プラズマ CVM による機能材料の切断加工*

— 内周刃型切断加工装置の試作とその切断加工特性 —

森 勇藏** 山内和人** 山村和也** 佐野泰久**

Cutting of Functional Material by Plasma CVM

— Development of the Cutting Machine with Inner Blade Electrode and Its Cutting Characteristics —

Yuzo MORI, Kazuto YAMAUCHI, Kazuya YAMAMURA and Yasuhisa SANO

For cutting the functional material, a mechanical machining method which applied cutting and grinding is generally used. Therefore, a deformed layer is left in the cut surface, and an another process for removing the deformed layer is required in order to restore the original performance of the functional materials. Plasma CVM (Chemical Vaporization Machining) which cannot leave deformed layer theoretically was applied to the cutting, and the equipment with high speed rotary inner blade electrode was developed, and machining characteristics using this equipment are described. Improving the cutting speed is carried out by sufficient supply of the reactant gas to the machining gap between the electrode and the work and by sufficient decomposition of supplied reactant gas. And, decreasing the kerf loss is carried out by the localization of the plasma generation.

Key words: plasma CVM, cutting of functional material, deformed layer, cutting speed, kerf loss

1. 緒 言

機能材料の多くは、良好な結晶性や均質性を得るために、まずバルク材として作製されることが多い。そして作製されたバルク材を所望の形状に加工することにより、種々の素子として用いられる。バルク材を加工する第一段階のプロセスには、普通、加工現象として塑性変形や脆性破壊を利用した機械的な切断加工が用いられている。そのため、切断面には必然的に加工変質層が残る。材料本来の機能を引き出すには、加工変質層を除去するための別のプロセスが必要となる。例えば、シリコンのインゴットをダイヤモンドソー (#500) を用いて切断した場合、X 線トポグラフィを利用した測定により、深さが $20 \sim 30 \mu\text{m}$ にも及ぶ加工変質層が観察され¹⁾、比較的加工変質層が小さいとされるワイヤソーを用いても、アングルポリッシュ法によって $10 \mu\text{m}$ 程度の加工変質層が観察されている²⁾。また、これらの測定法では観察が困難な、原子レベルでの結晶性の乱れが、さらに深い領域まで及んでいる可能性は否定できず、機能材料に極限の機能を求める場合、切断面に加工変質層を残すことの無い、新しい切断加工法の開発が望まれている。

本論文では、加工原理に化学反応を用いた、原理的に加工変質層を残し得ない、プラズマ CVM (Chemical Vaporization Machining)³⁾⁴⁾ を切断加工に応用することを提案し、内周刃型切断加工装置を試作し、それを用いた基礎実験結果について述べる。

2. プラズマ CVM による切断加工方法

2.1 プラズマ CVM による切断加工の概念

図 1 にプラズマ CVM による切断加工の概念を示す。ブレードやワイヤ等の電極をワークに対して適当な加工ギャップを設けて配置し、反応ガス雰囲気下において高周波電界を印加する。プラズマ CVM では大気圧という高圧力下においてプラズマを発生させる。大気圧下では、ガス分子の平均自由行程が小さく ($\sim 0.1 \mu\text{m}$)、イオンが電界中で加速される時間が短いため、プラズマの発生には高い電界強度が必要となる。また、イオンの拡散距離が短いため、発生したプラズマは電界強度の小さい場所には広がりにくいという特徴を持つ。従って、加工ギャップ部で最も電界強度が大きくなるように、加工ギャップ長および電極形状を最適化することで、加工ギャップ部のみに局在化したプラズマを発生させることが出来る。そしてプラズマ中において、反応ガスの分解により生成された活性な中性ラジカルとワーク表面原子とが化学反応することで除去加工が行われ、加工される速度に合わせてワークを送って行けば、非接触の切断加工が可能となる。

Fig.1 Basic concept of cutting by plasma CVM

* 原稿受付 平成 12 年 4 月 13 日

** 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科 (吹田市山田丘 2-1)

2.2 種々の電極形態と応用例

図2に切断加工に用いるための種々の電極形態を示す。(a)は小径の金属ワイヤにワークを対向させてプラズマを発生させるもので、構造的には最も簡単な電極である。直径と長さを考慮して張力を決めれば、細いワイヤや長いワイヤを用いても $10\mu\text{m}$ 程度の真直度でワイヤを張ることが出来るため、細い切断幅や長い切断長が期待できる。また多数本のワイヤを張ることも容易であるため、同時に複数の切断加工を行うことも可能である。しかしながら、ワークに深く切り込んだ場合、プラズマ部に入り込むガス分子は切断溝外側からの拡散によるもののみになるため、円滑なガスの供給と排出が困難になる。仮に、ワイヤより数百 $\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 程度上方にガス供給用のノズルを設けたとしても、大気圧という高圧力雰囲気下においてはその粘性のため、プラズマ発生部である電極-ワーク間の $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 程度の加工ギャップに円滑なガスの流れの場を形成することは困難である。また、細いワイヤは熱容量が小さいため、プラズマに大電力を投入することも困難である。

