

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760171

研究課題名(和文) MEMS/NEMS技術を用いたマイクロヒートパイプ複合基板の開発研究

研究課題名(英文) Development of a Wiring Board Having Micro Heat Pipes by MEMS/NEMS Technology

研究代表者

小糸 康志 (KOITO, Yasushi)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：70347003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロヒートパイプ複合基板を開発することを目的とし、プラスチック平板の表面上に熱サイフォン式、ウイック式、自励振動式のヒートパイプを形成して、伝熱特性に関する実験を実施した。実験では、ヒートパイプの温度分布の経時変化を測定するとともに、内部の流動・伝熱現象を観察し、さらに、ヒートパイプの有効熱伝導率を評価した。実験結果から、プラスチック平板内における潜熱輸送の効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a wiring board having micro heat pipes, a thermosyphon, a capillary-wick and an oscillation heat pipes are fabricated on a surface of a plastic board, and their heat transfer characteristics are investigated by experiments. In experiments, the phenomena inside the heat pipe are observed and the transient variation of temperatures is measured. Moreover, the effective thermal conductivity of the heat pipe is evaluated. From the experimental results, the effectiveness of the phase-change heat transfer inside the plastic board is confirmed.

研究分野：熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：ヒートパイプ 熱サイフォン 熱輸送機器 伝熱促進 サーマルマネジメント 電子機器冷却 電子基板 複合基板

### 1. 研究開始当初の背景

MEMS/NEMS 技術が普及し、微細加工技術を用いた様々なものづくりが行われている。例えば、半導体チップの裏面に微細加工技術を用いてマイクロチャンネル熱交換器をつくり、そこに冷媒を流して半導体チップを冷却する研究が挙げられる。

一方、半導体チップの冷却には、従来からヒートパイプが利用されている。ヒートパイプは、適量の作動液を封じ込めた一本の密閉管であり、受熱部と放熱部その間の断熱部に分けることができ、管内壁にはウイックと呼ばれる毛細管構造体が設けられている。受熱によってウイック内の液が蒸発し、発生蒸気は断熱部を流れ、放熱部で凝縮、放熱する。凝縮液は、ウイックの毛細管力によって受熱部へと還流する機構となっている。ヒートパイプは、外部動力を要しない熱輸送デバイスであり、蒸発・凝縮潜熱を利用するため、多量の熱を小さな温度差で輸送できるという特長を有する。ヒートパイプは、種々の工業分野で実用されている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、マイクロヒートパイプ複合基板を開発することである。従来のヒートパイプは発熱体に外付けされるが、本研究は電子基板の一部をヒートパイプにするものであり、基板自体に潜熱輸送の機能を持たせ、接触熱抵抗の低減と、半導体機器冷却系のコンパクト化、軽量化を目指すものである。

### 3. 研究の方法

(1) まず、電子基板と同様に熱伝導率が低いアクリル板を用い、その表面上に熱サイフォン式のヒートパイプを形成して、伝熱特性に関する実験を実施した。

図1に、熱サイフォン式ヒートパイプの詳細を示した。アクリル平板の表面に断面 5.0 mm × 5.0 mm、長さ 120 mm の溝を掘り、銅の薄板を使用してヒートパイプの熱輸送空間を形成した。下部がヒーター(ヒートソース)による加熱部、上部が冷却ジャケット(ヒートシンク)による冷却部であり、重力を利用して作動液を還流させるものである。また、作動液の封入ならびに内部の減圧のために上部に管を設けており、加熱部には沸騰石を使用した。ヒートパイプの温度測定位置( $T_H$ ,  $T_1 \sim T_4$ ,  $T_C$ )は図1に併記した通りである。作動液には水を使用した。

図2に、実験装置の概要を示した。実験では、ヒートパイプ内に作動液を入れ、真空ポンプにより内部の空気を取り除いた後、ヒートパイプを加熱・冷却して、各位置の温度の経時変化を測定した。なお、熱損失を軽減させるため、加熱部および冷却部を除くヒートパイプ表面には断熱材を使用した。実験条件として、冷却ジャケットへの冷却水流入温度を 15 °C とし、ヒートパイプの熱輸送空間全体積に占める作動液の体積割合  $V^+$  を 10 %、

