半導体ランプ熱処理装置におけるウエハ均一加熱制御方法の検討*

平澤 茂樹^{*1}, 鈴木 匡^{*2}, 円山 重直^{*3}Optimal Heating Control Condition to Unify Heat Flux on a Wafer
during Rapid Thermal Processing with Lamp HeatersShigeki HIRASAWA^{*4}, Tadashi SUZUKI, and Shigenao MARUYAMA^{**} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

To unify heat flux on a wafer during rapid thermal processing with lamp heaters, we developed a rapid computation technique to find the optimum conditions for controlling lamp heating rate. Box's method was used to optimize heating rate by repeatedly calculating distributions of heat flux on the wafer by using 3D radiative heat transfer analysis program. Calculation results show that the minimum distribution of heat flux on the wafer is 1.5% at a heat-up condition of 100°C/s and 4-zones control of 16 rod-type lamps. The minimum heat flux on the wafer is 210 W/m² (so the temperature difference in the wafer is 0.5°C) at a steady state at 1 000°C. This minimum heat flux is 1/15 times of that produced by non-controlled heating with the same lamps.

Key Words: Thermal Radiation, Numerical Analysis, Furnace, Heat Treatment, Optimal Control, Wafer

1. 緒 言

半導体拡散プロセスでは、シリコンウエハを 800~1200℃に加熱することにより、不純物 (B, P, As など) の拡散、結晶の損傷の回復、熱酸化膜の形成などを行う。LSI の高集積化が進み、浅い接合および薄い酸化膜を実現するため、ランプ熱処理装置を用いて 100℃/s の急速昇温の後に 10 秒程度の短時間熱処理が行われている。一方、ウエハの大直径化が進み、直径 200mm のウエハにて、昇温時の温度分布 ±10℃ 以内、定常時の温度分布 ±1℃ 以内の均一熱処理が要求されている。熱処理するウエハの表面状態は個々に異なっており、また熱処理中のウエハ面内温度分布を精度良く測定する技術がまだ十分に確立していないこともあり、ランプヒータ発熱制御方法は今だに経験に依存するところが多い。もし、発熱量の最適制御条件の計算をパソコンで高速で行うことができれば、実用上で非常に有用である。

ランプ発熱制御についてこれまでにいくつかの研究がなされている。著者ら⁽¹⁾は、2次元放射伝熱計算により、ランプ群を 2ゾーンに分割して発熱制御した時の発熱比率とウエハ面内温度分布との関係を検討した。

Sorrell ら⁽²⁾は、フィードバック発熱制御方法について 1 次元モデルにより簡易な制御方法を提案した。Norman⁽³⁾は多数のランプを個々に独立にダイナミック発熱制御することにより均一な熱処理が可能であることを示した。Aral ら⁽⁴⁾は多数の局所線形変換関数を用いたランプ発熱量の最適制御方法を提案した。しかし、複数ランプの最適発熱条件をパソコンで高速に計算することができる実用的な方法は見当たらない。

本研究では、単純な解析モデルによる 3 次元放射伝熱解析と最適化計算により、ウエハ面内熱流束不均一度を最小とする複数ランプゾーンの最適発熱条件を高速で計算する方法を提案し、それを用いてウエハ均一加熱条件を明らかにすることを目的とする。

2. ランプ熱処理装置の発熱条件の最適化計算方法

図 1 はランプ熱処理装置の熱処理室の模式図を示す。天井面と床面にある多数の平行した棒状のランプヒータ間にウエハを入れて加熱するものである。均一加熱のためウエハの周囲にはウエハと同じ熱的条件のリング板を設ける。このような構造について複数のランプ発熱量の最適化計算を行う。最適化計算には装置の放射伝熱計算を繰り返し行うため、放射伝熱計算の高速化が必須であるが、前報⁽⁵⁾に示したように、計算に用いる要素数をできるだけ小さくすることが高速計算に有効である。図 2 (a) (b) に装置全体の 3 次元放射伝熱計算の計算モデルを示す。要素数低減など、計算に

* 原稿受付 2001 年 4 月 18 日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所(☎ 300-0013 土浦市神立町 502)。^{*2} (株)日立製作所デバイス開発センタ(☎ 198-8512 青梅市新町 6-16-3)。^{*3} 正員, 東北大学流体科学研究所(☎ 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)。

