

A 半導体ウエハ向け ナノポグラフィ測定システムの開発

半導体素子の微細化、高性能化にともない、その主要部材であるシリコンウエハには極めて高精度な形状制御が求められている。最先端の素子は既に5nmプロセスでの量産が進められており、さらに2nmまでの微細化も実証されている。このような微細素子に対応すべく、ウエハ表面の平坦度に対し非常に厳しい仕様が定められている。さらにその平坦度の制御を支える計測技術に対しては、サブナノメートルレベルの計測精度が必要とされている。

当社はウエハ製造工程における平坦度計測のニーズに対し、独自の計測手法を開発し、2014年よりサイトフラットネス計として販売してきた。ヘテロダイン干渉法で光触針により形状を計測する方法を採用し、サブナノメートルの繰り返し再現性を実現した¹⁾。シリコンウエハ製造の研磨工程における計測用途で使用されており、その品質管理に欠かせない計測装置となっている。

他方、ウエハ製造の最終工程においては、その表面粗さの評価・管理も重要な課題となっている。当社はそのようなお客さまのニーズを踏まえ、新たにナノポグラフィ測定装置を開発した。本稿ではナノポグラフィの測定原理を述べるとともに、実用性を備えた当社独自システムの構成と、測定精度の評価結果、すでに生産しているサブナノ精度サイトフラットネスに本システムを組み合わせた当社の新たなラインナップであるLNSW-3020FEについても紹介する。



LEO事業本部
製造部
原野 敬久

A-1 ナノポグラフィについて

半導体デバイス製造における各工程の歩留まり改善による生産性の向上のためには、半導体ウエハの表面特性を高精度に測定する形状測定装置が望まれている。特に、近年ではナノポグラフィと呼ばれる凹凸形状が注目されている。

ナノポグラフィはSEMI M43-0301により定義されており、ウエハの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エハの撓みや反り等の比較的長周期な形状を除いた約0.2mm～20mmの領域内の表面凹凸(非平面偏差)を示す。

フォトリソグラフィ工程ではプロセスマージンに影響する形状を、ウエハ裏面を基準平面としたサイトフラットネスにて評価しているのに対し、CMP(Chemical Mechanical Polishing)工程では一般的に裏面はエアバック等で支持されて裏面凹凸は吸収され、表面基準で加工される。CMP工程により加工されるSTI(Shallow Trench Isolation)ではナノ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、半導体ウエハの最終出荷検査項目ではサイトフラットネスとともにナノポグラフィがもちいられており、半導体素子の微細化にともないより高精度なナノポグラフィ測定装置が求められている。

A-2 当社測定システムのコンセプト

半導体ウエハは、集積回路のコストダウンを図るために1枚のウエハからより多くのチップを生産すべく、広いFQAを確保することができる大口径化が進んでおり、近年では直径300mmのウエハによる製造が主流となっている。

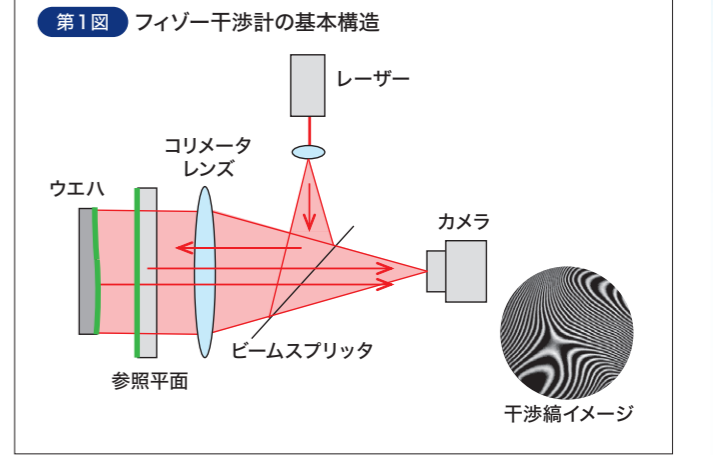
このような大口径の被測定物に対し、1つの測定系でウエハ全面を測定しようとする、光学系における直径や光路長等のサイズが大きくなり支持構造を含めて装置が大型化してしまう。その結果、光学測定系の剛性確保が困難となり床振動等の設置環境における外乱の影響によって性能が悪化するという問題がある。

上記の問題を踏まえ、当社では小型かつ高精度な表面形状測定装置の実現のために、測定範囲を分割して画像取得することで大口径ウエハの形状測定が可能であるナノポグラフィ測定システムを開発した。

