

プラズマ CVM による機能材料の高精度無歪加工

大阪大学大学院 工学研究科精密科学・応用物理学専攻

山 村 和 也

Precision damage-free figuring of functional materials by plasma chemical vaporization machining

Kazuya Yamamura

Division of Precision Science & Technology and Applied Physics, Graduate School of Engineering

1. はじめに

加工とは、目的とする機能を発現させるために、設計した通りの形状、あるいは物性を有する表面を創成することである。われわれ人類は、いかに便利で快適な生活ができるかという思いのもとに、多種多様な生産活動を行って発展し続けてきたわけであるが、その発展は加工技術の進展が支えてきたと言っても過言ではない。有史以来、加工技術に対しては常に高品質と高精度化が求められてきたが、現在では、半導体デバイスにおいて線幅 10 ナノメートルを切る超微細な回路パターンの形成に不可欠な EUVL (Extreme Ultra Violet Lithography) 露光機用の反射ミラーから、身近な例では携帯電話のカメラ用の非球面レンズに至るまで、ナノメートル精度の形状とサブナノメートルオーダの

表面粗さの実現が加工技術には求められている。このような要求に対して、既存の切削や研削等の機械的な加工法を適用した場合、加工速度は大きいものの、接触加工であるがゆえに振動や熱変形等の影響を受けやすく、また、塑性変形や脆性破壊を利用する加工原理から考えて、表面層に多大な欠陥が形成されることは避けられない。このような欠陥の形成なしに加工するためには、化学的な方法に頼らざるを得ないが、現在半導体デバイスの製造に用いられている低圧力下でのドライエッチングは、加工現象は化学的ではあるものの、レジストを援用した微細加工を主たる目的としており、機械加工に匹敵するような加工の空間分解能や加工能率は得られていない。一方我々の研究グループでは、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を有する新しい加工法の開発を 1988 年頃から開始し、プラズマ CVM (Chemical Vaporization Machining) と名付けた。加工現象は純粋に化学

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
TEL 06-6879-7293
FAX 06-6879-7293
E-mail: yamamura@prec.eng.osaka-u.ac.jp

的であり、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^{1,2)}。さらに、近年、SiC、GaN、ダイヤモンド等の硬脆材料の表面に大気圧プラズマを照射することで表面を軟質化し、母材よりも軟質な砥粒を用いて軟質層を除去することにより、原子オーダーで平滑な表面がダメージフリーに得られるプラズマ援用研磨法も開発し^{3,4)}、プラズマ CVM による形状創成とプラズマ援用研磨による表面仕上げから構成される『プラズマナノ製造プロセス』を創生することで、ナノメートルオーダーの形状精度とサブナノメートルレベルの表面粗さを実現するものづくり技術の革新に取り組んでいる。本稿では紙面の都合によりプラズマ CVM の概要のみ解説する。

2. プラズマ CVM による形状創成

プラズマ CVM は、大気圧下で局在して発生させた容量結合型高周波プラズマもしくはマイクロ波プラズマによって高密度の反応種を生成し、これを加工物の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化学的酸化加工法である。工具等の接触が無い原子単位の加工法であることから、機械加工で問題となる振動や熱変形等の外乱の影響を受けにくい

(脱母性原理)。したがって、局所プラズマを数値制御走査することにより、ナノメートルレベルの形状精度が容易に得られる。また、大気圧プラズマ中ではイオンの平均自由行程が短いため、電界加速によってイオンが得る運動エネルギーは小さく、イオン衝撃による表面損傷はほとんどない²⁾。したがって、加工に寄与するのは主として中性のラジカルによる純粋な化学反応であるため、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の創成が期待できる。また、真空排気ならびに排気のためのチャンバーや真空ポンプが不要であることから、プロセスが簡便化できるとともに装置コストを大幅に低減できる。従来の機械加工とプラズマ CVM の比較を図 1 に示す。

