

(4)微冷气推进器虽然安全、可靠、无毒、机动性和预测性好，但高压贮箱和供应管路增加了无效载荷，微阀有时会发生泄漏，降低了系统的可靠性。因此它不适合用作微小卫星的推进器；

(5)微化学推进器特别是固体微化学推进器，可在同一芯片上集成制作各种尺寸的贮箱、喉颈和装填不同的推进剂，在  $1\text{cm}\times 2\text{cm}$  芯片上可以集成 106 个微推进器。

当采取一定的逻辑功能时，推进器可以产生特定要求的脉冲。由于完全采用 MEMS 技术，没有活动件，没有泄漏，可以与其他 MEMS 元件集成，从而可大大减小推进器的体积和质量，特别适合低成本的系统，例如微型卫星和纳米卫星 [38-43]。

综上所述，由于结构等方面的限制，没有一种推进器可完全适合于各种用途。可根据不同航天器的特点，设计单一的或混合型的推进系统。根据航天器的寿命、体积和质量要求，变轨或姿态控制精度的需求，参考现有推进系统的结构特点和适用范围，优化组合现有的推进器，以得到最佳的推力效果。其中，液体和固体微化学推进器由于大范围的采用了基于硅的 MEMS 技术，在体积和重量上大大降低，从而可以弥补以前发展的微推进器的不足，为微卫星和纳米卫星的推进系统拓展了新的发展方向。

#### 1.4 本文工作

本文的主要目的是研究微推进器的加工及封装测试工艺中的一些挑战性步骤，核心内容如下：

- (1) 双掩膜深槽刻蚀燃烧腔；
- (2) 高深宽比刻蚀燃料加注流道，散热流道；
- (3) 双面对准刻蚀贯穿微孔、克服 lag 效应对散热流道的损伤；
- (4) 大图形区的硅硅键合；
- (5) HOYA 玻璃的激光打孔及抛光；
- (6) 超厚带图形玻璃-硅-硅-玻璃的三明治键合。
- (7) 保护性划片
- (8) 推进器芯片的封装及于测试台的可靠连接
- (9) 芯片测试

## 第二章 液体微推进器的结构及加工流程

### 2.1 总体结构说明

MEMS 微推进器由 2 层硅+2 层玻璃组合而成，外面两层为帽板，作用是封闭推进器；内侧两层为壁板，是形成微推进器的主要结构。MEMS 微推进器主要结构如下图 2.1 所示。（具体的尺寸不要给出来，一些设计的具体的图可以删掉，如 2.2, 2.3 等）

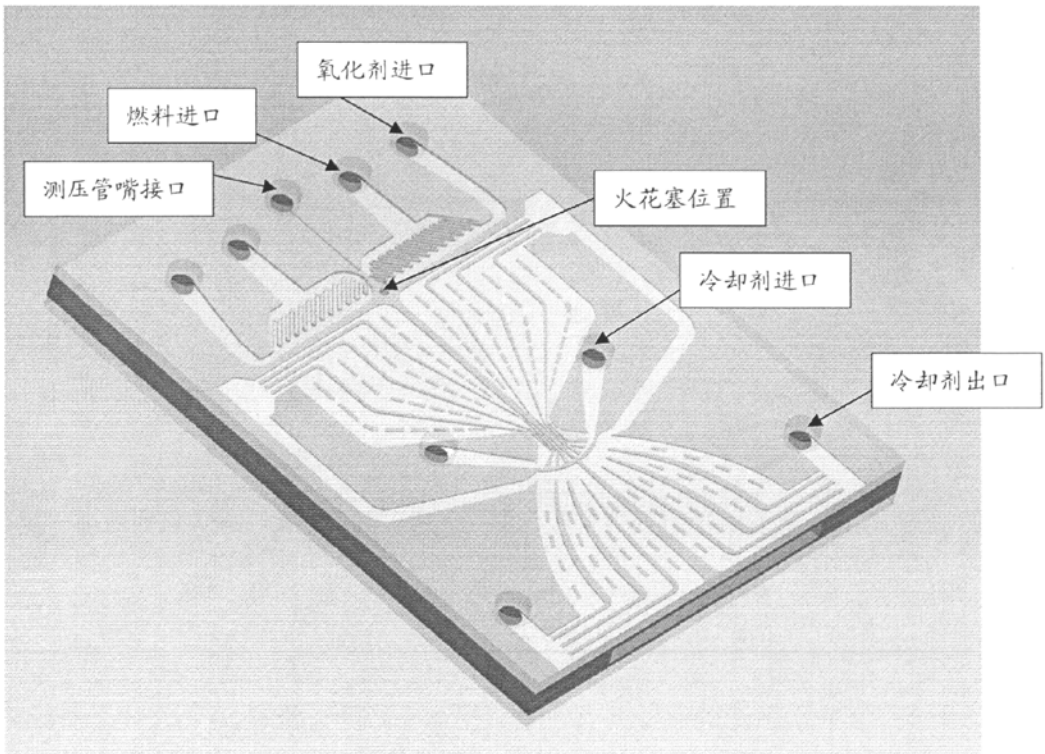


图 2.1 MEMS 微推进器总体结构设计

推进剂从帽板上端四个圆形入口进入，通过壁板上的喷注孔喷入燃烧室。帽板上端靠中间的圆孔为测压管嘴的接口。冷却剂从帽板中部的两个圆形入口流，从帽板下端的两个圆形出口流出。这样安排冷却剂的流向是为了能够更好的冷却燃烧室喉部。

### 2.2 帽板结构

MEMS 微推进器的两片壁板的结构完全相同，两片帽板的结构不同。顶部的

帽板称为顶板, 底部的帽板称为底板。图 2.2 和图 2.3 给出了顶板和底板的视图。

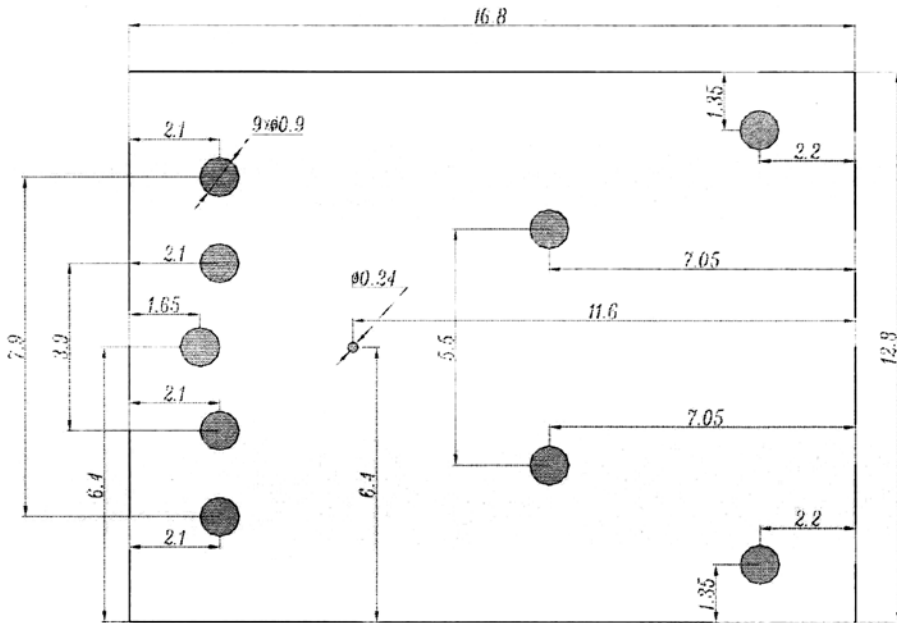


图 2.2 顶板的视图

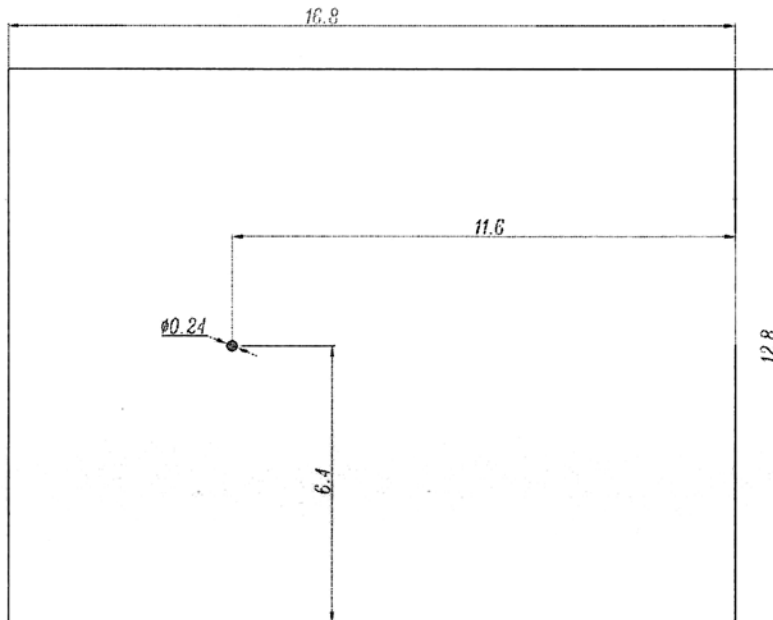


图 2.3 底板的视图

顶板上 9 个  $\Phi 0.9$  圆孔分别为推进剂入口，测压管嘴接口和冷却剂的入口和出口。顶板主要起到封闭推进剂流道和冷却剂槽道的作用。顶板和底板上的  $\Phi 0.24$  圆孔为火花塞位置，由于微推进器使用的推进剂是  $\text{CH}_4$  和  $\text{O}_2$ ，因此需要点火装置的位置。顶板和底板的厚度都是  $1000\ \mu\text{m}$ ，板上的孔结构都通孔。

