

(技術資料)

シリコンウェーハ用高精度ナノトポグラフィ測定技術の開発

原野敬久*¹・甘中将人*¹・田原和彦*¹(工学博士)・松岡英毅*²・篠田達昭*¹

Development of High-precision Nanotopography Measurement Technology for Silicon Wafers

Norihisa HARANO・Masato KANNAKA・Dr. Kazuhiko TAHARA・Hideki MATSUOKA・Tatsuaki SHINODA

要旨

半導体シリコンウェーハ製造において、CMP (Chemical Mechanical Polishing) 工程で加工される STI (Shallow Trench Isolation) の品質はナノトポグラフィの影響を強く受けることが知られており、半導体素子の微細化に伴い高精度のナノトポグラフィ測定装置が求められるようになってきている。近年は直径300 mmのシリコンウェーハ使用が主流であり、大型シリコンウェーハは無重力条件下で30 μm程度の反り(warp)形状を持つ。そのため、光の波長を使った形状測定手法であるフィゾー干渉計によりウェーハ全体で干渉縞を写すと、縞模様が密となり過ぎて測定ができなくなる恐れがある。そこで、測定範囲を分割して画像取得することにより、通常発生しうる反りに対応させ、300 mmシリコンウェーハの形状測定が可能なナノトポグラフィ測定システムを開発した。

Abstract

In semiconductor manufacturing, it is known that the nanotopography of silicon wafers has a great influence on the quality of shallow trench isolation (STI), which is processed by the chemical mechanical polishing (CMP) process. With the miniaturization of semiconductor elements, a high-precision nanotopography measurement system has become necessary. In recent years, the production of wafers with a diameter of 300 mm has become mainstream and, in general, each 300 mm wafer has a warp of approximately 30 μm under conditions of weightlessness. The Fizeau interferometer is a shape measurement apparatus that uses the wavelength of light, and if interference fringes are shown for the entire wafer, the striped pattern may become too dense due to the warp, making measurement difficult. Against this backdrop, a nanotopography measurement system has been developed to measure the shape of each 300 mm wafer by dividing its measuring range and capturing the image of each sector to deal with the warp that usually occurs.

検索用キーワード

ナノトポグラフィ, 半導体, シリコンウェーハ, CMP, STI, 視野分割

まえがき = 微細化が進む半導体デバイス製造において、各工程の歩留りを改善させて生産性向上を図るために、半導体ウェーハに対して表面凹凸の低減が望まれている。ウェーハの厚み分布を反映する平坦度に加え、近年ではナノトポグラフィと呼ばれる指標が注目されている。

ナノトポグラフィは半導体製造装置に関する国際規格/スタンダードである SEMI M43-1109¹⁾により定義されており、ウェーハの FQA (Fixed Quality Area: デバイス製造に使用可能な領域) 内で、表面形状から半導体ウェーハのたわみや反り等の比較的長周期的な形状を除いた約0.2 mm~20 mmの周期成分を持つ表面凹凸(非平面偏差)の度合いを示す指標である。

CMP (Chemical Mechanical Polishing) 工程により加工される STI (Shallow Trench Isolation) では、ナノトポグラフィがその品質に大きな影響を与えることが知られている²⁾。そのため、半導体ウェーハの最終出荷検査項目にナノトポグラフィの評価値が加えられており、半導体素子の微細化に伴い表面凹凸に対する高度な要求に対応できるべく、より高精度なナノトポグラフィ測定装置が求められるようになってきている。

本稿では、シリコンウェーハの研磨後検査工程向けに当社が開発したサブナノメートル精度ナノトポグラフィ測定装置について紹介する。

1. ナノトポグラフィ測定装置の測定原理と特徴

ナノトポグラフィは、一般的には干渉計方式³⁾、静電容量センサ方式⁴⁾などにより測定される。当社では、測定手法として図1に示すフィゾー干渉計方式を採用している。図1の光学系では、レーザー光がコリメータレンズにより平行光として参照平面に照射され、参照平面で反射する光(参照光)と透過する光に分割される。透過した光はウェーハ面で反射するため、参照光と再び重なった時に生じる干渉縞を解析してウェーハの形状を算出する。

