

レーザープロセッシングのための光干渉非接触温度計測技術の 超高精度化に関する研究

広島大学 先進理工系科学研究科
教授 東 清一郎
(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019223-B3)

キーワード：急速熱処理，非接触温度測定，光学干渉

1. 研究の目的と背景

レーザープロセッシングの高精度化には、被処理物内部の温度分布変化を高時間分解で計測し、これを加工条件にフィードバックすることが重要である。半導体デバイス作製プロセスでもマイクロ秒時間のレーザーアニール技術は極めて重要で、結晶成長や不純物活性化に不可欠であるが、残留応力による基板の反りや割れがしばしば大きな問題となる。一例として 8K 有機 EL ディスプレイの画素トランジスタにはこれまで IGZO (Indium Gallium Zinc Oxide) などの酸化物半導体が最有力とされてきたが、電子移動度が $\sim 10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 程度では十分な電流駆動能力が得られないことが明らかになり、 $\sim 100 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ の移動度が得られるレーザー結晶化ポリシリコンが改めて脚光を浴びている。一方、超 LSI の不純物活性化プロセスにはレーザースパイクアニールが不可欠とされ、ガラスと半導体薄膜の複合材料にとどまらず単結晶シリコンウエハのレーザープロセッシングにおいてもマイクロ秒時間での温度計測と残留応力解析が極めて重要な技術課題となっている。

ミリ秒時間分解で温度を非接触計測する技術としては放射温度計が広く使われている。被処理サンプルの放射率さえ分かれば比較的容易に温度計測可能である反面、

- ① マイクロ秒時間領域の温度計測では精度が低下する
- ② サンプル最表面温度は分かるが深さ方向の温度分布やその時間変化は計測できない
- ③ 低温領域では温度精度が著しく低下するため適用可能な温度領域に制約がある

といった課題を有する。

本研究では光干渉非接触温度測定法 (Optical Interference Contactless Thermometer : OICT) の高精度化により上記課題の解決を図り、実用化へと展開するための基盤構築を目指す。OICT は、温度変化に伴うサンプルの屈折率変化に起因する干渉波形を解析することで、サンプル厚さ方向の温度分布をマイクロ秒時間分解で可視化する技術である (図 1 参照)。物質の屈折率 n は温度依存性をもっており、この係数 (dn/dT) を熱光学係数 (Thermo-Optic Coefficient : TOC) と呼ぶ。例えばシリコンウエハに急速熱処理をおこなう際に 1310 nm のプローブレーザーを裏面より照射し、実時間反射強度をフォトダイオードで測定すると、干渉波形が得られる。赤外レーザー

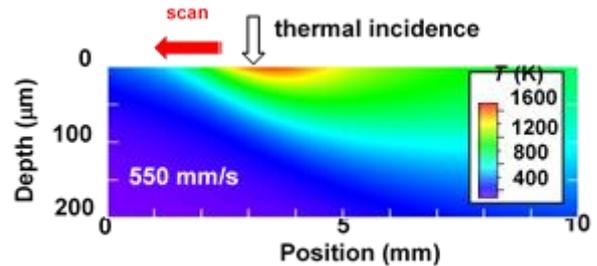


図 1. 超急速熱処理中にガラス基板内に発生した深さ方向温度分布の OICT による計測例。

はシリコンウエハを透過するため、ウエハ内で多重反射し、それら光束の位相、すなわちシリコンの屈折率 n とウエハ厚み d の 2 倍の光路長 $2nd$ によって反射率 R が決まる。前述の通り、 n は温度依存性を有するためレーザーアニールによる温度変化に起因する干渉は実時間反射率の振動として観測される。熱伝導解析と光学干渉解析を組み合わせたシミュレーションにより実験結果を再現することで、ウエハ内温度分布のマイクロ秒変化を可視化することができる。以上の通り、OICT は被処理サンプル内部の温度を裏面から非接触で計測できるという特徴を有する。

そこで本研究では、以下の 3 項目を目的として研究を推進した。

1. OICT における測定温度の超高精度化

本計測技術の基盤となる TOC の精密計測法を確立するとともに長時間領域における熱電対との比較から、 $\pm 1^\circ\text{C}$ の精度を達成する。