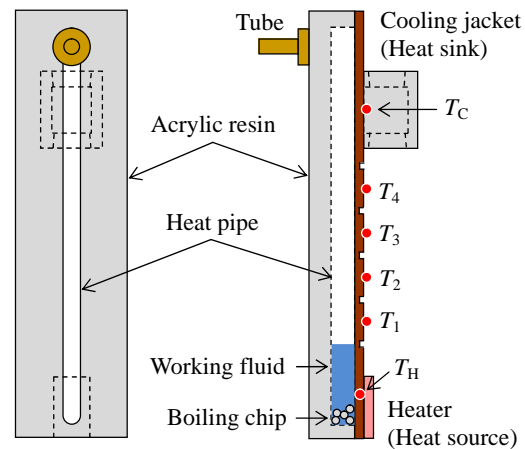
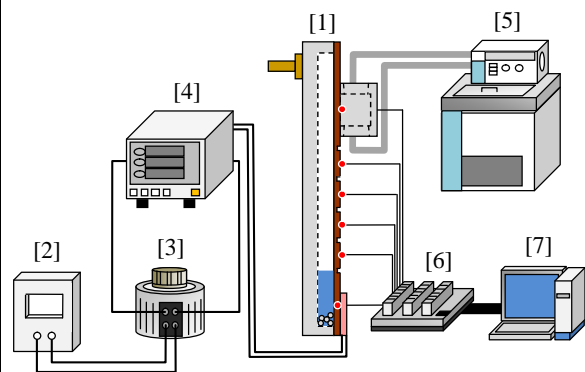


図1 熱サイフォン式ヒートパイプの詳細



[1] Heat pipe [2] AC power [3] Volt slider  
[4] Wattmeter [5] Thermostatic bath  
[6] Data logger [7] Personal computer

図2 実験装置

20 % , 30 % , 加熱量  $Q$  を 3.0 W , 6.0 W , 9.0 W と変化させた。比較検討のため、ヒートパイプに作動液を封入しない場合についても同様に実験を行った。なお、ヒートソースのサイズは 10 mm × 10 mm である。

(2) (1)の実験結果を踏まえ、ポリカーボネート平板に、毛細管式ヒートパイプと自励振動式ヒートパイプを形成し、伝熱特性に関する実験を実施した。毛細管式ヒートパイプは 10 mm × 10 mm のヒートソースを対象とし、自励振動式ヒートパイプは 30 mm × 10 mm のヒートソースを対象としたものである。

図3に、毛細管式ヒートパイプの詳細を示した。ポリカーボネート平板の表面に断面 5.0 mm × 5.0 mm、長さ 100 mm の溝を掘り、銅の薄板を使用してヒートパイプの熱輸送空間を形成した。ウイックには、ポリエチレン粉体の親水性焼結体を使用した。ヒートパイプの温度測定位置( $T_H$ ,  $T_1 \sim T_3$ ,  $T_C$ )は図3に併記した通りである。

