The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	EEM(Elastic Emission Machining)によるSi(001)表面の平坦化（第1報） ：半導体表面の超平坦化のための超清浄EEMシステムの開発
Author(s)	森, 勇藏; 山内, 和人; 三村, 秀和 他
Citation	精密工学会誌論文集. 2004, 70(3), p. 391-396
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/86992
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

The Japan Society for Precision Engineering

論文

EEM (Elastic Emission Machining)による Si(001)表面の平坦化（第1報）*

—半導体表面の超平坦化のための超清浄 EEM システムの開発—

森　勇藏**　山内和人***　三村秀和***　稲垣耕司***　久保田章亀†　遠藤勝義**

Flattening Si (001) surface by EEM (Elastic Emission Machining)
- Development of Ultraclean EEM system for ultraflat semiconductor surface preparation -

Yuzo MORI, Kazuto YAMAUCHI, Hidekazu MIMURA, Kouji INAGAKI, Akihisa KUBOTA and Katsuyoshi ENDO

Ultraprecision surface preparation techniques to make atomically flat Si surfaces are strongly demanded in the next-generation semiconductor technology age. However, effective technique dose not exist particularly for Si(001) surface smoothing. The only possible technique is a heating method in the ultra-high vacuum, however it dose not have industrial feasibility. In this work, a new EEM (Elastic Emission Machining) system having ultrahigh cleanliness has been developed for semiconductor surface preparation. In the EEM system, ultraclean techniques such as a refining system for mixture fluid and numerically controlled sample stages hydrostatically supported by ultrapure water are developed and equipped. Machined surfaces are observed by AFM (atomic force microscope). Obtained images show that topmost atoms on the premachined surfaces are preferentially removed in EEM, and that the processed surfaces have atomic-level flatness.

Key words: EEM, ultraprecision machining, atomic-level flatness, Si(001) surface, Hydrogen-terminated Si surface, AFM (Atomic Force Microscope), STM (Scanning Tunneling Microscope)

1. はじめに

Si(001)表面は，Si 電子デバイスの製造工程において，ゲート酸化膜の界面準位の制御性から，半導体デバイス用基板として最も重要かつ最も広範に用いられる表面である[1)2)]．そして，デバイスサイズの更なる微細化や，新しい動作原理の超微細デバイスの構築が精力的に研究・開発される中で，原子レベルで平坦かつ結晶学的に欠陥の無い Si(001)表面の製作技術を実用化への発展性のある方法により確立することが極めて重要であり，強く求められている．現在，Si 表面の原子スケールでの平坦化技術は，2 種類に大別できる．一つは，超高真空中で 1000℃以上に加熱することによって，表面の不純物の除去と熱力学的な表面原子の拡散と再配列の制御を行う方法であり，もう一つが薬液を用いたウエットエッチングプロセスによって，これを行う方法である．前者は，古くより，表面科学の基礎研究において，原子レベルの平坦面を得る方法として広く利用されている．しかし，大面積を処理するためには，莫大な熱エネルギーと全面において極めて高精度な温度および応力の管理が必要であり，産業レベルの技術として現実性が皆無に近い．

一方，ウエットプロセスによる平坦化は，フッ化水素酸やフッ化アンモニウム水溶液中での処理により，完全な Si(111)表面を得ることが可能である[3)]．しかし，Si(001)表面では，その表面エネルギーの大きさから，OH^-による異方性エッチングにより，より表面エネルギーの小さい (111) 方位のファセットからなるマイクロピットやマイクロバンプが形成され[4)~6)]，原子レベルで平坦な Si(001)表面を得ることができていない．

本研究では，EEM[7)~18)]によって Si(001)表面を平坦化することを目的とし，新たに EEM システムを開発した．原子分子サイズの反応種による通常の化学エッチングと異なり，EEM では原子スケールでは平面に近い微粒子表面を反応種として利用しているため，Si(001)表面上に発生するエッチピットの底部は加工されず，表面の凸部側から加工される．加工速度を OH^-によるエッチピット形成速度より速く設定すれば，エッチピットの無い，完全な Si(001)平坦表面の作製が可能であると考えられる．しかし，原子レベルで平坦な表面を得るためには，加工環境の清浄化が重要である．例えば，加工表面に存在する有機不純物は，微粒子と加工物表面の間の化学反応に対してマスクとして作用するため，マイクロラフネスの発生原因であることが明らかにされている[16)]．また，加工液中に溶存する酸素は極めて活性なため，Si 等の表面を高速に酸化することがわかっている[18)]．さらに，金属不純物汚染は,半導体基板の加工において必ず避けなければならない項目であることは言うまでも無い．EEM システムの開発では，加工液の循環精製システムの開発など多くの清浄化対策を施した．その結果，加工液の清浄度に関して，TOC (total organic carbon) と溶存酸素濃度がともに 1ppb レベル，溶存金属イオン濃度も数 ppb

