

## 論文

## 低消費電力・低コスト・高耐久性のマイクロヒータの開発

山岡 英彦<sup>\*1)</sup>

## Development of low power consumption, low cost, and high durability micro heater

Hidehiko Yamaoka<sup>\*1)</sup>

In general, the micro-heater is adopted for sensors such as gas sensor, humidity sensor, flow sensor and thermal acceleration sensor. The downsizing, low power consumption and high speed response are required for these sensors. In order to respond to these requirements, a miniature type heater is being developed and manufactured applying the Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) technology.<sup>(1)-(3)</sup>

However the MEMS technology is a high barrier for small-sized and medium enterprises (SMEs) to develop a product using a MEMS micro-heater and enter into a market because of the complicated structure of micro-heater, and the costly semiconductor manufacturing process required for the production process. Further, low power consumption for a long term operation with a battery and decreased thermal stress for damage prevention of element are strongly required.<sup>(4)-(8)</sup>

In this study, an improvement on the manufacturing process has been engineered for the new entry of an SME by cutting down the initial investment cost and reducing the number of processes with high cost of running. The new structure has been successfully developed with low power consumption based on reduced thermal capacity, and enhanced durability based on relieved thermal stress.

キーワード：マイクロヒータ，中空，白金電極，アンカー

Keywords : Micro heater, Cavity, Platinum electrode, Anchor

## 1. はじめに

一般的に，ガスセンサ，湿度センサ，フローセンサ，熱式加速度センサなどのセンサには，マイクロヒータが用いられている。これらのセンサでは，小型化，低消費電力化，高速応答性が求められている。これらの課題を解決するために，Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 技術を用いた微細なヒータが開発され，製品化されている<sup>(1)-(3)</sup>。しかし，MEMS 技術を用いたマイクロヒータの構造は複雑であり，その作製プロセスは高価な半導体製造工程を基本としていることから，中小企業がMEMSマイクロヒータを用いた製品を開発し，市場に参入するには高い障壁がある。また，電池での長時間駆動を目指したさらなる低消費電力化や素子破壊防止のための熱応力低減が求められている<sup>(4)-(8)</sup>。

本研究では，初期投資とランニングコストの高い工程数を低減することで，中小企業の新規参入しやすいプロセスを設計した。また，開発した構造は，熱容量の低減による低消費電力化，熱応力の緩和による高耐久性化に成功したので，ここに報告する。

## 2. 研究目標

本研究では，ガスセンサへの応用を目指して，表1に示す目標を設定した。

表1. 研究目標

項目	目標値
低消費電力	・ 400℃で基本消費電力10 mW以下。 ・ 間欠駆動が可能な熱応答性を有する。
低コスト	・ フォトリソグラフィ，スパッタ，ドライエッチング等の高コスト工程を6工程以内。
高耐久性	・ 熱衝撃525万回で断線もしくは短絡無し。 (低温：約25℃，高温：約400℃)

これらの目標値の一部は，独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の開発プログラムである次世代高信頼性ガスセンサー技術開発の目標値を参考にした<sup>(1)</sup>。

## 3. 構造設計・試作

ヒータ部の熱容量を小さくすること，少ないプロセス数で素子を作製できること，熱衝撃による応力を低減することを考慮し，構造設計を行った。

3.1 熱容量・断熱性 一般的なMEMSマイクロヒータは，図1に示すような中空構造をしている<sup>(9)-(13)</sup>。この

事業名 平成25年度 基盤研究  
\*1) 電子半導体技術グループ

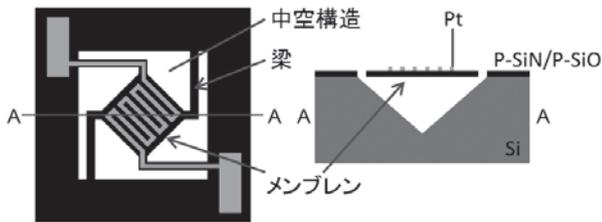


図1. 従来のマイクロヒータ構造

マイクロヒータは、梁で支えられた中空メンブレンの上にヒータ配線が形成されており、加熱部位を中空構造とすることで熱容量が小さくなり、さらに、梁で支える構造とすることで周囲との断熱性を確保している。この結果、少ない電力で加熱でき、熱応答速度が速くなる利点がある。

