

## 論文の内容の要旨

論文題目            **Thermal Conductivity Pressure Sensors  
on the Basis of Ultra-Fine Silicon Structures**  
(超微細シリコン立体構造を用いた熱伝導圧力センサ)

氏     名            久保田 雅則

我々は大気の中で生きている。食物や水の摂取と異なり、人間は数分たりとも酸素・二酸化炭素のガス交換を止めることが出来ない。従って、大気的安全性を確保する努力は、食物・水の安全性と並んで「安心して生活できる社会」の実現のために不可欠である。現在までに、有毒ガス・酸素・二酸化炭素などの濃度を測定するセンサが多数開発されており、特に半導体デバイスとして製造されるものは微細化やコストの面で利点が多い。

将来的には、ガスセンサ・ガスポンプ・圧力計・制御演算装置・エネルギー源・通信装置などを1 cm程度の大きさで集積化した「集積化ガスシステム」を開発することで、人間の行くところどこでもいつでも大気をモニタリングする仕組みが開発できると考えられる。このような集積化システムの実現には、半導体加工技術を用いてシリコン基板上に機械構造や集積回路を組織化した微小電気機械システム(MicroElectroMechanical Systems: MEMS)を用いることが有力である。本研究では、集積化ガスシステムに向けて、大気圧付近での動作・CMOS回路とのプロセス親和性・圧力計以外のユニットとの同時作製などを考慮し、シリコンの極微細立体構造を用いて構成されるピラニー型の熱伝導圧力センサを開発した。MEMS作製技術の一つであるバルクマイクロマシニング技術を利用して極微細構造を形成することで、マクロスケールでは真空用の圧力計であるピラニーゲージの動作範囲を高い圧力へと移動させることが可能となり、大気圧以上でも高い感度を持つピラニーゲージを実現した。

マクロスケールの電気・機械構造に於いてアクチュエーションやセンシングに用いられている原理や法則をそのままミクロスケールのMEMSに適用しようとするのは適切でない場合が多い。即ち、マクロスケールでは無視出来ていた力や現象がミクロスケールでは無視出来なくなることから、マクロスケールで用いられている仕組みを単純に寸法だけ小さくするのではMEMSに適したデバイスを実現することは困難である。逆にミクロスケールでのみ発現する現象を積極的にデバイス応用することも可能である。

熱伝導圧力計は、気体の熱伝導率が圧力に比例する現象を用いている。圧力計はヒーターとヒートシンクから構成されており、間にある気体分子が輸送する熱の量をヒーターの温度変化として(即ちヒーターの抵抗値変化として)測定して間接的に圧力を測定するデバイスである。

ただし、気体の熱伝導率が圧力に比例するのは気体分子の平均自由行程がヒーター・ヒートシンク間の距離よりも十分に大きい場合に限られ、平均自由行程よりも十分大きな容器の中(例えば我々が生活している部屋)では熱伝導率は圧力に関係なく一定である。室温 1 気圧下での大気平均自由行程は 65nm 程度であるため、この現象を利用するためには微細なヒーター・ヒートシンクの作製が必須である。半導体加工技術を駆使して微小なヒーターとヒートシンクを形成し、その間にサブミクロンスケール幅のギャップを設けることで高い圧力においてもピラニーゲージを動作させることができるようになる。

本研究で開発したピラニーゲージの模式図を図 1 に、作製したデバイスを図 2 に示す。単結晶シリコンのマイクロブリッジ構造をデバイス層厚さ 5  $\mu\text{m}$  の Silicon-On-Insulator 基板を用いて形成した。ヒーターとヒートシンク間のギャップはサブミクロン開口用に最適化を行った Bosch プロセスを用いて、Deep Reactive Ion Etching (DRIE)技術によって形成しており、深さ 5 $\mu\text{m}$  に対して最小 250 nm 幅のギャップを実現した。電子線描画によってパターンニングしたアルミニウムをマスクとして前述の DRIE を行い、その後埋め込み酸化膜を気体のフッ化水素で除去して空中に浮かせている。このデバイスの低真空～大気圧に於ける動作曲線を図 3 に示す。より広いギャップを持つデバイスも作製し比較したところ、モデルが示すとおりギャップが短くなるにつれて直線性の高い領域が高圧側へ移動していることが分かる。250 nm ギャップのデバイスの大気圧に於ける感度は、0.9 mW の電力を投入したとき 0.001%/kPa であった。このデバイスは CMOS プロセスコンパクトな手法のみを用いて作製されており、MEMS の重要な課題である LSI との集積化に適している。