図 2 に数値制御プラズマ CVM 加工プロセスの概要を示す。本プロセスでは、まず前加工面の形状や厚さ分布を精密に計測し、目的形状からの偏差量分布を求める。次に、加工量はプラズマの滞在時間に比例するという原理に基づき、単位時間当たり形成される単位加工痕形状と偏差量分布を用いたデコンボリューションシミュレーションにより、加工物上のプラズマの滞在時間分布を決めるワークテーブルの送り速度分布データを作成する。そして、そのデー

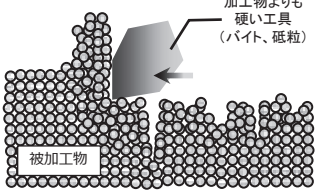
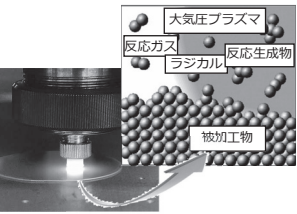
項目	機械加工	プラズマCVM
イメージ図		
加工原理	機械的作用による材料欠陥の導入、運動、増殖を利用	プラズマにより生成したラジカルの化学反応を利用
加工精度	工具の位置制御により形状を創成するため、機械の精度、振動、熱変形等に依存する	加工量をプラズマの滞在時間で制御するため、機械の精度や外乱の影響を受けにくい
ダメージ	加工変質層が形成されるため材料物性を活かさない	化学反応を利用するため加工変質層無し

図 1 機械加工とプラズマ CVM の比較

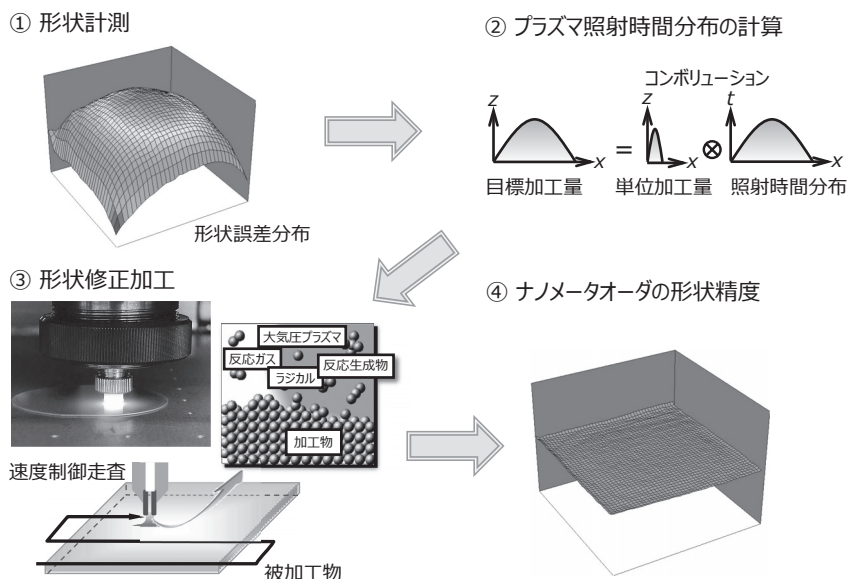


図2 数値制御プラズマCVMによる形状創成の概要

タをNCコントローラに転送し、テーブルの走査速度制御を行うことで形状修正加工を行う。最後に再度形状測定を行い、偏差量が許容値以内になるまで上記プロセスを繰り返すことにより、目標の形状精度を達成する。通常修正加工量が数百ナノメートル程度であれば1回の修正加工により、十ナノメートルオーダーの形状精度が得られる^{5,6)}。プラズマCVM加工において、被加工物がシリコン系の材料(Si, SiO₂, SiC, Si₃N₄)の場合には、ヘリウムやアルゴン等の不活性ガスに微量のCF₄もしくはSF₆等のフッ素系のガスと解離促進ならびに残留するCやSを除去するための酸素ガスを微量添加した混合ガス

