

图 3.27 玻璃毛刺导致的键合裂纹

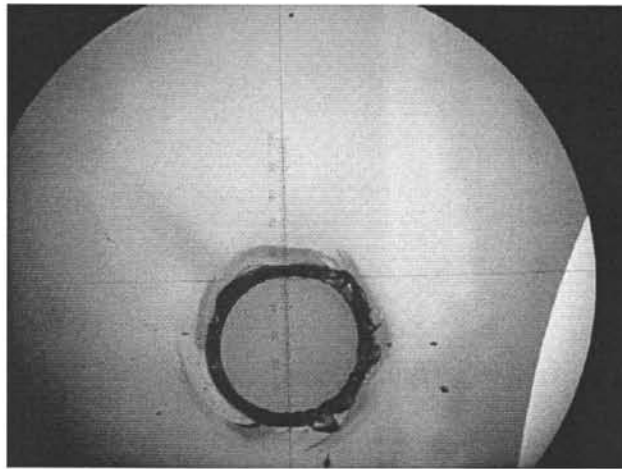


图 3.28 调整参数并抛光后得到的形貌良好的孔

3.6 流道封闭超厚带图形玻璃-硅-硅-玻璃的四层键合

3.6.1 阳极键合的机理

阳极键合过程实质是固体电化学反应过程，其键合过程如图 3.29 所示，在键合温度条件下，玻璃中的碱金属离子受热离解，通电后施加于玻璃与阳极硅之间的电场使玻璃中的碱金属离子(主要是 Na^+)从阳极附近迅速向阴极移动，并在阴极表面析出，在玻璃与阳极界面附近形成约几微米厚的极化碱金属离子耗尽层，负电荷在该耗尽层内积累；同时在阳极表面产生相应的镜像电荷，在玻璃耗尽层中产生高强电场，玻璃厚度方向上的电压降主要在耗尽层区域，非耗尽层区域电压降较小，耗尽层附近电场高达 10^6V/cm [2, 3]，电场在阳极硅和玻璃界面产生了巨大的静电场吸引力，耗尽层中氧负离子向阳极硅界面移动，使

玻璃的耗尽层产生弹性变形及黏性流动最终与硅表面紧密接触。图 3.29(b) 为玻璃与硅通过静电力紧密接触;图 3.29(b)为由于加热作用, 在玻璃中产生了离子电流, 使玻璃产生了耗尽层, 氧阴离子受静电力作用迁向界面并与硅表面反应, 形成 Si—O 键;图 3.29(c) 为当耗尽层大到一定程度, 反应停止;图 3.29(d) 为阳极连接中电流过程, 表明了一些典型的数值, 过程 (a) - (c) 的电流在 x 轴上标出。在硅/玻璃界面处发生了不可逆的氧化反应, 连接界面前沿的 Si^+ 、 O^{2-} 离子相键合形成 $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ 结构, 并与玻璃耗尽层的氧负离子及网络基体构成硅氧复合氧化物, 从而完成瞬间键合。按照 kerkendal 效应, 固相反应过程主要受界面两侧元素浓度梯度影响, 且温度较高时反应速率较大, 此时垂直于界面的静电场吸引力成为促进固相反应和提高键合质量的主要因素[7, 8]。而随着键合时间延长, 玻璃的耗尽层厚度增加, 电流迅速减少, 最后稳定在一很小数值上。图 3.30 所示的过渡层的形成就充分说明在电场力作用下, 玻璃中的氧负离子向界面迁移, 使得玻璃界面发生了弹性变形和黏性流动与硅界面紧密接触, 最后发生氧化反应生成硅氧复合化合物, 形成永久键合。

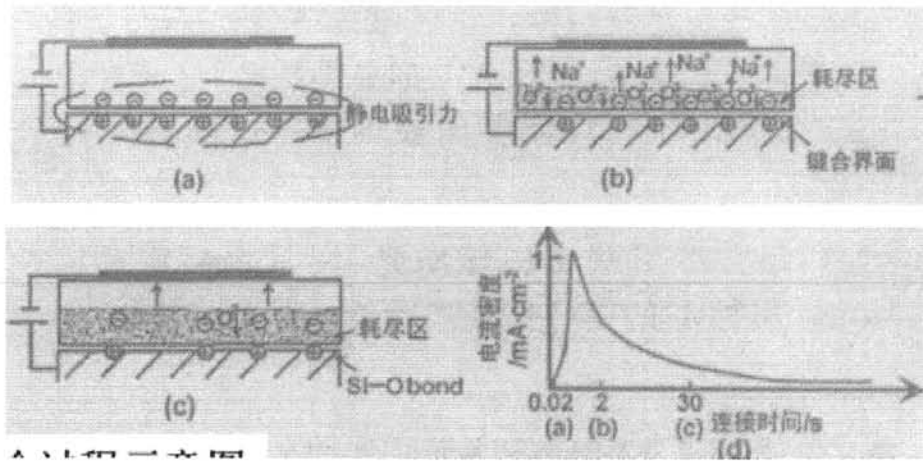


图 3.30 阳极键合过程示意图

3.6.2 第一块冒板键合过程

散热流道第一块冒板的键合采用 EVG 带有双面对准功能的键合机，玻璃上的标记来自于溅射燃烧腔图形后再腐蚀 Au、Ti 层，用光刻胶对对准标记和引导槽做了保护，腐蚀结束后再做键合前的清洗。

冒板键合过程简述如下：

用标准的 RCA 溶液清洗，清洗温度为 60~80 °C，RCA 溶液配比为 (NH₄OH:H₂O₂:H₂O=0.25:1:5)，最后用去离子水清洗并用氮气吹干。将 HOYA SD2 玻璃硅片叠放并夹持于专用键合试验炉平台的正负电极之间，硅片接正极，玻璃接负极(图 1)用类似光刻时的双面对准系统如图 3.31，利用清洗前预留的溅射标记将冒板小孔与流道小孔严格对准。由于玻璃、硅片都超厚，为增加可形成耗尽层的离子数目，增加玻璃的电导率及黏滞性流动，温度为热匹配区(图 3.32 为 HOYA SD2 玻璃与单晶硅片的热膨胀系数曲线)的上限 400 °C，最高直流电压为 1000V，压力为 1MPa，时间为 6min(进入键合腔包括抽真空的时间为 15min)。加热炉升温速度为 10°C/min，试件键合后随炉冷却，冷速为 4°C/min。

从键合系统记录的电压、电流、电荷、温度、压力曲线看(图 3.32)，电压分三次加载到芯片，形成耗尽层的初始电流建立稳定，并且与电压有很好的相应，键合后期电流减小，共价键生成，符合阳极键合的基本规律。最终得到了表面暗灰的良好键合表面，如图 3.33。微观上难度最大的燃料加注流道与玻璃键合牢靠，没有坍塌，如图 3.34。

值得注意的是又于冒板和硅片键合后的硅片都很大程度超过了标准键合厚度参数，采用了大电流、大电压、大压力、高温，HOYA 玻璃表面析出钠络合物明显，形成斑点如图 3.35，由于燃烧腔键合片上有大通孔，故在底座上也留下了对应斑点，如图 3.36。