以上のことより、ワイヤ電極は厚いワークや高加工速度を必要とするワークの切断には不向きであり、長ワイヤや多数本ワイヤを用いた大面積薄膜のパターンニング等に有効な電極であると言える⁵⁾。

図2(b)はワイヤの代わりに金属ブレードを用いたものである。ワイヤに比べて大電力を投入できるが、薄いブレードをねじれることなく張る機構が必要になり、ブレードそのものの形状精度も要求される。

図2(c), (d)は共に高速で回転するブレード電極とワークの間にプラズマを発生させるものである。電極の回転に伴って生じる粘性流により、プラズマ発生部への反応ガスの供給およびプラズマ発生部からの反応生成物の排出を効率的に行うことができるので、ワークに深く切り込んだ状態でも安定にガスの給排気が可能になる。また、電極自体もガス流により冷却されるので、投入電力を増加させることができ、加工速度の向上が図れる。これらの特徴により、厚いワークの切断が可能になる。また、(c)は外周刃型の回転電極であり、(d)は内周刃型の回転電極である。外周刃型は内周刃型に比べて構造が簡単であるが、スラスト方向の振れを抑えて高速回転を

Fig.2 Examples of the electrode for cutting by plasma CVM

行うためには直径に見合った厚みが必要となり、大口径化と切断加工幅の減少を両立させることが困難である。内周刃型は刃に張力を与える機構を外周部に持たせることが可能であるため、薄い刃を用いても大口径化が可能であるが、外周部を固定するため、切断したいワーク径の3倍以上の外径を有する電極が必要となる。

以上、切断加工における種々の電極形態について特徴を述べたが、本研究においては高加工速度と狭切断加工幅が期待できる(d)の内周刃型電極を試作し、その加工特性を調べた。

2.3 内周刃型切断加工装置

図3に試作した内周刃型電極の概略図および図4に装置全体の概観写真を示す。内周刃は内径 250mm 、外径 460mm 、厚さ 0.1mm のステンレス製薄板である。最外周部を回転電極枠に固定し、外周部より約 40mm 内側をねじにより回転軸方向に押し込むことで半径方向に張力を与え、張り上げる機構を有する。回転電極は一組のふっ素系グリス潤滑の背面合わせアンギュラ型ボールベアリングによって片持ち支持し、マグネットカップリングによってチャンバ外部の高速回転モータにより駆動する。モータはインバータ制御により、約 6000rpm まで回転が可能である。内周刃回転時の振れはラジアル方向に $10\mu\text{m}$ 程度、スラスト方向に $50\mu\text{m}$ 程度である。チャンバには昇降ステージが設けてあり、ステージ上部のワーク台にワークを設置する。昇降機構は、チャンバ外部に設

Fig.3 Schematic view of cutting apparatus

Fig.4 Photograph of cutting apparatus

置されたガイド、ボールねじ、AC サーボモータから構成され、溶接ペローズを介してチャンバ内部のワーク台を昇降させる。昇降量および昇降速度はパーソナルコンピュータにより制御を行う。図中の接触センサは、内周刃とワーク台間の電気抵抗をチャンバ外部より測定し、電気抵抗値がある値以下になった時、接触信号をパーソナルコンピュータに伝えるものである。内周刃とワークが接触するまで昇降ステージを上昇させることで、その時の加工ギャップ長を測定できる。

チャンバはステンレス製で容積は約 0.3m³ である。排気系にはドライポンプを用い、ドライポンプの排気側にはハロゲン系ガス用の吸着型除害装置を設置している。ガス供給はマスフローコントローラで所定濃度のガスを大気圧まで充てんする。高周波電力は、半同軸型空洞共振器でチャンバ内のインピーダンスに整合し、容量結合を介して回転電極に供給している。高周波電源の周波数は 150MHz である。

3. シリコンの切断加工実験および考察

3.1 切断加工方法

本装置における実験手順について述べる。ワークをワーク台に固定し、約10Pa (0.1Torr) まで初期排気を行う。その後、所定濃度の反応ガスを大気圧まで充てんし、電極を設定速度で回転させる。送り制御にはパーソナルコンピュータを用い、加工速度と送り速度が等しくなるよう、図 5 に示す手順によって送り制御を行う。実験終了後、チャンバ内のガスを排気し、窒素パージを行った後、ワークを取り出す。

