

研究ノート

Plasma CVM (Chemical Vaporization Machining) の開発

山村和也*, 森勇藏**

Development of Plasma CVM (Chemical Vaporization Machining)

Key Words : Plasma, Atmospheric Pressure, Radical, Etching

1. はじめに

近年、半導体やファインセラミックスなどの、いわゆる機能性材料を用いたデバイスの高性能化・高品質化がますます重要視されてきている。しかし、その加工法としてはいまだに研削やラッピング、ポリッシング等の機械的な加工法に頼らざるを得ないのが現状である。機械的な加工法は、その加工原理として転位の運動や増殖を伴う塑性変形やマイクロクラックの進展等を利用するため、加工速度が大きという長所を持つ半面、工具の剛性や切削力の変動が直接加工特性に影響し、また加工表面には必然的に転位や空孔等の欠陥から成る加工変質層を形成してしまふなどの短所を合わせ持つため、高精度化、高品質化の限界を迫る上で本質的な障害となる。

そこで、われわれは加工現象として純粋に化

学的な作用のみを利用した加工法であるプラズマ CVM (Chemical Vaporization Machining) を考案、開発してきた¹⁾²⁾³⁾。プラズマ CVM とは 1 気圧以上という高圧力雰囲気中でプラズマを発生させ、そこで励起された反応性の高い中性ラジカルを材料と作用させ、揮発性物質に変えることにより除去を行う加工法である。また高圧力下でのプラズマは、ラジカル密度が高くしかも局在化するので、加工能率と材料歩留りの点においても優れた加工特性が得られる。さらに除去反応は原子単位で純化学的に起こるため、幾何学的には原子オーダーの平坦さが、また結晶学的にも無擾乱の優れた加工面が期待できる。

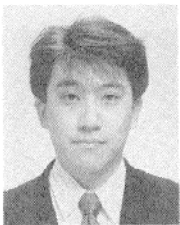
本稿ではプラズマ CVM の加工特性、ならびに加工表面の物性について述べる。

2. プラズマ CVM の概念と加工原理

プラズマ CVM とは、ハロゲン等電気陰性度の大きな原子を、高圧力雰囲気中において空間的に局在した高周波プラズマ内で励起し、より反応性の高い中性ラジカルとすることによって、被加工物と反応させ、これを揮発性物質に変えることにより除去を行なう加工法である。原子単位の加工法であることから幾何学的に優れた加工面を得ることが可能であると同時に、加工現象は化学的であり、材料本来の性質を損うことなく、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。本加工現象を利用したものとして、既に、半導体デバイス製造の分野において、ドライエッチングプロセスとして実

*Kazuya YAMAMURA

1967年1月31日生
平成3年大阪大学大学院工学研究
科精密工学専攻前期課程終了
現在、大阪大学工学部、精密工学
科、第5講座、助手、工学修士、
特殊加工
TEL 06-879-7286



**Yuzo MORI

1940年3月31日生
昭和38年大阪大学工学部精密工学
科卒業
現在、大阪大学工学部、精密工学
科、第5講座、教授、工学博士、
超精密加工、特殊加工、表面物性
TEL 06-879-7284



用化されている反応性プラズマエッチングがある。しかし、通常 $10^{-1} \sim 10^2 \text{Pa}$ という低圧力雰囲気中で行なわれているため加工速度が小さく、また、加工の空間的な制御性が全く無いため、このままでは従来の機械加工にかわる加工法には成り得ない。それに対してプラズマCVMでは、以下に示す基礎概念に基づき、物性的なダメージを伴うことなく機械加工に匹敵する加工特性(加工能率、空間分解能)を得ることを可能にした。

(1) 大気圧以上の高圧力雰囲気中でプラズマを発生させる。

加工速度を大きくするには反応種であるラジカルの密度を大きくする必要がある。そこでプラズマCVMでは大気圧($1 \times 10^5 \text{Pa}$)以上の高圧力雰囲気中でプラズマを発生させることにより高密度ラジカルの生成を実現している。また、高圧力下ではプラズマは電極の周囲に局在化し、しかも気体の平均自由行程が非常に小さい($\sim 0.1 \mu\text{m}$)ので、プラズマ外に拡散したラジカルはすぐさま他の分子と相互作用することによって反応性を失い、加工領域は電極の近傍のみに限定される。よって、高圧力雰囲気中でプラズマを発生させると、高密度ラジカルの生成による加工能率の増大とともに、加工の空間分解能の向上にも寄与することになる。