* 原稿受付 平成 15 年 4 月 21 日
** 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科附属超精密科学研究センター（吹田市山田丘 2-1）
*** 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科
† 学生会員 大阪大学大学院工学研究科

NII-Electronic Library Service

The Japan Society for Precision Engineering

を実現した．本報では，EEM システムの設計・開発と EEM システムの性能を評価するために行った 80℃高温超純水で処理した Si(001)表面の加工例について報告する．

2. 加 工 装 置

2.1 加工装置の全体構成

装置の全体構成ならびにクリーンルーム内に設置された装置の全体写真を図 1 および図 2 に示す．また，ステージの動作仕様を表 1 に示す．試料ステージは，ストローク 100mm の X-Y 移動と連続した回転が可能であり，直径 200mm の試料であれば，全面を加工することができる．本装置では，化学加工である EEM を安定かつ高精度に行うために，様々な加工環境の清浄化対策が施されている．特に，ステージの案内や軸受けには，超純水を作動流体とする静圧支持システムを採用している．これにより，通常の機械ステージにおいて生じる油蒸気等の有機物汚染を完全に無くすことができ，同時に加工雰囲気への摩耗粒子や不純物分子の混入を抑制することができる．また，加工装置は，加工雰囲気を外気から隔離するプロセスチャンバーを備えており，内部を窒素ガス雰囲気にすることで，加工液への酸素分子の溶け込みを避けることができる構造になっている．ステージ駆動部も別のチャンバー内に収められ，実験室雰囲気から完全に隔離することができ，加工試料を装着する際の有機汚染等を最小限にする配慮がなされている．

一方，加工液循環精製システムを備えることによって，加工中も常に，脱ガス（特に酸素ガス）と有機不純物や溶存金属イオンの除去を行い，装置の構成要素からの溶出や僅かなリークによって加工液中に混入する不純物を取り除くことができるシステムになっている．また，加工ヘッドはノズル型とし，一括に加工できる面積に自由度を持たせるとともに，高分子（ポリウレタン）製の回転球型加工ヘッドの際に必要となる加工液へ溶出した有機不純物の除去が不要となり，系全体の清浄化対策を容易にしている．以下に，各項目ごとに開発項目と性能評価を行った結果について述べる．

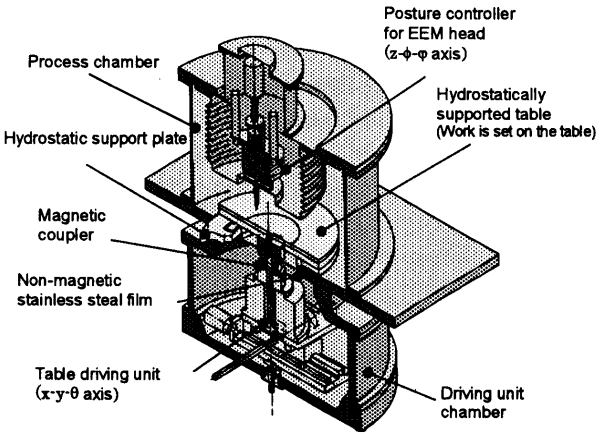


Fig.1 Schematic drawing of ultraclean EEM system

Table 1 Specifications of numerically controlled stages

	Stroke	Maximum feed rate
X stage	100 mm	5 mm/s
Y stage	100 mm	5 mm/s
θ stage	Continuous	1rad/s (10rpm)

