

シリコン基板上の沸騰伝播現象を利用したマイクロポンプ

金 政焄[†] 奥山 邦人[‡] 森 昌司[‡]

Micropump Using Boiling Propagation Phenomena on a Silicon Substrate

Jeong-Hun KIM[†], Kunito OKUYAMA[‡] and Shoji MORI[‡]

Abstract

Micropump using boiling propagation as the actuation mechanism is proposed. A film heater on a silicon (Si) substrate placed facing a microchannel is powered pulsewise. Boiling propagation is triggered at a high wall superheat by generating a vapor bubble at the end of the heater. The repetition of unidirectional propagation over the heater length produces continuous pumping action in the microchannel. The propagation configuration, propagation velocity, propagating bubble size, maximum allowable repetition frequency and the wall superheat range for the occurrence of propagation are investigated under pool boiling conditions using ink for a thermal inkjet printer. The results obtained for Si substrate are compared with those on a quartz glass (SiO₂). No significant difference in the propagation behaviors and the pumping head is observed between the Si and SiO₂ substrates for a given pulse period, wall superheat and repetition frequency. However, a larger pulse power is required for the Si substrate because of its higher heat diffusion property. The resulting larger heat storage in the substrate before the boiling onset causes the delay of bubble collapse after the pulse heating. The gradual increase in the temperature of the thin Si substrate during the repetition of the pulse heating results in a lower allowable repetition frequency and therefore in lower pumping performance compared with those for the SiO₂ substrate.

Key Words: *Micropump, Boiling propagation, Pulse heating, Silicon substrate*

記号

F	: 流量	[$\mu\text{l}/\text{min}$]	ΔT_{sat}	: 伝熱面過熱度	[K]
f	: 繰り返し加熱周波数	[Hz]	$\Delta T_{sat,B.I.}$: 沸騰開始時伝熱面過熱度	[K]
f_{max}	: 繰り返し加熱可能最大周波数	[Hz]	$\Delta T_{sat,p}$: 伝播開始時の伝熱面過熱度	[K]
Δh	: 細管内液柱ヘッド差	[mm]	$\Delta T_{sat,trig}$: トリガ気泡発生時の伝熱面過熱度	[K]
$h_{b,av}$: 平均気泡高さ	[mm]	t	: パルス加熱開始後の時間	[s]
k	: 熱伝導率	[W/(m·K)]	$V_{p,av}$: 平均伝播速度	[m/s]
Q	: 半球面での熱移動速度	[W]	x_{tip}	: 伝播気泡先端位置移動距離	[m]
Q''	: パルス発熱量	[MW/m ²]			
Q_{trig}''	: トリガパルス発熱量	[MW/m ²]			
q_l''	: 液体への伝達熱流束	[MW/m ²]			
r	: ヒータ有効発熱部等価円半径	[m]			
s	: ヒータ有効発熱部面積	[m ²]			
T_w	: 伝熱面温度	[K]			

1 緒言

沸騰気泡を利用したマイクロポンプは、構造が単純で小型化に適し、大きな変位が得られることから、MEMS (Micro-electromechanical Systems)における液輸送方法として多様な分野への応用が期待されている。

受付日: 2006年8月9日, 担当エディター: 河村 洋

[†] 佐賀大学 海洋エネルギー研究センター (〒849-4256 佐賀県伊万里市山代町久原字平尾 1-48)

[‡] 横浜国立大学 工学研究院 機能の創生部門 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1)

る。一般に沸騰気泡は加熱毎に発生、成長、収縮、消滅を繰り返すだけなので、微小な流路内で一方向の正味流れを生じさせるには、(1)ノズル、デフューザなど流路の非対称構造、(2)流路に沿う複数のヒータの時系列加熱などが必要になる[1-5]。

一方、伝熱面との濡れが良い液体あるいは極めて平滑な伝熱面を用いた場合など、沸騰開始時の伝熱面過熱度が定常核沸騰のそれに比べかなり高くなる(水や有機液体では約 50 K 以上の)場合には、初気泡発生直後に加熱面に沿って沸騰領域が急速に広がる特異な「沸騰の伝播現象」が生じることが知られている[6-8]。著者らは、マイクロ流路内で同現象を一方向へ繰り返し発生させることによる液体輸送法を提案し、断面積一定の流路に沿って細長い薄膜ヒータを配置したU字型マイクロ流路を用いて本現象にポンプ作用が生じることを初めて実験的に明らかにした[7]。しかし、短い周期で加熱を繰り返すと、ヒータ付近の基板(石英ガラス)の温度が徐々に上昇し、沸騰現象の再現性が失われ、ポンプ作用も得られなくなった。より安定した動作には、基板や液体に速やかに放熱がなされ、繰り返し加熱に伴う温度上昇が十分小さく抑えられる必要がある。

繰り返しパルス発熱する薄膜ヒータから半無限基板への放熱に関する数値解析[9]によれば、熱伝導性に優れたシリコン (Si, 熱伝導率と熱拡散率はそれぞれ 300 K で $148 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $88.0 \text{ mm}^2/\text{s}$) を基板に用いれば、高過熱度への昇温に必要なパルス発熱量は基板が石英ガラス(SiO_2 , 熱伝導率と熱拡散率はそれぞ

