

二焦点レンズを用いたシリコンウェーハの厚み測定

Measurement of Silicon Wafer Thickness Using a Double-Focus Lens

上村 康幸*・谷 泰弘*・渡部 和**・佐藤 壽芳***

Yasuyuki KAMIMURA, Yasuhiro TANI, Kazushi WATANABE and Hisayoshi SATO

1. 緒 言

半導体の基板に使用されるシリコンウェーハは、現在8インチが主流であるが、今後300mmさらには450mmと大口径化しようとしている¹⁾。一方、半導体デバイス製造においては、小型化・高集積化に伴いパターン形成時の被写体深度が小さくなり、大口径ウェーハほど高平坦化(TTV)が要求されている。

ウェーハを平坦化する加工工程に、劣悪な作業環境を抑え自動化を促進するために、ラッピング工程を研削加工に置き換える片面の平面研削盤が使用されようとしている^{2,3)}。真空チャックされたウェーハを平面研削盤で研削加工すると、一般に、加工時の熱変形などによりウェーハの中心部が多く削れ中凹の形状が得られる。このような形状を抑制するために、砥石主軸を傾けて補正する研削加工が採用されている。その際、研削後のウェーハのTTV(厚みむらであり、ウェーハの裏面を基準としたときの表面の凹凸)をオンマシンで0.1 μm 以下の精度で高速に自動測定したいという要求がある。TTVをオンマシン測定することで、高精度の補正研削が可能となり、大口径ウェーハの高平坦化が達成できる。

8インチ以下のシリコンウェーハのTTV測定は、操作が簡単で容易に高分解能が得られる静電容量方式が多用されている。しかし、ウェーハを真空チャックした加工機上で測定する場合、チャック面の溝が影響し正確なTTVが得られない。2つのセンサを対向させ、両側から位置を測定する場合、ウェーハをその都度チャック面から取り外して測定する必要がありオンマシン測定できない。また、両センサの走査軸の位置ずれが問題となる。そのため現状の方法は適用できない。

一方、ガラスなどの透明な材料を対象とした厚み測定には、①レーザ光を被測定物に斜めに入射させその表面と裏面で反射した二つのビーム間隔から厚みを測定する方法⁴⁾や②スーパールミネッセントダイオードを光源として被測定物の表面および裏面からの反射光と参照光ミラーからの反射光とを交互に合波・干渉させて厚みを測定する方法⁵⁾がある。しかし、①の方法は、被測定物表面の傾き角に敏感で、表面のうねり成分の程度によってはその正反射光が得られなくなる。また、光を特定の角度で入射させるため、被測定物の表面と裏面で得られる反射光は正確な厚みに対応しない。さらに、測定誤差が1から2 μm と大きいいためシリコンウェーハのTTV測定には適さない。

一方、②の方式は、被測定物を走査する駆動ステージと参照光ミラーを位相変調させる駆動ステージとを交互に走査させ、透明なガラスの厚みと屈折率を同時に1Hz前後で測定できる。しかし、シリコンウェーハのTTV測定では100Hz以上の測定速度が要求されており、2軸以上のステージを走査させる方式では限界があり適用は困難である。

そこで本研究では、チャック面の溝に影響されず大口径ウェーハのTTVを高精度にオンマシンで高速測定できる方法として、シリコンを透過する赤外光を被測定物に垂直に入射させ、二焦点を持つ対物レンズを適用した厚み測定法を提案する。

2. シリコンウェーハの厚み測定原理

2.1 厚み測定用光学系

シリコンの厚みを一方向から光学的に測定するためには、使用する光がウェーハを透過する必要がある。シリコンを透過する波長域は1.2-8 μm の赤外光で、その中でも1.3-1.5 μm の赤外光がより強い透過強度が得られると報告されている⁶⁾。そこで、図1に示した本光学系のレーザダイオードには、波長1.3 μm のものを使用した。

