

(論文)

# シリコンウェーハ用サブナノ精度サイトフラットネス計

## Site Flatness Measurement System with an Accuracy of Sub-nanometer Order for Silicon Wafer



田原和彦\*1  
Kazuhiko TAHARA



松岡英毅\*1  
Hideki MATSUOKA



森岡哲隆\*1  
Noritaka MORIOKA



甘中将人\*2  
Masato KANNAKA

The requirements for the flatness of silicon wafers are becoming more stringent every year with the microfabrication of devices. In addition to that issue, the semiconductor chip manufacturing process for  $\phi$  450mm, the next generation wafer size, is studied. New equipment using a heterodyne interferometric method was developed to measure site flatness with an accuracy of sub-nanometer order for 300 or 450mm silicon wafers. This equipment based on the spiral scan method enables the measurement of global flatness and site flatness. It is also possible to measure SFQR and ESFQR with 0.5nm( $\sigma$ ) repeatability in an environment of less than 5 Gal of floor vibration. First, this paper gives the outline of a system and the experimental results for repeatability concerning global flatness and site flatness, which turned out to be GBIR : 0.68nm( $\sigma$ ), SFQR : 0.33nm( $\sigma$ ), and ESFQR : 0.39nm( $\sigma$ ), according to actual measurements. Next, referring to the results of the measurement of actual wafers, it explains how this new equipment is effective in the management of the process.

まえがき = シリコン半導体デバイス構造の微細化が進み、リソグラフィ工程ではプロセスマージンが非常に小さくなっている。この工程では、チャックされたウェーハ面内で一定領域ごとに焦点合わせが行われ、焦点面と光軸が垂直になるようにチルティングが行われる。そのため、この領域内でのウェーハ厚さの変動幅が光学系の焦点深度よりも大きければ、デフォーカス不良が生じる。この局所領域内での平坦（へいたん）度はサイトフラットネスと呼ばれ、デバイスの最少加工寸法と同程度の大きさが要求される。最少加工寸法は現段階で25nmに達し、5 nm/年 程度のペースで微細化されている。一部では十数nmの試作ラインの建設も予定されているなか、サイトフラットネスの検査装置にはサブナノメートルの精度が必要とされるようになった<sup>1)</sup>。

一般的に、サブナノメートルの精度をもつ形状測定装置では環境振動など様々な外乱の影響を受けやすいため、設置場所が限定される場合が多い。しかし、平坦度の検査が必要とされる工程や施設では、特殊な環境を用意することなく、高い精度で測定が可能な装置が望まれている。

また、ウェーハサイズに関して、現在主流は $\phi$ 300mmであるが、 $\phi$ 450mmウェーハサイズでの半導体製造プロセスの検討も行われている。

(株)コベルコ科研（以下、当社という）、および(株)神戸製鋼所は、高精度なサイトフラットネス検査への関心の高まりを受け、鏡面研磨後の300mmおよび450mmシリコンウェーハを対象とする耐振動性を強化したサブナノ



図1 LSW-3010FE (サブナノ精度サイトフラットネス計)<sup>2)</sup>  
Fig.1 LSW-3010FE (Site flatness measurement system with an accuracy of sub-nanometer order for silicon wafer)<sup>2)</sup>

精度サイトフラットネス計（以下、本装置という）を開発した（図1<sup>2)</sup>）。本稿では、まずサイトフラットネスの概略を説明し、つぎに本装置の概要、性能評価、および実測定について述べる。

### 1. 平坦度の指標

平坦度の指標にはグローバルフラットネスとサイトフラットネスがある（図2<sup>3)</sup>）。グローバルフラットネスの代表的なものとしてウェーハ全面の厚さむらを評価するGBIR (Global backside ideal range) がある。GBIRは厚さ分布の最大値と最小値の差と定義されている。一方、サイトフラットネスの代表的なものとしてSFQR (Site front least squares range) とESFQR (Edge site

