

(論文)

面法線方向測定を用いた新しいウェーハエッジの断面形状測定法

New Measurement Method for Cross-section of Wafer Edge Using Surface-normal Sensing Technique



森本 勉*
Tsutomu MORIMOTO



片山 亮*
Ryo KATAYAMA



高橋英二*
Eiji TAKAHASHI



赤松 勝**
Masaru AKAMATSU

We have developed a new method to measure the cross-section of a silicon wafer edge using a surface-normal sensing technique. This method is applicable to the wafer's notch that cannot be measured by the conventional projective method. For demonstration, we have also developed a prototype that is constituted with multiple LEDs that are turned on sequentially with two cameras with telecentric lenses to measure the angle of the surface-normal and the processing unit for cross-section from the angle information. As a result, the prototype was found to have practicable measurement accuracy and throughput.

まえがき = シリコンウェーハの大口径化によりエッジ周辺で製造されるチップの数が増加した結果、エッジ周辺における歩留り向上がデバイス工場の課題となっている。それに伴い、ウェーハのエッジ周辺の形状（断面形状）にも関心が高まっている。ウェーハやデバイス製造時におけるウェーハ周辺部と保持部材の接触により起こるチッピングや、CMP (Chemical Mechanical Polishing) プロセスによるエッジ周辺における膜厚むらがエッジ断面形状に関係していると考えられるためである¹⁾。

現在、エッジ断面形状の標準として、SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) M1²⁾ が一般的に用いられている。この標準は、断面形状の許容範囲をテンプレートと呼ばれる幾何的な図面で定義している。一方、測定方法としては、同じく SEMI の標準測定法として破壊検査法ならびに非破壊検査法がある³⁾。破壊検査法は、ウェーハを径方向にへき開もしくは切断し、そのエッジ部の断面を顕微鏡で観察する方法である。簡便な方法であるが、破壊検査であるため、ウェーハの出荷検査や、恒常的な工程検査への適用はできない。非破壊検査法は、図 1 に示すように、ウェーハエッジに平行光束を照射し、エッジの影を TV カメラで撮像し境界面をエッジ断面形状として測定する方法である。この方法は、㈱コベルコ科研から商品化しているエッジ断面形状測定装置で採用している方法¹⁾で、非破壊かつ高速の測定が可能なることから、工程管理と出荷検査の両方の用途で標準的に利用されている。万能投影法による形状測定方式の一種で、信頼性も高い測定手法であるが、投影式という技術の性格上、図 1 上部に示すようなウェーハの結晶方位を示すノッチ部の測定が不可能である。

近年、線状レーザ投影による三角測量法を用いた測定

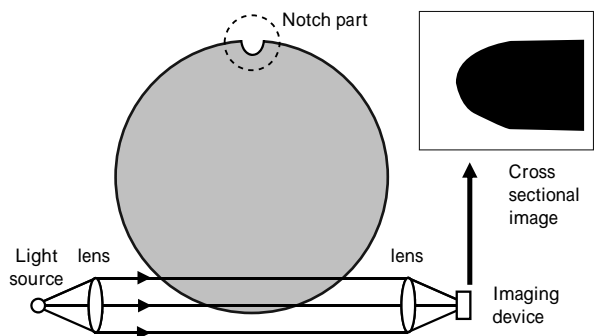


図 1 投影法によるエッジ断面形状測定法の説明図

Fig. 1 An illustration of projective method for cross-section of wafer edge

装置が開発された⁴⁾。高速の測定が可能なる優れた方法であるが、鏡面に仕上げられたエッジの表面では線状レーザ光の散乱光の検知が困難で最終製品への適用が難しいという問題がある。

上記状況を踏まえ、われわれは、最終製品として鏡面に仕上げられたエッジ部の断面形状測定方法についてノッチ部への適用も可能な測定手法を考案し、製造ラインの利用に必要な測定精度と測定速度を持つ装置の開発を行ってきた。本稿では本研究で得られた新しいエッジ断面形状の測定手法とともに、本手法を適用して構築した実証機の測定結果について報告する。

