

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20421

研究課題名（和文）Si屈折率温度依存性の高精度測定のための両面－タンデムハイブリッド干渉計の開発

研究課題名（英文）Development of hybrid system of double-sided- and tandem- interferometer for precise measurement of refractive index and its temperature dependence of silicon

研究代表者

川嶋 なつみ（KAWASHIMA, Natsumi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：10908635

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、可視レーザー光を用いた両面干渉計による幾何学的厚さ測定と、近赤外低コヒーレンス光を用いたタンデム干渉計による光学的厚さの同時測定が可能なハイブリッド干渉計による、シリコンの屈折率及びその温度依存性の高精度測定を目指している。可視光帯域の低コヒーレンス光源を用いて、タンデム型低コヒーレンス両面干渉計の原理確認を行った。シリコン基板の幾何学的厚さの測定が可能な両面干渉計を構築し、可干渉距離以上の光路差を補償する干渉計と光ファイバで直列接続し、幾何学的厚さ算出に必要な各干渉縞画像を取得可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案するハイブリッド光学系で屈折率値及びその温度依存性が高精度に測定できれば、産業界における分光干渉計測の高精度化、高信頼性に資するとともに、シリコンの物性値に新たな知見を加えることが期待される。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to develop a hybrid interferometer capable of simultaneously measuring geometric thickness by a double-sided interferometer using visible laser light and optical thickness by a tandem interferometer using near-infrared low-coherence light to obtain the refractive index of silicon and its temperature dependence with high accuracy. We confirmed the principle of a tandem low-coherence double-sided interferometer using a low-coherence light source in the visible light. A double-sided interferometer that can measure the geometric thickness of a silicon wafer was developed and connected to an interferometer that compensates for an optical path difference greater than the coherence length. It was confirmed that interference fringe images required to obtain the geometrical thickness can be acquired even though there is an optical path difference greater than the coherence length.

研究分野：光計測

キーワード：屈折率 分散 温度依存性 厚さ計測 広帯域光干渉 レーザー計測 干渉計測 光計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体業界では素子の高密度化が求められており、シリコン基板全体の厚さむらを数 10 ~ 100 nm 以下にすることが要求されている。加えて、厚さの絶対値に関しても高精度な管理の必要性が増してきており、 $10^{-4}$  レベルの厚さ測定精度が求められている。また、基板研磨の過程など、温度変化、分布のある環境においても高精度な厚さ測定が求められている。

現在の産業界では、シリコン基板の絶対厚さ *in-situ* 測定に分光干渉計が広く使われている。分光干渉計では、基板に近赤外光を垂直に入射し表面反射光と裏面反射光の干渉光を分光することで厚さを計測しているが、内部透過光を利用しているため実際は光学的厚さ ( $n \times t$ ) を測っている。幾何学的厚さ ( $t$ ) は光学的厚さを屈折率 ( $n$ ) で除算して求めており、上述の厚さ測定精度を達成するためには、屈折率を  $10^{-4}$  オーダー精度で知る必要がある。しかし現状は、装置メーカー毎に異なる文献値が用いられている上、屈折率には温度依存性があることも知られているため、このオーダーでの信頼性ある屈折率の値は得られていない。そのため、現在はシリコン基板の幾何学的厚さの信頼性が担保されていない状況にある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、幾何学的厚さ測定の信頼性確保のため、屈折率及びその温度依存性の高精度測定法を開発することである。可視レーザー光を用いた両面干渉計<sup>(1)</sup>による幾何学的厚さ測定と、近赤外低コヒーレンス光を用いたタンデム干渉計による光学的厚さの同時測定が可能なハイブリッド光学系により、屈折率及びその温度依存性の高精度測定を達成する。タンデム干渉計とは基板表面と裏面とで構成されるフィゾー干渉計と補償干渉計とを光ファイバで直列に接続した干渉計であり、光源の可干渉距離を超えるフィゾー干渉計内の光路差 ( $2 \times n \times t$ ) を補償干渉計内の光路差で補償することにより測定できる。