ところで、Bosch プロセスを用いた DRIE はバルクマイクロマシニングに於ける最も一般的なプラズマエッチング方法であり、アスペクト比の高いトレンチをエッチングできる有用な技術である。しかし、等方性エッチングと側壁保護のサイクルを数秒単位で繰り返して掘り進めるという方法であるが故に必ずサイドエッチが起こり、幅 100nm を切るようなディープサブミクロン開口の深掘りエッチングは容易ではない。本研究では次に、DRIE で掘ったトレンチを狭窄させることで基板と垂直な超高アスペクト比ギャップを形成する技術の開発を行った。

よく知られたギャップ狭窄方法にシリコンの熱酸化を利用する方法がある。熱酸化によって表面にシリコン酸化膜層が形成されるとき、構造の体積が増加するためにギャップが狭窄する。この方法は 1000 $^{\circ}\text{C}$ ほどの高温プロセスのため CMOS プロセスと統合困難である。そこで薄膜をギャップ内に製膜して狭窄を行うことにした。本研究では超臨界流体製膜(SuperCritical Fluid Deposition: SCFD)によって Cu 薄膜を形成する手法を用いた。超臨界流体は比較的高い溶解力と浸透性を兼ね備えており、高い濃度の薄膜前駆体を高アスペクト比トレンチの底まで輸送できる。前駆体濃度が高いことで、製膜速度の濃度変化に対する依存が小さい領域での製膜を行うことができ、トレンチの開口から底に至るまで均一な製膜が可能となる。Cu-SCFD の

場合、開口幅 100 nm・アスペクト比 100:1 のようなトレンチに対してもステップカバレッジがほぼ 100%である。この方法を用いて via hole への金属埋め込みを行った先行研究があるが、トレンチの狭窄の目的に利用しデバイスに応用したのは本研究が初めてである。DRIE によって幅 450 nm、深さ 5  $\mu\text{m}$  のトレンチを形成しておき、その基板に厚さ 200 nm の Cu/CuMn<sub>x</sub>O<sub>y</sub> 膜を製膜した。なお、製膜温度は CMOS ポストプロセスで使用可能な温度である 200 °C であった。図 4 に Cu 製膜によって形成された幅 50 nm 深さ 5  $\mu\text{m}$  のトレンチの断面 SEM 写真を示す。ピラニーゲージのモデルを Cu/Si の二層構造に対応するように拡張した上で、本手法をピラニーゲージに応用した。図 5 にデバイスの写真を、図 6 に真空から 68 気圧までの動作曲線を示す。50 nm ギャップのデバイスの大気圧に於ける感度は、5.4 mW の電力を投入したとき 0.018%/kPa であった。同じ電力で比較すると DRIE で作製した前述ピラニーゲージと比較して感度は 3 倍となった。また、Cu 製膜によってヒーターの抵抗値が 4 k $\Omega$  から 13  $\Omega$  へと大幅に低下させる事ができた。より低い電圧で同じ電力を投入することが出来るため、LSI との集積化に有利である。SCFD による製膜は、シリコンやその酸化膜・窒化膜を主な構造材料としていた MEMS に対して各種金属や酸化物を含む多様な材料による修飾を可能とする技術である。特に極微細幅トレンチは容量型のデバイスの作製に有利な技術となる。

本研究では、CMOS ポストプロセスに対応したシリコンバルクマイクロマシニング技術を用いて、大気圧以上の圧力でも高い感度を有する長さ 100  $\mu\text{m}$  の微小ピラニー型圧力計を開発した。本研究で開発したデバイスや SCFD によるディープサブミクロン幅の高アスペクト比トレンチ形成技術は、同じくディープサブミクロン幅のギャップを必要とする「熱遷移ガスポンプ」など、集積化ガスシステムの他の要素の開発にも応用が可能であると考えられる。