1 測定原理

1.1 基本原理

本測定方法は、測定対象に光線を入射し反射させたときの入射角と反射角から、測定対象の局所領域の法線角度、すなわち、面法線方向を求めることが基本原理となる。測定の流れは 2 つに分れる。第 1 として、測定対象

*技術開発本部 電子技術研究所 **㈱コベルコ科研 LEO 事業本部

を微小領域に分けその微小領域ごとに面法線方向分布を求め、その面法線方向から断面形状の微分値を算出する。第2として、その微分値を測定領域で積分することで最終的に断面形状を求め、測定が完了する。

本技術による断面形状測定原理の概略を図2に示した。図中には説明のため x - y 直交座標系を図示した。測定対象を原点付近に配置し、求める測定対象の断面形状を x の関数として $f(x)$ と表し、測定対象の点 $P(x, f(x))$ に入射する光線を入射光 I_i 、反射する光線を反射光 I_o と表す。点 P における入射光角度 $\theta(x)$ と出射光角度 $\phi(x)$ 、および測定対象の法線の角度 $\alpha(x)$ を、それぞれ y 軸と成す角度とし、その方向を図2に示すように定義する。このとき、入射角と出射角が等しくなるという反射の法則から、次の関係が導かれる。

$$\alpha(x) = \frac{\phi(x) - \theta(x)}{2} \dots\dots\dots(1)$$

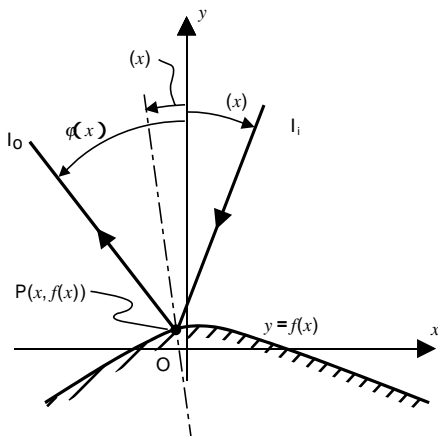


図2 測定原理説明図
Fig. 2 Illustration of measurement principle

式(1)から、入射角と出射角が既知のとき、求める断面形状の点 P における法線角度 $\alpha(x)$ が求まる。点 P における微分係数は法線角度の正接と一致するため、求めたい断面形状 $f(x)$ は次のように求めることができる。

$$f(x) = \int \tan(\alpha(x)) dx + C \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 C は積分定数である。積分定数は本測定原理では決定できないが、定数項であり全体の高度が変動するだけの意味を持つことから、通常の断面測定では不問である。

1.2 形状測定ユニットの基本構成

測定原理に従った形状測定ユニットの基本構成を図3を用いて説明する。光源には直径5mmの砲弾型LEDを半径160mmの円周上に2.5°間隔で配置する。この円の中心は図3における x - y 座標系の原点と一致させる。また、 i 番目のLEDと原点を結ぶ線分の y 軸からの角度を θ_i とする。本装置では、測定対象の大きさは1mm程度であり、160mm離れたLEDからの入射光はほぼ平行光とみなせるとする。このようにしたとき、 i 番目のLEDが点灯しているときの、前節で定義した入射光角度 $\theta(x)$ は、

$$\theta(x) = \theta_i \dots\dots\dots(3)$$

と表すことができる。

LEDからの入射光は、測定対象で反射し、この反射光を結像用のレンズとして機能するテレセントリックレンズを介して撮像素子であるCMOSエリアセンサで受光する。ラインセンサでも機能するが、測定したい断面位置の反射輝度のみを利用するため、測定位置の選択などで利便性が高くなるエリアセンサを用いた。以下の説明では、機能の面からラインセンサとして記述している。