干渉縞を解析して変位を算出する方法には、図2に示す位相シフト法⁵⁾とワンショット法⁵⁾の二つの解析法がある。位相シフト法は Position 1 にある測定位置で干渉計画像を撮影した後、ピエゾ機構等を用いて参照平面と測定対象面の相対距離をサブミクロンオーダーで移動させて再度撮影を行う。これを任意回数(N回)繰り返し、得られたN枚の干渉画像から位相画像を作成

*¹ (株)コベルコ科研 LEO事業本部 技術部 *² (株)コベルコ科研 LEO事業本部 技術部 (現 (株)コベルコ科研 LEO事業本部 製造部)

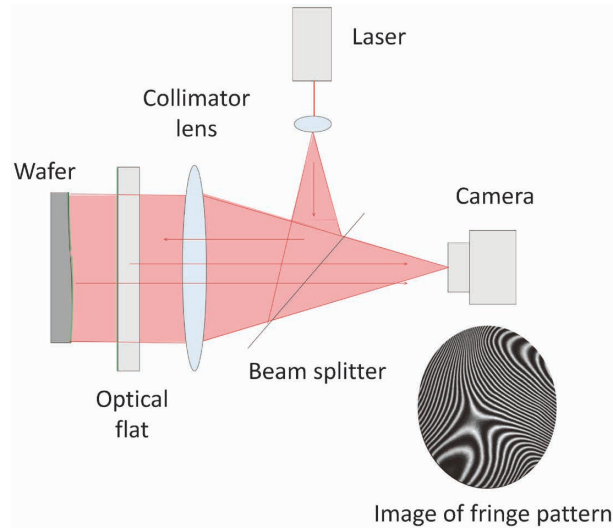


図1 フィゾー干渉計の基本構造
Fig.1 Fundamental structure of Fizeau interferometer

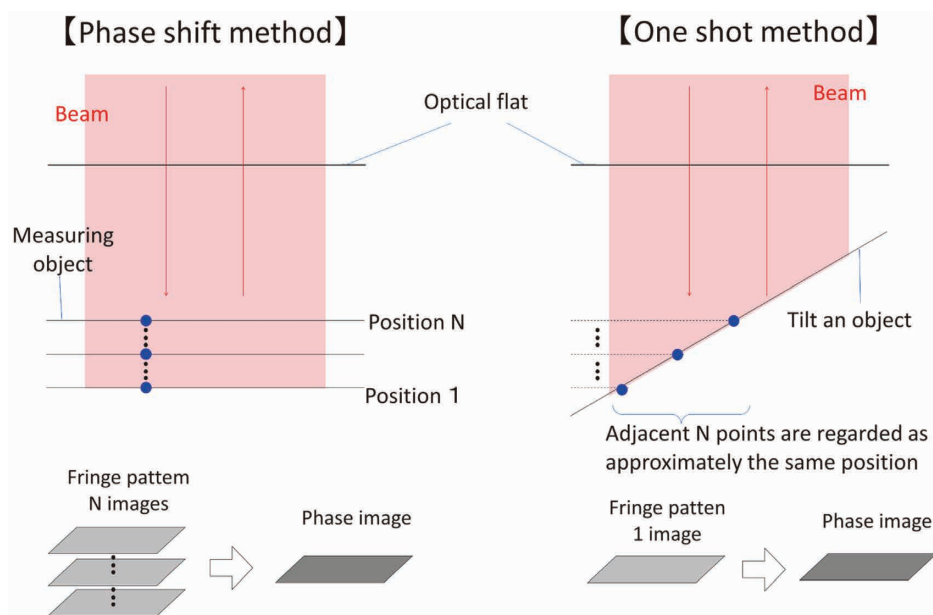


図2 位相シフト法とワンショット法の概要
Fig.2 Outline of analysis methods

する。位相シフト法では、撮影した画像の画素ごとに変位が求まるが、複数の干渉画像を撮像するため参照面と測定対象面の距離が振動の影響で変化して誤差要因となることが懸念される。これに対して、ワンショット法では測定対象物を傾けることにより、密で一樣な縞画像を作り、局所的な縞画像の面的な位置ずれを元に位相画像を作成する。このため、1枚の画像から変位を解析することができるが、複数の画素を使用して位置ずれを算出するため、同じ撮像系を使う場合には空間分解能が位相シフト法よりも低くなる。しかし、昨今のカメラ性能の向上により高画素での撮影が可能となり、ワンショット法の低い空間分解能は問題になっていない。当社では、対象間距離を動かすことなく1枚の画像から解析できるメリットを重視し、ワンショット法を採用している。

2. 当社測定システムの狙い

半導体ウェーハは、集積回路のコストダウンを図るために1枚のシリコンウェーハからより多くのチップを生

産するために、広いFQAを確保することができるよう、大口径化が進んでいる。近年では、直径300mmのシリコンウェーハによる半導体デバイス製造が主流となっている。