一方、メンブレン自体の熱容量はヒータ配線の熱容量と同程度以上であるので、メンブレンを省略し、ヒータのみを宙空状態にできればマイクロヒータの熱容量を半分に低減できるものと考えた。図2に本研究で開発したマイクロヒータ構造を示す。

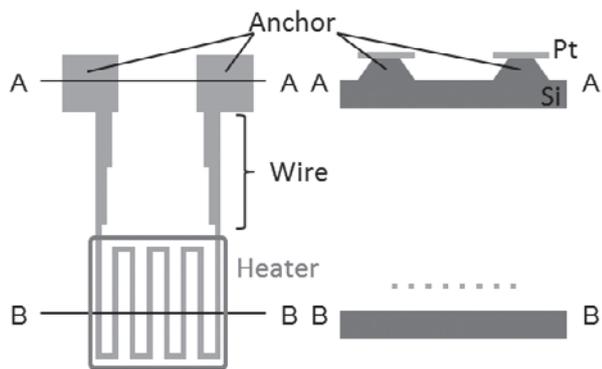


図2. 本研究のマイクロヒータ構造

熱容量を低減しつつ、ヒータの断熱性を確保するため、以下に示す新しい構造を提案する。

- ・アンカー部からの熱逃げを抑制するため、配線部を設ける。
- ・配線部自体が発熱しないようにアンカー部付近の線幅を太くする。
- ・ヒータ部からの熱伝導を抑制するため、ヒータ付近の配線部を細くする。

**3. 2 コスト** 従来のMEMSマイクロヒータ構造では、メンブレン構造が用いられており、配線の取り回しや感ガス材などの搭載の設計自由度が大きいという利点がある。しかし、メンブレン構造を形成するためには、成膜、パターンニング、およびエッチングの3工程が必要であり、パターンニングのためのマスク代と高額な工程費用が発生する。一般的にメンブレン構造には、シリコン酸化膜やシリコン窒化膜の単層、積層、またはこれらの混合層が用いられるケースが多く、これらの成膜には化学的気相堆積法[Chemical Vapor Deposition : CVD法]や、スパッタ法といっ

た高額な装置を必要とする成膜方法が用いられるので、工程費用が高額になる。さらには、作製プロセス数が増えると製品歩留りの低下を招くため、トータルコストが上昇するという課題がある。本研究で提案しているマイクロヒータ構造はメンブレンを省いているので、工程が簡略化される結果、製造コストを低減できる。

**3. 3 熱応力** マイクロヒータに求められる性能の一つとして、高速熱応答性があり、例えばガスセンサの場合、30秒ごとにガス濃度を検知する必要がある。ガス濃度を検知している時間は約400°Cの加熱を行い、検知していない時間は省電力化のため室温に冷却する。この時、メンブレンやヒータ配線部が熱膨張と冷却収縮を繰り返すとともに、梁部の根元に応力が集中する結果、梁部が破断する故障が知られている。このため梁部分に応力緩和構造を採用する必要がある<sup>(8)</sup>。従来のMEMSヒータは、加熱部であるメンブレンが両持ち梁で支持されている結果、上記の応力集中が発生したが、本研究では、ヒータを片持ち梁構造とすることで、熱応力を解放できる。

**3. 4 試作** 図3に製造プロセスの概略図を示す。絶縁層である熱酸化SiO<sub>2</sub>膜付きのシリコン基板上に薄膜抵抗体として白金を用いたヒータパターンを形成した。ヒータパターンをエッチングマスクに用いて、SiO<sub>2</sub>およびシリコンを等方性ドライエッチングし、マイクロヒータを作製した。

