

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K05321

研究課題名(和文) タンデム型低コヒーレンス両面干渉計による透明基板の厚さと屈折率同時測定技術の開発

研究課題名(英文) Development of simultaneous measurement method for geometrical thickness and refractive index of transparent plate by tandem low-coherence double-sided interferometer

研究代表者

平井 亜紀子 (Hirai, Akiko)

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・研究グループ長

研究者番号：00357849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、透明基板の幾何学的厚さを信頼性高く測定する技術を確立すること、および試料の屈折率分散も同時に測定する技術を確立し、試料の製造条件との関係を調べることである。そのために可視光領域の低コヒーレンス光を用いたタンデム型低コヒーレンス両面干渉計を開発した。原理確認のために、不透明ではあるが幾何学的厚さ分布が既知であるシリコンウェーハ片を測定し、厚さ分布の形状、レンジがよく一致することを確認したが、厚さの絶対値には目標不確かさ以上の差があった。今後、絶対厚さの測定精度を向上させた上で、透明基板の厚さ分布精密測定を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本技術開発により、国際単位系にトレーサブルに透明試料の絶対幾何学的厚さの測定が達成できる。また、同一の系で同じ箇所の屈折率分散も測定できる。試料内部の屈折率分布は、不純物濃度分布や歪み分布が反映されているので、加工条件との相関を調べれば、より高品質な半導体用基板製造技術への波及効果が期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to establish a technique to measure the geometric thickness of transparent substrates with high reliability. Addition to that, to establish a technique to simultaneously measure the refractive index dispersion of the sample is subsidiary purpose. For these purposes, a tandem low-coherence double-sided interferometer was developed. To confirm the principle, the geometric thickness of a silicon wafer was measured using low-coherence light in the visible region. The obtained thickness distribution was in good agreement with the results obtained with an existing double-sided interferometer using laser light in its shape and range, however, the difference in the absolute value of the thickness was greater than the target uncertainty. In the future, we will improve the measurement accuracy of the absolute thickness and work on the precise measurement of the thickness distribution of the transparent substrate.

研究分野：光計測

キーワード：干渉計測 低コヒーレンス干渉 厚さ計測 屈折率

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、半導体製造では、素子の高密度化、小型化が一層求められている。そのため、微細化の他に、三次元積層デバイスにより集積度を向上させる技術が注目されている。デバイスを積層させるために、シリコン基板の厚さを、従来(数百 $\mu\text{m}$ )よりも薄い数 $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ に薄化する技術が進んでいる。また、液晶、有機 EL に続く第三のディスプレイとして注目されているマイクロ LED でも数十 $\mu\text{m}$ 厚のサファイア基板が使われる。基板が薄くなるにつれて、その厚さ管理は一層重要となっているため、数十 nm 程度の高精度厚さ計測技術が必要とされている。最近、製造業界全般において、加工精度の向上や生産拠点の世界的拡大に伴い、測定精度向上とともにその信頼性担保が重要となっており、国際単位系(SI)にトレーサブルな精密計測の重要性が一層高まっており、半導体業界においても例外ではない。