一般的にシリコンウェーハは無重力条件下で30 μ m程度の反り(warp)形状を持つ。フィゾー干渉計は光の波長を使用した形状測定手法であるため、シリコンウェーハ全体で干渉縞を写すと縞模様が密となり過ぎて、縞間隔が空間分解能以下となることで測定できなくなる恐れがある。そこで、当社では測定範囲を分割して画像取得することにより、通常でも発生してしまう反りに対応できるようにしている。

3. 当社測定システムの概要

当社が開発したナノトポグラフィ測定システムの概要を図3に示す。本システムは、測定範囲を分割して測定するために、主に「フィゾー干渉計からなるナノトポグラフィ測定センサ部」と「センサ部を走査する2軸ス

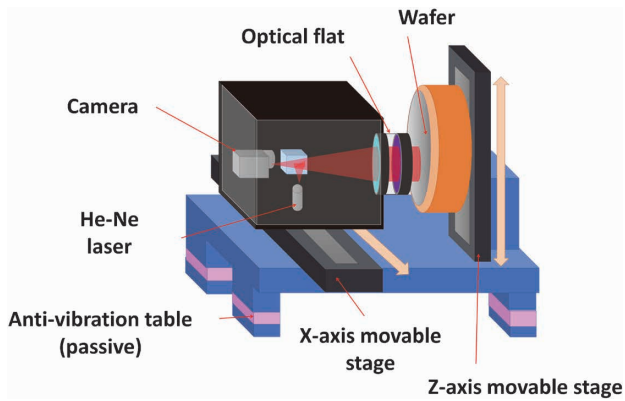


図3 ナノトポグラフィ測定システムの構成図

Fig.3 Configuration diagram of nanotopography measurement system

ステージ (X軸, Z軸) から構成されている。X, Z軸ステージによりセンサ部を任意の測定座標に移動させ、ウェーハ全面を分割して干渉縞画像を取得し、位相解析により形状画像にする。取得された各視野の形状画像は、全て隣接する形状画像と領域が一部オーバーラップしており、当社独自の画像再構成システムにより画像間の境界をつなぎ合わせて1枚のウェーハ全面画像として出力する。以上の測定システムにより、直径300mmシリコンウェーハの表面形状測定を可能にしている。

4. 装置性能の評価

4.1 測定形状の確からしさの評価

当社が開発した装置による測定形状の確からしさを評価した。

上述した測定システムを用いて、1枚のウェーハを面内方向の回転角度を変えて3回測定した際のナノトポグラフィマップを図4に示す。図中の三角印はウェーハのノッチ位置を示しており、矢印は図5および図6に示す形状の位置と方向を示している。図4(a)を基準角度として、時計回りに90°および180°回転させて測定した結果を図4(b), 図4(c)に示す。設置角度の回転とともにナノトポグラフィマップが同じ形を保ったまま回転していることが定性的にわかる。各ナノトポグラフィマップに対して、ウェーハの同じ位置、方向における断面プロフィールを図5に示す。また、三つの角度で測定した平均プロフィールと各プロフィールとの差を図6に示す。図6より、各プロフィールは0.6nm以下の差で一致していることがわかる。完全に同じ座標で断面プロフィールラインを得ることは難しく、この0.6nmにはわずかな断面プロフィールラインのずれに起因する誤差が含まれるものの、ウェーハの設置時のステージや光

