

研究论文

微机电系统中的矩形通道内微气泡控制生长

董涛^{1,2}, 杨朝初³, 毕勤成³, 张玉龙¹, 谷丹丹¹, 张春权¹¹ 厦门大学萨本栋微机电研究中心, 福建 厦门 361005; ² 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; ³ 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 采用微机电系统 (MEMS) 硅加工工艺, 设计、加工出了 6 种不同规格的实验用微气泡控制生长 MEMS 器件; 构建了 MEMS 器件中微气泡控制生长实验系统并完成了实验, 讨论了热负荷、微加热元宽度、微通道截面参数、工质流速及物性参数等对微气泡生长的影响。结果表明: 同等实验条件下, 加热电压幅值越高, 微气泡生长速率越快; 加热脉冲宽度仅对微气泡形成后的进一步生长有影响; 加热条件相同的前提下, 微加热元宽度越大, 气泡成核所需的时间越短、微气泡生长速率越快; 微通道宽度一定且高宽比大于 1 的条件下, 高宽比越小, 后期微气泡生长速率越慢; 微流体的流速越高, 微气泡生长始点越晚、生长速率也越低。相同实验条件下, R113、FG-72、去离子水三者中, R113 中微气泡生长始点最靠前、生长速率最快, 去离子水中微气泡生长最靠后、生长速率最慢。

关键词: 微机电系统; 微流体相变; 微气泡生长; 微小有限空间; 矩形微通道

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 01-0054-07

Micro-bubble controlled growth in rectangular microchannel of micro-electro-mechanical systems

DONG Tao^{1,2}, YANG Zhaochu³, BI Qincheng³, ZHANG Yulong¹, GU Dandan¹, ZHANG Chunquan¹¹ Pen-Tung Sah Micro-Electro-Mechanical Systems Research Center,Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; ² State Key Laboratory of ExplosionScience and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; ³ State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: With the silicon microfabrication process, six micro-electro-mechanical systems (MEMS) devices for exploring micro-bubble growth were designed and fabricated. Experimental investigations of micro-bubble growth in micro restrained space were performed. The results showed that the micro-bubble growth rate was influenced by heat power, dimensions of microheater, microchannel section, microfluidic velocity, and materials of the fluid. A higher heating voltage resulted in faster bubble growth. The width of heating pulse took effect during the latter period of bubble growth. Under the same heating voltage and pulse width, a larger width of the microheater led to faster bubble growth. When the aspect ratio of the microchannel section was over 1.0, a smaller aspect ratio brought on slower bubble growth during the latter period. The larger the microfluidic velocity, the later the bubble growth start point, and the slower

2006-06-28 收到初稿, 2006-08-23 收到修改稿。

联系人及第一作者: 董涛 (1978-), 男, 工学博士, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50406019); 中国博士后科学基金项目 (2004035669); 江苏省博士后科学研究资助计划项目 (苏人通 2004 [计] 300 号)。

Received date: 2006-06-28.

Corresponding author: DONG Tao. E-mail: dongtao@mail.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50406019).

the bubble growth Under the same test condition, the bubble growth rate of R113 was the largest among the three working fluids, followed by FG-72 and deionized water, due to the effect of thermophysical parameters of the fluids.

Key words: MEMS; microfluidic phase change; micro-bubble growth; micro restrained space; rectangular microchannel

引 言

微机电系统 (MEMS) 中微气泡的成核、生长过程是典型的微流体相变现象。利用 MEMS 器件流路中的微小有限空间, 控制热气泡的生长, 可实现将微气泡生长过程所释放的膨胀功用于: MEMS 器件中微流体的驱动源, 如, 微气泡驱动的生物颗粒致动器^[1]、微生物分析系统混合致动器^[2], 等; 开发新型微流体功能器件, 如, 微气泡驱动的机械执行器、相变型热驱动微泵^[3]、热/光驱动的微泵, 等。Lin^[4]、Yang 和 Tsutsui^[5] 曾评述过微气泡驱动的应用前景。此外, 微气泡在超声波医学诊断和治疗时也有应用^[6]。

