The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	数値制御EEM (Elastic Emission Machining) 加工システムの開発
Author(s)	Yamauchi, Kazuto; Mimura, Hidekazu; Mori, Yuzo
Citation	表面科学. 2001, 22(3), p. 152-159
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/85461
rights	This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

解　説

表面科学 Vol. 22, No. 3, pp. 152−159, 2001

数値制御 EEM（Elastic Emission Machining）加工システムの開発

山内和人・三村秀和・森　勇藏

大阪大学大学院工学研究科精密科学専攻　〒565−0871　大阪府吹田市山田丘 2−1

（2000 年 12 月 22 日受理）

Development of Numerically Controlled EEM (Elastic Emission Machining) System

Kazuto YAMAUCHI, Hidekazu MIMURA and Yuzo MORI

Department of Precision Science and Technology, Faculty of Engineering, Graduate School of Osaka University
2−1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565−0871

(Received December 22, 2000)

Ultraprecise figuring systems are needed in many scientific fields. For example the mirrors for synchrotron-radiation X-ray facilities and extreme ultraviolet lithography systems should have atomically smoothed surfaces and extremely high figure accuracy of the order of nanometer range. Furthermore, next-generation semiconductor surfaces should be atomically flat as the substrates for nanometer devices. The EEM (Elastic Emission Machining) system developed by the authors can provide the atomically smoothed surfaces free from any crystallographic damage. A basic research has been performed to evaluate the use of a numerically controlled EEM system for ultraprecise figure corrections. We have constructed an EEM figuring system for ultraprecise scientific components. Testing showed that its performances are sufficient for figuring with nanometer accuracy.

1. は　じ　め　に

今日，最先端の科学技術分野では，原子的に平滑で nm レベルの形状精度をもつ極めて高精度な自由曲面が，様々な領域で要求されている。例えば，SPring-8 を始めとする第 3 世代のシンクロトロン放射光を利用した X 線顕微鏡や X 線干渉計，また，次世代の高集積化半導体デバイス実現の鍵を握ると言われる極紫外リソグラフィ装置などでは，形状誤差が 0.1 nm（RMS; Root Mean Square）レベル，スロープエラーが 10^{-7} rad レベルの極めて高精度な反射ミラーが必要とされている[1~4]。これらの実現に向けて様々な加工プロセスの開発が行われており，従来のピッチ研磨を小型工具により実現するローカルピッチ研磨やイオンビーム加工などが nm レベルの形状修正が可能な最終仕上げ加工技術として，精力的に研究されている[2~4]。しかし，これらの加工法では，加工速度に無視できない影響を与えるパラメータが非常に多く，いまだに加工特性の十分な安定化を実現したプロセス装置が開発されていない。現在のところ，10 nm オーダの形状誤差をもつ加工物を nm レベルの精度にまで形状修正するためには，数回から十数回の加工と計測が繰り返されるのが実情である。しかも，これらの加工技術は表面に対して，結晶学的なダメージを与える力学的な作用を利用する加工法であることから，透過型の光学素子などでは，適用できない場合もある。一方，半導体表面などの機能表面でも，次世代のナノスケールデバイスの開発に向け，その基板の幾何学的な精度が原子スケールまで求められることは明らかである。しかし，加工時に導入される機械的な欠陥が，その上に形成されるデバイスの性能に著しい悪影響を与えることは明白であり，新しい加工技術の確立が待たれている。

