

硅微电阻电热式推进器的加热电阻的设计制作和试验研究*

唐 飞 王晓浩 叶雄英 周兆英

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 北京 100084)

摘要:在电阻电热式微推进器中,用体硅设计制作了立柱状结构的加热电阻。典型的加热电阻柱横断面积为 $240\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$,高度为 $150\ \mu\text{m}$,沟槽的宽度为 $50\ \mu\text{m}$ 。采用 ICP(诱导耦合等离子)工艺制作。利用杂质半导体材料的电阻率随温度的变化特性,在施加恒流源的情况下,可以使加热电阻的工作温度具有自动调节功能,保持在本征温度附近,避免烧毁电阻。理论分析和试验结果证实了这种加热电阻的可行性及其温度自动调节功能。试验测量的 $74\ \Omega$ 的加热电阻的本征温度为 $550\ \text{K}$,与理论预测值相符。

关键词:MEMS 微推进器 加热电阻 自动调节
中图分类号:V43

0 前言

体积小、重量轻、成本低和性能高的微推进系统是小型航天器的核心。微推进系统由于其结构简单且推力小,可以为小卫星、微小卫星甚至纳卫星提供精确的姿态控制和轨道机动能力。MEMS (Micro electronic mechanical system) 技术的发展使制造微米量级的微喷管成为可能。电阻电热式推进器由于构造简单、易于微型化,且与硅加工工艺兼容,因而成为研究的重点。

通常设计中,加热电阻都采用表面工艺制作在加热腔的腔壁上。如 E. V. MUKERIEE 等^[1]研制的一种以水作工质的电阻电热式微推进器。它是一个硅-玻璃键合而成的双层结构,其气化腔、工质进口和喷管都采用各向异性腐蚀的方法制作在硅片上,与玻璃键合后,形成封闭的腔体。加热电阻制作在硅片表面,如图 1 所示。

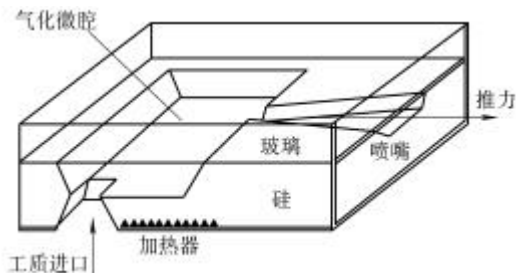


图 1 E. V. MUKERIEE 等研制的微推进器

清华大学精仪系在 1999 年曾研制出国内第一只基于硅片的微推进器^[2]。它是一个由两片硅片组成的结构,上层硅片用体硅加工工艺制造出喷嘴,下层硅片表面制作有金属 Ti 做成的加热电阻,如图 2 所示。

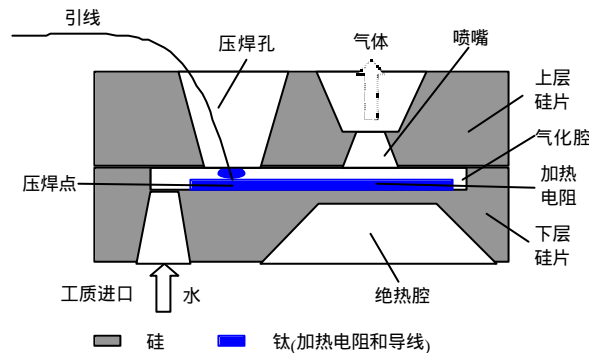


图 2 清华大学研制的微推进器

显然这种采用表面工艺的制作在腔壁上的加热电阻的加热效率是不高的。为了提高效率,获得较高的工质温度,在微推进器的加热腔中利用体硅设计并制作了立柱状结构的加热电阻,使工质在流经加热电阻柱阵列时,可以被充分加热。同时,利用杂质半导体材料的电阻率温度变化特性^[3-4],采用恒流源供电,使微推进器的工作温度具有自动调节功能,避免烧毁加热电阻。