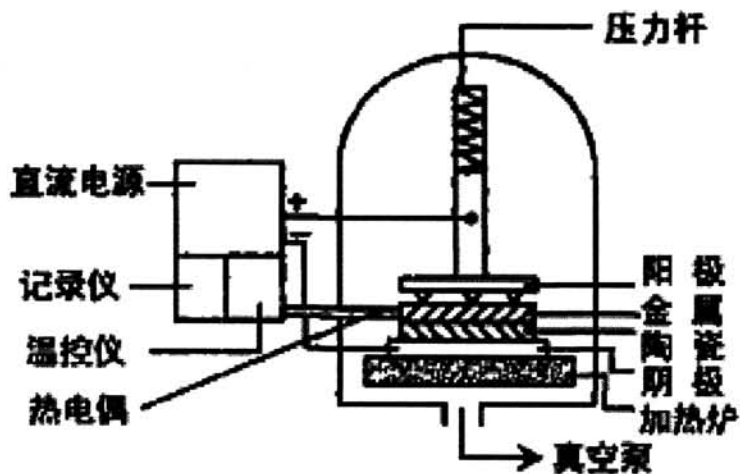


图 3.31 阳极键合系统简图

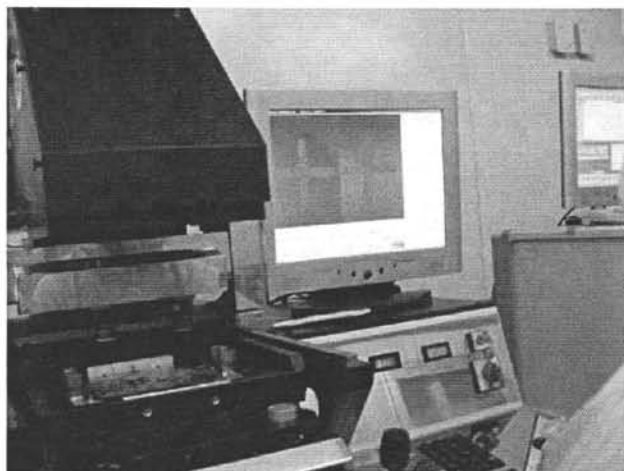


图 3.32 键合对准

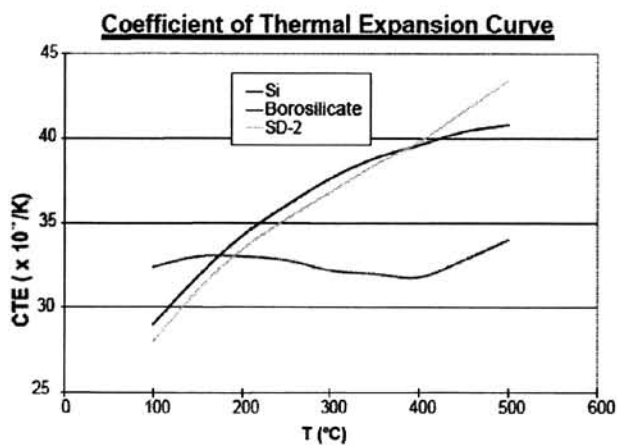


图 3.33 HOYA SD2 玻璃与硅片的热匹配曲线

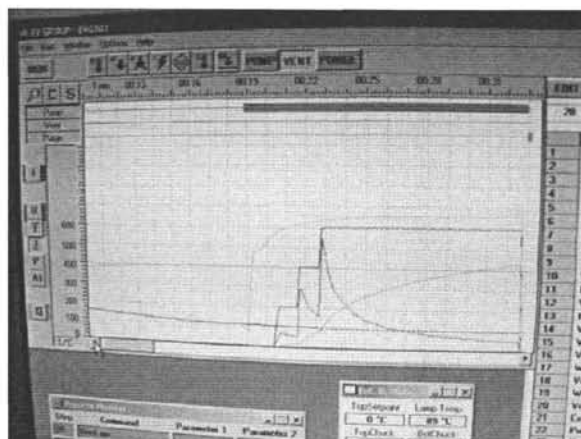


图 3.34 键合过程中各参数跟踪曲线



图 3.35 键合表面暗灰色，键合良好

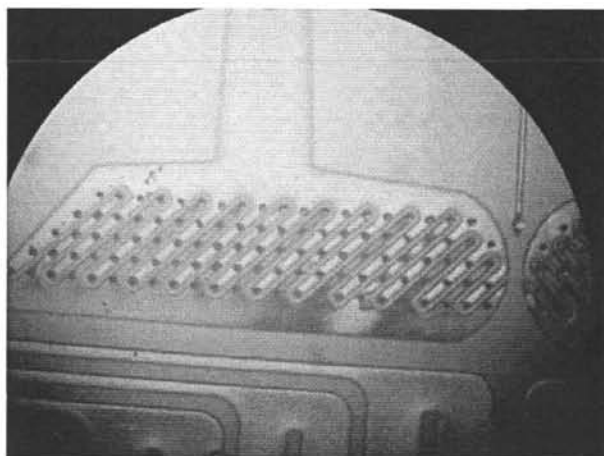


图 3.36 最小尺寸的燃料隔离壁也牢靠键合



图 3.37 极限参数下玻璃表面析出的钠络合物



图 3.38 析出物通过燃料孔、测压孔沉积在底座上

3.6.3 第二块冒板键合过程

3.6.3.1 键合难点

如果沿用第一片流道冒板的键合方案，会有以下问题：

1) 阳极键合是玻璃与阴极相连，硅片接阳极。在高温高电压下，玻璃里面的 Na_2O 电离成 Na^+ 和 O_2^- ，在外加电场作用下 Na^+ 向阴极漂移，从而在玻璃-硅的界面处形成带负电荷的耗尽层，与带正电的硅片形成很强的静电引力[8, 9]。但玻璃-硅-玻璃键合结构，其上电极与下电极接触的都是玻璃，当第二片带通孔的玻璃片在上面接触阴极时，对于原来第一次键合的片来说就是施加反向电压。采用同样工艺程序和工艺参数时，反向电压会破坏第一次键合时玻璃-硅界面处建立起来的电荷分布，使剩余 O_2^- 离子在高压下又被拉回到玻璃里面，引起玻璃里面的电荷重分布，从截面处肉眼可看到从玻璃-硅界面上有向玻璃里面延伸、

破坏局部玻璃结构的痕迹，表面上看就是麻点密布，结构不牢固。

2) 三层键合时，如果前期第一次键合与磨抛处理不当，会累积很多的应力引起整个结构的变形与翘曲，在二次键合时发生裂片。

3.4.3.2 第二块冒板键合工艺

问题的核心就在于加电机构，既要保证第一块玻璃的耗尽电荷区不被破坏，又要保证第二块玻璃的电场稳定建立。我们采取了两种措施：

1) 制作一个小巧可靠的电极与夹具 chuck 上的加电点 space 相连，搭结在硅片上如图 3.39，避免与上电极相连。这样硅片的两面都与玻璃进行阳极键合，不会打乱原有建立的内部电荷分布和键合效果，从而形成牢固键合界面。

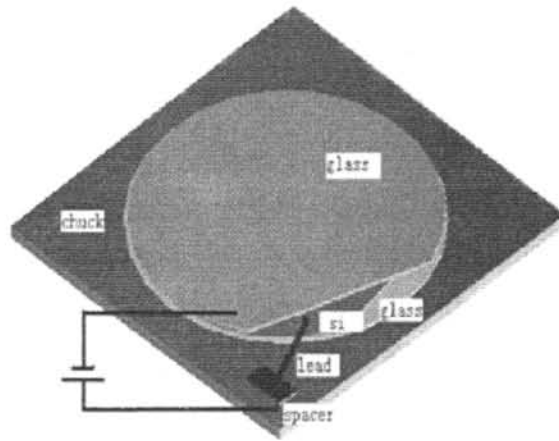


图 3.39 增加给硅片加电附件

2) 底座上加垫一块石墨板，阳极板也用石墨电极，这对上几步积累的应力是很好的缓冲，保证不裂片。

最终应用与第一块冒板相似的参数，得到了牢靠的键合结果，是也由于钠析出严重而有表面斑点如图 3.40，但内部完好。

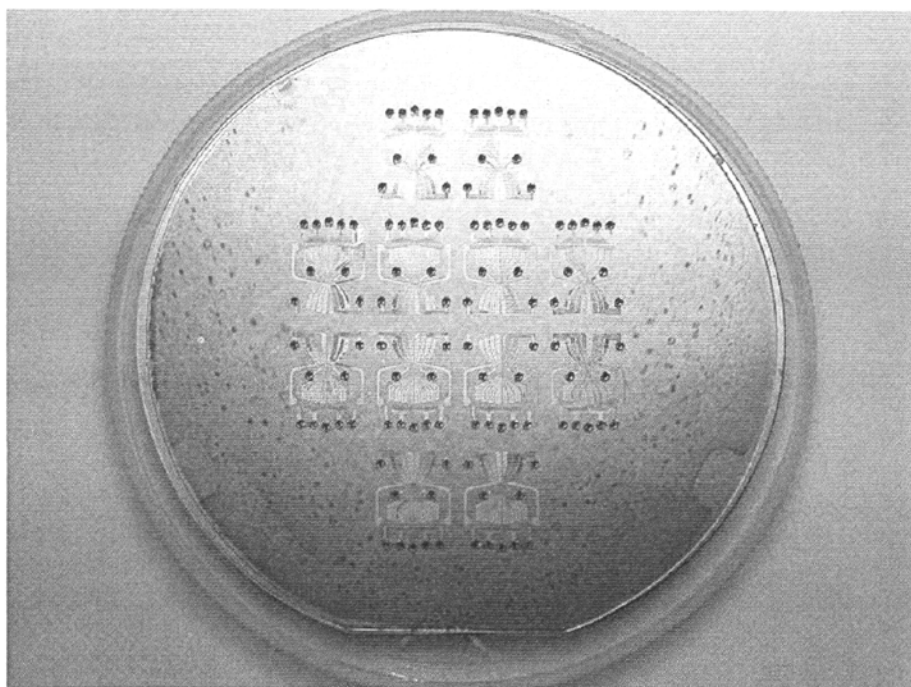


图 3.40 极限条件下第二块冒板表面的析出物

3.7 保护性划片

3.7.1 划片基本过程及设备特点：

如图 3.41 所示包括真空吸附式装片、划片刀位置校准、树脂刀高速切割、清洗、吹干、卸片等步骤。图 3.42 所示为划片机组要部位结构，尤其要注意吸附托盘上的结构。