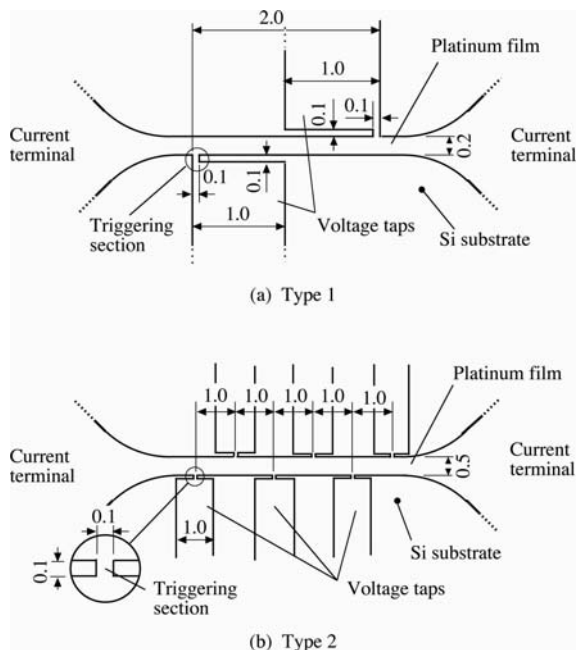


Fig. 1 Test film heater.

れ 300 K で $1.38 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $0.85 \text{ mm}^2/\text{s}$) の場合より大きくなるものの、繰り返し加熱時のヒータ付近の基板の定常的温度上昇は顕著に抑えられることが報告されている。一方で伝熱面上の過熱液の崩壊過程である沸騰伝播現象そのものに基板の熱伝導性が影響することも考えられる。

そこで本報告では、基板がシリコンの場合の薄膜ヒータ面上の沸騰伝播挙動を実験により調べ、石英ガラス基板の場合と比較するとともに、マイクロ流路内において繰り返し伝播現象を生起させた際のポンプ能力に与える基板物性の影響を検討した。

2 実験装置及び方法

図 1 に試験部発熱体の概略を示す。表面に厚さ $1 \mu\text{m}$ の絶縁層(SiO_2)をもつ厚さ 0.65 mm の Si 基板上に厚さ $0.25 \mu\text{m}$ の白金薄膜が蒸着されヒータ部がパターンニングされている。有効発熱区間は、試験片 1 では $0.2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 、試験片 2 は $0.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ であり、前者は伝播現象の観察とポンプ実験、後者は局所の伝熱挙動を調べるのに用いた。有効発熱区間には温度測定用の電圧タップが複数本設けられており(試験片 1 は 2 mm 間隔で 2 本、試験片 2 は 1 mm 間隔で 6 本)、左端の 1 本の先端縮小部(図中○で囲んだ $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ の区間)をヒータ上の沸騰を誘発するための気泡発生用トリガ部としても用いた。

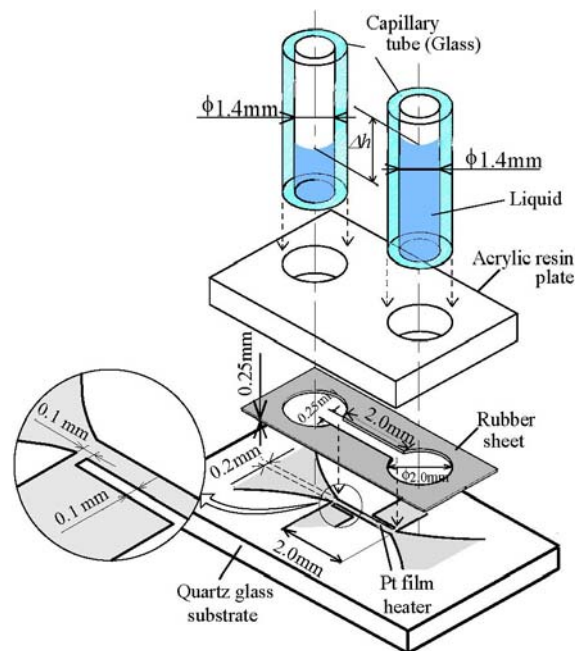


Fig. 2 Test section of micropump.

SiO₂ 基板試験片については、その厚さ(1.0mm)を除きヒータのパターン・寸法とも Si 基板試験片と同じである。伝播現象観察と伝熱測定は各試験片を室温の試料液プールに浸した状態で行い、またポンプ実験は厚さ 5mm の黄銅製支持基板に固定した試験片上に、図 2 に示すようにゴムシート(ヒータ直上部分は幅 0.25mm のスリット状にくり抜かれている)、アクリル板、ガラス細管を順に積層して U 字型マイクロ流路を形成し、シリンジで室温の試料液を満たして行った。試料液にはサーマルインクジェット(TIJ)プリンタ用のインク(主成分水(80%以上)、エチレングリコール及びイソプロピルアルコール)を用い、気泡が観察できるよう染料抜ききのものを使用した。TIJ インクは、単一成分液体に比べ加熱後速やかに気泡が完全消滅するので後続のパルス加熱沸騰に影響を及ぼし難い。実験では、図 3 に示す“Main”回路により矩形パルス信号を電力増幅し、図 1 の加熱電流用端子間に通電することにより薄膜のヒータ部全体をステップ状に発熱させ、所定の過熱度($\Delta T_{sat, trig}$)に達した時、“Trigger”回路により図 1 における左端の加熱電流用端子と左端の電圧タップ間に矩形のパルス電流を流し、トリガ部を短時間高発熱させて気泡を発生させ、ヒータ面に沿う一方向への伝播を誘起させる。伝播が他端に達した直後に加熱を停止する。このシーケンスを一定の周期で繰り返した際に生じ

