

非接触ケミカルプロセスによる機能材料および 量子光学素子の超精密加工

研究ノート

山村和也*

Ultraprecision Machining of Functional Materials and
Quantum Optical Components by Noncontact Chemical Processes
Key Words : Atmospheric pressure plasma, Numerically controlled,
Figuring, X-ray mirror, Neutron mirror

1. はじめに

近年の最先端物づくりにおいては、極限レベルの機能や性能を達成するために、産業界のみならず基礎科学分野からも無歪かつ再現性の高いナノメートルレベルの形状創成能力が求められている。しかしながら、従来の機械加工法では脆性破壊や塑性変形を加工現象として利用するため、必然的にダメージが導入され、素材が本来有する優れた物理・化学的性質を維持することができない。また、工具が接触する加工であるために外部からの振動や熱変形等の影響により、工具の接触状態が変動して加工特性が変化するという、いわゆる母性原理に支配されてしまうため、ナノメートルレベルの加工精度を恒常的に達成することは極めて困難である。機械加工の精度を向上させるには、装置本体の剛性、ワークテーブルの運動精度、工具の品質、温度環境等のすべてにおいて高精度化を図る必要があり、結果として装置本体やユーティリティーの価格が極めて高額になるだけでなく、取扱いの難易度も格段に高くなるため、製造現場に導入する際のバリアが非常に高くなってしまふことは否めない。したがって、これらの諸問題を解決するためには、既存技術の改良だけでは極めて困難であり、新しい概念の加工技術の開発が望まれている。

我々は、大気圧プラズマを利用したプラズマ

CVM (Chemical Vaporization Machining) や、局在した液相エッチング領域を用いるローカルウェットエッチング (Numerically Controlled Local Wet Etching ; NC-LWE) 等の新しい非接触な化学的加工法を提案し、実用に供するための研究開発を行っている。本稿では、これら2つの加工法の概要と応用例を述べる。

2. プラズマ CVM

プラズマ CVM は、大気圧プラズマを用いることにより、加工現象としては化学的な反応を用いながら、機械加工に匹敵する空間制御性と加工能率とを有する新しい加工法の創出を目的とし、1988年頃から大阪大学の森らによって開発が進められてきた¹⁻³⁾。本加工法は、大気圧雰囲気中で空間的に局在した高周波プラズマによって高密度の反応種を生成し、加工物表面原子と反応させて揮発性の物質に変えることにより除去を行う加工法である。工具等の接触が無い原子単位の加工法であることから、外乱の影響を受けずに幾何学的に優れた加工面が得られる。さらに、高圧力下では衝突周波数が大きいため、イオンの運動エネルギーは小さい。したがって、イオン衝撃ダメージがほとんどないため、材料本来の性質を損なうことなく、結晶学的観点からも極めて優れた加工面が創成できる⁴⁾。当初は、チャンパーを用いてガス置換を行った雰囲気中でプラズマを発生させていたが、最近では完全に大気開放下で加工できる装置を開発し、チャンパーや真空ポンプ等のユーティリティーおよび加工プロセスを開始するまでの時間を不要とすることで、より実用的なものとなっている。

プラズマ CVM を水晶ウエハの厚みを均一化するプロセスに応用した例を紹介する。図1に示すのは、フォトリソグラフィ工程を援用した順メサ型水晶



*Kazuya YAMAMURA

1967年1月生
大阪大学・大学院工学研究科・精密工学
専攻博士前期課程修了(1991年)
現在、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 准教授
博士(工学) 超精密加工
TEL : 06-6879-7293
FAX : 06-6879-7293
E-mail : yamamura@upst.eng.osaka-u.ac.jp