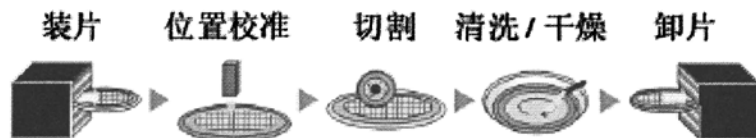


图 3.41 划片流程

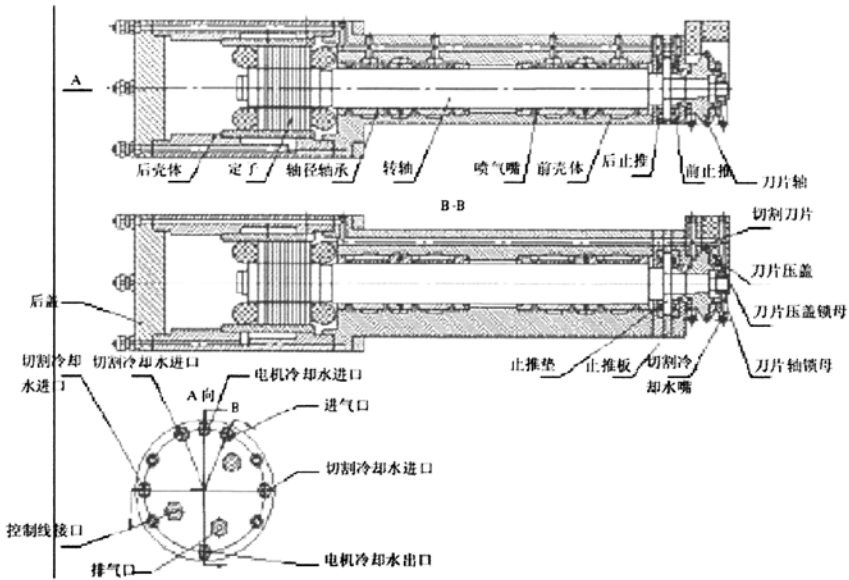


图 3.42 划片机组要部位结构，尤其要注意吸附托盘上的结构

3.7.2 划片难点：

对于此硅-玻璃-玻璃-硅键合片的挑战在于：

- 1) 整体厚度很厚达 3mm，并且材料不单一，一刀很难划透、并且保持界面不受损伤。
- 2) 整个圆片上有许多燃料加注孔、测压孔、冷却剂孔形成的通孔，无法直接吸真空固定。
- 3) 不是所有 cell 的结构都一致，有喷射口敞开的也有喷射口封闭的，导致在同一刀上有不同的深度，这就需要不同深度划片。
- 4) 划片时冷却液、划片废渣可能会进入流道必须保护。

3.7.3 问题解决：

- 1) 采用双面对准划片的工艺。
- 2) 加蓝膜阻挡通孔，保证吸真空顺利如图 3.43。
- 3) 对喷射口敞开结构，浅划 1.1mm，保护冷却液不会从喷口污染芯片。
- 4) 对每一次划片步骤，都用蓝膜保护非划片部分，防止冷却液从通孔堵死流道微孔如图 3.44。

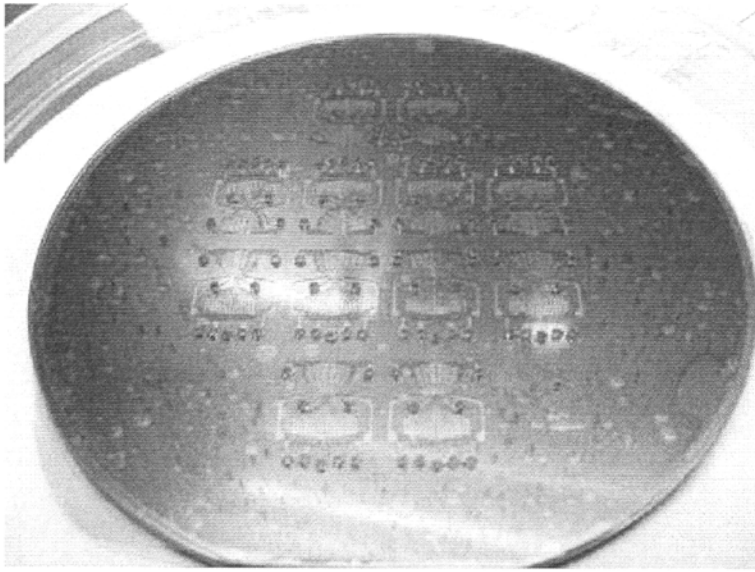


图 3.43 与底座接触的通孔用蓝膜保护

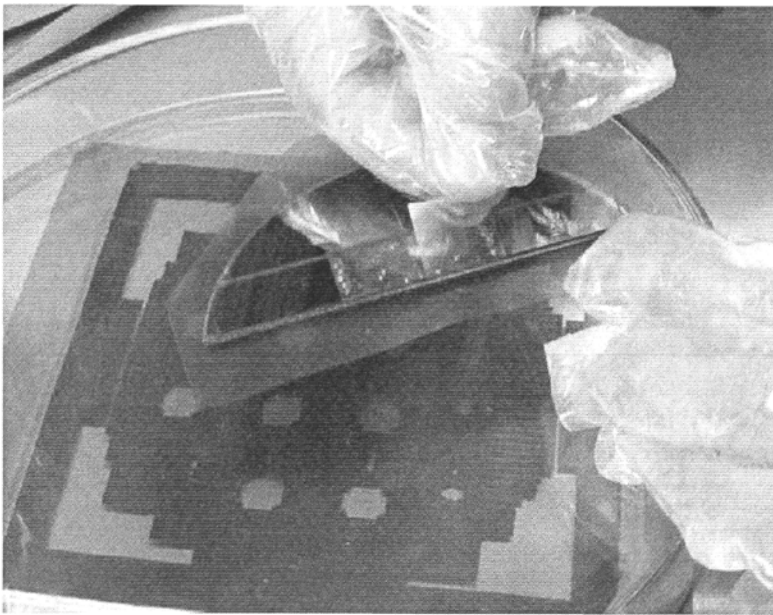


图 3.44 正面每个 cell 均粘蓝膜保护流道不受阻

最终，得到了横断面平整（如图 3.45），燃烧腔喷口形貌完好（图 3.46）的裂片结果，燃料加注孔、测压孔、冷却剂孔均用蓝膜保护（图 3.47），且燃料加注微孔未受切割液堵塞（图 3.48）。