\*1 (株)コベルコ科研 LEO事業本部 技術部 \*2 技術開発本部 生産システム研究所

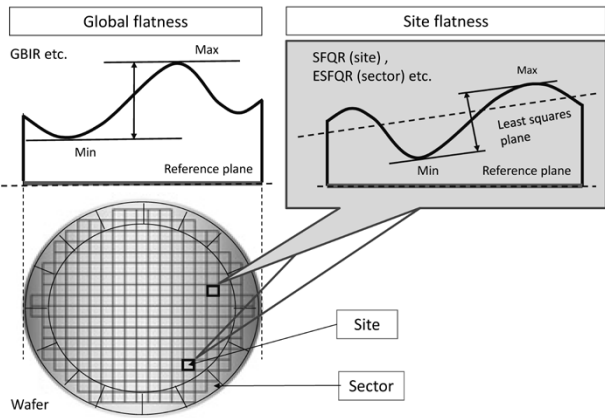


図2 GBIR, SFQR, ESFQRの定義<sup>3)</sup>  
Fig. 2 Definition of GBIR, SFQR, ESFQR<sup>3)</sup>

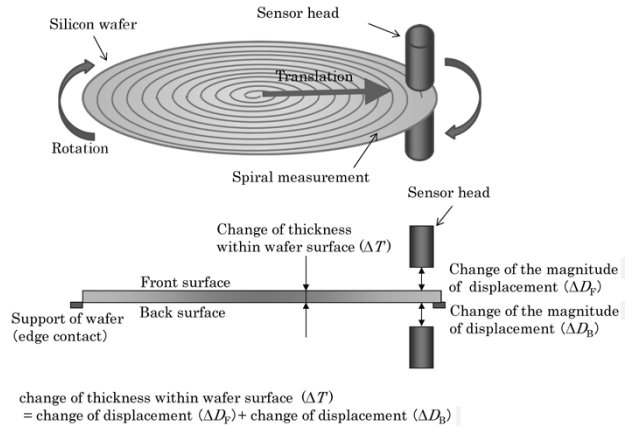


図3 測定部の概要  
Fig. 3 Schematic of measurement part

front least squares range) がある。SFQRはウェーハ全面をICチップ相当の格子状に区切り、それぞれの領域(サイト)内での厚さむらを示す。ESFQRはウェーハ面内に対して平坦度が悪化しやすいエッジ近傍を評価するもので、ウェーハエッジ近傍を円弧に沿った等間隔の帯状に区切り、それぞれの領域(セクタ)内の厚さむらを示す。SFQR、およびESFQRは、指定領域内での厚さの分布から最小二乗法により求められた基準面からの距離の最大値、最小値の差と定義される。

これらは主に、リソグラフィ工程での歩留りを左右する指標として設けられたもので、ウェーハ取引における仕様にも用いられる。そのため、検査精度を含め、ウェーハメーカー、およびデバイスメーカーで重要視されている。

## 2. 測定装置

### 2.1 測定の原理と特長

非接触での平坦度測定には、静電容量や光干渉、三角測量などの方式が用いられる。とくに静電容量方式は表面の粗いウェーハの測定も行うことができる。また、対物距離や測定レンジにもよるが数十～百nmの測定精度があるため平坦度検査装置に広く用いられてきた<sup>4)</sup>。数十nm以下の精度での測定を行う場合にはフィゾー干渉法や斜入射干渉法などの光干渉法が一般的に用いられる。これらの方法は測定物の表面状態に制限を受けることがあるが、高精度に測定を行えることに特長がある。本装置ではサブナノメートルの繰り返し再現性を得るため、ヘテロダイン干渉法を用い、光触針により形状を計測する方法を採用した。以下、測定原理を述べる。

鉛直方向に向かい合わせて配置した一対のセンサヘッド(光触針部)の空隙において、ウェーハを水平面内で回転、かつ半径方向に直線移動させることにより、らせん状にスキヤニングを行う。ウェーハは、回転及び直線移動が可能なステージ上に支持(エッジ部)されており、ウェーハの移動はこのステージの動作によって行われる(図3)。スキヤニングの際には、上側センサヘッドとウェーハ表面間の面内の変位変化(ΔD<sub>F</sub>; 基準は測定開始点)、および下側センサヘッドとウェーハ裏面間の変位変化(ΔD<sub>B</sub>)を測定する。両センサヘッド間の距離は一定であるため、両センサで測定した変位変化量を加算す