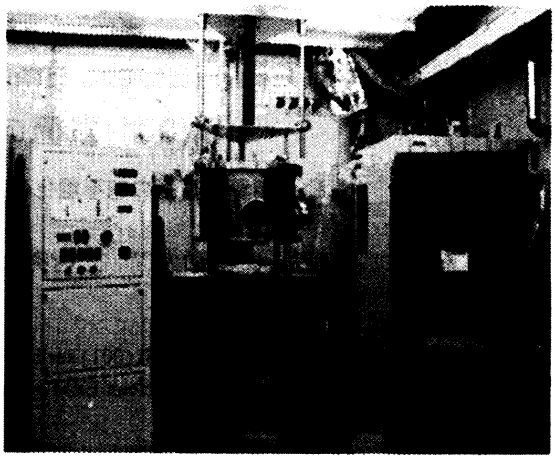


Fig.2 photograph of EEM apparatus in ultraclean room

2.2 超純水静圧支持ステージ

一般の静圧支持ステージでは，剛性を高めるために，2 枚のパッドでガイドを挟み込む両面支持法が採用される場合が多い．しかし，このような構成では，高い支持剛性が期待できるものの，パッド間の距離やガイドの平面度の要求が厳しく，構造も複雑なものになる．本研究は，下面のみを静圧支持とし，ステージと駆動系に取り付けられた永久磁石の吸引力によって，ステージを静圧支持部に押し付ける簡易的な構造としている．このことにより，両面支持法による静圧支持システムと同様の高い剛性と磁気結合の復元力による並進および回転の自由度を有するステージが実現できる．静圧支持システムには，図 3(a)に示すようなマルチリセス型の静圧軸受を採用している．ポンプによって加圧された超純水は，軸受面に設けられたポケットに供給される．ポケットに供給された超純水は，ステージ浮上で生じる流体隙間とその周辺にあるランド部を通過して外部へ流出するようになっている．図 3(b)は，ポケット部，ランド部の概観図である．

以下に，本試料ステージの設計について述べる．静圧系において，流体隙間を h とすると荷重 $W(h)$は次式のように表される．

$$W(h) = A_e P_r(h) \tag{1}$$

ここで，A_eは有効支持面積，$P_r(h)$はポケット内の圧力である．剛性 K は荷重の微分として以下のように与えられる．

$$K = \frac{\partial W(h)}{\partial h} \tag{2}$$

支持部のポケット内における圧力は供給圧力から流体絞りでの圧力損失を差し引いた値を示す．超純水の流量 Q は，支持面内におけるランド部の流れがレイノルズの方程式に従うとすると次式で表される．

$$Q = \frac{Bh^3}{\mu} P_r(h) \tag{3}$$

ここで，$B=L/12\,w$，w はランド幅，L はランド長さ，μ は粘性係数である．流体絞りに円筒絞りを用いたとき，そのコンダクタンスで決まる流量 Q_0は，供給圧力を P_s，円筒の直径を d，長さを l，$k_c=\pi d^4/128$ として次式のようになる．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society for Precision Engineering

$$Q_0 = \frac{k_c}{l}(P_s - P_r(h)) \tag{4}$$

(3), (4)の流量 Q, Q_0 が等しいので，剛性は次式のようになる．

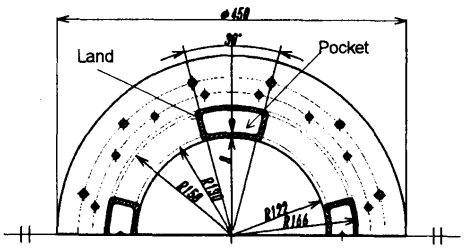
$$K = \frac{\partial W}{\partial h} = \frac{3Bh^2 A_e k_c}{(Bh^3 + k_c)^2} P_s \tag{5}$$

剛性 K が最大となるように $\partial K / \partial k_c = 0$とすると，加工ステージに加わる荷重 W および剛性 K と流体隙間 h の関係は，使用時の設定荷重および流体隙間を W_0, h_0 として，次式のようになる．

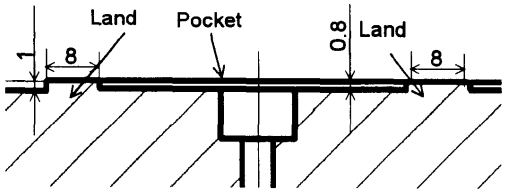
$$W = \frac{A_e P_s k_c}{Bh^3 + k_c} = \frac{A_e P_s h_0^3}{h^3 + h_0^3} \tag{6}$$

$$K = \frac{3Bh^2 A_e k_c}{(Bh^3 + k_c)^2} P_s = \frac{3}{2} \cdot \frac{W_0}{h_0} \tag{7}$$