## 2.3 壁板结构

### 2.3.1 壁板总体结构

壁板是 MEMS 微推进器的关键部分，其正面的结构为冷却剂流道、推进剂流道及喷注孔，背面的结构为燃烧室和喷管。图 2.4 和图 2.5 分别为壁板的正面和背面视图。

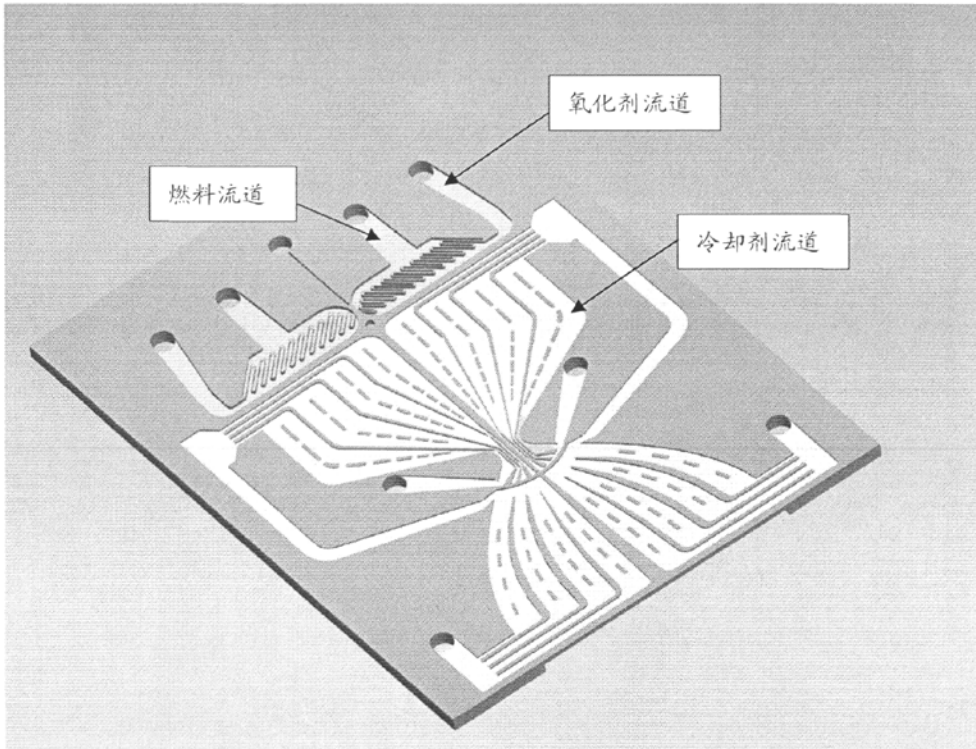


图 2.4 壁板的正面视图

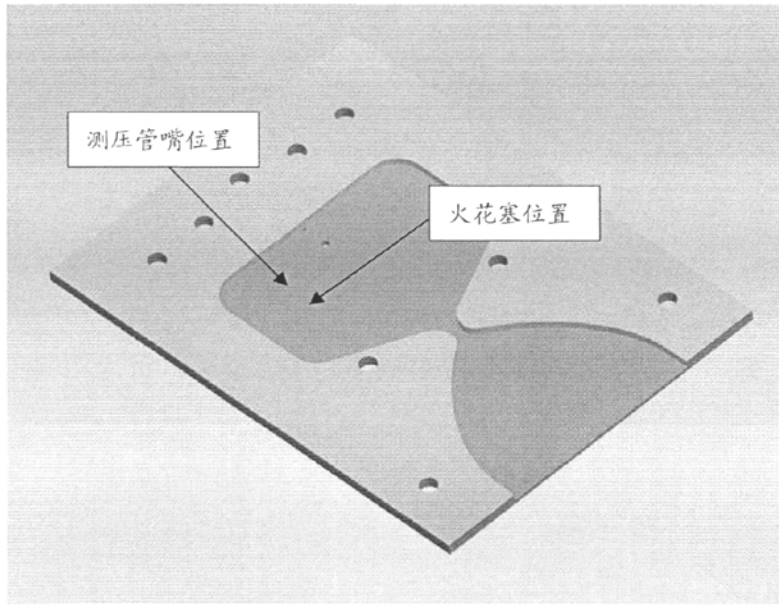


图 2.5 壁板的背面视图

壁板的正面结构由于存在不同深度，因此需要分两个阶段蚀刻完成。图 2.5 所示结构的刻蚀深度为  $150\ \mu\text{m}$ ，而图 2.6 所示结构的刻蚀深度为  $50\ \mu\text{m}$ 。首先将图 2.5 所示的结构刻蚀  $100\ \mu\text{m}$  的深度，然后将图 2.6 和图 2.5 所示的结构同时刻蚀  $50\ \mu\text{m}$  的深度。

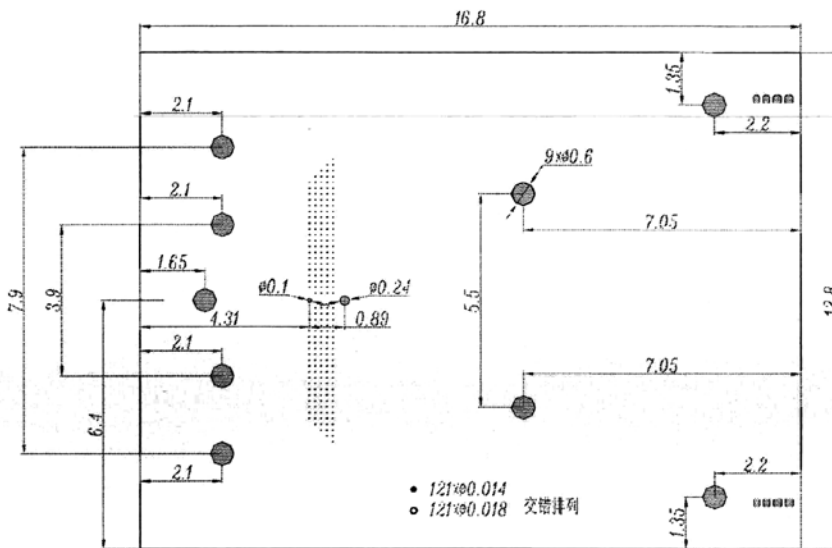


图 2.5 壁板正面视图 1 (具体的尺寸不要给出来)

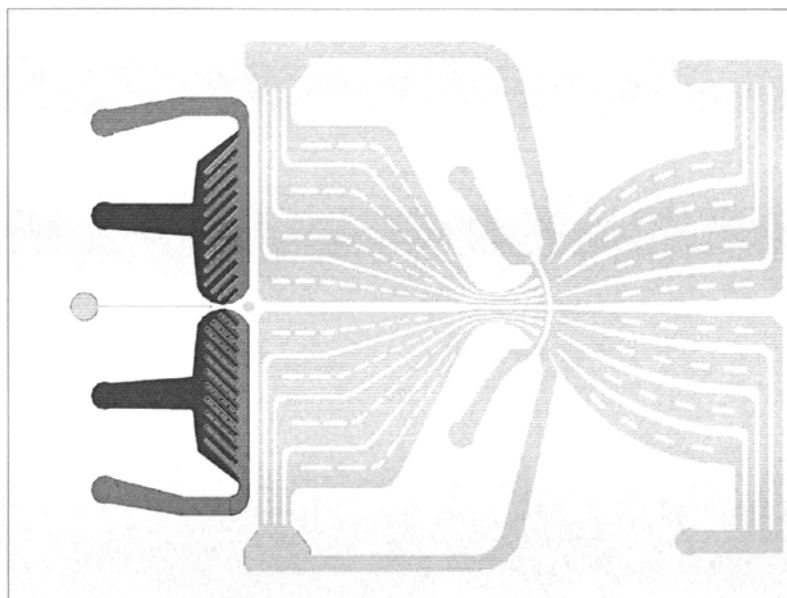
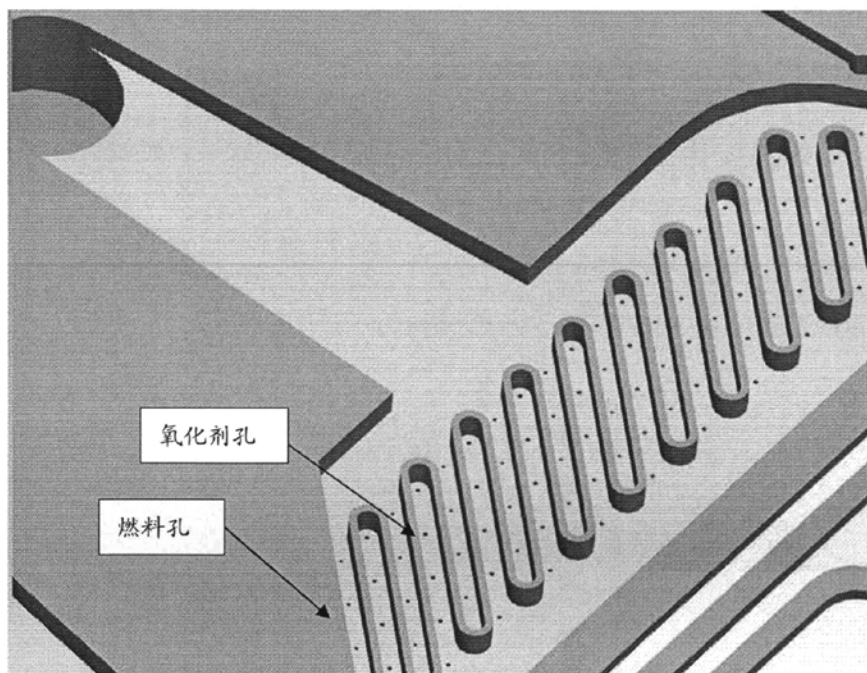


