvira Gómez, Elisa Vallés, Use of the reverse pulse plating method to improve the properties of cobalt - molybdenum electrodeposits, Surface & Coatings Technology 201 (2006) 2351 - 2357.
- [5] C.C. Nee, W. Kim, R. Weil, J. Electrochem. Soc. 135 (1988) 1100.
- [6] E. Chassaing, M.P. Roumegas, M.F. Trichet, J. Appl. Electrochem. 25(1995) 667.
- [7] A. Marlot, P. Kern, D. Landolt, Electrochim. Acta 48 (2002) 29.
- [8] T. Sato, H. Takahashi, E. Matsubara, A. Muramatsu, Mat. Tr. 43 (2002) 1525.
- [9] E.J. Podlaha, M. Matlosz, D. Landolt, J. Electrochem. Soc. 140 (1993) L149.
- [10]. S. Majumder, N.E. McGruer, P.M. Zavracky, G.G. Adams, R.H. Morrison, and J. Krim, "Contact Resistance Measurements and Modeling of an Electrostatically Actuated Microswitch," Tribology Issues and Opportunities in MEMS, Kluwer Academic Publishing, pp. 471-480.
- [11] S. Pacheco, L. P. B. Katehi, C. T. Nguyen, Design of Low Actuation Voltage RF MEMS Switch, , IEEE International Microwave Symposium

Digest, Vol. 1, June 2000, pp. 165-168.

[12] 格普塔 KC, 加格 R, 查德哈 R, 微波电路的计算机辅助设计, 冯忠华译北京:科技出版社, 1986:PP. 43 — 45 •

[13] 郭硕鸿, 电动力学, 北京:高等教育出版社, 2003:pp. 153 — 155

[14] Gabriel M. Rebeiz 等著, 黄庆安等译, RF MEMS Theory, Design, and Technology, 东南大学出版社, 江苏, 2005.

[15] Vijay K. Varadan 等著, 赵海松等译, RF MEMS And Their Applications, 电子工业出版社, 北京, 2005.

[16] Gabriel M. Rebeiz } Jeremy B. Muldavin, RF MEMS Switches and Switch Circuits, IEEE microwave magazine, December 2001.

[17] K. E. Petersen, Micromechanical Membrane Switches on Silicon, IBM J. RES. DEVELOP. VOL. 23 NO. 4 JULY 1979, pp. 376-385.

[18] 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.

[19] J. Jason Yao and M. Frank Chang, A SURFACE MICROMACHINED MINIATURE SWITCH FOR TELECOMMUNICATIONS APPLICATIONS WITH SIGNAL FREQUENCIES FROM DC UP TO 4 GHZ, The 8th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, and Euro sensors IX. Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, pp. 384-387.

[20] D. Hyman, A. Schmitz, B. Warneke, T. Y. Hsu, J. Lam, J. Brown, J. Schaffner, A. Walston, R. Y. Loo, G. L. Tangonan, M. Mehregany, and J. Lee, Surface micromachined RF MEMS switches on GaAs substrates, Int. J. RF Microwave CAE, Vol. 9, No. 4, 1999, pp. 348-361.

[21] 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.

[22] C. Chang and P. Chang, Innovative micromachined microwave switch with

very low insertion loss, *Sensors and Actuators*, Vol. 79, 2000, pp. 71-75.

[23] C. Goldsmith, J. Randall, S. Eshelman, T. H. Lin, D. Dennistor, S. Chen, and B. Norvell, Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies.

[24] 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.

[25] S.-C. Shen and M. Feng, Low actuation voltage RF MEMS switches with signal frequencies from 0.25 GHz to 40 GHz, in Proceedings, IEEE International Electronics Device Meeting, December 1999, pp. 689-692.

[26] D. Peroulis, S. Pacheco, and L. P. B. Katehi, MEMS devices for high isolation switching and tunable filtering, in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, MA, June 2000, pp. 1217-1220.

[27] 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.

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

[29] D. Hah, E. Yoon, and S. Hong, A low-voltage actuated micromachined microwave switch using torsion springs and leverage, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 48, No. 12, December 2000, pp. 2540-2546.