美国、日本、韩国以及中国香港的研究者都曾报道过微气泡生长的实验研究^[7-14]。总结他们的研究工作, 具有如下特点: 实验手段无一例外地采用显微可视化技术, 以方便获取微观图像^[7-14]; 实验器件加工多采用 MEMS 工艺, 微加热器均为多晶硅或 Pt 膜, 以便检测加热器的表面温度^[8, 13-14]; 实验对象多是针对浸没在液体中的微加热器表面的气泡生长, 即: 局部面热源或线热源作用下的大空间池沸腾气泡成核、生长、合并过程^[11-12]。

考虑 MEMS 器件中水力直径小至微米级的流路对气泡成核、生长、运动的影响, 本文针对矩形微通道内气泡生长特点, 设计加工实验器件, 完成微气泡控制生长实验, 讨论和分析微通道内气泡生长的影响因素, 为新型微气泡驱动 MEMS 器件的设计提供依据。

1 微气泡控制生长 MEMS 器件的设计、加工

本文将加热元、温度传感等元件采用标准 MEMS 工艺集成到实验器件内, 设计、加工出的微气泡控制生长实验器件为“三明治”结构, 如图 1 所示, 由玻璃盖板、微通道侧壁层、微

通道底壁层键合而成。玻璃盖板上设有宏、微流体接口; 材料为 PyrexTM 7740, 全透光, 便于实现可视化。侧壁层和底壁层均为 (110) 硅片, 厚度为 400 μm 。

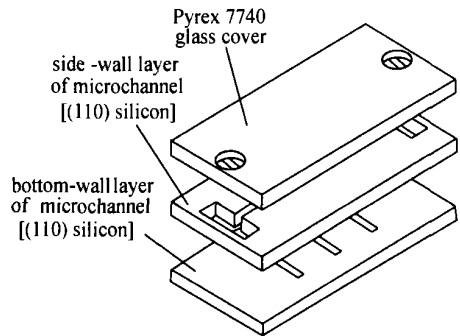


图 1 微气泡控制生长 MEMS 器件结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of MEMS devices for micro-bubble controlled growth

微通道侧壁层的上下表面蚀刻至通透。侧壁层底部布置有微加热元转接引线; 转接引线和引出电极用于连接外加电压和微加热元, 材料为 Au, 厚度分别为 0.05 μm 和 0.2 μm 。微通道底壁层上布置有微加热元、微温度传感阵列、引出电极、封装引线孔。微加热元材料为 Pt, 垂直于流动方向布置, 数目为 3~5 个, 厚 0.4 μm ; 微加热元同时也作为测温元件使用。图 2 显示了 1 组微加热元阵列在体视显微镜下的照片。

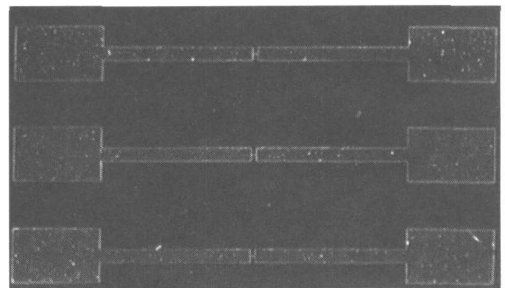


图 2 微加热元阵列显微照 ($\times 50$)

Fig. 2 Micrograph of microheater array ($\times 50$)

2 MEMS 器件中微气泡的管内控制生长实验

2.1 微气泡控制生长实验系统

微气泡控制生长实验系统布置如图 3 所示：直流电源和脉冲发生器通过高增益转换器，给微加热元提供具有一定脉冲宽度的加热电压；脉冲发生器同时给数据采集板传送脉冲信号，以激发数据采集程序进行电压信号的采集和存储。