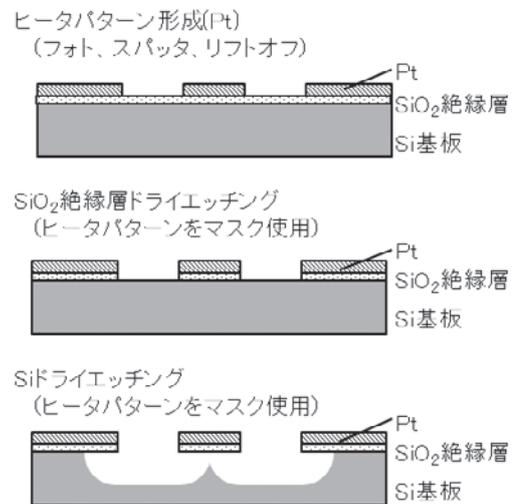


図3. プロセス概略図

## 4. 特性測定

マイクロヒータの性能を評価するために、基本消費電力測定、熱応答性測定、および熱衝撃耐久試験を行った。

**4. 1 基本消費電力測定** 基本消費電力とは、ヒータを一定温度で保持する時に消費する電力のことである。したがって、基本消費電力を知るためにはヒータ温度を知る必要がある。本研究では、簡便にしかも高精度にヒータ温度を知る手法として電気抵抗率の温度係数から算出する方法を採用した。本研究で用いている薄膜抵抗体はアニール処

理（加熱処理）によって温度係数が変化することが知られているので，アニール温度と電気抵抗率の温度係数の関係を測定した。測定結果を図4に示す。本研究で用いた薄膜抵抗体では，600℃から1000℃の範囲において，アニール温度と温度係数は比例関係にある。

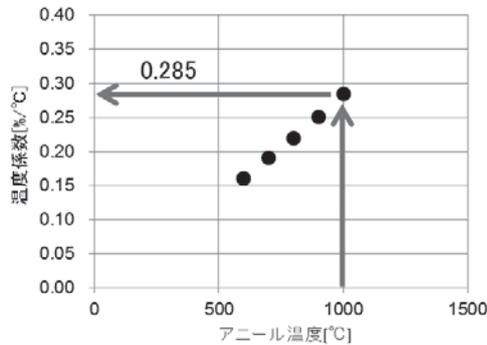


図4. 薄膜抵抗体のアニール温度と温度係数

マイクロヒータを用いた各種センサの計測精度を向上させるためには，温度係数を大きくする必要がある。そこで，実験に使用した加熱装置の最大加熱温度である1000℃でアニールを実施した。このとき，マイクロヒータの電気抵抗率の温度係数は0.285%/℃となる。

アニール温度1000℃の場合には，マイクロヒータ素子が反り上がることを確認した。図5にアニール前後のSEM写真を示す。ヒータが反り上がることによって基板との離隔が大きくなり，この結果，ヒータの断熱性が高くなるので，この反りを断熱性改善に利用することにした。反り量の許容値については今後の検証課題である。

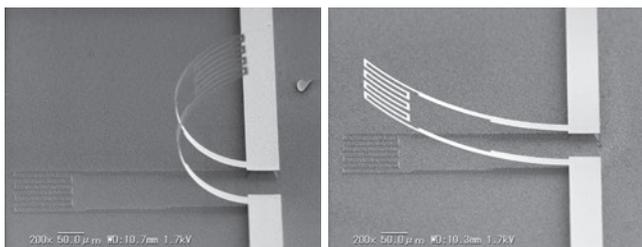


図5. マイクロヒータSEM画像（左：アニール前，右：アニール後）

ヒータを定電流で駆動することで温度を一定に保ち，この時の電流とヒータの両端にかかる電圧から電力を算出することで基本消費電力を求めた。図6に消費電力とヒータ温度のグラフを示す。