A-3 測定原理と特徴

当社では、ナノポグラフィの測定手法として第1図に示すフィゾー干渉計を採用した。その光学系では、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。透過した光はウエハ面で反射し、参照光と再び重なった時に生じる干渉縞から位相解析を行いウエハの形状を算出する。

フィゾー干渉計をもちいた解析手法としては第2図に示す位相シフト法とワンショット法が挙げられるが、当社では以下の理由によりワンショット法を採用した。位相シフト法では測定対象面と参照面の距離を高精度に変化させるためにピエゾ機構を備えねばならず、装置構造が複雑化するとともに、1視野の解析に複数枚の撮影画像が必要となる。それに対して、ワンショット法では1回の撮影画像から位相画像を作成可能なため、装置の小型化とタクトタイムの短縮が期待できる。

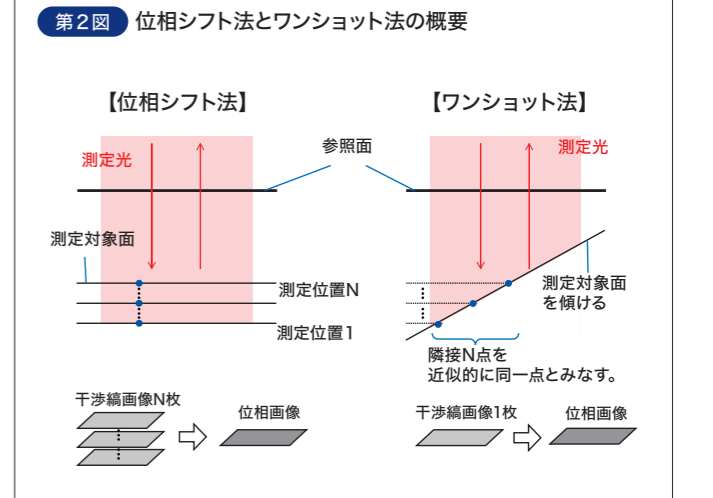


第1図 フィゾー干渉計の基本構造

A-4 測定システムの概要

第3図に当社の提供するナノポグラフィ測定システム概要を示す。本システムは主に、ナノポグラフィ測定センサ、センサ保持可動部(X軸)、ウエハ搬送ステージ、ステージ保持可動部(Z軸)によって構成されている。

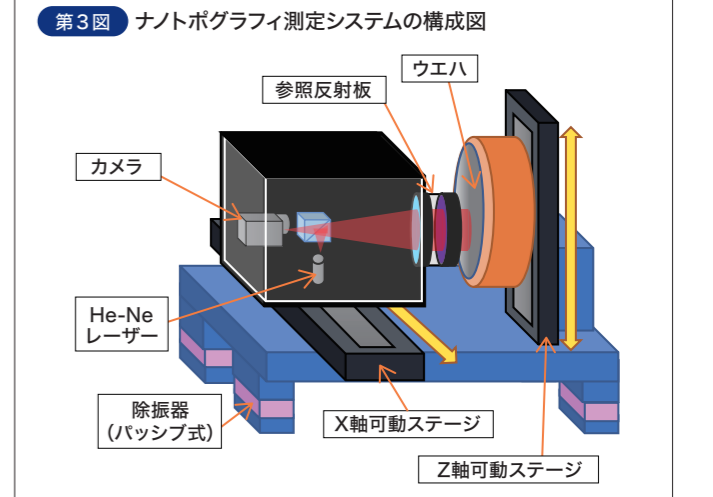
ステージに搬送されたウエハを起倒させることで垂直に保持し、ウエハの自重たわみの影響を軽減した状態にて測定を行う。また、X、Z軸ステージによって任意の測定座標に移動し、ウエハ全面を分割して画像を取得する。取得された各視野の画像は、全て隣接する画像と領域が一部オーバーラップしており、当社独自の画像再構成システムによって画像間の境界を繋ぎ合わせ、1枚のウエハ全面画像として出力される。以上の測定システムにより、小型の光学測定系による大口径(直径300mm)ウエハの表面形状測定が可能となる。