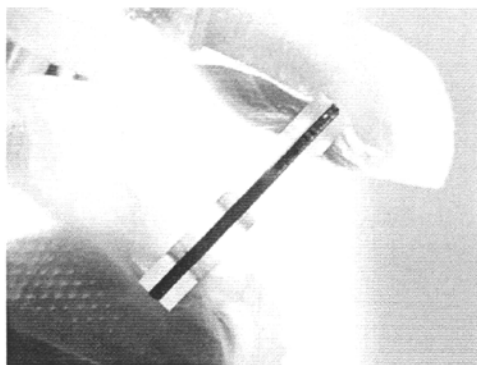


图 3.45 双面对准划片后，切面光滑

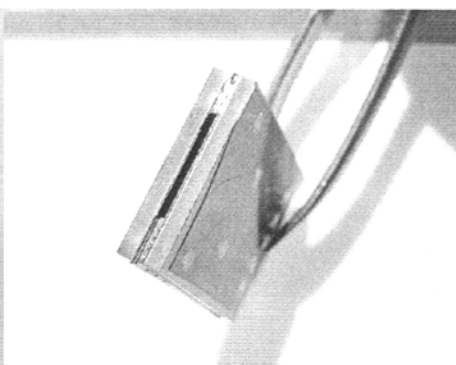


图 3.46 喷口形貌完好

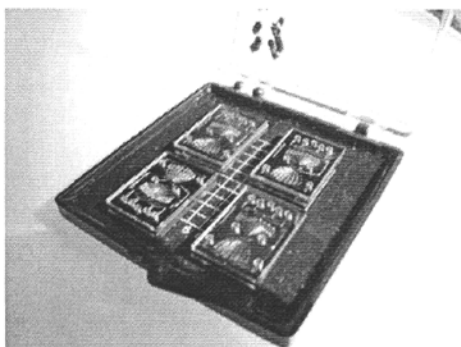


图 3.47 燃料加注孔、测压孔、冷却剂孔均用蓝膜保护

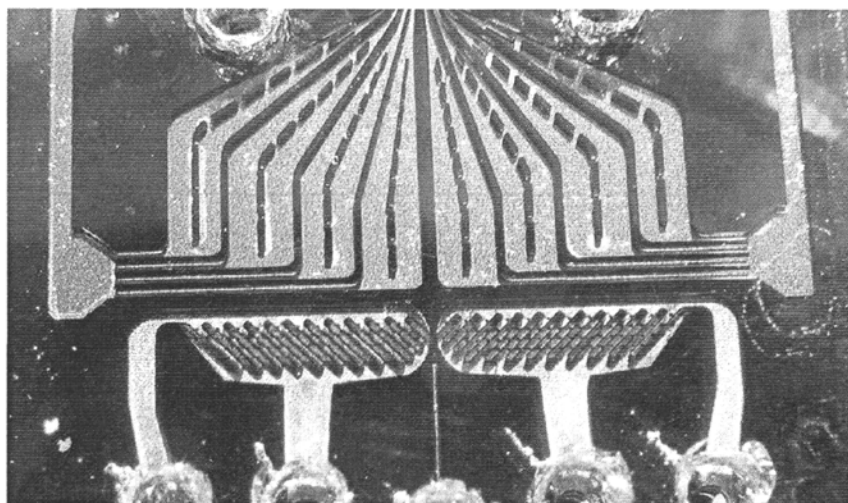


图 3.48 氧化剂和燃料加注孔未受堵塞

3.8 微推进器与 KOVA 管的封装及与测试台的匹配

3.8.1 推进器封装方案

整体方案如图 3.49，上方管路连接推进器芯片和外围的封装结构；下方留的螺纹孔是为向推进器提供燃料和冷却液提供的接口。虽然推进器的芯片本身很小，但是封装以后，尤其是连接了供气管路和冷却液管路之后，占的空间变大，结构也变得相当的复杂。

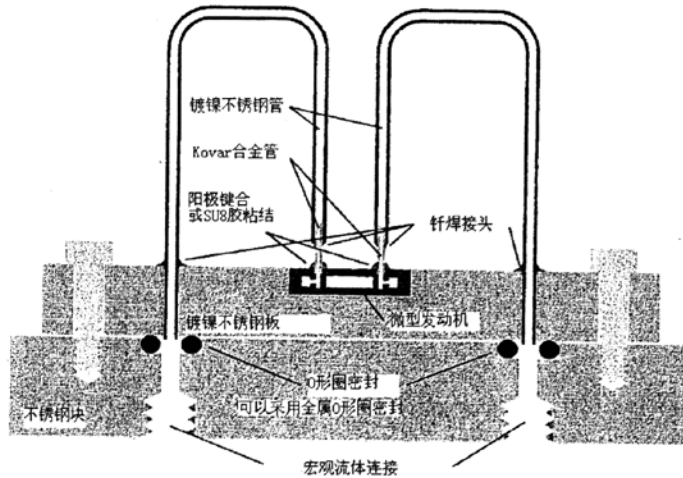


图 3.49 封装方案

3.8.2 推进器封装难点：

1) 推进器与 KOVAR 管的连接

推进器玻璃罩板上的燃料加注孔、测压孔的直径仅有 0.9mm，为使燃料和冷却液能准确注入，必须使用直接与之匹配的细管，同时还对细管本身和它们的衔接部位提出了耐压至少 13 个大气压的要求，并且，粘接管子与芯片时极易堵塞管子下方仅 100 微米厚度的流道入口。

通过反复试验，我们选择了 proxy putty 塑钢土做为密封介质，由于这种胶是一种双组分胶，初始混合时呈橡皮泥状，可塑性很好，便于对 KOVAR 管的支撑定型；不加热时流道性不明显，不易堵塞流道。

利用这些优点，采用了常温接管管路与芯片，静置 30min，待水分部分挥发后，加热软化，增加与缝隙和表面的填充性和附着力，如此反复在 70 摄氏度烘箱中作 3 个温度循环，密封牢靠，表面也会很坚硬（如图 3.50），同时起到了结构胶的作用，可以防止不锈钢盖板对管路引入的外力导致管子脱落（如图 3.51）。

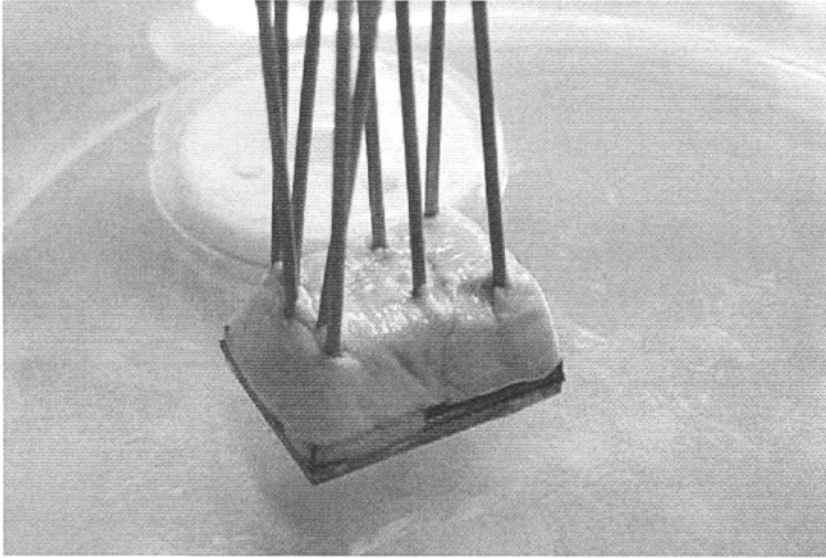


图 3.50 兼做密封和结构的塑钢土连接 KOVAR 管

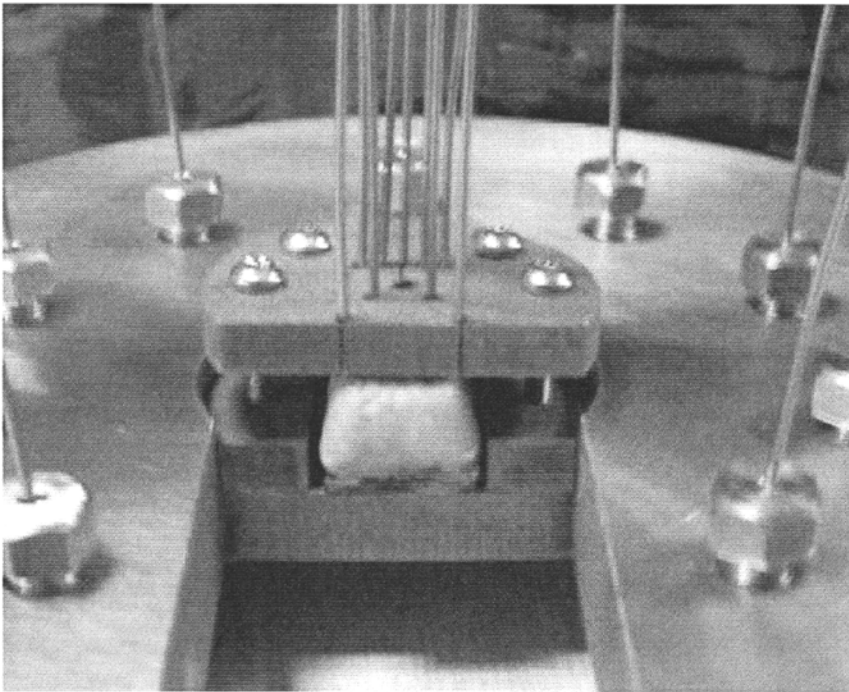


图 3.51 密封介质同时支撑顶盖

2) 由于 KOVAR 管比较昂贵, 因此对外围的 KOVAR 管重复利用, 这就涉及到了推进器上一次性封装的 KOVAR 管与底座管子的衔接方案, 同样的耐压和可拆卸连接是难点。