Fig.5 Flow chart of the cutting process

図 6, 図 7 に、切断加工を行った例を示す。図 6 は切断加工量と加工時間との関係を示したものであり、ほぼ時間に比例した切断量が得られていることが分かる。図 7 は切断途中の試料の切断幅を観察したものであるが、一様な切断幅で加工が行えていることが確認できる。これらより、試作した装置はプラズマ CVM による基礎的な切断加工特性(切断加工速度および切断加工幅)を評価するのに十分な性能を有していると判断した。なお、以後の実験では図 6 における直線の傾きを切断加工速度として算出し、図 7 における向かい合う切断面間の距離を切断加工幅として測定し、加工特性の評価を行っている。

Fig.6 Relationship between stock removal and machining time

Fig.7 Side view of the cut sample

3.2 切断加工特性

切断加工において検討すべき加工特性は、切断加工速度、および切断加工幅(カーフロス)、切断面の形状精度、切断面の表面粗さ、切断面の物性等であるが、本論文では切断加工速度および切断加工幅、切断面形状精度について評価した結果について述べる。なお、加工実験には 25mm×25mm の単結晶シリコンを用いた。

3.2.1 切断加工速度

本加工法において、切断加工速度を向上させるためには、次の 2 項目が重要であると考えられる。

- 反応ガスを電極-ワーク間の加工ギャップに十分に供給するとともに反応生成物を速やかに排出する。
- 供給した反応ガスを十分に分解する。

以下、項目(a)と(b)について検討を行った結果について述べる。まず項目(a)に関して、本加工法の場合反応ガスの供給は、チャンバ内の雰囲気ガスが回転する電極表面に引き連れられることにより行われる。従って、反応ガスの供給量は、電極の回転数、および雰囲気ガス中の反応ガス濃度に比例し、それにともない加工速度も向上すると考えられる。図 8 に切断加工速度の電極周速度依存性を示す。これより、切断速度は電極周速度にほぼ比例しており、円滑なガス供給が行われていることが分かる。

次に、反応ガス濃度をパラメータとして切断加工実験を行った結果を図 9 に示す。同一電極周速度下においては、反応ガス濃度の増加に伴い、加工速度も増加していることが分かる。

また、反応ガスの供給量をさらに増加させるために、内周刃回転電極の側面に微細な溝構造を形成することを試みた。これは、形成した溝構造により雰囲気ガス分子を効率よく捕捉することで、より多くのガス分子を加工部に供給することを目的としたもので、図 10 に示すような溝構造をリソグラフィ技術を用いて作製した。なお、溝構造は全周にわたって形成されている。

Fig. 8 Relationship between cutting rate and peripheral velocity of the rotary electrode

Fig. 9 Relationship between cutting rate and SF6 concentration

Fig. 10 Schematic view of the groove formed on the side of the electrode

Table 1 Machining conditions

	A	B
Inner diameter of blade	250 mm	
Thickness of blade	0.3 mm	
Peripheral velocity (Rotation speed)	39 m/s (3000 rpm)	
Gas composition (He : SF ₆)	90 : 10	80 : 20
Machining gap	100 μm	60 μm
RF power	900 W	

Table 2 Effect of the groove

	Removal rate μm/min	
	Without side groove	With side groove
A	115	207
B	151	228

表 1 に溝構造の有無による比較実験の条件を、表 2 にその実験結果を示すが、溝構造を有するブレードを用いたときの方が通常のブレードに比べて 1.5 倍以上の加工速度が得られており、電極表面の形状を変化させることで、さらに反応ガスの供給量を増加できることが分かった。

次に、項目(b)の反応ガスを十分に分解するための条件について検討を行った。供給した反応ガスを十分に分解するためには、十分な電力をプラズマに供給すること、及び、反応ガスの分解が促進されるような添加ガスを加えることが考えられる。図 11 は種々の条件において投入電力を変化させたときの加工速度の変化を示したものである。いずれの条件においても投入電力の増加に伴い、ほぼ投入電力に比例した加工速度の増加が見られた。また、図 11 の B の条件において投入電力を 1300W とした時、本実験における最高切断加工速度 0.7mm/min を得た。

図 12 は添加ガスとして、SF₆の分解を促進すると報告されている⁶⁾酸素を選び、添加の有無による加工速度の変化を示したものである。これより、各加工条件において反応ガスと同量の酸素を添加すると、同一電力においても加工速度が 1.2～1.5 倍程度増加することが分かった。