本ステージシステムでは，永久磁石による吸引力をできるだけ大きくして剛性を高めると同時に，安定したステージ浮上量を得るために，磁気ギャップに対して磁気力の変動が少ないことが望まれる．本ステージでは，磁束密度の大きい住友特殊金属製のネオマックス(Nd/Fe/B 系磁石)を**図 4** に示す構造で対向させ，磁気カップリングを構成し，加工チャンバーと駆動部を収めるチャンバーの隔離ために，磁極間を 200 μm とし，そこに非磁性のステンレス(SUS316)箔を挿入した．この構成時の流体隙間と磁石による吸引力の関係を実測した結果が**図 5** である．磁極間距離を 200 μm と比較的大きく設定しているため，磁気力の変動が少ないことがわかる．図 5 には，式(6)から求めた静圧支持力も示している．静圧による支持力と磁気力の差から，縦方向に 7.1×10^7 N/m 程度の剛性が得られていることがわかる．これは，EEM 加工において十分な剛性である．また，2 つの曲線の交点から，浮上量は 15 μm となることがわかる．一方，このときの横ずれに対する磁気カップリングの剛性の実測値は 4×10^5 N/m (40gf/μm)であった．EEM 加工において求められる横方向の位置決め精度は，数値制御加工の場合であっても 10μm 程度である．この場合，4N (400gf)が許容荷重となるが，非接触加工である EEM においては必要十分な値である．これらの結果をもとに決定した静圧ステージのパラメーターを**表 2** に示す．作製した試料ステージの横剛性や縦剛性は，所定の値を得ている．このときの超純水の消費流量を計測したところ，設計値の約 3 倍となり，この流量から式(3)により隙間を算出すると 21 μm であった．また，ステージの浮上量を測定したところ，その値は約 15 μm となり，設計値と一致していた．これは，静圧ステージ支持部の取り付け時のたわみ等により，部分的に流体隙間の広い部分があるためと推定される．

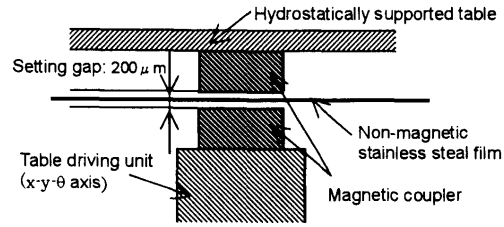


(a) Overhead view of hydrostatic support plate

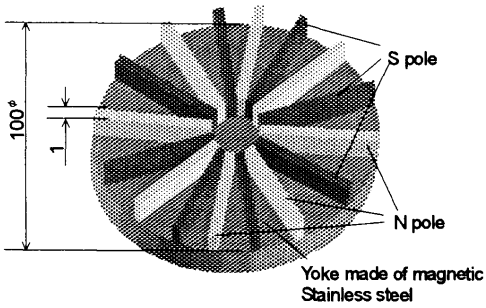


(b) The sectional view of a part of hydrostatic support plate

Fig.3 Schematic view of hydrostatic support plate



(a) Schematic drawing of magnet coupling



(b) Construction of magnet coupling

Fig.4 Schematic view of magnetic coupling

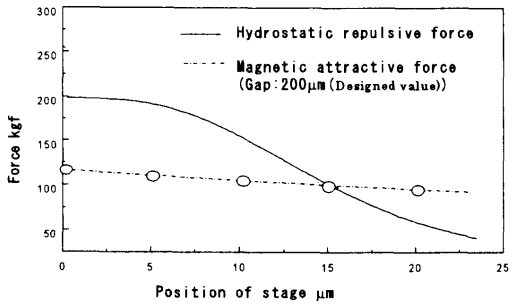


Fig.5 Relationship between the stage-gap and hydrostatic repulsive and magnetic attractive forces

Table 2 Specification of the hydrostatic supporting system

Pumped-up pressure	7×10^5Ps (7kgf/cm^2)
Flux of ultrapure water	500cc/min
Hydrostatic bearing gap	15μm
Magnetic gap	200μm
Load	10^3N (100kgf)
Effective cross section of pad	2800mm^2
Rigidity in lateral direction	4×10^5N/m (40gf/μm)
Rigidity in gap direction	1.0×10^8N/m (10kgf/μm)

NII-Electronic Library Service

The Japan Society for Precision Engineering

2.3 加工ヘッド

EEM では，超純水と微粒子を混合した加工液を作製し，加工液を加工物表面に供給する．そして，加工液中の微粒子表面の原子と加工物表面の原子とが化学的に相互作用し，加工物表面の原子が除去される．加工物表面の原子を除去する為には，加工物表面上に高速のせん断流を発生させる必要がある．EEM では，これまでに高分子（ポリウレタン）製の回転球を用い，加工物と回転球間に生じる弾性流体潤滑流れを利用するものと，高圧力のノズル吐出流れを利用するものが開発されている．本研究では，一括加工域の大きさの自由度が大きいスリット状に開口したノズル型の加工ヘッドを用いた．その構造およびその仕様の一例を図 6 に示す．このとき，安定した流れを形成するため，加工液の吐出は液中で行われる．また，図 6 に示すように，加工ヘッドと加工表面間の距離を 1mm 程度に設定することができるため，加工ヘッド走査の際の姿勢制御がきわめて容易であり，機械剛性や熱変形，その他の原因による装置の変形が加工速度に及ぼす影響は無視できる．加工ヘッドに供給する加工液の圧力伝達装置の概略図を図 7 に示す．加工液は清浄度が要求されるため，ポンプで直接加圧することができない．このため，図 7 に示すように，加工液をベローズによって隔離し，別の圧力媒体である市水の圧力を加工液に伝達する圧力トランスミッタを開発した．圧力トランスミッタは，チャンネル A および B の 2 基を用意した．プランジャポンプにより加圧された市水は，チャンネル A もしくは B のどちらかの圧力トランスミッタ内のベローズを押し縮め，ノズルから加工液を所定の圧力で吐出する．他方のトランスミッタは，ギヤポンプによって，市水が吸引され，加工槽から加工液を吸い上げ，ベローズ内が加工液で充填される．これらの動作は，自動バルブの制御により，チャンネル A および B の間で繰り返され，加工液が連続して加工ヘッドから吐出できる仕組みにした．

