

高周波・赤外集光一体型加熱装置の熱解析

池田 圭
(株式会社 アテナシス)

西澤 伸一
(独立行政法人 産業技術総合研究所)

Abstract

Thermal analysis using Monte Carlo (MC) radiation method is performed to simulate temperature field of hybrid super rapid thermal annealing (HS-RTA) equipment which consists of a low frequency (LF) induction annealing unit and two infrared annealing units to improve temperature non-uniformity of a heated substrate. It is confirmed that MC radiation method with considering semitransparent quartz rod and its complex refractive index is successfully able to simulate the infrared light transmission through the rod and temperature distribution of the substrate.

1. はじめに

シリコンカーバイド (SiC) に代表されるパワー半導体デバイス材料は実用化に向けての開発が急速に進んでおり、半導体材料として特性を引き出すためのイオン注入や不純物をドーピングした後の活性化アニール技術の確立が急がれている。一般に、SiC の活性化アニールプロセスでは 1600°C 以上の高温が要求される。しかしながら、長時間基板を高温下に曝すと、SiC 基板表面から Si の選択的優先蒸発が発生し、局所的なグラファイト化や表面の荒れ、これに伴うシート抵抗の増加、不安定なデバイス動作といったデバイス特性の劣化が懸念されている。その為、高温アニールを行う際の昇温・アニール時間を低減させる技術が必要とされている。

基板を加熱する技術として、交流を用いた誘導加熱技術や、輻射熱を利用したランプ加熱技術が従来から知られている。誘導加熱は、交流を印加するコイルを、加熱対象物をらせん状に取り囲むように配置し、対象物に誘導電流を発生させ加熱する。容易に高温に加熱することができる一方で、表皮効果の影響により、加熱対象物の外周表面近傍に誘導電流が集中し、加熱対象物の外部に発熱部が集中するため、アニール炉の場合には基板の温度分布に対する不均一性が比較的大きい。また、Si 基板のアニール技術として用いられているランプ加熱は、1600°C 以上に昇温させることが容易でなく、SiC 基板に対するアニール技術として、誘導加熱は不可欠と考えられる。

そこで、誘導加熱を用いて基板外周を 1600°C 以上に昇温させると同時に、基板中央近傍を補助的に熱輻射で加熱し、基板の温度分布に対する不均一性を低減したハイブリッドスーパーアニール (HS-RTA) 装置が提案されている¹⁾。この装置では、基板中央付近を補助的に加熱するために、基板半径よりも小さな直径を持つ石英ロッドを基板の上下から挟むように配置し、石英ロッドの反対側の端部近傍に赤外線ランプを配置することによって輻射熱を基板中央部に効率的に輸送する構成となっている。これは、屈折率が 1 よりも大きい石英ロッド端部より、臨界角を満たす角度で進入した光がロッド内で全反射して、反対側の端部へ効率良く運ばれることを利用したものである。

実際に、この HS-RTA 装置を用いることで、1 分以内に 1700°C 以上に昇温可能なことが確かめられている²⁾が、装置の最適化に対する指針は明らかではなく、数値シミュレーションによる検討が望まれている。

光学的に半透明な部材を熱輻射解析に考慮する場合、一般に Discrete Ordinate Method (DOM) が利用されるが、DOM では臨界角を考慮していないため、全反射を正しく取り扱うことが出来ない。CFD-ACE+は、複素屈折率の物性データを利用し、全反射も考慮可能な Monte Carlo (MC) Radiation³⁾と呼ぶ熱輻射モジュールを有しており、このモジュールを利用することで HS-RTA 装置をより現実的に解析することが可能である。今回、この輻射モ

ジュールを用い、実際の装置構成を模擬した計算モデルを利用し、その実用性を確認したので以下に報告する。

2. MC Radiation モジュール

MC Radiation モジュールを利用する場合、半透明部材の屈折率を考慮するために、オプティカルデータベース⁴⁾を利用する。

半透明部材の屈折率は、以下の式で定義される。

$$\tilde{n} = n - ik \quad (1)$$

ここで、 \tilde{n} は複素屈折率で、 n と k はその実数部と虚数部、 i は虚数である。 n と k は、温度依存性を考慮するために、以下の多項式で近似される。