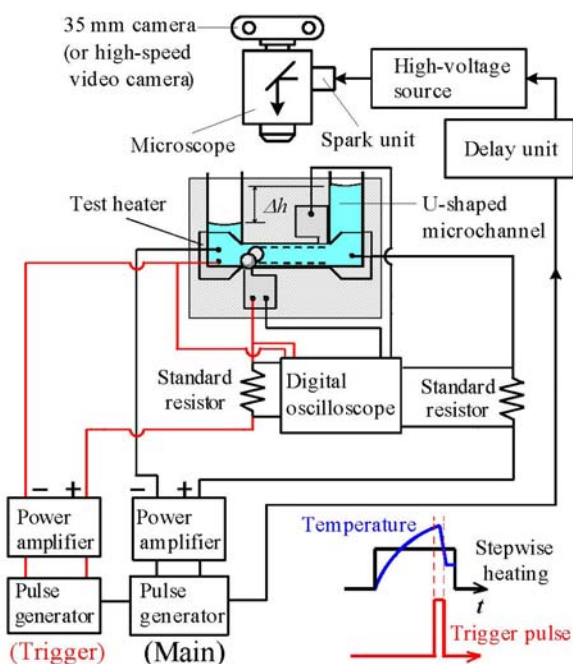


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus.

る左右ガラス細管内液柱高さの差(ヘッド差)及び流量(メニスカスの移動による)を測定した。ヒータの発熱量は両端のタップ間電位差と加熱電流より、ヒータの温度(タップ間平均温度)は電気抵抗の温度変化より求めた。温度測定誤差は ± 7 K 以内である。現象の観察は 35 mm カメラによるストロボ撮影またはハイスピードビデオカメラ(27000 f/s)により行った。

3 実験結果及び考察

3.1 沸騰開始過熱度

図 4 に、トリガ気泡を発生させない場合のパルス加熱時の沸騰開始過熱度 $\Delta T_{sat, B.I.}$ (ただし試料液の飽和温度は 100°C を仮定)を発熱量 Q'' (熱流束換算値)に対して示す。沸騰開始時刻は高速ビデオの画像において最初に気泡を捕捉した時刻とした。沸騰が生じない発熱量範囲では加熱し続け定常状態に達したときの過熱度をプロットしている(Si 基板では●印, SiO₂ 基板では▲印で表示)。Si 基板の場合、沸騰は約 10 MW/m² 以上で生じ(SiO₂ 基板では約 3 MW/m² 以上)、 $\Delta T_{sat, B.I.}$ は約 100 K 程度と高く、発熱量の増加とともに少しずつ増加する。

3.2 沸騰伝播の様相

図 5 には、Si 基板試験片でトリガ気泡により一方向への伝播を生じさせた際の沸騰様相を、SiO₂ 基板試験片の場合とともに示す。パルス時間幅(2.2 ms)並びにトリガ時のヒータ過熱度 $\Delta T_{sat, trig}$ (= 90 K)が両者でほぼ同一になるように発熱量を調節した。この

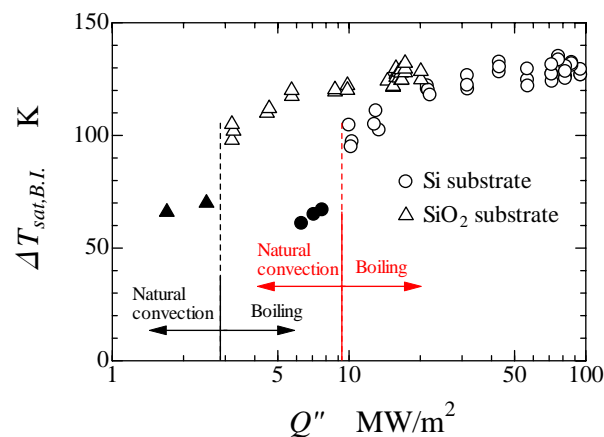


Fig. 4 Wall superheat at boiling incipience at pulse heating without triggering bubble as a function of heat generation rate.

ため熱伝導率と熱拡散率が高い Si 基板では, SiO₂ 基板の場合の 7 倍以上の発熱量が必要になったが, 沸騰開始前に液体側に伝わる熱流束 q_l'' は一次元熱伝導を仮定し液体の物性は水のそれとみなして試算してみるとほぼ同じ 6.4 MW/m² であった. いずれの基板の場合もトリガ部に気泡が発生すると同時に伝

熱面上に気泡が発生し, 高過熱度にある右側の領域に向かって成長・伝播し, 他端に達して停止する. 伝播気泡の後部は速やかに凝縮・消滅するので, あたかも伝播気泡が伝熱面をすべって移動しているように見える. 伝播気泡の先端部は高過熱液の自己蒸発により液体を前方に押しつけ, 後端部は凝縮によ