図4に、自励振動式ヒートパイプの詳細を

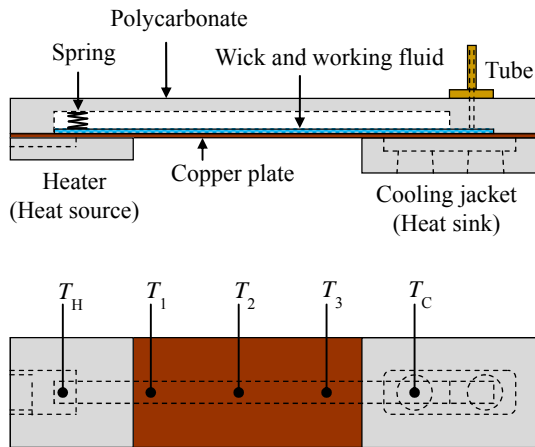


図3 毛細管式ヒートパイプの詳細

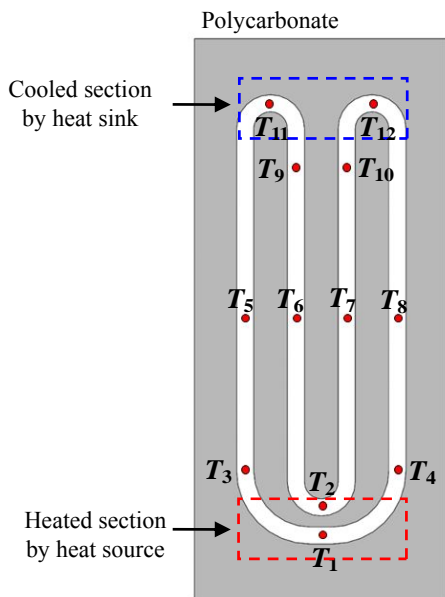


図4 自励振動式ヒートパイプの詳細

示した。ポリカーボネート平板の表面に、断面  $3.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$  の流路を長さ  $80 \text{ mm}$  の間で往復させ、ループ状の熱輸送空間を形成した。ウィックは使用せず、ヒートパイプの温度測定位置 ( $T_1 \sim T_{12}$ ) は図4に併記した通りである。なお、毛細管式ヒートパイプ、自励振動式ヒートパイプともに、作動液には水を使用した。

実験方法は、熱サイフォン式ヒートパイプの場合と同様であり、作動液量  $V$  と加熱量  $Q$  を変化させ、ヒートパイプ各位置の温度の経時変化を測定した。比較検討のため、ヒートパイプに作動液を封入しない場合についても実験を行った。

#### 4. 研究成果

(1) まず、熱サイフォン式ヒートパイプに関する研究成果について記述する。

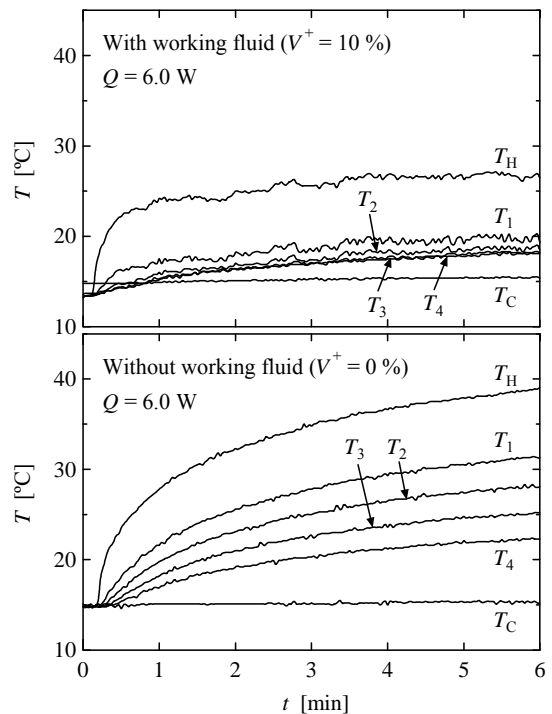


図5 温度分布の経時変化  
(熱サイフォン式ヒートパイプ)

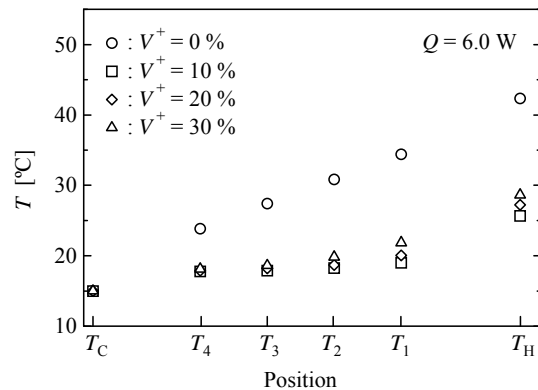


図6 定常時の温度分布  
(熱サイフォン式ヒートパイプ)

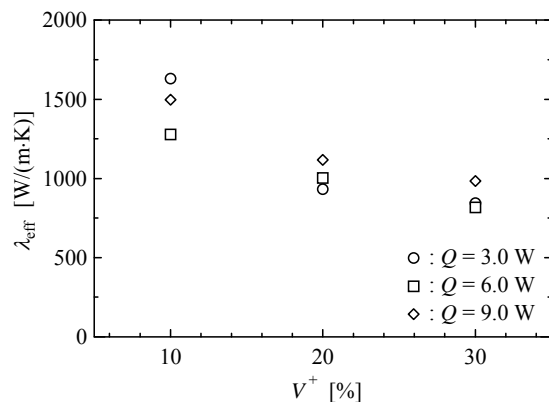


図7 有効熱伝導率  
(熱サイフォン式ヒートパイプ)