1 结构和工作原理

微推进器加热腔中的立柱状结构的加热电阻如

* 国家 973 计划基金资助项目(G1999033106)。20050118 收到初稿, 20050704 收到修改稿

图 3 所示。为了增加导热面积，并强化对流换热的效果，加热电阻柱断面呈菱形，沿流路交错分布。典型的电阻柱横断面积为 $240\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ ，高度为 $150\ \mu\text{m}$ ，之间沟槽的宽度为 $50\ \mu\text{m}$ ，加热腔大小为 $1\ 000\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ 。加热电阻柱与微推进器加热腔是一个整体，采用 ICP(诱导耦合等离子)工艺一体制作完成。

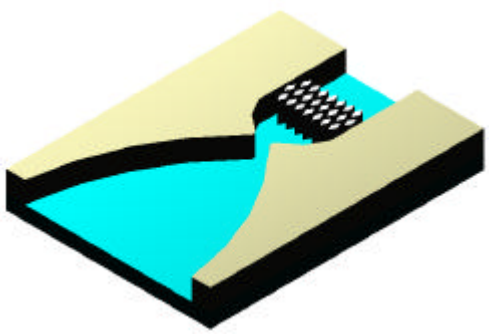


图 3 微推进器喷管及加热电阻结构示意图

单个微推进器外围尺寸为 $4\ 900\ \mu\text{m} \times 4\ 200\ \mu\text{m} \times 1\ 045\ \mu\text{m}$ 。整个结构由一块硅片和一块玻璃经硅-玻璃键合而成。加热腔、微喷管和加热电阻制作在硅片上，组成微推进器的上层。在玻璃上溅射钛铂金，并图形化，形成硅-金电极、内部导线及压焊焊盘，作为微推进器的下层。

硅-玻璃键合后，钛铂金与硅加热柱之间因压力结合而导通。工作时，在加热电阻柱上施加恒流源，电流沿钛铂金-加热电阻柱-加热腔顶部硅片-加热电阻柱-钛铂金的顺序流过硅加热电阻柱，构成电流通路，如图 4 所示，从而在加热电阻柱上产生热量。

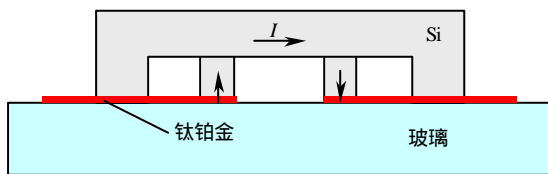


图 4 电流流向

2 硅片的选择

硅微推进器采用体硅做加热电阻，工作时施加恒流源，使加热电阻工作在恒定的温度，须选择合适的硅片。本节首先讨论半导体的电特性。

本征半导体是指没有杂质和缺陷的半导体。当半导体的温度 $T > 0\ \text{K}$ 时，有电子从价带激发到导带，同时价带中产生了空穴，这就是所谓的本征激发。由于电子和空穴成对产生，导带中的电子浓度 n_0 应

等价于带中的空穴浓度 p_0 ，即 $n_0 = p_0$ 。本征载流子浓度可表示为^[5]

$$n_i = n_0 = p_0 = 4.82 \times 10^{15} \times \left(\frac{m_p^* m_n^*}{m_0^2} \right)^{3/4} \times T^{3/2} \times \exp\left(-\frac{b}{2k_0}\right) \times \exp\left[-\frac{E_g(0)}{2k_0 T}\right] \quad (1)$$

式中 m_0 ——电子惯性质量
 m_p^* ——价带顶空穴有效质量(对于 Si, $m_p^* = 0.59 m_0$)
 m_n^* ——导带底电子有效质量(对于 Si, $m_n^* = 1.08 m_0$)
 T ——温度
 k_0 ——玻尔兹曼常数，其值为 $8.69 \times 10^{-5}\ \text{eV/K}$