非接触厚さ測定には、基板材料を透過する波長帯域の広帯域光を用いて、基板試料表面からの反射光と試料内部を透過した試料裏面からの反射光との干渉を利用する分光干渉方式が広く用いられている。しかし、二つの光の光路差は、試料の屈折率( $n$ )と幾何学的厚さ( $t$ )の積である光学厚さ( $n \times t$ )となるため、産業上必要な幾何学的厚さを求めるためには屈折率の正確な情報が必要となる。例えばシリコンでは、近赤外光を用いた分光干渉方式の装置が広く用いられており、そこでは一般に屈折率の文献値が使用されているが、メーカーや装置によって異なる文献値が使用され、業界で統一した値がない。また、屈折率は波長によって異なり(屈折率分散)、ロット毎のばらつきがあり、さらに、微量不純物濃度によっても屈折率が変わるため、用いた文献値が正しいとは限らず、測定された幾何学的厚さの信頼性が保証できていない。そのため、複数の装置で測定した結果の不一致や、内部の屈折率分布が厚さ分布として測定される問題があった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、透明基板の幾何学的厚さを信頼性高く測定する技術を確立すること、および試料の屈折率分散も同時に測定する技術を確立し、試料の製造条件との関係を調べることである。そのためにタンデム型低コヒーレンス両面干渉計を開発する。幾何学的厚さを測定するための両面干渉計で透明基板を測定する際不要な光の影響を除くために可干渉距離が短い低コヒーレンス光(広帯域光)を用いる。しかし、両面干渉計では、可干渉距離以上の光路差を持つ光の干渉も測定しなければならない。そこで本研究では、可干渉距離が短いという問題をタンデム型干渉計の構築により解決する。本技術開発により、国際単位系にトレーサブルに透明試料の絶対幾何学的厚さの測定が達成できる。また、同一の系で同じ箇所の屈折率分散も測定できる。試料内部の屈折率分布は、不純物濃度分布や歪み分布が反映されているので、加工条件との相関を調べれば、より高品質な半導体用基板製造技術への波及効果が期待される。

### 3. 研究の方法

透明試料の幾何学的厚さを精密に測定するタンデム型低コヒーレンス両面干渉計を開発する。図1に本研究で開発する測定用両面干渉計を示す。光源からの光をレンズで平行光にし、ビームスプリッタ  $BS_C$  で二つの光路に分け、ビームスプリッタ  $BS_L$ 、 $BS_R$  に導く。 $BS_L$ 、 $BS_R$  でさらに二つの光路に分け、一方は試料に、もう一方は参照鏡  $M_L$ 、 $M_R$  に導く。 $BS_L$  と  $BS_R$  の間の光路に厚さ  $t$  の試料を設置する。各  $BS$ 、 $M$ 、試料間の光路長を図のように  $a$  から  $f$  で示し、左右の CCD カメラ上で観測される干渉縞を解析して得られる光路差をそれぞれ  $\gamma$ 、 $\delta$  で示す。以降、試料表面で反射する光に関する光路長は添字  $S$  で、試料の脇の空間を通る光に関する光路長は添字  $A$  で示す。試料表面で反射した光は、左右の CCD カメ

ラでそれぞれ、参照鏡  $M_L$ ,  $M_R$  で反射した光との干渉縞画像が測定され、これを解析することにより、光路差  $\gamma_s=2(c_s-f_s)\cdots(1)$ 、光路差  $\delta_s=2(b_s-e_s)\cdots(2)$  が求められる。試料の脇の空間を通過してきた光は、反対側の参照鏡