図5に、ヒートパイプ各位置の温度の経時変化を示した。ここでは、 $Q=6.0\text{ W}$ において、 $V^+=10\%$ のときの実験結果(上図)を、作動液を封入しない場合の実験結果( $V^+=0\%$ 、下図)とともに示した。横軸は加熱開始からの時間  $t$  である。いずれの場合も、加熱を始めると各位置の温度が上昇し、しばらくすると定常状態に達するが、両者を比較すると  $V^+=10\%$ の場合、各位置の温度が全体的に低くなっている。また、この場合、定常状態に達するまでの時間も短くなっており、従来のヒートパイプと同様に応答性が良いことがわかる。

図6に、定常状態におけるヒートパイプの温度分布を示した。ここでは、 $Q=6.0\text{ W}$ の場合について、 $V^+=10\%$ 、 $20\%$ 、 $30\%$ の実験結果を示しており、作動液を封入しない場合( $V^+=0\%$ )の実験結果も併記した。作動液を封入した場合、いずれの  $V^+$  においても、加熱部では作動液の蒸発・沸騰現象が生じ、一方で、重力により作動液が流下・還流する様子を観察できた。また、作動液を封入しない場合と比較すると、作動液を封入した場合、ヒートパイプの加熱部および断熱部の温度が大幅に低くなっており、作動液の相変化による潜熱輸送の効果が現われていると判断できる。

図7に、熱サイフォン式ヒートパイプの有効熱伝導率  $\lambda_{\text{eff}}$  を示した。 $\lambda_{\text{eff}}$  は、 $V^+$  が増加すると減少するが、 $V^+=10\%$ において  $\lambda_{\text{eff}}=1280\sim 1630\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  の高い値が得られることが確認できた。なお、 $V^+$  が大きくなると、図1から推察できるように、沸騰石より上方の液量が多くなり、その重さによって沸騰が抑制されるため  $\lambda_{\text{eff}}$  が減少すると考えられる。

(2) 次に、毛細管式ヒートパイプおよび自励振動式ヒートパイプに関する研究成果について記述する。

図8に、定常状態における毛細管式ヒートパイプの温度分布を示した。ここでは、 $Q=6.0\text{ W}$ の場合について、 $V=1.0\text{ mL}$ 、 $1.5\text{ mL}$ 、 $2.0\text{ mL}$ の実験結果を示しており、作動液を封入しない場合( $V=0\text{ mL}$ )の実験結果も併記した。なお本研究では、図3のように、ウイックの設置位置を熱輸送空間の下面に限定しているため、ヒートパイプを作動させると、凝縮した液滴の一部が上面に留まる。したがって、ヒートパイプ内で実質的に熱輸送に寄与している作動液量は  $V$  よりも小さくなっている。図8から、 $V=2.0\text{ mL}$ の場合、作動液の相変化による潜熱輸送の効果が現れていると判断できる。一方、 $V=1.0\text{ mL}$ 、 $1.5\text{ mL}$ のとき、作動液を封入しない場合とほぼ同様の温度分布となっており、ウイックがドライアウトして、作動液不足の状態になっていると判断できる。

図9に、毛細管式ヒートパイプの有効熱伝導率  $\lambda_{\text{eff}}$  を示した。 $V$  が少なく、 $Q$  が大きい場合にはドライアウトが生じるが、 $V=2.0\text{ mL}$ 、 $Q=6.0\text{ W}$ の条件下では、 $\lambda_{\text{eff}}=575\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ の熱輸送を達成していることがわかる。なお、 $V$

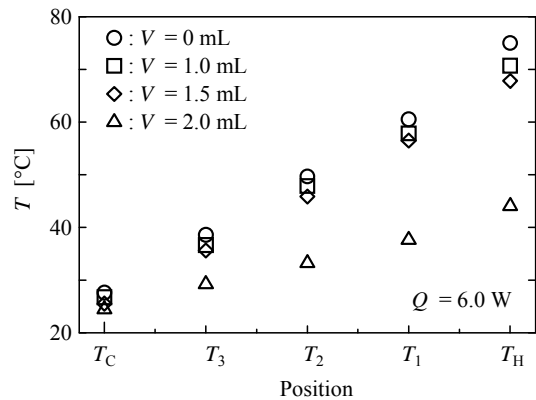


図8 定常時の温度分布  
(毛細管式ヒートパイプ)

