

半導体基板を用いた高性能ヒータの作製と特性評価

野毛 悟

The fabrication and characterization of the high-performance heater using the semiconductor substrate

Satoru Noge

Abstract, The purpose of study is realization of the device for a heater with an about 600 °C high-temperature and high-speed temperature follow-up in a small size by utilizing the resistivity change in temperature of the silicon. The heater, which satisfied a necessary condition for the introduction in the thin film device, was manufactured, thereafter; the temperature properties were measured under a vacuum. When the power consumption was 96W, heater temperature was 552 °C. The measurement results suggest that the heater hold the high-temperature state at low power in vacuum .

Key Words: High-temperature, Heater, Silicon, Vacuum

1. はじめに

本研究室では、主に酸化物材料を対象として、エレクトロニクス応用に適した薄膜の形成技術に関する研究を行っている。高品質な薄膜を形成するには、さまざまな条件の最適化が必要であるが、最も重要なパラメータの一つに薄膜形成時の温度がある。所有している RF マグネトロンスパッタ装置は加熱温度が 350°Cであるが、特性の良い無機材料薄膜形成には、600°C程度の温度を必要とする場合が多い。さらに、温度上昇時間によって薄膜特性が変化するため、温度追従性が求められる。一般的な真空装置内部での基板の加熱に用いられる熱源には、カンタル線（鉄・クロム等の合金線）あるいは赤外線ランプなどがある。しかし、1インチ程度のエリアを加熱するような小形の真空装置においては、内部のワークスペースが小さいことや装置の改造にかかる部品の調達などに問題があり、トライアルな研究課題において費用対効果が高いとはいえない。この課題を解決する方法の一つとして、我々はヒータの発熱体にシリコン基板を用いることを考えている。

本研究では半導体の抵抗率温度変化を利用した薄型ヒータを考案し、基本構造の設計と製作を行い、特性の評価ののち装置への実装を検討している。このヒータは、現有の各種成膜装置に対して、水冷機構などおおがかりな装置の改造を必要しないこと、加熱部分が比較的小型化できワ

ークスペースを制約しないこと、基板ホルダーへの着脱が可能なことなどから、ヒータの安定動作を確保できれば研究推進への波及効果も大きい。また、発熱体として半導体を用いることにより、成膜環境に対するコンタミネーションを軽減し、赤外線ランプ加熱等の加熱方法との併用など実装や実用面でも有効な方法であると期待できる。物性的な特性として、シリコンの抵抗率温度変化⁽¹⁾に着目すれば、常温からある程度の温度までは比例して抵抗値が上昇するが、ある温度を超えたところで指数関数的に抵抗値が減少することから、特に高温環境下において有用なヒータと考えられる。現有の RF マグネトロンスパッタ装置への実装を一つのケースとして、小型で 800°C程度の高温と高い温度追従性を有する装置用ヒータの実現を目的とする。

1. ヒータの仕様

2. 1 仕様全般

今回、作製を計画したヒータの仕様について簡単に述べる。現有の RF マグネトロンスパッタ装置（アルバック機工 VTR-151M/SRF (SCOTT-C3)）を対象として、設計と製作を行なうこととした。

ヒータの設計に当たっては以下の点を確保することを目値として定め、形状等の検討を行なうこととした。

有効加熱エリア：1インチ角以上

使用可能温度：800 度程度

使用雰囲気：アルゴンおよび酸素ガス

ヒータ高さ：10mm 以下

その他：真空装置内の基板ホルダーに着脱可能

*沼津高専 電気電子工学科

National Institute of Technology, Numazu College

2. 2 発熱体の検討

発熱源として、シリコン基板(厚み 0.65-0.70mm 程度)を用いることとした。基板のサイズは、縦 25.4mm 横 38mm の長方形である。シリコン板の長辺の両端を上下から給電用電極で挟み込む構造とするため、ヒータの有効面積は 25.4mm(1 インチ)角を確保できる。給電部分に低抵抗化のための加工を施して用いる。また、加熱面の絶縁かつ機械的強度の向上のために、石英薄膜をスパッタリングによって堆積させることとした。

発熱体としてシリコンを用いるにあたって、予備実験を行った。半導体は、格子散乱が抵抗率を支配し、温度上昇とともに抵抗率は線形的に増加する領域と外部からの熱エネルギーが半導体のエネルギーギャップを上回ることにより、価電子帯から伝導帯へ電子が励起され伝導キャリア密度が指数関数的に増加し、抵抗率はその逆数で減少する領域で異なった電気伝導特性を持っている。特に高温領域において発熱量が大きくできると考えられる。