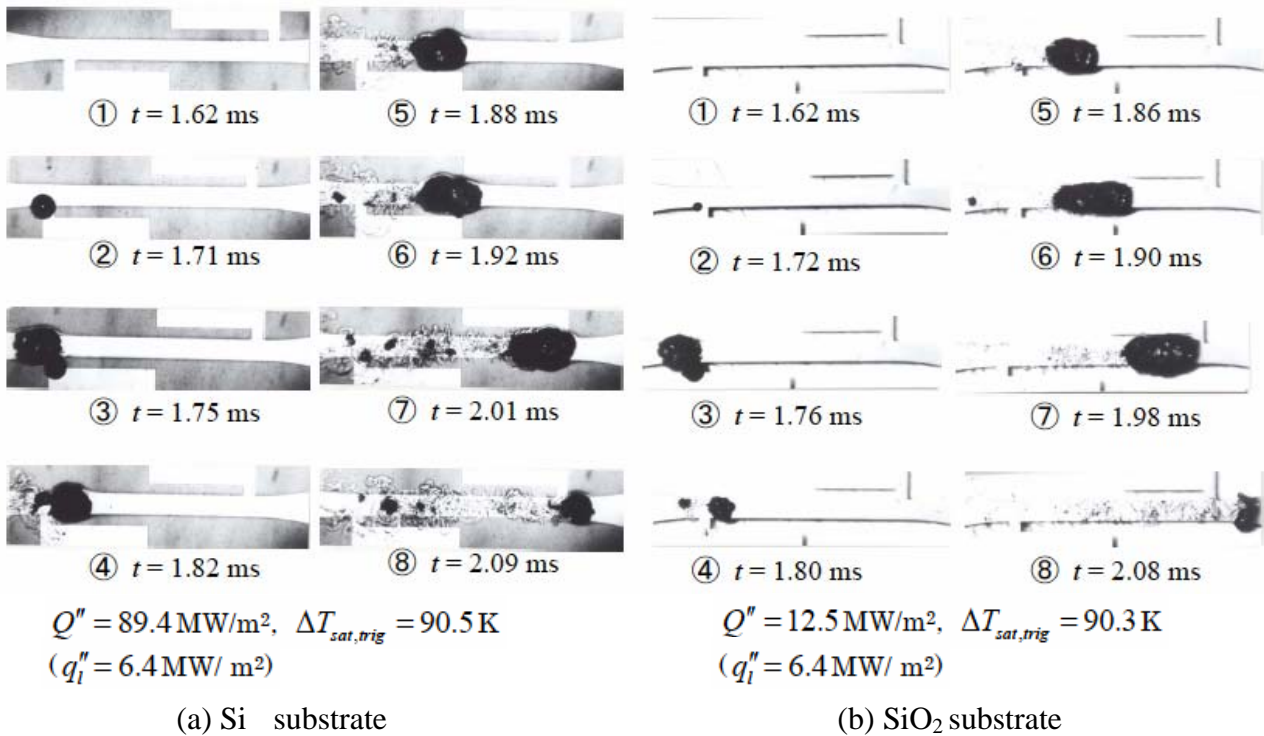


Fig. 5 Photographs of boiling propagation triggered at left end potential tap on Si substrate and SiO₂ substrate.

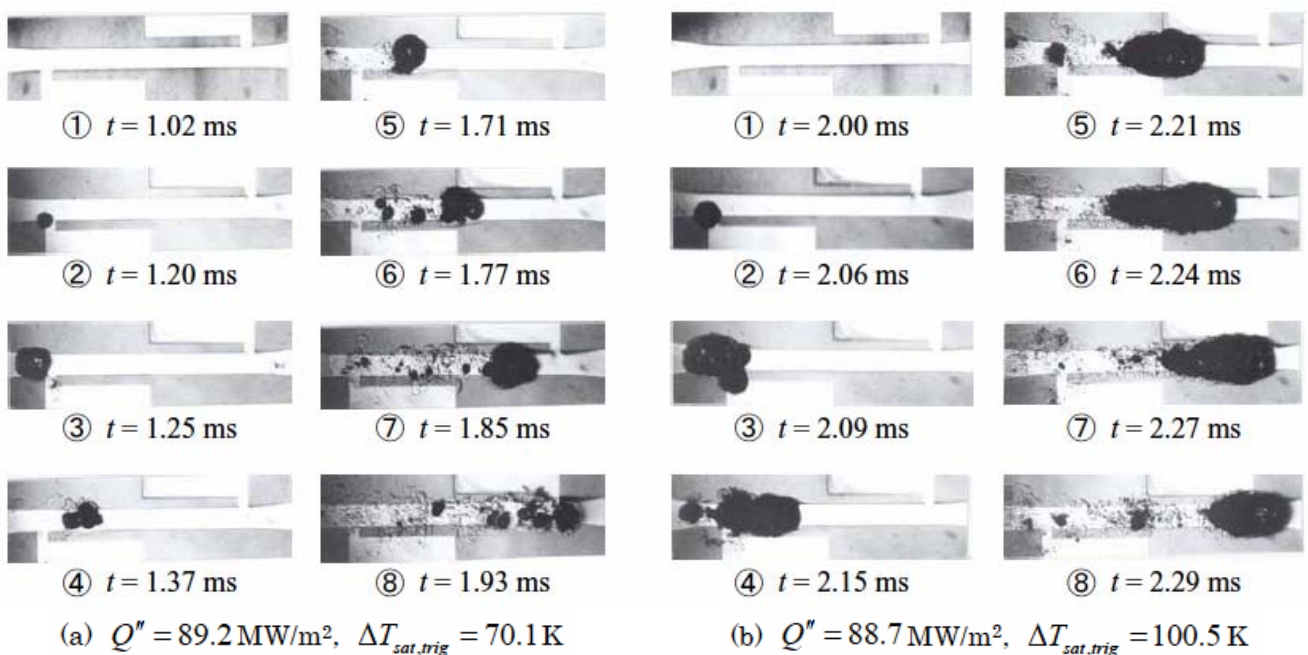


Fig. 6 Photographs of boiling propagation triggered at left end potential tap on Si substrate.