を反応ガスとして用いる。反応ガスをプラズマ中に供給し、解離反応によりフッ素ラジカルを生成して被加工物表面と反応させ、揮発性のSiF₄に変えることで除去加工を行う。プラズマ生成用の電極は直径3~10 mm程度であり、電極径に対応した局所プラズマを発生させて被加工物上を数値制御走査することで、マスクを用いることなく任意の形状加工が可能である。加工の空間分解能は局所プラズマの大きさで決まるため、除去対象の加工量分布における空間波長に応じて電極径を変えるか、もしくはプラズマ領域を制限するオリフィスを設置する。これまでに図3に示すように、電極先端部にオリフ

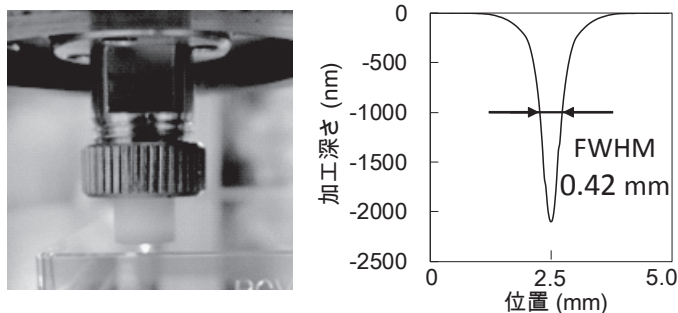


図3 プラズマ領域制限用のオリフィスを設置した電極写真と得られた静止加工痕

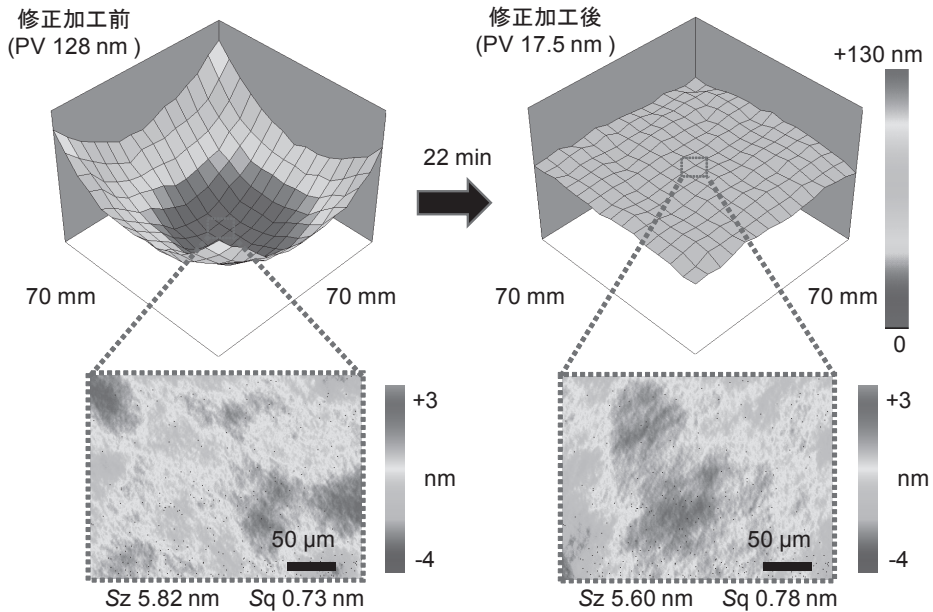


図4 石英ガラス基板の平坦化加工結果

イスを設置することにより約 0.5 mm の最小加工空間分解能を得ている。

3. 石英ガラス基板の平坦化

X 線集光ミラーや EUVL 用反射光学素子にはナノメータ精度の形状精度や平坦度が要求されている。ナノメータオーダの形状精度を実現するためには極限的な精度の形状計測技術と加工技術の両方が確立されなければならない。プラズマ CVM は母性原理に従うことなく、また、工具の摩耗等も無いことから、再現性と安定性に優れた加工特性を維持できるため、ナノ精度加工を実現する加工法として期待できる。図 4 に数値制御プラズマ CVM 加工により、厚さが 6.35 mm の合成石英ガラス基板の平坦化加工を行った結果を示す。70 mm 角領域における平坦度が、22 分間の修正加工により 128 nm から 17.5 nm まで向上し、加工前後における表面粗さはほとんど変化しないことがわかる。単結晶材料や石英ガラスのようなアモルファス材料は均質であるため、プラズマ CVM 加工によって表面粗さが悪化することなく、加工前の表面モフォロジーをそのまま維持できる。