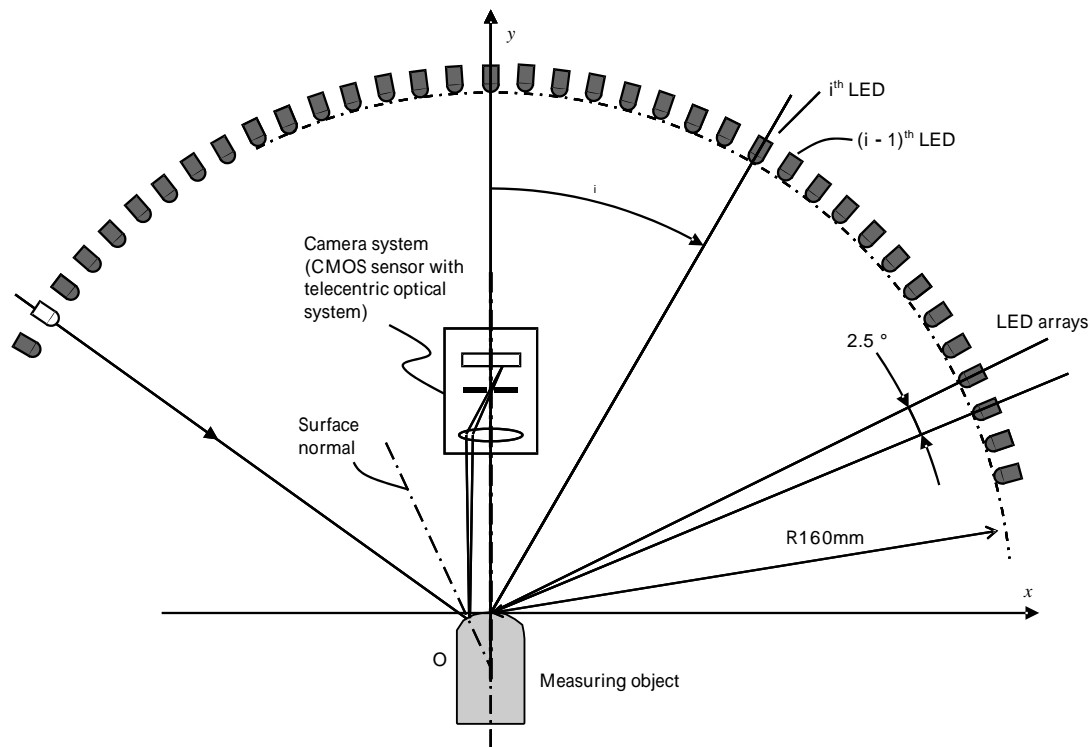


図3 形状測定ユニットの基本構成の模式図
Fig. 3 Explanation drawing of basic measuring unit

ラインセンサとテレセントリックレンズからなる受光光学系の光軸は y 軸と一致するようにした。テレセントリックレンズは、物体側の主光線が光軸と平行となるレンズであり、この特長から y 軸と平行な反射光成分が主としてラインセンサ面に結像される。すなわち、ラインセンサで明るく観測される光線の、前節で定義した反射光角度 $\varphi(x)$ は、測定対象の位置に関わらず、

$$\varphi(x) = 0^\circ \dots\dots\dots(4)$$

となる。

式(3)と式(4)を式(1)に代入すると、ラインセンサで明るく観測される位置の法線方向が次のように求まる。

$$(x) = \frac{i}{2} \dots\dots\dots(5)$$

ラインセンサの出力は、輝度分布として計算機に取込まれ、データ処理により断面形状を算出する。図4(a)は、LEDを順次点灯した際のラインセンサの出力例である。この図で示すように輝度出力(Intensity)は、測定対象の位置(Location of Measuring Object)とLEDの点灯位置(Number of LED)とのマトリクスとなる。図4(b)は、特定のラインセンサの画素位置(すなわち特定の測定対象の位置)の反射光強度に注目し、反射光強度とLEDの点灯位置(すなわち入射光角度)の関係を示している。本装置では、図4(b)のような強度分布の重心を求め、最も明るくなるLEDの点灯位置、すなわち、入射光角度を重心により算出した。LEDの点灯位置は離散的であるが、重心を求めることで補間的に入射光角度を求めることができる。図4(a)のマトリクスと、式(5)の関係式から、求めた測定位置における法線角度分布と、それから算出した断面形状は図5のように求められる。