(2) イオン衝撃による基板損傷を防ぐ。

プラズマ中にはイオンや電子が存在するが、加工面の物性を保つためにはこれら荷電粒子の加工面への衝突を防ぐ必要がある。交流電界中における荷電粒子の運動は、他の粒子との衝突がないものと仮定すると以下の式で表される。

$$E = E_0 \cos \omega t \quad \dots\dots(1)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{eE_0}{m} \cos \omega t \quad \dots\dots(2)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{eE_0}{m\omega} \sin \omega t \quad \dots\dots(3)$$

$$x = -\frac{eE_0}{m\omega^2} \cos \omega t + \text{Const} \quad \dots\dots(4)$$

$$= A \cos \omega t + \text{Const} \quad \dots\dots(5)$$

E_0 : 電界強度

e : 素電荷

m : 荷電粒子の質量

ω : 角周波数 ($= 2\pi f$)

A : 荷電粒子の振幅 ($= -\frac{eE_0}{m\omega^2}$)

上式より荷電粒子の振幅 A は周波数の 2 乗に反比例して小さくなることが分かる。よって、電源周波数を大きくすることによりイオンの衝突による格子損傷、および電子衝突による基板温度の上昇を抑えることができると考えられる。プラズマCVMにおいては、一般にプラズマエッチングで用いられている電源周波数 13.56MHz よりも 1 桁以上大きい、150MHz 帯の周波数を用いることにより、加工によって生じる基板損傷の低減化を図っている。また高周波であるため、試料がセラミックス等の絶縁体でも加工が可能である。

3. プラズマCVMの加工特性

プラズマCVMでは、高圧力雰囲気中において、電極周囲に局在化したプラズマを発生させるので、目的に応じて電極の形状を変化させる

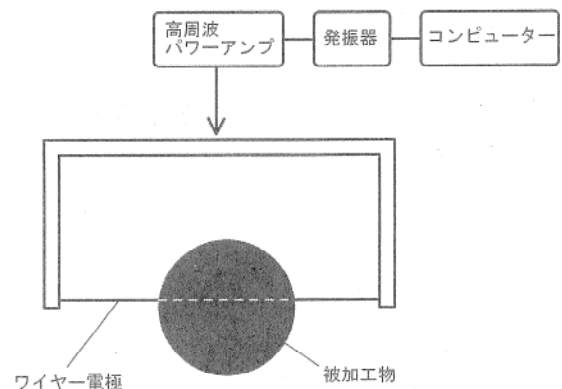


図1 プラズマCVMにおける切断装置の概念図

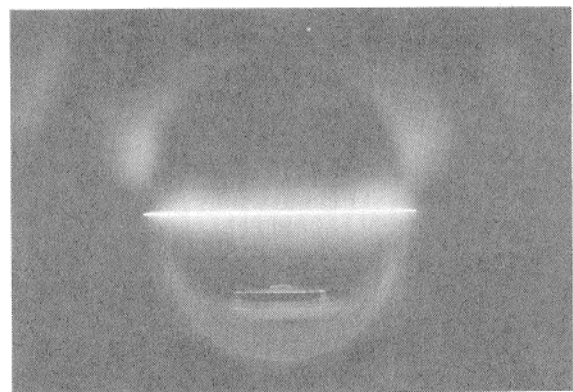


図2 ワイヤー電極周囲に発生させたプラズマ (ワイヤー径 $50 \mu\text{m}$)

ことにより任意の加工形態をとることが可能である。本節ではプラズマCVMを切断、ポリシングおよび形状加工(NC加工)に応用した例について述べる。

3.1 切断加工

図1, 図2に切断装置の概念図及び50 μm 径ワイヤーによるプラズマの写真を示す。本装置では小径金属ワイヤーを電極として配し、電界強度が大きなワイヤー周囲のみにプラズマを発生させることにより空間分解能の高い加工が可能である。また、従来からの切断法であるワイヤーソーや内周刃では、剛性等の問題から適用しうる被加工物の大きさに限界があるが、プラズマCVMは非接触な加工法であるためその様なことは問題とならない。

