

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：52605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03796

研究課題名（和文）測定表面の法線ベクトル検出機能の付加による三角測量式光学センサの測定精度の向上

研究課題名（英文）Improving measurement accuracy of triangulation type optical sensor by detecting normal vector to measurement surface

研究代表者

伊藤 幸弘（ITO, Yukihiro）

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・教授

研究者番号：80431972

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：シリコンウェーハの表面形状測定において、三角測量式光学センサの測定原理により生じる偏差の有無、およびその影響の大きさについて、形状が既知である非球面レンズを測定対象として実験的に検証した。その結果、偏差と測定表面の傾きとの関係についての定量的な知見を得た。次に、三角測量式光学系の実験環境構築のために光学系を模したシミュレーションの作成に取り組み、前述の偏差についての実験結果と定性的に一致することを示した。最後に、三角測量式光学センサの測定原理を模した実験的モデルを構築し、測定表面の変位や傾きの変化に対する測定値の変化が前述の実験・解析結果と同様の傾向を示し、実験装置の構成の妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

三角測量式光学センサの応答性の高さの大面积表面形状測定への活用は工業的に大きな意味があると考えられる。三角測量式光学センサの測定表面の傾きに応じた偏差については一般的に知られているが、実際の測定におけるその大きさや補正方法を検証した研究はこれまでにない。さらに、本研究で開発した技術を、半導体基板であるシリコンウェーハの形状測定に応用することは工業的な価値が高いと考える。

研究成果の概要（英文）：In the surface shape measurement of silicon wafers, the effects of deviation caused by the measurement principle of a triangulation optical sensor were verified experimentally using an aspheric lens with a known shape. As a result, quantitative knowledge was obtained about the relationship between the deviation and the tilt of the measurement surface. Next, in order to construct an experimental environment of the triangulation optical system, a simulation imitating the optical system was carried out, and it was shown to qualitatively match the experimental results for the deviation mentioned above. Finally, an experimental model imitating the measurement principle of the triangulation optical sensor was constructed, and the changes in the measured values in response to changes in the displacement and tilt of the measurement surface showed the same trends as the experimental and analytical results mentioned above, confirming the validity of the configuration of the experimental equipment.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：シリコンウェーハ 形状測定 三角測量式光学センサ オートコリメータ 測定偏差補正

### 1. 研究開始当初の背景

シリコンウェーハに反りや板厚の偏差が生じている場合、半導体製造のパターン露光工程において焦点が合わずパターン形成不良が生じる。このように、半導体の品質に大きな影響をおよぼすウェーハの反りや板厚偏差は、シリコンインゴットからのウェーハの切り出しにおけるワイヤの走行軌跡や振動により生じ、ワイヤの張力や走行速度などの加工条件により左右される。切り出すウェーハの直径が大きくなるとワイヤが長くなるため、走行軌跡や振動の制御はより困難となる。したがって、反りや板厚偏差が小さいウェーハを切り出すためには、切り出し後のウェーハ形状を測定し加工条件との関係を明確にする必要がある。形状測定結果を加工条件にフィードバックすることにより、ウェーハ加工精度の向上が望める。

そこでこれまでに、大口径シリコンウェーハの反り形状と板厚偏差の高精度同時測定方法の開発を行っている。提案手法では、ウェーハ表面の損傷防止と測定時間短縮の観点から非接触かつ高応答で測定が可能な三角測量式光学センサを用いる。そして、ウェーハに対して測定センサを走査させることにより、重力により大きいたわんだウェーハ表面形状を測定する。ここで本測定方法においては、ウェーハが鏡面であることから正反射タイプの三角測量式光学センサを用いている。この場合、図1に示すように、同じ高さにレーザーの焦点が合っても、測定表面に傾きが生じることにより半導体レーザーに対する測定表面の法線も傾く。そして、レーザーの入射・反射角度が変化し、ポジションセンサ上の集光位置が変位することにより測定値が変化する。したがって、測定センサを走査することにより、重力によりたわんだウェーハ表面の形状を測定する場合には、測定値の変化の原因として形状による高さの変化と表面の傾きの影響を分離できない。ウェーハの大口径化により重力たわみが大きくなると、この問題による測定誤差はさらに大きくなる。