予備実験として、ダミー負荷を接続し電圧降下法によって電流値を求めた。また、ダミー負荷はシリコンの抵抗率変化に対して突入電流が流れないように制限をかける役割もある。シリコンの表面の温度を測定しながら通電電流を測定し、シリコンの抵抗値を求めた。

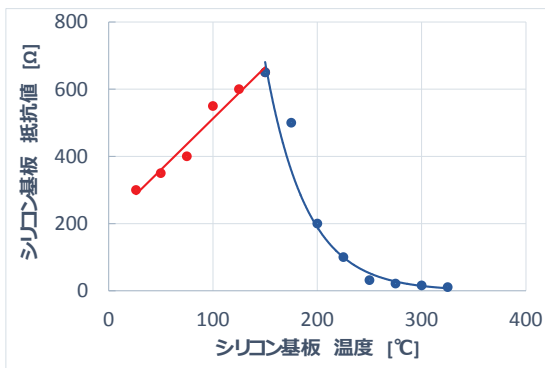


図 1 シリコン基板の抵抗温度特性

図 1 はシリコン基板の抵抗温度特性の測定結果である。発熱体としてシリコンを使用するという目論見に対して概ね期待の結果となっている。

2. 3 発熱体の検討

次に、シリコン発熱体を内蔵したヒータ構造を検討し、作製しながら改良を加えることで、実装に向けたヒータを作製することとした。シリコンヒータの構造を図 2 に示す。また、作製中のシリコンヒータの写真を図 3 に示す。シリコン板の温度が上昇すると、体積膨張による応力歪みによってシリコン板が破損する可能性があるため、固定は上面から抑え込む形とし、平面方向への膨張を緩和する。

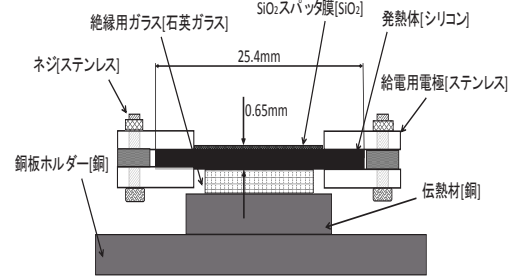


図 2 シリコンヒータの構造

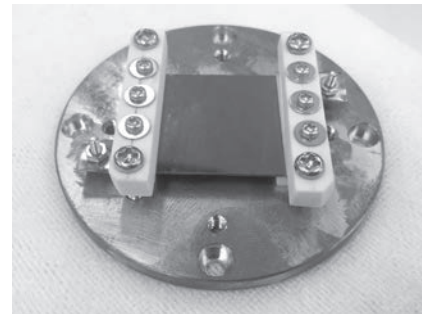


図 3 シリコンヒータ外観

シリコン板と伝熱材の間に石英ガラスを採用し、電極同士の短絡防止を図っている。

3. シリコンヒータの制御

3. 1 大気中での温度制御実験

シリコンヒータ制御実験の接続を図 4 に示す。シリコンヒータ、ダミー抵抗、温度コントローラを直列に接続している。まずは、大気中での温度制御を確認するため、ベースヒータにはホットプレートを用いている。常温でのシリコン板は抵抗が大きく電流が流れにくいのが 180°C~200°C 付近から急激に抵抗値が減少する。電流分布が一様になるまでに電流が微小部分に集中すると熱膨張によりシリコンが割れるなどの不具合もある。また、RF マグネトロンスパッタ装置のヒータの最高温度は 350°C であることから、シリコン板の抵抗値が指数関数的に減少する領域に突入する 200°C 程度までの昇温は可能である。

これらのことから、ベースヒータで 350°C まで加熱し、その後に制御をかけ温度コントローラから電流を供給し目標温度まで昇温させる方法とした。K 型熱電対によってシリコンヒータ表面の温度を測定し、温度コントローラにフィードバックされた温度情報をもとに電流値を調節し温度を安定させる。また、ダミー抵抗はシリコンヒータの熱暴走を防ぐための固定抵抗である。作製したシリコンヒータは大気中においてホットプレートをベースヒータとして利用し定格出力 5A の電源を用いて到達温度は 548°C となった。