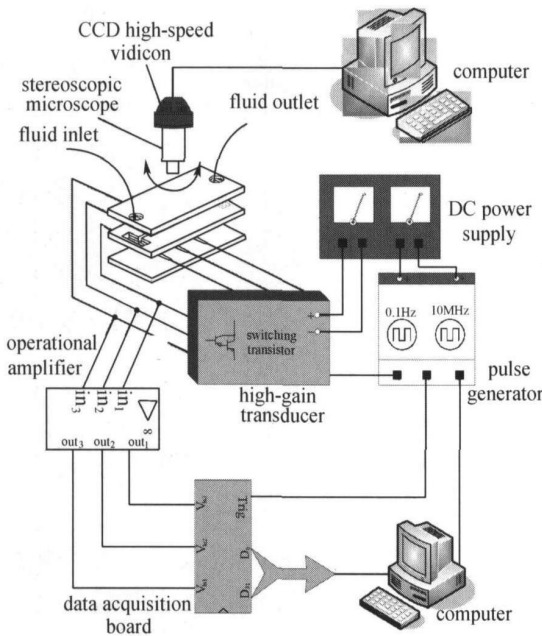


图 3 微气泡控制生长实验系统

Fig 3 Test loop of micro-bubble controlled growth

显微可视化系统由 SZ45-B1 体视显微镜、高速 CCD 摄像机以及图形捕捉卡构成：微气泡生长的动态图像经由体视显微镜的光路放大后，由高速 CCD 摄像机感光后生成数字图像，通过图形捕捉卡在显示器上实时显示，并实现动态存储。体视显微镜总放大倍数为 2~ 225。

微气泡控制生长实验开始时，调整直流电源输出电压到预定值，接通脉冲控制电路，给微加热元进行加热；脉冲电压加到微加热元上的同时，CCD 高速摄像机开始动态记录气泡生长过程的图像，并存储到计算机的硬盘中^[15]。

2.2 微气泡控制生长 MEMS 器件几何参数

实验中用到的 6 种微气泡控制生长实验器件的结构参数，如表 1 所示。

表 1 微气泡控制生长实验器件结构参数

Table 1 Parameters of MEMS device for micro-bubble growth

Section	W_{heater} / μm	L_{heater} / μm	W_c / μm	H_c / μm
A	3	60	60	150
B	5	60	60	150
C	8	60	60	150
D	3	60	60	120
E	3	50	50	120
F	3	50	50	100

2.3 微气泡控制生长实验参数测量

2.3.1 加热电流与加热电压 微加热元的加热电压由直流电源（型号：DF1731SB）提供；微加热元上的电流采用数字式示波器（型号：GDS-840C）测量；加热电压由 NITM 5112 型高速数据采集系统测量。

2.3.2 微加热元表面温度 微加热元（Pt 电阻）具有稳定的电阻-温度特性，通过测定微加热元两端的电压降变化，可确定微加热元的电阻值，再由 Pt 电阻的温度-电阻曲线确定微加热元表面温度。对于温度系数为正值的 Pt 电阻温度传感器，其电阻-温度特性可以写成：

$$R = R_0 [1 + \zeta (T - T_0)] \quad (1)$$

式中 R 为 Pt 电阻在温度 T 时的阻值； R_0 为参考温度 T_0 时的阻值； ζ 为电阻温度系数。本文利用 HP4145 型半导体参数分析仪在真空恒温箱内，对一典型微加热元（长 60 μm 、宽 8 μm ）标定得到： $\zeta = 0.00325 \Omega \cdot \text{K}^{-1}$ 。

2.3.3 微流体流速 微气泡控制生长实验器件的两端分别装有两个注射器。进行低 Reynolds 数条件下的微气泡生长时，在入口注射器的活塞上加一个恒定的力（加一个砝码），使活塞极缓慢地移动；由实验过程中注射器活塞扫过的容积和微流道的流通截面积，来确定微流体的平均流速。

设微通道高为 H_c 、宽为 W_c ，注射器活塞直径为 D ， Δt 时间内的位移为 S ，则微流体的平均流速 \bar{u} 可按式 (2) 估算

$$\bar{u} = \frac{V}{\Delta t} = \frac{\pi D^2 S}{4W_c H_c \Delta t} \quad (2)$$

微流体流动的平均 Reynolds 数为

$$\text{Re} = \frac{\rho_1 \bar{u} D_h}{\mu_1} = \frac{\rho_1 \pi D^2 S}{2\mu_1 (W_c + H_c) \Delta t} \quad (3)$$