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

**日立ビアメカニクス(株)

***東京大学名誉教授

レーザダイオードから出た光は基本的にはコリメータレンズで平行光にすべきであるが、レーザダイオードをコリメータレンズの焦点位置に正確にセットできなかったことや光軸中心に対するコリメータレンズの取付け精度の問題によりコリメータレンズを使用しない光学系を構成した。レーザダイオードの前に置かれた球レンズから出た光を、光径 $\phi 0.5 \text{ mm}$ 、拡がり角 8.5° の状態で無偏光ビームスプリッターに入れ、ビームスプリッター（透過率 50%）から直進する光を対物レンズで集光させた。ウェーハの表面と裏面からの反射光はビームスプリッターで 90 度に曲げられ、フォトダイオードで受光される。光の乱反射や球面収差などの影響を小さくするため、ビームスプリッターと対物レンズ間の光軸中心に $\phi 0.8 \text{ mm}$ 穴の開いたスリットを設けた。その状態で、ウェーハの裏面の位置を集光点より極僅か対物レンズに近くなるようにセットした。そして、ウェーハを光軸に垂直に保ったまま対物レンズから遠ざかる方向に光軸に沿って 0.3 mm/s の一定速度で移動させた。するとまず集光点がウェーハの裏面に一致し、このとき反射光強度は極大値となる。さらにウェーハを遠ざけると、今度は集光点が表面に一致した点で反射光強度の最大値が現われ、図 1 のようにウェーハの裏面と表面で 2 つのピークが得られる。このピーク間距離からウェーハの厚みを算出する。

本光学系の対物レンズには、光通信用レンズの開口数 $\text{NA} = 0.59$ と $\text{NA} = 0.37$ の 2 種類を使用した。透過率はどれも 98% 以上である。また、反射光を受光するフォトダイオードには、赤外受光領域 $1.0 \sim 1.6 \mu\text{m}$ のものを採用した。被測定物の単結晶シリコンウェーハには、厚みが① 0.664 mm 、② 0.623 mm 、③ 0.502 mm の 3 種類を用いた。厚みは何れもマイクロメータで測定した。また、ウェーハ①、②の屈折率は、共に 3.4981 で赤外分光計により測定した値である。一方③のウェーハの屈折率は、両面が鏡面であったため、赤外分光計では裏面の粗さによる反射光が影響し測定不能であった。

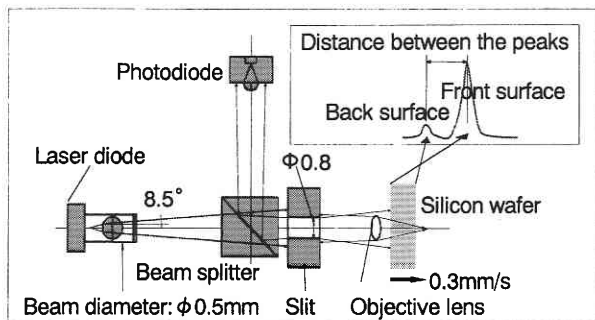


図 1 厚み測定用光学系

2.2 厚み測定の理論式

図 2 に合焦点を利用した厚み測定の概略図を示す。角度 θ_i で集光した光がウェーハの中に入ると、入射光は屈折し、角度 θ_o で等光する状態に変化する。そのため、太線で示された表面に合焦点の状態から Y だけウェーハをレンズに近づけたときに、細線で示される裏面に合焦点の状態となる。したがって、厚み t と移動量 Y の関係は、(1) 式のように表わすことができる。一方、スネルの屈折式は (2) 式で示される。ここで、 n_1 は空気の屈折率で 1 とした。 n_2 はシリコンウェーハの屈折率、 θ_i は集光角、 θ_o は屈折により変化した集光角である。(2) 式の関係を用いて (1) 式の θ_o を消去すれば (3) 式のような厚み t の理論式を導き出せる。このように厚み t は表面と裏面で合焦点を作るための移動量 Y と集光角 θ_i 、そしてウェーハの屈折率 n_2 の関数となる。すなわち、ウェーハの屈折率 n_2 と集光角 θ_i を既知の値とすれば、 Y を実測することで、厚み t を算出できる。ここで移動量 Y の値は、使用する対物レンズの開口数 ($\text{NA} = n_1 \sin \theta_i$) すなわち光の集光角により変化する。