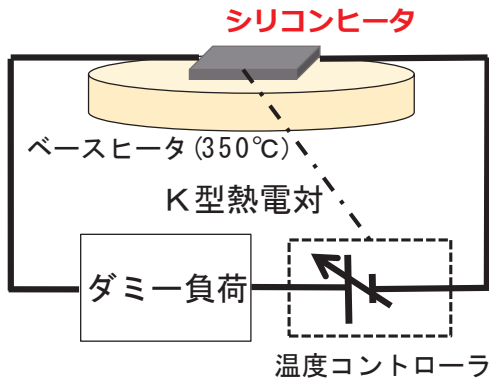


図4 シリコンヒータ制御回路

4. ヒータの改良と真空中における特性評価

4.1 独立型ヒータへの改良

実際にシリコンヒータを使用するのは真空装置内であり真空度は1Pa程度を想定している。大気中での温度制御はほぼ可能であることが確認できた。

次のステップとして、ヒータを実装する成膜装置内に近い環境で昇温実験を行い制御性や特性を確認する必要がある。小型の真空装置にシリコンヒータを設置し、1~10Pa程度の真空中での実験を行い、温度特性を確認することとした。

昇温実験に用いる小型真空装置にはベースヒータが無い場合、ベースヒータを内包するようなヒータとして改良することを試みた。このことにより、小型でかつ単独の基板加熱ヒータとして使用することも可能であると考えられたためである。

また、当初の設計指針であるワークスペースをヒータの設置によって占有しないことに留意しながらベースヒータの選定をおこなった。今回の仕様に対して、小型のセラミックヒータ(坂口電熱製 MS-1000R)をベースヒータとして用いることが一つの解決手段と考えられたので、これを使用することとした。図5に25mm角、厚さ2mmのセラミックヒータ(Rタイプの熱電対内蔵)を示す。小型のヒータであるが大気中でベースヒータとしてシリコンヒータを加熱したところ、セラミックヒータ400°Cのときにシリコン板表面が237°Cまで昇温した。

小型のヒータであるが大気中でベースヒータとしてシリコンヒータを加熱したところ、セラミックヒータ400°Cのときにシリコン板表面が237°Cまで昇温した。このことからベースヒータとして機能することが確認できたので、昇温実験に用いる小型真空装置にフィードスルーを含む配線作業を行い真空中での温度特性を測定した。

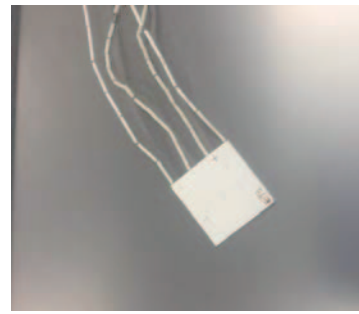


図5 ベース用セラミックヒータ

4.2 真空中でのヒータ昇温実験

図6に実験回路を示す。ヒータ部分は真空装置内に設置されている。ダミー負荷や給電用の電源およびコントローラは全て真空室外に配置し、給電用の導線、温度測定用の熱電対などは全て真空装置に取り付けたフィードスルー端子を介して接続されている。

実験は以下の手順と条件で行なった。

まず、ロータリーポンプによって真空装置内を5~10Pa程度まで排気する。この実験では、成膜プロセスで用いるようなArガスへの置換は行っていない。

次に、ベースヒータとして一体化したセラミックヒータの設定温度を350°Cとし、独立した制御電源から給電して発熱体として使用するシリコン板を加熱する。

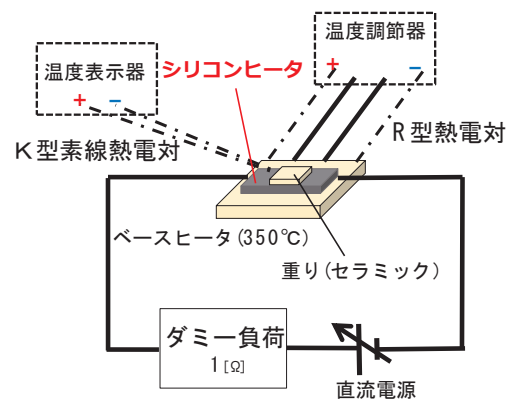


図6 昇温実験回路

実験は以下の手順と条件で行なった。まず、ロータリーポンプによって真空装置内を5~10Pa程度まで排気する。この実験では、成膜プロセスで用いるようなArガスへの置換は行っていない。