假设禁带宽度 E_g 随温度线性变化，即 $E_g = E_g(0) + bT$ ，则 $E_g(0)$ 表示外推至 $T = 0\ \text{K}$ 时的禁带宽度， b 为斜率。对于 Si, $E_g(0) = 1.21\ \text{eV}$, $b = -0.000\ 3\ \text{eV/K}$ 。

由于本征载流子浓度随温度迅速变化，用本征材料制作的器件性能很不稳定，所以制造半导体器件一般都用含有适当杂质的半导体材料。对于 n 型半导体，其电阻率 r 可以表示为

$$r = \frac{1}{nq m_n} \quad (2)$$

式中 n ——载流子浓度。轻掺杂时(杂质浓度 $10^{16} \sim 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$)，可以认为载流子浓度近似等于杂质浓度，即 $n \approx n_d$
 q ——电子电荷，其值为 $1.602 \times 10^{-19}\ \text{C}$
 m_n ——电子的迁移率。迁移率随杂质的变化不大，可以认为是常数。300 K 时，Si 的电子迁移率 $m_n = 1\ 350\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$

对杂质半导体，有杂质电离和本征激发两个因素存在，又有电离杂质散射和晶格散射两种散射机构的存在，因而电阻率随温度的变化关系比较复杂，图 5 表示了一定杂质浓度的硅样品的电阻率和温度的关系^[5]。

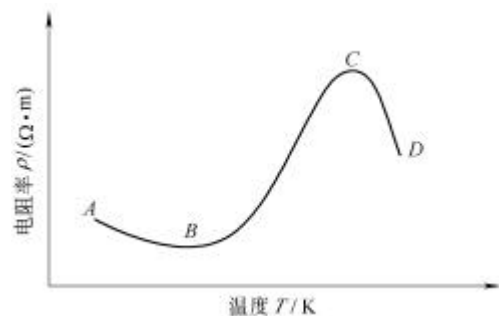


图 5 硅样品的电阻率和温度的关系

曲线大致分为三段。

AB段 温度很低,本征激发可忽略,载流子主要由杂质电离提供,它随温度升高而增加;散射主要由电离杂质决定,迁移率也随温度升高而增大,所以,电阻率随温度升高而下降。

BC段 温度继续升高,杂质已全部电离,本征激发还不十分显著,载流子基本上不随温度变化;晶格振动散射上升为主要矛盾,迁移率随温度升高而降低,所以电阻率随温度升高而增大。

CD段 温度继续升高,本征激发很快增加,大量本征载流子的产生远远超过迁移率减小对电阻率的影响,这时,本征激发成为矛盾的主要方面,杂质半导体的电阻率将随温度的升高而急剧地下降,表现出同本征半导体相似的特性。*C*点的温度称为本征温度。

在本征载流子浓度没有超过杂质电离所提供的载流子浓度的温度范围内,载流子主要来源于杂质电离,而将本征激发忽略不计。但是随着温度的升高,本征载流子浓度迅速增加。当温度足够高时,本征激发占主要地位。要保持载流子主要来源于杂质电离,则要求本征载流子浓度至少比杂质浓度低一个数量级^[5-6]。因此,可以将本征载流子浓度比杂质浓度低一个数量级时所对应的温度,认为是硅片的本征温度。很明显,杂质浓度越高,本征温度也越高。基于以上分析,结合式(1)可以画出硅片的掺杂浓度与本征温度之间的关系曲线如图6所示。

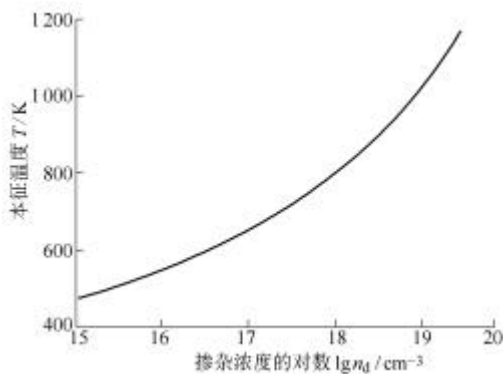


图6 掺杂浓度的对数与本征温度的关系

利用杂质半导体的电阻率随温度的这种变化关系,设计了具有温度自动调节功能的加热电阻。其工作原理如下:采用恒流源供电。随着温度的升高,加热电阻也越来越大(*BC*段),由公式 $P = I^2 R$ 可知,电阻产生的热功率也越大,温度将不断升高,直到到达本征温度点*C*。之后杂质半导体的电阻率将急剧下降,从而产生的热功率也将迅速降低,温度随之下降。如此往复,最终温度将稳定在本征温度附