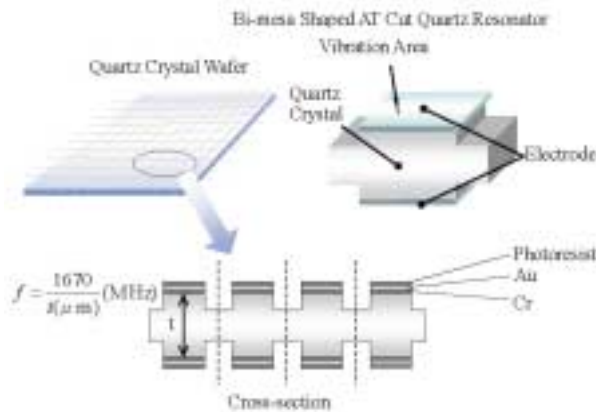
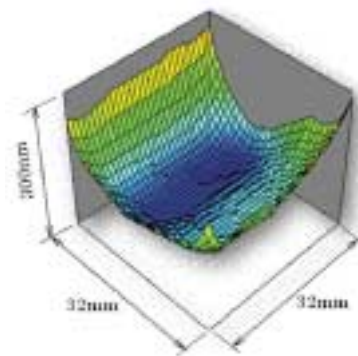
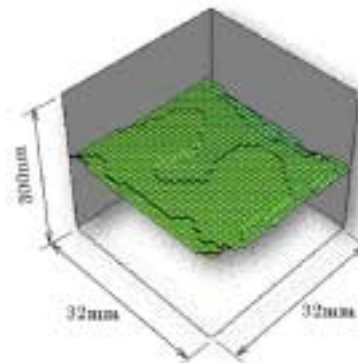


図1 順メサ型水晶振動子の作製プロセス

振動子の作製プロセスである。生産性を高めるためには半導体デバイスの作製プロセスと同様に、大型の水晶ウエハ上に多数の振動子を形成した後に、個々の水晶振動子に細分化する。しかし、従来の両面機械研磨による水晶ウエハの薄板化では、キャリアもしくはウエハそのものが破損したり、研磨中の面圧分布に起因するウエハ厚さの分布が生じたりしてしまう。共振周波数は厚さに反比例するため、厚さの分布は水晶ウエハ上に形成する個々の振動子の共振周波数のばらつきを引き起こす。したがって、金属電極を蒸着した後に周波数をモニターしながらイオンビームエッチングにより $\pm 2\text{ppm}$ 以下の周波数ばらつきを抑える調整が行われている。しかしながら、イオンビームエッチングはエッチングレートが小さいため、現状ではイオンビームエッチングによる調整範囲に水晶振動子の板厚をそろえるために、個々の振動子に分離した後に湿式エッチングにより許容厚さ範囲にしている。我々は、生産性を向上させるために、振動子を形成する前のウエハの段階でプラズマCVMを適用して厚さをそろえることを提案し、ATカットウエハにおける厚さの均一化を行った。ウエハの大きさは $40 \times 40 \text{ mm}^2$ 、厚さ約 $60 \mu\text{m}$ であり、反応ガスにはヘリウムで希釈した CF_4 と O_2 ($\text{He} : \text{CF}_4 : \text{O}_2 = 1500 : 20 : 4$ それぞれ cc/min) を用いた。また、プラズマ発生用の電極径は 3mm で、電源周波数は 13.56MHz である。図2に厚さを均一化した結果を示す。均一化前には最大で 337 nm あった厚み分布が、均一化後には 34.3 nm まで向上できている。このときの加工時間は 7.5 分で、実用に供し得るレベルである。現在、水晶ウエハメーカーとともに実用化に向けた共同研究を実施している。



(a) 均一化前



(b) 均一化後

図2 ATカット水晶ウエハの厚み均一化の例

3. 数値制御ローカルウェットエッチング

数値制御ローカルウェットエッチング(NC-LWE)法は、局在した液相エッチング領域を速度制御で走査することによって形状創成を行う新しい加工法である⁵⁻⁷⁾。本手法も、プラズマCVMと同様に非接触な化学的無歪加工法であるため、振動や熱変形等の外乱に対して鈍感であり、加工量はエッチャントの滞在時間によりナノメートルレベルの精度で正確に制御できる。よって、同レベルの加工精度が得られる他の加工法と比較してインシャルコストが極めて安価で、特別なノウハウを必要としない新しい概念の超精密加工システムとして期待できる。