$$n = n_0 + n_1\theta + n_2\theta^2 + n_3\theta^3 \quad (2)$$

$$k = \exp[k_0\theta] [k_1 + k_2\theta + k_3\theta^2] \quad (3)$$

ここで、 θ は温度を無次元化した以下の式で与えられる。

$$\theta = (T - 300)/1000 \quad (4)$$

オプティカルデータベースとして、60 分割された波数に対し $n_0 \sim n_3$, $k_0 \sim k_3$ の各値を準備する。波数は、 $j=1 \sim 60$ に対し、以下の(5)式で計算した値を利用するが、波長に直すと $0.1 \sim 94 \mu\text{m}$ の範囲となる。

$$\eta_j = 94.40608 \times 10^{2+0.05j} \quad (5)$$

本計算モデルでは、考慮した石英部材に対し

て、CFD-ACE+のオプティカルデータベースに含まれる SiO_2 のデータを利用した。

MC Radiation Module を用いる計算では、計算モデル内で追跡する光の本数を設定し、そのエネルギーが十分小さくなるまで追跡を続ける。本計算モデルでは、その数を 8,000,000 とした。

3. 計算結果

3.1 計算モデルの概略

計算モデルの概略を図 1 に示す。モデルは二次元軸対称とし、最も下に位置する点線が中心軸である。ステンレス (SUS) 部材がモデルの中央部に主に配置されている (グレー表示している部分で、以下図 2~図 5 の表示も同様)、実際には装置は縦置きであり、向かって左側が鉛直下向きとなるが、本報告では都合上横置きで示す。

加熱される $\phi 50\text{mm}$ の基板はモデル中央に位置している。ランプ (lamp) を仮定した高温部は、楕円体内部の離れた側に位置し、ランプとランプに対向するように配置された石英ロッド (rod) の中心は、それぞれ楕円の焦点に一致するように配置されている。本モデルでは、ランプ表面の温度を 3000K と仮定した。

石英部材の配置を図 2 に示す。基板を両側から挟むように石英ロッドが配置されている。その他、基板保持のためのサセプター (susceptor) を支えるホルダー (holder)、及び交流を印加する 4 ターンのコイル (coil) の内側に石英の 2 重管 (tube) が配置されている。

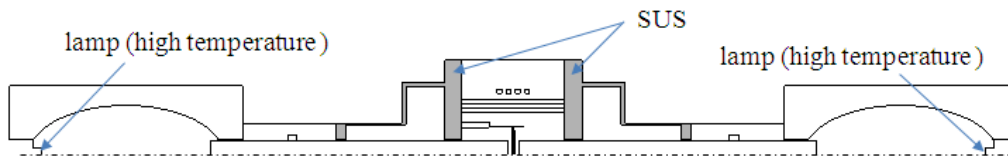


図 1 計算モデルの全体図と SUS 部材、及び高温部 (ランプ)

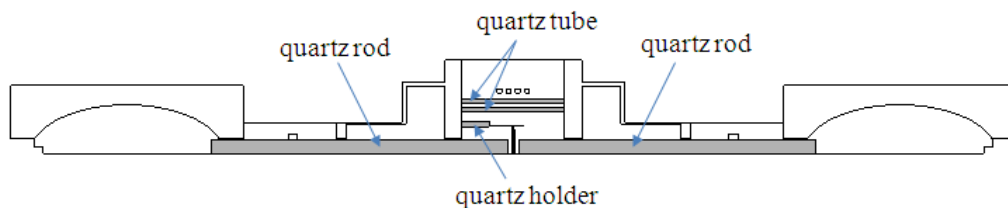


図 2 計算モデルの全体図と石英部材 (ロッド, チューブ, ホルダー)