2. 光干渉波形解析シミュレーション技術の高精度化

現在二次元で行っている解析を三次元に拡張し面内方向の温度分布まで考慮することで、レーザー強度の空間分布および横方向への熱拡散を考慮した解析を可能とする。

3. OICT に基づく残留応力モデルの構築

局所レーザーアニール技術へ OICT を適用し得られたサンプル内温度分布のマイクロ秒温度変化に基づき、残留応力を定量的に計算可能な物理モデル構築を目指す。

2. 実験方法および実験結果

2.1 TOC の測定¹⁾

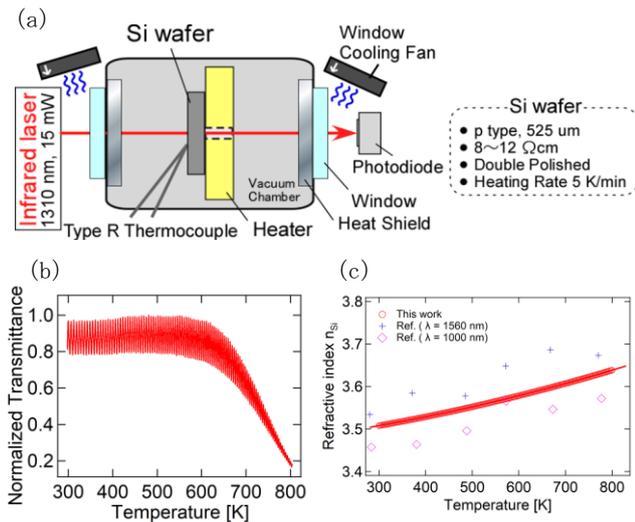


図2. TOC 測定実験の概略図。シリコンウエハを測定する場合の例と測定結果を示す。

図2 (a) にシリコンの TOC 測定に使用した装置の概略を示す。両面研磨シリコンウエハをヒーターユニットに密着し、真空チャンバ内に設置する。ヒーターユニットには光を透過させるための穴が空いており、シリコンウエハ温度を熱電対で計測する。測定用のプローブレーザー光は真空チャンバの石英窓から入射し、シリコンウエハを透過して逆方向にある石英窓から出射し、強度測定用のフォトダイオードに入射する。ヒーター温度を変えながら透過光強度を計測すると、図2 (b) に示すような振動波形が観測される。この山と谷から光学厚みの変動を抽出し、これから屈折率の温度依存性を求めた結果を図2 (c) に示す。正確な測定を実現するためにはシリコンウエハ内の温度分布を可能な限り小さくする必要があり、結果的にはヒーターブロックを二重にし、試料を挟む形で測定をおこなった。また、昇温過程と降温過程の両方で測定をおこない、振動の山谷の温度が一致するよう、5°C/min のゆっくりとした温度スイープレートでの計測をおこなった。この結果、図2 (c) 赤丸で示す本研究の結果は、他研究よりバラつきが少ない結果となった。この実験データにフィッティングをおこなった結果、シリコンの TOC として、

