小特集Ⅱ. マイクロデバイス用基板の平滑化・平坦化技術

ナノトポグラフィーの測定と標準化

吉 瀬 正 典*

*日本エー・ディー・イー㈱ (〒144-0035 東京都大田区南蒲田 2-16-1)

Measurement and Standarization of Nanotopography

Masanori YOSHISE*

*Japan ADE Ltd. (2-16-1, Minami-Kamata, Ohta-ku Tokyo 144-0035)

Key Words : Nanotopography, Shallow Trench, Isolation, CMP

1. はじめに

次世代 LSI でのデバイス構造は、ウェーハ表面に多層の成膜処理を行うことで急速な微細化が可能になりつつある。しかしながら、積層することによりウェーハ表面の凹凸が大きくなり、パターン描画プロセス(リソグラフィ)でのデフォーカスを起こすため、プロセスの途中でウェーハ表面の平坦化(プラナリゼーション)が必要で、現在ではその多くが CMP (Chemical Mechanical Polishing) プロセスにて平坦化がなされている。また一方では、デバイスの高密度化のために、素子間分離の改善が行われ、従来の分離領域の大きな LOCOS (LOCAl Oxidation of Silicon) から STI (Shallow Trench Isolation) が主流となりつつある。このプロセスの変更とともに、ウェーハ表面の微細な凹凸が重要視され、今までのフォトリソグラフィのための表面形状であるフラットネスとは別に、ナノトポグラフィーの重要性が顕在化しつつある。ナノトポグラフィーの必要性は 1998 年に C. Shan Xu などにより CMP プロセスでの問題点として発表され¹⁾、さらに 1999 年には K. V. Ravi により次世代のウェーハのフラットネスへの要求として発表²⁾されて以来、さまざまな発表³⁾が行われている。現在、国内外において、ウェーハ仕様としてこのナノトポグラフィーの要求がされつつあり、本稿では、ナノトポグラフィーの測定とその標準化について述べる。

2. ナノトポグラフィー

2. 1 定義

ナノトポグラフィーの定義は SEMI (Semiconductor Equipment & Material International) の標準規格として昨年 10 月米国 Austin にて開催された標準化委員会にて正式に承認され、SEMI ドキュメント M 43-0301 Guide for Reporting Wafer Nanotopography⁴⁾としてその定義を「空間波長成分が約 0.2 mm~20 mm のウェーハ表面に存在する凹凸」と定義された。但し、現在の定義ではまだ十分討議されていない部分もあり、SEMI AWG (Advanced Wafer Geometry) タスクフォースで継続審議を行っている。

2. 2 STI と CMP

ウェーハ上での素子の高密度化が進むにつれ、素子間分離の方

法として LOCOS のように、部分的に熱酸化により絶縁領域を作製する手法が開発されたが、この方法ではバースピーグと呼ばれる絶縁領域の広がりが高密度化の妨げとなった。したがって、現在では、幅 2000~3000 Å 弱、深さ 3000~4000 Å 程度の溝(トレンチ)で素子間の分離を行う、いわゆる STI (Shallow Trench Isolation) 技術が開発された。STI 技術はウェーハ表面にまず、CMP 処理のためのストッパーとしての SiN 膜を生成し素子分離領域に RIE (Reactive Ion Etching) で表面に素子分離を行うためのトレンチを作製し(図 1 (A))、このトレンチに絶縁体である SiO₂ が充填できるように、ウェーハ表面に HDP (High Density Plasma) などで SiO₂ を生成する(図 1 (B))。その後、トレンチ以外の活性領域の不要な SiO₂ を CMP にて除去するが、このプロセスで SiO₂ を完全に除去しないと活性領域に絶縁膜が残り不良を発生し、また SiO₂ を完全に研磨除去すると活性領域のオーバーポリッシュが発生する(図 1 (C))。SiO₂ の成膜は良く制御されており、現在では数%以内の厚み均一性で行われている。したがって、活性領域での SiO₂ の表面の凹凸はウェーハ表面の凹凸に近似しておりウェーハ表面の微細な凹凸が CMP 後の