著者らの開発した EEM は，微粒子表面と加工物間の化学反応に基づく加工法であり，結晶学的性質を損なうことなく原子レベルで平滑な表面を得ることができ

E-mail: yamauchi@prec.eng.osaka-u.ac.jp

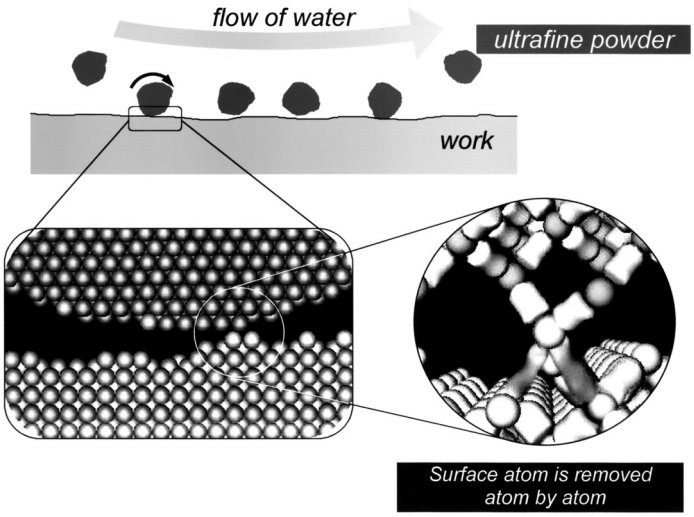


Fig. 1　Schematic drawing of EEM mechanism.

る[5~16]。また，加工物表面への微粒子の供給速度を一定にすることができれば，他の加工法で行われるような加工速度に影響する多くのパラメータを複雑に制御する必要はない。さらに，加工装置に対して，機械剛性や精度を要求しないことも大きな特徴である。

ここでは，EEM の加工原理の簡単な紹介を行った後，高精度光学素子や半導体基板の加工を行うことのできる実用に供し得る超精密 EEM 加工システムを開発したので[17]，これらについて述べる。開発に際し，表面の平滑性が原子レベルであると同時に，マクロな形状精度についても，1 nm（P-V; Peak to Valley），0.1 nm（RMS）レベルの達成を目標に掲げた。

2．EEM の加工原理

EEM では，**Fig. 1** に示すように，超純水の流れによって加工物表面に微粒子が供給され，加工物と微粒子の両表面間で化学結合が生じた後，同じ流れによってこの微粒子が取り除かれる際に，原子単位の加工が進むと考えられている。微粒子には，多くの場合，金属酸化物が用いられ，表面の水酸基が反応サイトとなる。水素または水酸基で終端された加工物表面と反応すると，H_2 または H_2O 分子を放出し，微粒子と加工物の表面原子間に酸素を介した化学結合が生じ，電気陰性度の大きい酸素により，加工物表面原子のバックボンドの結合に関与する価電子が奪われ，表面原子の除去が進むことが，第一原理分子動力学シミュレーションを用いた著者等の研究からわかりつつある[14]。微粒子に SiO_2 および ZrO_2 を用いた場合の表面原子除去過程のシミュレーションの例を

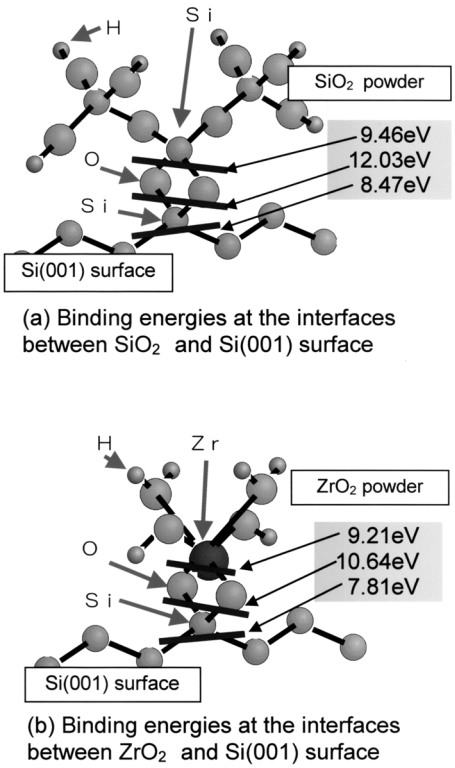


Fig. 2　Estimated binding energies at the interfaces between ultrafine powder and Si(100) surface.