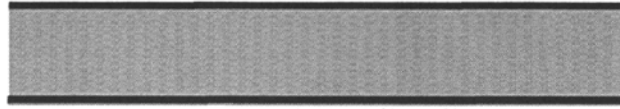
图 2.6 壁板正面视图 2

此阶段完成的加工包括壁板正面的推进剂，冷却剂流道等结构。

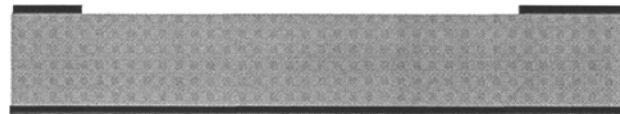


## 2.5 工艺流程:

此推进器采用三块掩模板，流程如下：



1. 热氧化3000A



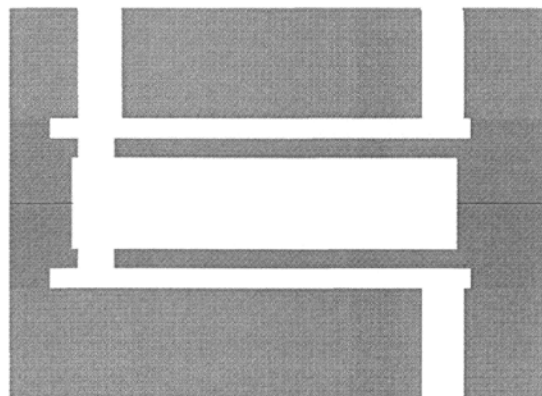
2. 正面刻硅250微米



3. 背面刻硅100微米+50微米，双掩膜，背片；BHF去氧化层  
重复以上步骤做第二片



4. RCA清洗，硅硅键合，退火



5. 正反面阳极键合两块打孔的1mm厚玻璃

### 第三章 工艺加工核心步骤

整体版图设计既要考虑到器件的流体性能，又要结合刻蚀区域的深度带来的结构强度的影响，合理的布置通孔、深槽的分布。

#### 3.1 双掩膜深槽刻蚀燃烧腔

##### 3.1.1 ICP 体硅深刻蚀工艺介绍

微推进器燃烧腔体的刻蚀使用英国 STS 公司生产的 Multiplex ICP 刻蚀机。深反应离子刻蚀 (DRIE) 已成为一项重要的 MEMS 加工工艺，在各种结构和器件的加工中得到了日益广泛的应用。它的主要特点是垂直性好，具有很高的深宽比。特别是近年来出现的电感耦合等离子体源 (inductively coupled plasma, ICP)。使高密度反应离子刻蚀工艺日臻成熟。ICP 技术采用氟基气体作为刻蚀气体和侧壁钝化用聚合物生成气体，从根本上解决了系统腐蚀和工艺尾气的污染问题。ICP 刻蚀基于 Bosch 开发的 ASE™ 工艺，刻蚀与聚合物淀积交替进行，得到高深宽比，同时还采用了射频电源相控技术，使离子源电源和偏压电源的相位同步，确保等离子密度达到最高时偏压也达到最高，使高密度等离子刻蚀的优势得到充分发挥 [1]。

##### 3.1.2 基于 Bosch ASE 的 ICP 刻蚀原理

ICP 刻蚀基于 Bosch 开发的 ASE™ 工艺，工艺过程如图 3.1 所示。刻蚀工艺过程分为两步：刻蚀周期与钝化周期。用  $SF_6$  进行刻蚀，用  $C_4F_8$  生成聚合物形成侧壁保护，刻蚀与保护交替进行，形成各向异性，直到达到所要求的刻蚀深度。由于垂直方向的刻蚀速度远大于对侧壁的刻蚀速度，因此可以得到很好的各向异性刻蚀结果。

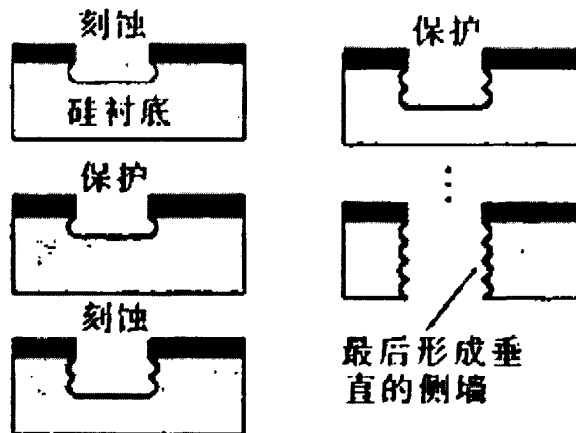


图 3.1 Bosch ASE™ 工艺过程

STS Multiplex ICP 高密度反应离子刻蚀系统的结构如图 3.2 所示。13.56MHz 的射频功率通过电感线圈的耦合进入等离子源，使刻蚀气体在高频磁场和感生电场的共同作用下电离产生高密度等离子体。气体流量由气体流量控制器控制，等离子产生和平板偏压采用独立的射频源，在这一技术中，用  $SF_6$  作为刻蚀气体， $C_4F_8$  作为聚合物产生气体，刻蚀与聚合物产生交替进行。在刻蚀过程中离子源电源和偏压电源同时工作，反应室通入  $SF_6$ 。用于产生氟离子对硅进行刻蚀。

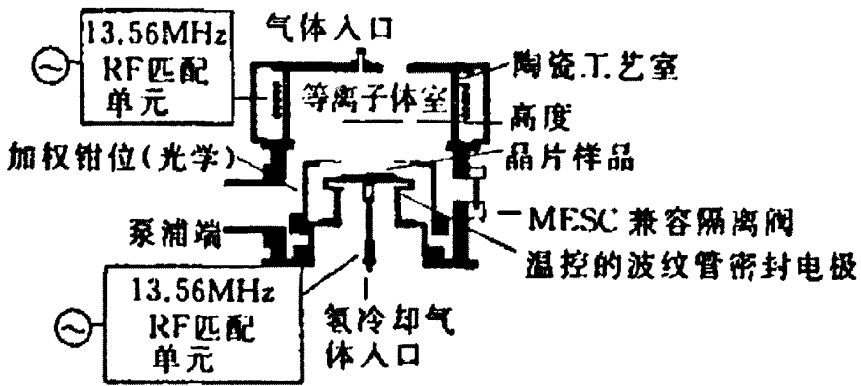


图 3.2 STS Multiplex ICP 系统结构

影响刻蚀侧壁形状的工艺参数有刻蚀周期/钝化周期比、平板电极功率、钝化气体  $C_4F_8$  流量以及重叠周期[3]。

### 3.1.3 ICP 刻蚀过程中使用组合掩模&防止掩膜颗粒回落

推进器腔体由于达到 250 微米槽深，并且喉部尺寸较小，需要有很好的垂直度，同时用厚胶和氧化硅做掩膜，分次刻蚀。（有个别腔体内有小凸起，由于 AOE 机器 0 圈老化影响散热导致了厚胶边缘变性发乌而颗粒化如图 3.3，胶粒落入了氧化硅图形区在深刻蚀时形成硅柱如图 3.4。该用 RIE 各向同性刻掩膜后此现象消失图 3.5）。