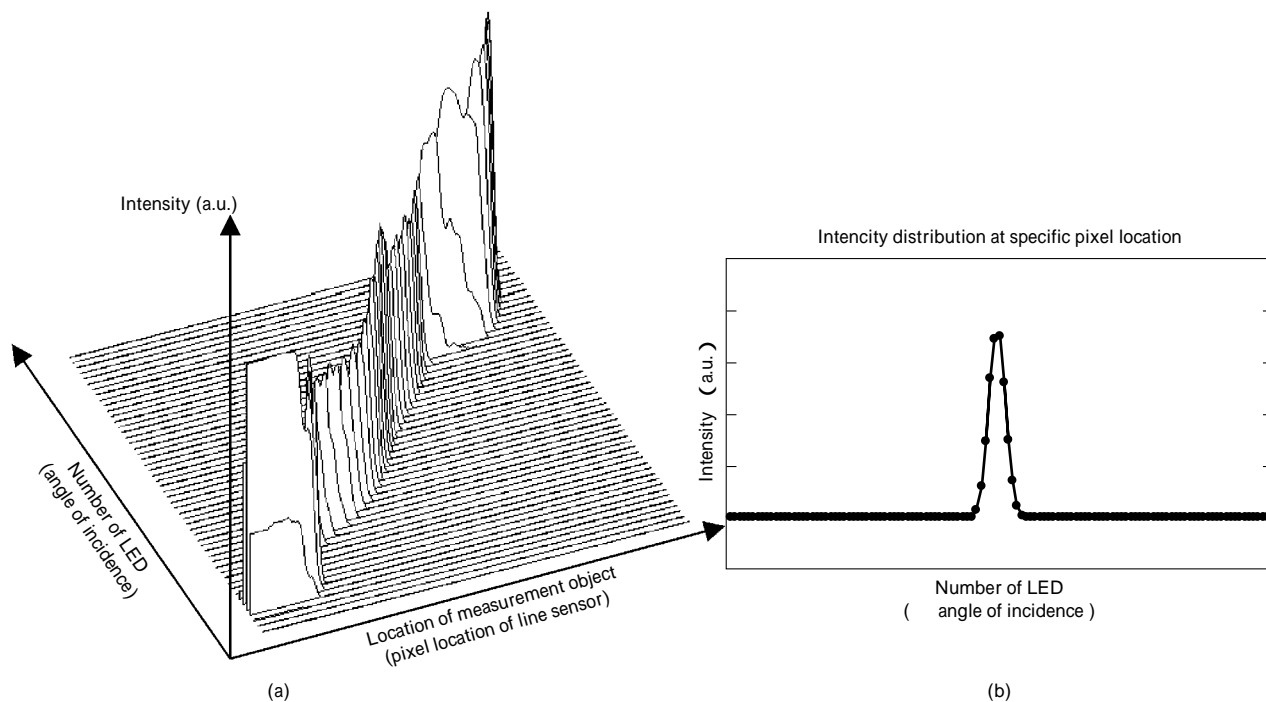


図4 (a) ラインセンサと測定対象位置および照射 LED 位置との関係を表す測定例、(b) ラインセンサの特定の位置における輝度と照射 LED 位置との関係を示す例

Fig. 4 (a) Sample of relationship among location of measuring object, the number of the LED and intensity of line sensor, (b) Sample of relationship between the number of LED and intensity of line sensor at specific pixel location of line sensor

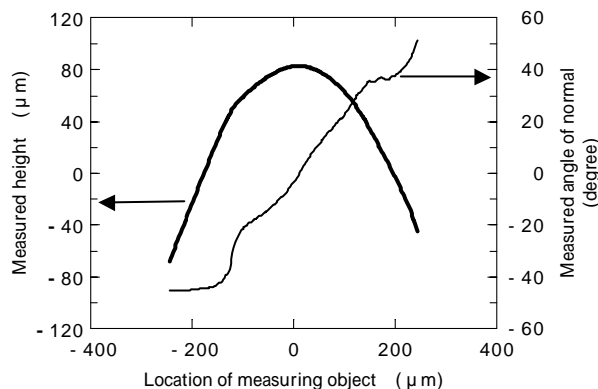


図5 測定された測定対象の面法線方向とその面法線方向から算出された測定対象の断面形状

Fig. 5 Measured angle of normal of measured object and calculated cross-section of measured object using angle of normal