2.3.4 微气泡几何尺寸 微气泡的几何尺寸，根据体视显微镜获得的微气泡在水平面上的投影图像

来确定。以微加热元长度为参照对象 [微通道宽度相等, 实验中两种微加热元长度分别为 $(60 \pm 1) \mu\text{m}$ 、 $(50 \pm 1) \mu\text{m}$], $50 \mu\text{m}$ 相当于 15 个像素点, 每个像素点相当于 $3.33 \mu\text{m}$ 。因此, 通过确定微气泡投影面积的像素点, 利用 Media Cybernetics 公司的图像分析软件 Image-Pro Plus 5.0.2 测量得到微气泡面积。

确定微气泡面积的测量误差主要来自像素点的数目; 微气泡几何尺寸的测量误差为 ± 1 像素点。

2.4 微气泡控制生长实验工质和实验参数

实验中采用的工质为 R113、FG-72 和去离子水, 其中 R113 的物性数据取自 NIST REFPROP 6.01^[16], FG-72 的物性数据为 25°C 的值^[17], 去离子水的数据取自文献 [18] 中的附录。表 2 给出了微气泡控制生长实验参数范围。其中, 加热电压幅值和脉冲宽度在正式实验之前, 通过预先实验确定。

表 2 微气泡控制生长实验参数

Table 2 Test parameters of micro-bubble growth

Parameter	Value
heating voltage U/V	8, 10, 12
heating pulse width τ/ms	0.8, 1.0, 1.2, 1.5
original temperature $T_0/^\circ\text{C}$	20
Re	0.001–0.1

3 矩形微通道内微气泡的控制生长实验结果与分析

3.1 微气泡生长过程

图 4 显示了典型的微气泡生长图像 (工质为 FG-72、器件 A): $t = 140 \mu\text{s}$ 时, 微气泡初步形成; $t = 180 \mu\text{s}$ 时, 微气泡逐渐长大; $t = 190 \mu\text{s}$, 微气泡继续生长, 向微通道壁面贴近; $t = 220 \mu\text{s}$, 微气泡恰好与微通道竖直壁面相切。当微气泡继续增大, 由于受到微通道竖直壁面的限制, 气泡只能沿微通道壁面向上、向前、向后生长。这表明: 当微气泡的直径增大到与微通道的水力直径相当时, 微气泡的生长必然受到微通道壁面的限制, 不再保持圆球的形状; 此后, 微气泡的生长规律将有别于大空间的池沸腾情形。

图 5 给出了微气泡生长过程中典型的加热元表面瞬态温度曲线 (加热功率为 10.5 mW , 器件 A,

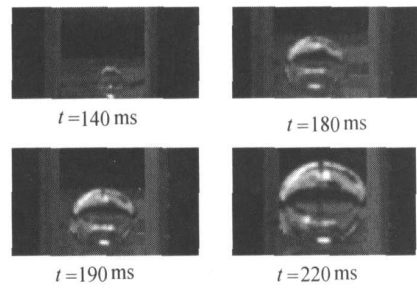


图 4 微通道内气泡典型生长过程 (器件 A, 加热功率 10.5 mW)

Fig 4 Typical bubble growth in microchannel (Section A, with heating power at 10.5 mW)

工质为 R113): 微加热元表面温度随持续加热迅速升高, 在 $t = 138 \mu\text{s}$ 时突然降低约 10 K , 然后再缓慢上升, 呈“V”形; 微加热元表面温度突然降低的时刻, 即为微气泡生长始点, 由于饱和液体蒸发吸热, 导致微加热元表面温度降低; “V”字顶点对应的时刻 ($t = 145 \mu\text{s}$), 微气泡初步形成。这与 Deng 等^[14]、Tsai 和 Lin^[8] 观察到的实验现象一致。

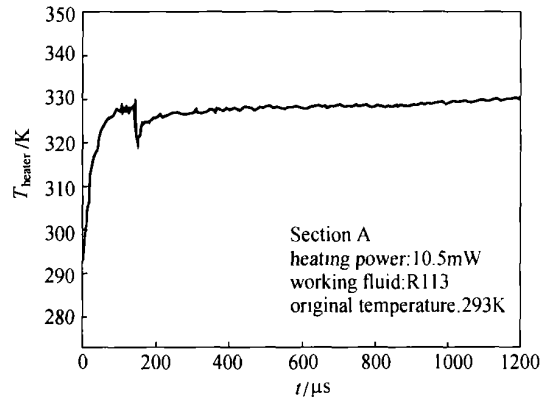


图 5 微气泡生长过程中典型的微加热元表面瞬态温度曲线

Fig 5 Typical transient temperature curve at microheater surface during micro-bubble growth

