

(論文)

光干渉法によるウェーハの精密形状計測

Precise Measurement of Wafer Geometry Using Interferometric Methods



森本 勉*

Tsutomu Morimoto



戒井 真**

Makoto Ebisui

New equipment using an interferometric method was developed to measure a wafer geometry called edge roll-off (ERO) which occurs within the edge exclusion length. An oblique incidence interferometer enabled the measurement of the rough surface of a wafer during manufacture. Moreover, the function of circumference profiles averages enabled the precise measurement of ERO without roughness effects. To evaluate ERO, lateral position is also important. This equipment specifies the exact lateral position of the physical edge of the wafer with an optical projection system.

まえがき = 半導体デバイスの微細化は、シリコンウェーハに高い平坦度を要求する。これは、リソグラフィ装置の分解能を上げるほど光学系の焦点深度が浅くなるからである。一般に、ウェーハの平坦度は中心部よりも外縁部の方が劣る。これはエッジロールオフ (Edge Roll-off: ERO) と呼ばれる「ダレた形状」が存在するからである。ウェーハ外縁部まで平坦度を高くし、デバイスの製造可能な領域を広げるため、ERO の低減はウェーハ製造上の重要な課題の一つとなっている¹⁾。また、ERO はデバイス製造の平坦化工程である CMP (Chemical Mechanical Polishing) 工程に影響を与える²⁾。これは、ERO の違いによって生じる加工圧分布の違いがウェーハ端から 10mm 程度の内部領域にまで及び、CMP による研磨レートの分布に変化をもたらすからである。CMP 工程への影響も含め、ERO の半導体デバイスへの影響は議論され始めたばかりで、ERO をどう測定、評価すべきかまだ業界でも決まっておらず、議論が続いている。

当社と㈱コベルコ科研は、ERO の関心の高まりを受け、業界に先駆けエッジロールオフ測定装置を開発した。本稿では、まず ERO の概略を説明し、次に開発した装置の測定原理と測定例を述べる。

1. エッジロールオフ

図 1 は、ウェーハ外縁部と表面形状の模式図である。ウェーハの最も外側は Chamfer と呼ばれる面取部であり、300mm ウェーハでは、物理的な先端より 0.3~0.5mm の領域にあたる。ERO はその面取部より内部の数 mm までにいたる領域にある。

ERO の発生要因は様々であるが、大きな要因はウェーハの研磨工程にある。研磨布をウェーハに押当てると、研磨圧力が周辺部でパルス状に高くなり¹⁾、周辺部が多く研磨されるからである。リテーナと呼ばれるウェーハ

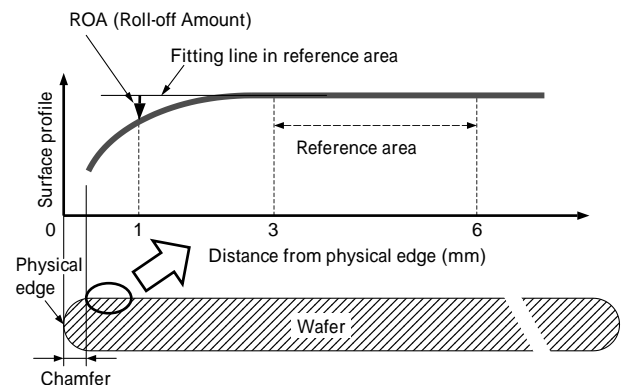


図 1 エッジロールオフ(ERO)とロールオフ量(ROA)の説明図
Fig. 1 Explanation of Edge Roll-off (ERO) and Roll-off Amount (ROA)

の近傍に構造物を設置し、外縁部の応力集中を緩和する方法は、ERO の制御方法の一つであるが、エッチング工程や研削工程などでも ERO の発生要因は存在し、完全な制御は難しい。また、条件によってはダレではなく、「盛上がった形状」となる場合がある。