E-mail: hira@merl.hitachi.co.jp

次の仮定を用いる。

(1) 実際のウェハは円板であるが、要素数を最小限にするため正方形板と仮定する。放射伝熱計算に4角形面要素を用いており、ウェハ表面と裏面をそれぞれ1つの正方形要素とした。ウェハ温度と熱流束を均一にすることを目的としており、ウェハ面内の温度分布と熱流束分布がないと仮定しても誤差は小さいと思われる。ウェハは放射率0.7の拡散面とする。

(2) 実際のランプヒータの構造は細いフィラメント素線がコイル状に巻かれてガラス管の中に収められているが、これをガラス管の外形寸法の面状ヒータがあるものと仮定し、ランプ1本が1つの4角形要素とする。ヒータの放射率は1とする。

(3) ヒータ部分以外の装置の内壁を放射率0.1の拡散面の反射板とする。反射板は冷却されているためその温度は常に200℃とする。

(4) ウェハ、ヒータ、反射板の放射率の波長依存性を無視する。

(5) ウェハとヒータ間にあるガラス管の影響、ウェハ支持治具の影響、及びガス対流の影響を無視する。

以上の仮定により、ランプが上下全体で16本の時に要素数は48になる(内訳: ウェハ2, ランプ16, 天井側と床面側の反射板22, 側面8)。3次元放射伝熱計算は放射熱線法・放射要素法の計算プログラム(REM²)⁽⁶⁾を用い、全体の温度分布を与えた時の射度(放射エネルギー)分布を計算する。ウェハ面内の熱流束不均一度の計算は、この装置全体の放射伝熱計算により求まる射度分布を用い、ウェハ面上に多数の小さな正方形面要素を仮定した時の正方形面要素に対する放射エネルギーの出入りを計算して求める。ウェハ面内の熱流束分布を計算する小さな正方形面要素の位置を図2(a)に□印にて示す。装置の対称線と対角線上にてランプ直下やランプ間など11ヶ所とする。小さな正方形面要素と周囲要素との形態係数 F_{ij} はあらかじめ計算しておき、局所熱流束 q_i は既に求まっている射度 J_j より次式で計算する。

$$q_i = \epsilon_w (\sigma T_w^4 - \sum_j (F_{ij} J_j)) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 σ はステファンボルツマン定数、 T_w はウェハ温度、 ϵ_w はウェハ放射率である。

ランプ発熱量の適正化計算には、離散系の最適点探索手法の1つであるBOX法⁽⁷⁾を用いる。BOX法は変数の数より多い数のランダム探索点を仮定し、その評価関数の値の最大傾斜方向に探索を繰り返す方法である。探索点ごとに放射伝熱計算とウェハ熱流束不均一度計算を行って評価関数の値を求める。ここでウェハ熱流束はウェハ両面の熱流束の平均値である。

ウェハの熱処理条件として、初期状態200℃のウェハを1000℃まで100℃/sで昇温させ、1000℃の一定温度に10秒保ち、その後冷却する場合を検討する。そこで、昇温時にはウェハ面内のどの位置でもウェハに入る熱流束を $5.3 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ (温度変化100℃/s、ウェハ厚さ0.5mmとして計算した値)に近くしてかつできるだけ均一にする最適化計算を行う。定常時にはウェハ温度を1000℃の一定温度に保つため、ウェハ面内の平均熱流束を0に近くしてできるだけ均一にする最適化計算を行う。各条件におけるランプ発熱量の適正化計算の手順は次のように2段階に分ける。まず、すべてのランプの温度を一定とし、ウェハ全体の熱流束と指定の熱流束の差を評価関数として、評価関数を最小とするように中央ゾーンのランプの温度を求める。次に中央ゾーンのランプ温度を求めた値に固定し、ウェハ面内の熱流束分布の最大幅を評価関数として、評価関数を最小とするように残りの複数ランプ温度の最適条件を求める。ここで、放射伝熱計算はランプ温度を与えて計算するが、その計算結果より各ランプ発熱量が求まる。