り周囲から液を引き込むのでマイクロ流路内では液を前方に輸送する効果が得られるものと考えられる。伝播の様相には基板による大きな差異は見られないが、Si 基板では伝播気泡通過後に多くの気泡が残存(または新たに発生)している。これは、後述するように沸騰開始前に基板に蓄積されていた熱の影響と考えられるが、伝播完了後(加熱終了後)の気泡消滅の遅れはマイクロポンプでは繰り返し加熱可能周波数の低下につながる。

図 6 は、Si 基板試験片で $\Delta T_{sat, trig}$ が図 5(a) と異なる場合の伝播の様相を示す。過熱度が比較的小さい図 6(a) の場合、伝播気泡が前方隣接部の気泡核を次々と活性化させ巻き込みながら進んでいるような様相が見られる。過熱度が高くなると、図 6(b) のように伝播気泡と速度は顕著に大きくなり輪郭がなめらかになる。これらの傾向は SiO₂ 基板における水の沸騰伝播の場合[8]と同様であった。

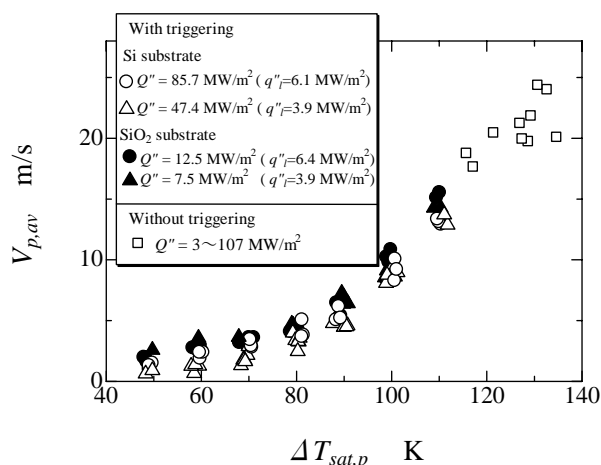


Fig. 7 Average propagation velocity as a function of wall superheat at inception of propagation.

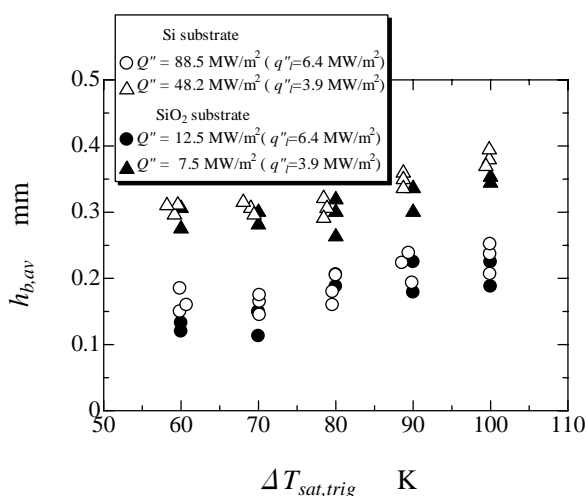


Fig. 8 Average bubble height during propagation as a function of wall superheat at triggering of boiling.

3.3 伝播速度と気泡高さ

図 7 に $\Delta T_{sat, trig}$ を変化させた際の平均伝播速度 $V_{p,av}$ と伝播開始時過熱度 $\Delta T_{sat,p}$ の関係を示す。トリガ気泡を付与することで付与しない場合の沸騰開始過熱度よりかなり低い過熱度でも沸騰伝播が生じ、Si 基板と SiO₂ 基板のいずれにおいても $V_{p,av}$ は $\Delta T_{sat,p}$ とともに顕著に増加すること、また伝播速度に与えるこれら基板材料の影響は小さいことがわかる。なお、過熱度 48 K 以下では伝播は観察されなかった。

図 8 に側面からの観察による伝播気泡高さ $h_{b,av}$ (各撮影時刻における最大高さの伝播開始から終了までの時間平均値)と $\Delta T_{sat, trig}$ の関係を示す。気泡高さはマイクロポンプの流路高さを設定する上で重要となる。図から、 $h_{b,av}$ は 0.1~0.4 mm 程度であり、過熱度や基板材料による差は小さく、主にパルス発熱量に依存している。発熱量が大きいほど小さくなるのは、沸騰開始までの加熱時間が短くなり、液体に蓄積される過熱エネルギーが小さくなるためである。

3.4 伝播時の局所熱伝達

図 9 には、試験片 2 でヒータ長さ方向 1 mm ごとに分割測定した局所温度 $T_1 \sim T_5$ の時間変化を伝播気泡先端位置 x_{tip} (図中 \circ 印で表示) と対応させて示す。図中 $t = 6.25 \text{ ms}$ に記された矩形波はトリガーパルス(図の条件ではトリガー部単位面積当たりの発熱量 209 MW/m^2 , 時間幅 0.1 ms)を表す。約 100 K もの高過熱度での急激な沸騰開始にもかかわらず乾燥面の出現による伝熱の低下は観測されず、むしろ伝播気泡の通過した直後から壁温が順次降下して定常(核沸騰)値に近づく。しかし、Si 基板の場合、SiO₂ 基板

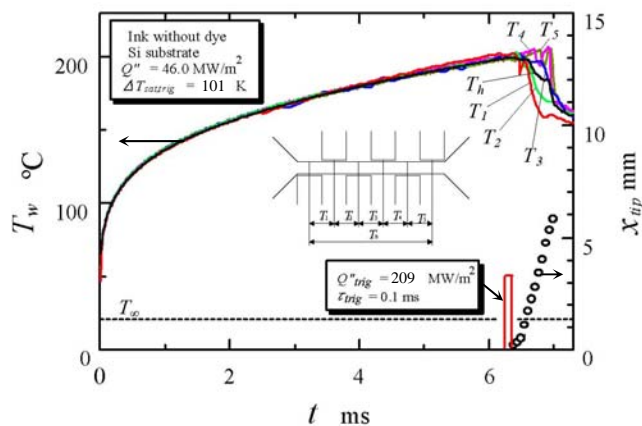


Fig. 9 Time traces of local wall temperature during boiling propagation at stepwise heating.