在实验中同时观测到: 对于器件 A, 当加热功率由 10.5 mW 增大为 12.5 mW 时, 微加热元表面的瞬态温度平均升高约 $2 \sim 3 \text{ K}$, 曲线“V”形明显左移, “V”字顶点出现在约 $t = 135 \mu\text{s}$ 时刻; 在同样的初始条件和加热功率 (10.5 mW) 下, 器件 B 和器件 C 所得的加热元表面瞬态温度均比器件 A 要低, 其中的“V”形相对于器件 A 明显右移。这表明: 对确定的器件, 加热功率对微气泡生长的始点起决定作用; 同等实验条件和加热功率情况下, 加热元宽度越大, 加热元表面温度越低, 微气泡生

长始点越晚。

3.2 微加热元热负荷的影响

3.2.1 加热电压幅值 图 6 给出了不同加热电压幅值条件下得到的微气泡生长曲线 (加热脉冲宽度为 $1200 \mu\text{s}$, 工质为 R113): 微气泡生长始点发生在约 $140 \mu\text{s}$, 此后随着加热的继续, 微气泡迅速增大; 微气泡生长速率随时间逐渐减缓。其原因可能是: 微加热元附近的工质温度相对较高, 微气泡生长初期主要在靠近加热元附近的流体中长大, 因而生长速率较快; 当微气泡生长到一定程度, 气泡周围的工质温度较低, 气泡界面上发生的凝结率增大, 从而使得微气泡生长速率减慢。

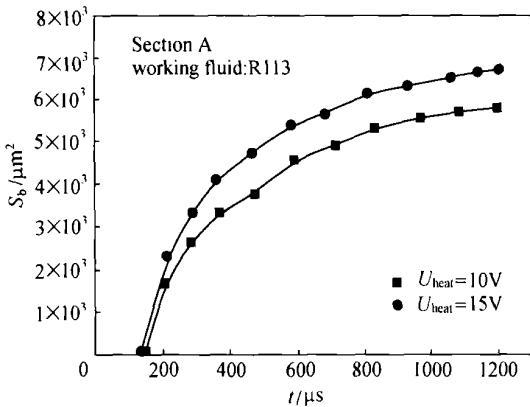


图 6 不同加热电压幅值时的微气泡生长 ($T_0 = 20^\circ\text{C}$)

Fig. 6 Micro-bubble growth under different amplitude of heating voltage ($T_0 = 20^\circ\text{C}$)

3.2.2 加热电压脉冲宽度 图 7 给出了相同加热电压幅值 ($U = 10 \text{ V}$)、不同脉冲宽度条件下得到的微气泡生长曲线: $t = 800 \mu\text{s}$ 之前的 3 条曲线基本上较为吻合; 当 $t > 800 \mu\text{s}$ 和 $t > 1000 \mu\text{s}$, 两个较短加热脉冲宽度的曲线依次出现了分叉, 这是由于停止加热后, 气泡界面上蒸气的凝结, 微气泡的体积迅速减小, 导致微气泡面积减少。因此, 加热电压的脉冲宽度对于微气泡生长的初期并无影响, 只对维持微气泡生长和微气泡的生命周期有影响。

3.3 微加热元宽度的影响

图 8 给出了以 R113 为工质、相同加热条件下 (加热电压 10 V 、脉冲宽度 $1200 \mu\text{s}$), 分别从实验器件 A、C、E 得到的不同加热元宽度对微气泡生长速率的影响: 微气泡生长初期, 微加热元宽度越大, 微气泡的生长速率越高; 而在微气泡生长后期, 微加热元宽度越大, 微气泡的面积也越大, 但

