

# 特集 | ブリッジ型マイクロヒータの放熱分析\*

## Analysis of Heat Transfer in Micro-bridge Heater

和戸弘幸 山本敏雅 竹内幸裕 大塚義則 秋田成行  
 Hiroyuki WADO Toshimasa YANAMOTO Yukihiro TAKEUCHI Yoshinori OTSUKA Shigeyuki AKITA

For the design of thermal sensor, heat transfer and thermal response in a micro-bridge heater should be revealed. The power input is measured as a function of temperature rise both in air and in vacuum to separate the heat transfer through air. The ratio of the transfer through air to the other transfer is investigated as a function of the area and the configuration of the heating region. The result indicates that the transfer through air is the major heat-loss and is proportional to the area, and the transfer though air on the beams is separated. Thermal response is revealed to depend on the area and not on the configuration.

**Key Words** : Thermal Sensor, Micro-bridge Heater, Heat Transfer, Thermal Response

### 1. はじめに

近年、圧力をはじめとするほとんどすべての物理量の検出において、Siマイクロマシニング技術を利用した半導体センサの研究開発が盛んに行われている。この半導体センサの特長は、半導体プロセスを用いることで小型でかつ低コスト化を実現できる点にある。

特に、Si基板あるいは多結晶Siにミクロンオーダの加工を施すことで、梁やダイヤフラム構造等を形成し、「加速度」や「圧力」などの外力による構造変形を検出するセンサは、既にエアバックシステムや燃料噴射制御等などに広く用いられている。一方、この変形を利用するセンサ以外にも、「熱」を利用したガスセンサや湿度センサなども開発が活発となってきている。

これらの多くはセンサ内にヒータ構造が必要であり、例えばガスセンサではSnO<sub>2</sub>等のガスを検知する膜を加熱させ、感度を上げることに使われている。このようなヒータを持つ熱式センサは、半導体化することで低消費電力及び高応答なセンサを実現できるメリットがある。これは、ヒータを半導体プロセスで使われるSiの酸化膜(SiO<sub>2</sub>)や窒化膜(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)等の薄膜絶縁膜を用いてSi基板上に橋架して形成させることで、基板との熱絶縁性を高めつつ熱容量を極めて低減できるためである。

本稿は、この低消費電力かつ高応答なガスセンサ<sup>1)</sup>や湿度センサ<sup>2)</sup>への展開が可能なマイクロヒータに関してのものである。

数μmの薄膜構造で形成されるマイクロヒータは、数mWで数100℃まで昇温可能であり、また数msで応答することが知られている<sup>3)</sup>。しかし、その熱絶縁

効果によって低消費電力化や高応答が図れる一方、機械的強度の劣化が懸念される。

そのため、構造を設計するにあたり、支持部強度を高めて信頼性を確保することと支持部への放熱量を低減して投入電力を有効に活用することの両立が必要となる。そのためには、発熱部から支持部や空気への放熱量を把握することが重要となるが、どの程度であるかを見極めた報告は少なく、応答性などの基本特性と関連づけたものはなかった。数少ない報告もまた解析を利用するものがほとんどで<sup>4)</sup>、かつ熱伝導率や比熱等の薄膜物性値がバルク値と異なるため<sup>5)</sup>、その妥当性に懸念があった。そのため、放熱量を経路ごとに分離把握できる簡便な方法が求められていた。

このような背景を踏まえて本稿では真空を利用し、ヒータから生じる放熱を分離する簡便な測定手法を提案した。実際に、ブリッジ型マイクロヒータの試作を行い、消費電力とヒータ温度との関係を大気中と真空中で比較することで、全放熱量から空気への放熱を分離できる方法について述べるとともに、様々な発熱部形状における放熱変化を調べた。

その結果、発熱部から生じる放熱量のほとんどが空気への放熱であり、発熱部形状が同じであれば空気への放熱は発熱部面積に比例することがわかった。そして、この放熱量の面積依存性から梁上での空気への放熱をさらに分離できることを明らかにした。さらに、基本特性である応答性への影響を調べた結果、発熱部面積に依存するが形状には依存しないことを明らかにしたことについて述べる。