$$n_{Si} = 3.46 + 1.18 \times 10^{-4} T + 1.30 \times 10^{-7} T^2$$

なる値を得た (T は絶対温度)。同様の測定法によって、シリコンカーバイドの TOC も求め、

$$n_{SiC} = 2.63 + 4.89 \times 10^{-5} T + 4.96 \times 10^{-8} T^2$$

なる値を得た。これによって、OICT の解析で温度を求める精度を高める基礎データの取得を完了した。

2・2 シリコンウエハの温度測定¹⁾

OICT により急速熱処理時のシリコンウエハ内の温度

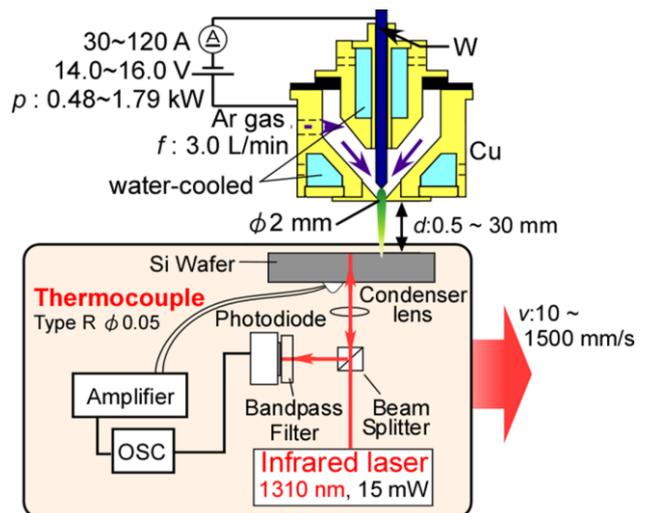


図3. OICT を用いた急速熱処理時のシリコンウエハ温度の測定実験の概略図。シリコンウエハ裏面に熱電対を貼付け、測定温度の比較をおこなった。

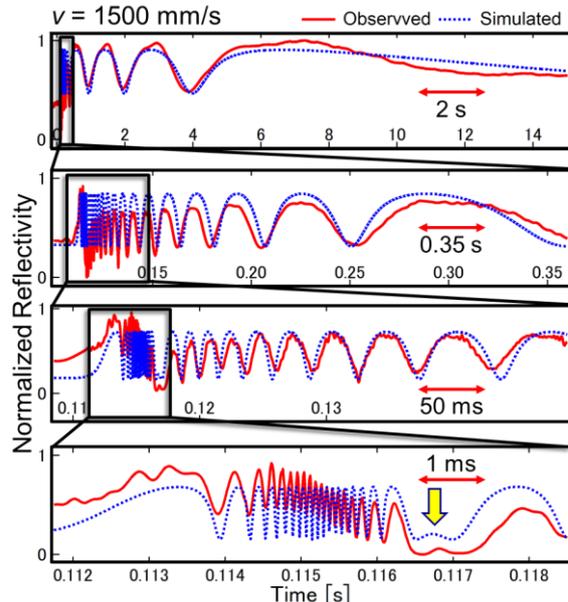


図4. OICT によりシリコンウエハ温度を測定する実験結果の一例。 $v = 1500$ mm/s の測定結果を示す。

を計測するために、図3に示す実験をおこなった。レーザーアニールを模擬するために、熱源として我々が所有する大気圧熱プラズマジェットを用いた。Ar ガスの DC アーク放電により 1 万度程度の高温度熱流である熱プラズマジェットを発生し、直径 2mm のノズルから噴出させつつ、シリコンウエハおよび OICT 光学系を設置したサンプルステージを速度 $v = 10 \sim 1500$ mm/s で一軸走査した。このときシリコンウエハ裏面の温度変化を熱電対で計測し、OICT の結果との比較をおこなった。

一例として、 $v = 1500$ mm/s で計測をおこなった結果を図4に赤線で示す。シリコンウエハの加熱・冷却に伴う反射率の振動が明瞭に観測され、図4上図に示す通り最長

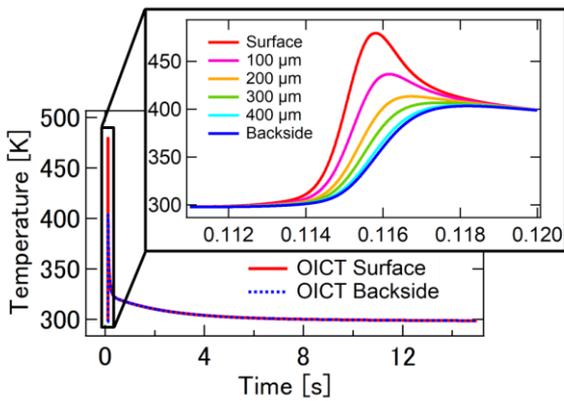


図5. 急速熱処理時のシリコンウエハ温度をOICTにより測定した結果の一例。

15秒程度まで振動が続いた。特にシリコンウエハの温度が急上昇している部分を見ると、図4の各拡大図に示す通り多数の振動が見られ、1ms以下の時間スケールでの振動が観測されていることが分かった。この様な広いレンジの計測結果を可能な限り正確に再現するために、解析モデルの改善をおこなった。熱プラズマジェットからの入熱プロファイルは3つの異なる半値幅をもつガウス分布の重ね合わせを仮定し、更にウエハ表面および裏面からの熱の散逸をモデルに取り入れた。この解析プログラムによりフィッティングをおこなった結果を図4に青点線で示す。秒からミリ秒までの時間スケールにおいて、全ての振動を正確に再現することができた。この結果、得られたシリコンウエハ内の温度分布を図5に示す。秒スケールではウエハ