よって、これまでの機械的な切断法に代わって、格子欠陥の導入を伴わない純化学的な手法により半導体等の機能材料のスライシングが可能になる。さらに、プラズマ領域の局在化により材料歩留まりの向上も期待できる。

3.2 ポリシング加工

ポリシング加工の場合は、平行平板電極により面状のプラズマを発生させ、それに対して被加工物をランダムに相対運動させることにより加工面の平滑化を図る。図3に平行平板型電極を用いて得られたシリコン(単結晶ウエーハ)の加工面粗さを示す。測定には位相干渉顕微法(WYKO社製 TOPO-2D システム)を用いた。また、反応ガスにはヘリウムベースのSF₆(1%)を用いた。

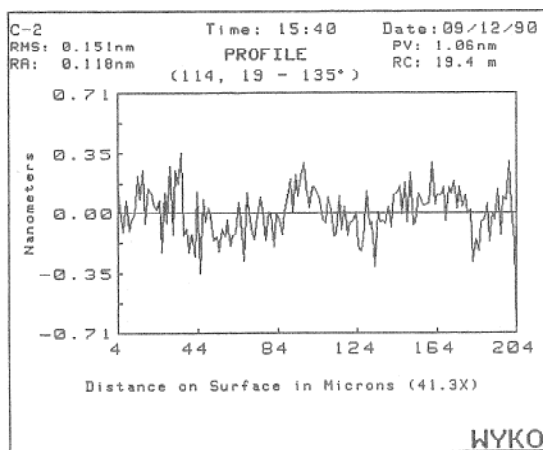


図3 プラズマCVMポリシング面の表面粗さ

図3より長周期のうねりが見られるものの、短周期ではp-vで1(nm)以下の表面粗さが得られていることが分かる。また、加工面にはシリコンの結晶面方位に依存する加工形状は見られないため、反応種であると考えられるFラジカルと単結晶シリコンの反応においては加工速度の異方性が少ないと言える。これより、除去反応は原子単位で進行するため、反応ガスの供給方法および被加工物の電極に対する運動方法の改良等により、原子オーダーの平坦さが得られる可能性がある。

3.3 形状加工(NC加工)