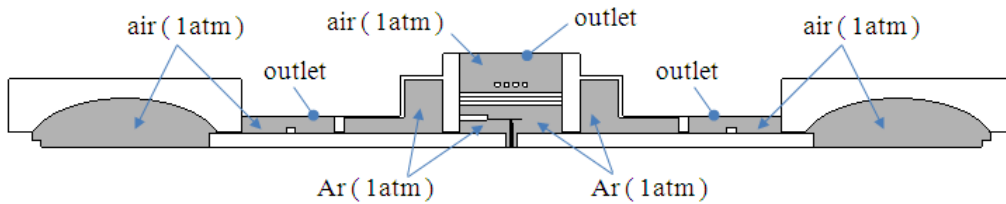


図3 計算モデルの全体図と流体部（空気，アルゴン）

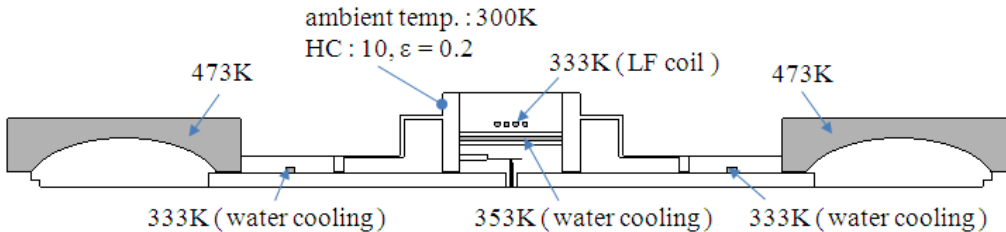


図4 計算モデルの全体図と温度固定領域（石英チューブ間の水は流体として定義）

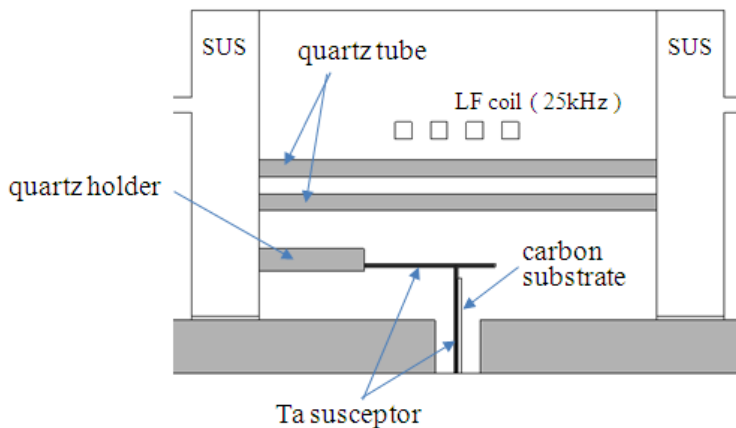


図5 計算モデルの基板近傍

流体部として取り扱った領域を図3に示す。ランプ近傍とステンレス部材の外側に位置する領域に大気（Air）を、また、ステンレス部材内部にアルゴン（Ar）の領域を考慮した、ステンレス部材の外側位置するAirの領域（3ヶ所）は、出口境界（outlet）を有する。

温度を固定とした領域を図4に示す。ランプ周辺の部材は200°C（473K）、ロッドを途中で冷却する部分の温度とコイルを60°C（333K）、2重管の間で冷却される部分を80°C（353K）とした。また、ステンレス部材のもっとも外側の境界は、雰囲気温度を27°C（300K）とし、熱伝達係数（10W/m²K）と輻射率（0.2）を考慮した。

基板近傍を図5に示す。基板は、本モデルではカーボン（carbon）を仮定し、その基板がタンタル（Ta）のサセプターに載せられている。誘導加熱に利用されるコイルには25kHz・1kAの交流が印加されると仮定した。

誘導加熱によって直接加熱される部材はSUS、Ta、及びcarbonが対象となるが、SUSについては温度に依存しない電気抵抗率・熱伝導率を、Taとcarbonについては、電気抵抗率・熱伝導率の温度依存性をそれぞれ考慮した。

不透明の部材・境界の輻射率として、SUS：0.2、coil：0.1、lamp表面：1.0、lamp近傍の壁面：0.02、Ta：0.3、outlet：1.0をそれぞれ仮定した。

3.2 誘導加熱のみ／ランプ加熱のみの計算結果

始めに、誘導加熱のみ考慮した計算結果を示す。なお、以下に示す計算結果は定常解析の結果である。

図6に基板近傍の温度分布（コンター）を示す。サセプターが2100°C（～2400K）近くまで加熱されている一方で、基板の温度はそれほど上昇していないことが分かる。

次に、ランプ加熱のみを考慮した際の基板近傍の温度分布（コンター）を図 7 に示す。基板中央で最も温度が上昇し、周辺に向かって温度が下がる傾向を示し、先の報告²⁾と同様の結果が得られた。