3. 研究の方法

可視レーザー光源による両面干渉計と近赤外低コヒーレンス光源によるタンデム干渉計のハイブリッド光学系を構築する。両面干渉計は  $L$  で一部光路を遮った色が薄い光束、タンデム干渉計は  $W$  で遮った濃い光束で示す。両面干渉計では、光ファイバを射出した 633 nm レーザ光の半分がビームスプリッタ  $B_Z$  で反射した後、ビームスプリッタ  $B_X$  で 2 つに分かれる。ミラー  $M_X$  の反射光と試料左面反射光との干渉信号をカメラ  $X$  で測定し、光路差を求める。同時に、 $B_Z$  を透過し時計回りに試料横を通ってきた光と  $M_X$  の反射光との光路差も  $X$  で測定する。カメラ  $Y$  においても同様に 2 つの光路差を測定する。これら 4 つの光路差から試料の幾何学的厚さ ( $t$ ) を求める。一方、タンデム干渉計では  $1.5 \mu\text{m}$  帯低コヒーレンス光源を用い、フィゾー干渉計 (試料の表面反射光と裏面反射光) の光路差 ( $2 \times n \times t$ ) を補償するように補償干渉計内の光路差 ( $D_0 - D_1$ ) を調整し、近赤外カメラ  $Z$  で干渉信号を測定する。 $D_0 - D_1$  はレーザー干渉計で測定する。この光学的厚さ ( $n \times t$ ) を幾何学的厚さ ( $t$ ) で除算することにより、屈折率値を算出する。

また、試料温度を変えながら幾何学的厚さ ( $t$ ) と光学的厚さ ( $n \times t$ ) を同時に測定し、屈折率の温度依存性を求める。ハイブリッド光学系による幾何学的、光学的厚さの同時測定によって、試料の熱膨張を補正し、屈折率温度依存性を高精度に求める。

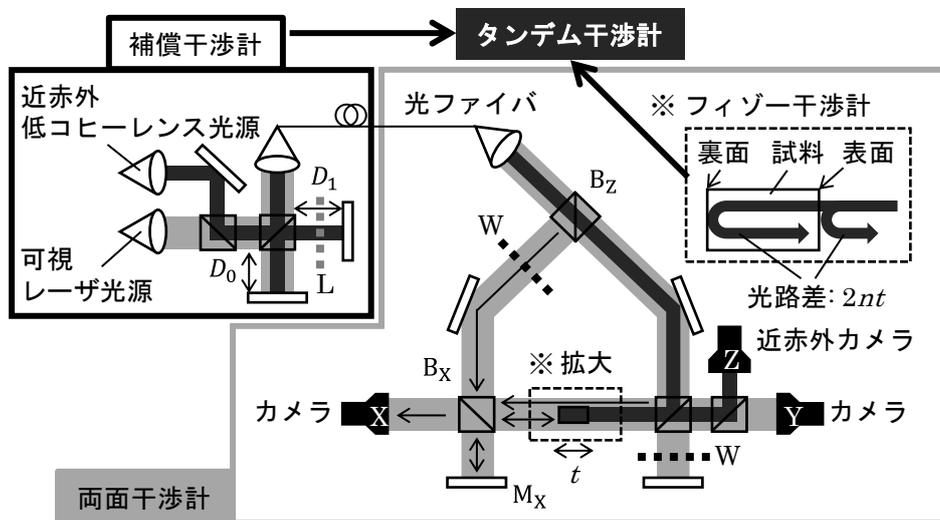


図1 両面干渉計とタンデム干渉計のハイブリッド光学系

#### 4. 研究成果

現有の両面干渉計に使用している可視レーザー光はシリコン基板を透過しないため、幾何学的厚さに加え光学的厚さの同時測定を実現するためには、シリコン基板を透過する近赤外光源を使用する必要がある。また、可干渉距離が短い低コヒーレンス光源を用いることで、波長ごとの光学的厚さの二次元分布が得られることから試料の屈折率を測定できる。両面干渉計と同軸に設置した低コヒーレンス光源によるフィゾー干渉計の可干渉距離以上の光路差を補償するため、補償干渉計内の光路差を調整し干渉信号を取得するタンデム干渉計の構築を目指した。

まずは試験的に可視光帯域の低コヒーレンス光源を用いて、タンデム型低コヒーレンス両面干渉計の原理確認を行った。図2のように補償干渉計(図2(a))と試料の幾何学的厚さの測定が可能な両面干渉計(図2(b))を構築した。CCDカメラによって二次元の干渉縞画像を取得することにより厚さむらの測定が可能である。この両面干渉計と補償干渉計はシングルモード光ファイバで接続した。試料は厚さの呼び寸法が950 μmのシリコン基板を用いた。