Fig. 2 および **Fig. 3** に示す。Fig. 2 は微粒子と Si（001）表面間のいろいろな断面の結合エネルギーを評価した結

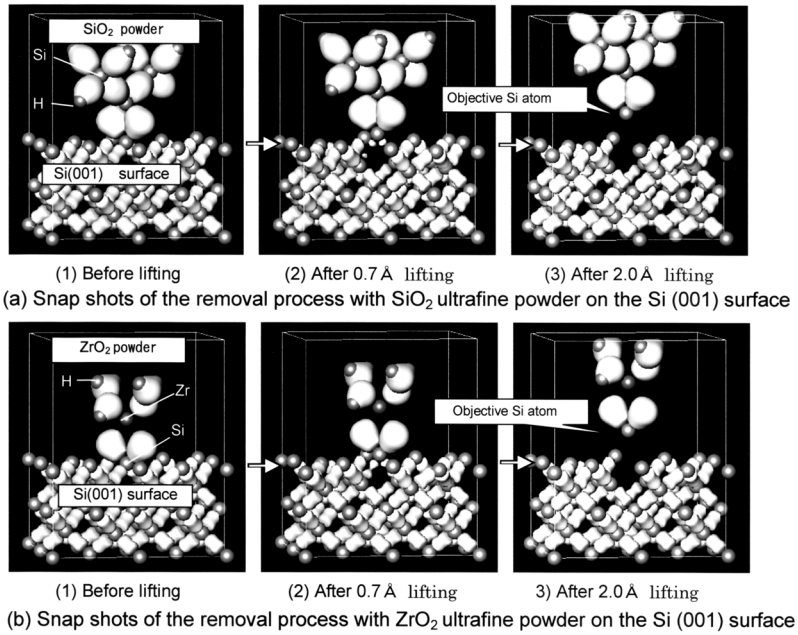


Fig. 3 Snap shots of the atomic removal process from Si(001) surface obtained by first-principles molecular dynamics simulation.

果であり，化学結合した微粒子と加工物表面が分離する際，結合エネルギーの最も小さい表面 Si のバックボンドの結合が切れ加工が進むことを示している。また，バックボンドの結合エネルギーは ZrO_2 の場合のほうが SiO_2 の場合より十分に小さく，ZrO_2 微粒子の方が加工能率の点から優れていることを示している。実験により評価した結果でも，ZrO_2 の方が SiO_2 の場合より，10 倍から数十倍の速度で加工できることがわかっている[6, 16]。Fig. 3 は，表面原子除去過程を分子動力学シミュレーションにより観察した結果である。微粒子と結合した Si 表面原子が微粒子に結合したまま引き上げられ，原子を単位とする除去が進行することが見て取れる。このとき，微粒子に与える引き上げ力は，超純水の流れにより容易に与えられることも見積もられている。

3．EEM における加工精度の支配要因

EEM は，微粒子と加工物表面間の化学反応に基づく加工法であり，加工速度は一義的に加工物上の所定の領域への微粒子の供給速度に依存する。このため，長時間安定して一定の供給速度を保証できる加工ヘッドの開発が重要である。さらに，EEM において原子的に平滑な表面を安定して得るためには，加工環境の清浄化が重要であることも明らかになってきている。例えば，加工表面に存在する有機不純物などの異物は，微粒子・加工物表面の間の化学反応に対してマスクとして作用し，マイクロラフネスの発生原因となることがわかっている[14]。また，加工液中に溶存する酸素は，極めて活性であり，Si 等の表面を高速に酸化することもわかっている[16]。本装置の開発では，様々な項目において清浄化対策を施し，EEM に基づく安定した超精密加工システムの実現を目指した。

4．数値制御加工装置

4.1 数値制御ステージ

開発した加工装置の全体写真を **Fig. 4** に示す。Fig. 4（a）に示す加工装置は，シンクロトロン放射光の中でも硬 X 線領域の光の集光に用いるトロイダルタイプの斜入射ミラーなど，様々な大型の非球面の加工を目的としている。Fig. 4（b）に示す加工装置は，軸対称非球面や半導体基板などの加工を目的として開発したものである。どちらの装置も，各ステージの駆動ねじや案内・軸受には，超純水を作動流体とする静圧支持システムを開発し，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無くすことができ，また，相対運動する支持部がすべて非接触であることから，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。さらに，両装置とも加工装置全体が密閉できる構造になっており，内部を窒素ガス雰囲

気にすることで，酸素ガスの加工液への溶存を避けることができる。また，必要に応じて，加工槽内を完全に超純水で満たすことも可能である。

4. 2　加工ヘッド

微粒子を加工物表面と化学的な相互作用を伴って付着させ，これを取り除くためには，加工物表面上のせん断流が 5 m/s・μm 程度の速度勾配をもつ必要がある[14]。

(a) Numerically controlled EEM system for SR mirrors, etc.