図3にNC-LWE加工システムの概略を、図4に試作した5軸制御装置を示す。本システムは、エッチャントを局所的に被加工物の表面に供給および吸引するためのノズルヘッド、ガス吸引用真空ポンプ、循環ポンプ、リザーブタンク、熱交換器、および被加工物もしくはノズルを移動させるためのXYテーブルから構成されている。本手法では、同軸状ノズルの中央部からエッチャントを供給し、外周部にお

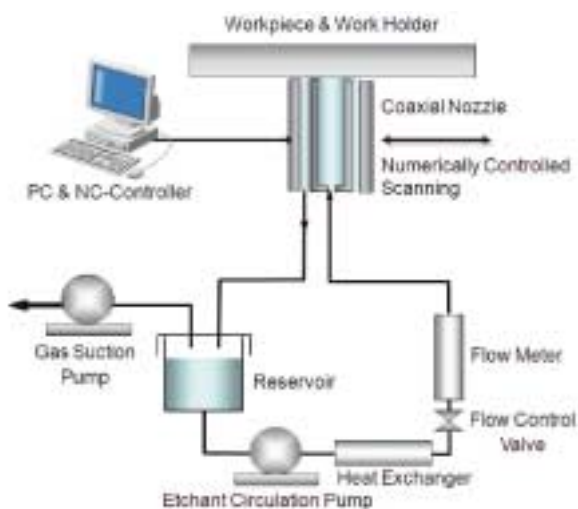


図3 NC-LWE 加工システム



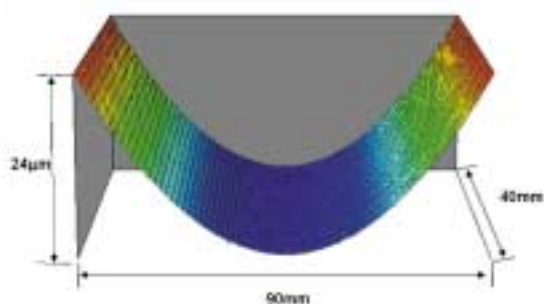
図4 試作した5軸制御NC-LWE装置

いて強制的にエッチャントとその揮発成分とを同時に吸引するため、ノズル形状や重力に対するノズル姿勢の制約は無く、また、ノズルから拡散したエッチャントの揮発成分の付着による表面荒れを防げるという特長を有する。

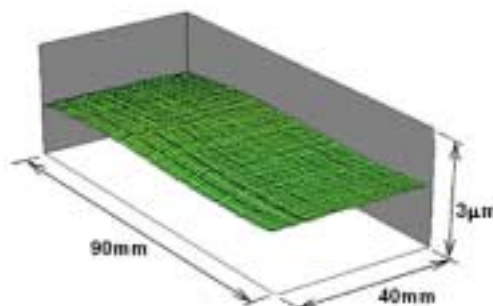
LWE 法は機械加工法のように工具の切り込み位置の制御で形状を創成するのではなく、加工対象物ごとに形状計測を行って除去すべき加工量を求め、機械精度に依存することなく決定論的に形状を創成する。エッチャントの温度および濃度を高精度に制御することは比較的容易であるため、バッチ間およびバッチ内におけるエッチングレートの再現性は高く、要求精度がサブミクロンレベルであれば通常は1回の数値制御加工により決定論的に目的形状が得

られる。

図5は中性子を集光するための楕円筒ミラーを作製した例である。基板の材質は合成石英ガラスで、エッチャントには37wt%、40のフッ化水素酸を用いた。本ミラーの場合、NC-LWE加工の結果として形状誤差400nmを得た。この作製した楕円筒ミラー基板の上にイオンビームスパッタ成膜によりスーパーミラーを形成し⁸⁻¹⁰、中性子を集光した結果を図6に示す。集光しない場合と比較してピーク強度で6倍のゲインが得られており、中性子小角散乱計測等への適用が期待されている。