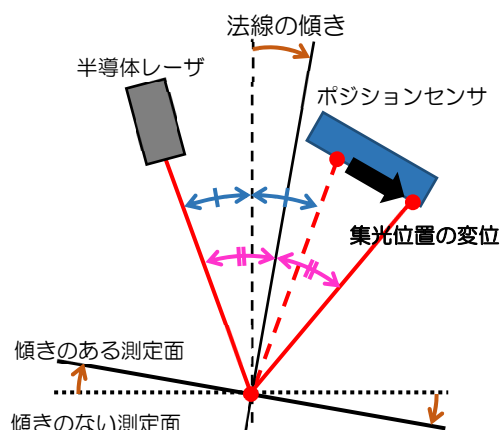


図1 測定表面の傾きにより生じる偏差

これに対し、オートコリメータは図2に示すように、光源から出た光はコリメートレンズにより平行光となり、ハーフミラーで直角に曲げられて対物レンズを透過して測定表面に照射する。そして、測定表面で反射した光は対物レンズで集光されてハーフミラーを透過し、対物レンズの焦点距離 $f$ に置かれたポジションセンサ上に集光する。測定表面が微小角 $\theta$ だけ傾くとポジションセンサ上の集光位置が $2f\theta$ 変位する。この変位から表面の傾き(法線ベクトル)を知ることができる。以上の原理により、測定表面の高さが変化した場合でもポジションセンサ上の集光位置は変化しないことから、測定表面の法線ベクトルのみを測定できる。

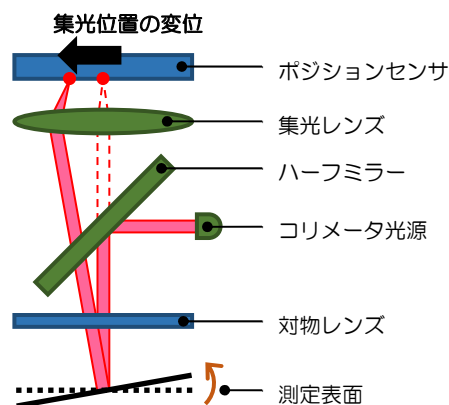


図2 オートコリメータの原理

そこで本研究では、オートコリメータの原理により測定表面の傾きを検出して、三角測量式の偏差との関係を求め、その影響を低減することでウェーハ形状測定精度の向上を図った。

### 2. 研究の目的

本研究では、正反射タイプの三角測量式光学センサにおいて測定表面の傾きにより生じる偏差の補正手法を開発し、サブミクロンの測定精度が要求される大口径シリコンウェーハの形状測定精度の向上を目的とした。三角測量式はその測定原理により、測定表面の高さの変化による真の変位と傾きの変化により生じる見かけ上の変位を分離できない。したがって、センサを走査させて、ウェーハのようになめらかな形状を持つ形状を測定することには不向きである。しかしながら、三角測量式は非接触、かつ高精度で応答性が抜群に高く、ウェーハ形状測定への適応性が非常に高い。そこで、オートコリメータの原理により測定表面の傾きを検出して、三角測量式の偏差との関係を求め、その影響を低減することでウェーハ形状測定精度の向上を図った。

### 3. 研究の方法

前述のように、三角測量式では測定原理により測定表面の傾きに応じた偏差が生じる。そこで本研究では、高さの変化による真の変位と表面の傾きの変化により生じる見かけ上の変位の分離を試みる。まずは、三角測量式における測定表面の傾きと偏差の関係についてのデータベースを構築する。これは、形状が既知である例えば円筒レンズの形状を三角測量式により測定し、幾何学的に得られる値との差を取ることで得られる。そして、ウェーハ形状と同時に測定表面の傾きを測定するために、測定表面の法線ベクトルを検出可能なオートコリメーション機能を三角測量式光学センサに実装する。そのために、一般的に装置が大型となるオートコリメータの原理を、既存の三角測量式光学センサに搭載可能な大ききで構築する必要がある。