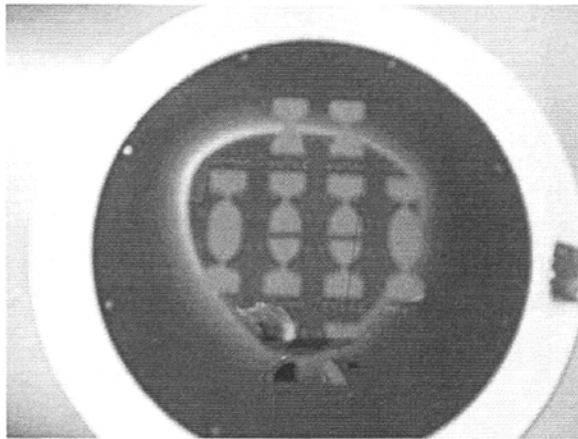


图 3.3 刻燃烧腔掩膜时散热不好导致的厚胶发乌

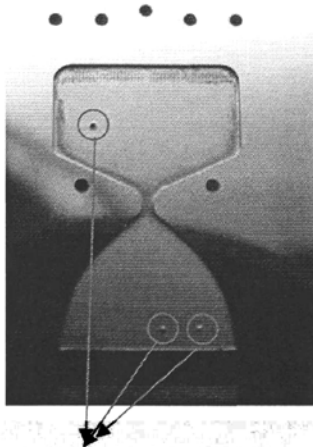


图 3.4 AOE 回落的胶粒在 ICP 时形成的凸起

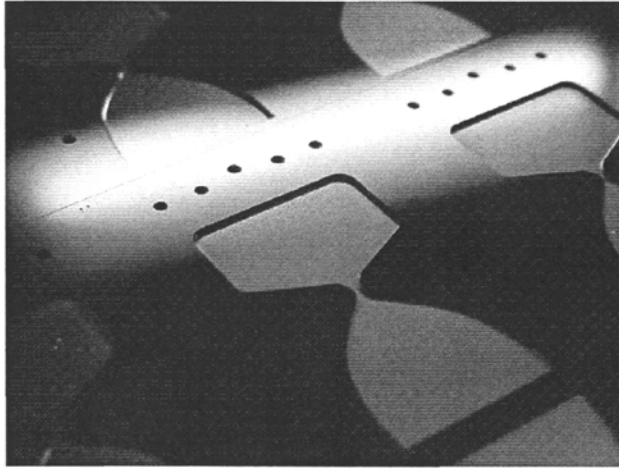


图 3.5 光刻胶、SiO<sub>2</sub> 做组合掩模时得到的光滑表面

### 3.2 高深宽比刻蚀燃料加注流道，散热流道

氧气和甲烷的混合注入区，由于采用了燃料喷射孔高度交错的设计如图 3.6，隔离壁很薄很高，极易坍塌，主要挑战来自于 ICP 深槽刻蚀时隔离壁下部燃料加注孔刻蚀时逸散刻蚀气体 SF<sub>6</sub> 对侧壁根部的影响。通过试验各种等离子体释放频率、刻蚀气体和保护气体的时间比，结合带有导气槽的 Al 衬片，保证了隔离壁的垂直和表面的无缺陷如图 3.7。

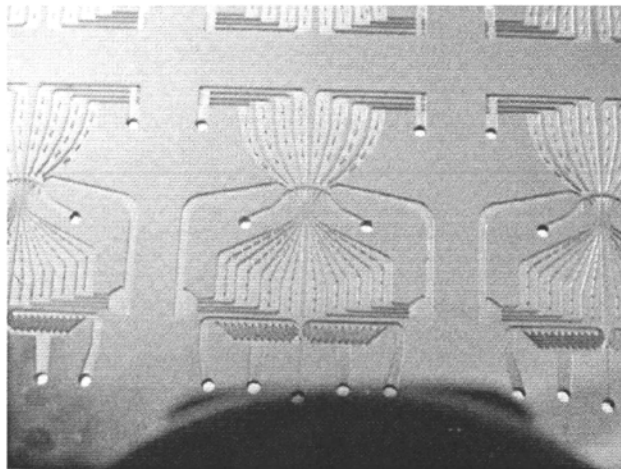


图 3.6 燃料加注区，散热流道区（深度 180 $\mu$ m）

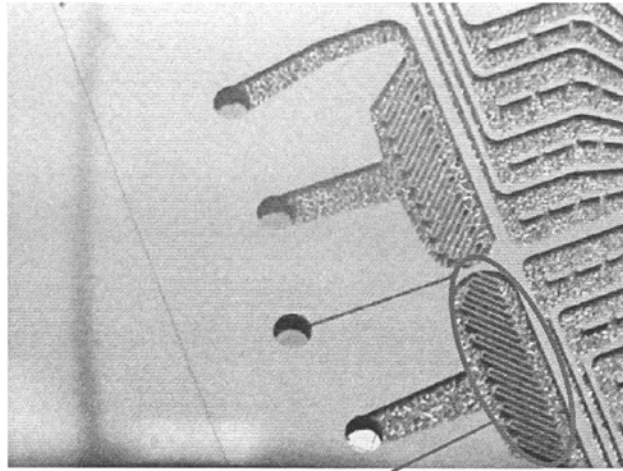
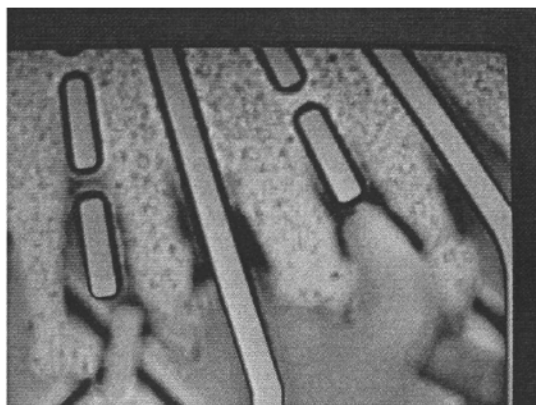


图 3.7 优化后得到垂直度很高的燃料隔离壁

### 3.3 燃料加注孔刻蚀时 lag 效应和“黑硅”现象的克服

#### 3.3.1 长时间高深宽比刻蚀时出现的 lag 效应和“黑硅”现象

由于燃料加注孔与燃料加注流道是嵌套图形的关系,并且二者刻蚀图形深宽比差异很大,由于随着 ICP 刻蚀深宽比的增加,刻蚀速率会明显下降,整体推进两种图形的刻蚀时有很明显的 lag 效应产生,这会导致在燃料加注孔远没有刻通时,流道已经过刻严重,而造成流道坍塌如图 3.8,背景红色为暴露的粘接衬片的光刻胶,背景黑色线条为衬片上的导气槽,防止贯通后刻蚀气体对反面的刻蚀。



如图 3.8 Lag 效应估计不足导致小孔刻通时流道区余厚不足而坍塌  
更为严重的是,长时间的刻蚀后直径不到 10 微米的燃料加注孔深宽比变得

很高，底部  $C_4F_8$  保护气体很难及时排出，不光会影响刻蚀速率，甚至会直接导致保护气体大量聚集后形成复杂的聚合物，堵死刻蚀表面，照成“黑硅”。如图 3.9，大部分的黑色的燃料加注孔以永久性无法刻通。

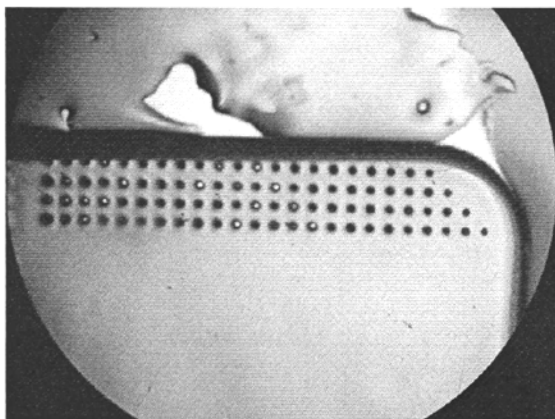


图 3.9 侧壁保护气体释放的量太大导致的“黑硅”现象

### 3.3.2 深槽图形区域的二次图形化后结合双面对准刻蚀燃料加注小孔

解决 lag 效应和黑硅现象最直径的办法就是减小单面刻蚀的深宽比和刻蚀时间，结合燃料流道背面是大面积的燃烧腔，有进一步甩胶、光刻的可能，这样就可以实现对同一微孔图形的双面刻蚀。

难点在于燃烧腔的深度达到了 250 微米，甩胶时会遇到很高的台阶，而燃料加注孔正好就分布在此台阶下面，转速高、胶甩太薄会导致无法覆盖台阶，ICP 刻蚀时刻伤燃烧腔的边缘，尤其是喉部，在键合时会有很大的问题。低转速，甩胶太厚，会导致台阶下方光刻胶堆积，根本无法曝光、显影小孔，甚至在真空坚膜时由于胶过厚而爆裂如图 3.10。