図 1 STI プロセス

福田哲生：ナノトポグラフィー調査研究報告会資料

図2 CMP プロセス
C. S. Xu etel ; Electrochmical and
Sold-state letter, 1988

表1 スラリーの特性

	CeO ₂ +海面活性剤	SiO ₂ 系
SiN 対 SiO ₂ の選択比	大 (数 10~数 100)	小 (4~5)
SiO ₂ の研磨速度	大	小
ナノトポグラフィーの影響	受けにくい	受けやすい
マイクロスクラッチ	出やすい傾向	出にくい傾向
コスト	高い	安い

福田哲生：ナイトポグラフィー調査研究報告会資料より

活性領域での SiO₂ の残膜，またはオーバーポリッシュの問題を起こす。

CMP プロセスでは一般的に，ウェーハ裏面はエアバックなどを利用したソフトバッキングなどで支持されており，裏面の凹凸はこのソフトバッキングにより基本的に吸収され，オモテ面基準で加工されている。オモテ面での研磨では，CMP 装置の構造，ポリッシングパッド，スラリー，加圧，回転速度などの多くの複合要素により，研磨加工の特性が決定されている。中でも研磨加工特性に影響を与えるものとして，研磨パッドの硬度，スラリーの選択比がある。IC 1000 のような硬いパッドで加工した場合は，ウェーハの表面はより平坦化され STI の場合には SiO₂ の表面は平坦化されても，SiO₂ の厚みバラツキは Si ウェーハの表面の凹凸と強い相関がある。しかし，IC 1000+Suba IV のような柔らかい 2 層パッドで研磨すると，SiO₂ はその表面に沿った形で均一に研磨されるので，SiO₂ の厚みバラツキは改善されるが，ディッシングやエロージョンなどが発生し表面の平坦化は良くない(図 2)。

また，研磨パッドの硬さのほかに，使用されるスラリーによって加工特性も変化する(表 1)。酸化セリウム(CeO₂)+界面活性剤のスラリーを使用した場合は，SiN と SiO₂ の選択比が大きく SiO₂ 表面の研磨は研磨量が大きく，SiN 表面の研磨時は研磨量が少なく，ナノトポグラフィーの影響を受けにくい。しかし，SiO₂ の研磨速度が大きいためマイクロスクラッチが発生しやすく，またコストも高い。一方，SiO₂ 系のスラリーを使用すると，SiN の研磨速度と SiO₂ の研磨速度の差が少なく選択比が小さいために，ナノトポグラフィーの影響を受けやすいが，マイクロスクラッチの発生は少なく，コストも安い(表 1)。したがい，結果としては，ウェーハ表面は凹凸のない形状が求められる。

STI 以外にも，A. Grenville などは，ポリシリコン配線の ECD(Electrical Critical Dimension)の改善を報告している⁹⁾。この報告の中で，シリコンウェーハのナノトポグラフィーが

図3 ポリシリコン ECD とナノトポグラフィーとの相関

ECD に影響を及ぼすことを発表している(図 3)。報告では，ナノトポグラフィーの大きな SSP(片面研磨ウェーハ)とナノトポグラフィーの小さな DSP(両面研磨ウェーハ)の ECD を比較し，ナノトポグラフィーの大きい SSP が ECD のバラツキの大きいことを示している。今後 100 nm の世代では大きな問題となることが予測される。

3. ナノトポグラフィーの測定

3. 1 ウェーハの測定

現在，市場では 4～5 種類のナノトポグラフィー測定装置が紹介されており，光正反射の位置の変化をからウェーハ表面の凹凸の傾き測定，光干渉の位相差を利用し表面の凹凸の高さ測定などそれぞれの独自の技術を使用している。ナノトポグラフィーは SEMI M 43-0301 の定義から，ある指定された大きさの領域内での高低差で表すので，正反射光から表面の傾斜を測定する方法では，測定された傾きを高さに変換する必要がある。ウェーハは測定ステージ上にセットし，非吸着にてウェーハをフリーの状態にしてオモテ面の凹凸を測定する。ウェーハを吸着すると，吸着力によりオモテ面の形状が変わり，フィルター処理に影響を与える。フォトリソグラフィーを目的とし，裏面吸着をするフラットネスの測定とは異なり，ナノトポグラフィーの場合は，オモテ面基準となる。