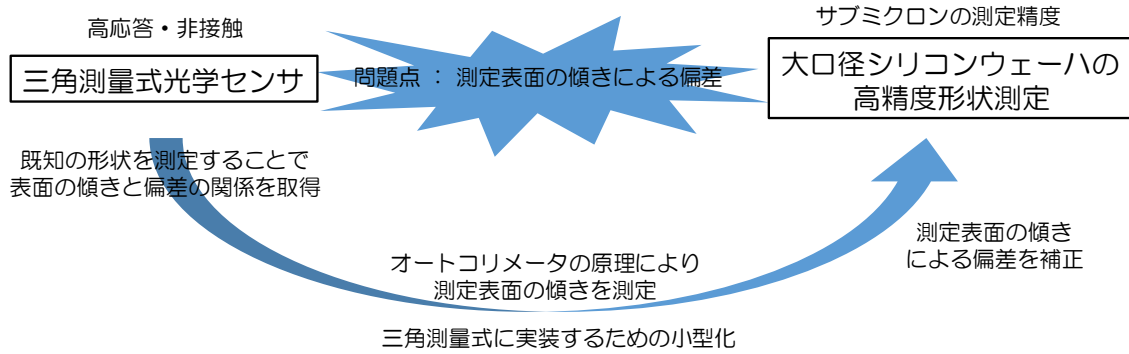


図3 研究概要

### 4. 研究成果

#### (1) 三角測量式光学センサの測定原理により生じる偏差についての実験的検証

シリコンウェーハの高精度表面形状測定において、三角測量式光学センサの測定原理により理論上生じる偏差の有無、およびその影響の大きさについて実験的に検証した。

まずは形状が既知である非球面レンズを測定対象として検証した。その結果、測定表面の傾斜角度が $\pm 1\text{deg}$ 以下の範囲においては、実験に使用した三角測量式光学センサの分解能である $0.1\ \mu\text{m}$ 以上の偏差は見られないことがわかった(図4)。これに対し、測定表面の傾斜角度が $\pm 1\text{deg}$ 以上になると、傾斜角度の増加に伴う偏差の増加も見られ、三角測量式光学センサにおける測定表面の傾きにより生じる偏差を確認し、その影響の大きさについて定量的な知見を得た。以上の実験結果から、表面形状測定のためにウェーハを外周三点で支持した場合の表面の傾斜が最大でも $1\text{deg}$ 以下である現行の直径 $300\text{mm}$ ウェーハにおいては、偏差の影響は見られないことが予想された。

そこで次に、実際に直径 $300\text{mm}$ ウェーハを測定対象として、表面形状測定に対する偏差の影響の有無を実験的に確認したところ、予想通り偏差の影響は見られず前述の検証結果の妥当性を裏付けることができた。

一方で、直径 $450\text{mm}$ ウェーハを測定対象とした場合には三角測量式光学センサの測定原理による偏差が表面形状測定結果に影響することが予想され、今後の本研究課題による三角測量式光学センサの測定精度向上の意義を確認した。

#### (2) 三角測量式光学センサの測定原理を模したシミュレーションの作成

三角測量式光学系の構築のためにはシミュレーションが必要と判断し、光軸や測定対象表面、ポジションセンサを直線の式で、また反射点や集光点をそれら直線の交点で表現した数値解析モデル(図5)を構築し、三角測量式光学系を模したシミュレーションの作成に取り組んだ。こ

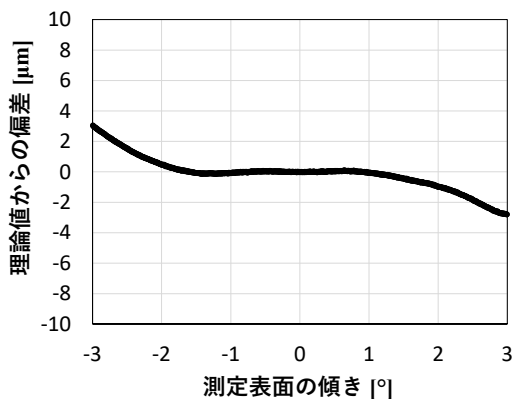


図4 測定表面の傾きと偏差の関係<sup>1)</sup>

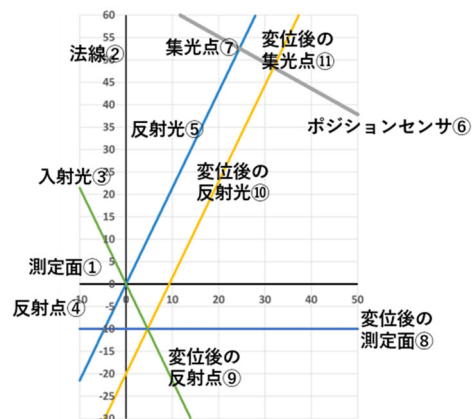


図5 三角測量式光学センサの測定原理を模したシミュレーションのモデル

れにより、三角測量式光学センサによる測定表面の変位をはじめ、本研究のテーマである測定表面の傾きにより生じる偏差についてもシミュレートすることができ、その傾向は一昨年度までに得られた実験結果と定性的に一致することを示した。