第2図 位相シフト法とワンショット法の概要

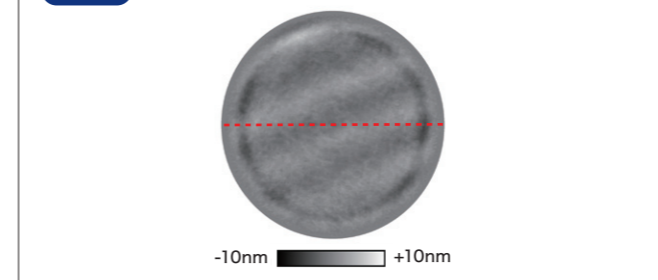
A-5 測定性能の評価

本測定システムにて300mmウエハを測定したウエハのナノポグラフィマップおよびラインプロファイルをそれぞれ第4図と第5図に示す。また、ラインプロファイルをSEMI M49-1108Nの規定に基づいて30回測定(6回測定/日を5日間)し、各測定座標に対して標準偏差を算出した結果も併せてプロットした(第5図の青線)。プロフィール上の全測定点の標準偏差の平均は約0.12nmであった。

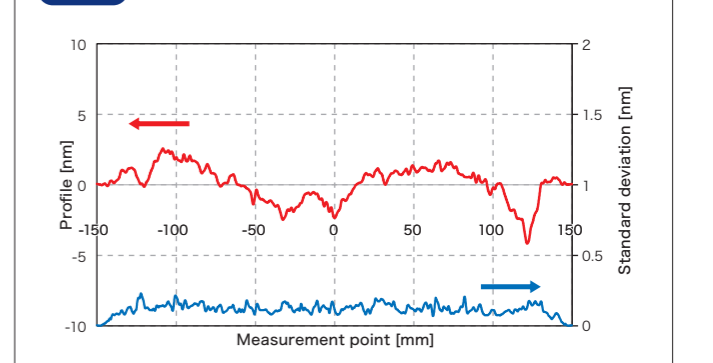


第3図 ナノポグラフィ測定システムの構成図

第4図 ナノポグラフィマップ



第5図 ナノポグラフィプロフィール



さらにこの標準偏差を元に作成した度数分布を第6図に示す。標準偏差0.25nm以下にて累積比率が100%に達していることから、本システムにてサブナノメートル精度でナノトポグラフィが測定可能であると判断することができる。

A-6 ナノトポグラフィの評価指標

ナノトポグラフィの評価指標として、マップおよびプロファイル以外にTHA(Threshold Height Analysis)があり、その算出方法はSEMI M43-0301にて定義されている。THAによる算出方法を以下に示す。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によって高さ変化(PV値)を算出し、その値を分析エリアの中心点に割り当てる。この計算をウエハのFQA内にある全ての分析エリアに対して実施する(第7図:PVフィルタリング)。

PVフィルタリングしたマップデータ(PVマップ)から、横軸をPV値、縦軸をそのPV値以上となる分析エリアの面積比率としたグラフを第8図に示す。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PV値[nm]がTHAの結果として求められる。THAにより算出された値の表記はTHA(任意寸法)mm角@(指定値)%[nm]として示される。

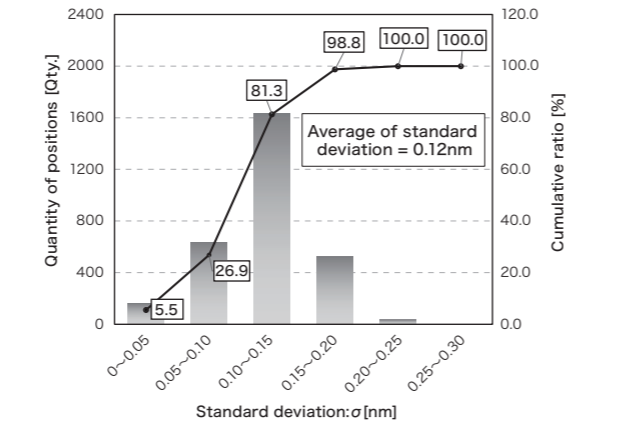
THAはウエハの局所的な凹凸を評価する解析手法として使われるが、SEMI M49-1108Nでは、任意寸法を2mmまたは10mm角の分析エリアに対して0.05%を指定値とする解析条件がもちいられる。最先端ウエハにおいてTHAの再現性(標準偏差)は、2mm角@0.05%の条件で0.13nm以下、10mm角@0.05%の条件で0.4nm以下の測定性能が求められている。

ウエハ20枚を本システムにて30回測定(6回測定/日を5日間)した結果からTHAを解析し、各ウエハの再現性を評価した結果を第1表と第9図、第10図に示す。2mm角@0.05%の条件で標準偏差が0.06nm以下、10mm角@0.05%の条件で標準偏差が0.18nm以下であり、本測定システムにて最先端ウエハの測定に求められる再現性が確認された。上記より半導体ウエハの出荷検査に必要なナノトポグラフィ評価性能を有していると考えられる。