[30] M. Ruan, J. Shen, and C. B. Wheeler, Latching Micromagnetic Relays, *IEEE J. Microelectromech. Systems*, Vol. 10, December 2001, pp. 511-517.

[31] 孙训方等编, 材料力学, 高等教育出版社, 1994 年。

[32] F. Pan, J. Kubby, E. Peeters, et al., Squeeze film damping effect

on the dynamic response of a MEMS torsion mirror, *J. Micromech. Microeng.*, 1998, 8, pp. 200-208.

[33] M. Zahn, *Electromagnetic Field Theory: A Problem Solving* Wiley& Sons, New York, 1979. John

[34] A. K. Rastogi, Seema Hardikar, Characteristics of CPW with Thick Metal Coating [A], *Infrared and Millimeter Waves*, 2002. Conference Digest [C], Twenty Seventh International Conference on, 22-26 Sept. 2002: pp. 345-346.

[35] 格普塔 KC, 加格 R, 查德哈 R, 微波电路的计算机辅助设计, 冯忠华译, 北京: 科技出版社, 1986: pp. 43-45.

[36] 郭硕鸿, 电动力学, 北京: 高等教育出版社, 2003: pp. 153-155.

[37] Yi Huang, Calculation of Microwave Parameters of CPW with a Buffer Layer, 2002 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings: pp. 875-878.

[38] Haeyang Chung, William S.C. Chang, Modeling and Optimization Traveling-Wave LiNbO₃ Interferometric Modulators, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 27(3), March 1991: pp. 608-617.

[39] Chang Liu, Tom Tsao, Yu-Chong Tai and Chih-Ming Ho, Surface Micromachined Magnetic Actuators, *IEEE*, 1994, pp. 57-62.

[40] Raanan A. Miller, Yu-Chong Tai, et al An Electromagnetic MEMS 2 x 2 Fiber Optic Bypass Switch, 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators: pp. 89-92.

[41] 李超波, 焦斌斌, 陈大鹏等. 基于 MEMS 技术的红外成像焦平面阵列[[J]]. 半导体学报, 2006, 第 27 卷, 第 1 期: pp. 150-155.

[42] 王成伟, 闫桂珍, 朱泳, ICP 硅深槽刻蚀中的线宽控制问题研究, *微纳电子技术*, 2003 } 7/8: pp. 104-107.

[43] 王阳元 武国英 郝一龙等, 硅基 MEMS 加工技术及其标准工艺研究, *电子学报*, 2002 Vol. 30 No. 11, pp. 1577-1584.

[44] GUCKEL H, BURNS D W, Fabrication of micromechanical devices from polysilicon films with smooth surfaces, *Sensors and Actuators*, 1989, 20:

pp. 117-122.

[45] ALLEY R L, MAI P, KOMVOPULOS K, et al, Surface roughness modification of interfacial contacts in polysilicon microstructures [A], Transducers 93 [C], 1993, pp. 288-291.

[46] 朱自强, 超临界流体技术原理和应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

[47] (法) M. 埃尔温斯波克等, 硅微机械加工技术, 化学工业出版社, 2007.

[48] 阎立峰, 陈文明, 超临界流体((SCF)技术进展. 化学通报, 1998 年第 4 期.

[49] Robert W. Jackson, Consideration in the Use of Coplanar Waveguide for Millimeter-Wave Integrated Circuits, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 34, Dec. 1986, pp. 1450-1456.

[50] A. Gopinath, Losses in Coplanar Waveguides, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 30, July. 1982, pp. 1101 — 1104.