近。这种温度自动调节功能带来的好处是,可以不必担心微推进器的加热电阻因温度过高而烧毁。

由于提高工作温度可以提高微推进器的比冲。因而,在选择硅片时,希望硅片的本征温度要高,从而要求硅片的杂质浓度要高,由式(2)可知,硅片的电阻率将减小。但是如果硅片的电阻率太小的话,对外部电源电路的要求就会很高(否则会有很大一部分功率消耗在电源内部,对于微卫星而言,这是很难接受的)。因此对于硅片的电阻率,要有一个折中的选择。

选用的硅片的电阻率为 $0.55 \sim 0.80 \Omega \cdot \text{cm}$;从式(2)可以求得硅片的掺杂浓度为 $5.78 \times 10^{15} \sim 8.41 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$;由图6可以得到硅片的本征温度接近550 K。对应的加热电阻为 $76 \sim 112 \Omega$ 。

3 工艺流程及加工结果

该微推进器的制作工艺简单,仅需3步光刻,因而加工周期短,成品率高。图7列出了微推进器的制作工艺流程。选用厚度为 $525 \mu\text{m}$ 的102 mm单面抛光n型单晶硅片和厚度为 $520 \mu\text{m}$ 的102 mm Pyrex玻璃。首先对硅片进行扩散、氧化、图形化、体硅腐蚀 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 和去氧化层工艺,如图7a所示;再进行蒸镀铝、图形化、ICP $150 \mu\text{m}$ 并去铝,在硅片上制作出喷管、加热腔和加热电阻,如图7b所示。然后对玻璃进行图形化、溅射钛铂金并剥离,在玻璃上制作出导线及压焊盘,如图7c所示。之后进行硅-玻璃键合,形成喷管、加热腔和加热电阻,如图7d所示。

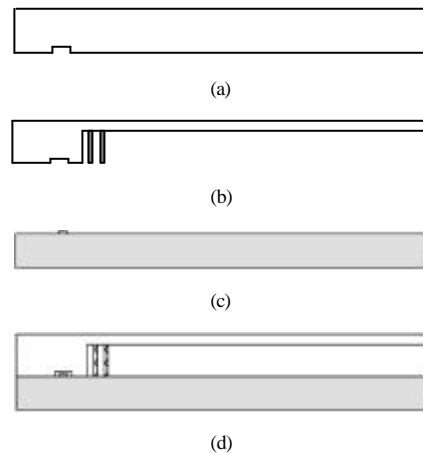


图7 微推进器制作工艺流程

图8是ICP刻蚀后的微推进器硅主体结构在未封装时的SEM照片,从中可以清楚地看到加热电阻的结构。

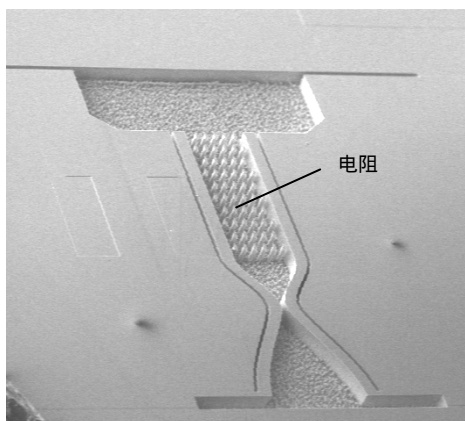


图 8 微推进器的 SEM 照片

4 试验

试验中,微推进器被用耐高温胶粘在印刷电路板上,并通过压焊线将电流从外部印刷电路板引入到微推进器的加热电阻柱上。

温度数据由铂铑-铂热电偶采集,热电偶直接用 SilverGoop 作为粘结剂固定在硅片上。用清洁的水制成冰屑与清洁的水相混合放在保温瓶中,使它们达到热平衡,并将热电偶的两参考电极分别插在冰水混合物中的两根玻璃试管的底部,并与底部存有少量清洁的水银相接触。