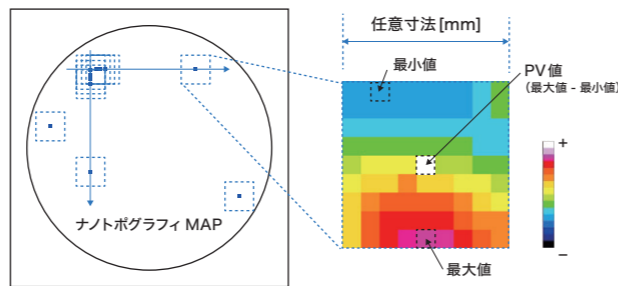
第1表 THA測定結果

サンプルNo	THA2.0mm角@0.05%[nm]	標準偏差σ [nm]	THA10.0mm角@0.05%[nm]	標準偏差σ [nm]
1	2.298	0.038	7.148	0.072
2	2.384	0.034	7.424	0.103
3	2.150	0.039	6.608	0.081
4	2.572	0.028	7.986	0.077
5	2.252	0.041	7.482	0.112
6	2.499	0.035	7.921	0.089
7	2.366	0.042	7.289	0.153
8	2.109	0.024	5.635	0.111
9	2.086	0.041	6.340	0.138
10	2.042	0.029	6.058	0.075
11	2.514	0.040	8.224	0.097
12	2.332	0.035	7.397	0.083
13	2.048	0.040	6.075	0.100
14	1.942	0.033	5.561	0.075
15	2.337	0.050	7.431	0.066
16	2.377	0.028	7.955	0.081
17	3.172	0.026	7.863	0.132
18	2.967	0.031	8.100	0.127
19	3.219	0.026	7.431	0.099
20	2.633	0.027	6.498	0.103