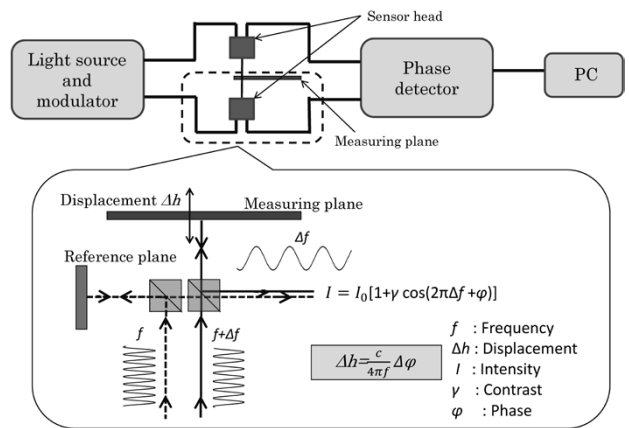


図4 測定方法  
Fig. 4 Measuring method

ることにより、面内における厚さの変化量(ΔT)を算出することができる。

ヘテロダイン干渉型変位計(以下、ヘテロダイン干渉計という)の原理を図4に示す。レーザ光源では、同一レーザ光から周波数 $f$ と $f + \Delta f$ に変調された二つのレーザ光束が作られ、光ファイバで個別にセンサヘッドに導かれる。二つの光束はそれぞれウェーハ上の測定面と、センサヘッドに内蔵された参照面に照射され、その反射光が光ファイバを通じて光検出器に導かれる。二つの反射光の合成強度は、変調周波数 $\Delta f$ のビート(うなり)で輝度変調され、式(1)で表される干渉信号 $I$ となる。

$$I = I_0 [1 + \gamma \cos(2\pi \Delta f t + \varphi)] \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $I_0$ : 2光波の強度の和、 $\gamma$ : コントラスト、 $\varphi$ : 2光波の位相、 $t$ : 時間

この干渉信号の位相 $\varphi$ は測定面と参照面の距離によって決まり、測定面の変位変化量と位相差の関係は式(2)で表される。

$$\Delta h = \frac{c}{4\pi f} \Delta \varphi \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\Delta h$ : 変位変化量、 $\Delta \varphi$ : 位相差、 $c$ : 光速  
位相差 $\Delta \varphi$ を検出し、式(2)の演算を行うことで測定面の変位変化量を得ることができる。ヘテロダイン干渉計は干渉光の位相変化を観測するため、測定値は原理的に光量変化による影響を受けないという特長をもつ<sup>5)</sup>。

本装置に搭載したヘテロダイン干渉計ではさらに、上

下のセンサヘッドのレーザ光源を同一とし、コモンパスを使用することで環境温度の変化によるドリフトを抑えた。また、光ファイバ自体に加わる圧力や振動により光の位相や偏光が乱れ、干渉信号に影響を与えないよう、ユニット間の光搬送には偏波保持光ファイバを採用した。センサヘッドおよびその保持部では、駆動系の振動や床の振動による測定誤差が極小となる構造をシミュレーション解析によって求め、結果を設計に反映した。加えて、音による測定値への影響を実験的に評価し、センサヘッドカバーの材質や形状を選択した。以上のように、温度変化、振動、音など、考え得るあらゆる外乱の影響を受けにくい工夫を随所に施した。