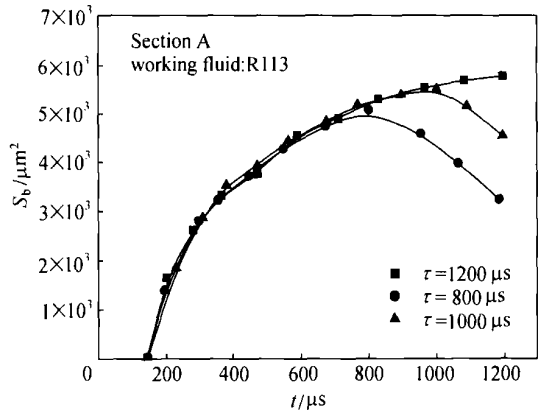


图 7 不同加热脉冲宽度条件下的微气泡生长 ($U = 10 \text{ V}$)

Fig. 7 Micro-bubble growth under different pulse width ($U = 10 \text{ V}$)

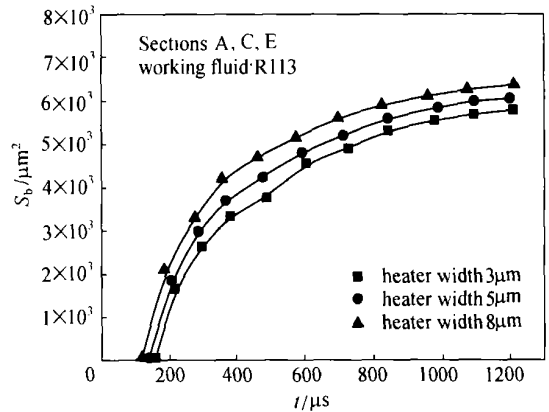


图 8 微加热元宽度对微气泡生长的影响

Fig. 8 Micro-bubble growth under different heater width

是微气泡的生长速率基本相同。值得注意的是: 微加热元宽度越大, 微气泡开始生长的时间也越早, Lee 等^[9]在对池沸腾微线形加热元上的气泡成核实验中也观察到类似的现象。

图 8 中的曲线是在加热电压幅值、脉冲宽度相同的条件下得到的; 对于仅是宽度不同的微加热元, 宽度越大则电阻越小, 加热功率也越大, 因而微气泡生长始点更早、速率更高。

3.4 微通道截面的影响

矩形微通道的截面特征可用高宽比 α 来表示:

$$\alpha = H_c / W_c \quad (4)$$

图 9 显示了 α 对气泡生长规律的影响 (工质为 R113, 器件 A 和 D): 生长初期, 两器件中的微气泡生长速率基本一致; 在生长后期, α 较小的器件中微气泡面积增大速率明显减缓。其原因可能是,

当 $\alpha > 1$, 在 α 较小且宽度相同的微通道内, 气泡更早地受微通道顶壁的限制, 此后气泡生长沿微通道轴向伸长; 沿微通道轴向的微气泡两端面距离微加热元较远, 液体温度相对较低, 界面上的蒸气凝结加剧, 从而导致气泡生长速率减缓。器件 E 和 F 也表现出相似的实验结果。

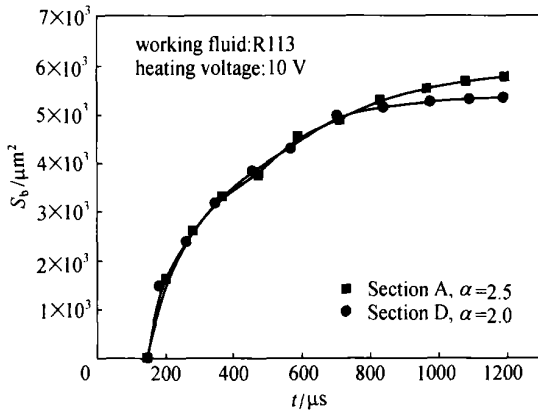


图 9 微通道截面高宽比对微气泡生长的影响
Fig 9 Micro-bubble growth under different microchannel aspect ratio

3.5 工质流速的影响

图 10 给出了不同 Reynolds 数下微气泡的生长曲线的对比: 工质流速越大, 微气泡生长的速率越缓慢, 微气泡成核所需的时间也越长。其原因可能是: 流速越高, 微加热元附近的液体需要更长时间才能达到过热状态, 导致微气泡成核的等待时间增加; 工质流动使得加热元附近的过热液体层变薄, 导致微气泡生长速率减缓。