### (3) 三角測量式光学センサの測定原理を模した実験環境の構築

三角測量式光学センサの測定原理を模した実験的モデルを構築した。基本的な構成として、測定表面を再現したミラーにレーザーを照射し、その反射光を CCD カメラで受光した。レーザーとミラーの間の距離の変化が測定表面の変位に、ミラーの傾きの変化が測定表面の傾きに相当する。ミラーの変位や傾きが変化することにより、CCD カメラ上での受光位置が変化し、測定値が変化する。ミラーの変位と傾きは、ミラーを精密変位テーブルと回転テーブル上に載せることにより再現した。

次に、測定表面を再現したミラーの変位や傾きにより生じる測定値の変化を観察し、構築した実験装置の構成の妥当性を検証した。検証方法として、三角測量式光学センサにより非球面レンズの表面形状を測定することで過去に実験的に得た、測定表面の変位や傾きの変化に対する測定値の変化の傾向や、昨年度作成した三角測量式光学センサの測定原理を再現した数値解析モデルにより算出した、測定表面の傾きにより生じる測定値の偏差の傾向と比較した。その結果、構築した実験装置により構築した測定表面の変位や傾きの変化に対する測定値の変化は、これまでの実験・解析結果と同様の傾向を示し(図 6・図 7)、実験装置の構成の妥当性を確認できた。

しかしながら、前述の構築した実験装置による測定結果は、変位テーブルや回転テーブルの位置決め精度や繰り返し精度による不確かさが大きく、さらにレーザーや CCD カメラとミラーの間の距離が長いことにより、実際のウェーハ形状測定に求められる精度や分解能を満足していないことがわかった。そこで、変位テーブルや回転テーブルにより生じる不確かさを見積もることをはじめとした、実験装置についての不確かさ解析を行った。さらには、実験装置構成要素の配置位置を調整することによる分解能の向上も検証した。

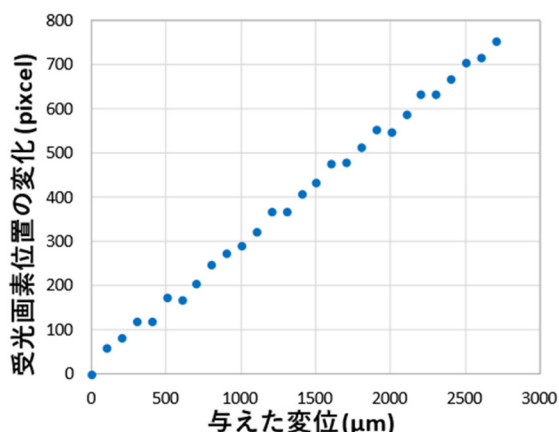


図 6 ミラーの変位と受光位置の変化の関係

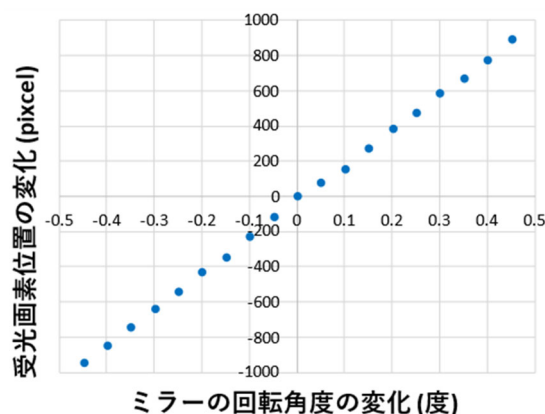


図 7 ミラーの回転と受光位置の変化の関係

### <引用文献>

- 1) 馬場浩史郎, 伊藤幸弘, 深津拓也, 大口径シリコンウェーハの形状測定における三角測量式光学センサの測定原理により生じる偏差の実験的検証, 精密工学会第 29 回学生会員卒業研究発表講演会, (2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤幸弘
2. 発表標題 大口径シリコンウェーハの高精度形状測定方法の開発
3. 学会等名 電気加工学会第232回電気加工研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 馬場浩史郎, 伊藤幸弘, 深津拓也
2. 発表標題 大口径シリコンウェーハの形状測定における三角測量式光学センサの測定原理により生じる偏差の実験的検証
3. 学会等名 精密工学会第29回学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------