ヒータを400℃に加熱するのに必要な基本消費電力は約10 mWであり，目標を達成できた。

また，配線部とアンカーからの熱逃げ抑制の効果を確認するために，配線の長さやアンカー数をパラメータとした検証実験を行った。結果を表2に示す。

配線長による消費電力低減効果は②と③の結果から13%，アンカー数による消費電力低減効果は②と④の結果から

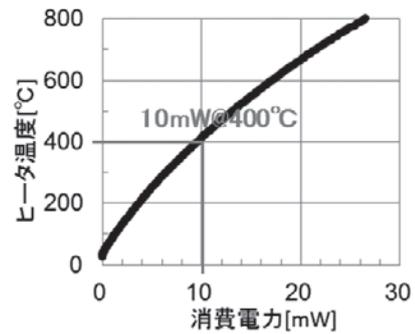


図6. 消費電力とヒータ温度

表2. 配線長とアンカー数の消費電力に及ぼす影響調査

	①	②	③	④
配線長[μm]	120	220	120	220
アンカー数[個]	3	2	2	3
消費電力[mW]	12.6	10.0	11.5	10.8

7.4%，配線長とアンカー数の効果の合計は①と②の結果から20.6%であり，配線部の設計の重要性を立証する結果となった。

4. 2 熱応答性測定 熱応答性は，マイクロヒータに通電後，一定温度に達するまでの時間を測定して行った。図8に回路概略図を示す。

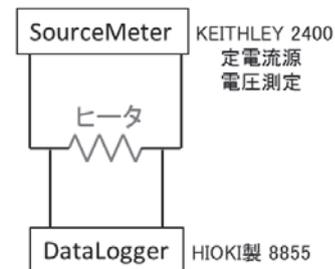


図8. 熱応答性測定回路概略図

ソースメータを用いて，マイクロヒータを定電流駆動し，その時の電圧値を5 μ秒ごとにモニタして，熱応答性を評価した。電圧値の高速モニタには，データロガー（HIOKI社製 8855 MEMORY HiCORDER）を用いた。測定した結果を図9に示す。

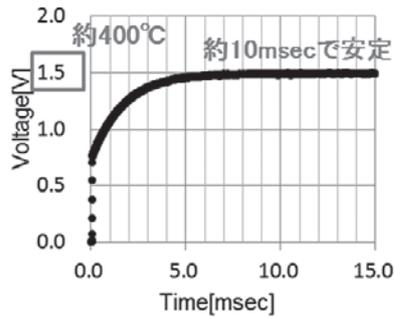


図9. 熱応答性測定結果

約10 m秒で400°Cまで加熱できることを確認できた。ガスセンサに求められる測定間隔は1分間に2回検知であり<sup>(1)</sup>、10 m秒での熱応答性があれば、間欠駆動が可能である。フローセンサ、加速度センサなどの高速応答性を求められるデバイスへの応用も十分に期待できる。

**4.3 熱衝撃耐久性試験** 図8の測定回路で、ソースメータから矩形波を出力し、通電と遮断を繰り返すことで、マイクロヒータに常温と高温の熱衝撃を印加した。設定値を表3に示す。

表3. 熱衝撃試験の設定値

温度	電圧値	時間
25°C (室温)	0.0 V	100 m秒
400°C	1.5 V	100 m秒

熱衝撃耐久性試験投入前後の電気抵抗値の変動率を評価した。250万回の熱衝撃後、中間取出しを行い、合計525万回の熱衝撃を加えた後の電気抵抗値の変動率を求めた。図10に525万回の熱衝撃耐久性試験後の電気抵抗値の変動率のヒストグラムを示す。