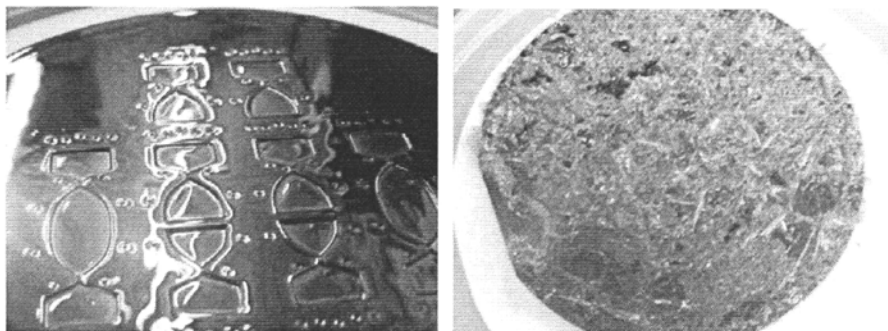


图 3.10 直接图形区甩胶后，真空烘箱坚膜失败

通过反复摸索，最终使用低转速甩胶，结合无版曝光减薄胶厚，最终真空坚膜后表面完好，如图 3.11。在此基础上双面刻蚀，减小了刻蚀的最大深宽比，单面刻蚀的时间，成功实现了在距离侧壁 20 $\mu\text{m}$  的位置上微燃料孔的显影，最终保证了贯通硅片尺寸极小的微燃料孔的刻蚀如图 3.12，并且从正反面叠加的红外图片（图 3.13）看到背面流道也形貌完好，嵌套关系准确。

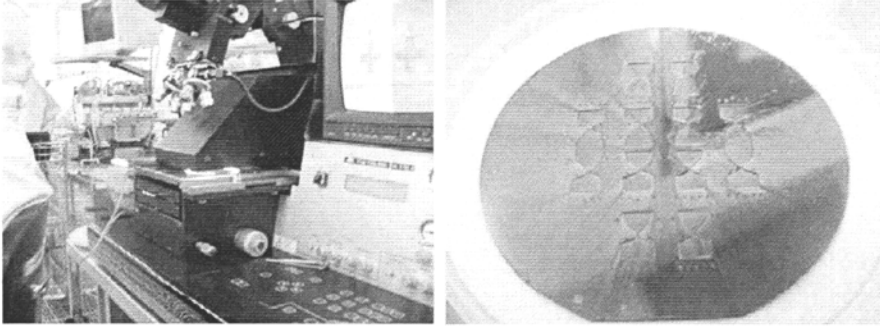


图 3.11 无版曝光减薄胶厚及其真空坚膜效果

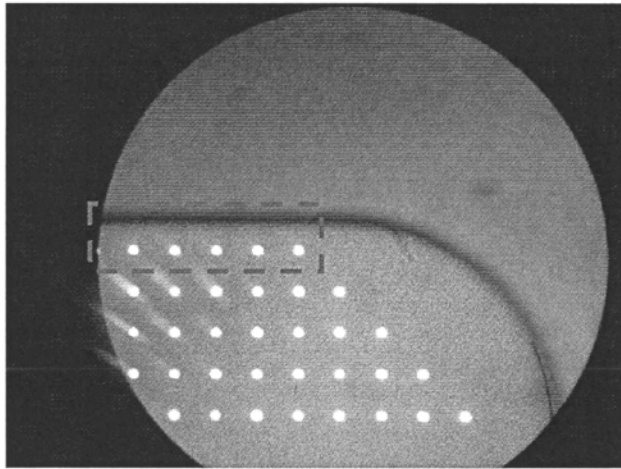


图 3.12 250 $\mu\text{m}$  深燃烧腔边缘小孔成功显影、刻通

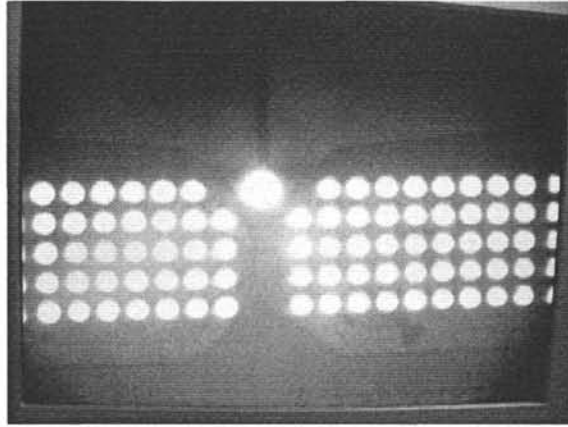


图 3.13 加注氧气和甲烷的小孔刻通并且表面完好的红外照片(正反面叠加)

### 3.4 燃烧腔大图形区的硅-硅键合

#### 3.4.1 硅硅直接键合工艺机理

自从提出硅硅直接键合工艺,人们对键合工艺装置进行了不少改进,但键合的基本过程是类同的。

直接键合技术主要过程可分两步:首先将两片镜面抛光的晶片(氧化或未氧化)经过化学处理后,在室温下将两个晶片面对面粘贴在一起。两晶片就通过表面吸附的分子膜建立起氢键链接,这一过程被称为预键合。然后对预键合的晶片进行高温退火处理,使界面原子的排列发生重组和相互溶合,界面形成牢固的共价键链接。这个过程就是热键合。

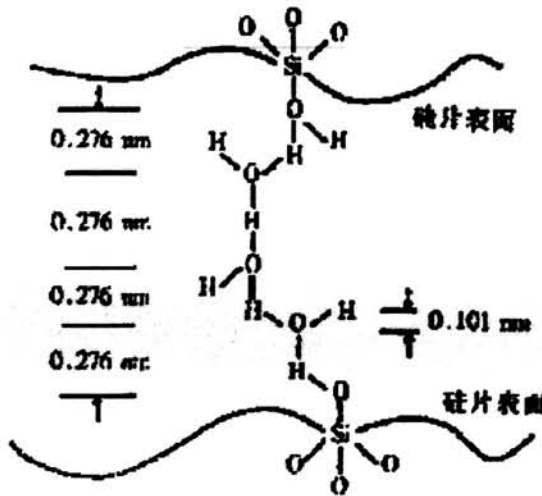


图 3.14 硅片亲水表面用氢键和三个水分子连接的室温直接键合模型

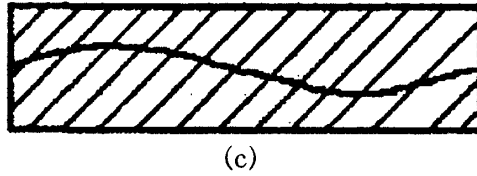
在垂直于硅片表面方向, 硅片体材料的三维晶格周期性被破坏, 电子势能不存在平移对称性。处于晶体内部的原子受到最近邻和次近邻原子对称力场的作用而处于平衡态, 处于表面的原子由于非对称力场从而存在指向空间的剩余结合力, 形成表面悬挂键。为使表面自由能最小, 表面原子结构发生重排并吸附外来原子。直接键合机理因硅片表面悬挂键终端原子的不同而不同。当硅片在清洗后提出水面时, 表面不沾水为疏水性处理; 提出水面时, 表面吸附一层水膜为亲水性处理。纯净的硅片表面是疏水性的, 将硅片浸入氧化性溶液的瞬间, 硅片表面就会生成氧化层。硅氧化层表面因化学极性的作用存在非桥键的羟基(OH), 即硅醇键  $\text{SiOH}$ 。由于羟基是亲水基, 易于物理吸附水而形成氢键, 所以表面具有亲水性。以羟基团为终端的硅片表面通过吸附的水分子之间的氢键发生自发的键[1]。亲水键合模型为  $\text{Si-OH}\cdots(\text{HOH}\cdots\text{HOH}\cdots\text{HOH})\cdots\text{OH-Si}$ , OH团的键长为  $0.101\text{nm}$ , 以氢键连接的两个氧原子间距为  $0.276\text{nm}$ (如图 3.15 所示)。即使硅片之间的距离达到  $1\text{ nm}$ , 多个水分子之间形成的桥也能将较为粗糙的表面连接起来。而用氢氟酸 HF 浸泡过的硅片表面是疏水性的, 以氢和少量氟为终端。两个疏水性硅片表面也可以通过氢键互相键合, 其模型为  $\text{Si-F}\cdots(\text{HF}\cdots\text{HF}\cdots\text{HF})\cdots\text{H-Si}$  HF 的键长为  $0.255\text{nm}$ , 所以即使两个硅片键合表面间距达到了  $0.8\text{nm}$ , 仍可以键合上, 但疏水表面的硅片在较低温度下键合强度较低。一般的说, 两个亲水性的硅片表面更容易发生键合。因此, 亲水性硅片键合工艺是目前人们研究和应用的重点。具有这种化学表面态的两个硅片粘贴后经过高温退火, 界面面发生成键反应, 这样两个硅片通过化学键互相连接起来。



(a)



(b)