(b) Numerically controlled EEM system for semiconductor surface, etc.

Fig. 4　Photographs of numerically controlled EEM systems.

高速せん断流れを発生でき，かつ数値制御加工の際の高い制御性と安定性を得るため，本研究では高圧力加工液のノズル吐出流れを利用する加工ヘッドを新たに開発した。その構造およびその仕様の一例を **Fig. 5** に示す。スリット状に開口したノズルより加工液を吐出するもので，加工表面上の特定の位置に加工液を供給することができ，数値制御に基づく形状修正加工システムへの適用が可能である。このとき，安定した流れを形成するため，吐出は気中ではなく液中で行う。従来の数値制御 EEM 加工装置では，加工液中でポリウレタン製の球を加工物表面に所定の荷重で押し付けながら回転させ，このときの弾性流体潤滑流れを利用する加工ヘッドが用いられた[6~9]。しかし，発生する流体膜厚が 1 μm 程度であり，使用できる微粒子径に制限があり，また，確率的に生じる加工液中の凝集粒子の影響により，長時間安定した加工特性を得ることが困難であった。また，構成材料が有機高分子であることから加工槽の有機汚染の原因となる問題もあった。本ヘッドでは，これらの問題をすべて解決することができる。さらに，Fig. 5 に示すように，加工ヘッド・加工表面間の距離を 1 mm 程度に設定することができるため，数値制御加工における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プロセス装置のひずみが加工速度に及ぼす影響は無視できるほど小さい。

5．数値制御システム

5. 1　数値制御システムの構成

本装置における数値制御システムの構成を **Fig. 6** に示す。位相シフト光干渉計を用い，恒温室において加工前表面の形状を計測し，また，本加工ヘッドを単位時間滞留したときに得られる単位加工痕形状を顕微型位相シフト光干渉計により計測する。これらのデータから，所定形状を得るために必要な加工ヘッドの滞留時間分布を得ることができ，この逆数である送り速度分布を数値制御盤に送ることによって数値制御加工が行われる。また，

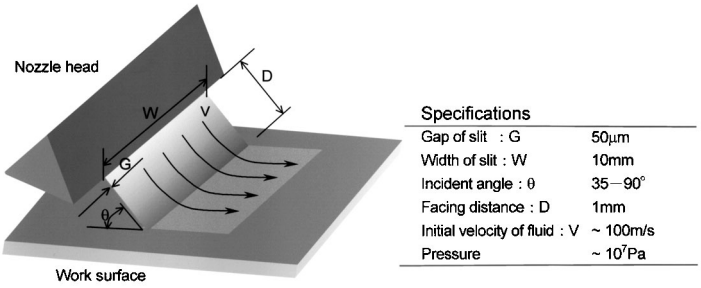


Fig. 5　High pressure jet-nozzle-type head for numerically controlled EEM system.

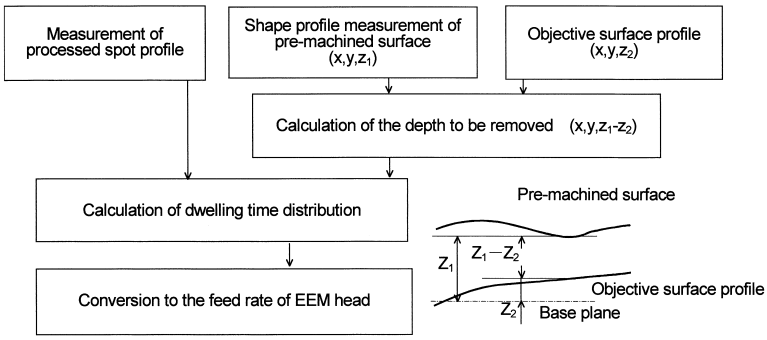


Fig. 6 Schematic diagram of numerically controlled EEM procedure.