Fig. 1 Schematic view of lamp heating apparatus

Fig. 2 Calculation model

3. 計算結果

ランプ熱処理装置の最適ランプ発熱条件の計算結果を示す。図2を基準計算条件とする。ランプ寸法 10mm×220mm, ランプピッチ 30mm, ランプとウェハとの距離 30mm, 装置寸法 240mm×240mm×60mm, ウェハ寸法 200mm×200mm, リング板の幅 10mm, 外寸法 220mm×220mm とした。対称形状であるため、ランプ16本のうちウェハ半径位置が同じ条件の4本のランプを1つのランプ発熱ゾーン（同じランプ発熱量）とし、全体で4ゾーン発熱制御とする（図2(a)中に数字でゾーン番号を示す）。図3に、ウェハ温度の時間変化（破線）に対応した、ウェハ面内熱流束不均一度を最小とする発熱量最適条件（実線）の計算結果を示す。発熱量は各ゾーンのランプ1本当たりの値である。ウェハの外周に低温の側壁があるため、ウェハ外周に近いゾーンNo. 4のランプ発熱量が最も大きくなる。昇温時にてウェハ温度が 200℃の時のウェハ面内熱流束分布を図4に示す。図2(a)に□印にて示した位置のウェハ両面の熱流束の平均値である。熱流束の最大値は対角線上（破線）の天井側のランプと床面側のランプの交叉する位置にあり、逆に最小値はランプ間の反射板が交叉する位置にある。表1のNo. 1に昇温時にてウェハ温度が 200℃と 1000℃の時、1000℃の定常時のウェハ面内熱流束不均一度を示す。昇温時は平均熱流束 $5.3 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ に対する比率を示す。定常時には熱流束分布の幅を示す。昇温時のウェハ面内熱流束不均一度は平均熱流束に対して 1.3~1.6% であり、このことより昇温時にはウェハ面内に約 12℃（温度上昇 800℃の約 1.5%）の温度分布が生じることがわかる。定常時のウェハ面内熱流束の幅は 210 W/m^2 であり、この値を用いてウェハ面内の定常熱伝導計算を行うとウェハ面内に 0.5℃の温度分布が生じることになる。

計算精度の検証のため、図1の構造にて要素を細かく分割し、全要素数が 1200 とした場合の計算を行った。ウェハ面内熱流束の分布の計算結果を表1のNo. 2に示す。要素数を小さくしたモデル計算No. 1と比較して、ランプ最適発熱条件とウェハ面内熱流束分布は 10% 以内で一致している。

表1のNo. 3に発熱量制御なしでランプ温度が一定の場合の計算結果を示す。発熱量制御なしでは昇温時のウェハ面内熱流束不均一度が 5.7~12% になり、定常時のウェハ面内熱流束不均一度が 3100 W/m^2 になる。計算No. 1の発熱量の制御により熱流束不均一度が $1/8 \sim 1/15$ に低減していることがわかる。

ランプ構造を同じにし、上記の4ゾーン制御のうち、中央から3ゾーン分を1つのゾーンにまとめた2ゾー

ン制御、中央から2ゾーン分を1つのゾーンにまとめた3ゾーン制御とした場合の計算結果を図5及び表1のNo. 4, 5に示す。昇温時のウェハ面内熱流束不均一度は2~4ゾーン制御であり変わらないが、定常時には2ゾーン制御の場合の熱流束不均一度が 1.5 倍になることがわかる。また、ランプピッチ 20mm とした 24本の棒状ランプヒータを6ゾーン制御とした場合の計算結果を図5及び表1のNo. 6に示す。ウェハ面内熱流束不均一度は約 $1/2$ に低減することがわかる。この理

Fig. 3 Change of optimum lamp heating rate

Fig. 4 Distribution of heat flux in wafer

Fig. 5 Effect of number of zones

由は、今回の計算条件でウェハ面内熱流束不均一度が生じる最大の原因は発熱ランプをすきまをあけて平行して設けているためであり、ランプピッチを小さくすることは均一加熱に有効であるからである。コスト増加を考えなければ、設置可能なだけランプ数を増し、制御ゾーン数を増すことが均一加熱になる。

計算高速化について、表1のNo.1の計算時間は300MHzパソコンにてあらかじめ形態係数の算出が5min、各条件についてのランプ最適発熱量計算が25s(収束精度0.1%として繰り返し計算回数100)であった。一方、No.2の詳細計算はワークステーションにて形態係数の算出が2hr、ランプ最適発熱量計算が2hrであり、本報のモデル化を用いると計算時間1/250の高速に最適制御条件を計算ができることがわかる。