プラズマCVMにおいて加工量は、被加工物表面における電極(プラズマ)の滞在時間に比例するので、被加工物をポイント状あるいはラ

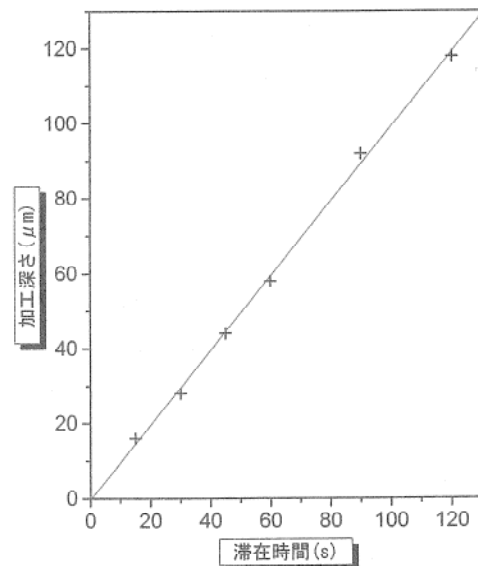


図4 プラズマ滞在時間と加工深さの関係

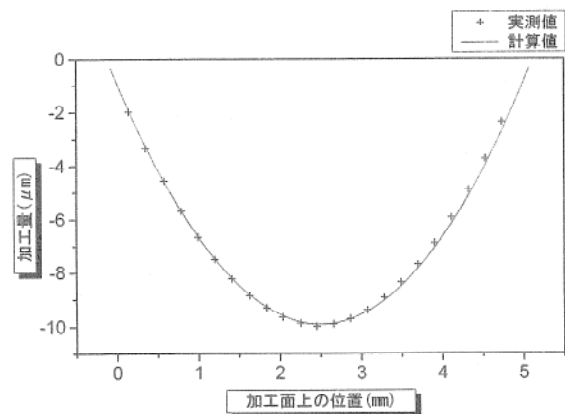


図5 形状加工により得られた結果

イン状のプラズマに対して速度制御を行ないながら走査することにより任意の形状を得ることができる。図4はシリコンに対するポイント状プラズマ(He+3%SF₆)の滞在時間と加工深さの関係を示したものであるが、比例関係が得られていることが分かる。また、図5は石英ガラスをライン状プラズマに対して速度制御走査することにより、凹面形状を作製した結果であるが、計算値と0.5%以内の誤差で一致していることが分かる。(測定はWYKO社製 TOPO-2 Dシステムを用い、未加工部を基準とした。)

4. 加工面の物性評価

次にプラズマ CVM 加工面の物性を評価した結果について述べる。プラズマ CVM は原子単位の化学反応を利用した加工法であるため、加工面の物性も優れたものが期待できる。本節ではシリコンの加工面を対象とし、デバイス特性に大きな影響を与える加工表面の欠陥密度を SPV (Surface Photovoltage) スペクトロスコピー⁴⁾により評価した結果について述べる。SPV 法は、半導体表面にバンドギャップよりも小さなエネルギーを持つ光を照射した際に生じる電子遷移の有無を、表面電位 (SPV) の変化として検出するものである。よって加工時にダメージが導入されると、このときに生じる電

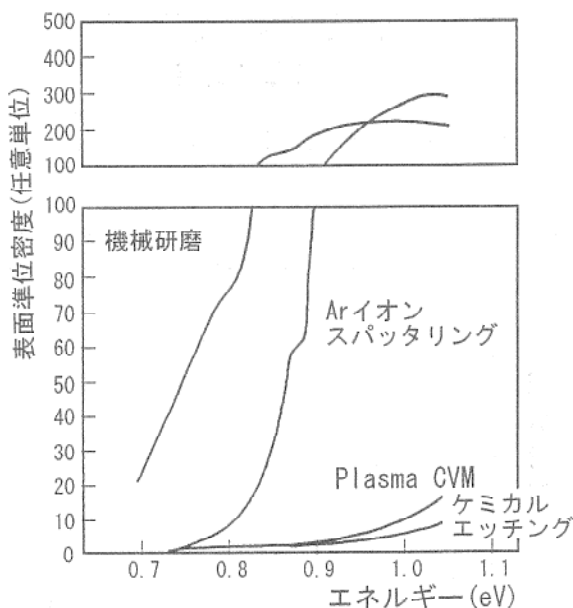


図6 SPV スペクトロピーによって得られた各種加工面の表面準位密度

子配列の乱れに対応した電子準位が本来準位の存在しないバンドギャップ内に形成されるため、SPVを測定することで高感度に加工表面における欠陥密度を評価できる。

図6は、照射光のエネルギーを走査して、シリコンの各種加工面に存在する電子準位密度を求めたものである。試料には比抵抗10ΩcmのP型Czシリコンを用いた。また各加工条件を表1に示す。

表1 加工条件

機械研磨 + 洗浄	砥粒: φ0.1μm, SiO ₂ 荷重: 150gf/cm ² HF:H ₂ O=1:3(室温)
Ar ⁺ スパッタリング + 洗浄	加速電圧: 1KV イオン電流密度: 5μA/cm ² HF:H ₂ O=1:3(室温)
Plasma CVM + 洗浄	反応ガス: He+SF ₆ (1%) 投入電力: 100W HF:H ₂ O=1:3(室温)
ケミカルエッチング + 洗浄	HF:HNO ₃ :HO ₂ O=1:6:8(室温) HF:H ₂ O=1:3(室温)