第二部分: MEMS 微推进器的加工

第一章 引言

1.1 微推进器研究背景

随着科学的进步, MEMS 技术也得到飞速发展, 已经深入到社会的领域, 其中最引人注目的就是在现代卫星技术中的广泛应用。MEMS 即微机电系统, 是利用制造微芯片的工艺技术制造而成的微小型机械装置或部件。20 世纪 80 年代以来, 微米、纳米技术发展迅速, 星上探测器、数据处理和传输设备日趋小型化, 出现了质量 100kg~1000 kg 的小卫星、10 kg~100 kg 的微卫星, 甚至更轻的纳卫星、皮卫星和飞卫星。微小卫星具有体积小、质量轻、发射灵活、反应快速、研制周期短, 以及功能密度比和性价比高等优点, 而且多以星座形式部署, 生存能力强、侦察监视范围大、重访周期短, 可满足应付突发事件和局部战争的需要, 军事上有较大的应用潜力。虽然单颗微小卫星的功能无法与大型卫星相比, 但构成星座和网络系统的微小卫星, 在通信、信号侦察、照相侦察、导弹预警和气象观测等方面能发挥独特的作用 [1-4]

在以前, 为了满足卫星小型化的要求和精确控制航天器的轨道调整、引力补偿、位置保持、轨道机动及姿态控制曾经发展了几种微推进系统, 如:微电推进技术、微冷气推进技术、微激光等离子体推进技术, 它们的特点不在于本身尺寸的大小, 而在于它们能提供 $10^{-6}\text{N}\cdot\text{s} \sim 10\text{N}\cdot\text{s}$ 的推力脉冲, 可以为航天器提供精确的控制。虽然它们都有非常突出的优点, 但由于它们的体积和重量始终降不下来, 因此限制了它们在微卫星上的使用。当微卫星的质量小于 1kg 时, 所要求的最小推力脉冲很小:在 $10^{-4}\text{N}\sim 10^{-6}\text{N}$ 之间, 而且推力系统的体积和重量也要求大大降低。传统的推进系统不易在提供这么小脉冲的同时也满足体积和重量的要求。为了适应这种变化, 在传统的化学推进系统的基础上, 许多国家发展了基于 MEMS 技术的微化学推进系统。它们不但在推力上满足要求, 而且由于大范围的采用了硅材料和基于硅的微加工技术, 在体积和重量上也可以满足整体要求 [5. 6]。

1.2 国内外微推进器的研究现状

1.2.1 固体升华式推进器

固体升华式微推进器是基于固体升华分解的化学推进系统。其工作方式是:固体推进剂升华分解为相对分子量较小的蒸汽, 当具有足够压力的蒸汽通过蒸汽

管路从一定尺寸的喷嘴喷出时,产生一定大小的推力。固体推进剂的贮存时间可达几年。根据管路结构,固体升华式推进器可分为有阀门和无阀门两种。

升华式推进器的推进剂通常为碳酸盐或氨基甲酸盐,它们能升华分解为 NH_3 , CO_2 , 和 H_2O 。因为推进剂贮存在低压下,且推进系统不需要冷气推进的高压管路和阀门(对于无阀门系统),所以整个系统的质量很小,可靠性也大为提高。另外,其整体结构较简单,推进剂贮存密度高,也可大大减小系统的尺寸。

在有阀门固体升华式推进器中,固体推进剂贮存在一个固气两相平衡的封闭轻质药室内,蒸汽管路与喷嘴间有一个控制推力的阀门,如图 1.1 所示。打开阀门蒸汽从喷嘴喷出,产生推力,固体升华产生的压力很低。升华所需要的热量由推进剂分解释放的能量提供,另外还需要利用外部加热器和航天器本身的结构,对升华的速度进行热量控制。在一个简化推进系统内,推进器的理论比冲可达 $784 \text{ N} \cdot \text{S} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 833 \text{ N} \cdot \text{S} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。推力由蒸汽压力决定,故推力在一个推力脉冲中的衰减取决于固体升华为蒸汽的速度。这种有阀门推力系统提供的推力和比冲较低,但在微阀门和加热器的控制下,系统的反应时间很短。