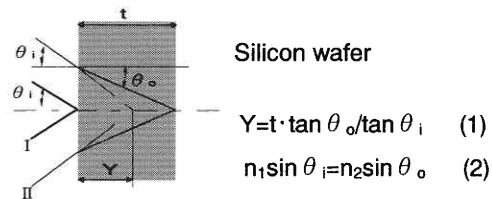


図 2 合焦点を利用した厚み測定原理

$$t = Y \sqrt{\frac{n_2^2 - \sin^2 \theta_i}{1 - \sin^2 \theta_i}} \dots \dots \dots (3)$$

図 3 に、 $\text{NA} = 0.59$ ($\theta_i = 36.629^\circ$) の対物レンズを使用したときの各ウェーハの厚みに対応する反射光強度のピーク間距離を示す。厚みが増すにつれて、減衰のため裏面に合焦した点の反射光強度は小さくなる傾向を示し、(3) 式の通りピーク間距離 Y の計測値はその厚みに対応して大きくなること分かる。

2.3 集光角の算出方法

図 1 に示した本光学系の幾何学的配置等から対物レンズの集光角を正確に計算することは、レンズの取付け精度等の問題により困難である。そこで、(3) 式に示した厚み測定式を (4) 式のような集光角の式に変形し、屈折率 n_2 と厚み t を既知として、厚みに対応するピーク間距離を実測すれば、レンズの取付け精度が悪くてもそれに影響されず正確な集光角 θ_i を算出することが可能となる。

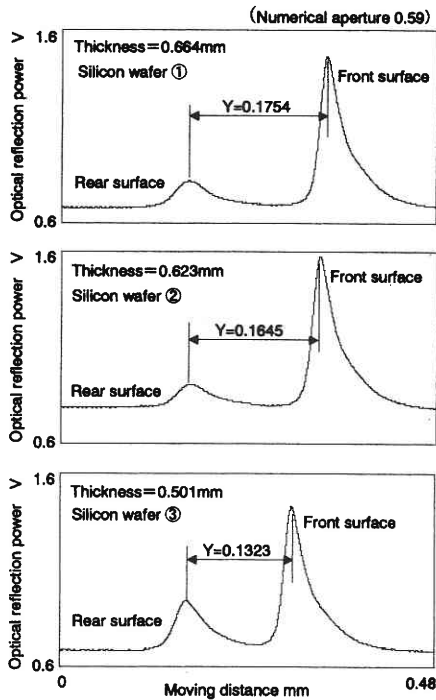


図3 各ウェーハの厚みに対応したピーク間距離

$$\theta_i = \sin^{-1} \sqrt{\frac{Y^2 n_2^2 - t^2}{Y^2 - t^2}} \dots \dots \dots (4)$$

図3に示したウェーハ①を基準にして(4)式から集光角を算出すると $\theta_1 = 23.357^\circ$ の値が得られた。この値は、厚み $t = 0.664 \text{ mm}$ (マイクロメータ値) と屈折率 $n_2 = 3.4981$ (赤外分光計値) を既知とし、厚みに対応するピーク間距離 $Y (Y = 0.1754 \text{ mm})$ を計測して算出した。幾何学的配置等から計算した集光角と(4)式から算出した値とを比較すると 13° 前後の大きな差が見られた。このずれについて言及すれば、光軸に対する対物レンズの取付け精度が影響し、光学系の幾何学的配置等から計算した集光角に差が生じたものと考えられる。この算出した集光角を基に厚みを算出した結果、① = 0.664 mm 、② = 0.623 mm 、③ = 0.501 mm の値が得られ、マイクロメータ値に全てのウェーハの厚みが一致した。

2.4 ウェーハの屈折率の算出方法

ウェーハの屈折率は、酸素や炭素その他の元素の不純物によって変化する可能性がある。集光角の異なるシステムでの厚みが算出されれば、ウェーハ毎に変化するとと思われる屈折率を算出することができる。屈折率の算出方法として、二焦点レンズを使用した方法を以下に提案する。