基板上において、半径方向のポジションに対する温度プロファイルを図 8（誘導加熱のみ）及び図

9（ランプ加熱のみ）に示す。基板面内の温度分布は、誘導加熱とランプ加熱の場合で逆のトレンドを示すことから、両者を組み合わせたハイブリッド方式を用いることにより、温度分布の不均一性を改善できる可能性のあることが示されている。

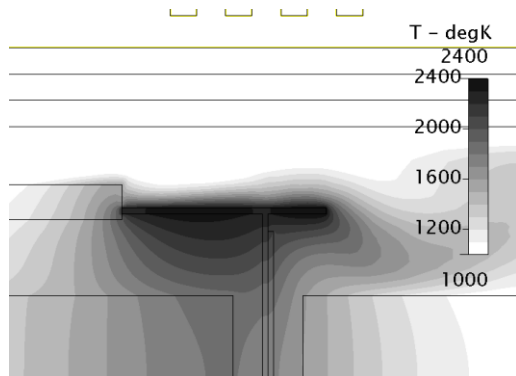


図 6 基板近傍の温度分布（誘導加熱のみ）

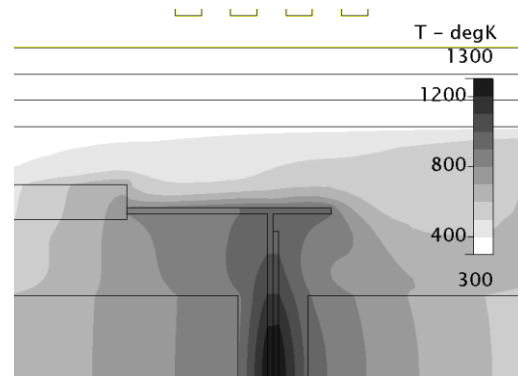


図 7 基板近傍の温度分布（ランプ加熱のみ）

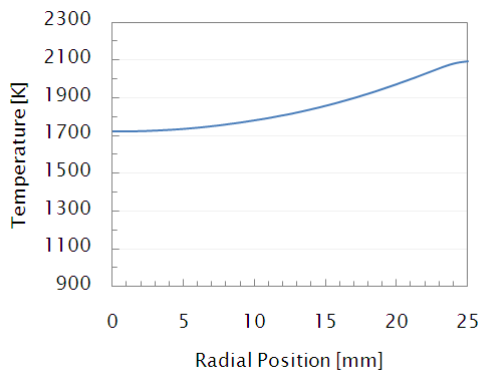


図 8 基板上径方向の温度分布（誘導加熱のみ）

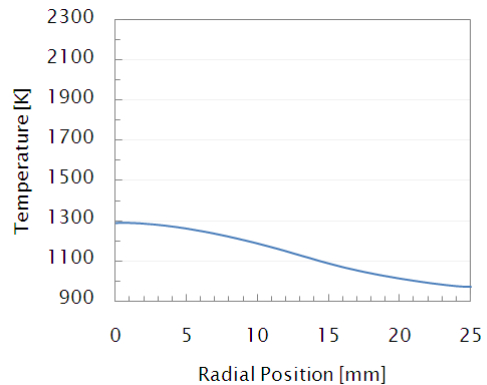


図 9 基板上径方向の温度分布（ランプ加熱のみ）

3.3 ハイブリッドの計算結果

誘導加熱とランプ加熱の両者を考慮した計算モデル全体の温度分布を図 10 に示す。ランプに近い石英ロッド端部はかなり高温になるが、石英ロッド中央付近に水冷部があり、ランプからの輻射熱を熱伝導として基板に伝えているわけではないことが分かる。

基板近傍の温度分布（コンター）を図 11 に示す。サセプターと基板の中央の領域で温度が上昇している様子を示している。

基板上において、半径方向のポジションに対する温度プロファイルを図 12 に示す。広い範囲で、1700°C（～2000K）を越え、且つ温度分布の不均一性も改善されていることが分かる。また、基板端部で最も高温となる特徴は、実験結果²⁾を再現し

ている。

実験的には、HS-RTA 装置を用いることで、1分以内に 1700°C 以上に昇温可能が確認されており²⁾。これらの非定常計算の結果については、講演にて紹介する予定である。

4 まとめ

SiC の高温アニールプロセスへの応用が期待・実用化されているハイブリッドスーパーアニール（HS-RTA）装置の熱解析を行い、Monte Carlo Radiation モジュールを利用して石英の複素屈折率を考慮した詳細な検討を行った。