一种典型的无阀门固体升华式推进器由药室和与之直接相连的喷嘴组成,如图 1.2 所示。不工作时,推进剂降温,产生的蒸汽压力可忽略不计。工作时,太阳光或外部加热源升华固体,产生蒸汽压力,提供推力。推力为 $10^{-3} \text{ N} \sim 10^{-1} \text{ N}$,比冲为 $490 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 686 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,两者都较低,且系统响应时间也长。加热推进剂所需的能量为 $2 \text{ kW} \cdot \text{N}^{-1} \sim 3 \text{ kW} \cdot \text{N}^{-1}$ 。通过加热喷嘴处的蒸汽(电阻加热式推进器),可提高蒸汽的压力,进而提高推进器的性能。

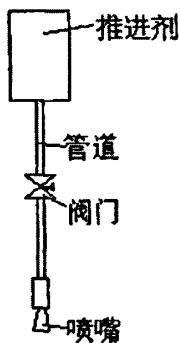


图 1.1 有阀门

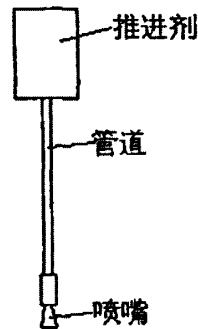


图 1.2 无阀门

升华式推进器的主要缺点是蒸汽倾向于凝结、固化在推进剂管路中或喷嘴处

(特别是气体产物中的碳化物)。这会影响推进器的性能和使用时间[7]。

1.2.2 液体微化学推进器

液体微化学推进器是基于电加热的化学推进系统，其工作原理是利用电能加热工质，使之汽化分解，经喷管膨胀后加速喷出产生推力，工作方式与化学推进基本相同。根据工质的加热方式，电热式推进可分为电弧式和电阻式两种[8, 9]。

基于 MEMS 技术，美国的 E. V. Mulerjee 等初步研制成功了基于硅芯片的电阻式电热推进器。以往研制的高压气体推进器，需要贮箱和供应管路，质量很大。基于 MEMS 技术的电阻式电热推进器则无需高压贮存设备，减小了整个推进系统的质量，增加了卫星的有效载荷。

该装置通过电阻加热微蒸发室(由微加工制造)内的流体，产生蒸汽，当蒸汽喷出喷管时产生推力。它有两种不同的设计：一种是喷管在侧面，如图 1.3 所示；另一种是喷管在顶部，如图 1.4 所示。图 1.3 中，流体通过腐蚀生成的流体入口进入蒸发室。因为硅是优良热导体，所以加热器置于推进器的表面。在不对称(侧喷管)设计中，用玻璃密封蒸发室的一侧。玻璃为不良热导体，它可降低热损失，提高加热器的效率，同时也可作为观察流体流动和微蒸发室中蒸发状况的窗口。由于热仅由一侧提供，燃料在微蒸发室中的蒸发有很长的预加热过程。即使如此，散布在硅片上的加热器也有足够的热接触和热传导率来有效地加热微蒸发室。这种喷管布局可以实现所输出特征脉冲的最大化和优化。而在图 1.4 中，基片的厚度和腐蚀技术限制了喷管的尺寸，尤其是它的长度。通过各向异性腐蚀，在基片背面形成流体入口，在另一侧形成喷管。结构中的上下硅片是熔结成一体的。微蒸发室两侧的加热器同时加热，可提高加热效率。

