半導体プロセス用埋め込み型石英ヒーターの最適化設計

Optimization layout for Quartz Heater implanted metal

○穂積 葉子¹⁾、天野 正実¹⁾

Yoko HOZUMI, Masami AMANO

1) Covalent Materials Corporation, 30, Soya, Hadano, Kanagawa, Japan

Key Words: *Quartz Heater, Joule heating analysis, FEM,*

1. 始めに

コバレントマテリアル㈱（以下当社）は、半導体プロセスに用いる高機能石英モジュール ARISTORUM®を開発した。これらには、石英ガラス中へ金属を封止し静電チャックの機能を付加した ARISTORUM® ESC（以下 ESC）と、封止した金属を発熱させヒーターの機能を付加した ARISTORUM® HEATER（以下ヒーター）がある。ESC は、Si ウェーハ以外にも、サファイアや石英ガラスなどの絶縁基板も吸着可能である。ヒーターは、石英ガラスの高純度、低発塵な特性を生かした製品であり、高速昇降温が可能でクリーンな環境の温度コントロールに最適である。そのサイズは、小さいものでは3mm×6mm×0.2mm から直径250mm まで幅広く作製可能である。特に小型のものは、熱容量が小さく温度応答性に優れており、狭い空間での局所的な加熱に適している。また、石英の透明性を生かし、その場観察用の覗き窓を設置することも可能である。半導体プロセス中においては、局所接合等に用いられる。

これらのモジュールは、配線パターンを自在に設計できるため、顧客のニーズに対応した製品を設計可能である。特にヒーターは、均熱化が重要であるが、複数の配線パターンに対する設計コストが大きく、多くのパターンを試作できない。そこで我々は、試作の低コスト化を図るため、数値解析を用いた配線パターンの均熱設計手法を検討した。本論文は、そのジュール発熱解析の手法について述べる。

2. 有限要素法による計算

2-1. モデル

ヒーターに埋められている金属は、厚さ数 μm 程度であり、ソリッド要素を用いたモデリングは困難である。よってモデルは、1つの要素内に異なる材料特性の層を厚さ方向に設定できる3次元積層要素を用いて作成した。解析対象のヒーターは、形状が単純な3mm×6mm×0.2mm の小型石英ヒーター（以下マイクロヒータ）とした。Fig.1 にヒーター形状を示す。

解析対象のマイクロヒータは、石英に金属配線がサンドイッチされた積層部分と、石英単一層から成り立っている。ゆえに材料設定は、単一材料の層と、複数材料の層を分けて材料特性を決定した。ヒーター全体の厚み 0.2mm に対して、金属配線は 0.01mm で、厚み中央部に封止されている。Tab.1 に厚みと材料の設定について、Fig.2 にモデルの断面図を示す。なお、単一層は、複数材料層と同じ厚みを設定している。

Fig.1 Micro Quartz Heater and polished rice

Tab.1 Configuration of layers

layer ID	Metal layer		Quartz layer	
	Material	thickness(mm)	Material	thickness(mm)
1	Quartz	0.09	Quartz	0.09
2	Metal	0.01	Quartz	0.01
3	Quartz	0.1	Quartz	0.1

Fig.2 Cross-section view of Micro Quartz Heater model

2-2. 材料特性

解析に用いた物性値を Tab.2 に示す。本解析では金属配線を白金線とした。なお、Tab.2 に示した物性値は室温の値だが、解析は温度依存性を考慮している。

Tab.2 the Property of Materials

Materials	Density g/cm^3	Thermal Conductivity W/mK	Specific Heat J/gK	Resistance Ω
SiO_2	2.2	1.4	0.682	—
Pt	21.4	74.4	1.31	24

白金の固有抵抗値 ρ については、印加電圧と温度測定結果から求めた。Fig.3 に温度依存性の固有抵抗値 ρ を示す。また算出に用いた式(1)を以下に示す。

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (1)$$

ここで、R：抵抗、A：断面積、L：長さとする。なお、石英の固有抵抗値は、計算上絶縁とみなせるよう十分に高い値を設定した。

Fig.3 Specific resistance ρ of Platinum

2-3. 境界条件

ジュール発熱条件の定義には、電流及び電位の2つの境界を使用できるが、本解析では電位境界を用いた。設定は、配線の一端を電位0、もう一端を4.0V、7.0Vとして全体に電位差を与えた。放熱条件は、ヒーター表面に室温20°Cとした自然対流の熱伝達係数を用いた。

3. 解析結果と考察

解析結果は、赤外線サーモグラフィ（FSV-7000S：株式会社Apiste製）を用いた加熱試験の温度測定結果と比較した。サーモグラフィと解析モデル中心温度の経時変化をFig.4に示す。解析により求めた温度は、印加電圧7.0Vで、サーモグラフィ測定結果とよく一致していた。定常状態になった5~15sec間の温度差は、約3.6%程度だった。対して印加電圧4.0Vの結果は、昇温・降温パターンが一致しているものの、測定結果より高い温度を示した。定常状態になった5~15sec間の温度差は、約9.7%と7.0Vよりやや高い値となった。

測定結果と若干の乖離が見られるのは、解析に用いた白金の固有抵抗値 ρ と、実際の配線形状の差異が考えられる。固有抵抗値は、式(1)より、電圧・電流の測定結果、金属配線の幅および高さから求めた断面積、線中心の長さから求めた。配線のR部分については、直線部分と同じ断面積として求めた。実際の配線は、製造された過程において厚みや幅にばらつきがあること、R部分は直線部分と断面積が異なることなどから、算出した固有抵抗値 ρ は、誤差を含むことが考えられる。また、有限要素モデルは、厚みばらつきを考慮していないため、結果に差異が生じたものと思われる。

Fig.5に7.0V印加時の温度分布解析結果、サーモグラフィの赤外線画像および可視画像を示す。金属発熱体は、配線が密集しているほど温度が高くなるため、ヒーター中央部の温度が高い。定常状態の温度分布は、サーモグラフィの分布とよく一致していた。以上のことから、有限要素法を用いた配線設計は有効であると言える。

Fig.4 Results of Temperature measurements
a) Applied 7.0V, b) Applied 4.0V

Fig.5 Schematic of temperature distributions
A) Thermography, B) Visible image, C) Analysis contour figure

4. まとめ

当社開発品、高性能石英モジュールであるARISTORUM® HEATERについて、配線設計支援のため有限要素法を用いたジュール発熱解析の手法を検討した。モデリングは、3次元積層要素を用い、固有抵抗値を試験結果から求めて解析を実施。2種類の電位を与えたが、測定結果との誤差はそれぞれ、3.6%と9.7%であった。これは、実際の金属配線形状のばらつきによる固有抵抗値の差異が原因と考えられる。しかしながら、サーモグラフィの温度分布と解析結果はよく一致しており、温度誤差も数%であることから、有限要素法での配線設計は有効であると言える。