次に、ベースヒータとして一体化したセラミックヒータの設定温度を350°Cとし、独立した制御電源から給電して発熱体として使用するシリコン板を加熱する。

シリコンの表面温度は0.5φのK素線を用いた熱電対により測定する。シリコン基板上の温度をシリコンヒータ制

御用の電源にフィードバックしながら温度を上昇させる。シリコン基板が 200℃付近になったあたりから徐々にシリコン基板に電流が流れ始めるので、給電用の出力に制限（プログラムで制御）をかけながら電流を流す。

ヒータ給電用の電源の定格出力(100%出力)となるように制御しシリコンヒータ表面の温度変化を測定した。

4. 3 実験結果

シリコンの表面温度は 0.5φの K 素線を用いた熱電対により測定した。シリコン基板上の温度をシリコンヒータ制御用の電源にフィードバックしながら温度を上昇させる。シリコン基板が 200℃付近になったあたりから徐々にシリコン基板に電流が流れ始めるので、給電用の出力に制限（プログラムで制御し突入電流を抑制する）をかけながら電流を流す。

ヒータ給電用の電源の定格出力(100%出力)となるように制御を続け、シリコンヒータ表面の温度変化を測定した。シリコンヒータへの投入電力とヒータ表面の温度変化の測定結果を図 7 に示す。横軸にシリコンヒータに投入した電力、縦軸は投入電力によって得られた基板表面上の温度である。電力はダミー負荷によって消費される電力（約 23[W]と見積られる）を含んだ値となっている。

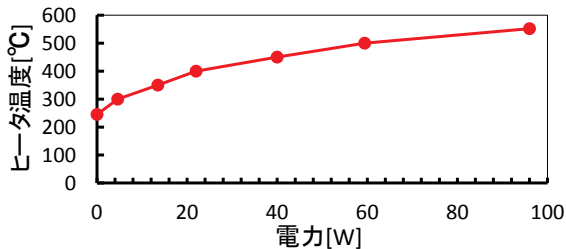


図 7 シリコンヒータの電力-温度特性

電源の定格電流に制限されているが、投入電力 96[W]（電圧：20[V]，電流：4.8[A]）において、552[°C]の温度が得られている。シリコンヒータで消費されている電力は約 73[W]であるが、低電力で高温まで昇温できる可能性を検証できた。

5. まとめ

本研究においては、市販の赤外線ランプ加熱のような加熱方式では定格が 1[kW]（電圧：100[V]，電流：10[A]）程度以上のものが市場に流通している一方で、現有の成膜装置の条件（容積や基板サイズ、ワークスペース、水冷機構など）に合わせてカスタマイズすることはかなり難しく、装置の改造に時間と多くの費用を必要とすることを解決するための方策としてヒータの設計と製作を行なった。

セラミックヒータのような比較的低電力で高温まで昇温できる（50[W]で 1000[°C]まで対応）ヒータも市販されているが、流通価格が極めて高価（発熱体 1 個で 8 万～20 万円程度）であり、これに治具などの周辺部品の設計を外注する必要もある。また、実験遂行中には、ヒートショックなどによる破損のリスクも考慮すると安易に導入することはできないであろう。

発熱体としてシリコン板を用いた簡易な構造かつ安定性の良い小型ヒータの設計と作製を行った。成膜装置へ導入するための条件は概ね満足している。また、シリコンヒータを制御するための回路を考案し、高温を保持することを確認した。

これらを総合的に判断すると、実験室においてトライアルな条件下での使用においては、半導体（本報告では、成膜時の条件出し用に用いる程度のダミーシリコンであるが）基板を用いたヒータは、形状や寸法、あるいは発熱温度の目標値に自由度があり、使用環境に特化して設計し作製することが可能であり、極めて有用であると考えられる。

謝辞

実験の遂行にあたっては、多田 拓君（沼津高専 H28.3 卒業，現，横浜国立大学在籍）の尽力によるところが大きく感謝する。

文献

- (1) 吉田 梅次郎：「半導体物性工学」株式会社 昭光堂，12 版（発行年 1963 年）
- (2) 澤田 豊：「透明導電膜の新展開」株式会社 シーエムシー，1 版（発行年 1999 年）
- (3) 高橋 清/山田 陽一：「半導体工学」森北出版株式会社，3 版（発行年 2013 年）