2.4 加工液循環精製システム

本加工装置では，加工環境の清浄化のために，新たに加工液の循環精製システムを開発し，これを搭載している．本システムは加工実施中およびそうでない時も常に動作し，装置の構成要素からの溶出や僅かなリークによって加工液中に混入する不純物を取り除くことができるシステムになっている．図 8 にそのシステムの構成を示す．加工液循環精製システムは，容量 10l の加工液の貯蔵タンクと直列に設置された固液分離ユニットおよび脱気ユニットから構成され，ポンプ C により，このループを 10l/min で加工液が循環している．固液分離ユニットによって，加工液から液相成分が分離され，溶存する金属イオンや有機分子が取り除かれる．さらに，脱気ユニットによって溶存ガスが除かれる．固液分離ユニットにより液相分が除去されるが，貯蔵タンクの液面が，液面計と自動超純水供給バルブによって制御されることで，加工液の濃度を一定に保つようになっている．さらに，貯蔵タンク内には攪拌装置と超音波発振装置を備え，加工液中の微粒子の分散状態を安定に保つことが可能である．加工中は，加工槽の液面をモニターすることによって，ポンプ A および B が適宜動作し，2l/min の流量で貯蔵タンクと加工槽間の加工液の循環が行われている．

加工環境の清浄度評価は，固液分離ユニットから排出される液相の分析によって行うことができる．分析の結果，溶存酸素，TOC ともに 1ppb オーダで，液相中の金属イオン濃度についても，ICP-MASS (inductively coupled plasma mass spectroscopy) による測定から，数 ppb であることが分かった．溶存酸素および TOC の分析を行った一例を図 9 および図 10 に示す．実験室雰囲気から導入された溶存酸素や有機不純物は，加工装置を密閉後 15 時間程度で 1ppb レベルに達していることがわかる．

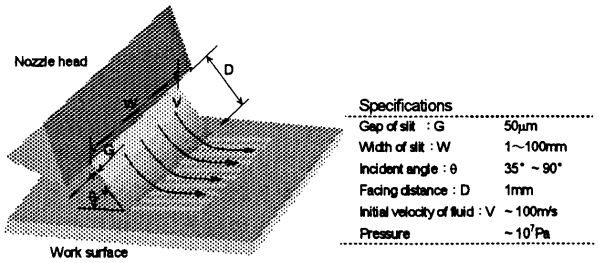


Fig.6 Schematic drawing of ultra-high-pressure nozzle-type head.

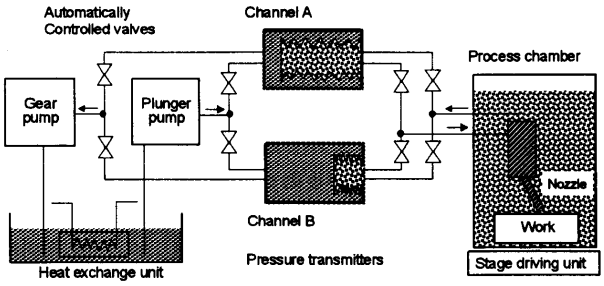


Fig.7 Schematic diagram of highly pressured ultrapure water generator

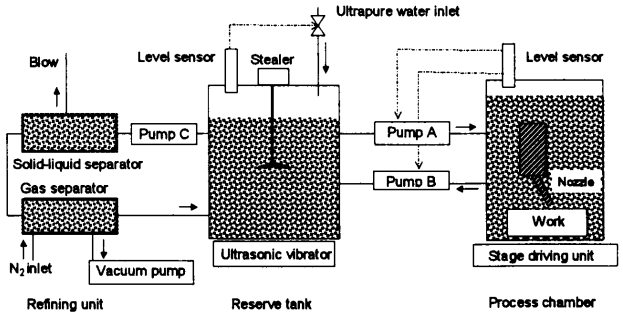


Fig.8 Schematic diagram of in-situ refining system for EEM fluid

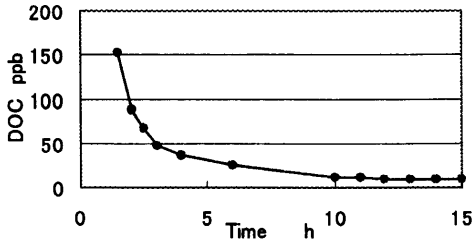


Fig.9 Elimination properties of DOC (dissolved oxygen concentration)