2. エッジ断面形状測定装置

考案した測定方法でウェーハエッジの断面形状が測定できることを実証するため、性能実証機を開発した。実証機の構成図を図6、および外観を図7に示す。この実証機は、前章の測定原理で説明した形状測定ユニットを2個使い構築した。説明のため、図6には q - z 直交座標系を記載している。図6における角度は、全て q 軸を 0° とした反時計回りを正の方向としている。なお、LED光源と計算機は、2台の形状測定ユニットで共用している。LEDは、原点を中心とする半径160mmの円周上に 30° から 332.5° の間に 2.5° 間隔で122個配置(LED名:L1~L122)した。テレセントリックレンズとラインセンサからなるカメラは 135° 、および 225° の位置に2台配置した。2個の形状測定ユニットで独立に前章で説明した方

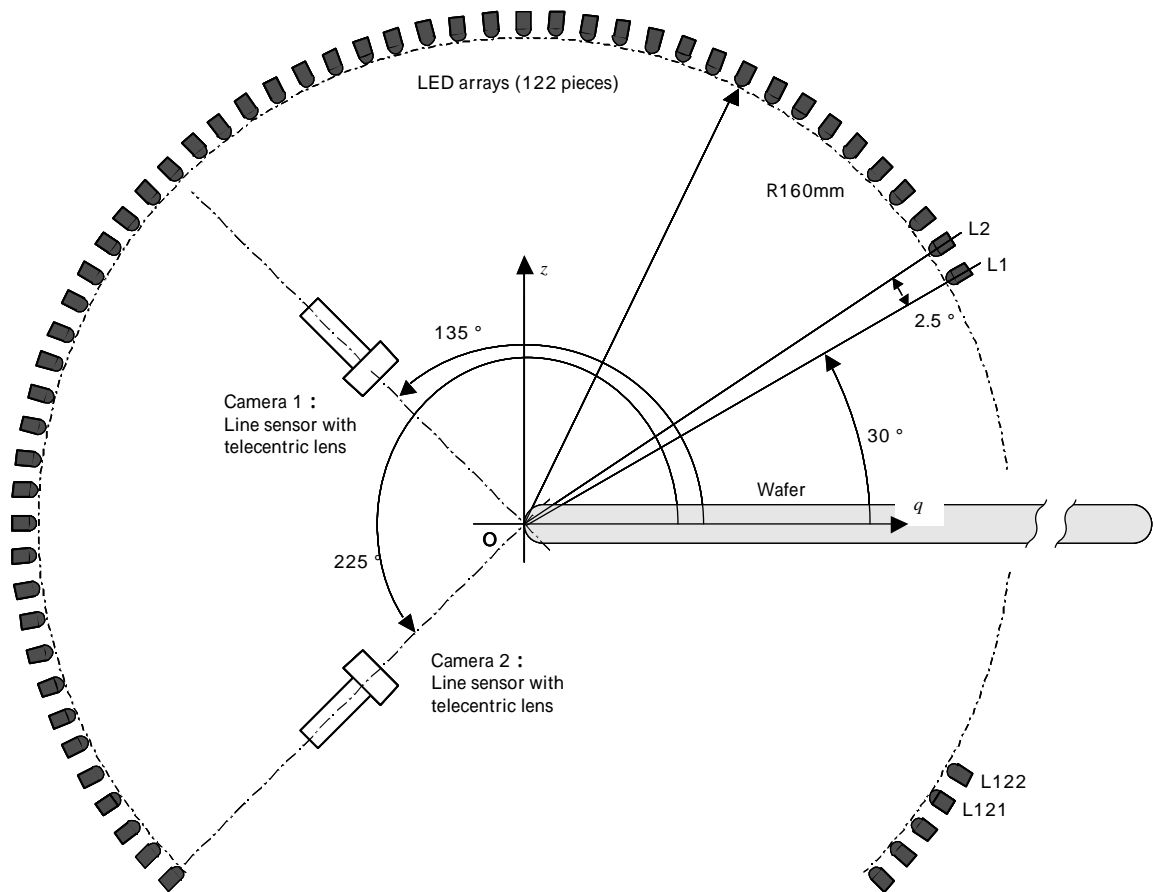


図6 開発したエッジ断面形状測定装置の説明図

Fig. 6 Diagram of developed wafer-edge-cross-section measurement system

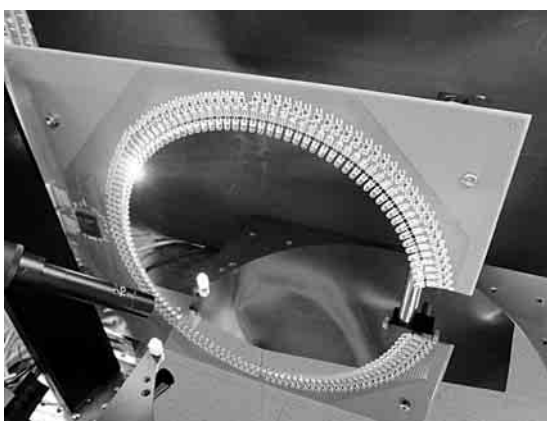


図7 性能確認装置の外観

Fig. 7 Photograph of developed prototype

法により形状を求める。それぞれのユニットで求めた形状は座標系が異なるため、図6の q - z 座標系に合致するように測定した形状に対して回転変換を行う。2つの測定結果の連結には両者の測定値の位置あわせが必要となるが、本測定原理では、式(2)でも明らかなように、測定ユニットと測定対象の絶対的な距離は不明であり、このままでは位置あわせはできない。そこで、本装置では一方の測定結果を移動させ、共通して求めている部分が最も合致する位置を探索して求める方法を採用した。