尝试了两种方案：

1. 聚四氟管做连接支撑，热缩管密封，如图 3.52，但这种方案在 3 个大气压就很不稳定，个别管路爆裂。

2. 采用金属连接，使用一种双通连接器，其中包括退火后的不锈钢卡塞做为密封件如图 3.53，保证了至少 13 个大气压的耐压，而且可拆卸操作。但是标准双通没有 0.9mm 直接，故先用电火花线切割切出 2cm 长度的不锈钢管作为转接管，考虑到 KOVAR 管是铁镍钴合金，对银钎焊焊料有很好的附着力，并且钎焊的焊料在高温下可以深入不锈钢管 0.5-1mm，对耐压密封很合适，骨这段转接管与 KOVAR 管采用钎焊连接如图 3.54，最终的连接效果如图 3.55。

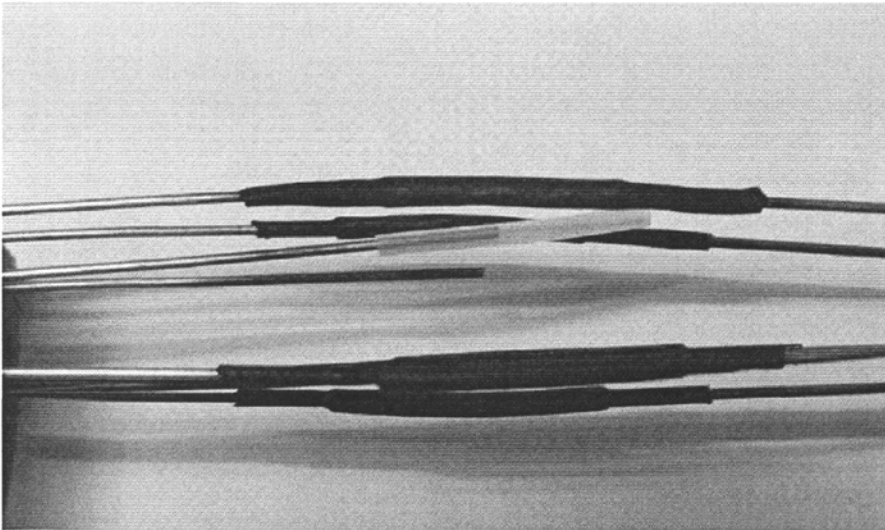


图 3.52 聚四氟管+热缩管连接方案

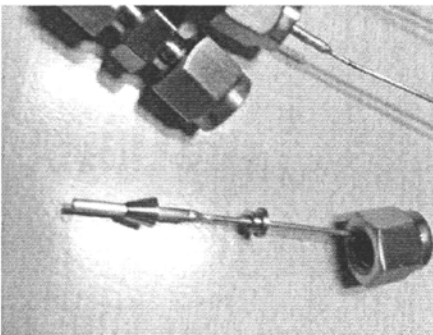


图 3.53 退火后的不锈钢密封卡件



图 3.54 银钎焊不锈钢与 KOVAR 管

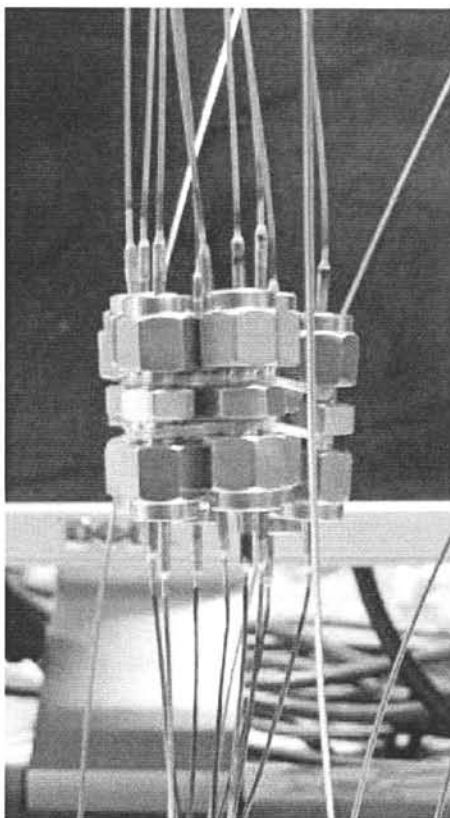


图 3.55 整体的可拆卸连接图

3.9 测试平台的搭建与部分测试结果

3.9.1 冷流测试平台框架

冷流实验台含 4 个流体流路，分别是氧气流路、甲烷流路、冷却剂的流入流路和流出流路，如图 3.56 所示。甲烷和氧气在进入推力器之前分别变为 2 个分支，以分别进入 2 个喷注器中。冷却剂为乙醇或去离子水，冷却剂贮箱需设计增压装置。冷却剂在进入推力器之前也变成 2 个分支，流出推力器之后，2 个分支重新汇合成 1 个流路。这些流路的入口和出口与 MEMS 双组元微推力器内部流道相互对应。冷流实验台和封装好的微推力器的接口统一使用 1cm 直接锥螺纹卡头。

气体推进剂的入口压力能够调整，调整范围是 2.0bar~15.0bar，最高压力能够达到并维持在 15.0bar，误差 ± 0.5 bar。两种推进剂的总流量为 0.1g/s~5.0g/s。冷却剂出口压力约为 1bar，其入口压力能在 2.0~15.0bar 之间变化以调整冷却剂流量，冷却剂总流量为 0.5g/s~6.5g/s。设计燃烧室压力最大为 12.5bar，测量燃