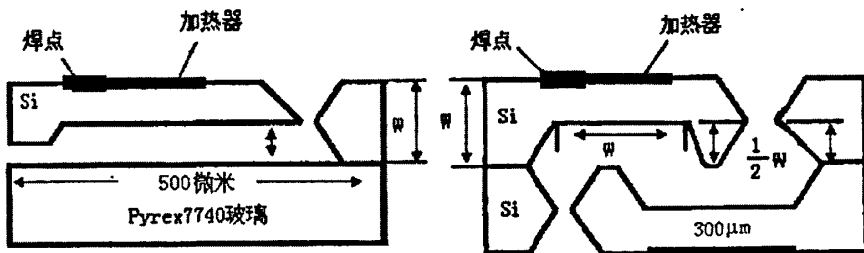


图 1.3 侧面喷管推进器示意图 图 1.4 顶端喷管推进器示意图

为获得最优化的线性推力，喷管、蒸发室和加热器的尺寸与参数都至关重要。

因此需要建立一个模型,以精确估计这些参数的影响,并据此优化发动机的设计。模型以水为推进剂,在发动机参数确定的情况下,当输入功率为 10.8W 时,最大的推力输出为 0.46mN。由于水的蒸发热和比热容较大,此结果显得相对保守。如果采用沸点、比热容和蒸发热更低的流体,那么蒸发将更加容易,也就是说,能够以更少的能量获得更好的性能。这种微推进器仅是微推进系统的一个元件,设计相对简单,便于与其它 MEMS 元件集成,进一步使卫星的推进系统的微型化 [10]。

1.2.3 固体微化学推进器

固体微化学推进器是基于 MEMS 技术的固体推进剂微推进器,适用于空间有限的微型卫星的精确定向和高度控制。固体推进剂贮存在常压贮箱中,这种贮箱是微加工制作的。利用 MEMS 技术可以在同一块芯片上集成多个独立可寻址的微推进器,它们能产生 $10^{-6}\text{N}\cdot\text{s} \sim 10^{-4}\text{N}\cdot\text{s}$ 的推力脉冲,可满足纳米卫星的轨道控制。如果将推进器可提供的最小脉冲作为一个“脉冲节”,那么这些推进器将能以“脉冲节”为单位,以一定的逻辑功能产生推力。由于“节”很小,推进器可以对小卫星的姿态连续地进行精确微调。此即所谓“数字推进” [11·12·13]。

根据这个概念,美国和法国的科学家在制造各自微化学推进器的原型时,都采用了将推进器与辅助结构完全集成的方法。这样就可以剔除贮箱、供应管路和微阀,从而避免了泄漏,增加了有效载荷并提高了可靠性。

美国 David H. Lewi: 等制造了一个由玻璃和硅片组成的三明治结构推进系统,如图 1.5 所示。该系统的中间为药室阵列,药室的一端用易裂盖片密封。药室中装填易燃的推进剂,也可装填气态、液态或固态的惰性物质。推进剂加热后,药室内压力升高。当压力超过盖片的破裂阈值时,流体排出,产生一个推力脉冲。每个药室可提供一个“脉冲节”,脉冲的大小取决于药室的大小和推进剂的类型。与传统的可重复使用的推进器和燃料箱不同,这种推进器是一次性的。

该推进器的底层点火电路使用了标准的 CMOS 制造工艺,寻址和控制电路可以很容易地集成到设计中。以斯蒂芬酸铅作为推进剂,可以产生 $10^{-4}\text{N}\cdot\text{s}$ 的推力脉冲,功率为 100 W,持续时间为 1ms。经计算,只有大约 10% 的推进剂产生了推力。通过改进药剂的燃烧和改变推器的参数,可提高推进器的效率。