## 2.2 平坦度測定部の構成

測定部を対向配置して厚さを測定する装置では、両測定部の間隔の変化が測定値の誤差要因となる。そのため、駆動系から生じる振動や装置外部からの振動を抑えるとともに、ステージの重心移動による構造体の変形を低減する必要がある。図5に本装置の構成を示す。回転ステージにはエアベアリング式の中空モータ、直動ステージにはエアスライダ式のリニアモータを搭載し、ステージ動作中の振動を抑制した。測定系のベースおよびセンサ保持部に対しては、振動減衰性が高く熱膨張係数の小さいグラナイトを用いることにより、振動や熱膨張による構造の微小変形を抑えた。一般に、床からの振動を除去するには、空気ばねを利用した除振器を搭載することが多い。しかし、通常は数Hzに共振領域があり、ステージの重心移動に応じて姿勢が変化してしまう問題がある。そこで本装置では、振動、および姿勢変化を感知してフィードバック制御を行うことのできるアクティブ除振台を搭載し、低周波数帯域の共振と姿勢変化を抑えた。

調整誤差や温度変化によって生じる上下センサの位置ずれも厚さ測定値の誤差要因となり、機差や長期的な測定値の変動につながる。そこで、センサの位置を調整するため、水平方向2軸の直動ステージとそれを自動調整するアルゴリズムを開発した。この方法により、定期的な校正を行うことで測定誤差を抑えることができる。

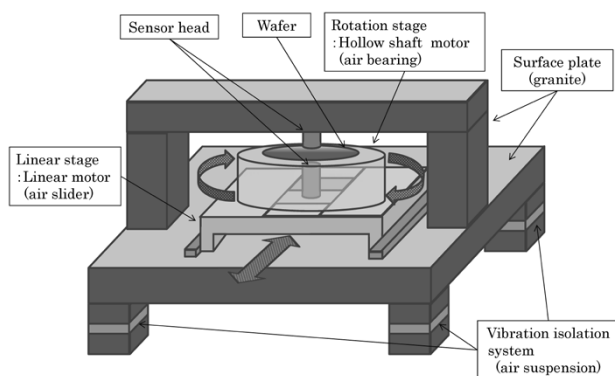


図5 装置構成  
Fig. 5 Measurement system composition

## 3. 装置性能の評価

### 3.1 繰り返し再現性による評価方法

本装置によって300mmウェーハのGBIR, SFQR, お

よびESFQRをそれぞれ10回測定し、繰り返し再現性の評価を行った。

そのときのGBIRの測定結果を図6に示す。標準偏差( $\sigma$ )は0.68nmとなった。ウェーハ全面の厚さむら649.2nm(平均値)に対し、1nm以下の再現性で測定できていることがわかる。また、各測定ごとの値の変動には単調増加などの特徴的な傾向はなく、ランダムなばらつきを示している。図7はSFQR測定値の標準偏差( $\sigma$ )とサイト個数の度数分布を示したものである。計算条件はサイトサイズ26×8mm, サイトオフセット(0,0), 全サイト数は336個である。全てのサイトの標準偏差( $\sigma$ )の平均値は0.33nmとなり、88.3%のサイトが0.5nm以下, 全サイトで1nm以下となった。同様に、図8にESFQR測定値の標準偏差( $\sigma$ )とサイトの個数の度数