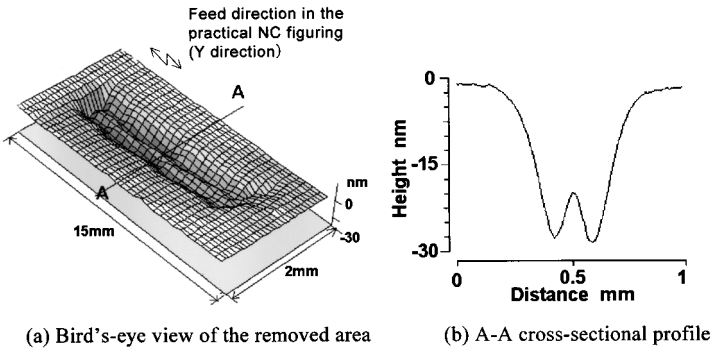


Fig. 7 Machined spot profile measured by microscopic phase sifting interferometry.

加工後の表面形状は，同様に位相シフト光干渉計によって計測し，評価することができる。

5.2 数値制御データ算出プログラム

数値制御 EEM では，単位加工痕の大きさや形状により，形状修正が可能な空間周波数が制限され，期待される加工後の形状精度が影響を受ける。本システムで開発した数値制御データ算出プログラムでは，用いる加工ヘッドに応じて加工後の形状誤差の自乗平均を最小にするヘッドの送り速度分布を求めることができる。形状誤差の評価点を r_i とし，加工前形状の計測からわかる必要加工量分布を $M(r_i)$，場所 j に加工ヘッドを静止させたときの単位加工痕の加工量分布を $N_j(r_i)$，加工ヘッドの場所 j における滞留時間を t_j とすると，形状誤差の自乗平均 E は，

$$E=\sum_{i}^{m}\{M(r_i)-\sum_{j}^{n}N_j(r_i)-t_j\}^2 \qquad (1)$$

で与えられる。ここで，m は形状誤差の評価点の数であり，n は想定した静止加工位置の総数である。そして，次の連立方程式の解によって，滞留時間分布 t_j を得ることができる。

$$\frac{\partial E}{\partial t_j}=0 \ (j=1,\ 2,\ 3,\ \cdots,\ m) \qquad (2)$$

滞留時間 t_j の中に負の数がある場合は，必要加工量分布 $M(r_i)$ を全領域で一様に増加させ，すべての滞留時間が正となるところで計算を終える。このことより，全除去体積も最小にすることができ，加工能率の点からも，最適な数値制御加工条件を求めることができる。なお，隣接する送りの間隔は，これが原因で幾何学的に決まる凹凸を 0.1 nm(P-V) 以下にするように設定している。

6．数値制御による形状修正加工と精度の評価

Fig. 7 は，顕微型位相シフト光干渉計により測定した吐出角度が試料表面に対して垂直な場合の単位加工痕の一例である。また，加工前の形状を位相シフト光干渉計により測定した結果を **Fig. 8** に示す。Fig. 7 および Fig. 8 をもとに，式 (1)，(2) に従って，最適な加工ヘッド送り速度分布を算出し，形状修正加工を実施した後の計測結果を **Fig. 9** に示す。**Fig. 10** は，加工前後の形状を詳細に比較するため，加工面内の代表的な場所において，加工前の形状，修正加工によって得られるはずの予定形

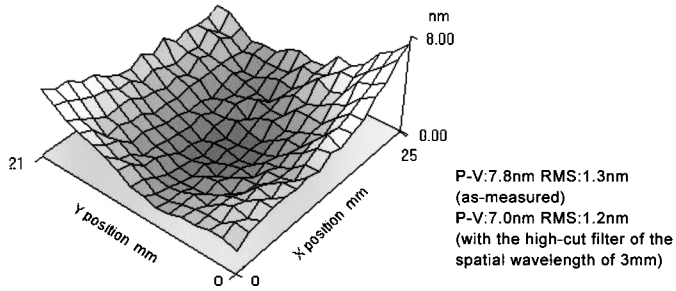


Fig. 8　Pre-machined surface profile measured by phase sifting interferometry.