烧室压力的压力计的能测量的最大压力大于 12.5bar。

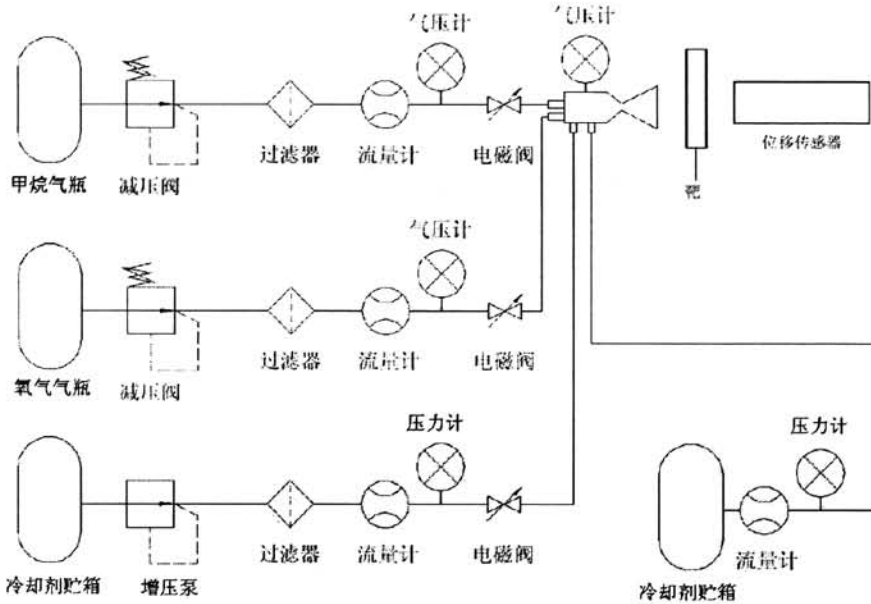


图 3.56 MEMS 双组元微推力器实验台示意图

3.9.2 冷流测试平台模块

一、最终推进器组装后的测试平台为四大板块：

管路供气、供冷却液部分，如图 3.57 为包含了减压阀、过滤器、电子流量计、电磁阀。

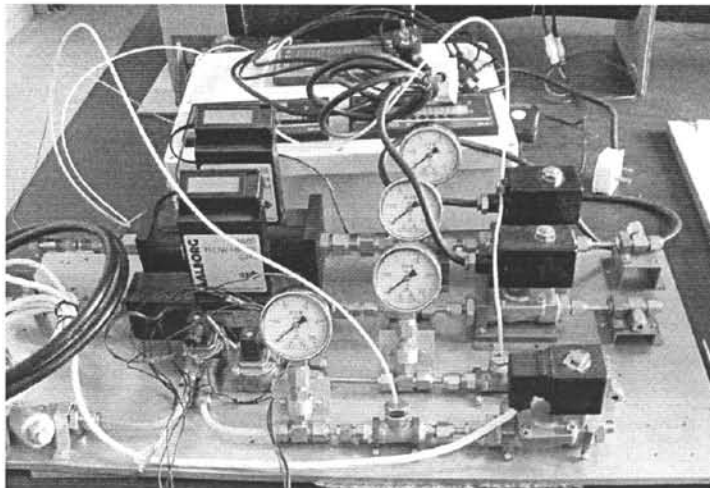


图 3.57 管路供气、供冷却液部分

二. 气源 (图 3.58), 水源 (图 3.59) 部分, 提供 $0\sim 25$ 个大气压的纯氮气。 $0\sim 15$ 标准大气压的去离子水。

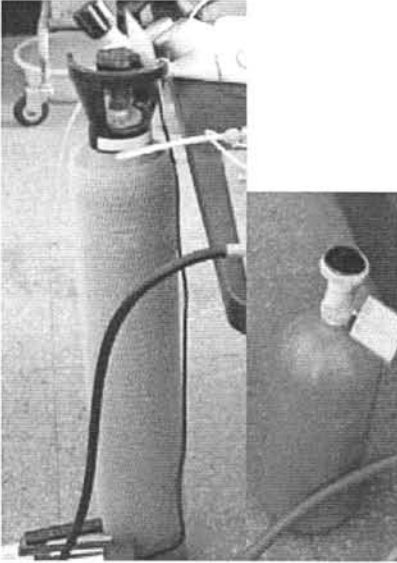


图 3.58 双路气源



图 3.59 带过滤的去离子水泵

三. 外围传感器

对于冷却剂进出口温度测量, 选用 STT-T 系列铂电阻温度传感器, 该系列采用不锈钢外壳封装, 内部填充导热材料和密封材料灌封而成, 尺寸小巧, 适于高压流体管道温度测量。对于推力器外表面处温度测量, 选用最简单方便的 STTT-V 系列热电偶温度传感器。STTT-V 系列热电偶温度传感器用外带绝缘的热电偶丝材焊接而成, 是测温产品里结构最为简单的一种, 响应速度极快, 适用于快速温度测量, 满足测量推力器表面温度的要求。

由于使用单摆的扰动感应推力, 单摆使用钢制作, 位移较小, 所以选用电涡流位移传感器。传感器由探头、加长电缆、前置器组成。电涡流传感器是以高频电涡流效应为原理的非接触式测量位移-振动传感器。它能以高线性度、高分辨率对进入其测量范围内的金属物体位移及运动状况进行测量。

选用 ST 型非接触式位移振动传感器, 探头直径为 11mm, 线性量程 4mm, 线性误差 $\pm 1\%$ 。传感器探头感知位移信号, 信号通过加长电缆传输进入前置器, 前置器输出电压信号 0 到 5V。为对位移信号进行采集, 需要将前置器输出到数据采集卡, 采集卡与计算机相连, 通过相应软件, 对信号进行采集、保存。采用的数据采集卡为 1208FS, 属于八通道数据采集卡。图 3.60 为电涡流位移传感器。

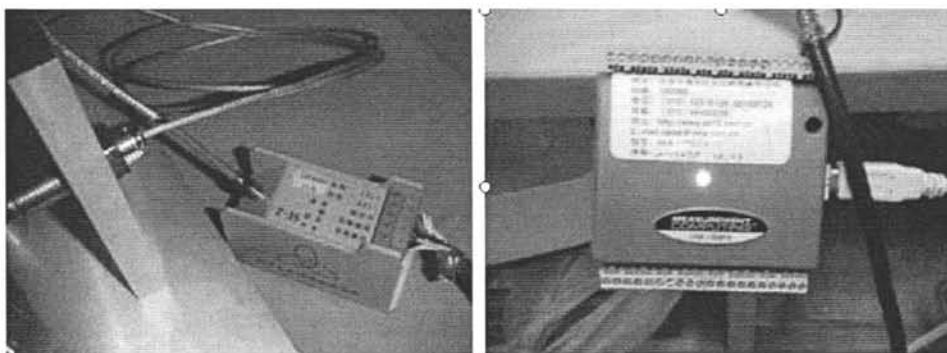


图 3.60 为电涡流位移传感器及数据采集卡

四. 与封装底座衔接部分

测量系统与封装好的推进器的连接关系体现在气路、水路的连接和位移传感器的连接。如图 3.61 气路、水路连接统一采用金属密封，聚四氟管连接。图 3.62，位移传感器安装与碰口位置单摆比较敏感的下方。

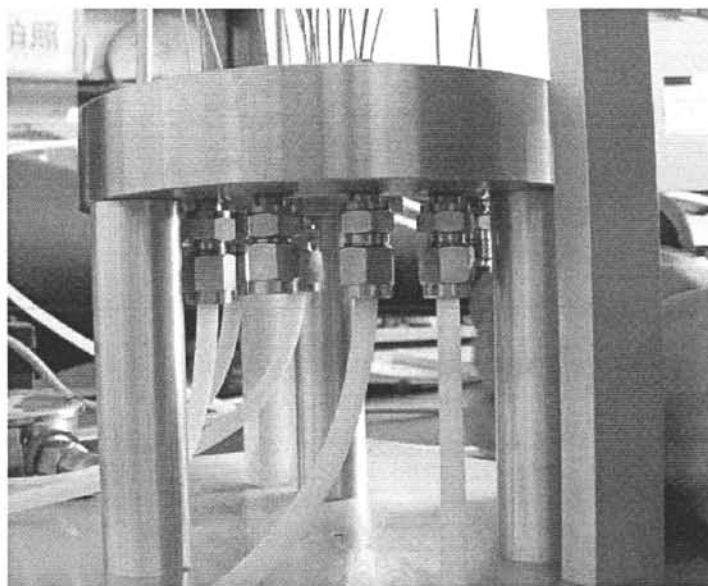


图 3.61 气路、水路连接统

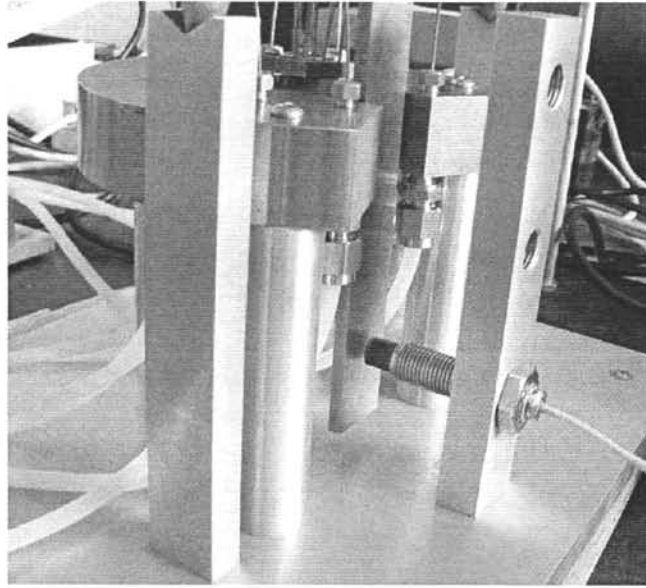


图 3.62 位移传感器的安装

3.9.3 推力测量

由于目前是冷流试验阶段，推力并不是由燃料燃烧产生，而是由四个燃料加注孔通高压气体，进入燃烧室直接产生推力，具体测量过程如下：

准备好实验台，连接好电源线和信号线，验证系统密封性能。打开计算机上的数据采集软件，进入数据采集界面，同时等待气体流量计的示数稳定下来归零。

打开气瓶，打开电磁阀，开始数据采集，调节减压阀出口压力，观察气体流量计读数。当到达某一预定的流量点，停止调整减压阀，观察单摆的摆动，当稳定一段时间后，停止数据采集，关闭电磁阀，关闭减压阀，关闭气瓶阀门。对已采集数据进行记录，重复上述步骤，得到几组数据，最后统一进行分析。