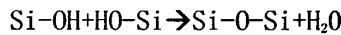


(a) 键合前 (b) 室温键合 (c) 高温键合

图 3.15 硅片键合过程示意图

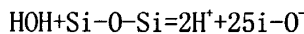
在硅硅直接键合的退火过程中，硅片键合界面的物理化学反应机理[2]一般可用三个阶段的键合过程加以描述：

第一阶段，从室温到 200℃，两硅片表面吸附 OH 团，在相互接触区产生氢键。随着温度的升高，OH 团因得到热能而增大迁移率，表面氢键形成机率也随之增大，因而使硅片产生弹性形变，键合面积增大，键合强度也增加。温度达到 200℃左右，从这时起，形成氢键的两硅片的硅醇键之间发生聚合反应，产生水及硅氧键，即：



由于硅氧键结合远比氢键牢固，故键合强度迅速增大。到 400℃ 时，聚合反应基本完成。

第二阶段温度在 500~800℃ 范围内，在形成硅氧键时产生的水向 SiO<sub>2</sub> 中的扩散不明显，而 OH 团可以破坏桥接氧原子的一个键使其转变为非桥接氧原子，即：



第三阶段，温度高于 800℃ 后，水向 SiO<sub>2</sub> 中扩散变得显著，而且随温度的升高扩散量成指数增大。键合界面的空洞和间隙处的水分子可在高温下扩散进入四周 SiO<sub>2</sub> 中，从而产生局部真空，这样硅片会发生塑性变形使空洞消除。同时，此温度下的 SiO<sub>2</sub> 粘度降低，会发生粘滞流动，从而消除了微间隙。超过 1000℃ 时，邻近原子间相互反应产生共价键，使键合得以完成。图 3.15 说明了硅片从室温的物理贴合到高温退火过程中键合界面的变化。

### 3.4.2 推进器燃烧腔键合工艺:

#### 3.4.2.1 表面清洗处理

表面清洗处理的目的是除杂和形成合适的表面化学态。它在键合过程中起到至关重要的作用,因为它直接影响键合界面的结构和电学特性。清洗技术应该是在不破坏硅片抛光面的平整度和粗糙度的基础上实现清除所有站污和建立合适表面态。表面清洗具体分为两步:预清洗和常规清洗。预清洗主要目的是清除硅片表面的灰尘、有机物和通常的硅片表面站污的金属原子(如 Cu, Fe 等);常规清洗主要目的是形成需要的表面化学态。

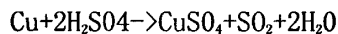
#### 燃烧腔表面清洗及亲水化处理

预清洗的方法是利用各种化学试剂和有机溶剂与吸附在被清洗物表面上的杂质及油污发生化学反应和溶解作用,或伴以超声、加热、抽真空等物理措施,使杂质从被清洗物体的表面脱附(或称解吸),然后用大量高纯热、冷去离子水冲洗,从而获得洁净的物体表面。

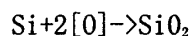
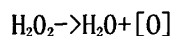
- (1) 用硫酸加双氧水混合液( $H_2SO_4 : H_2O_2=3:1$ )浸泡硅片直至不起反应为止。倒掉残液,用去离子水冲几遍,再用去离子水超声处理 3~5 分钟,然后用热去离子水冲洗 5 分钟。

原理:在通常情况下,过氧化氢主要表现为强氧化剂的作用。它对有机物、非金属和大多数金属都具有氧化的能力。尤其是在酸性或碱性的溶液中,可使低价化合物氧化成为高价化合物,同时可以使一些难溶的物质发生氧化变为可溶物质。

硫酸的主要性质是具有很强的酸性、氧化性,能与碱性氧化物、两性氧化物及其氢氧化物等作用,生成硫酸盐。它不但能与金属活动顺序表中氢以前的金属发生作用,而且在加热的条件下也能与氢以后的金属发生作用(Au 除外),例如当硅表面吸附有铜(Cu)时



若在硫酸中加入双氧水( $H_2O_2$ )后,将增强硫酸的氧化能力,不但能有效地去除硅表面沾污的金属原子、有机物、灰尘,而且能使硅片表面氧化:



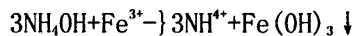
- (2) 用稀释氢氟酸溶液(HF : H<sub>2</sub>O=1 : 1)泡 30 秒, 冲热去离子水 15 分钟。

原理: 氢氟酸主要性质是具有较弱的酸性、易挥发和有很强的腐蚀性。氢氟酸的酸性比盐酸、硫酸、硝酸都弱的多。但它有一个重要的特性是它能溶解二氧化硅。众所周知, 在室温下硅片暴露在空气或水中其表面会生成厚度为几个埃的氧化层, 一般我们叫它为本征氧化层。经过化学机械抛光的硅片表面通常存在 2~10 埃的本征氧化层。这些本征氧化层会融入杂质, 给硅片表面引入沾污, 我们利用氢氟酸的这个特性去除硅片表面的氧化层, 通常使用 1%的 HF 溶液漂洗 15 秒, 但必须使用高质量、无杂质污染的的 HF, 因为刚刚暴露出的硅片表面很容易从 HF 溶液、去离子水和周围的空气中吸附粒子、金属原子和有机物。

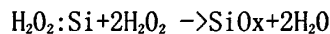
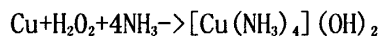
- (3) 用 RCA1 溶液(I 号洗液 NH<sub>4</sub>OH : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O=1 : 2:5)煮至沸腾, 倒掉残液, 用去离子水冲几遍。

原理: 氢氧化钱是氨气的水溶液, 又称为氨水。它是弱碱, 可与酸发生中和反应生成钱盐。例如:  $\text{NH}_4\text{OH} + \text{HCl} \rightarrow \text{NH}_4\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$

它可与许多金属离子(如 Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>等)反应生成不溶性的氢氧化物沉淀。如:



若在氨水中加入双氧水后, 氨水不仅作为碱溶液去除杂质, 更重要的是它充当络合剂的作用, 它能与许多重金属离子(如 Cu<sup>2+</sup>, Ag<sup>+</sup>, CO<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Pt<sup>4+</sup>, Cd<sup>2+</sup>等)发生络合作用, 如:



提供内配位体形成各种可溶性的络合物, 而后清除掉。它既利用了碱性溶液中过氧化氢的强氧化作用, 又利用了氨水的络合作用, 使吸附在硅片上的金属或金属离子氧化以及络合成可溶性物质而后清洗去除。

- (4) 用 RCA2 溶液(II 号洗液 HCl : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O=1 : 2 : 8)煮沸 2~3 分钟, 倒掉残液, 冲热去离子水 15 分钟, 冲冷去离子水 5 分钟。推进器此步清洗如图 3. 16

原理: 它是用高纯去离子水、浓度为 30%的过氧化氢和浓度为 37%的盐酸按一定体积比混合而成的。在酸性溶液中过氧化氢同样具有很强的氧化性, 可使

有机物、无机物等杂质氧化成高价离子或氧化物。显然，盐酸在这里起了酸性溶液作用，是过氧化氢的氧化性能大大增强。盐酸还有另一些重要作用，一是由于它是强酸，所以它能和硅片表面杂质中的活泼金属(如铝、锌等)、许多金属氧化物(如氧化钙、三氧化二铁等)以及硫化物(如硫化铝等)等互相作用，使这些杂质成为溶解性的;另外，盐酸还兼有络合剂的作用，盐酸中的氯离子将为  $\text{Au}^{3+}$ ,  $\text{Pt}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  等金属离子提供内配位体，形成可溶于水的络合物。

这样在 RCA2 溶液中，过氧化氢不断地把杂质氧化成为高价离子或氧化物，而盐酸中的氯离子就把这些高价离子或氧化物络合成为可溶性的络合物，而后由水清洗去除，从而达到清除硅片表面杂质的目的。

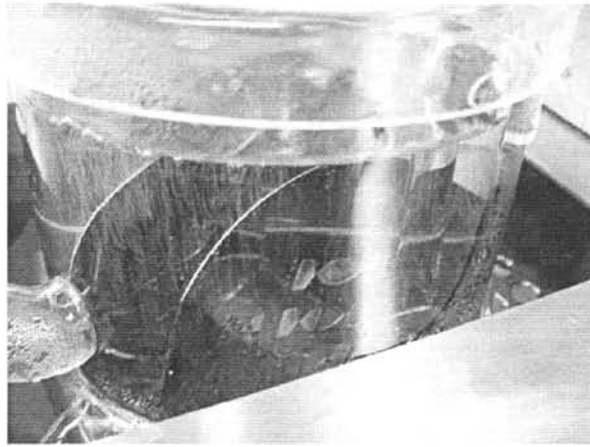


图 3.16 RCA2 清洗

硅硅直接键合片界面的硅氧化物的过渡层厚度不仅由表面清洗处理时硅片表面所形成的氧化硅的厚度所决定，而且也与硅片表面上吸附的羟基多少所决定，即由表面处理后硅片的亲水度来决定。