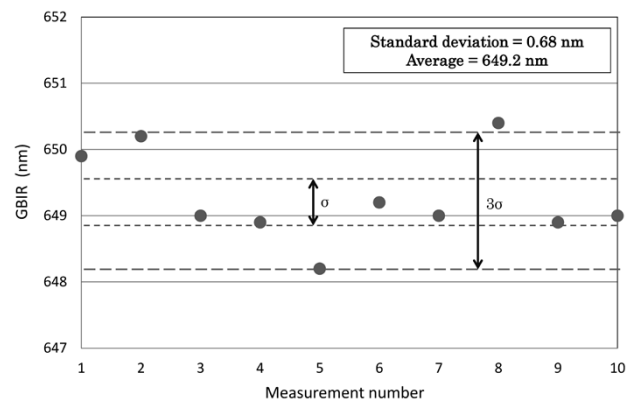


図6 GBIRの再現性  
Fig. 6 Repeatability of GBIR

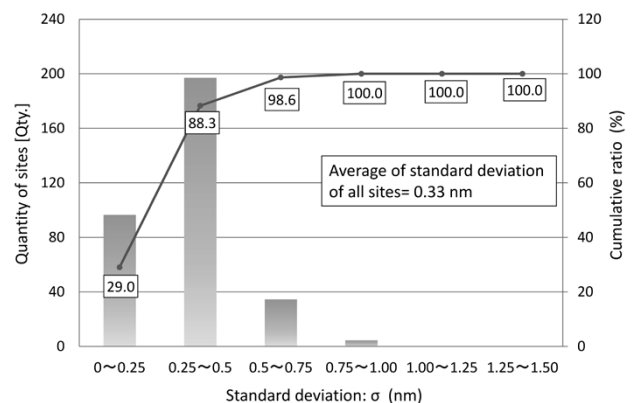


図7 SFQRの再現性  
Fig. 7 Repeatability of SFQR

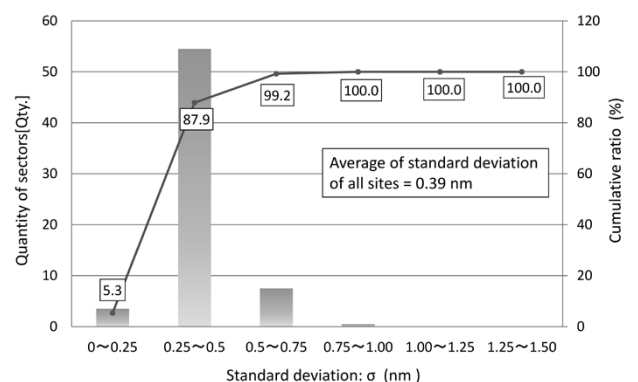


図8 ESFQRの再現性  
Fig. 8 Repeatability of ESFQR



分布を示す。計算条件はセクタ長さ30mm, セクタ角度5 deg, 全サイト数は72個である。全てのサイトの標準偏差 ( $\sigma$ ) の平均値は0.39nmとなり, 87.9%のサイトが0.5nm以下, 全サイトで1 nm以下となった。

SFQRとESFQRの標準偏差 ( $\sigma$ ) の分布を比較すると, SFQRの方が0.25nm ( $\sigma$ ) 以下を占める割合が大きいことがわかる。これは, サイトの方がセクタよりも7割ほど面積が小さく1サイトあたりの測定時間が短いため, 長周期成分の誤差が生じにくいと考えられる。また, SFQRおよびESFQRの再現性がGBIRよりも良いことも同様の要因が考えられる。

以上の結果より, グローバルフラットネスに加え, 面内およびエッジ近傍のサイトフラットネスを今回の目標であるサブナノメートルの精度で測定できることが確認できた。

### 3.2 実測定

実用的な2枚のウェーハ (Sample A, B) を対象に, 本装置で測定を行った。図9に厚さの2次元マップと1ライン (図中の矢印線部) の厚さ分布を示す。GBIRはSample Aが0.609 $\mu$ m, Sample Bが0.433 $\mu$ mとなった。一般に, ウェーハの平坦度は中心部よりもウェーハ外周近傍が劣ることが知られている<sup>6)</sup>。1ラインの厚さ分布では, そのエッジ近傍の急峻な変化を両サンプルでとらえられており, サブミクロンオーダーの厚さの分布を測定できていることがわかる。

図10はSFQRのサイトマップを示す。値の大きなサイトの色が濃くなるように20nmピッチの濃淡スケールで表現しており, 10nm以下のサイトのみを白色で表示した。ウェーハの中心部に着目すると, Sample Aでは大半が20nm以下のサイトで占められているが, Sample Bには20nmを超えるサイトも多くみられる。このため, 平均値はSample Aが26.9nm, Sample Bが30.5nmとSample Aが小さくなった。エッジ近傍では両サンプルとも中心部に比べて大きな値を示すサイトが多く, 100nm近くを示している。SFQR MaxではSample Aが135.5nm, Sample Bが107.9nmとなりSample Aが30nm程度大きいことがわかる。エッジ近傍の詳細を調べるため, 同ウェーハのESFQRの測定を行った結果を図11に示す。ESFQRの測定値を縦軸, セクタの円周方向に対しての角度を横軸として表示した。ESFQRの平均値はSample Aが335.4nm, Sample Bが466.2nmとなり, Sample Bに比べSample Aの方が全体的に小さいことがわかる。この評価により, Sample Aの方がエッジ近傍の厚さむらは小さく, 周方向に対しての厚さむらは両ウェーハとも同様であることがわかった。