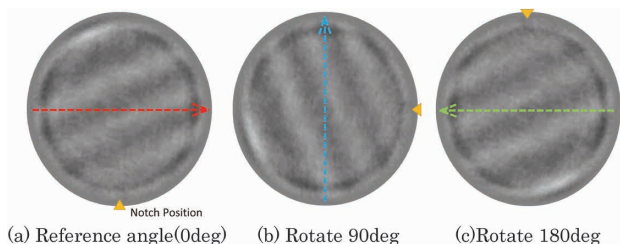


図4 回転角度の違いによるウェーハ形状の比較

Fig.4 Comparison of wafer shapes due to different rotation angles

学系との相対的な位置関係の影響により測定精度が低下することはなく、0.6nm以下の精度でナノトポグラフィマップが得られることが確認できた。

4.2 繰り返し再現性の評価

当社が開発した測定システムの繰り返し再現性を評価するために、SEMIの再現性試験方法に従い、1回の測定ごとに測定対象ウェーハを測定装置から取り出し搬送

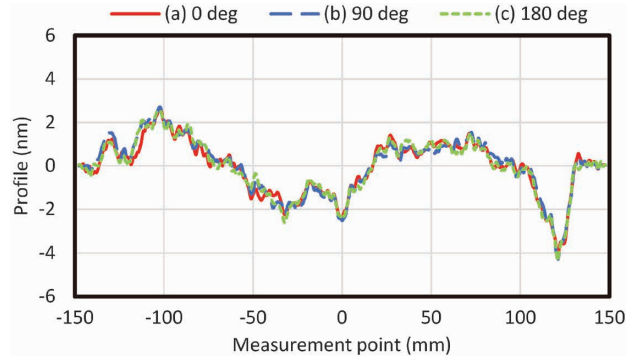


図5 3つの角度で測定したウェーハの断面プロフィール

Fig.5 Cross-sectional profiles of wafer measured at three angles

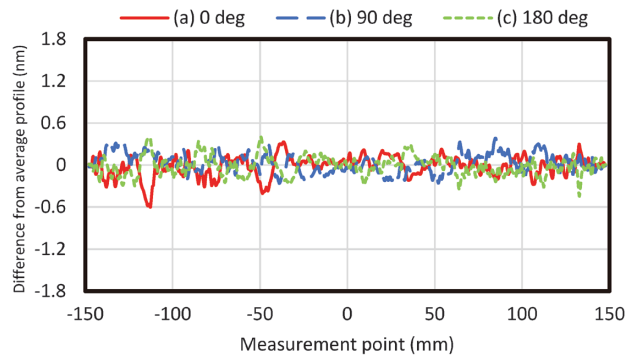


図6 3つの角度で測定したウェーハの各プロフィールと平均プロフィールとの差異

Fig.6 Difference between each profile at three angles and average profile

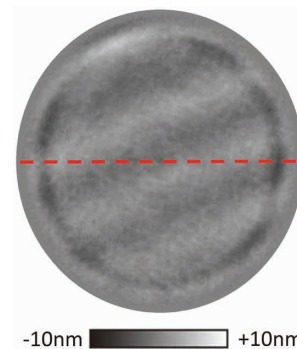


図7 ナノトポグラフィマップの一例

Fig.7 Example of nanotopography map

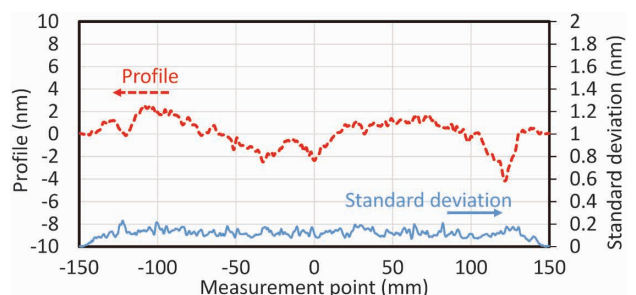


図8 ナノトポグラフィのラインプロフィール

Fig.8 Nanotopography line profiles

して再度測定する条件にて30回の測定（6回測定/日を5日間⁶⁾を行った。ナノトポグラフィマップ例を図7、1回分の測定ラインプロファイル（破線）、30回測定の標準偏差を算出した結果（実線）を図8に示す。

プロフィール上の全測定点の平均標準偏差は約0.12 nmであり、最大でも0.2 nm程度の再現性で測定が可能であることが確認できた。

5. 実測定評価

5.1 実ウェーハの二次元マップに見られる特徴