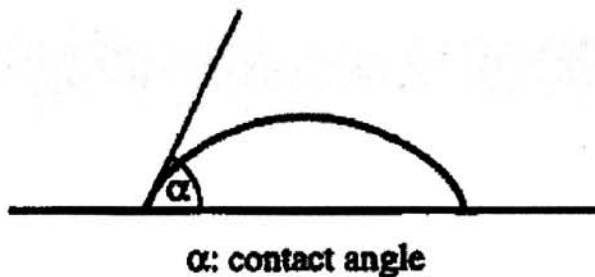


图 3.17 接触角  $\alpha$

硅片表面的亲水性可用硅片表面与水的接触角来测量。图 3.17 为接触角  $\alpha$  概念的示意图。经发现在 RCA1 溶液中煮过后硅片表面的接触角  $\alpha$  大约是  $50^\circ$ ; 如果硅片表面是经 RCA1 和 RCA2 充分处理过, 它的接触角  $\alpha$  是由在 RCA2 中的温度所决定的, 如果 RCA2 溶液温度在  $95^\circ\text{C}$  或低一点时接触角  $\alpha$  大约为  $25^\circ$ , 如果温度为  $100^\circ\text{C}$  时接触角  $\alpha$  大约为  $9^\circ$  [7]。表 4-2 为不同亲水处理硅片表面的接触角大小。从表中可以看出  $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2$  接触角为最小, 从而对硅片表面亲水性处理最好, 处理后表面终端的 OH 也应最多。

#### 3.4.2.2 燃烧腔预键合

预键合是将经过表面清洗处理后的硅片抛光面面面相向贴在一起, 施以一定的初始压力, 以排除界面的空气, 使之由于范德瓦尔斯力(疏水表面)或氢键(亲水表面)贴合, 送入低温(一般室温至  $150^\circ\text{C}$ )下的超净室或充满惰性气体的环境中放置。预键合时间通常比较长, 以保证键合点能充分接触成键。

我们使用 kalsuss 键合机, 过程简图如图 3.18,

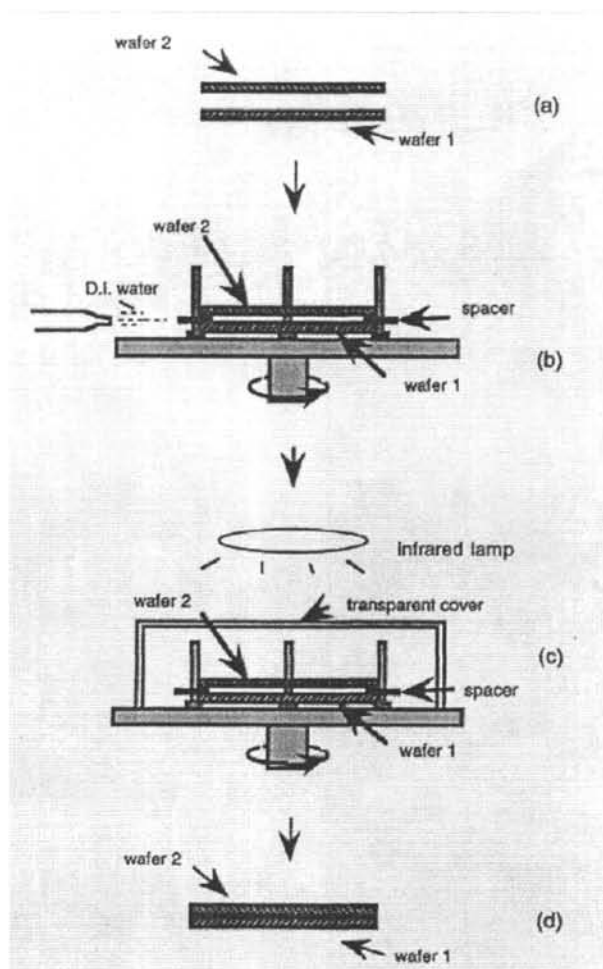


图 3.18 微型超净间预键合过程示意图

红外透射检测方法(IR 检测法)是在检测键合片空洞时最常用的方法,它是一种实时监控的探测方法。图 3.19 为键合片界面空洞 IR 探测系统框图。由于红外光在硅键合片界面空洞与硅材料之间的透射率不同,当一定强度的红外平行光线从键合片一面垂直入射到键合片表面时,在键合片另一面红外摄像仪将收集到该硅键合片透射的红外光,最后成像于监·视器上,就可观察到硅键合片中空洞的大小、形状。硅片本身能透过红外光谱,但随着掺杂浓度的上升,硅键合片厚度的增加,红外光透射率将逐渐减小,红外检测图像观测能力将逐渐降低,这是由于硅片吸收红外光线所造成的。

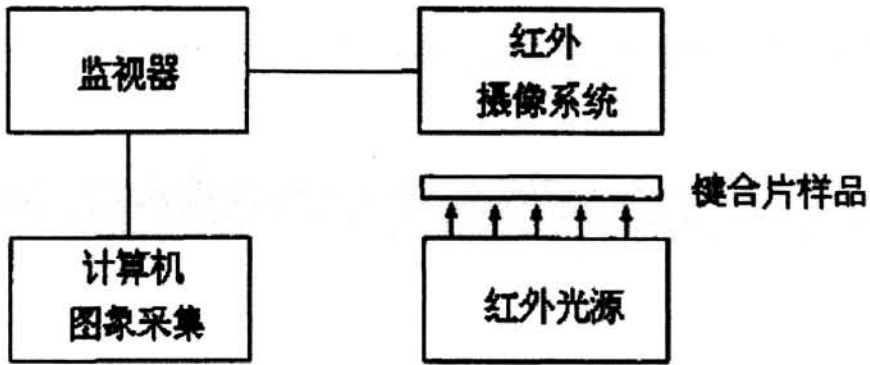


图 3.19 键合硅片界面空洞 IR 探测系统框图

若硅键合片没有空洞的区域，则在显示器上显示出均匀一致的浅色区图像；若有空洞，则红外光线在通过空洞时将产生干涉，使强度变弱，显示出与其形状一致的阴影区图像或牛顿环图像，由此可以观测硅键合片中的空洞。推进器燃烧腔面键合后红外图片如图 3.20，可见结构区基本没有牛顿环，圆片周围有牛顿环出现。并且背面的流道区保持完好如图 3.21，为下一步玻璃冒板的键合打下了很好的基础。

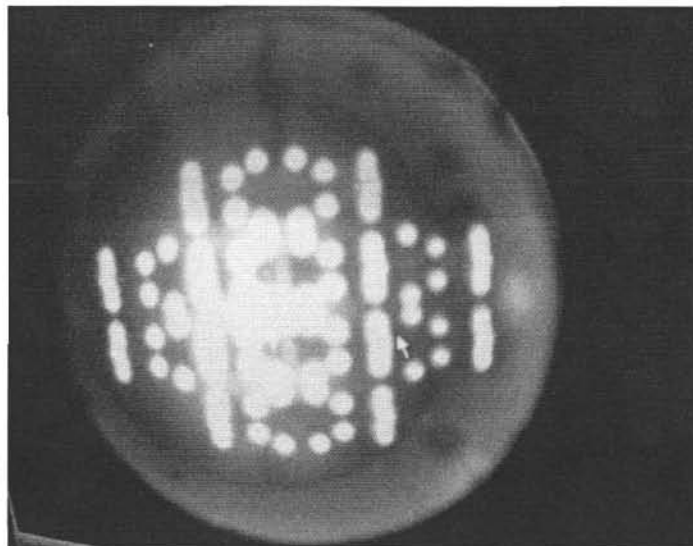


图 3.20 预键合燃烧腔后的红外图（白亮点不是牛顿环，是通孔透光）

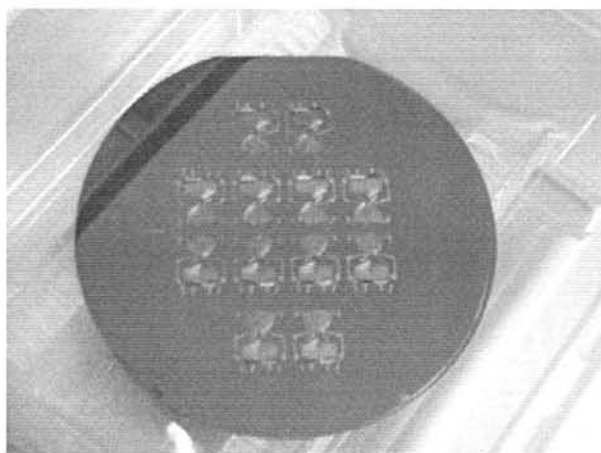


图 3.21 非键合面在高压下未受损伤

### 3.4.2.3 高温退火

高温退火的目的是进一步增强键合强度，将经预键合获得的键合片在较高的温度(温度范围可从几十摄氏度到一千摄氏度以上)和一定的保护气体(通常为  $N_2$ ,  $O_2$  或惰性气体)下进行退火处理，同时需要保证一定的真空度(较高的真空度有利于界面气泡的减少)。温度升高硅片弹性形变增加，引起那些未键合的微小区域键合，使键合强度增加。在很高的温度下，表面的  $SiO_2$  发生塑性变形、固态扩散和粘滞流动，使键合界面的微观间隙逐渐消失，并可能形成共价键，使键合强度增加。因此，为了得到较强的键合强度，键合的退火温度应超过  $900^{\circ}C$ 。如图 3.22 所示为湿氧环境下推进器圆片键合退火的过程，图 3.23 为退火后的红外图形，相比较预键合期由于空洞所呈现的牛顿环进一步减少。