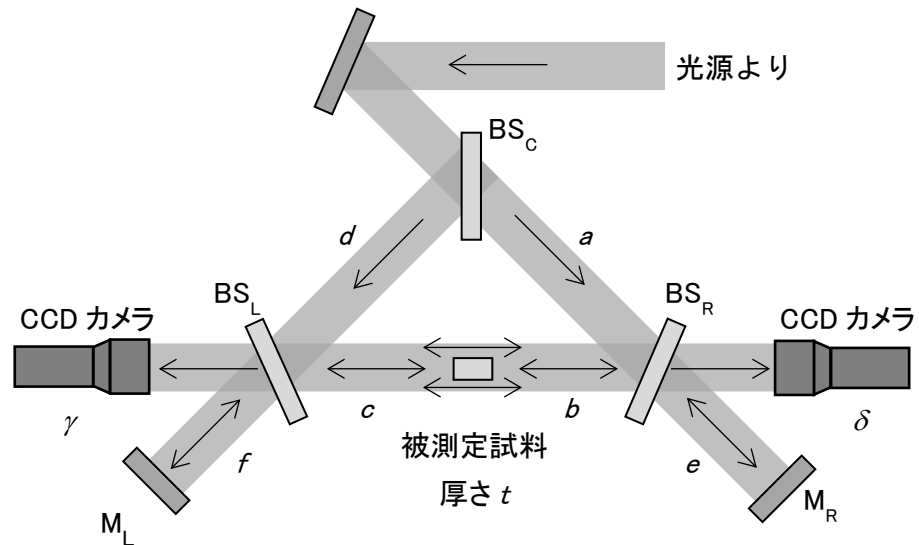


図1 測定用両面干渉計

で反射した光と干渉し、光路差  $\gamma_A=\{a_A+b_A+t+c_A-(d_A+2f_A)\}\cdots(3)$ 、 $\delta_A=\{d_A+c_A+t+b_A-(a_A+2e_A)\}\cdots(4)$  が求められる。  $c_s-f_s=c_A-f_A$ 、 $b_s-e_s=b_A-e_A$  なので、 $\{(3)+(4)-(1)-(2)\}/2$  より試料の幾何学的厚さ  $t$  が求められる。光源がレーザーの場合は、光路差が大きくても干渉縞が観測できるが、低コヒーレンス光の場合は可干渉距離以上の光路差では干渉縞が発生しない。 $\gamma_s$ ,  $\delta_s$ ,  $\gamma_A$ ,  $\delta_A$  の光路差を同時にゼロ付近にすることはできないので、これまででは、低コヒーレンス光で両面干渉計を実現することはできなかった。そのため、単一光ファイバーを介して、補償干渉計を直列に接続したタンデム干渉計を構築する。

図2にタンデム型低コヒーレンス干渉計の原理図を示す。測定干渉計の光路差  $2|D_0-D_1|$  が光源の可干渉距離より長い場合、測定干渉計単体では干渉縞は観測されない。しかし、直列に補償干渉計を接続し、補償干渉計の光路差  $2|D_2-D_3|$  が測定干渉計の光路差と等しくなるように調節すれば、光源から検出器に至る四通りの光路のうち、二つの光路の光路差を可干渉距離以下にすることができ、光検出器で低コヒーレンス光の干渉縞を観測することができる。補償干渉計の光路差を同軸のレーザー干渉計(現有)により正確に測定することによって、測定干渉計の光路差を知ることができる。図1の測定用両面干渉計の前に補償干渉計を設置することにより、両面干渉計中の大きな光路差を補償することができ、その補償量も正確に測ることができる。試料の透過光や裏面反射光など不要な光は、可干渉距離より大きい光路差があれば干渉縞が発生しないため、測定に影響を及ぼさない。

#### 4. 研究成果

タンデム型低コヒーレンス両面干渉計システムを設計し、構築した。システム全体を図3に示す。測定用の光源は、中心波長 679 nm、スペクトル半値全幅約 7 nm の SLD ( Super Luminescent Diode、SUPERLUM 社、M-S-670-G-I-7) である。図1の両面干渉計ではプ