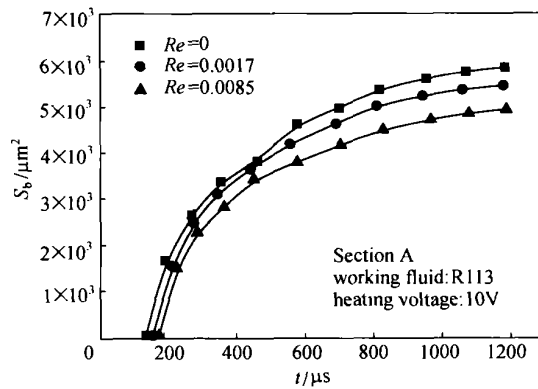


图 10 工质流速对微气泡生长的影响
Fig 10 Micro-bubble growth under different fluid velocity

3.6 工质物性的影响

微加热元表面微气泡成核的先决条件是: 微加

热元表面形成过热的液体微层。同等实验条件下, 以 R113、FG-72 和去离子水为工质得到的微气泡面积增大速率对比如图 11 所示: R113 中微气泡最先开始生长 ($t = 145 \mu s$), FG-72 其次 ($t = 184 \mu s$), 去离子水再次 ($t = 268 \mu s$); R113 中微气泡生长速率最快, FG-72 其次, 去离子水再次。其原因可能是: 相同压力条件下, R113 的沸点最低、比热容最小, 最易形成满足气泡成核条件的液体微层; 去离子水的气化潜热比另外两种工质要高得多, 同样加热功率导致的蒸发量最少, 因而微气泡面积增大速率较低。

此外, 工质的热导率可能对微气泡成核始点也有影响, 表面张力则可能对气泡形成后的生长速率有一定影响^[19], 有待于通过进一步的实验或其他方法进行更细致的研究。

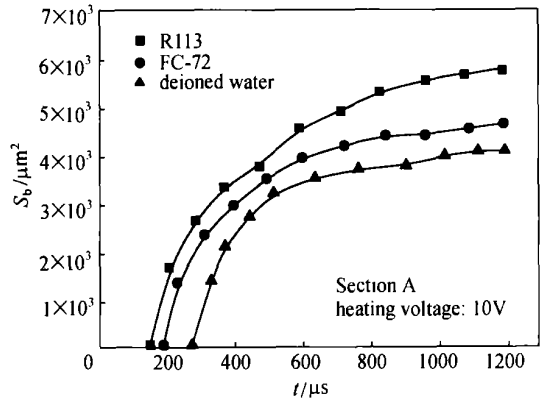


图 11 不同工质中的微气泡生长
Fig 11 Micro-bubble growth in three working fluids

4 结 论

本文设计、加工出了微气泡控制生长 MEMS 器件, 完成了微通道内气泡控制生长实验; 通过 Pt 微加热元电阻-温度特性确定加热元的表面温度, 讨论和分析了加热电压 (幅值和脉冲宽度)、微加热元宽度、微通道截面参数、工质流速及物性参数对微气泡生长过程的影响。

(1) 对确定的微加热元、相同工质初始状态而言: 加热脉冲宽度一定时, 加热电压幅值越高, 微气泡生长速率越快; 加热电压幅值一定时, 加热脉冲宽度仅对微气泡形成后的进一步长大有影响。

(2) 在加热电压幅值、脉冲宽度相同的条件下: 微加热元宽度越大, 加热功率越高, 气泡成核所需的时间越短, 微气泡生长速率越快。

(3) 当微通道宽度一定且 $\alpha > 1$ 时, α 越小,

后期微气泡面积增大的速率越低, 其原因是: 远离微加热元的气泡界面上凝结率增大。

(4) 在加热条件、微通道几何尺寸相同的条件下, 微通道内工质流速越高, 微气泡生长始点越晚、生长速率也越低。

(5) 工质物性对微气泡生长有明显影响: 同等实验条件下, R113、FG-72、去离子水三者中, R113 中微气泡生长始点最靠前、生长速率最快, 去离子水中微气泡生长最靠后、生长速率最慢。