NII-Electronic Library Service

The Japan Society for Precision Engineering

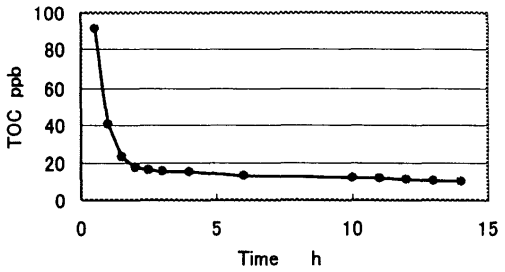


Fig.10 Elimination properties of TOC

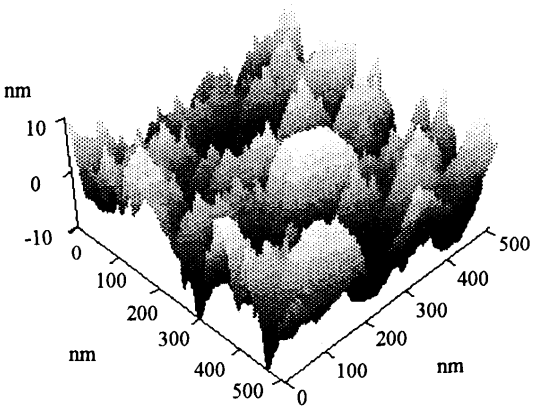
3. Si (001) 高温超純水処理面の加工

Si(001)表面に対して高温で超純水処理を行うと，液中の OH^- イオンの高温下での作用により，優先的に(111)面で構成されるマイクロピットとマイクロバンプが，一様かつ高密度に形成され，空間波長域で 1μm 以下の領域に極めてランダムなマイクロラフネスが発生する．EEM では，比較的粒径の大きい粒子を反応性粒子として用い，マイクロラフネスを構成する凹凸との幾何学的関係から凸部の原子と微粒子が選択的に作用し，これを除去することによって平坦化を実現している．本研究では，高温超純水処理し，マイクロラフネスを故意に増加させた Si(001)面をテスト加工表面に選ぶことにより，EEM の特徴である凸部の原子の選択的な除去の確認と同時に，有機不純物の混入と加工表面への付着によるマイクロラフネスの改善不良や新たな構造をもつマイクロラフネスの発生が無いことの確認を行った．加工条件を表 3 に示す．また，加工後に AFM 観察を行うために，以下のような洗浄処理を行った．加工終了後は，表面を乾燥させることなく装置から取り出し，超純水をフローさせた PTFE （poly-tetra fluoro-ethylene）バス内で数分間リンスして残留する加工液を除いた後，超純水をフローさせた石英バス内で約 10 分の超音波洗浄（周波数 1MHz）により付着微粒子の完全な除去を行う．このとき，加工表面はわずかに親水性を示すが，超音波発振の停止後，石英バス内に濃度が 1%となるようにフッ化水素水を加え，1～2 分後に完全な疎水面となった段階で取り出し乾燥した．

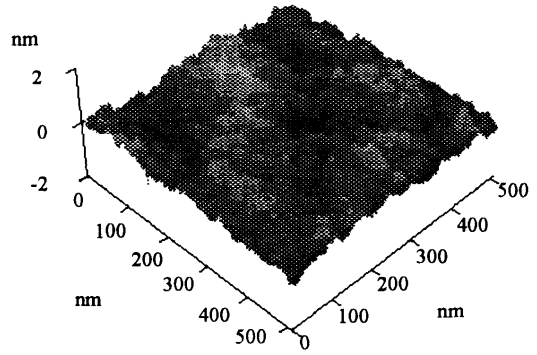
図 11 は，AFM（atomic force microscopy）（デジタルインスツルメンツ社製 NANOSCOPE IIIa）によって，加工前後の表面を計測した結果である．前加工表面のマイクロラフネスは Ra: 3.76nm［P-V: 45.18nm, RMS:4.63nm］であるのに対して，EEM 加工表面では，Ra: 0.15nm [P-V: 1.63nm, RMS: 0.19nm]であった．また，加工面内の他数点での測定結果も同様であり，このことから，全域で安定に平坦化が進んでいることが推察できる．また，このときの加工量は 50nm であり，前加工面のマイクロラフネスの peak-to-Valley である 45.2nm とほぼ同等の除去により，0.1nm（RMS）のレベルで表面の平坦化が行われていることがわかる．さらに，図 12 は AFM による測定結果の PSD (power spectral density)解析[19]を行った結果である．空間波長 1μm から 0.01μm のすべての領域で，1/100 以上の改善が見られる．これは，各空間波長領域で粗さの振幅が平均して 1/10 以下に低減されたことを示している．また，マイクロラフネスのスペクトル構造に違いが生じることなく，加工とともに全空間波長域で