3. 2 フィルタリング

測定されたデータには，ウェーハがフリーの状態での形状のため Bow・Warp のような曲率半径数百メートルのような大きなウネリを含んでおり，これらの長い波長成分を除去する必要がある。現在 SEMI M 43-0301 の定義では前述したとおり波長成分が約 0.2 mm～20 mm の範囲を対象としており，カットオフ周波数の指定はウェーハのユーザーとサプライヤーの両者の合意に基づき，M 43-0301 では詳細の指定は行わない。この 0.2 mm～20 mm の範囲の成分を取り出すには測定された長い波長成分をハイパスフィルターで処理すれば良い。ハイパスフィルターの手法としては，測定したデータから長い波長成分を算出し，元の測定データからこの成分を取り除き，必要な短い波長成分を抽出する。実際には図 4 のように，測定データの連続した複数の点 N の値に，それぞれの点に設定された重み係数 A を乗じ，点数にて除した値 N_F を計算し，これを繰り返す。この手法は測定したデータか

ら短い波長成分を取り除いた長い波長成分を抽出する方法でコンボリューション(畳込み)と呼ぶ。図5は同一のウェーハのフィルター処理前のグラフと20mmハイパスフィルター後のグラフである。左側のグラフはフィルター処理前で、表面はスムーズな状況だが、PV値は約5000nmと大きい。一方、右側のグラフは20mmのハイパスフィルター処理後で全体にランダムな斑模様が見え、PV値も約1000nmと小さい。

測定したデータのフィルタリングには問題がある。問題点としてはエッジ部の外側のデータが無いためエッジ近傍でのフィルタリングとウェーハ中央部でのフィルタリングでは、前述した図4のフィルター出力である N_{F11} (エッジ近傍)と N_{F4} (中央部)の違いフィルター特性が変わる。この問題を回避するために次の3つの方法が考えられる(図6)。

(1) 中央部の重み付け関数が変わらない範囲のみをデータとし、

図4 コンボリューション

- エッジ除外領域を大きくとる。
- (2) 外周近傍では重み付け関数の領域を小さくし計算することで、外周部でのカットオフ周波数を調整する。この場合、ウェーハの中央部とエッジでは重み付け関数が変わるため必要な短い波長成分もフィルタリングすることがある。
- (3) エッジ外側のデータを外挿し、内側とエッジの重み付け関数を同一にすることで、エッジ部の異常データをなくす。この方法では外挿処理の手法によりデータに誤差が発生する。

コンボリューション法以外でのフィルタリングの一つにFFTがあるが、FFTでの解析は、アルゴリズム上有限のデータが無限に繰り返されることを前提としており、ウェーハ測定の場合相対するウェーハのエッジ形状は異なり、無限に繰り返されることはなく、不連続部分の補正方法としてウィンドウ処理を行うことで改善できるが、方法によりデータが変化してしまう。

フィルタリングは、使用するフィルターの種類によっても、出力されるデータが異なる。現在一般的に使用されているフィルターにはガウシアン(Gaussian)フィルターがあり、そのほか立ち上がり特性の良いダブルガウシアン(Double Gaussian)もあり、その特性は図7である。この図から、立ち上がりの緩やかなガウシアンフィルターで、カットオフ周波数を20mm(図中のX軸(Normalized Wavelength=1の点)にて設定しても、実際には40mmの波長成分がまだ15%程度残っており、フィルターの選択やカットオフ周波数の設定には注意する必要がある。

4. 測定装置

4.1 測定原理

図5 フィルター前(a)とフィルター後(b)