\* (社)電気学会の了解を得て、E部門「マイクロマシニング研究会(1999.3)」より、一部加筆して転載

## 2. マイクロヒータ試作

試作したブリッジ型マイクロヒータの概観及び断面構造をFig.1に示している．このような薄膜構造を形成する場合，膜に内部応力が存在するため，構造体にかかる応力を制御することが必要である．構造体全体に圧縮応力がかかると座屈が生じ，強い引張応力がかかると膜破壊が生じるため，一般的には数10MPa程度の弱い引張応力が望ましいとされる．

一方，膜厚方向の応力分布もまた構造体に反りを発生させる要因となるため，応力分布についても制御することが要求される．そこで，ヒータ材料を膜中心として圧縮応力膜であるSiO<sub>2</sub>膜と引張応力膜であるSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜を組み合わせた対称膜構造によりマイクロヒータを試作した．

この構造の特長は，圧縮及び引張応力膜を組み合わせることで全体にかかる応力を緩和させること，及び構成膜を膜中心に対して対称としたことで反りを発生させる応力分布を打ち消し合うことである．

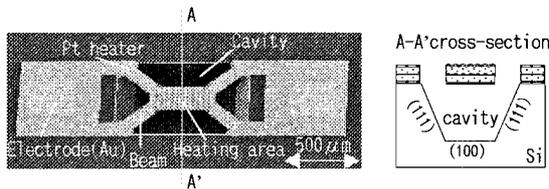


Fig. 1 SEM photograph of micro-bridge heater.

その製作工程は，初めにSi(100)基板上にSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜0.075μm，SiO<sub>2</sub>膜0.6μmを順次堆積させ，構造体となる下部膜を形成する．その上に，ヒータ材料としてPt薄膜を0.35μm堆積させ，ヒータ形状が得られるようにエッチングを施した．そして，下部膜形成時と同じ膜厚かつ堆積順を逆としてSiO<sub>2</sub>，Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜を積層させて上部膜を形成させることで，全体の膜厚を1.35μmとし，かかる応力を約10MPaの引張応力となるようにした．その後，配線取り出し口となる部分に金パッドを形成させ，ブリッジ形状が得られるように絶縁膜をエッチングする．最後に，TMAH(Tetramethyl Ammonium Hydroxide)溶液を用いて深さ280μmの空洞部が形成されるようにSi基板を異方性エッチングすることで，マイクロヒータを形成した．ヒータは四つの梁すべてにPt膜を配置させてリード部とし，中央の発熱部を支持させた構造とした．また，発熱部内でのPt配線のライン&スペースを約40となるよう抵抗値を設計し，試作したPtヒータの抵抗温度係数は3530ppm/°Cであった．

## 3. 放熱分離測定法

Fig.2は消費電力を決定づける放熱の三つの要因を示している．要因には，空気への放熱，梁を通しての基板側への放熱，輻射による放熱がある．ただし，輻射による放熱量は，センサの通常使用温度が数百度程度と考えると，その放熱は他の二つの要因と比較して無視できるほど小さい<sup>6)</sup>．そのため，発熱部から梁を通して基板側への放熱量 $Q_{sub}$ と空気を通しての放熱量 $Q_{air}$ との2つの要因を分離することが重要となる．

$Q_{sub}$ と $Q_{air}$ を分離する測定は，真空中と大気中のヒータ特性を比較することで可能となる．大気中では支持部である梁を通しての基板側への放熱と空気を通しての放熱との2要因が作用するのに対し，真空中では梁を通しての基板側への放熱のみの1要因によって放熱が生じるためである．

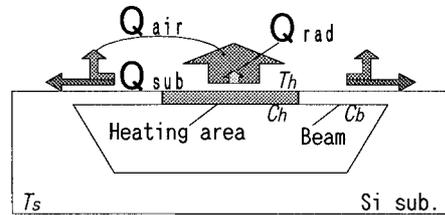


Fig. 2 Schematic cross-section of heat-transfer in micro-bridge heater. (heat-transfer  $Q$ , temperature  $T$ , heat-capacity  $C$ )