これらの結果より、プラズマ中で生成するふっ素ラジカルの量を N_F とし、 $N_F = \alpha N_{SF_6}$ (α はふっ素生成率、 N_{SF_6} は SF₆ の供給量) と考えると、項目(a)によつては N_{SF_6} が増加することで加工速度が増加、項目(b)によつては α が増加することで加工速度が増加する、と考えることができる。

Fig. 11 Dependence of cutting rate on RF power

Fig. 12 Effect of additional O₂ gas for cutting rate

Table 3 Machining conditions

Peripheral velocity	72 m/s
(Rotation speed)	(5500 rpm)
Machining gap	100 μ m
RF power	1000 W

Fig.13 Relationship between kerf loss and SF₆ concentration

Table 4 Machining conditions

Peripheral velocity	72 m/s
(Rotation speed)	(5500 rpm)
Gas composition (He : SF ₆ : O ₂)	89 : 10 : 1
Machining gap	100 μ m
RF power	1400 W

Fig.14 Photograph of cut surface

Fig.15 Profile of cut surface

3.2.2 切断加工幅

狭い切断加工幅を得る（カーフロスを小さくする）ためにはプラズマ発生領域の局在化を行うことが重要である。図 13 は SF₆ 濃度 10%, 20% において、表 3 の加工条件のもとで加工幅を調べた結果である。図より反応ガス濃度の上昇と共に切断加工幅の減少が見られる。これは、SF₆ には電子付着性によりプラズマ中の電子密度を減少させる作用があることから、濃度の上昇にともない、電界強度の弱い部分のプラズマは消滅し、電界強度の大きい内周刃電極先端部のみにプラズマが集中することでプラズマの局在化が達成できたためと考えられる。なお、図中で同一濃度に対して加工幅にばらつきが見られるのは、電極の回転方向に対して加工幅の分布があるか

らであり、上流部における幅が中流部以降に比べて狭くなる傾向が見られている。これは、上流部は常に冷えたガスが供給されることから中流部以降に比べてプラズマの強度が弱いためと思われる。

3.2.3 切断面の形状精度

最後に切断面の形状精度について述べる。表 4 に示す条件で端部約 2mm を残して切断加工を行い、切断して切断面の観察を行った。図 14 はその写真であるが、鏡面に近い表面が得られていることが分かる。また図 15 は触針式粗さ計による切断面の形状を測定した結果である。約 20mm にわたり 10 μ m 程度の形状精度が得られていることが分かった。

4. 結 言

本研究によって得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 内周刃型高速回転電極を用いたプラズマ CVM 切断加工装置を試作した。試作した装置によって 25mm×25mm のシリコン単結晶の切断加工実験を行い、加工特性の評価を行った。
- (2) 切断加工速度を向上させるための項目として、(a)反応ガスの電極-ワーク間への十分な供給、(b)供給した反応ガスの十分な分解、の 2 項目を挙げ、前者に対しては電極回転数の増加および反応ガス濃度の増加によって、後者に対しては投入電力の増加および酸素ガスの添加によって、実際に加工速度が向上することを示した。また、最高切断加工速度として 0.7mm/min を得た。
- (3) 切断加工幅を狭くするための項目として、プラズマ発生領域の局在化を挙げ、反応ガス濃度の上昇に伴うプラズマの局在化によって実際に加工幅が狭くなることを示した。また、最小切断加工幅として 0.3mm を得た。

謝 辞

本研究の一部は科学技術振興事業団ならびに文部省科学研究費補助金 (COE 形成基礎研究費 08CE2004) の援助を受けて行われた。また加工装置の製作にあたっては (株) 新潟鐵工所の協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 高野幸男：エレクトロニクス用結晶材料の精密加工技術，サイエンスフォーラム，(1985) 610.
- 2) 諏訪部 仁：硬脆材料の高効率・高精度スライシング加工，アイピーシー，(1995) 222.
- 3) 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.
- 4) 森 勇蔵, 山内和人, 山村和也, 佐野泰久：プラズマ CVM の開発，精密工学会誌，66, 8 (2000) 1280.
- 5) 森 勇蔵, 佐野泰久, 木山精一, 中野真吾, 堂本洋一, 山本恵章, 津田信哉, 中野昭一：プラズマ CVM 法による集積型 a-Si 太陽電池のバターンニングに関する研究 (I)，1995 年春季第 42 回応用物理学会関係連合講演会講演予稿集，(1995) 850.
- 6) R. d'Agostino and D. L. Flamm: Plasma Etching of Si and SiO₂ in SF₆-O₂ Mixtures, J. Appl. Phys., 52 (1981) 162.