図6 エッジでのフィルタリング法

ナノトポグラフィーの測定装置は、数社より市場に出ているが ADE-Phase Shift 社のナノマッパーを例に説明する。測定の原理を図 8 に示す。ナノマッパーは光源に白色光を使用した干渉計である。光源より出た光は、ビームスプリッターにて 2 方向に分けられ、1 つはピエゾで振動している基準鏡で反射し、1 つはウェーハ表面にて反射する。それぞれの面から反射された光は位相をシフトさせることで、干渉縞を発生させウェーハの表面の高低差を直接測定する。測定はウェーハ表面を複数分割し有効径が 100 mm の小型の光学系を使用することで、コストの低減と 200 mm/300 mm の両方のウェーハが可能である。分解能は横方向約 0.2 mm、縦方向 0.4 nm の高分解能が可能である。

4. 2 装置仕様

装置の仕様を表 2 に示す。

5. SEMI 測定標準

SEMI M 43-0301 Guide for Reporting Wafer Nanotopography は現在ナノトポグラフィーの測定基準となる数少ない文書であるが、SEMI の Standard にはこの Guide Line と Specification の 2 種類の文書があり、Guide Line は Specification に比べ今後もまだ十分検討する必要がある場合に多く使われる。

5. 1 定義

「空間分解能が約 0.2 mm～20 mm 範囲のウェーハ表面の凹凸」

5. 2 計算

a. 解析エリア：一辺が距離 D(mm)の正方形、または直径が

D(mm)の円形の解析エリアを設定する。このエリアの中にはピクセルが存在するし、解析エリアは、その領域のすべてが FQA の内側にあるものとする。また、解析エリアは複数個設定できる(図 9)。

b. PV 値：解析エリアの最高値と最低値の差を計算し、その値を解析エリアの値とし、エリアの中心位置とする。計算する解析エリアは FQA 内のすべての解析エリアとし、XY 方向に 1 ピクセルごとと移動し FQA 内をスキャンする(図 9)。

5. 3 報告事項

5. 3. 1 フィルター：カットオフ値、フィルターのタイプ、ピクセルサイズ

表 2 装置仕様

測定対象ウェーハ	a) 直径：SEMI 標準 M 1 に準拠する 200 mm (ノッチウェーハ)及び 300 mm b) 表面状態：鏡面(エピウェーハを含む) c) そり：ウェーハを平面状に設置した状態で <50μm
分解能	(X, Y) 0.2 mm (Z) 0.4 nm
測定再現性精度	1.0 nm/1σ
スループット	200 mm：60 枚/時間 300 mm：30 枚/時間 (本スループットは、測定条件及び出力内容によって異なる)
搬送系	カセットタイプ： 300 mm オープンまたは FOSB 200 mm SEMI 規格 25 枚入りカセット カセット構成 1) 200 mm/300 mm ウェーハ共用 (200 mm 2 個/300 mm 1 個) 2) 200 mm ウェーハ専用(4 個) 3) 300 mm ウェーハ専用(2 個) ウェーハ搬送用ロボット ウェーハ裏面吸着方式 ブリアライメント機構
ユーティリティ	電 源：100 VAC 8 A 50 Hz/60 Hz 圧縮空気：80 psi (552 kPa) 真 空：25 inchHg (21 SCFH)
装置寸法	幅 1,321 mm、奥行 2,083 mm、高さ 2,159
装置重量	約 1,000 kg
設置環境	温 度：16℃～23℃ 相対湿度：20%～50%

図 7 ハイパスフィルター特性

図 8 測定の原理

図 9 解析エリア

図 10 グラフィックス

図 11 解析領域

図 12 解析領域内での計算法

5. 3. 2 解析エリア：形状(正方形，丸形)，大きさ

5. 3. 3 データ

- a. スレッシュホールドカーブ(Threshold Curve)：各解析エリアごとに、設定した許容値を超えた解析エリアと FQA 内のピクセル数の割合(%)をグラフ表示したもの(図 10(a))。
- b. パーセントエリアデーター：スレッシュホールドカーブ上で指定された許容値を超えた領域の割合(%)。
- c. スレッシュホールド値：スレッシュホールドカーブ上で、指定された領域の割合での許容値。
- d. ハイトマップグラフ：ウェーハ全面の高さを表示した分布図(フィルター後のデータ)(図 10(b))。
- e. デフェクトマップ：ウェーハ全面のマップで、各解析領域ごとに定められた許容値を超えた領域に色分けをした分布図(図 10(c))。
- f. PV 解析マップ：各解析領域毎に計算された PV 値のウェーハ全面図。