に比べ大きなヒータ発熱量が必要になるため沸騰する前に多量の熱が基板内に蓄積しており、沸騰開始後はこの熱が温度降下とともにヒータ面に流出してくるので、加熱終了後気泡が完全に消滅するまで時間がかかるようになるものと考えられる。

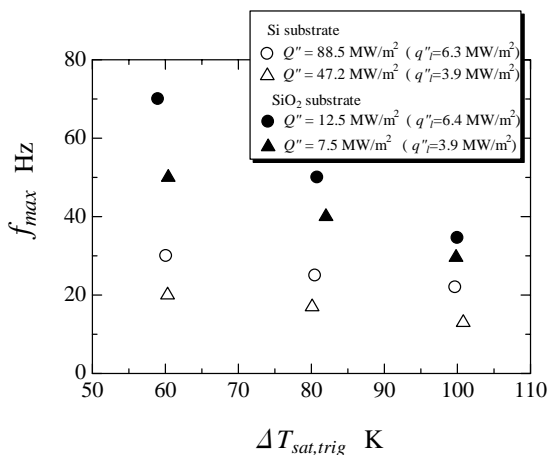


Fig. 10 Maximum allowable repetition frequency for propagation as a function of wall superheat at triggering of boiling.

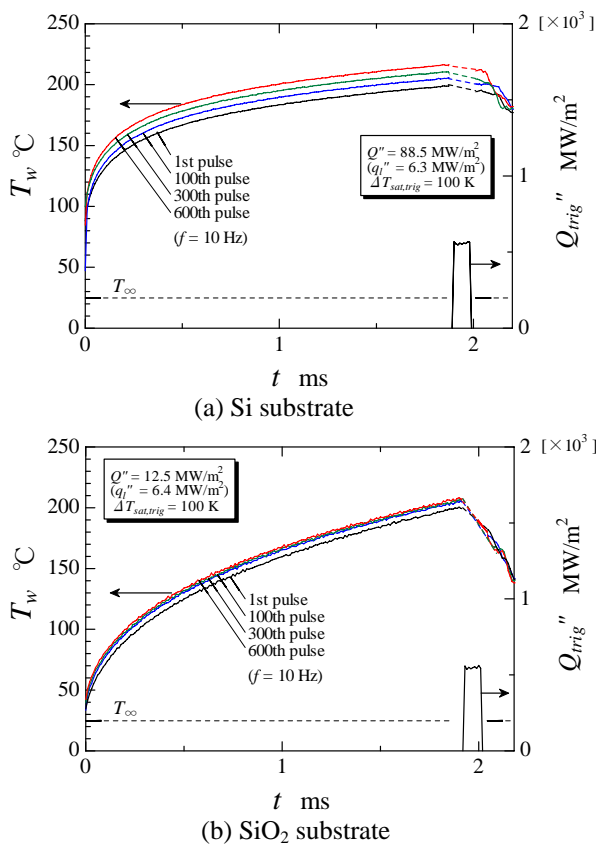


Fig. 11 Variation of time trace of heater temperature during repetition of pulse heating (comparison between SiO₂ and Si substrates).

3.5 繰り返し加熱許容周波数

上述のパルス加熱による沸騰伝播現象を高い頻度で繰り返すと、トリガ気泡が付与される前にヒータ面の不特定な位置で沸騰が開始したり次のパルスの前に気泡が完全に消滅しないなど、直前のパルスによる沸騰の影響が出てくる。一方向への沸騰伝播現象を再現性よく起こすことのできる繰り返し加熱可能最大周波数 f_{max} を、試験片を試料液プールに浸漬した状態で調べた。図 10 に示すように、同一基板で比較すると、 f_{max} は $\Delta T_{sat,trig}$ が小さくまた発熱量が大きいほど高く、SiO₂ 基板の場合、最大 70 Hz まで可能であったが、当初の予測とは反対に Si 基板よりも高い値となった。

図 11 は、試料液プール中でパルス加熱を 10 Hz で 60 秒間繰り返したときのヒータ温度波形の経時変化を示す。10 秒経過するごとに波形全体に高温側にシフトしているが、これは繰り返し加熱によりヒータ付近の基板温度が次第に上昇するためである。SiO₂ 基板では 60 秒でほぼ飽和しているが、Si 基板ではまだ上昇し続ける傾向があり十分な放熱がなされていない。一方、薄膜ヒータから半無限基板への放熱に関する数値解析 [9]によれば、ヒータ付近の基板の定常的温度上昇は、Si 基板の場合 SiO₂ 基板の約 1/7 (ただし繰り返し加熱周波数、パルス加熱時間幅、トリガ時過熱度が等しい場合)と見積もられ、図 11 の結果はこの予測と全く逆の傾向を示している。このことについて以下に考察する。