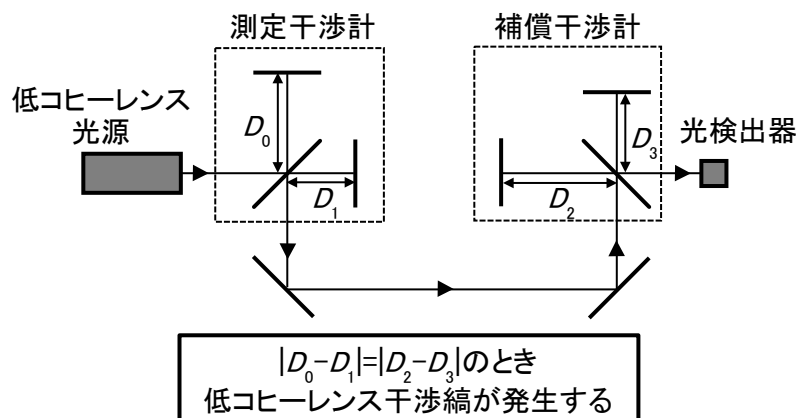


図2 タンデム型低コヒーレンス干渉計の原理

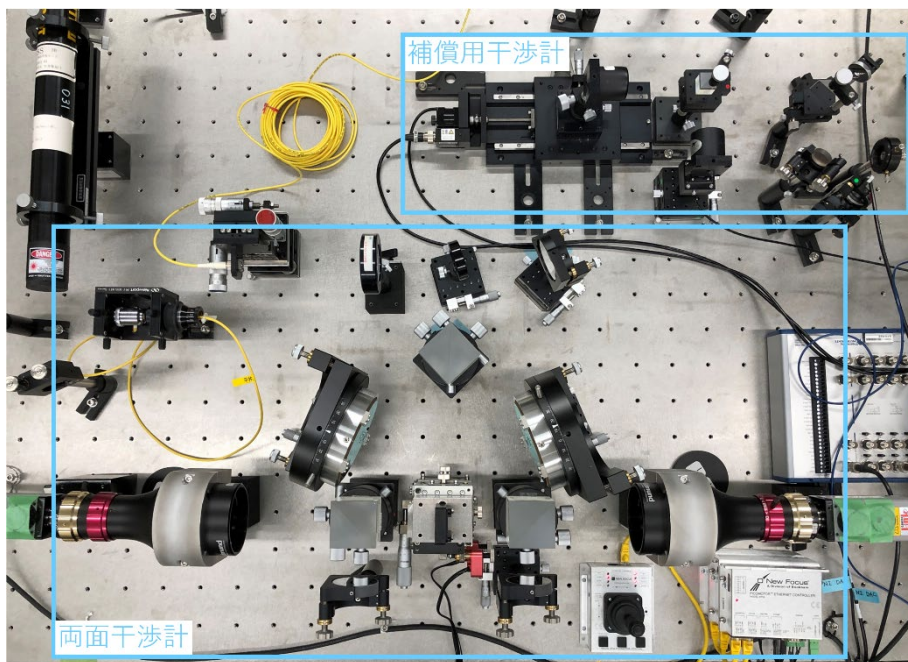


図3 タンデム型低コヒーレンス両面干渉計システム

レートビームスプリッタを用いた三角光路で説明したが、ビームスプリッタの屈折率分散による波長ごとの位置ずれや角度ずれを防ぐため、キューブ型ビームスプリッタを用いた五角光路とした。補償用干渉計は、一方の腕の光路長を粗動ステージで調整して両面干渉計の光路差を大まかに補償し、もう一方の腕の光路長をピエゾステージ(PI 社、P621.1CD)で精密に走査する。低コヒーレンス干渉縞のピーク位置周辺で位相シフトを行い、精密に位相分布を測定する。補償用干渉計には、波長安定化He-Neレーザも通せるようになっており、補償した光路差、つまり両面干渉計の光路差をSIトレーサブルに測定することにより、タンデム型低コヒーレンス両面干渉計で得た厚さと屈折率の値をSIトレーサブルにすることができる。

原理確認のために、不透明ではあるが幾何学的厚さ分布が既知である呼び厚さ 950  $\mu\text{m}$  シリコンウェーハ片を測定した。約 30 mm $\times$ 10 mm に切り出したシリコンウェーハ片の約 16.2 mm $\times$ 9.3 mm の領域を測定した。厚さ分布は、形状、レンジともレーザ光を用いた両面干渉計で得られた結果[1]とよく一致したが、厚さの絶対値には差があった。今後、粗動ステージとピエゾステージのより精密な校正を行い、測定環境データを用いたより精密な空気屈折率補正、測定時間短縮による環境安定化を行い、絶対厚さの測定精度を向上させる。そして、透明基板の厚さ分布測定に取り組んでいく予定である。

<引用文献>

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
---------	---------