6. 今後の課題

SEMI M 43-0301 の中で、現時点でも、色々な課題を抱えている。課題としては

- a) フィルターの定義
- b) 解析エリアの定義
- c) 解析エリア内での計算方法 などがある。

これらの項目については、現在も審議中であり、未だ適切な結果は出ていない。

6. 1 フィルターの定義

フィルターの定義として、現在カットオフ周波数については特に定義されておらず、図 7 のようにカットオフ周波数にて減衰特

性が 50% であるなどの表記を明確にする必要がある。また、減衰特性の詳細についての論議は審議されておらず、この特性によってはナノトポグラフィーのデータに影響が出ることは事実であるが、この特性の指定は実際のデバイスプロセスとの関連性を明確に論議する必要がある。

しかしながら、プロセス情報は各デバイスメーカーでの機密事項に関することが多く、標準化は難しい。

6. 2 解析領域の定義

現在の M 43-0301 では、解析領域全体が FQA の内部に在ることとしているが、この場合、図 11(a) のように FQA に内接する解析領域の中心点が半径となる領域のみにデータが存在し、また正方形の場合は図 9 のように FQA と解析エリアの間に計算しない部分が発生する。反対に、解析領域の中心点が FQA 内にある場合を含めると、図 11(b) のようにデータ領域は広がるが、ウェーハエッジでのフィルタリングには問題があり、エッジ近傍でのデータに不確実性が残る。

6. 3 解析領域内での計算法。

現在の M 43-0301 では解析領域内の PV 値を、その領域の中心値とすることから、解析領域内に最高点と最低点が変わらなければ、この 2 点を含むすべての解析領域値 PV が一定である(図 12 の下図)。

別の計算方法として、各解析領域の中心点からの最大変位量を値として計算する方法が検討されている。この方法は、図 12 の上図のように P 1 にある解析領域の中心部とその最高値又は最低値との差の大きいほうの値とし、ピクセルが P 1 から P 5 へ

移動するに従い、中心点が移動するために、それぞれの最高値と最低値の差を値とする(図 12 の上図)。この場合、中心点からの変位の法が絶対値としては小さくなり、表面に対して追従してゆく。

7. ま と め

ナノトポグラフィーの測定については、実際にはまだまだ討議されなければならない課題が色々であり、今後継続して検討すべき課題がある。その中でも、1) 本来に必要な周波数成分は何か?、2) エッジ近傍のフィルタリングはどのように処理すべきか? の2点に絞られる。適切な、周波数成分の選択は、デバイスのプロセス構造と CMP プロセスの手法に大きく関連する。この点の解決にはプロセスでの条件とその効果の情報は不可欠である。またエッジでのフィルタリングの問題は、現在明確な解決案が無く、さらなる研究が必要とされる。これらの問題の解決には、実際のデバイスプロセスでのデータや、CMP 装置の詳細データが必要であり、今後デバイスメーカー、CMP 装置メーカーおよび

測定装置メーカー各社の協力が期待される。

(2001-2-16 受理)

文 献

- 1) C. Shan Xu, E. Zhao, R. Jairath and W. Krusell; Electrochemical and Solid-state Letters, I(4) 181 (1998)
- 2) K. V. Ravi; Wafer Flatness Requirements for Future Technology, Future FAB International (July 1999)
- 3) 福田哲生; ナノトポグラフィー調査研究報告会資料(2000年10月5日), 社団法人 電子情報技術産業協会(旧 日本電子工業振興協会)等
- 4) SEMI M 43 0301 GUIDE FOR REPORTING WAFER NANOTOGRAPHY
- 5) Andrew Grenville*, Brian Coombs, John Hutchinson, Keln Kuhn, David Miller, Patrick Troccolo; Electrical Critical Dimension Metrology for 100-nm Linewidths and Below, SPIE Microlithography (2000)

~~~~~