表面および裏面の温度にはほとんど差が見られないのに対して、ミリ秒スケールではウエハ厚さ方向に温度分布が生じていることが分かった。このようにして得られたウエハ温度を裏面熱電対の結果と比較したところ、 $v = 10$ mm/sでは1.5 Kと小さい値であったのに対して、 $v = 1500$ mm/sでは熱電対で計測した温度はOICTで計測した裏面温度より77 Kも低くなった。これは接触式である熱電対では接触部分の熱容量あるいは熱抵抗が無視できないため、早い温度変化には追従できないことを示している。このことから、OICTは試料内部温度が分かることに加えて、応答速度が速い点においても大きな優位性を有することが明らかになった。解析プログラムによるフィッティングに伴う温度誤差を見積もったところ、ミリ秒時間の温度計測であっても ± 2 K以下で温度を求められることが明らかになった。

2・3 三次元温度分布の計測^{2,3)}

前述のとおり、OICTによる非接触温度測定の基本技術は構築できたため、これを更に三次元温度分布のイメージングに拡張する研究を実施した。図3に示すOICT測定系において、プローブレーザー光をビームエキスパンダで拡大して試料に照射するようにした点と、フォトダイオードに代えてハイスピードカメラを導入した点が三次元イメージングをおこなう上での変更点である。従来はプローブレーザー光を照射した1点の温度変化が実時間反射率の振動として計測されたのに対して、三次元イメージングに拡張した計測システムでは反射光の干渉縞を観測するこ

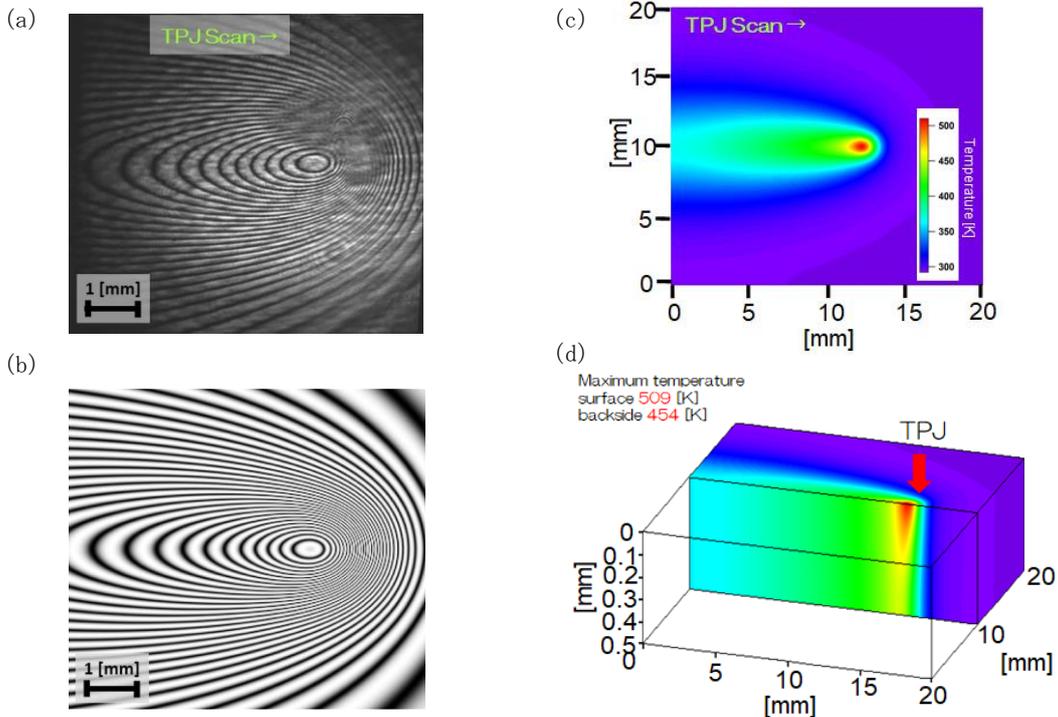


図6. OICTイメージング測定系で得られた干渉縞の実測結果(a)とシミュレーション結果(b)。解析の結果得られた試料表面における温度分布(c)および試料深さ方向断面における温度分布(d)。

となる。この干渉縞から温度分布を抽出するために、解析プログラムを従来の二次元から三次元のシミュレーションに拡張し、試料内の温度分布が三次元で計測できるように変更した。