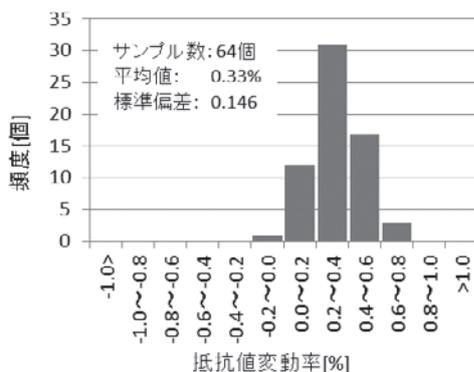


図10. 熱衝撃耐久性試験結果

この試験による断線もしくは短絡発生率は0%で、電気抵抗値の変動率は、平均で0.33%、標準偏差は0.146であった。この電気抵抗変動率は、温度に換算すると約1.14°Cとなり、400°Cに対して十分に小さい変動率であると判断した。

## 5. まとめ

マイクロヒータの開発にあたり、低消費電力化、低コスト化、高耐久性を目的として、ヒータ構造の設計とその作製プロセス設計を行った。

メンブレンの省略、アンカー構造の採用、熱逃げ抑制用の配線構造により、プロセスコストの削減とともに熱容量を低減することで、低消費電力化を実現できた。また、ヒータの片側を自由端とする構造とし、熱応力を逃がす設計にした。これにより、525万回の熱サイクルにおいても断線率、短絡率がともに0%の高耐久性を達成した。今後、本開発で得た知見を活かした製品開発へ応用していく。

本研究では、一般的かつ安価な設備を用いて製造可能で、しかも従来工法よりも少ないプロセス数での製造を目指した。本研究で開発したマイクロヒータ構造を用いることで、中小企業のMEMS技術への新規参入が期待できる。

(平成27年7月13日受付, 平成27年8月11日再受付)

## 文 献

- (1) NEDO : 「次世代高信頼性ガスセンサー技術開発」, [http://www.nedo.go.jp/activities/EF\\_00213.html](http://www.nedo.go.jp/activities/EF_00213.html)
- (2) 鈴木卓弥, 相馬伸一, 長瀬徳美 : 「コードレス都市ガス警報器用メタンセンサ」, 富士時報, Vol.84, No.4 (2011)
- (3) 和戸弘幸, 山本敏雅, 竹内幸裕, 大塚義則, 秋田成行 : 「ブリッジ型マイクロヒータの放熱分析」, デンソーテクニカルレビュー, Vol.5, No.1, pp.51-55 (2000)
- (4) 特開2009-58389 : 「ガス検知素子」, 新コスモス電機株式会社
- (5) 特開2012-107999 : 「ガス検知素子」, 新コスモス電機株式会社
- (6) 特開2011-80809 : 「ガスセンサ素子及びその製造方法」, 北陸電気工業株式会社
- (7) 特開2007-64865 : 「ガスセンサ及びガスセンサの製造方法」
- (8) 高田義, 堂上長則, 中田谷昌徳 : 「MEMS技術を用いたマイクロメタンセンサの開発 - 熱耐久性の改善 -」, 信学技報 IEICE Technical Report ED2009-113, pp.57-61
- (9) 木村光照 : 「熱型マイクロセンサの技術動向」, Savemation Rev, pp.4-12 (2001)
- (10) 中小企業庁 : 研究開発成果報告書「MEMS型水素センサー素子及び実装技術の開発」, <http://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/portal/seika/2007/19-63-3-6.pdf>
- (11) 申ウソク, 西堀麻衣子, 松原一郎 : 「5. 熱電式マイクロガスセンサ」, J.Plazma Fusion Res, Vol.87, No.12, pp.835-839 (2011)
- (12) Daisuke Yamazaki, and Toshitsugu Ueda : 「Differential Platinum Thin Film Hydrogen Gas Sensor」, IEEJ Tras.SM, Vol.130, No.3 (2010)
- (13) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 : 「レプリカ成形技術を用いた低コストMEMS製造技術」, [https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2012/pr20120710\\_2/pr20120710\\_2.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120710_2/pr20120710_2.html)