(a) 楕円筒ミラーの形状



(b) 形状誤差分布

図5 中性子集光用楕円筒ミラーの作製結果

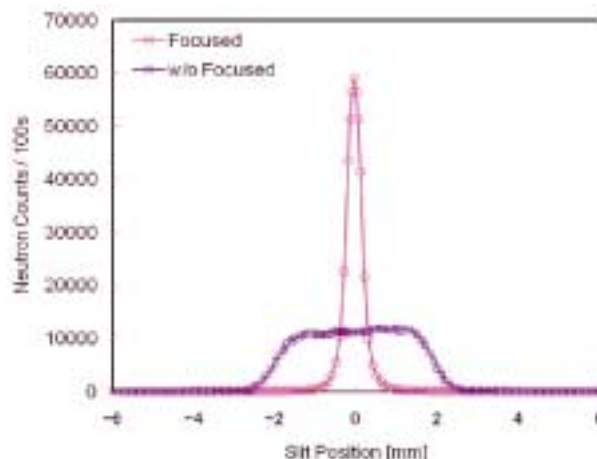


図6 作製したスーパーミラーによる中性子の集光結果

4. おわりに

ナノメータレベルの形状精度が要求される光学素子や機能材料の加工に応用できる新しい加工法として、数値制御ローカルウエットエッチング法を提案した。本加工法は、従来の機械加工技術と比較して装置コストが極めて安価でありながら、ナノメータレベルの形状精度が得られる可能性を有しており、平面基板のみならず任意の非球面形状の創成に有用であることが示されている。これらの加工技術が、産業界のみならず基礎科学分野においてもブレークスルーを生み出す超高精度形状創成技術として貢献できれば幸いである。

ローカルウエットエッチング法の開発の一部は、NEDO平成17年度産業技術研究助成事業(05A33704d)の援助を受けて行われた。また、数値制御ローカルウエットエッチングによる楕円筒ミラーの作製に関しては、大阪大学の高井宏之氏、永野幹典氏の、イオンビームスパッタ成膜によるスーパーミラーの作製および中性子集光実験による集光性能の評価に関しては、日本原子力研究開発機構J-PARCセンターの曾山和彦研究主幹、山崎大博士、丸山龍治博士の協力を得た。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 特許：ラジカル反応による無歪精密加工方法，登録番号2521127.
- 2) Y. Mori, K. Yamamura, K. Yamauchi, K. Yoshii, T. Kataoka, K. Endo, K. Inagaki and H. Kakiuchi, "Plasma CVM (Chemical Vaporization Machining) : An Ultra Precision Machining Technique Using High-pressure Reactive Plasma", *Nanotechnology* **4** (1993) 225-229.
- 3) Yuzo Mori, Kazuya Yamamura and Yasuhisa Sano; The study of fabrication of the X-ray mirror by numerically controlled plasma chemical vaporization machining: Development of the machine for the X-ray mirror fabrication, *Rev. Sci. Instrum.* **71** (2000) 4620-4626.
- 4) Yuzo Mori, Kazuto Yamauchi, Kazuya Yamamura and Yasuhisa Sano, "Development of plasma chemical vaporization machining", *Rev. Sci. Instrum.* **71** (2000) 4627-4632.
- 5) K. Yamamura, "Fabrication of Ultra Precision Optics by Numerically Controlled Local Wet Etching", *Annals of the CIRP*, **56**, (2007) 541-544.
- 6) Kazuya Yamamura, Takuro Mitani, "Etching characteristics of local wet etching of silicon in HF/HNO₃ mixtures", *Surf. Interface Anal.*, **40** (2008) 1011-1013.
- 7) Kazuya Yamamura, Hiroyuki Takai, "Figuring of elliptical hard X-ray focusing mirror using 1-dimensional numerically controlled local wet etching", *Surf. Interface Anal.*, **40** (2008) 1014-1018.
- 8) K. Soyama, W. Ishiyama, K. Murakami, "Enhancement of reflectivity of multilayer neutron mirrors by ion polishing: optimization of the ion beam parameters", *J. Phys. Chem. Solids*, **60** (1999) 1587-1590.
- 9) R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, M. Hino, K. Soyama, "Development of neutron supermirror with large-scale ion-beam sputtering instrument", *Physica B*, **385-386**, (2006) 1256-1258.
- 10) R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, M. Hino, K. Soyama, "Development of neutron supermirrors with large critical angle", *Thin Solid Films*, **515** (2007) 5704-5706.