OICT イメージングにより得られた実験データおよび三次元へと拡張した解析プログラムにより再現した干渉縞イメージの比較を図6 (a) (b) に示す。新たな光学系で極めて鮮明な干渉像を取得することができ、対物レンズで拡大して捉えた像では $10\ \mu\text{m}$ の空間分解能で干渉縞分布を得られることが明らかになった。専用コンピュータにより三次元シミュレーションも実用的な時間内で実行可能となり、図6に示す通り実測の干渉縞数(スキャン方向前方25本、後方11本、スキャン垂直方向27本)を完全に再現することができた。この結果、TPJ 熱処理中のサンプル表面および内部の温度分布を図6 (c) (d) に示す通り取得することができた。OICT イメージングにより高い空間分解能と $100\ \mu\text{s}$ の高い時間分解能を同時に達成しつつ、三次元温度分布を得られることが実証できた。

以上の成果を踏まえ、OICT の新たな可能性として半導体デバイス動作時の自己発熱過程の観測への適用を試みた⁴⁾。図7はOICT イメージングを半導体デバイス(4H SiC ショットキーバリアダイオード:SBD)の温度測定に適用する方法を示す。光学系の構成に関しては、デバイスを拡大するために対物レンズが高倍率になっていることを除けば従来法と同じである。SBD に順方向のパルス(1 ms)を印加し、デバイスの裏面側からOICT イメージングをおこなう。印加するバイアス電圧(V_F)を増加させるとSBDに大きな電流が流れデバイス自体の自己発熱による温度上昇が発生する。図8に示す通り、SBD 動作時のOICT イメージングにより発熱に伴う明瞭な干渉縞が見られた。 $V_F = 30\ \text{V}$ における観測例を図8 (A)に示す。パルス印加と同時に電極中心部から周辺部へ向かって広がる干渉縞の輪が確認され、パルス印加終了と同時に縞は

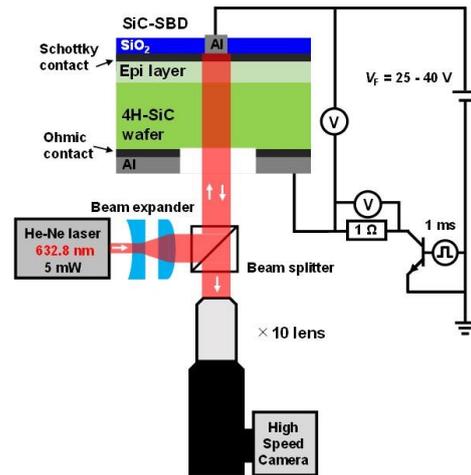


図7. OICT イメージングをSiC ショットキーバリアダイオード動作時の温度計測に適用する実験の概略図。

再び電極中心部に向かって収束していった。これは電流密度が高い電極中心部から温度上昇が始まり、電極周辺部への熱拡散に伴う温度変化を捉えたものである。これを三次元シミュレーションにより再現した結果が同図(B)である。デバイスの発熱をモデルに取り入れることで測定結果を極めて良く再現できる。この結果、デバイス内部の温度を図8(右)に示す通り、三次元で可視化することができた。従来のデバイス温度測定技術では表面温度やジャンクション部などの局所的温度は計測できていたが、内部温度をマイクロ秒の時間分解能で計測できる技術は初めての試みである。