现阶段, 实验研究工作还需要深入、系统地进行分析, 以便获得微气泡可控生长特性的定量分析结论, 总结出微小有限空间内微气泡控制生长关联式。

符 号 说 明

- A —— 截面积, μm^2
- D_h —— 水力直径, μm
- H —— 高度, μm
- L —— 长度, μm
- S —— 面积, μm^2
- W —— 宽度, μm
- α —— 高宽比
- τ —— 加热脉冲周期, ms
- μ —— 黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
- ζ —— 电阻-温度系数, $\Omega\cdot\text{K}^{-1}$

下角标

- b —— 气泡
- c —— 通道
- heater —— 加热元

References

[1] Maxwell R B, Gerhardt A, Toner M, Gray M L, Schmidt M A. A microbubble-powered bioparticle actuator. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12 (5): 630-640

[2] Deng P, Lee Y K, Cheng P. Design and characterization of a micro single bubble actuator//The 12th International Conference on TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Boston, United States: IEEE, 2003: 647-650

[3] Li Z X, Wang M R, Yao X B, Guo Z Y. Pumping mechanism of thermally driven phase transition micropump. *Microscale Thermophysical Engineering*, 2004, 8: 31-41

[4] Lin L. Microscale thermal bubble formation: thermophysical phenomena and applications. *Microscale Thermophysical Engineering*, 1998, 2: 71-85

[5] Yang W J, Tsutsui K. Overview of boiling on microstructures—micro bubbles from micro heaters

Microscale Thermophysical Engineering, 2000, 4: 7-24

[6] Matsumoto Y, Allen J S, Yoshizawa S, Ikeda T, Kaneko Y. Medical ultrasound with microbubbles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, 29: 255-265

[7] Lin L, Pisanò A P, Carey V P. Thermal bubble formations on polysilicon micro resistors. *Journal of Heat Transfer*, 1998, 120: 735-742

[8] Tsai J, Lin L. Transient thermal bubble formation on polysilicon micro-resistors. *Journal of Heat Transfer*, 2002, 124: 375-382

[9] Lee J Y, Park H C, Jung J Y. Bubble nucleation on micro line heater. *Journal of Heat Transfer*, 2003, 125: 687-692

[10] Lee H C, Oh B D, Bae S W, Kim M H, Lee J Y, Song I S. Partial nucleate boiling on the microscale heater maintaining constant wall temperature. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2003, 40 (10): 768-774

[11] Okuyama K, Tsukahara S, Morita N, Iida Y. Transient behavior of boiling bubble generated on the small heater of a thermal ink jet printhead. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28: 825-834

[12] Hong Y, Ashgriz N, Andrews J. Experimental study of bubble dynamics on a micro heater induced by pulse heating. *Journal of Heat Transfer*, 2004, 126: 259-271

[13] Deng P, Lee Y K, Cheng P. Micro bubble dynamics in DNA solutions. *J. Micromech Microeng*, 2004, 14: 693-701

[14] Deng P, Lee Y K, Cheng P. Measurements of micro bubble nucleation temperatures in DNA solutions. *J. Micromech Microeng*, 2005, 15: 564-574

[15] Dong Tao (董涛), Chen Yunsheng (陈运生), Yang Zhaochu (杨朝初), Bi Qincheng (毕勤成), Wu Huilong (吴会龙), Zheng Guoping (郑国平). Flow and heat transfer in comby fractal microchannel network. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2005, 56 (9): 1618-1625

[16] McLinden M O, Lemmon E W, Klein S A, Peskin A P. Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixture, NIST Standard Reference Database 23-Version 6.01 [CP/DK]. United States: NIST, 1998

[17] Fluorinert™ Liquids for Electronics Manufacturing [EB/OL]. [1998-12-03]. http://multimedia.mmm.com/mws/mediawebserver_dyn?6666660Zjcf6IVs6EVs666pGACOrrrrQ#search=%223M%20Fluorinert%20Liquids%20for%20Electronics%20Manufacturing%22

[18] Yang Shiming (杨世铭), Tao Wenquan (陶文铨). Heat Transfer (传热学). 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1998: 425-426

[19] Dong T, Yang Z, Wu H. Molecular simulations of R141b flow boiling in micro/nano channel: interfacial phenomena. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47 (9): 2178-2191