以上のように, 本装置は実用的なサンプルにおいてミクロンからナノメートルレベルの厚さむらを明瞭にとらえることができ, 複数の評価手法を用いることで平坦度の特徴を明らかにすることができた。

### 3.3 考察

実測定によりGBIRが0.68nm ( $\sigma$ ), SFQRが0.33nm ( $\sigma$ ), ESFQRが0.39nm ( $\sigma$ ) の繰り返し再現性結果を得た (3.1節) ことにより, 本装置がウェーハの厚さをサ

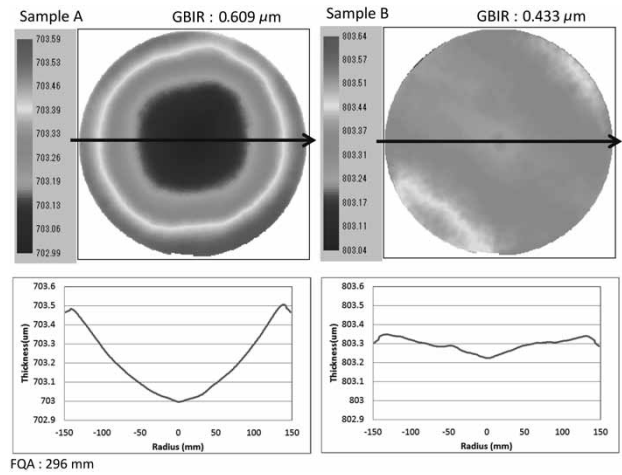


図9 Sample A, Bの2次元マップ  
Fig. 9 2D map of sample A, B

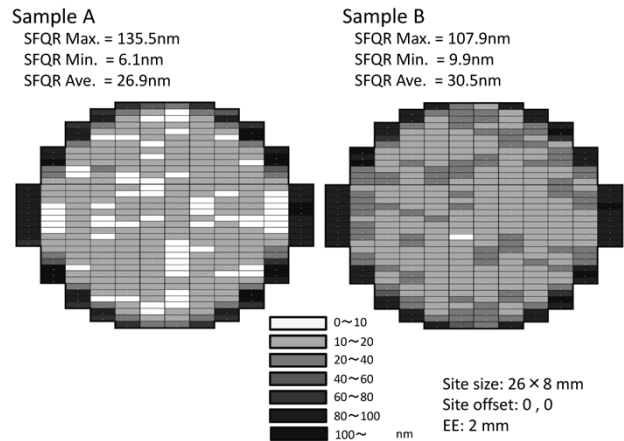


図10 Sample A, BのSFQRサイトマップ  
Fig.10 SFQR site map of sample A, B

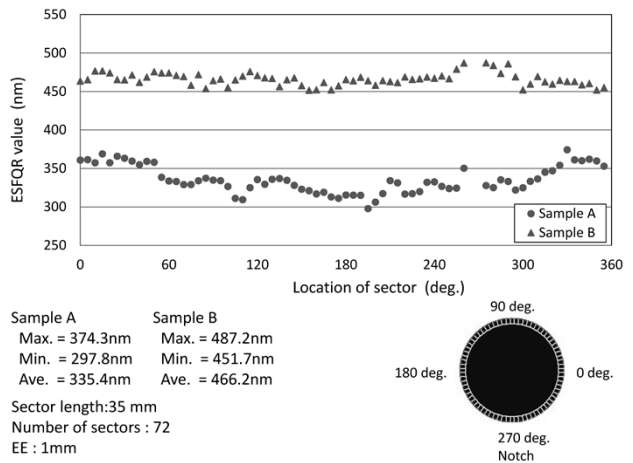


図11 Sample A, BのESFQRとセクタ角度の関係  
Fig.11 Relationship between ESFQR and sector angle of sample A and B