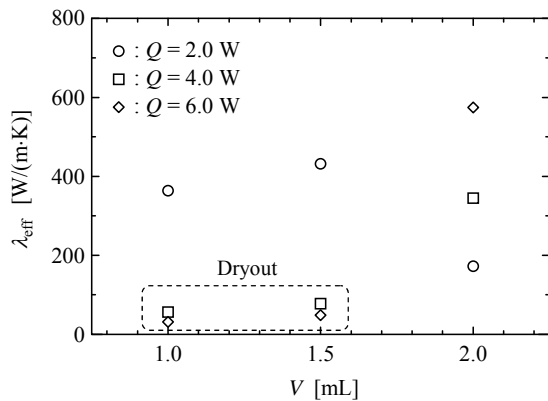


図9 有効熱伝導率  
(毛細管式ヒートパイプ)

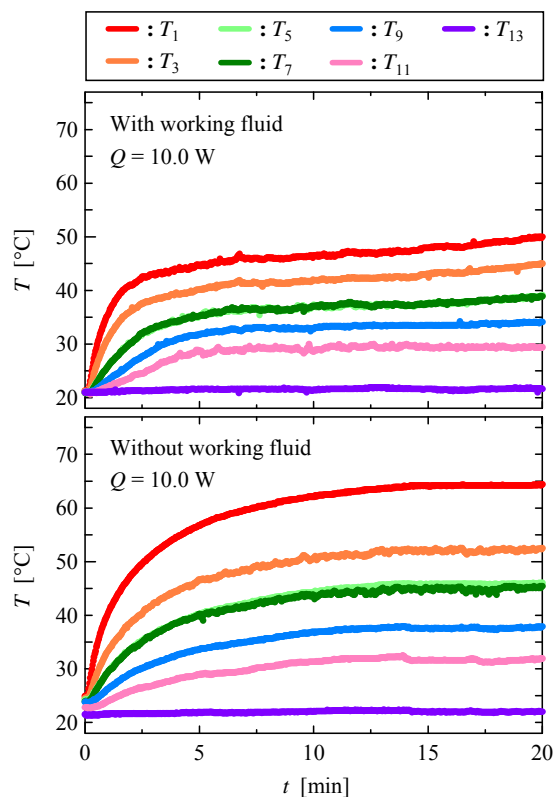


図10 温度分布の経時変化  
(自励振動式ヒートパイプ)

= 2.0 mL では、 $Q$  が小さくなると、ウイックの蒸発部に溜まる液量が増え、これが伝熱抵抗となるため、 $\lambda_{\text{eff}}$  が低下すると考えられる。

図 10 に、自励振動式ヒートパイプについて、各位置の温度の経時変化を示した。横軸は加熱開始からの時間  $t$  である。ここでは、 $Q = 10.0 \text{ W}$  の場合の実験結果を示しており、作動液を熱輸送空間の 50 % 封入した場合(上図)と封入しない場合(下図)の結果を比較した。なお、 $T_{13}$  は冷却水温度である。作動液を封入した場合、ヒートパイプの温度分布が全体的に低くなっており、有効熱伝導率を評価すると  $453 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  の値が得られた。

以上の研究結果から、ヒートパイプの機構を形成することにより、電子基板のようなプラスチック平板にも、潜熱輸送の機能をもたせることが可能であるといえる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計4件)

前原裕之, プラスチック材料を用いたウイック式ヒートパイプに関する研究(熱輸送特性に関する基礎実験), 日本機械学会九州支部第67期総会・講演会, 2014年3月14日, 九州工業大学(福岡県北九州市)

小糸康志, ポリマーヒートパイプに関する検討, 日本ヒートパイプ協会第32回総会および講演会, 2013年7月27日, TAP高田馬場(東京都新宿区)

Yasushi Koito, Fabrication of Heat Pipes on an Acrylic Resin Board, ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems (InterPACK 2013), 2013年7月18日, Hyatt Regency San Francisco Airport Hotel (Burlingame, California, USA)

小糸康志, ポリマーヒートパイプに関する基礎実験, 第50回日本伝熱シンポジウム, 2013年5月30日, ウェスティンホテル仙台(宮城県仙台市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小糸 康志 (KOITO, Yasushi)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号: 70347003