図 1 の上部に、ERO の評価方法として Kimura らが提案している ROA (Roll-off Amount) という評価値³⁾を示す。この評価値は、ウェーハが平坦と考えられる、ウェーハの物理的な先端から 3~6mm 位置 (Reference area) のウェーハ形状から基準平面を求め、1mm 位置のウェーハ形状とその基準平面との距離として定義されている。ROA は、ウェーハ外縁部がどれくらいダレているか、または盛上がっているかを表す指標であり、ERO の評価方法としてよく用いられている。

2. エッジロールオフの測定装置

ERO を評価する装置として、エッジロールオフ測定装置 (LER-310) を開発した。写真 1 に装置外観を、図 2 に LER-310 測定部の構成を示す。ウェーハ製造ラインで利用されるため、また測定分解能として 10nm 以下が要

*技術開発本部 電子技術研究所 **㈱コベルコ科研 LEO 事業本部



写真1 エッジロールオフ測定装置 (LER-310)

Photo 1 Photograph of edge roll-off measurement system (LER-310)

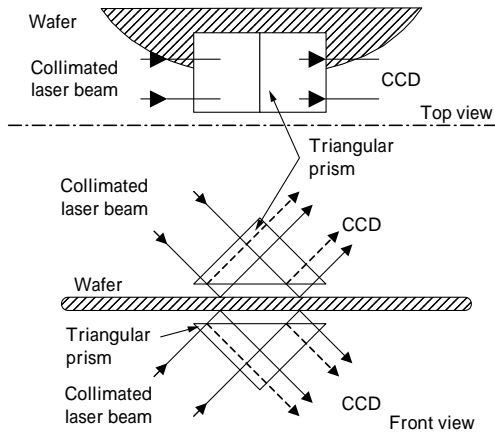


図2 エッジロールオフ測定光学系

Fig. 2 Schematic diagram of edge roll-off measurement system

求されることから、光干渉法による非接触測定方法を適用した。ウェーハの裏面は粗面の場合が多く、また工程途中の未研磨、すなわち粗面の測定ニーズにも対応できるように、本装置では斜入射干渉の光学系を採用した。また、ERO は表面だけでなく、裏面にも存在することから、ウェーハ形状の表裏を同時に測定できるように、光学系をそれぞれに配置した。測定レーザー光がウェーハに近接配置したプリズムに入射し、プリズム底面で一部が反射し参照光となる。一方、透過したレーザー光はウェーハで反射し物体光となり、物体光と参照光の合成による干渉縞が得られる。試料への入射角を θ 、試料とプリズム底面との距離を D 、レーザー光の波長を λ とすると、観測される干渉縞の強度 I は次式によって表される。

$$I = a \cdot \sin \left[\frac{2\cos \theta}{\lambda} \cdot D + \phi_0 \right] + b \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 a 、 b は試料の反射率や干渉計の構成によって決まる定数、 ϕ_0 は参照光と反射光の初期位相差を表す定数である。プリズム底面が平坦としたとき、 D は試料の形状を表す。 \sin 項の内部項を ϕ としたとき、 ϕ は試料の形状を反映した物体光と参照光の位相差である。式(1)の干渉縞を解析し、この ϕ を求める方法として位相シフト法がある。位相差 ϕ に既知の位相を加えて干渉縞を動かし、 ϕ を求める方法である。本装置では、2つの三角プリズムにはそれぞれピエゾアクチュエータが取付

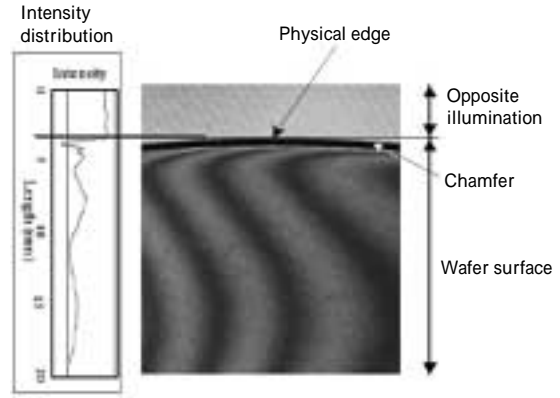


図3 干渉縞と背景光の例

Fig. 3 Example of interferometric fringe and background light

けてあり、参照光の位相を変化(位相シフト)させる位相シフト法を実行している。位相シフト法には多くの方式が提案されているが、本手法では、プリズムとウェーハの間で発生する多重反射による干渉縞ひずみに影響を受けない次式⁴⁾による位相シフト法で位相差 ϕ を求めた。