一例として，Fig.1の400μm×200μmの発熱部を梁幅100μm，梁長280μmで支持したマイクロヒータにおいて，大気中と真空中とで測定したヒータ温度に対する消費電力の関係をFig.3に示している．ここで，真空中での測定は $1 \times 10^{-3}$ Paで行い，ヒータ温度は抵抗温度係数から抵抗値増分を換算した．

実際に，試作したヒータでの放熱を比べてみると，消費電力の70%以上が空気への放熱であり，ほぼヒータ温度によらず $Q_{air}/Q_{sub}$ 割合は一定値の約3.4倍を示した．一方，大気中での測定において，ヒータ温度に対し消費電力が非線形に増加している．これは，放熱による自然対流の影響であると推察され，ヒータ温度が100°C付近から自然対流の影響が顕著になっている．

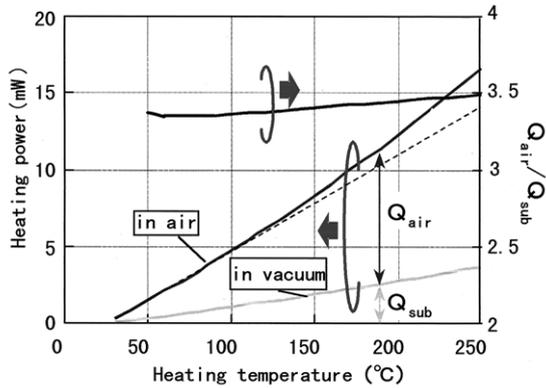


Fig. 3 Power as a function of the heating temperature.

4. ヒータ形状による放熱割合比較

発熱部面積による  $Q_{air} / Q_{sub}$  割合の影響を調べるため、梁部形状を固定し、発熱部面積を相似形(縦/横比 = 1/2)にて  $0.020 \sim 0.180\text{mm}^2$  まで変化させ、大気中と真空中でのヒータ特性を比較した。Fig.4 は、 $T=200$  となる消費電力の発熱部面積依存性を示している。真空中測定で得られる  $Q_{sub}$  は発熱部面積に対して変化せず、梁部と発熱部形状で決定され、面積に無関係の一定値となる。

これに対して、大気中と真空中との差である  $Q_{air}$  は発熱部面積に単純に比例するが、発熱部面積を零にしても  $Q_{air}$  は零とはならないことがわかる。これは、発熱部の面積として考慮していない梁上での放熱量と考えることができる。それゆえ、このような面積依存性を求めることで梁上での放熱量と有効な発熱部上での放熱量とをさらに分離することが可能となり、梁上における放熱量は  $3.8\text{mW}$  であることがわかった。

発熱部形状が放熱量に与える影響を調べるため、縦/横比を  $1/4, 1/2, 1/1$  の形状において、発熱部面積を変化させて評価を実施した。形状を変化させても、同様に発熱部面積に対して基板側への放熱量  $Q_{sub}$  は一定となり、空気への放熱量  $Q_{air}$  は面積に単純に比例した。Fig.5 は  $T=200$  時における基板側と空気への放熱について、発熱部面積を  $0.08\text{mm}^2$  一定としたときの発熱部形状に対する依存性を示している。

その放熱割合を見ると、基板側への放熱量および梁上での放熱量が縦/横比の増加に伴い、若干増加していることがわかる。これは、発熱部の縦/横比の違いで、発熱部中央と端部での温度差が異なるため、縦/横比が高いほど発熱部の温度分布が不均一になる影響と考えている。