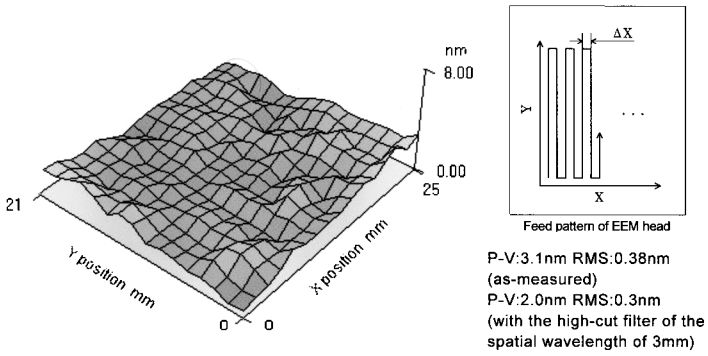


Fig. 9　Machined surface profile measured by phase sifting interferometry (Head-feed pattern employed in this NC figuring is also shown).

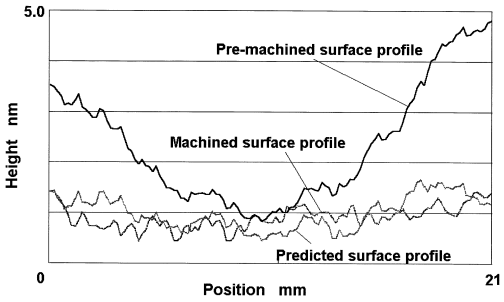


Fig. 10　Comparison between the profiles of pre-machined, predicted and machined surfaces along the line (X＝20 mm).

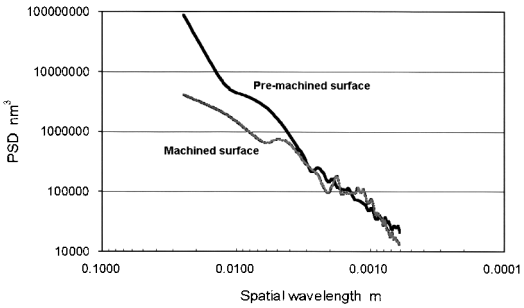
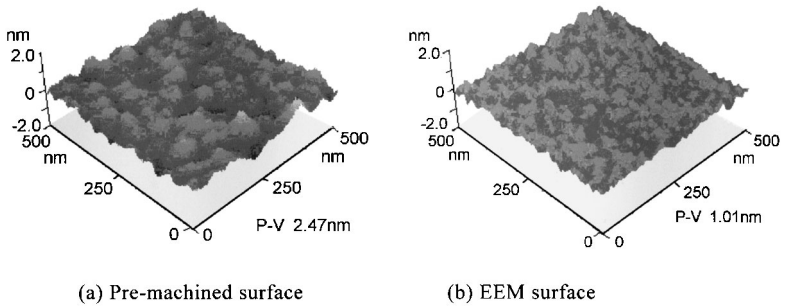


Fig. 11　PSD（Power spectral density）curves of pre-machined and machined surfaces.

状および加工後の実測形状について，2 次元表示したものである。Fig. 7 に示すように，単位加工痕の形状はスリットタイプのノズルを用いたことから X，Y 方向に極めて強い異方性があり，数値制御による形状修正のための加工ヘッドとして，必ずしも適当ではない。このため，Fig. 10 の前加工面形状と予定形状を比較すると，1 mm 程度以下の比較的高い空間周波数領域の凹凸は 2 つの曲線で完全に一致しており，この周波数領域の形状は，本ヘッドでは原理的に修正できないことを示している。しかし，空間周波数が低い領域では，±0.5 nm 以上の精度で所定の平面まで修正加工が可能であることが予定形状から予想できる。加工後形状の実測値も，予想形状と 1 nm（P-V）を十分に上回る精度で一致しており，所定の形状修正加工が行われたことを示している。

加工精度について，さらに定量的な評価を行うため，Fig. 8 および Fig. 9 のパワースペクトル密度解析を行った結果を **Fig. 11** に示す。図は X 方向について解析した結果であるが，Y 方向について行った場合でもほぼ同等



(a) Pre-machined surface (b) EEM surface

Fig. 12 AFM observations of as-received and EEM processed Si(001) wafer surface.