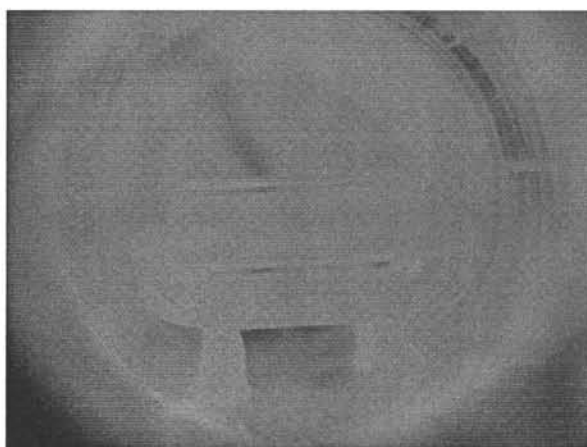


图 3.22 键合湿氧退火

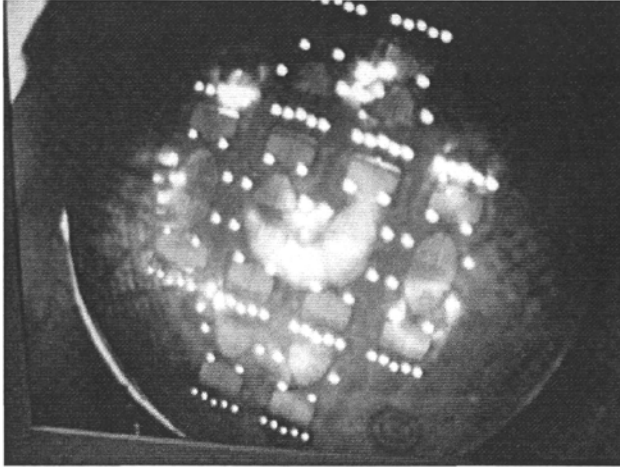


图 3.23 Si-Si 退火后键合红外照片（只在非图形区有牛顿环）

### 3.5 帽板的激光打孔及抛光

由于封闭流道的冒板采用 1mm 厚的 HOYA 玻璃, 直径只有 0.9mm, 而且燃料加注孔和测压孔距离很近, 如果用超声打孔, 精度很难保证, 也很容易导致碎片。考虑到激光的能量集中, 热应力较小, 故采取此方案。

#### 3.5.1 激光打孔基本原理

激光束是亮度（光子简并度）极高、空间相干性很好、时间特性可控的光束, 它以极小的发散度在空间传输。一般用于打孔的激光束发散角（用立体光锥的轴向剖面上的平面角描述）为几个毫弧度。经过光学系统聚焦后, 激光束既可作为一高源热源对材料进行加工处理。在材料被加热到它的熔点或沸点后, 就可以实现在材料上打孔的过程。

#### 3.5.2 最终确定的激光打孔方案

考虑到玻璃片的厚度和材质, 我们采用了 5 段式脉冲激光, 离焦量选择 -0.3mm。具体工作步骤如下:

把激光光闸在开合瞬间释放出的激光看作是一个激光脉冲, 将此脉冲序列分为若干小段: 其中第“1”段为前缘, “2”、“3”、“4”段为稳定输出, “5”段为尾缘, 如图 3.25a 所示。当“1”段脉冲激光束达到并进入材料后, 材料开始被加热。由于材料表面的反射损耗, 加热显得缓慢无力, 通过热量向材料内部传导, 造成周围区域材料的温升, 如图 3.24b 所示。材料的相变以熔化为主。相变区面

积大而深度浅。在“2”段脉冲激光束达到并进入材料后，如图 3.25c 所示，材料相变使加热显得剧烈得多，熔融区面积缩小而深度增加。孔径开始收敛。在第“3”，“4”段脉冲激光束达到并进入材料后，打孔过程相对稳定的进行，如图 3.25d 所示。材料的气化比例剧增至最大程度，从而形成了孔的圆柱段。在“5”段脉冲激光束达到并进入材料后，材料的加热已临近终止，气化及熔化迅速趋于结束，从最终形成了孔的尖锥形孔底，如图 3.24f 所示。图 3.25 所示为整个圆片所有孔加工完毕后的全貌，距离很近的孔之间也没有裂纹。

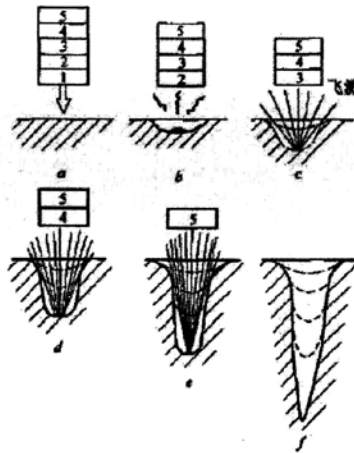


图 3.24 激光打孔形成过程示意图

a-激光脉冲的 5 小段;b-1 段进入;c-2 段进入;d-3 段进入;  
e-4 段进入;f-5 段进入

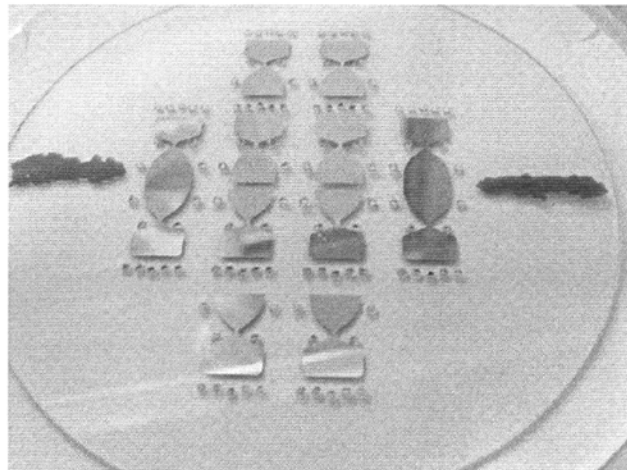


图 3.25 冷却流道小孔整体分布（没有裂纹，光刻胶保护的为键合对准标记）

### 3.5.3 帽板激光打孔异常处理

整个推进器帽板打过程中还应添加与被切材料相适合的辅助气体,惰性气体防止材料在加工过程中与周围空气发生化学变化,活性气体(例如氧气  $O_2$ )与材料发生剧烈的氧化反应产生除激光以外的第二个热源,同时帮助吹走熔渣。从喷嘴中与激光同轴喷出的辅助气体还能冷却聚焦镜片,防止烟尘和其他溅射物进入透镜座内污染镜片并导致镜片过热。

但是由于我们所使用的是单一方向辅助气源,最后一个脉冲时,会造成气流方向热点的偏移,如图 3.26 所示,沿气流方向有明显的尾锥,这个尾锥造成的崩渣高度达到了 100 微米左右,足以影响下一步的硅-玻璃键合,如图 3.27 所示为在加压阶段由此引发的键合裂纹。对尾锥的消除我们结合了减小气源强度和结合氧化铈抛光的方案,既消除了表面的不平整,又把抛光对玻璃的厚度损耗降到最小,图 3.28 为表面处理后孔的形貌,非常平整,对下一步键合打下良好的基础。

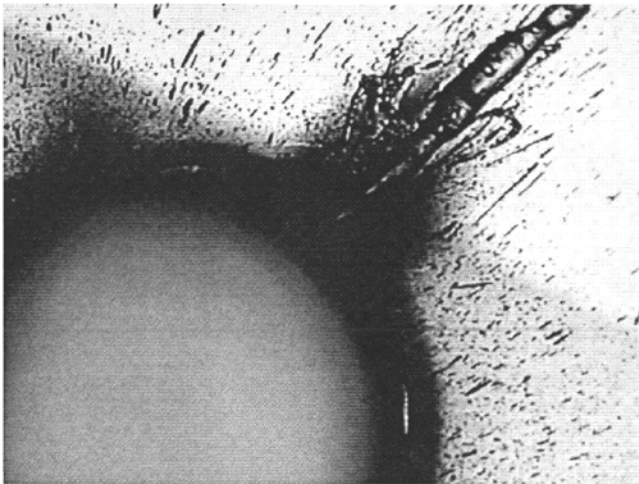


图 3.26 单方向辅助气源造成的切割尾锥毛刺