2・4 OICT に基づく残留応力モデルの構築

急速熱処理時には試料表面が高い昇温レートで加熱される一方、深さ方向へは熱拡散に伴う温度分布が生じる。基板表面と内部の温度差は加熱速度が速いほど大きな

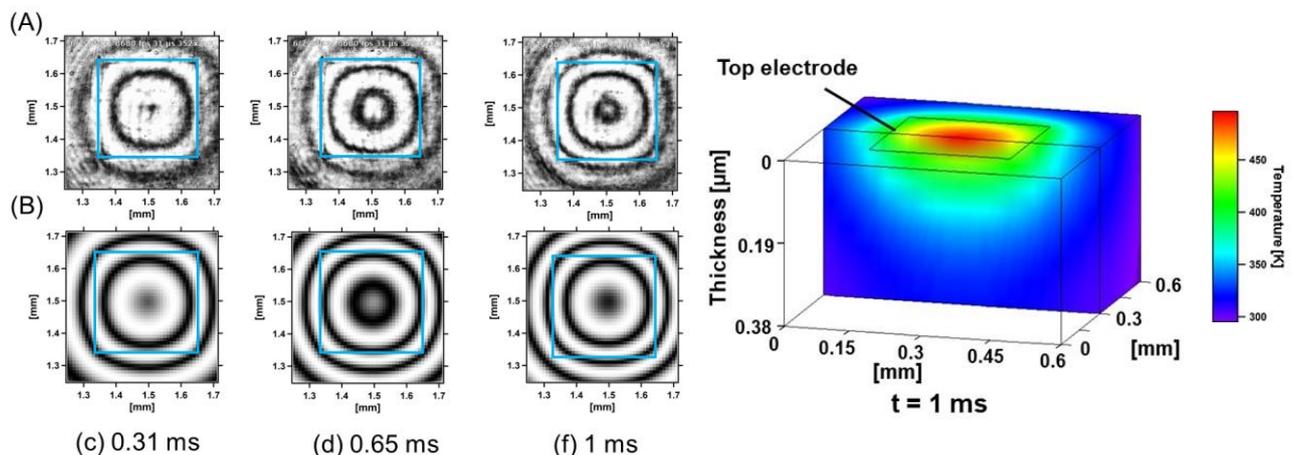


図8. $V_F = 30\ \text{V}$ において観測されたOICT イメージ(A)と三次元シミュレーションにより得られた干渉像(B)。TPJ 熱処理時の温度をOICTにより計測する様子。写真中心の黒い板がサンプルステージであり、下方にある光学系により裏面から温度測定をおこなう。

Strain-displacement equation:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{cases}$$

Stress-strain equation:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \frac{E\alpha\Delta T}{1+\nu} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Thermal expansion term

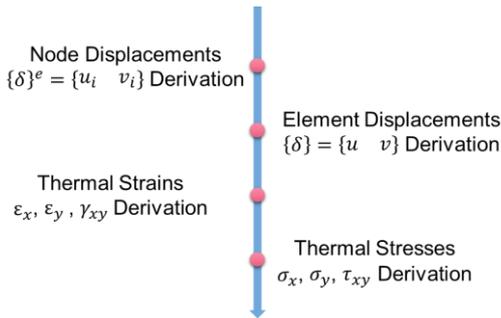


図9. OICTにより得られた温度分布から熱応力を導出する基礎方程式（上）と、計算過程の概要（下）。

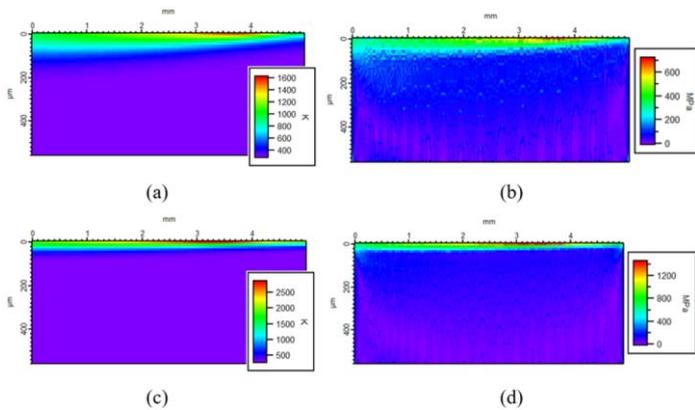


図10. OICTにより得られた温度分布 (a)、(c) から熱応力を導出した結果 (b)、(d)。

り、表面側が熱膨張する一方で内部の体積変化は小さいため、歪が生じる。この結果として発生するのが熱応力である。よって、OICTにより得られた温度分布を基に、熱応力を求める手法の構築に取り組んだ。

解析法の概要を図9に示す。OICTの解析モデルで用いたメッシュを利用して、各交点となるノードにおける変異と歪(ε)の関係を求める(図9(上))。ここでは石英のヤング率、ポアソン比、熱膨張係数を用いた。実際にOICTにより求めた温度分布を用いて、これから図9(下)に示す手順で熱応力分布を求めた。計算では、実際の実験条件である①投入電力1500W、走査速度700mm/sの場合と、これより高い②60kWの投入電力および5000m/sの走査速度の場合の2種類を検討した。その結果、図10に示す