であった。これは，前加工面の形状誤差にX，Y方向の異方性がなかったことに加え，単位加工痕形状の異方性についても，スリット長手方向（Y方向）の影響が，X，Y方向のどちらの形状修正精度にも同等に影響するためと思われる。図より，本加工実験において，空間波長が3〜4 mmより長い領域で有効な形状修正が行われていることが確認できる。また，最大および自乗平均形状誤差は，前加工面が7.8 nm（P-V），1.3 nm（RMS）であり，形状修正加工後は，3.1 nm（P-V），0.38 nm（RMS）であった。形状計測における最小空間波長（干渉じま検出用アレイセンサの1ピクセルに相当）は約0.2 mmであり，この空間波長が本測定のカットオフ波長となる。本実験において採用した加工ヘッドの特性から，形状修正が有効に機能したと考えられる空間波長3 mmをカットオフ波長とする低周波領域で評価すると，前加工面の形状誤差が7.0 nm（P-V），1.2 nm（RMS）に対して，形状修正加工後の形状誤差は，2.0 nm（P-V），0.30 nm（RMS）であり，極めて高い精度で数値制御加工が行われたことを示している。ところで，形状計測の再現性の評価結果では，測定の度に1 nm（P-V）程度の変化が生じている。これは，測定環境の安定性が原因と考えられる。しかし，実形状と相関をもたない誤差形状が加わった測定結果に基づく精度解析では，最大誤差，自乗平均誤差の双方とも，統計学的には，実際より大きく見積もられるものと予想され，測定誤差を考慮しても，本加工システムによって，1 nmレベルの形状修正加工が可能であると結論付けることができる。

7．表面のマイクロラフネスおよび結晶学的な評価

EEM加工された表面（Si(001)表面）のマイクロラフネスをAFMによって観察した結果を**Fig. 12**に示す。比較のために，現行の超LSI用ウエハ表面の測定結果を示している。現行のウエハ上に存在する10〜50 nm周期のラフネスが原子レベルで平坦化されていることがわかる。さらに，**Fig. 13**は著者らが開発した表面光起電力スペクトロスコピー装置によって，加工表面層の準位密度を評価した結果である。本装置により，極めて高い感度でSi加工面のミッドギャップ準位を非破壊で評価できることがわかっている[15]。この結果より，機械的な手法によって加工された表面やアルカリによるエッチングによって得られた表面には，非常に多くのミッドギャップ準位が存在しているのに対して，EEM加工表面は，ふっ酸・硝酸系のエッチャントによるエッチング面と同等またはそれ以下の準位密度になっていることがわかる。

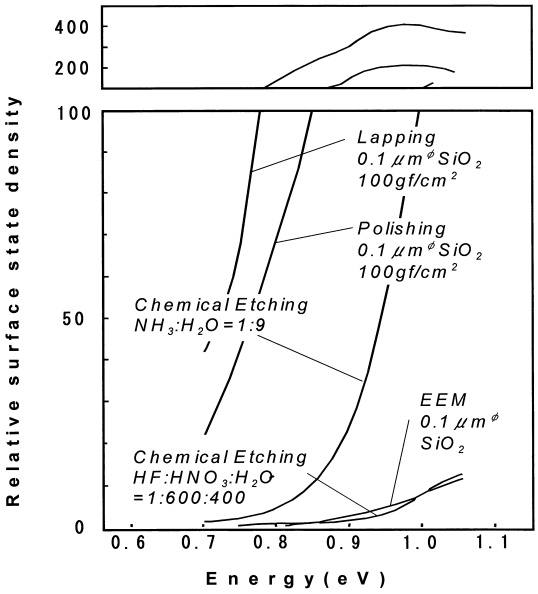


Fig. 13 Relative surface state densities of finely-prepared surfaces obtained surface photo-voltage spectroscopy.