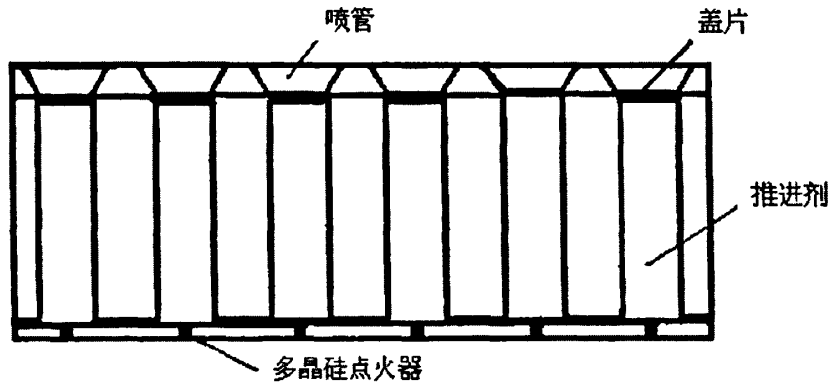


图 1.5 I 微化学推进器

法国科学家研制的推进器模型如图 1.6 所示。所用的推进剂为聚叠氮缩水甘油醚(GAP)。当加热到 300℃时，推进剂点火产生微推力。

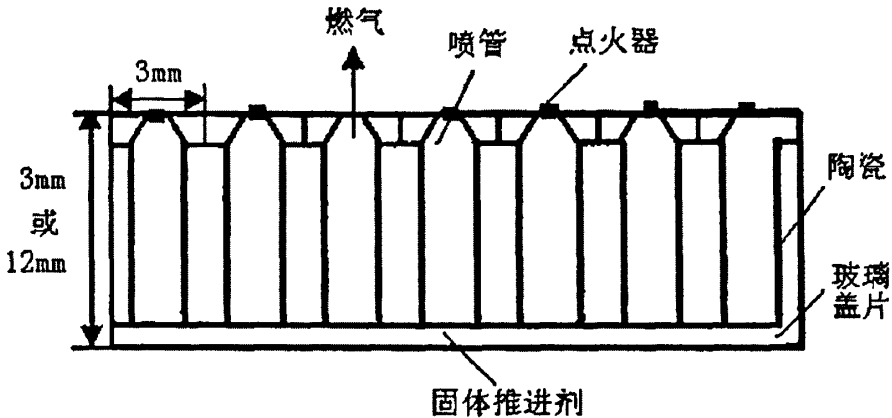


图 1.6 法国研制的微化学推进器

这种微推进器由三部分组成：

(1) 微加工制成的多晶硅点火器阵列多晶硅电阻被沉积在一层很薄的绝缘体膜上。多晶硅点火器由许多加热器组成，其上面附有喷管；

(2) 推进剂贮箱阵列用低热导率的陶瓷作贮箱材料，可使整个系统热损失达到最小，优化产生的推力；

(3) 薄玻璃盖片用来密封贮箱的另一端，结构的顶端可附加一个喷管阵列。

用 MEMS 技术制造固体微推进器，可以大大简化装配过程。输出推力的大小取决于推进剂的性能和推进器的尺寸参数。通过采用不同的工艺条件，推进器可以产生从数微牛到 150mN 的推力 [14. 15]。

1.3 微推进器性能比较

从可靠性、比冲、寿命、效率、成本和工作范围等方面，对微激光等离子体推进器、微化学推进器、微冷气推进器、电阻式电热推进器和离子推进器进行了比较，结果如表 1. 3. 1 所示。

表 1. 3. 1 各种微推进器的比较

类型	有效工 作周期	制造成 本	推进 剂	效率	可靠性	作用 时间	比冲/ 秒
			成本				
微激光	长	低	很低	高	很高	很长	1000
微化学	短	低	一般	低	低	短	200
微冷气	—	低	高	低	高	短	100
电热式	—	低	一般	低	一般	一般	50
离子	一般	高	低	高	低	一般	5000

由表 1. 3. 1 可知，不同推进器各有其优点，但也存在一定的问题：

(1) 当有喷管微推进器(微激光等离子体推进器除外)的喷管特征尺寸很小时，流体流动将不再符合粘滞流体流动时的性质，这时必须考虑微流体流动时所具有的特殊性质。当喷管达到微米级时，边界层的影响将起支配作用，而这将增加推力的不可预见性。特别是，当分子平均自由程不再远远小于喷管直径时，流体动力学所依赖的持续性假设将不复存在；

(2) 升华式推进器整体结构较简单，推进剂贮存密度高，这将大大减小系统的尺寸。但是它也有性能差和工作周期短的缺点，而且升华产生的气体产物容易凝结在蒸汽管路中。除非蒸汽管路保持足够高的温度，否则会导致蒸汽作功效率的降低；

(3) 电推进技术对能量要求较高，技术较复杂，需要许多关键的组件，不适合低成本系统。是它与微激光等离子体推进技术一样，具有寿命长、可靠性高和工作范围大的优点，可是用于大型航天器的高精度姿态控制(平衡太阳风、大气曳力等)和变轨运动。采用了 MEMS 技术的电阻式电热微化学推进技术，可以将体积和质量控制在很小的范围内，从而扩大了电推进技术的应用范围；