Table 3 Process parameters and conditions

Work piece	Si (001)
Material of fine powder particle	SiO_2
Shape of fine powder particle	Sphere
Diameter of fine powder particle	2μm
Volume-concentration	3.0w%
Temperature of fluid	23℃
Nozzle conditions	
Gap of slit: G	100mm
Width of slit: W	20mm
Incident angle: θ	35°
Facing distance: D	1mm
Initial velocity of fluid: V	30m/s
Phenomenal removal rate	0.2nm/min
Removal depth	50nm



(a) Commercially available Si(001) wafer surface
[P-V : 45.18nm, RMS : 4.63nm, Ra : 3.76nm]



(b) EEM processed surface（removal depth : 50nm）
[P-V : 1.63nm, RMS : 0.19nm, Ra : 0.15nm]

Fig.11 Surface profiles obtained AFM

その程度が急激に減少しており，本装置により安定した Si(001)表面の平坦化が可能であることが示されたといえる．

次報では，化学的加工法である EEM の安定かつ高精度な実施に不可欠な加工環境の清浄度および基本性能が確認された本装置により，超 LSI デバイス用に市販されている Si(001) ウエハを前加工面として，EEM による平坦化を行い，その表面の原子構造を STM (scanning tunneling microscopy) によって観察し，評価した結果について報告する．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society for Precision Engineering

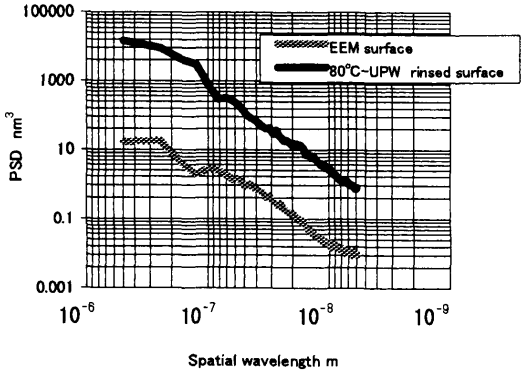


Fig.12 PSD analysis of the surface profiles obtained by AFM

4. おわりに

本研究では，半導体デバイス基板において最も重要かつ広範に利用されている Si(001)基板表面の原子レベルでの平坦化を目的に，EEM システムの開発を行った．その結果，マイクロラフネスの発生原因となる有機物汚染などの影響のない加工環境を実現し，本システムによって，高精度かつ高能率な Si(001)表面の平坦化が可能であることを示した．以下に，本研究で得た成果ならびに知見をまとめる．

(1) 半導体基板（特に Si(001)基板）の原子スケールでの平坦化を目的として，超清浄 EEM システムを開発した．

(2) 油蒸気や摩擦による磨耗粒子の発生の無い超純水静圧支持型の試料ステージを開発し，超清浄 EEM 装置用に組み込んで所定の動作を確認した．

(3) 加工液中の溶存ガス，有機物および金属イオンの除去を常時行うことができる循環精製システムを開発し，超清浄 EEM 装置用に組み込んだ．

(4) 加工液循環精製システムの動作により，加工液中の TOC および溶存酸素濃度，および金属イオン濃度が 1ppb オーダまで低減できることを確認した．

(5) 80℃の高温超純水により処理した Si(001)表面を加工した後，AFM によって加工表面を計測した．その結果，前加工表面マイクロラフネスの peak-to-valley である 45.2nm とほぼ同等の 50nm の除去加工により，0.1nm (RMS)のレベルで Si(001)表面の平坦化が行われることを確認した．これにより，表面凸部の原子から選択的に加工され，表面の平坦化が進む EEM の平坦化メカニズムが安定に機能していることを確認した．