以上の方法により、ウェーハのエッジ断面形状の全体が求まる。本実証機では、LED1個の点灯とその際に行う画像の取得時間は最短で3msとなっており、122個全てのLEDを点灯し、対応した画像を取得する時間は

366ms (= 3ms × 122)となる。断面形状を算出する計算機の処理時間と合せ、1点の断面形状の測定時間は1s以下となっている。

3. 測定結果

開発したエッジプロファイル測定装置を用い、エッジ部分(非ノッチ部)とノッチ部分を測定した。

まず最初にエッジ部分の測定結果について述べる。エッジの表面が異なる2種類のウェーハを用意した。一方のウェーハは直径が300mmの最終製品で、エッジ部が鏡面加工されたもの(以下、研磨試料/試料A)で、他方は直径が200mmの製造途中のウェーハで、研削後にエッチング処理がなされ、エッジ部が未研磨のもの(以下、未研磨試料/試料B)である。本測定装置は測定対象が鏡面反射する試料を仮定しており、研磨試料は好適な試料である。一方、未研磨試料の表面は鏡面ではないが、エッチングにより光の波長オーダーの粗さが除去されていると見られ、鏡面反射成分が強く、本測定装置で測定が可能であった。表面性状の参考としてエッジの顕微鏡像を図8に示した。

これらのウェーハに対し、本実証機で断面形状を測定した。その結果を図9に示す。なお、図9には測定結果の妥当性を検証する目的でSEMIの非破壊検査法に準じた(株)コベルコ科研社製エッジ断面測定装置LEP-2200⁵⁾の測定結果を合せて記載した。グラフを見る限りにおいて面取部でよく合致していることが確認できる。どの程度の一致度かを確認するため、次の方法で2測定プロフ