$$\phi = \arctan \frac{I_1 - 3I_3 + 3I_5 - I_7}{2(-I_2 + 2I_4 - I_6)} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 I_1, I_2, \dots, I_7 はピエゾアクチュエータにより $\lambda/2$ (90°) の位相差を順次7回与えて変化させた干渉縞画像を表している。

ピエゾアクチュエータによる位相シフトに関しては、温度特性などによる位相シフト誤差に注意が必要となる。 $\lambda/2$ の位相シフトを行う際、位相シフト誤差が存在し、干渉縞が $(\lambda/2 + \epsilon)$ ラジアン変化してしまった場合、 ϵ が小さいときは、 ϕ は次式で求めることができる⁵⁾。

$$\phi = \frac{I_1 - 2I_2 + 2I_3 - 2I_4 + I_5}{-I_{-2} + 2I_0 - I_2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 I_1, I_2, \dots, I_5 は5回の位相シフトの干渉縞画像である。この位相シフト誤差を随時補正することで、より高精度な測定が可能となる。図3は観測される干渉縞の例である。このような干渉縞を複数回取得し、式(2)および(3)から形状測定と位相シフト量の誤差補正を行う。ウェーハの位置決めは光学投影法で行う。図3の上部の明るい部分は背景光であり、その境界はウェーハの物理的な先端となっており、その位置の輝度変化によりその先端の座標を測定し、ROA評価の横軸の原点とする。これらの処理から、測定位置でのプロファイルとROAを計算する。本装置では、ROA評価の分解能は10nm、プロファイルの空間分解能は50 μ m、測定領域は30mm(径方向)×5mm(円周方向)である。

3. 測定例

図4に200mmウェーハの測定例を示す。図5には、本装置が粗さに影響を受けずにEROの評価を可能とするために採用している、周方向平均の説明図を示す。図4の細線は周方向平均をしない場合のプロファイルで、太線は周方向3.3mmで平均を施したプロファイルであ

る。図4の裏面の周方向平均プロファイルは粗さ成分が低減されており、周方向の平均の効果が確認できる。プロファイルの平均方法として、径方向の移動平均でも粗さの低減は可能であるが、データの端での適用が難しいこと、また空間分解能の低下などの欠点があるため、面で測定していることを活かし、周方向平均を採用している。

図6は300mm ウェーハの測定例である。45°ごと、8箇所のプロファイル測定結果を重ねて示した。300mm ウェーハでは、ウェーハを回転させながら研磨する方法を採ることが多く、角度による依存性が少ない。この測定例も角度位置の依存性が少なく、1本のプロファイルのように重なっている。本プロファイルの1mm位置でのROAの8平均は、表面および裏面で、それぞれ0.50 μm 、1.27 μm であった。電子情報技術産業協会(JEITA)が測定した、2003年製造のウェーハのROA測定結果⁶⁾では、表面のROAは、ウェーハメーカーやロットの違いで0.15~0.73 μm の幅で測定されており、図6の形状はウェーハの標準的エッジ形状の一例といえる。