本实验中需要测量的数据包括气体流量、压力以及电涡流传感器的电压信号。调节减压阀的出口压力，改变气体的流量，从而使单摆产生不同的位移。

实验时，之所以先打开电磁阀，而不是先升高压力后再打开电磁阀，有两点原因。第一点，如果后打开电磁阀，那么电磁阀打开一瞬间气体流率很高，但是不能维持；第二点，瞬间的高速气流给摆带来瞬间的速度，导致振动迟迟不能稳定，这种情况下的实验曲线如图 3.63 所示。这条曲线说明突然的气流带来一个大的偏转，但是很快又变小，还有较大的波动。因此实验时采取先打开电磁阀的方式。



图 3.63 高压气突然释放响应曲线

实验中发现，由于使用的是 4L 的小气瓶，气瓶内压力迅速降低。而气体流量不仅与减压阀出口压力，而且与气瓶中压力有关。而且，由于气体流量为热式传感原理，无需压力进行换算，因此，压力参数在本实验中的参考意义不大。事实上，如果使用推进器做冷流实验，那么该压力则是气体状态的重要参数之一。但是本实验中只需关心喷管出口处的气体状态，所以从这个意义上讲，压力测量意义也不大。因此，以流量为变化量，测量三组数据，分别是在流量为 24nL/min、32nL/min 和 40nL/min 下测得的。三次测量得到的位移信号曲线图 3.64 所示。

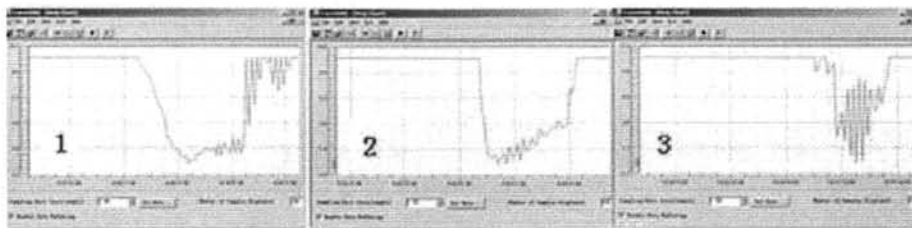


图 3.64 三次测量采集曲线

经过整理，得到以下数据表格。

三次测量整理所得数据

流量 (nL/min)	位移电压(V)	探头与靶面 距 (mm)	靶位移 (mm)
24	3.507	5.90	3.108
32	0.764	5.90	5.270
40	2.437	8.50	6.580

实验数据分析

本实验中使用的喷管截面为圆形，与第二章中测量方法与理论推导的情形不太一样。而且，由于喷管不是原来系统中所有，因此没有固定部分，实验时仅仅靠手

来控制使其不动。由此可见，实验数据是很精确，以下分析仅仅进行估算。估算的原理就是动量方程，喷管出口气体水平方向速度都被消耗用作给靶提供转矩。进行简化，假设喷管出口气压就是大气压，出口质量流率为 Q ，速度为 V ，出口截面面积为 A ，出口气体密度为 ρ ，喷管出口中心到单摆支点高度为 h_1 ，单摆面受力为 F ，单摆质量为 m ，电涡流位移传感器探头中心到单摆支点高度为 h_2 ，探头所对点的位移为 u ，重力加速度为 g ，单摆偏转角度为 a ，单摆质心到支点距离为 L ，易得

$$a = \arctgu / h_2 \tag{4-1}$$

$$F = QV = Q^2 / A\rho \tag{4-2}$$

$$F = mgL \sin a / h \tag{4-3}$$

表4.3 实验时的一些常数

A (mm^2)	ρ (g/L)	$M(g)$)	h (mm)	g (m/s^2)	h_2 (mm)	L (mm)
0.785	1.25	220	47	9.81	65	70

公式 4-3 是简化公式。将表格 4.3 中的数值和实验数据代入公式 4-1、公式 4-2、公式 4-3 计算可得表 4.4。

表4.4 计算结果比较

流量 (nL/min)	位移 (mm)	公式 4-2 算出的 力 (N)	公式 4-3 算出 的力 (N)
24	3.108	0.1600	0.1535
32	5.270	0.2844	0.2602
40	6.580	0.4444	0.3250

截止目前，可以再 13 个大气压下稳定测量推力，但仍有燃料加注流道两侧流量不对称的问题等待解决。

第二部分结论

采用双掩膜工艺解决了深槽刻蚀燃烧腔的问题，防止了 AOE 时由于散热 O 圈老化导致的厚胶变性颗粒回落腔体的问题。

应用 bosch 工艺高深宽比刻蚀燃料加注流道，散热流道，合理使用 ICP 的各种参数，保证极薄的燃料隔离壁的垂直与表面洁净。

应用深槽甩胶、无版曝光、双面对准刻蚀燃料加注微孔、克服 lag 效应对散热流道的损伤，同时避免了长时间刻蚀的“黑硅”现象，和流道的坍塌。

应用合理的预处理方案和参数，解决了大图形区的厚硅片的硅-硅键合，形成了对准精确，非图形区无缺陷的键合界面。

用五段式脉冲，结合适当的焦平面，合适的辅助气体强度，对封闭流道的 HOYA 玻璃进行激光打孔，保证了小孔的垂直度、抑制了尾椎毛碴；结合 CeO 抛光，在尽量减小片厚损失的前提下，保证键合面的光滑。

结合 HOYA SD2 玻璃的热匹配性质和掺杂性质，使用合理的电压、温度、压力参数，完成了超厚带图形玻璃-硅键合。设计专门的加电电极，保证不破坏第一块键合片的耗尽层电荷，成功实现玻璃-硅-硅-玻璃的三明治键合。

充分考虑圆片上的通孔对吸真空的影响、防止冷却剂进入喷射口堵塞流道，进行保护性划片。

使用钎焊、金属密封的方式完成了推进器芯片与 KOVA 管的封装及与测试台的可靠连接。

对推进器芯片的耐压、通畅性、推力进行了测试，截止到论文结束，完成了冷流耐 13 个大气压，推力达 30mN 的测试。

参考文献

- [1]王琪民.微型机械导论.中国科学技术大学出版社, 2003
- [2]石庚辰.微机电系统技术.国防工业出版社, 2002, 1
- [3]冯亚林, 郝一龙.MEMS 技术及其在军事中的应用.微电子学,2006,2:第 36 卷第 1 期
- [4]亢春梅, 曹金名, 刘光辉.国外 MEMS 技术的现状及其在军事领域中的应用.传感器技术 2002,6:4-7
- [5]Wesley C.Chang.Precision MEMS Nano-Cutting Device For Cellular Microsurgery, Proceedings of IMECE2004 [6]Gary K.Fedder.MEMS Fabrication.International Test Conference 2003 IEEE
- [7]朱健.MEMS 技术的发展与应用.Semiconductor Technology Vo1.28No.1 29:2003,2
- [8]赵晓峰, 温殿忠.MEMS 研究与发展前景.黑龙江大学自然科学学报, 2002, 3 月
- [9]刘广玉, 樊尚春, 周浩敏.微机械电子系统及其应用.北航出版社, 2002, 5
- [10]江绵恒.“创新一号”卫星研制实践及微小卫星发展趋势.中国科学院院刊, 2003.6
- [11]童志义.mems 加工技术及其工艺设备.电子工业专用设备, 2004, 1: 总第 108 期
- [12]詹亚峰, 马正新, 曹志刚.现代微小卫星技术及发展趋势.电子学报,2000: 28(7)
- [13]马元申, 于小红, 尹志忠.现代小卫星技术及其发展对策.标准化研究与应用,2003 年 第 5 期
- [14]谭晓昀, 刘晓为.应用 MEMS 技术加快微小卫星及微卫星的发展.仪器仪表学报,2004.8: 第 25 卷第 4 期增刊
- [15]Jongkwang Lee,Dae Hoon Lee,Sejin Kwon.Design and performance evaluation of components of micro solid propellant thruster.Joint Propulsion Conference and Exhibit 11-14 July 2004, Fort Lauderdale, Florida.
- [16]尤政, 张高飞.基于 MEMS 的微推进系统的研究现状与展望.微纳电子技术, 2004.3
- [17]尤政, 张高飞, 任大海.MEMS 微推进技术的研究.纳米技术与精密工程, 2004.6
- [18]A.Genovese,S.Marcuccio,M.Andrenucci.Experimental Behavior of FEEP Emitters