また、補償干渉計の粗動ミラーを移動させることで、左側カメラで確認できるミラーM<sub>x</sub>の反射光と試料左面反射光との干渉、B<sub>z</sub>を透過し時計回りに試料横を通ってきた光とM<sub>x</sub>の反射光との干渉、そしてこれらに対応する右側カメラで確認できる2つの干渉が確認できる位置を探し出し、微動ミラーを走査させることにより、図3に示すように、可干渉距離以上の光路差がある場合においても、各干渉縞画像を取得可能であることを確認した。粗動ミラーのスケール原点からのそれぞれのゼロ光路差位置を干渉縞のピークから求めた。それぞれのゼロ光路差位置をa, b, a', b'とした時、この数値を式(1)に代入してシリコン厚さLを算出した結果、呼び寸法と同じ950 μmが得られた。これにより、低コヒーレンス光源を使用した時の補償干渉計の原理を実証することができた。

$$L = \frac{b - a + b' - a'}{2} \quad (1)$$

新型コロナウイルス感染拡大に伴うテレワーク要請や半導体不足の影響で購入物品の納期が遅れる等、本研究を実施する時間が予定よりも取ることができなかったが、今後は、可視レーザー光源の両面干渉計に近赤外低コヒーレンス光源によるフィゾー干渉計を組み込み、補償干渉計で光路差を調整し試料の光学的厚さ測定を試みる。

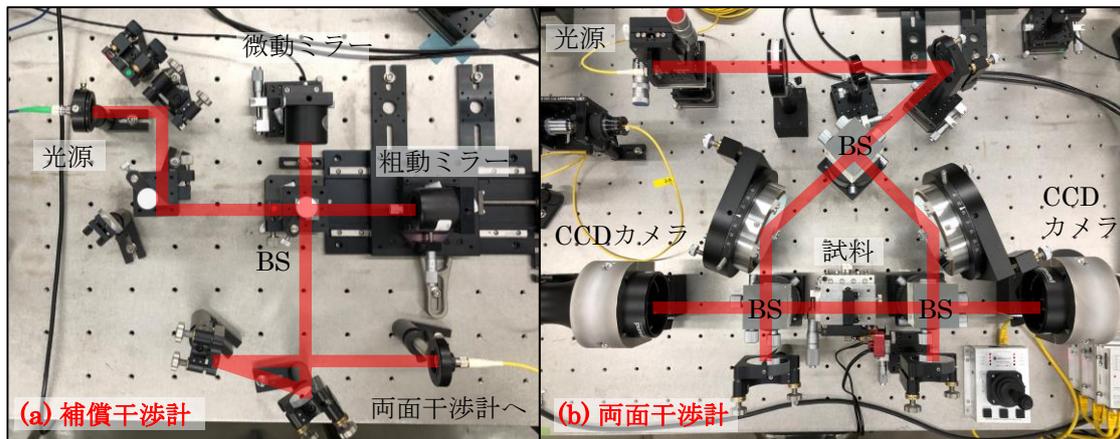


図2 (a)補償干渉計と(b)両面干渉計

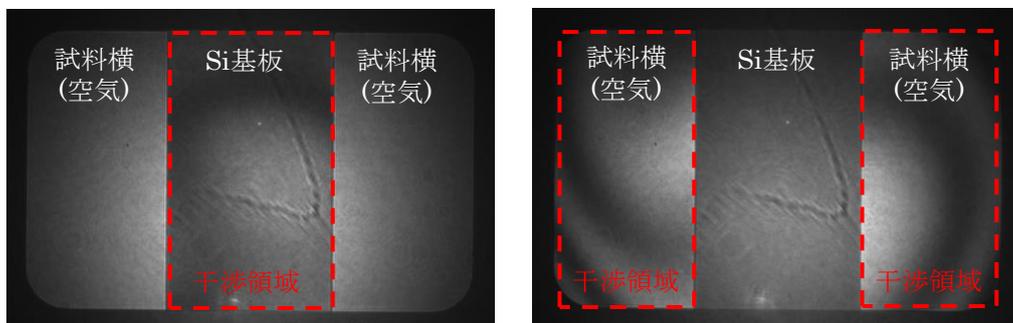


図3 光路差の異なる領域ごとの干渉縞画像

#### <参考文献>

- (1) Akiko Hirai, et al., "Precise measurement of the thickness of silicon wafers by double-sided interferometer and bilateral comparison," Metrologia, 58, 054002 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------