8. お わ り に

ここでは，微粒子表面の化学的な反応性を利用したEEMについて，その加工原理を簡単に紹介した後，著者らの開発したX線ミラー等の高精度光学素子や半導体基板の加工に適用可能な数値制御EEM加工システムについて述べた。

本加工システムにより得られる表面は，ふっ酸・硝酸系のウエットエッチングと同程度の低損傷加工法であることを表面光起電力スペクトロスコピー装置による観察結果から示し，表面のマイクロラフネスに関しては，原子レベルで平坦であることをAFMによる観察結果から示した。そして，実用機レベルを目標に開発した数値制御EEM加工システムでは，これらの加工特性を維持しながら，マクロな形状修正においても1 nmの精度で目的形状を創製できることを示した。

SPring-8などの第3世代放射光が拓くであろう，コヒーレントX線光学のための光学素子の加工や次世代の半導体基板表面の加工を進めており，EEM加工表面の果たす役割について，検討と評価を行っている。

謝　辞

本研究の一部は文部省科学研究費（COE形成基礎研究費08CE2004）ならびに新技術事業団（現科学技術振興事業団）からの研究費を受けて行われたものであることを付記し，ここに深く謝意を表す。

また，数値制御EEM加工システムの設計および製作において，光洋精工株式会社からの多大なるご協力を得たことを記し，深く謝意を表す。

文　献

1) T. Ishikawa: “Precision Science and Technology for Perfect Surfaces”, ed. by Y. Furukawa, Y. Mori and T. Kataoka (JSPE, Tokyo, 1999) p. 3.
2) H. Kinoshita, T. Watanabe, J. Daniel, D. Bajuk, Y. Platonov and J. Wood: “Precision Science and Technology for Perfect Surfaces”, ed. by Y. Furukawa, Y. Mori and T. Kataoka (JSPE, Tokyo, 1999) p. 9.
3) K. B. Becker: “Precision Science and Technology for Perfect Surfaces”, ed. by Y. Furukawa, Y. Mori and T. Kataoka (JSPE, Tokyo, 1999) p. 51.
4) M. Weiser, J. Froschke, H. Handschuh, M. Julich, M. Mayer and G. Seitz: “Precision Science and Technology for Perfect Surfaces”, ed. by Y. Furukawa, Y. Mori and T. Kataoka (JSPE, Tokyo, 1999) p. 61.
5) Y. Mori: “Precision Science and Technology for Perfect Surfaces”, ed. by Y. Furukawa, Y. Mori and T. Kataoka (JSPE, Tokyo, 1999) p. iii.
6) 森　勇藏，山内和人，遠藤勝義：精密工学会誌 **57**, 36 (1991).
7) 森　勇藏，井川直哉，奥田　徹，杉山和久，山内和人：精密機械 **49**, 1540 (1983).
8) 森　勇藏，奥田　徹，杉山和久，山内和人：精密機械 **51**, 1033 (1985).
9) Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo: Prec. Eng. **9**, 123 (1987).
10) Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo: Prec. Eng. **10**, 24 (1988).
11) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Endo, T. Ide, H. Toyota, K. Nishizawa and M. Hasegawa: J. Vac. Sci. Technol. A **8**, 621 (1990).
12) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Sugiyama, K. Inagaki, S. Shimada, J. Uchikoshi, H. Mimura, T. Imai and K. Kanemura: “Precision Science and Technology for Perfect Surfaces”, ed. by Y. Furukawa, Y. Mori and T. Kataoka (JSPE, Tokyo, 1999) p. 207.
13) K. Yamauchi, K. Hirose, H. Goto, K. Sugiyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano and Y. Mori: Computational Mat. Sci. **14**, 232 (1999).
14) 森　勇藏ほか：「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.
15) 山内和人，杉山和久，稲垣耕司，山村和也，佐野泰久，森　勇藏：精密工学会誌 **66**, 630 (1999).
16) 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：精密工学会誌 **64**, 907 (1998).
17) 森　勇藏，山内和人，杉山和久，稲垣耕司，三村秀和，今井利幸：精密工学会誌 (掲載予定).