いま微小薄膜ヒータから半無限基板への放熱を半径 $r_0 = \sqrt{s/\pi}$ (s : ヒータ有効発熱部面積)の半球面から半径方向一次元の定常熱伝導と近似的にみなせるとすると、中心から距離 r の位置における温度の無限遠点の温度との差 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T(r) = \frac{Q}{2\pi rk} \tag{1}$$

ここで、 Q は半球面全体における熱の移動速度(r に依らない一定値)、 k は基板の熱伝導率を表す。 ΔT が $r=r_0$ における値の 1/100 になる位置までを熱浸透厚さと定義すると、試験片 1 のヒータの大きさに対する熱浸透厚さは、基板材料の熱伝導率によらず約 40 mm 程度と見積もられ、基板厚さ(Si : 0.65 mm, SiO₂ : 1.0 mm)並びに試験片の支持基板(黄銅製)の厚さ(5 mm)よりかなり大きい。式(1)で同じ ΔT を得る Q の値は k の大きさに比例することも考え合わせると、Si 基板の場合基板の総厚が足りないため十分な放熱

性が得られず、反対に SiO₂ 基板では(SiO₂ に比べ熱伝導率の高い)黄銅基板がヒートシンクとなり放熱性が向上したため、予測とは逆の結果になったものと考えられる。

3.6 ポンプにおける液輸送能力

図 12 は、マイクロ流路内で一方向への伝播を繰り返し生じさせた際の細管内液柱ヘッド差 Δh と繰り返し加熱周波数 f の関係を示す。パルス加熱時間幅は 2.2 ms, $\Delta T_{sat, trig} = 100$ K, 流路幅は 0.25mm, 駆動部流路高さは図 8 の結果から 0.35 mm とした。ヘッド差は両基板とも f とともに同様に増加したが、SiO₂ 基板の場合、20 Hz までポンプ作用が得られたのに対し、Si 基板では最大 10 Hz で限界となった。これに関して、Si 基板において 20 Hz でパルス加熱を行った際のヒータ温度波形の経時変化を図 13 に示す。繰り返し加熱を続けると基板の温度上昇により沸騰開始前の波形全体が高温側にシフトしており、10 秒以上経つとトリガパルスを加える前に沸騰が始まっている(壁温の降下)。このとき沸騰は伝熱面上の不特定な場所で始まることから、一方向への流れは生じなくなり、ポンプ作用が失われる。繰り返し可能な加熱周波数が低くなったのは前節で述べた基板からの放熱性によるもの、すなわち Si 基板と黄銅支持基板の総厚がヒータに加えた熱を放散させるのに十分な厚さより小さかったためと考えられる。

図 14 は、ヘッド差 Δh と流量 F の関係を $\Delta T_{sat, trig}$ をパラメータとして示す。Si 基板の場合、10 Hz において最大約 50 μ l/min の流量が得られたが、これは SiO₂ 基板における最大流量の約 50%であった。

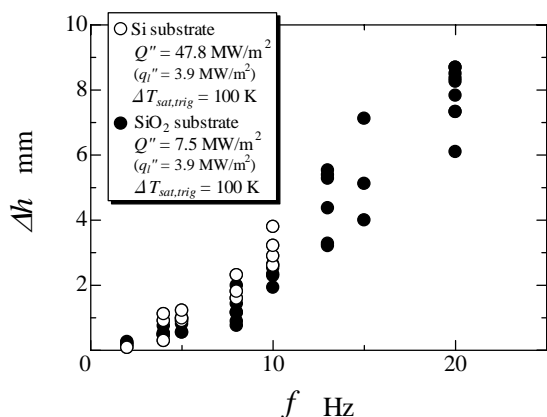


Fig. 12 Head difference produced during repetition of boiling propagation in a microchannel as a function of repetition frequency of pulse heating.

以上の結果から、実験に用いた大きさのヒータに対して Si 基板の高い放熱性を活かして繰り返し可能周波数を増大させるには基板を数 10 mm 以上に厚くする必要があるが、それは実用上からも現実的でなく、また Si 基板の場合 SiO₂ 基板に比べ非常に大きなパルス発熱量が必要になることも考えると、むしろ SiO₂ 基板の背面にヒートシンクを配し、基板厚さをパルス加熱時の温度変化が SiO₂ 層内のみに限られる最小厚さにすれば、パルス発熱量は小さくて済み、また次のパルスまでの比較的長い休止時間の放熱はヒートシンクになされるので、結果として繰り返し可能周波数は高く保てるものと考えられる。

なお、上述の議論は基板材料として Si を用いることを否定するものではない。ヒータ面積が本実験よりさらに小さく、例えば幅 10 μ m, 長さ 50 μ m 程度の微小ヒータの場合を考えると、3.5 節で述べた基板

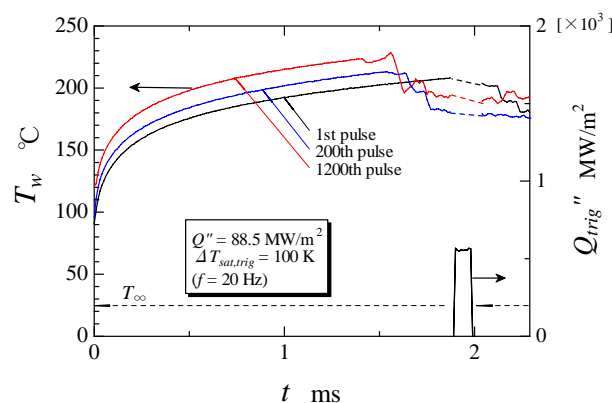


Fig. 13 Variation of time trace of wall superheat during repetition of pulse heating (Si substrate).