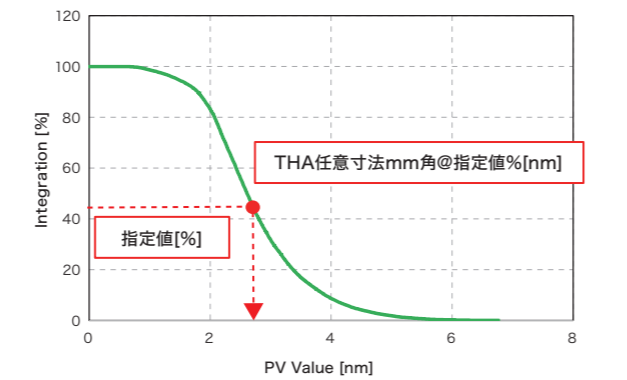
第6図 ナノトポグラフィプロファイルの再現性評価



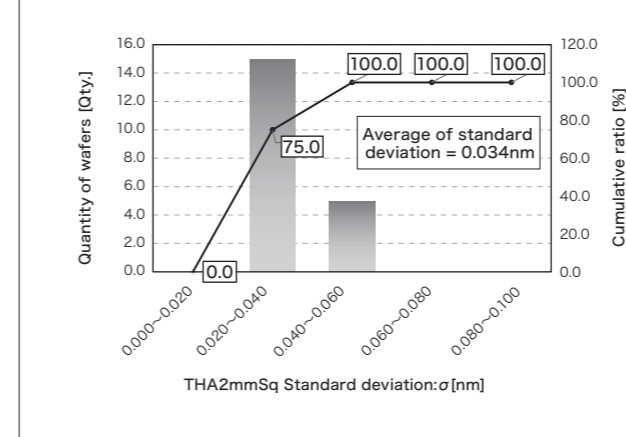
第7図 PVフィルタリング概要



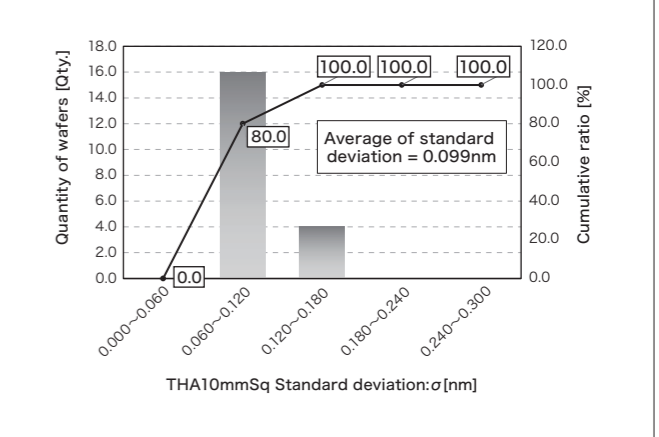
第8図 PVマップから算出した積算度数分布



第9図 THA2mm角@0.05%の再現性評価



第10図 THA10mm角@0.05%の再現性評価



A-7 LNSW-3020FEの仕様

次に、開発したナノトポグラフィ測定システムを当社のサブナノ精度サイトフラットネス測定(LSW-3020FE)と組み合わせたLNSW-3020FEについて紹介する。本装置の仕様を第2表に示す。

本装置は、半導体ウエハの出荷検査項目としてサイトフラットネス、厚さ、Bow/Warp、ナノトポグラフィ、エッジロールオフが測定可能なシステムを搭載している。また、ウエハ製造工場内でのインフラやネットワークに接続して稼働できるよう、OHT(Overhead Hoist Transport)より供給されたカセット内のウエハを自動で計測するGEM(Generic Model For Communications and Control of Manufacturing Equipment)通信にも対応している。

また量産ラインにおいて安定的にサブナノメートルの測定精度を確保するために、独自の装置構造により外部からの振動の影響を抑制している。床振動0.5Gal(100Hz以下のオーバーオール)の環境下においても十分な性能を発揮する耐震性能を有することを実証している。

第2表 LNSW-3020FEの標準仕様

測定対象	シリコン単結晶ウエハ(Polish) / 300mm
ウエハ厚さ	650 ~ 850um
測定原理	ヘテロダイン干渉計(Flatness, Bow/Warp) 分光干渉計(Center Thickness) フィゾー干渉計(Nontopography)
測定方法	フラットネス スパイラルスキャン: R Direction; 0.5, 1, 2mm Pitch θ Direction; ≤1mm Pitch ナノトポグラフィ 視野分割画像取得: 視野分割スキャン
装置サイズ/重量 環境	2000×2980×2100mm(W,D,H) / 5000kg(approx.) 床振動: ≤0.5Gal, クリーン度: Class1000 or More, 温度: 23°C±1°C
測定項目	平坦度 グローバルフラットネス: GBIR, GFLD, GF3D, GFLR, GF3R サイトフラットネス サイト: SBIR, SFLR, SF3R, SFQR, SBID, SFLD, SF3D, SFQD セクタ: ESFQR, ESFQD 形状: Bow/Warp 厚さ: Center Thickness ナノトポグラフィ: THA エッジロールオフ: ZDD
再現性(σ)	GBIR: <3.0 nm(Typ.: 1.5nm) SFQR: <0.75 nm(Typ.: 0.50nm) ESFQR: <1.30 nm(Typ.: 0.80nm) Bow/Warp: <1.00+(Warp/100)um Center Thickness: <0.050um Nanotopography THA@2mm角0.05%: <0.30nm Nanotopography THA@10mm角0.05%: <0.50nm ZDD: <10.00nm/mm ²
タクトタイム	平坦度(サイト)+ナノトポ両面測定時≤70s/Wafer 平坦度(サイト、セクタ)+ナノトポ両面測定時≤88s/Wafer

新たに開発したナノトポグラフィ測定システムについて紹介した。当社独自の視野分割測定と視野別画像の再構成技術により、光学系のサイズを抑えつつ(口径150mm)、高いスループットで300mmウエハ全面の計測を可能にした。さらにこれをサイトフラットネス計と組み合わせたシステムとして開発し、製品化したLNSW-3020FEについても紹介した。

当社平坦度計は、シリコンウエハ研磨工程において多くのお客さまでご愛用いただいている。昨今の市場の急成長とも相まって、最終の出荷検査工程への適用に対するニーズも高まっている。今回開発したLNSW-3020FEはこれらのニーズに応えるとともに、日々進化する最先端ウエハに適した装置となるように当社の技術を更に磨いていくことで、ウエハ最終製品の品質向上に寄与したいと考えている。今後も平坦度、表面粗さをはじめとした当社シリコンウエハ向け検査装置において、市場やお客さまにいただいた課題に対して開発・製造に取り組み、半導体分野の発展に貢献したい。

参考文献 *1) 田原和彦ほか,R&D神戸製鋼技術Vol.65(2015),No2,p.87-91
*2) 辻村学ほか,精密工学会誌Vol.67(2001),No8,p.1289-1293