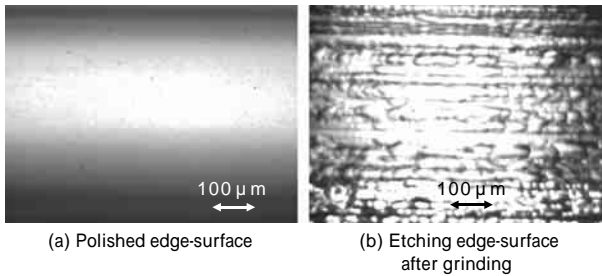


図8 測定対象エッジ表面
Fig. 8 Edge-surface of measuring object

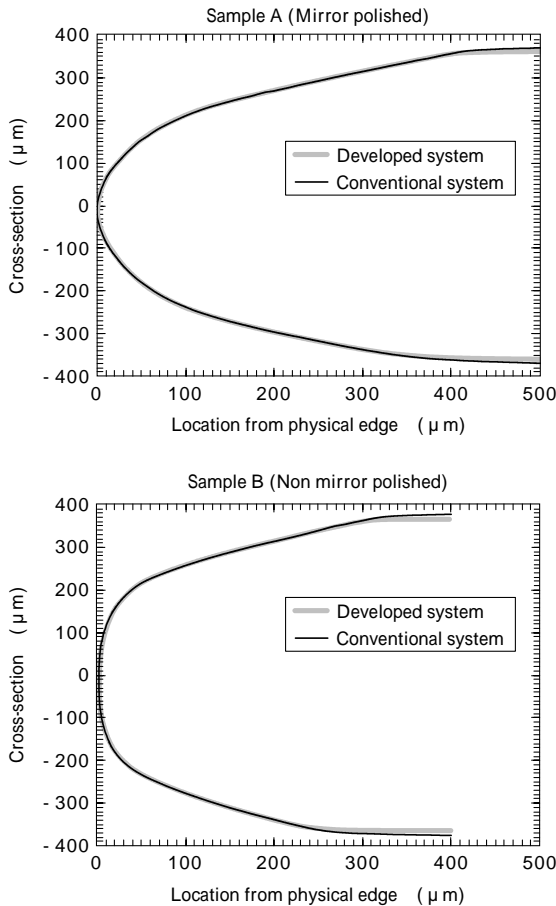


図9 開発装置と投影法の測定結果の比較
Fig. 9 Comparison of measurement results between developed system and conventional system (LEP-2200)

ファイルの距離の差を評価した。まず、(1) 本実証機での測定点と、その点に最も近接する他方装置による2つの測定点を探し、その2点を通る直線を求め、その直線と、最初の測定点の距離を差とし、次に、(2) すべての開発装置での測定点に対し、上記差を求め、差の2乗と平均の平方根 (Root Mean Square: RMS) を測定値差として求めた。この計算の結果、研磨試料 (試料A) における測定値差は $0.70 \mu\text{m}$ 、非研磨試料 (試料B) における測定値差は $1.3 \mu\text{m}$ と求めた。断面全体の大きさが厚さ方向で $775 \mu\text{m}$ であることを考慮に入れると、前述の2つの差は十分小さく、本実証機による測定の精度は従来の方法と同程度の精度であると考えられる。

ノッチ部の断面形状の測定結果を図10に示す。測定対象は直径が 200mm のウェーハ (最終製品) で、ノッチ部が鏡面に仕上げられており、測定箇所はノッチ部の

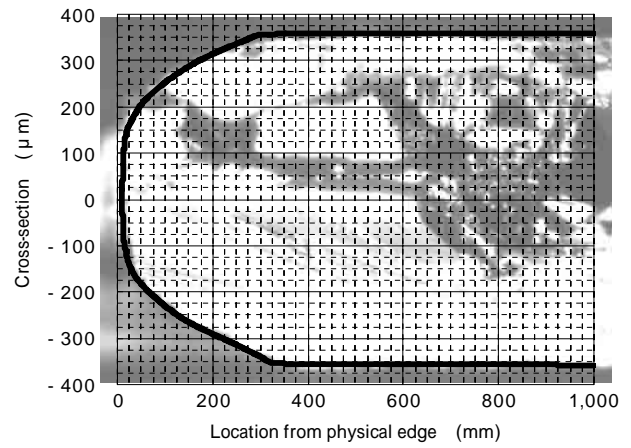


図10 本装置によるノッチ部の測定結果と、ウェーハノッチ部のへき開断面写真との比較
Fig.10 Comparison between measured result of notch area of silicon wafer and picture of cleaved cross-section of notch area