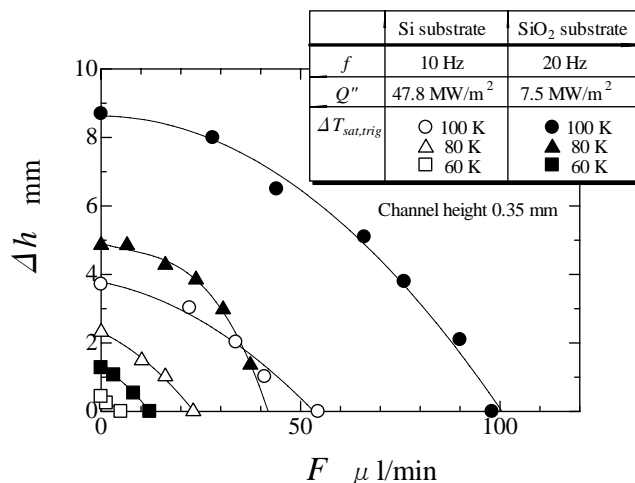


Fig. 14 Head difference produced during repetition of boiling propagation in a microchannel as a function of flow rate.

の熱浸透厚さは Si 基板の場合 1 mm 程度となり、本実験で用いた厚さ(0.65 mm)の基板内の温度変化は半無限基板のそれに近づく。このとき、文献[9]によれば、パルス発熱量を加熱時の温度変化が Si 基板上の SiO₂ 絶縁層(1μm)内に限定されるような高い値を選ぶことにより、温度変化が Si 基板まで及ぶ場合に比べ小発熱量で高い繰り返し加熱可能周波数が得られることが示唆されている。パルス発熱量の増加とともに気泡は小さくなるもの(図 8 参照)、より高温での沸騰伝播が可能になり伝播速度が増大することも考え合わせると、より小さなヒータと小さな流路の系において Si 基板上の沸騰伝播現象を利用したマイクロポンプの高い液輸送能力が得られる可能性のあるものと考えられ、今後検討していく必要がある。

4 結 論

シリコン基板に設けた微小薄膜ヒータ上の沸騰伝播現象とこれを利用したマイクロポンプにおける液輸送能力を、石英ガラス基板の場合と比較しつつ調べた結果、以下の結論を得た。

1. パルス加熱時間幅と伝播時の伝熱面過熱度がほぼ同一の条件の場合、気泡が伝熱面をすべるように移動していく伝播の様相や伝播速度の過熱度依存性に基板材質による相違は見られない。
2. 伝播気泡通過後直ちに伝熱が良好になるが、シリコン基板の場合、石英ガラス基板に比べ大きなヒータ発熱量が必要になり、多量の熱が基板内に蓄積する結果、気泡の消滅が遅れる。
3. 実験に用いた0.2 mm×2 mmの大きさのヒータに対して、基板(厚さ0.65 mm)はシリコンの高い熱伝導性を活かした十分な放熱を得ることのできる厚さよりかなり薄いため、繰り返し加熱によるヒータ付近の基板の温度上昇が顕著となる結果、伝播の繰り返し可能周波数が小さくなり、石英ガラス基板の場合に比べかえってポンプ能力は低

くなった。しかしながら、さらに小さなヒータに対しては繰り返し加熱可能周波数とポンプ能力が向上する可能性がある。

参考文献

- [1] Gravesen, P., Branebjerg, J. and Jensen, O. S., "Microfluidics - a Review", *J. Micromech. Microeng.*, 3 (1993), 168-182.
- [2] Ozaki, K., "Pumping Mechanism Using Periodic Phase Changes of a Fluid", *Proc. IEEE MEMS*, (1995), 31-36.
- [3] Jun, T. K. and Kim, C. J., "Valveless Pumping Using Traversing Vapor Bubbles in Microchannels", *J. Appl. Phys.*, 83-11 (1998), 5658-5664.
- [4] Yuan, H. and Prosperetti, A., "The Pumping Effect of Growing and Collapsing Bubbles in a Tube", *J. Micromech. Microengng.*, 9 (1999), 402-413.
- [5] Tsai, J. H. and Lin, L., "A Thermal Bubble Actuated Micro Nozzle-Diffuser Pump", *J. Microelectro- mechanical Systems*, 11-6 (2002), 665-671.
- [6] Avksentyuk, B. P., "Non-equilibrium Model of an Evaporation Front", *Russian J. Engng. Thermophysics*, 5 (1995), 1-8.
- [7] Okuyama, K., Kim, J. H., Takehara, R. and Iida, Y., "Pumping Action by Boiling Propagation in a Microchannel", *Microscale Thermophys. Engng.*, 9-2 (2005), 119-135.
- [8] Okuyama, K., Kim, J. H., Mori, S. and Iida, Y., "Boiling Propagation of Water on a Smooth Film Heater Surface", *Int. J. Heat & Mass Transf.*, 49-13,14 (2006), 2207-2214.
- [9] Kim, J. H., Okuyama, K. and Iida, Y., "Allowable Repetition Frequency of Pulse Heating in Microactuators Using Rapid Boiling (Effect of Electrical Insulation Layer beneath Heater)", *J. Thermal Sci. & Technol.*, 1-1 (2006), 20-30.