恒流源采用 DH1724A 系列稳压稳流电源。其最大输出电流为 1.5 A,最大输出电压为直流 350 V。热电偶读数、电压值及电流值均被多通道采集器读出到计算机中进行处理。温度试验系统如图 9 所示。

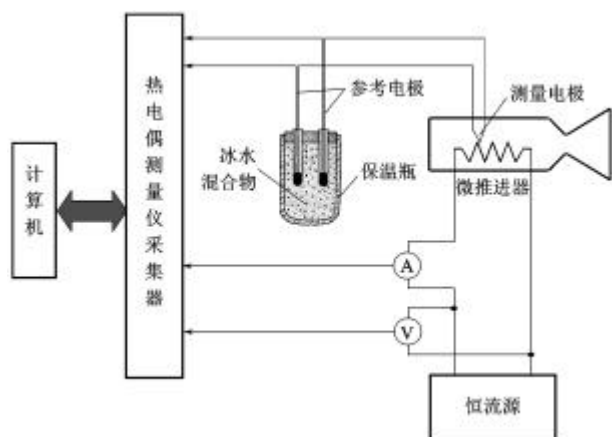


图 9 温度试验系统

采用上述试验系统,对微推进器加热电阻在恒流源作用下的温度特性进行了测量。试验选用的微推进器在常温下加热电阻的实测值为 74 Ω 。

图 10 是外部施加电流随时间的变化。试验中使恒流源的供给电流随时间逐步增大,图 11 和图 12 是在图 10 所示的电流载荷下,加热电阻的温度和加热电阻值随时间的变化图。

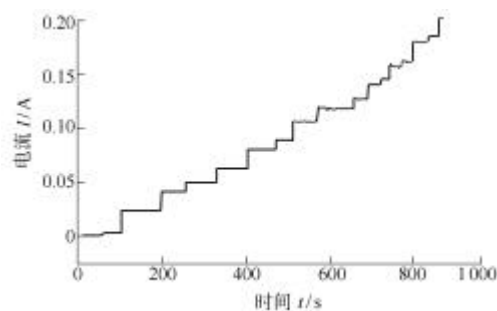


图 10 施加电流随时间的变化

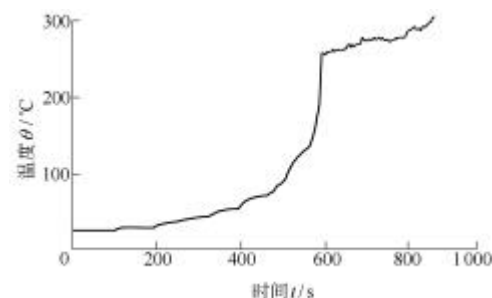


图 11 加热电阻的温度随时间的变化

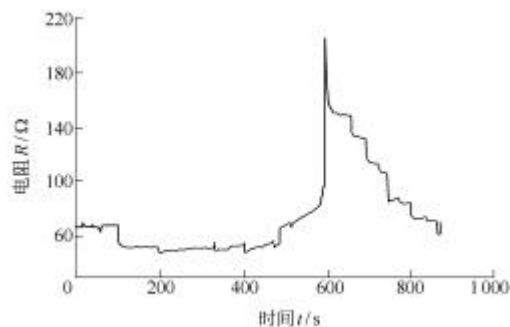


图 12 加热电阻值随时间的变化

图 11 显示,随着施加电流的增加,加热电阻的温度在起始阶段缓慢上升,然后在一临界时间点迅速升高到一个临界值,随后稳定在该值附近,即使电流持续增加,温度也基本保持不变。这说明所设计的加热电阻具有温度自我调节功能。这个稳定的温度值就是加热电阻的本征温度点。由试验结果可知,见图 11,测得的加热电阻的本征温度为 550 K 左右,与前面的理论预测值一致。