図1で示した対物レンズを二焦点レンズに置き換え

表1 屈折率の算出値と赤外分光計による測定値との比較

| | Refractive index measured by an infrared ray spectrometer | Calculation result of refractive index n_2 | Incident angle | |
|---|---|--|----------------------------|---------------------------|
| | | | $\theta_1 = 23.357^\circ$ | $\theta_2 = 19.201^\circ$ |
| | | | Distance between the peaks | |
| | | | $Y_1 \text{ mm}$ | $Y_2 \text{ mm}$ |
| ① | 3.4981 | 3.4976 | 0.1754 | 0.1801 |
| ② | 3.4981 | 3.4976 | 0.1645 | 0.1689 |
| ③ | — | 3.4963 | 0.1323 | 0.1359 |

ば、二焦点レンズの集光角 θ_1 と θ_2 で(3)式と同様な式を2つ得ることができる。そこで(5)式のようにその両者の比をとれば、未知の厚み t が消去され、(6)式のように屈折率 n_2 の式を導き出すことができる。この式は、2.3節の方法で求められる二焦点レンズの集光角 θ_1 と θ_2 そして二焦点レンズで測定されるピーク間距離の比をとることでウェーハの屈折率を算出できることを示している。

表1に、①、②、③のウェーハの屈折率を(6)式から算出した値と赤外分光計で測定された値とを比較した結果を示す。屈折率 n_2 の値は、二焦点レンズの各集光角を(4)式より計算された $\theta_1 = 23.357^\circ$ 、 $\theta_2 = 19.201^\circ$ とし、二焦点レンズを用いて測定されるピーク間距離 Y_1 、 Y_2 の値を(6)式に代入して算出した。算出した屈折率 n_2 は表1のように赤外分光計値に近い結果が得られた。また、③のウェーハのように屈折率が未知のウェーハでも、(6)式から算出できることが分かった。

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \theta_2}{n_2^2 - \sin^2 \theta_2}} \dots \dots \dots (5)$$

$$n_2 = \sqrt{\frac{(1 - \sin^2 \theta_2) \sin^2 \theta_1 - (1 - \sin^2 \theta_1) \sin^2 \theta_2 (\frac{Y_2}{Y_1})^2}{1 - \sin^2 \theta_2 - (1 - \sin^2 \theta_1) (\frac{Y_2}{Y_1})^2}} \dots (6)$$

3. 二焦点レンズの焦点間距離を利用した厚み測定

単レンズによる厚み測定では、ウェーハの厚みに相当する分(約 t/n_2)だけウェーハを移動させる必要がある。ところが、厚み測定に二焦点レンズを使用すれば、二焦点レンズの焦点間距離($f_2 - f_1$)によりウェーハの実移動距離を減らすことができる。ウェーハの実移動距離を減らせ

れば測定時間が短縮でき、被測定物の移動する場合には測定点のずれを最小化でき、高精度な厚み測定を実現できる。

そこで、 $f_1 = 0.358 \text{ mm}$ と $f_2 = 0.753 \text{ mm}$ の二焦点レンズを使用して、厚み測定を試みた。図4に、二焦点レンズの焦点間距離を利用してピーク間距離 Y_{2-1} を測定した結果を示す。測定したシリコンウェーハは、厚み $t = 0.664 \text{ mm}$ (マイクロメータ値) のものを採用した。図中の太線は f_1 の焦点距離をもつレンズによる反射光強度を、細線は f_2 の焦点距離をもつレンズによる反射光強度を測定した結果である。ピーク間距離 Y_{2-1} の測定値は、二焦点レンズの f_1 および f_2 のレンズで得られる反射光強度の測定位置を、図4に示した静電容量センサで検知し同定した。図4の結果で、 f_1 レンズによる表面のピークと f_2 レンズによる表面のピーク間距離が二焦点レンズの焦点間距離 ($f_2 - f_1$) を示している。また、 f_1 レンズによる表面の反射光と f_2 レンズによる裏面の反射光のピーク間距離が二焦点レンズのピーク間距離 Y_{2-1} を示している。二焦点レンズによる厚み測定の実験式は、二焦点間距離と二焦点レンズによるピーク間距離との和あるいは差に屈折率の項を掛けることで、(7)式のように定義できる。ピーク間距離 Y_{2-1} にかかる符号は、 f_1 レンズで得られる表面のピークより f_2 レンズで得られる裏面のピークが後に検出される場合を負、先に検出される場合は正となる。

$$t = (f_2 - f_1 \pm Y_{2-1}) \sqrt{\frac{n_2^2 - \sin^2 \theta_2}{1 - \sin^2 \theta_2}} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $f_2 - f_1$ (二焦点間距離) は、図4から実測した