最もおだやかな機械加工と考えられるポリッシング(通常の市販ウエハの最終研磨と同程度)の場合でも多くの準位が形成されていることが分かる。ここで伝導帯下端から0.17eV下にあるピークはAセンターと呼ばれる欠陥準位で、酸素と空孔の複合欠陥であると報告されている⁵⁾⁶⁾。それに対しプラズマ CVM による加工面では欠陥準位密度が2桁以上小さく、純化学的な加工法であるケミカルエッチング面とほとんど変わらないという結果が得られた。また、Ar⁺スパッタリング面と比較しても、1桁以上準位密度は小さい。これは150MHzという高周波電源を使用することにより、イオン衝撃による基板損傷が低減されていることを示すものと考えられる。

以上より、プラズマ CVM は機械加工におけるラッピングに匹敵する加工速度を持ちながらも、表面粗さ1nm以下の精度とともに物性的にも化学研磨とほぼ同等の表面の創成が可能な加工法であると言える。これらの結果はいずれも、プラズマ CVM において利用される加工現象を考えると必然的に期待されるものである。

5. お わ り に

半導体ウェーハ等に代表される、極限までの高精度、高品質化が要求される分野においては、現状の機械加工を主とする加工プロセスはもはや限界に至った感がある。機械加工は加工能率が高いという長所を持つが、その反面変形破壊という加工現象に寄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いるため、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。また加工表面には必然と転位や空孔等の欠陥から成る加工変質層が残存することになる。よって次世代プロセスに対応するには、これまでの機械的な手法に代わって、加工現象としては理想的なケミカルな反応を用いた加工法の開発が急務となる。

プラズマCVMは1気圧以上という高圧力下でプラズマを発生させ、それによって生成された高密度の中性ラジカルによる化学的な除去反応を加工現象として用いる、全く新しい概念の加工法である。そして物物的にはケミカルエッチング面と同等の低欠陥密度であり、また加工速度も機械加工に匹敵するという、加工法としての理想的な特性が明らかにされてきている。

現在、これらの基礎データをもとに、本技術を科学技術庁新技術事業団の委託開発テーマとして、半導体プロセスのスライシング及びポリシング工程、ならびにステッパー用非球面レンズの作製に応用すべく産学官協同による開発が行われている。

また、プラズマCVMならびに森らによって開発されたEEM (Elastic Emission Machining)^{7) 8) 9) 10) 11)}における加工現象を、原子・電子レベルから理論的および実験的に究明するため、平成6年度より同じく科学技術庁新技術事業団の研究交流促進事業に新規追加された“共同研

究等促進”に第1号テーマ(固体表面の電子状態シミュレーションとソフト加工)としてとりあげられ、第一原理分子動力学シミュレーションによる反応プロセスの解明が進みつつある。

最後に、本稿では触れなかったが、種々のセラミックスや高分子材料においてもプラズマCVMの応用範囲は広がりつつあり、今後ますます極限的な精度が要求される先端技術分野において、本技術が貢献できるものと期待する。

6. 参 考 文 献

- 1) 森 勇藏, 山内和人, 遠藤勝義, 精密工学会誌 57 (1991) 36.
- 2) Y. Mori, K. Yamamura, K. Yamauchi, K. Yoshii, T. Kataoka, K. Endo, K. Inagaki, and H. Kakiuchi, *Technol. Repts. Osaka Univ.* 43 (1993) 261.
- 3) 国内特許 特開平1-125829
米国特許 PAT No. 4960495
ヨーロッパ特許 EP 0300224B1
- 4) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Endo, H. Wang, T. Ide and H. Goto, *Technol. Repts. Osaka Univ.* 40 (1990) 293.
- 5) G. D. Watkins and J. W. Corbett, *Phys. Rev.* 120 (1961) 1001.
- 6) J. W. Corbett, G. D. Watkins, R. M. Chrenko and R. S. McDonald, *Phys. Rev.* 121 (1961) 1015.
- 7) 森 勇藏, 津和秀夫, 杉山和久, 精密機械 43 (1977) 20.
- 8) 森 勇藏, 精密機械 46 (1980) 5.
- 9) 森 勇藏, 井川直哉, 奥田 徹, 杉山和久, 山内和人, 精密機械 51 (1985) 1194.
- 10) Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo, *Prec. Engineering* 9 (1987) 123.
- 11) Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo, *Prec. Engineering* 10 (1988) 24.