(6) 加工前後の表面のマイクロラフネスを PSD 解析した結果，そのスペクトル構造の変化を伴うことなく，原子レベルの平坦化が進むことを確認した．また，この結果は加工部の他数点においても同等に得られ，有機不純物等の影響によるマイクロラフネス改善の不良や，あたらたな構造をもつマイクロラフネスの発生が無いことを確認した．

参考文献

1) H. Kageshima and K. Shiraishi: First-Principles Study of Oxide Growth on Si(100) Surfaces and at SiO_2/Si(100) Interfaces, *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 5936.
2) T. Aiba, K. Yamauchi, Y. Shimizu, N. Tate, M. Katayama and T. Hattori: Initial Stage of Oxidation of Hydrogen-Terminated Si(100)-2× 1 Surface, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** (1995) L707.
3) Y. Nakagawa, A. Ishitani, T. Takahagi, K. Kuroda, H, Tokumoto, M. Ono, and K. kajimura: Scanning tunneling microscopy of silicon surfaces in air Observation of atomic images, *J. Vac. Sci. Technol.* **A8** (1990) 262.
4) Y. Morita and H. Tokumoto: Atomic scale flattening and hydrogen termination of the Si(001) surface by wet-chemical treatment, *J. Vac. Sci. Technol.* **A14** (1996) 854.
5) K. Endo, K. Arima, T. Kataoka, Y. Oshikane, H. Inoue and Y. Mori: Atomic structures of hydrogen-terminated Si(001) surfaces after wet cleaning by scanning tunneling microscopy, *Appl. Phys. Lett.* **73** (1998) 1853.
6) K. Arima, K. Endo, T. Kataoka, Y. Oshikane, H. Inoue and Y. Mori: Atomically resolved scanning tunneling microscopy of hydrogen-terminated Si(001) surfaces after HF cleaning, *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) 463.
7) Y. Mori: Activities on perfect Surfaces in Osaka University, in *Precision Science and Technology for Perfect Surfaces*, Y. Furukawa, Y. Mori & T. Kataoka (eds.), JSPE, Tokyo, (1999) iii.
8) 森 勇藏，山内和人，遠藤勝義：極限精密加工技術，精密工学会誌，**57** 1 (1991) 36.
9) 森 勇藏，井川直哉，奥田 徹，杉山和久，山内和人：EEM(Elastic Emission Machining)による超精密数値制御加工に関する研究，精密機械，**49** 11 (1983) 1540.
10) 森 勇藏，奥田 徹，杉山和久，山内和人：EEM(Elastic Emission Machining)による超精密数値制御加工，精密機械，**51** 5 (1985) 1033.
11) Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo: Elastic Emission Machining, *Precision Engineering*, **9** (1987) 123.
12) Y. Mori, K. Yamauchi, and K. Endo: Removal Mechanism in Elasic Emission Machining, *Precision Engineering*, **10** (1988) 24.
13) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Endo, T. Ide, H. Toyota, K. Nishizawa and M. Hasegawa: Evaluation of Elastic Emission Machined Surface by Scanning Tunneling Microscopy, *J. Vac. Sci. Technol.* **A8** (1990) 621.
14) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Sugiyama, K. Inagaki, S. Shimada, J. Uchikoshi, H. Mimura, T. Imai, and K. Kanemura: Development of Numerically Controlled EEM (Elastic Emission Machining) System for Ultraprecision Figuring and Smoothing of Aspherical Surfaces, in *Precision Science and Technology for Perfect Surfaces*, Y. Furukawa, Y. Mori & T. Kataoka (eds.), JSPE, Tokyo, (1999) 207.
15) K. Yamauchi, K. Hirose, H. Goto, K. Sugiyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano and Y. Mori: First-principles of removal process in EEM (Elastic Emission Machining), *Computational Material Science*, **14** (1999) 232.
16) 森 勇藏他：「固体表面の電子状態シミュレーションとソフト加工による実証」終了報告書：科学技術振興事業団 (1999) B-349.
17) 山内和人，杉山和久，稲垣耕司，山村和也，佐野泰久，森 勇藏：SPV(Surface Photo-voltage)スペクトロスコピーによる超精密加工表面評価法の開発，精密工学会誌，**66** 4(1999) 630.
18) 山内和人，片岡俊彦，遠藤勝義，稲垣耕司，杉山和久，牧野修之，森 勇藏：EEM(Elastic Emission Machining)に関する研究－加工液中の溶存酸素が Si ウエハー表面に与える影響－，精密工学会誌，**64** 6 (1998) 907.
19) 角田均：シリコンウエハー表面マイクロラフネスの評価－パワースペクトル解析の応用－，応用物理，**66** 12 (1997) 1316.

NII-Electronic Library Service