デバイス製造に用いられる市販のシリコンウェーハを対象に、当社が開発した測定システムによりナノトポグラフィマップを測定した結果を図9に示す。図9(a)に示すナノトポグラフィマップでは、測定対象であるシリコンウェーハの表面に3点の特徴的な形状が確認できる。これら3点の特徴的な形状は図9(b)中に位置A、B、Cで示している。この詳細を以下に記載する。

位置Aでは、比較的長周期なスジ状の凹凸形状が一定角度方向に見られる。Yamadaらは、インゴットからウェーハをスライスする工程において、スライス時の加工温度の変化によりインゴット加工方向（一軸方向）に凹凸の反りが発生することを報告している⁷⁾。このことから、位置Aのような一軸方向のナノトポグラフィ模様はスライス工程が原因と推定される。

位置Bでは、ウェーハ中央部の凹みおよびこれを中心とした同心円状の模様が見られる。磯部は、研磨工程において、ホイールセグメントの切れ刃（砥粒）による軌道痕がウェーハの中心近傍に発生し、ウェーハ中心部に凹み（へそ）が発生すると報告している⁸⁾。位置Bの模様はその現象をとらえていると推定される。

位置Cでは、ウェーハ周辺部におけるリング状の凹凸が見られる。ナノトポグラフィを算出する際にハイパスフィルタをかけるためエッジからおおむね15 mmより外側はフィルタ条件が異なる点に注意を要するが、ここで述べるリング状の凹凸はエッジから約30 mm内側にあることから、ハイパスフィルタ条件の影響ではない。福田らは、研磨加工工程において、研磨時の面圧変化がウェーハ先端部の形状に影響を及ぼすと報告しており⁹⁾、その現象をとらえていると推定される。

以上のように、ナノトポグラフィマップは、ウェーハの表面形状内にある微細な凹凸成分として現れるウェー

ハ製造工程で生じる特徴的な形状をとらえていることがわかる。

5.2 THAによるナノトポグラフィ評価

つぎに、2枚の市販シリコンウェーハ（Sample A, B）を対象にナノトポグラフィ測定を行った結果を図10に示す。Sample AとSample Bを比較すると、Sample Bでは表面が比較的滑らかなのに対して、Sample Aでは細かな凹凸パターンがウェーハ面全体にわたって分布している様子が見られる。

図10において、破線部で示す位置での断面プロフィールを図11に示す。いずれのサンプルでも同様に長周期の変動が見られるが、2~10 mmの比較的短周期の波長成分については、Sample Bでは±0.5 nm以下の小さな凹凸が見られるのに対して、Sample Aでは±1.0 nmの比較的大きな凹凸が見られる（特徴的な箇所を図11上に矢印で示している）。