誘導加熱のみでは、基板の外周部が効率的に加熱される一方で、基板中央部の加熱が不十分となる。また、石英ロッドを利用したランプ加熱のみ

では、石英ロッド内を通過する輻射熱を考慮した計算結果が得られ、基板中央部を効率的に加熱できる実験結果を再現することが出来た。これらを組み合わせたハイブリッドの計算モデルでは、基板面内の温度分布に対する不均一性を改善でき、

先に報告されている測定結果と良い一致が得られた。MC Radiation モジュールを用いた熱解析は、半透明部材の屈折率・全反射が重要となる熱解析及びその設計に生かせることが示された。

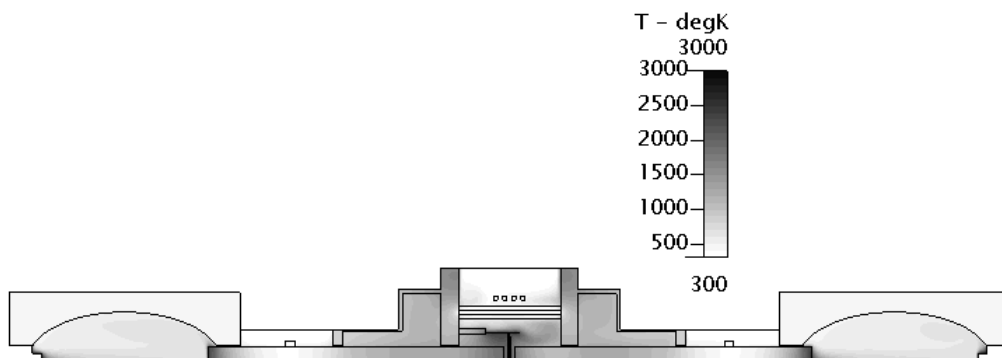


図 10 装置全体の温度分布（ハイブリッド）

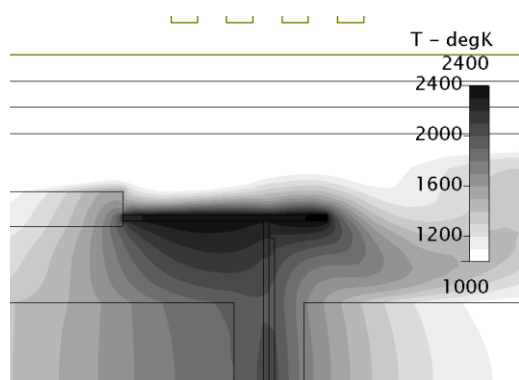


図 11 基板近傍の温度分布（ハイブリッド）

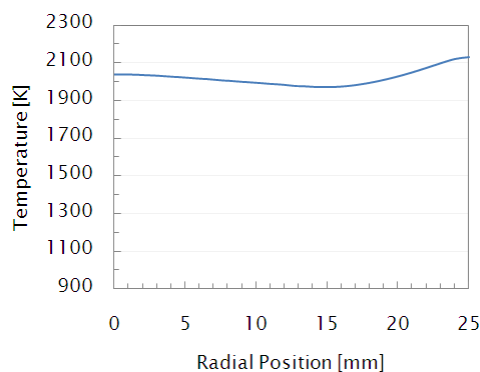


図 12 基板上径方向の温度分布（ハイブリッド）

5 謝辞

計算モデルの見直しに際し、有用なご意見を頂きました(株)サーモ理工の遠藤智義様と森笠福好様に感謝いたします。

参考文献

1) A. Kinoshita, K. Suzuki, J. Senzaki, M. Katou, S. Harada, M. Okamoto, S. Nishizawa, K. Fukuda, F.

Morigasa, T. Endou, T. Isii, T. Yashima, Jpn. J. Appl. Phys. 46-8A, 2007, pp. 5342-5344

2) A. Kinoshita, J. Senzaki, M. Katou, S. Harada, M. Okamoto, S. Nishizawa, K. Fukuda, F. Morigasa, T. Endou, T. Isii, T. Yashima, Mat. Sci. Forum Vol. 527-529 (2006) pp. 803-806

3) S. Mazumder, A. Kersch, A. Balakrishna, B. Haas, Electrochem. Soc. Proc. Vol. 99-10 p. 435

4) CFD-ACE+ Module Manual –Radiation Module