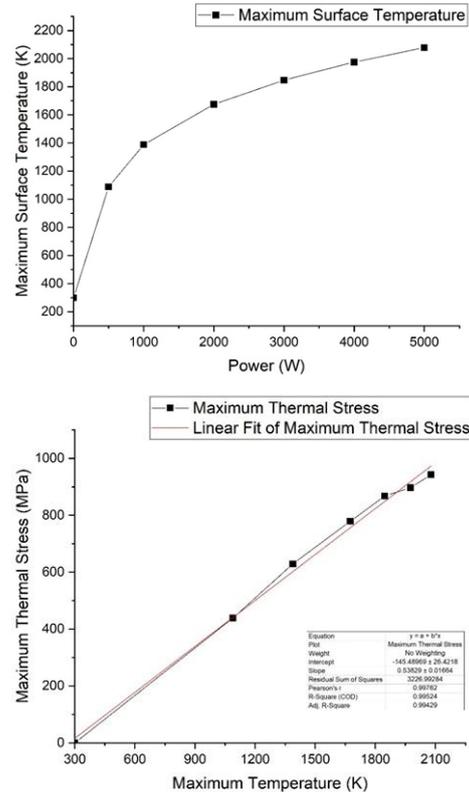


図11. 急速熱処理時の投入パワーに対する最高到達温度(上)と、基板表面における熱応力の表面温度依存性(下)。

通り、①の条件での最表面到達温度は~1600 Kとなる一方、基板内部はほぼ室温である領域が三分の二程度の深さに渡って存在することが明らかになった。これに伴う応力分布をみると、温度分布とほぼ同様となり、特に温度勾配が大きい基板表面付近に700 MPa程度の大きな圧縮応力が発生することが明らかになった。一方、極端な条件を適用して計算した②の場合においては表面温度は2800 K、応力は1400GPaを超える値を示した。以上の通り、走査速度が速く、且つ表面到達温度が高い場合に最表面において大きな熱応力が発生することが明らかになった。

様々な条件下で同様の計算をおこなった結果、投入パワーと表面到達温度、この時の最大応力を調査した結果を図11にまとめる。試料表面の最高到達温度と熱応力の間にはよい比例関係が見て取れる。例えばレーザーアニールによってアモルファスシリコン薄膜の結晶化をおこなう場合にはシリコンの融点以上に加熱されるため、基板表面も1867 K以上に達する。この場合、基板表面の熱応力は900 MPa 近くになることが分かる。このような大きな応力はクラック発生を誘発し、ガラス基板でしばしばみられる現象につながるものと考えられる。OICTを用いた超急速熱処理中の温度計測により得られた温度分布から、試料内部の熱応力分布を求める手法を構築した。熱応力に伴うクラッ

ク抑制や試料破壊といった課題に対して、定量的な評価手法を提供できるものと期待される。

3. 結論

本研究では、OICTにおける測定温度の超高精度化、光干渉波形解析シミュレーション技術の高精度化、OICTに基づく残留応力モデルの構築の3点に重点を置いて実験・解析をおこなった。結果として、ミリ秒時間の温度計測で ± 2 K以下の精度で温度を求められることが明らかになった。またOICTを三次元イメージングに拡張することで、 $10\ \mu\text{m}$ の空間分解能と $100\ \mu\text{s}$ の時間分解能を同時に達成しつつ、三次元温度分布を得られることが実証できた。この技術は超急速熱処理時の試料温度測定に加え、半導体デバイス動作時の自己発熱温度測定にも適用可能であることが明らかになった。更にOICTを応力解析に適用するためのモデル構築をおこない、OICTが超急速熱処理中の試料表面における応力測定に適用可能であることを明らかにした。

謝辞

本研究の実施にあたり実験、解析等に尽力してくれた研究室の学生諸君に感謝いたします。

参考文献

- 1) A. Kameda, Y. Mizukawa, H. Hanafusa, and S. Higashi, "Precise measurement of the temperature of a silicon wafer by an optical-interference contactless thermometer during rapid plasma processing," *J. Appl. Phys.*, 127 (203302), (2020) 203302-1.
- 2) S. Higashi, K. Matsuguchi, T. Sato, and H. Hanafusa, "Millisecond Annealing by Atmospheric Pressure Thermal Plasma Jet and Direct Imaging of Temperature Distribution using Optical Interference Contactless Thermometry (OICT)," *ECS. Trans.*, 104, (2021) pp. 63.
- 3) Jiawen Yu, Hiroaki Hanafusa, and S. Higashi, "Development of a real-time temperature measurement technique for SiC wafer during ultra-rapid thermal annealing based on optical-interference contactless thermometry (OICT)," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 62, (2023) SC1075-1.
- 4) K. Fujimoto, H. Hanafusa, T. Sato, and S. Higashi, "Direct observation of three-dimensional transient temperature distribution in SiC Schottky barrier diode under operation by optical-interference contactless thermometry imaging," *Appl. Phys. Express*, 15, (2022) 026502-1.