周期性の違いをより明確に分析するために、THA（Threshold Height Analysis）によるウェーハ特性の算出を行った。THAとは、局所領域の凹凸を定量化する手法の一つであり、THAの算出方法¹⁾と算出時のパラメータ⁶⁾はSEMIで指定されている。THAによる算出方法を以下に示す。図12に示すように、測定したナノトポグラフィマップに対して任意寸法の分析エリア（正方形または円形）の範囲内の最大値（Peak）と最小値（Valley）を求める。求めた最大値と最小値の差を取ることで高さ変化（P-V値）を算出し、その値を分析エリアの中心点に割り当てる。この計算をウェーハのFQA内にある全ての分析エリアに対して実施する。P-Vフィルタリングしたマップデータ（P-Vマップ）から、横軸をP-V値、縦軸をそのP-V値以上となる分析エリア

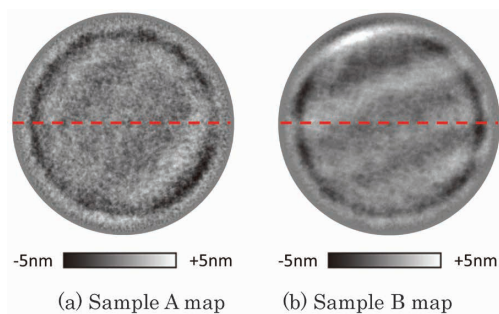


図10 ナノトポグラフィマップの比較

Fig.10 Comparison of nanotopography maps

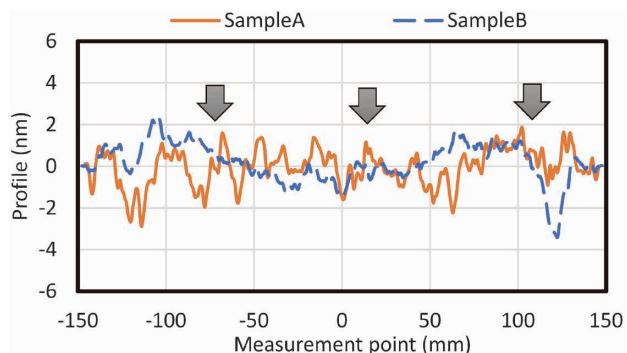


図11 断面プロフィールの比較

Fig.11 Comparison of cross-sectional profiles (Sample A : orange, Sample B : blue)

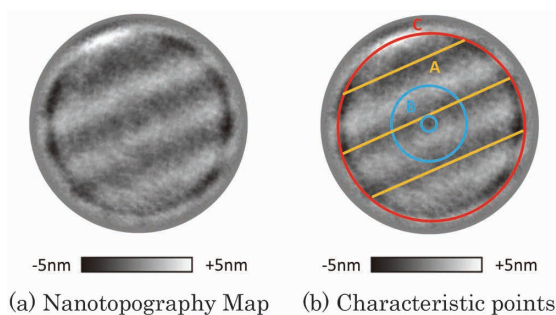


図9 測定例とナノトポグラフィマップ上の特徴箇所

Fig.9 Measurement example and characteristic points on nanotopography map

の面積比率とした累積度数グラフの一例を図13に示す。このグラフに対して、任意に設定した面積割合（指定値 [%]）とグラフの交点のP-V値 [nm] がTHAの結果として求められる。SEMI M49-0918では、P-Vフィルタのウィンドウサイズを2 mmと10 mmの2種類、累積度数の上位0.05 %を指定値としたP-V値をTHA値と規定している。このような指標を用いることにより、ウェーハの局所領域でどの程度の凹凸があるかを評価することができる。