図6からわかるように、ROAの測定位置である1mm

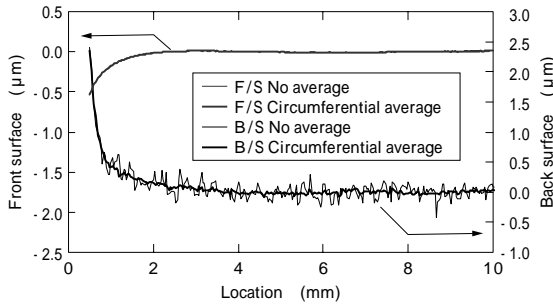


図4 200mm ウェーハの ERO プロファイルの例
Fig. 4 Example of ERO profiles of 200mm wafer

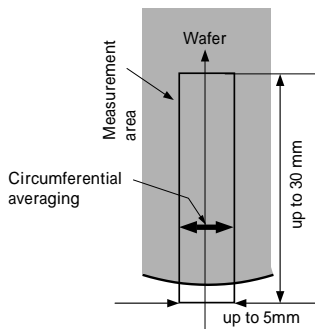


図5 周方向平均の説明図

Fig. 5 Schematic showing circumferential averaging of ERO profile

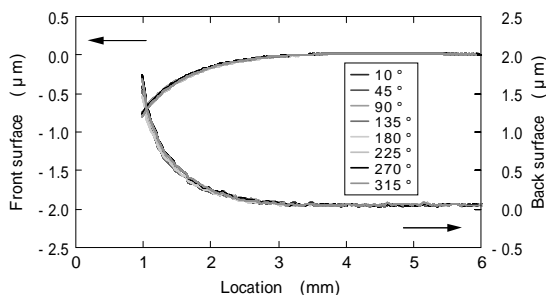


図6 300mm ウェーハの ERO プロファイルの例
Fig. 6 Example of ERO profiles of 300mm wafer

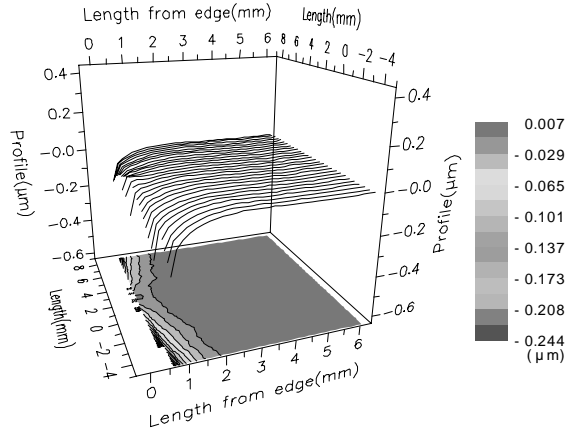


図7 周方向に依存性のあるエピウェーハの測定例
Fig. 7 Example profile of epi wafer with circumferential dependence

付近は形状の変化が大きい。このため、ROAの再現性はウェーハの位置決め精度に大きく影響を受ける。図6のウェーハの場合、位置決めを繰返して評価したROAの再現性は、20nm(3)以下であった。

図7は、周方向に ERO 形状が異なって測定された例である。測定サンプルはエピウェーハで、通常のウェーハでは観測されないこと、また特定の方位で盛上がり観測されることから、エピ成長時に結晶成長が局在化したものと考えられる。この異常領域はデバイス製造する領域でないため、リソグラフィの工程では問題は生じないが、CMP工程では、局所的な変化が加工圧の分布に影響を与える結果、ウェーハ周辺の歩留まりの悪化が懸念される。

むすび=半導体デバイスの微細化の進展に伴い、ナノレベルの形状制御が要求されるシリコンウェーハのエッジロールオフについて、光干渉技術を用いた測定装置を開発した。半導体デバイスの製造歩留まりとの関連から、ウェーハ製造工程においてエッジロールオフをどのように低減するかが重要な課題となっている。工程途中の粗い面を持つウェーハに対しても測定が可能である本装置がウェーハ製造工場利用され、この課題解決の一助となることを期待したい。

参考文献

- 1) 益永孝幸ほか：2001年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2001)p.489.
- 2) 福田明ほか：2004年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2004)p.497.
- 3) M. Kimura et al. : Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) p.38.
- 4) K. Hibino et al. : Opt. Rev. 1 (1994) p.270.
- 5) 森本勉ほか：第51回応用物理学関係連合講演会講演予稿集(2004)p.1093.
- 6) 電子情報技術産業協会：技術レポート JEITA EMR-3001(2004)p.2.