4. 結 言

要素数を小さくした単純な解析モデルによる3次元放射伝熱解析と最適化計算手法により、ランプ熱処理装置のヒータ発熱量の最適制御条件をパソコンにて25sで計算できる(従来の方法の1/250)、計算精度が10%程度であり、実用上に有用である。

(1) 開発した方法は、ランプ熱処理装置のヒータ発熱量の最適制御条件をパソコンにて25sで計算できる(従来の方法の1/250)、計算精度が10%程度であり、実用上に有用である。

(2) ランプ熱処理装置にてランプが16本で4ゾーン発熱制御を行う場合には、最適制御条件での昇温時のウェハ面内熱流束不均一度が約1.5%(これはウェハ面内温度分布約12℃に相当し、制御なしの場合の1/8)、定常時のウェハ面内熱流束不均一度が210W/m²(これはウェハ面内温度分布0.5℃に相当し、制御な

しの場合の1/15)にすることができる。

(3) ランプ熱処理装置の4ゾーン制御数を2~3に小さくすると、特に定常時の熱流束不均一度が大きくなる。一方、6ゾーン制御にすると熱流束不均一度を4ゾーン制御の約1/2にできる。

文 献

(1) 平澤茂樹, 内野敏幸, ランプアニール装置におけるウェハ温度分布の解析, 機論, 56-525, B (1990), 1511-1515.

(2) Sorrell, F. Y., ほか2名, A Global Model for Rapid Thermal Processors, IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, 3-4 (1990), 183-188.

(3) Norman, S. A., Optimization of Transient Temperature Uniformity in RTP Systems., IEEE Trans. on Electron Devices, 39-1 (1992), 205-207.

(4) Aral, G., ほか4名, Concurrent Engineering of a RTP Reactor: Design and Control, Proc. of. 2nd Int. Rapid Thermal Processing Conf., RTP' 94 (1994), 288-297.

(5) 平澤茂樹, 円山重直, 要素数低減による放射伝熱計算の高速化と誤差の検討およびランプ加熱装置への適用, 機論, 66-644, B (2000), 1249-1253.

(6) Maruyama, S., Radiative Heat Transfer between Arbitrary Three-Dimensional Bodies with Specular and Diffuse Surfaces, Numer. Heat Transfer, A, 24-2 (1993), 181-196.

(7) Box, M. J., A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods, Computer J., 8 (1965), 42-52.

Table 1 Calculation results

No.	conditions		Lamp power						Distribution of heat flux on wafer	
			Q ₁	Q ₂ /Q ₁	Q ₃ /Q ₁	Q ₄ /Q ₁	Q ₅ /Q ₁	Q ₆ /Q ₁		
1	4 zones	200℃ heat-up	340W	0.99	0.95	1.30	—	—	1.3%	—
		1000℃ heat-up	440W	0.99	0.99	1.52	—	—	1.6%	—
		1000℃ steady	84W	1.02	1.13	2.6	—	—	—	210W/m ²
2	4 zones (detail calc.)	200℃ heat-up	350W	0.98	0.91	1.20	—	—	1.2%	—
		1000℃ heat-up	440W	0.98	0.99	1.44	—	—	1.5%	—
		1000℃ steady	76W	1.05	1.25	2.9	—	—	—	210W/m ²
3	4 zones (no-optimization)	200℃ heat-up	350W	1	1	1	—	—	5.7%	—
		1000℃ heat-up	440W	1	1	1	—	—	12%	—
		1000℃ steady	89W	1	1	1	—	—	—	3100W/m ²
4	2 zones	200℃ heat-up	340W	1.23	—	—	—	—	1.4%	—
		1000℃ heat-up	440W	1.51	—	—	—	—	1.7%	—
		1000℃ steady	84W	2.7	—	—	—	—	—	340W/m ²
5	3 zones	200℃ heat-up	340W	0.96	1.27	—	—	—	1.3%	—
		1000℃ heat-up	440W	1.00	1.51	—	—	—	1.7%	—
		1000℃ steady	85W	1.13	2.6	—	—	—	—	230W/m ²
6	6 zones	200℃ heat-up	230W	0.98	1.06	0.85	1.21	1.22	0.5%	—
		1000℃ heat-up	260W	0.97	1.10	0.80	1.45	1.48	0.8%	—
		1000℃ steady	45W	1.02	1.15	0.87	2.1	3.3	—	150W/m ²