图 12 显示的是加热电阻值随时间的变化,从另一个侧面也说明了电阻的自动温度调节效应。由图 12 可见,随着电流的增加,加热电阻值首先逐渐减小,之后逐渐增大,在达到本征温度点时,电阻急剧上升,之后又随电流增加快速下降,而温度则基本保持在本征温度附近。这说明加热电阻利用自身的电阻随温度的变化可以有效地进行温度的自我调节。

5 结论

设计并制作了立柱状结构的体硅加热电阻,工

质在流经加热电阻柱阵列时，可以被加热电阻柱充分加热，以提高加热效率。硅-玻璃键合的两层设计方案使加工工艺简化、结构简单紧凑。

通过分析半导体的电阻随温度的变化规律，选择了电阻率为 $0.55 \sim 0.80 \Omega \cdot \text{cm}$ 的硅片，其本征温度接近 550 K。利用杂质半导体材料的电阻率随温度的变化特性，采用恒流源供电，可以使加热电阻的工作温度具有自动调节功能，稳定在本征温度附近。

利用基于热电偶测量的温度试验系统对在恒流源作用下的微推进器加热电阻的温度特性进行了研究。试验结果充分证实了利用杂质半导体材料制作的加热电阻的可行性及其温度自动调节功能。试验测量的 74Ω 的加热电阻的本征温度为 550 K，与理论预测值相符。

参 考 文 献

- [1] MUKERJEE E V, WALLACE A P, YAN K Y, et al. Vaporizing liquid microthruster[J]. *Sensors and Actuators*, 2000(83): 231-236.
- [2] YE X Y, TANG F, DING H Q, et al. Study of vaporizing water micro-thruster[J]. *Sensors and Actuators A*, 2001(3): 159-165.
- [3] ROBERT L B, HARTFORD E. Analysis and testing of a silicon intrinsic-point heater in a micropropulsion application[J]. *Sensors and Actuators A*, 2001(91): 249-255.
- [4] ROBERT L B. Analysis, fabrication and testing of a MEMS-based micropropulsion system[D]. MIT, 1999.
- [5] 刘恩科, 朱秉什, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 第4版. 北京: 国防工业出版社, 1994.

- [6] 吴士忠. 半导体物理[M]. 南京: 江苏科学出版社, 1986.

DESIGN, FABRICATION AND EXPERIMENT OF A HEATING RESISTOR IN SILICON-BASED MICRO-RESISTOJET

TANG Fei WANG Xiaohao
YE Xiongying ZHOU Zhaoying

(State Key Laboratory of Precision Measurement
Technology and Instruments, Tsinghua University,
Beijing 100084)

Abstract: A rhombic column heater, with the cross section area of $240 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$, the height of $150 \mu\text{m}$ and the gap width of $50 \mu\text{m}$, is designed and fabricated by ICP technology. It takes full advantage of the characteristics of the specific resistance-temperature variance of extrinsic semiconducting material to add the automatic thermoregulation function to the microthruster heating system, keep the temperature near the intrinsic point, and avoid the heater sintering by overheat, when constant current is supplied. The feasibility of the heater and the automatic thermoregulation function are already verified by the theoretical analysis and the experimental result. The intrinsic temperature of the tested heater with resistance of 74Ω is 550 K, which is consistent with the theoretical value.

Key words: MEMS Microthruster Heating resistor
Self-regulation

作者简介: 唐飞, 男, 1973 年出生, 讲师。主要研究方向为微系统设计和工艺、精密测量和控制技术。

E-mail: tangf@mail.tsinghua.edu.cn