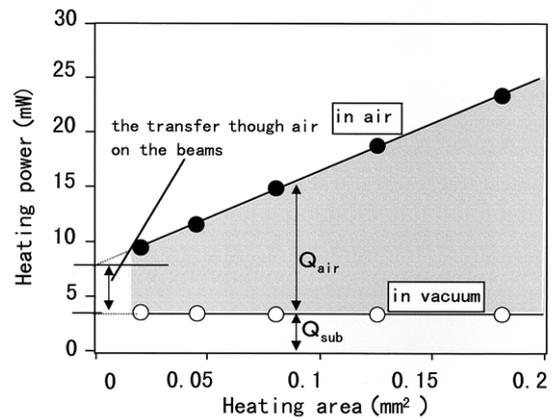


Fig. 4 Power as a function of heating areas at  $T=200$

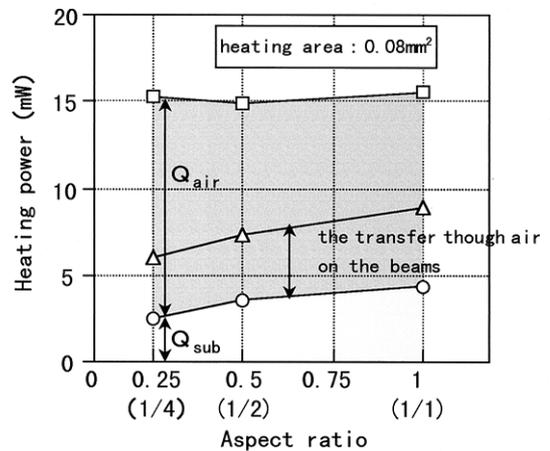


Fig. 5 Power as a function of the Configuration of heating areas at  $T=200$

5. 応答性への影響

これらの発熱部形状で放熱割合が異なるマイクロヒータにおける応答時間への影響について検討した。初めに、一般にマイクロヒータにおける非定常状態での挙動は、下式の簡単な一体熱容量モデルで表される<sup>7)</sup>。

$$(Ch + Cb) \frac{dT}{dt} + G T = P \quad (1)$$

ただし、 $Ch, Cb$  は発熱部および梁部の熱容量、 $T$  は発熱部と基板との温度差 ( $=T_h - T_s$ )、 $G$  は熱伝導率、 $P$  はヒータ電力であり、添字の  $h$  はヒータ部、 $b$  は支持部、 $s$  は基板を意味している。(1)式において、ヒータ電力  $P$  を一定になるように入力したとき、温度差  $T$  は単純に時定数 を含む以下の式になる。

$$T = \frac{P}{G} (1 - \exp(-t/\tau)) \quad (2)$$

このとき、時定数は  $\tau = (Ch + Cb) / G$  である。ここで、支持部形状を同一としているため、梁部の熱容量  $Cb$  は一定であり、 $Ch$  は発熱部面積  $S$  に依存するため、単位面積当たりの熱容量を  $c$  とすると、 $Ch = cS$  と表すことができる。一方、熱伝導率  $G$  は Fig.3 のようにヒータ温度と消費電力とが線形に近似できるため、その傾きから得られる。

発熱部面積依存性を考えた場合、大気中における熱伝導率  $G$  は  $Q_{air}$  が面積に対して線形なことから、同様に線形となる一方、真空中では  $0.018 \text{ mW/K}$  一定である。そのため、真空中での時定数  $\tau_v$  を考えると、面積に対して線形となり、Fig.6 の実測した  $\tau_v$  から各熱容量を  $c = 2.79 \text{ mJ/(Kmm}^2)$  および  $Cb = 0.0275 \text{ mJ/K}$  と簡単に得ることができる。この値を用いて、大気中での時定数  $\tau_a$  を計算した結果も Fig.6 に点線で示しているが、実測値と良く一致していることがわかる。

発熱部面積を変化させた場合に、単純な一体熱容量モデルが大気中および真空中とも適用でき、その応答性は放熱割合に起因した時定数  $\tau = (Ch + Cb) / G$  で決定されることがわかる。

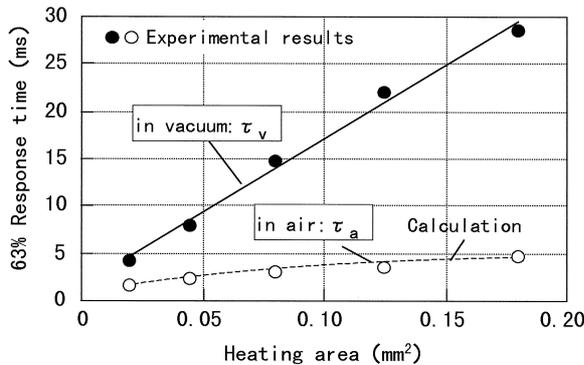


Fig. 6 The 63% response time as a function of the heating area in air and vacuum at  $T = 200$  .