ただし、単結晶やアモルファス材料であっても材料欠陥や機械加工によって形成された加工変質層が残存する場合には、その程度に応じて化学的な反応性が場所によって異なるため、表面粗さは悪化する。しかしながら、均質な材料を用い、かつ加工変質層の除去を適切に行えば、プラズマ CVM は光学素子の高精度無歪加工法として極めて有用であると言える。

4. おわりに

形状精度がナノメータオーダの超精密光学素子や、ダメージフリーかつ原子オーダの表面粗さが要求されるデバイス用半導体ウエハを作製する場合、現状の機械加工を主とする加工プロセスは、さらなる高精度化ならびに高品質化を目指す上では、もはや限界に達した感がある。機械加工は加工能率が高いという長所を有するが、その反面変形破壊という加工現象に關与する転位やクラック等の結晶欠陥は、原子レベルから考えると非常に大きな空間を占めており、その大きさが変形および除去単位の微小化を物理的に制限している。また、加工表面には転位や空孔等の欠陥から成る加工変質層が残存す

る。よって、さらなる加工プロセスの高精度化を図るためには、このような機械的な手法に代わって、加工現象として理想的である化学的な反応を用いた加工法の開発が急務となる。これらの要求に対して、機械加工に置き換わる全く新しい概念の化学的形状創成法として、大気圧プラズマを利用したプラズマCVMが提案され、本稿ではその実施例として石英ガラス基板の平坦化に適用した結果を示した。また、厚さが数十ミクロンという極薄の水晶ウエハにおける厚さ分布の均一化にもプラズマCVM加工が用いられ、厚さのばらつきを2 nm以下に低減するとともに、世界最小クラスの超小型水晶振動子の量産プロセスの実現にも貢献し、評価されている⁷⁾。今回、紙面の都合で割愛したが大気圧プラズマの照射による表面改質と軟質砥粒研磨とを組み合わせたプラズマ援用研磨を提案し、単結晶SiC基板やGaN基板に対して加工変質層やエッチピットを形成すること無く原子レベルで平滑に仕上げる事が可能であることも示されている^{8,9)}。今後、これら『プラズマナノ製造プロセス』が、従来加工技術の限界を打ち破る革新的な加工プロセスとして実用化さ

れ、ものづくり技術の発展に貢献することを願ひ、さらなる研究開発に取り組みたい。

参考文献

- 1) Y. Mori, K. Yamamura, K. Yamauchi, K. Yoshii, T. Kataoka, K. Endo, K. Inagaki and H. Kakiuchi, *Nanotechnology*, 4, 1993, 225.
- 2) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura, Y. Sano, *Rev. Sci. Instrum.* 71, 2000, 4627.
- 3) K. Yamamura, T. Takiguchi, M. Ueda, H. Deng, A. N. Hattori, N. Zettsu, *Annals of the CIRP*, 60, 2011, 571.
- 4) 山村和也, 瀧口達也, 上田真己, 鄧輝, 服部梓, 是津信行, *砥粒加工学会誌*, 55, 2011, 534.
- 5) K. Yamamura, K. Yamauchi, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa, Y. Mori, *Rev. Sci. Instrum.*, 74, 2003, 4549.
- 6) 森 勇藏, 佐野泰久, 山村和也, 森田 諭, 森田瑞穂, 大嶋一郎, 齊藤祐司, 須川成利, 大見忠弘, *精密工学会誌*, 69, 2003, 721.
- 7) 第42回 井上 春成賞, <http://inouesho.jp/jyusyou/42/index.html>
- 8) H. Deng, K. Yamamura, *Annals of the CIRP*, 62, 2013, 575.
- 9) H. Deng, K. Endo, K. Yamamura, *Annals of the CIRP*, 64, 2015, 531.