Sample AとSample BのTHA値の算出に使用したマ

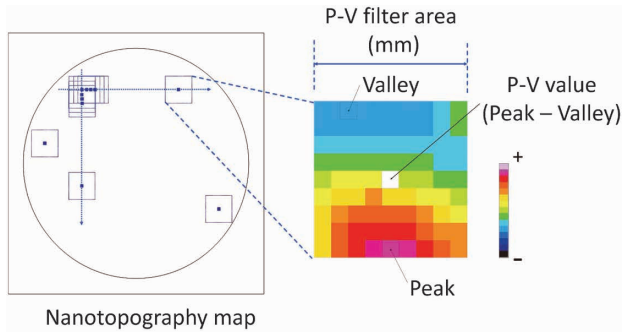


図12 P-Vフィルタリング
Fig.12 P-V filtering

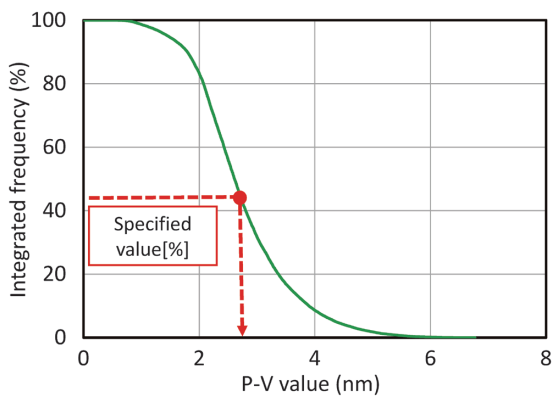


図13 P-Vフィルタリングマップの累積分布評価
Fig.13 Cumulative distribution evaluation of P-V filtering map

ップ全体における累積度数分布を図14に示す。グラフの横軸はP-V値 [nm] を示しており、縦軸はFQA領域内におけるウェーハ全体測定点数を100 %とした際の横軸で指定した累積度数の割合 [%] をそれぞれ示している。P-Vフィルタのウィンドウサイズによらず、Sample AのラインはSample Bよりも右にシフトしていることから、Sample Aの凹凸の方が大きいとした前述の違いがP-V値の度数分布の差に表れたものと考えられる。

また、累積度数分布において、P-V値のとくに大きな領域を拡大したグラフを図14の下部に示す。累積度数が上位0.05 %に当たるP-V値（THA値）に着目すると、2 mm角のウィンドウによるP-Vフィルタにおいては、Sample Aで3.18 nm、Sample Bで2.33 nmとなり、20%程度の差が見られる。いっぽう、10 mm角のウィンドウによるP-Vフィルタにおいては、Sample Aで7.90 nm、Sample Bで7.85 nmとなり、その差は1%以下とわずかである。この結果では、短周期成分に注目した場合、Sample Bの方がSample Aよりもナノトポグラフィに優れるウェーハといえる。

一般に、ナノトポグラフィは2 mmから20 mmまでの周期成分で算出されるが、この事例のようにTHA値のウィンドウサイズに着目することにより、デバイス製造にインパクトを与える周期成分に応じた評価が可能になる。

5.3 考察

ナノトポグラフィマップに見られる特徴から、図9に示したウェーハでは、凹凸が大きい領域が広範囲である位置Cの特徴的形状が最もTHA値に反映されていると考えられる。位置Aの特徴的形状については、凹凸の程度は大きいものの長周期性からTHA値に与える影響は小さい。位置Bの特徴的形状についても、比較的短周期であるものの凹凸が小さいことから、THA値に与える影響は小さい。また、5.1節で述べたように、ナノトポグラフィマップを観察することにより、ウェーハ加工