次に、発熱部の縦/横比が異なる場合を考えると、一体熱容量モデルでは前項で述べたように放熱の割合が違うため、縦/横比によって見かけ上の熱容量  $c$ 、 $Cb$  は異なることになる。しかしながら、同様に熱伝導率  $G$  が縦/横比によって変化するため、Fig.7 のように大気中の時定数を発熱部面積でプロットすると、発熱部形状に依存しないことがわかった。このことから、同じ梁部を持つヒータの応答性は、放熱割合に依らず面積にのみ依存することがわかった。

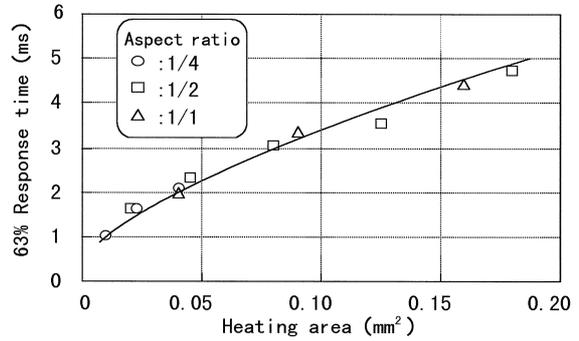


Fig. 7 The relationship between the 63% response time and the configuration of the heating region in air at  $T = 200$  .

## 6. おわりに

真空と大気中でのヒータ特性を比較することで、ブリッジ型マイクロヒータの発熱部から生じる放熱について、基板への放熱、発熱部あるいは梁部上での空気への放熱とを分離する簡便な実験手法について提案した。例として、発熱部面積と形状に起因する放熱量変化及び応答性への影響を概略ではあるが明らかにした。本方法及び結果は、マイクロヒータを用いるセンサでの構造に起因する放熱割合を見極め、センサ設計を行うための1つの糧となると考えている。

## < 参考文献 >

- 1) Lie-yi Sheng, Zhenan Tang, Jian Wu, Philip C.H. Chan and Johnny K.O. Sin, "A Low-Power CMOS Compatible Integrated Gas Sensor Using Maskless TiN Oxide Sputtering", *Transducers 97*, 1997, pp.939-942.
- 2) M. Kimura, "A New Method to Measure the Absolute-Humidity Independently of the Ambient Temperature", *Transducers 95*, 1995, pp.843-846.
- 3) C. Rossi, E. Scheid, D. Esteve, "Theoretical and experimental study of silicon micromachined microheater with dielectric stacked membranes", *Sensor and Actuators A* 63, pp.183-189.
- 4) 岡野 覚, 平野 真司, 堀口 浩幸, 「マイクロフローセンサにおける熱伝達解析」, *電気学会論文誌E*, Vol.119-E, pp.38-43, 1999
- 5) O. Paul, H. Baltes, "Thermal Conductivity of CMOS Materials for the Optimization of Microsensors", *J. Micromech. Microeng.*, vol3, 1993, pp.110-112.
- 6) Y.C. Tai, C.H. Mastrangelo and R.S. Muller, "Thermal Conductivity of Heavily Doped LPCVD Polysilicon", *Proc. of IEDM*, pp.278-281, 1987.
- 7) J. Hayasaka, C. Sawai and M. Kimura, "Study On Thermal Analysis Using Microheater", *Technical Digest of*

the 16th Sensor Symposium, 1998, pp.111-114.

< 著 者 >



和戸 弘幸  
(わど ひろゆき)

基礎研究所  
結晶成長，半導体センサ関連の要素技術研究に従事．工学博士



大塚 義則  
(おおつか よしのり)

基礎研究所  
半導体センサ関連のデバイス・プロセス，自動車用LSIの研究開発に従事．



山本 敏雅  
(やまもと としまさ)

基礎研究所  
SiMOS デバイス，Si半導体センサ関連の研究開発に従事．



秋田 成行  
(あきた しげゆき)

基礎研究所  
半導体センサ，自動車用LSI，ASIC機能回路の研究開発に従事．



竹内 幸裕  
(たけうち ゆきひろ)

基礎研究所  
化合物半導体のデバイス・結晶成長，半導体センサ関連の研究開発に従事．