値 0.3604 mm を採用した。また、ピーク間距離 Y_{2-1} は 0.1802 mm と実測した。二焦点レンズのそれぞれの集光角と屈折率は、2.4節に示した $\theta_1 = 23.357^\circ$ 、 $\theta_2 = 19.201^\circ$ および $n_2 = 3.4976$ と同値である。これらの値を (7) 式に代入し厚みを算出すると、 $t = 0.6644 \text{ mm}$ となりマイクロメータ値に一致した。これにより、二焦点間距離でウェーハの厚みを単レンズと同じように算出できることが分かった。しかし、今回使用した焦点間距離ではウェーハの実移動距離を減少させられる結果は得られなかったが、二焦点レンズの焦点間距離をうまく設定すれば、実移動距離を測定精度に有効な桁数だけに限定でき、高精度な厚み測定が可能となる。

4. 結 言

本研究では、チャック面の溝に影響されず大口径ウェーハのTTVを高精度にオンマシン測定できる方法として、二焦点レンズとシリコンを透過する赤外光を使用し、次のような方法を提案した。

- 1) 光学系のシステムを構成する際に、既知の屈折率と厚みをもつ標準試験片で厚みに対応するピーク間距離を実測して、対物レンズの集光角を同定する。
- 2) 上記したシステムを用い、二焦点レンズを使用して、未知の屈折率を算出する。
- 3) 同定した集光角と算出した屈折率そしてウェーハの厚みに対応した移動距離から厚みを算出する。

また、二焦点レンズを用いた方法では、レンズあるいは試料の実移動距離を少なくでき、厚み測定の高精度化の可能性を示した。

(2002年2月26日受理)

文 献

- 1) 高須新一郎, シリコンウェーハはどこまでおおくなるか, 応用物理, 65-8 (1996), 832-840.
- 2) 安部孝夫, 大口径ウェーハのための次世代加工技術, 電子材料, 35-7 (1996), 22-28.
- 3) 阿部耕三・ほか4名, ぜい性材料の超精密研削技術の研究 — 超精密研削装置の試作 —, 精密工学会誌, 59-12 (1993), 1985-1990.
- 4) 釜田富士夫, アンリツテクニカル, 45号, (1983), 30-34.
- 5) 田尻秀幸・ほか4名, 低コヒーレンス光干渉による屈折率と厚さ同時精密測定, 信学技報, OPE 96-116, 12 (1996), 37-42.
- 6) 小林昭・ほか2名, 非金属材料の工学的性質, (1964), 195, 東京, 地人書館.

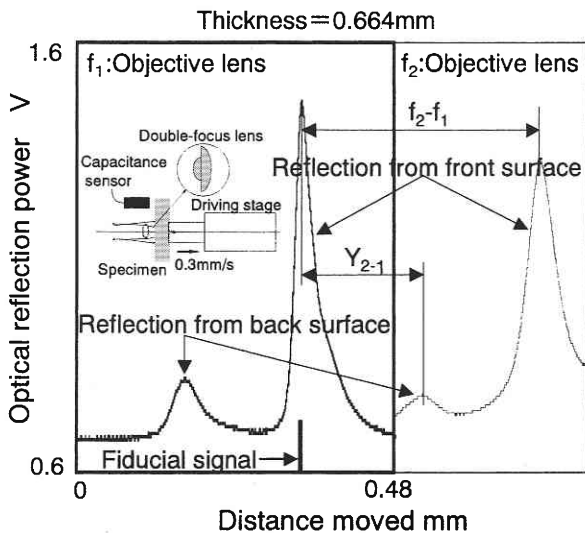


図4 二焦点レンズの焦点間距離を利用したピーク間距離の測定