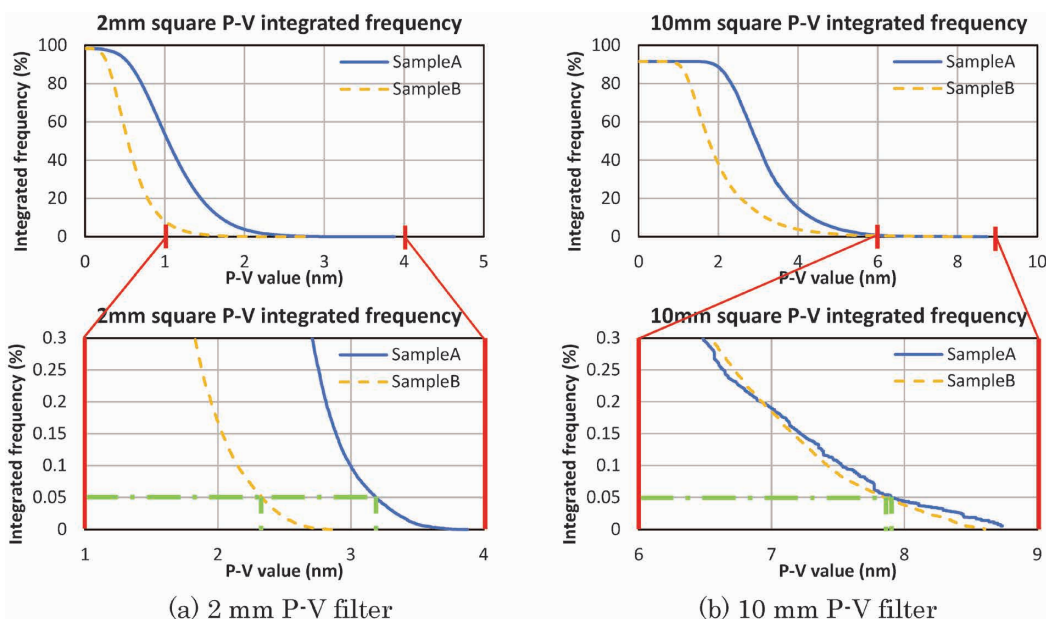


図14 サンプルウェーハのTHA評価
Fig.14 THA evaluation of sample wafers

プロセスが推定できる。さらに、THAのウィンドウサイズに注目することにより、ナノトポグラフィの周期性の傾向も把握することができる。

当社が開発したナノトポグラフィ測定システムは、THAによる定量的な評価値とともにナノトポグラフィマップの出力機能を備えており、局所的な欠陥領域とともにTHAには表れにくい形状因子が推定できる仕様になっている。これらの機能を用いることにより、シリコンウェーハの生産設備におけるウェーハの研磨条件の最適化に貢献できると考えられる。

むすび = 研磨後のシリコンウェーハの形状検査用に開発したサブナノメートル精度ナノトポグラフィ測定装置について、その性能を紹介した。本装置は「小型のフィゾー干渉計」、「ウェーハを垂直に保持するステージおよび任意の測定座標に移動するX,Zステージ」、「1枚のウェーハ全面画像を出力する画像再構成システム」により構成されている。ナノトポグラフィの測定再現性については、30回の断面プロファイル測定の実験結果の平均標準偏差で0.12 nmの結果が得られている。本装置で測定したナノトポグラフィマップを分析することにより、ウェーハの特徴的な形状が確認でき、ウェーハプロセスとこのプロセスで生じる形状との関係を推定することができる。ま

た、2枚のウェーハサンプルを比較し、局所的な欠陥領域に注目した指標から、ウェーハ形状の特徴の差を確認することができる。これらの結果から、本装置はウェーハプロセスの工程の変化をとらえる装置として有効に機能すると考えられる。

シリコンウェーハの表面性状に関しては、今後さらに厳しい精度が求められる。本装置が多くのウェーハ製造工程や研究用途で使用され、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) SEMI M43-1109. Guide for Reporting Wafer Nanotopography.
- 2) 辻村 学ほか. 精密工学会誌. 2001, Vol.67, No.8, p.1289-1293.
- 3) (株)神戸製鋼所. 甘中将人ほか. 表面形状測定装置および該方法. 特許第6618432号. 2019-12-11.
- 4) 信越半導体(株). 加藤忠弘. 半導体ウェーハの測定方法, その製造工程の管理方法, 及び半導体ウェーハの製造方法. 特許第4420023号. 2010-02-24.
- 5) 加藤純一. 精密工学会誌. 1998, Vol. 64, No.9, p.1289-1293.
- 6) SEMI M49-0918. Guide for Specifying Geometry Measurement Systems for Silicon Wafers for the 130 nm to 16 nm Technology Generations.
- 7) T. Yamada et al. Theoretical and Applied Mechanics Japan. 2002, Vol.51, p.251-258.
- 8) 磯部 章. 精密工学会誌. 2007, Vol.73, No7, p.751-755.
- 9) 福田 明ほか. エバラ時報. 2006, No.213, p.9-14.