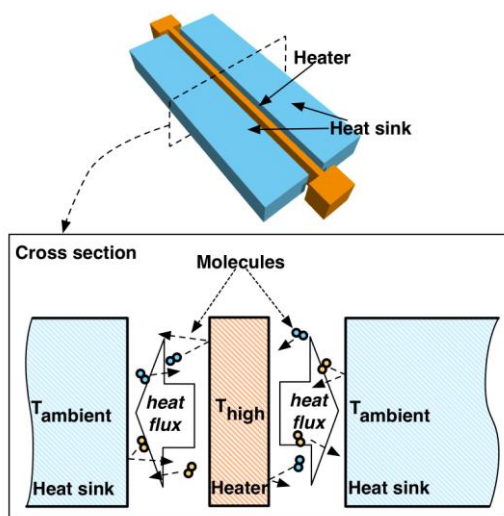


図 1. バルクマイクロマシニングで作製したピラニーゲージの模式図

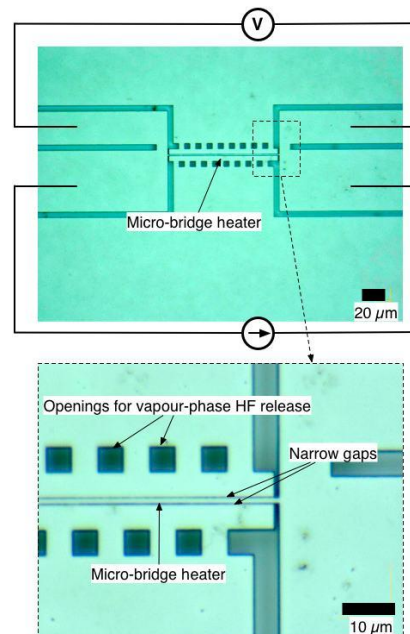


図 2. 作製したピラニーゲージの写真

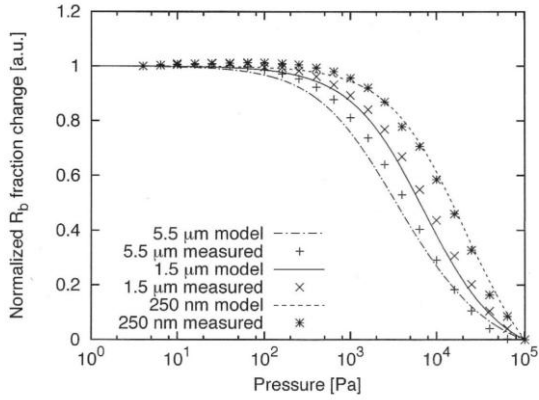


図 3. 圧力対抵抗値変化率グラフ。ギャップ長の異なる 3 つのデバイスをプロットしてある。

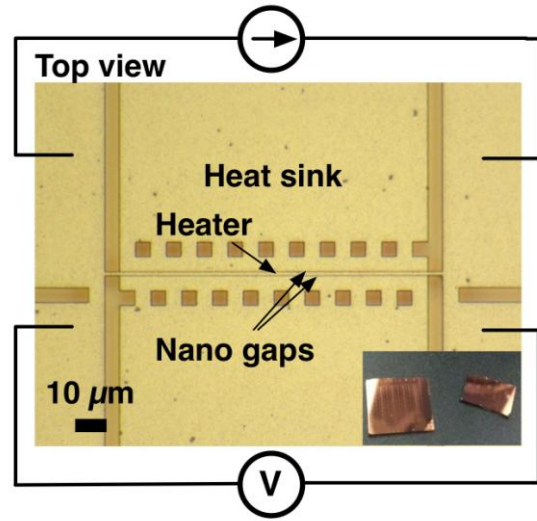


図 5. Cu 製膜後のデバイス写真

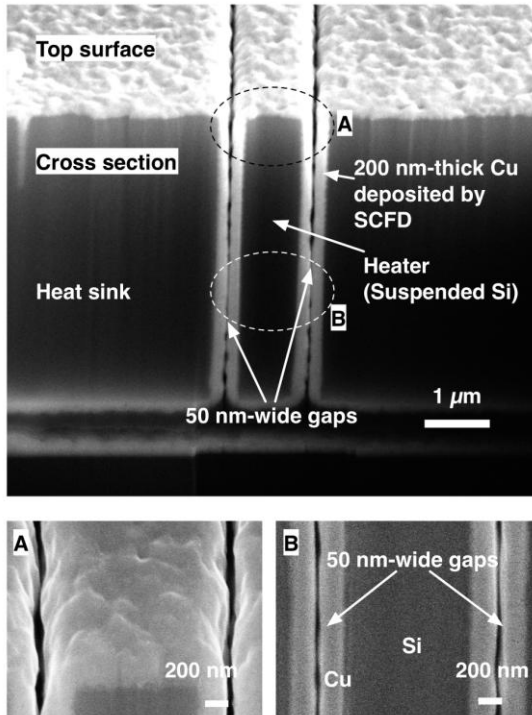


図 4. DRIE 後の Cu-SCFD によって形成された幅 50nm、深さ 5 $\mu$ m のトレンチ

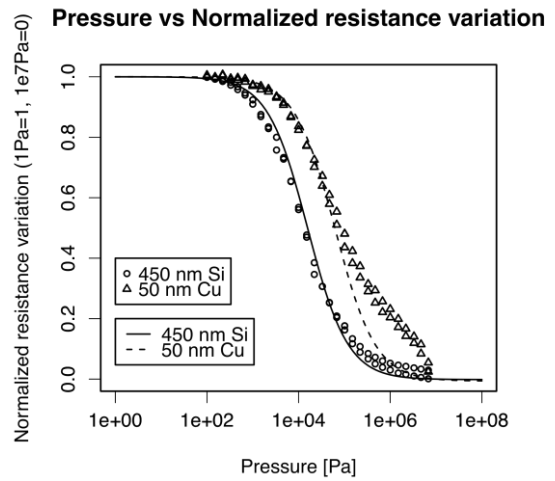


図 6. 50 nm ギャップを有するピラニーゲージの大気圧付近での抵抗値対圧力グラフ