ブナノメートルの精度で測定できることを実証できた。本装置はサイトフラットネス検査装置に要求される測定精度を満たすことから, 今後, 量産されることが予測される十数nmデザインルール用のウェーハも評価することができる。

本装置を用いることによってウェーハ研磨条件の最適化を行うことができ, 例えば, エッチングや研削, 研磨工程で発生するウェーハエッジ部のだれに関しては,

表 1 開発した装置の標準仕様

Table 1 Standard specification of developed measurement system

Wafer / Size	Silicon monocrystalline wafer (polish) / 300 mm
Wafer thickness	650~850 $\mu\text{m}$
Cassette / Transportation	FOSB, Open, FOUP etc. / Edge handling
Measurement method	Laser interferometer (flatness, bow/warp) Laser displacement meter (center thickness)
Scan mode	Spiral scan : $R$ direction ; 0.5 , 1 , 2 mm pitch $\theta$ direction : $\leq 1$ mm pitch
Measurement item	Global flatness : GBIR, GFLD, GF3D, GFLR, GF3R Site flatness : site ; SBIR, SFLR, SF3R, SFQR, SBID, SFLD, SF3D, SFQD sector ; ESFQR, ESFQD Shape : bow/warp Thickness : center thickness etc.
Repeatability( $\sigma$ )	GBIR : $\leq 3$ nm (typ. : 1 nm) SFQR : $\leq 1$ nm (typ. : 0.5 nm) ESFQR : $\leq 1.3$ nm (typ. : 0.5 nm) bow/warp : 1.2+ (warp/100) $\mu\text{m}$
Tact time	$\leq 60$ s/wafer
Size of device / Weight	1,970 $\times$ 2,990 $\times$ 2,200 mm (W,D,H) / 4,500 kg (approx.)
Temperature	23°C $\pm$ 1°C
Environment	Vibration of floor : $\leq 5$ Gal, Clean room : Class1000 or More
Application	Edge rolloff, Resistance, PN judgment, ID reading, Diameter FFU, Load port, OHT, SECS/GEM etc.

Sample A, Bで示したように (3.2節), 2次元マップやラインプロファイルを利用した視覚的な表示に加え, ESFQRの測定による定量的な評価を利用することができる。また, ウェーハ研磨装置の異常による平坦度劣化の検出を行うなど, 各生産プロセスへのフィードバックに利用することが可能であると考えられる。

本装置の仕様を表 1 に示す。本装置は外部からの振動の影響を受けにくく, 床振動 5 Gal の環境下においても, 今回得た繰り返し再現性結果と同等の結果が得られることを確認している。空間分解能は, SFQR の場合に 1 mm 以下, ESFQR の場合に 0.5mm 以下であり, 測定時間はエッジハンドリングによるウェーハの搬送時間などを含め, 60秒/枚以下 (SFQR測定時) である。

**むすび** = シリコンウェーハの研磨後検査工程向けとしてサブナノ精度サイトフラットネス計の開発を行った。本装置はヘテロダイン干渉計と, 高い防振性能をもつステージとベース, および高機能な除振器を搭載した構成と

なっていることを示した。グローバルフラットネス, およびサイトフラットネスの測定再現性 ( $\sigma$ ) は, 実測定において GBIR が 0.68nm, SFQR が 0.33nm, ESFQR が 0.39nm の結果を得た。また, SFQR や ESFQR などの平坦度評価指標を用いて 2 枚のサンプルを比較し, それぞれの平坦度の特徴を確認することができた。これにより, 本装置がプロセスの管理に有効であることを示した。

耐振動性を強化した本装置が, 多くのウェーハ製造工程や研究用途によって使用され, より高品質なウェーハの製造に貢献できることを期待したい。

#### 参 考 文 献

- 1) ITRS International Technology Roadmap for Semiconductors 2013 Edition.
- 2) 田原和彦, こべるにくす. 2014, No.42, p.18.
- 3) 田原和彦, こべるにくす. 2014, No.42, p.16.
- 4) 松岡英毅ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.2, p.7.
- 5) 特許登録番号 5199141
- 6) 森本 勉ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.1, p.45.