最奥部分である。この測定箇所は、前述の非破壊検査法で測定できないため、測定部分をへき開して顕微鏡像と画像上で比較を行った。図10にその様子を示す。図10の背景は、そのグラフと倍率をあわせて表示したへき開断面写真である。画像での比較であり定量性はないものの、へき開した断面の境界と測定形状は一致した。

4. まとめ

テレセントリックレンズとラインセンサを具備した2台の固定カメラと、円形状に配置した光源からなる移動機構のない簡単な光学系で、シリコンウェーハのエッジ断面形状を測定する手法を考案した。また、本測定手法に基づく実証機を製作し、従来用いられてきた投影方式との測定値差を計算し、同程度の測定精度と測定速度が得られたことが確認できた。本測定手法では、投影方式では測定できないノッチ部への適用も可能であることから、エッジの全周について断面形状の測定が可能となった。

ノッチ部に関しては比較可能な装置がなく定量評価はできなかったが、へき開したノッチ部の断面画像と良く一致していることが確認された。本測定手法は、ノッチ部の測定もエッジ部の測定も同一条件で測定が可能であり、ノッチ部もエッジ部と同様の精度で測定可能と考えられる。

測定時間に関しては、本実証装置ではデータ取得が約 400ms 、データ計算時間が 600ms となった。現状、ウェーハ工場で実施されているエッジ断面形状測定はウェーハの数箇所を測定するのが一般的である。データ計算を測定箇所の移動の際に行うとすると、計算時間はデータ取得時間のみの問題となり、1ウェーハ10点測定で測定時間が最大4秒程度増加する。この程度であれば測定時間に問題はなく、実用レベルと考えられる。

本報告では、精度の数値解析結果については省略し、光源が測定対象で平行光と仮定した場合の精度に対する影響や、LEDの数と精度の関係など、測定原理と実証機の精度評価について報告した。ウェーハの断面形状の仕

様は、測定結果をそのまま扱うのではなく、断面形状の面取部角度やその曲率半径などを数値化し、それらの数値をエッジ断面形状の仕様とすることが多い⁵⁾。この場合、断面形状の精度だけでなく、それらの数値の精度、再現性評価も重要である。現在、本測定手法に基づく測定装置の商品化を予定しており、これらの精度評価については商品化の後、報告する予定である。

むすび = 当社と㈱コベルコ科研では、年々厳しくなるウェーハの要求仕様に対応したウェーハ形状測定装置を開発してきた。エッジ形状の断面形状測定装置 LEP シリーズは特に力を入れてきた装置で、業界の標準的な装置としてご利用いただいている。本報告の測定方法は投影法を用いた装置で測定不可領域であったノッチ部の断面形状の測定を、移動機構がない簡便な光学系で可能にした。開発手法は測定対象の表面が鏡面であることを必要とするものの、表面性状に影響を受けない投影法の LEP

シリーズと機能補完しあうことで、ウェーハのエッジ部の全域で断面形状の測定装置を提供できるようになった。

ノッチ部の周辺は形状の特異箇所であり、デバイスの製造歩留りがもっとも悪い箇所とされる。本開発装置がウェーハ製造の工程管理や最終検査に適用されることによって、最適なノッチ部断面形状が研究の進展や安定した形状の供給が実現され、ノッチ部周辺の歩留り向上に貢献できるようになることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 住江伸吾ほか：電子材料，No.4 (1997)，p.111.
- 2) SEMI：SEMI International Standards, M1-1105, (2005)
- 3) SEMI：SEMI International Standards, MF928-0305, (2005)
- 4) Thomas Becker：SEMICON-WEST 2006 Wafer Edge Profile STEP Proceedings(2006)
- 5) 赤松 勝：LEP-2200 技術ノート，http://www.kobelcokaken.jp/tech_library/pdf/20060401/e.pdf