- Fed by a Cesium Chromate Tank.30 th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference,June 27-29,1994
- [19]Koizumi,H.,Kakami,A.,Furuta,Y.,Komurasaki,K.,and Arakawa,Y.Liquid Propellant Pulsed Plasma Thruster.28th IEPC,March 17-21,2003,France
- [20]David H.Lewis,Jr.,Siegfried W.Janson,Ronald B.Cohen,Erik K. Antonsson.Digital MicroPropulsion.Sensors and Actuators A,Physical,2000, 80(2)
- [21]B.Larangot,V.Conedera,P.Dubreuil,T.Do Conto,C.Rossi.Solid Propellant MicroThruster:an alternative propulsion device for nanosatellite.NanoTech 2002-"At the Edge of Revolution"9-12 September 2002
- [22]Daniel W.Youngner,Son Thai Lu,Edgar Choueiri.MEMS Mega-pixel Micro-thruster Arrays for Small Satellite Stationkeeping.14th Annual/USU Conference on Small Satellites
- [23]张为军, 堵永国等.微晶玻璃及其在电子元件中的应用.电子元件与材料, 2002.8
- [24]严宗毅, 许世雄等.流体力学.高等教育出版社, 1993
- [25]邓俊泳, 冯勇建.TMAH 单晶硅腐蚀特性研究.微纳电子技术,2003, 12
- [26]洪永强, 蒋红霞.微电子机械系统及硅微机械加工工艺.电子工艺技术, 2003, 24
- [27]王兴华, 薛亦渝.薄膜制备新技术及其应用研究.真空电子技术,2003,(5)
- [28]李晨松, 徐廷献.无机薄膜的制备技术.硅酸盐通报, 2003 年第 2 期
- [29]冯仕猛, 赵海鹰, 窦晓鸣.溅射功率对多层膜质量的影响.光学学报, 2002,(11)
- [30]Stearns D G,Rosen B S.Ion-assisted sputter deposition of molybdenum silicon multilayers.A ppl.Opt,1993,32(34)
- [31]樊中朝, 余金中, 陈少武.ICP 刻蚀技术及其在光电子器件制作中的应用.微细加工技术, 2003, 6: 第 2 期
- [32]郑志霞, 冯勇健, 张春权.ICP 刻蚀技术研究.厦门大学学报自然科学版, 2004, 8 月
- [33]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 年: 第 78 期

- [34]刘玉岭, 檀柏梅, 张楷亮.微电子技术工程: 材料、工艺与测试.电子工业出版社, 2004
- [35]邓俊泳, 冯勇建.TMAH 单晶硅腐蚀特性研究.MEMS 器件与技术,2003 年第 12 期
- [36]张为, 姚素英等.四甲基氢氧化铵在 MEMS 中的应用.微电子学, 2001 年 12 月
- [37]Philip-chandy P.An optical fiber sensor for biofilm measurement using intensity modulation and imag analysis.IEEE J.Selected Topics in Quantum Electronics,2000,6(5):764-772
- [38]高文钰, 刘忠立等.清洗对热氧化 13nm 二氧化硅可靠性的影响.半导体学报, 1999,20
- [39]胡春波, 张钢锤等.受激光控制分解式固体微推力器内流动特性研究.固体火箭技术, 2006.4
- [40]曹向群, 唐九耀.高温热氧化中二氧化硅层厚度的控制研究.光电子激光, 2001,12
- [41]Sami Franssila 著, 陈迪等译.微加工导论.电子工业出版社, 2006 年
- [42]张高飞, 尤政.基于 MEMS 的固体推进器阵列.清华大学学报(自然科学版), 2004.11
- [43] Thuy Tran-Quinn, Johnston S, Lindquist R. Contact Etch in the LAM 4520XL Using Standard CF₄/CHF₃ Chemistry[C].In: Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, 1996. ASMC 96 Proceedings. IEEE/SEMI 1996 on 12-14 Nov. 1996: 185-
- [44] Jansen H , de Boer M , Elwenspoek M. The Black Silicon Method. VI. High Aspect Ratio Trench Etching for MEMS Applications [C]. In: Micro Electro Mechanical Systems,1996, MEMS ' 96, Proceedings.'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems '. IEEE, The Ninth Annual International Workshop on 11-15 Feb. 1996:250-
- [45] Chou T-K A , Najafi K, Fabrication of Out-of-Plane Curved Surfaces in Si by Utilizing RIE Lag[C].In: Micro Electro Me-chanical Systems, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference on 20-24 Jan. 2002:145-

- [46] Jewett R E , Hagouel P I , Neureuther A R ,and Duzer T Van. Line-Profile Resist Development Simulation Techniques [J]. Polymer Eng Sci, June 1977,17(6):381.
- [47] Ono K, Tuda M. Dynamics of Plasma-Surface Interactions and Feature Profile Evolution During Pulsed Plasma Etching[J].Thin Solid Films ,2000,374:208.
- [48] Balooch M , Moalem M , Wang W-E , Hamza A V . Low-En-ergy Ar Ion-Induced and Chlorine Ion Etching of Silicon[J]. JVac Sci Technol, 1996,A14:229.
- [49] Mutumi Tuda,Kazuyasu Nishikawa,and Kouichi Ono. Numer-ical Study of the Etch Anisotropy in Low-Pressure, High-Density Plasma Etching[J]. J Appl Phys,Jan 1997, 81(2):960.
- [50] Chung Chen-Kuei. Geometrical Pattern Effect on Silicon Deep Etching by an Inductively Coupled Plasma System[J]. J Micromech Microeng, 2004,14:656.

致谢

感谢李志宏老师带我进入了充满了生机与活力的 MEMS 研究领域，在电镀金悬臂梁和微推进器项目推进过程中，遇到了许多棘手的问题，李老师敏锐的洞察问题的能力和对我的信任与鼓励给了我莫大的动力，最终实现了预期的目标。在学术问题的交流上，李老师宽阔的视野，雄厚的知识背景，严谨的治学态度，对我的学习习惯和学术道路的规划影响很深。生活中李老师严于律己，宽厚待人的态度也让我非常感动，给我们 MEMS 中心营造了身心舒畅，和谐上进的健康氛围。研究生生活即将结束了，我将带着几年来李老师传递的学术修养和人格魅力展开我新的征程。

感谢于敦山老师的举荐与对学生学习生活无微不至的关怀，于老师的敬业精神和严谨的作风将对我影响终生！

也很感谢张大成老师、闫桂珍老师、李婷老师，不管是工艺间里还是工艺间外。遇到各种各样学术问题、技术细节都能从他们那里的到热心的答复。在我们微米纳米技术加工国家重点实验室里我得到了很大的锻炼，不光是学术上的知识，更有严谨细心的工作态度；预防为主，高度负责的安全意识；实验室为家，自觉维护的主人翁精神。

与王玮老师，王颖老师的长期合作也令人难忘，每次面对流程单的增补，非标准工艺的讨论，都体现了师长耐心细致的工作态度和对新人最大限度的宽容和提携。田老师、孟老师、张玉荣老师、田雪佳、姚飞、商静怡、张美丽、戴晓涛、刘鹏、陈妍卿，霍得、刘春梅给予的耐心配合也令我非常难忘。

感谢 311、314、318 过去的和新的各位同仁陪我一起度过的快乐时光！来日方长！

最后感谢家人的爱与支持！