数値制御プラズマCVMによる 水晶ウエハの高精度加工に関する研究*

—加工装置の開発と基本的加工特性の取得—

山村和也** 柴原正文† 佐野泰久†† 杉山 剛††† 遠藤勝義** 森 勇藏**

Improvement of Thickness Uniformity of Quartz Wafer by Numerically Controlled Plasma CVM
—Development of the NC-PCVM Machine and Acquisition of Machining Properties—

Kazuya YAMAMURA, Masafumi SHIBAHARA, Yasuhisa SANO, Tsuyoshi SUGIYAMA,

Katsuyoshi ENDO and Yuzo MORI

For the purpose of machining an ultra high frequency quartz resonator, we study making of quartz wafer with uniform thickness by Plasma CVM. In this paper, it was examined that relationship between machining characteristics and elements of equipment (shield of electric field, surface roughness of vacuum chuck, etc.). Machining of quartz wafer was carried out by utilizing the rotary electrode. Then, following results were obtained. First, by setting dummy quartz wafers around the objective sample, the boundary condition of process was stabilized, and variation of removal depth on quartz wafer was improved. Second, the linear relationship between dwelling time of plasma and removal depth was obtained, and it was proven that high-precision machining of quartz wafer by the numerically controlled plasma CVM was possible.

Key words: plasma CVM, quartz wafer, high frequency quartz resonator, rotary electrode

1. 結 言

今日のブロードバンド化による急激な情報通信システムの発展に伴って、コンピュータネットワークを行き交う情報量は膨大になった。これに対応すべくインフラ機器も伝送能力の高性能化が求められ、WDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術を使った光伝送ネットが急速に普及してきている。長距離の光伝送路では中継機器が必要となるが、その内部ではデータおよびクロック信号の再生(CDR : Clock Data Recovery)が行われており、そのクロック源には水晶振動子が用いられている¹⁾。中継機器の高速動作には、クロック源の高周波化が必要となるが、通倍回路と組み合わせた 600MHz 帯が現在の最高周波数である。しかし、機器の小型化・省電力化を図るためには、通倍回路を省く基準周波数の高い水晶振動子が望まれている²⁾。そこで、本研究では高周波水晶振動子を作製する水晶ウエハを高精度化するために、両面機械研磨仕上げで供給される水晶ウエハの厚さムラを数値制御プラズマ CVM によって解消することを目的としている。本報では、数値制御加工を目的とした実験装置の製作、ならびにその基本性能の検証を行ったので報告する。

2. 高周波用水晶振動子の加工方法

水晶振動子は、水晶結晶から切り出し薄片化された水晶ウエハに電極を付与したものである。水晶振動子には用途に応じて様々なカット方法が提案されているが、現在、最も使用頻度が

高いのは常温域で安定な周波数温度特性を有する AT カットである。AT カット水晶振動子は厚み滑り振動を起こし、その共振周波数と水晶振動子の板厚には(1)式に示すように反比例関係が成り立つので、薄片化することにより高周波化が可能である。

$$f \approx 1670 / t \quad (1)$$

f : 共振周波数(MHz), t : 水晶ウエハ厚さ (μm)

従来から、水晶ウエハの薄片化は両面機械研磨によって行われている。遊星運動をさせて研磨する際には、水晶ウエハを保持するための鋼製キャリア (キャリア厚さは水晶ウエハ厚さの 2/3) が必要であるが、水晶ウエハの薄片化に伴い、キャリア自体もそれに対応して薄くする必要があり、最終的には機械的強度の低下によって研磨加工中に破損してしまう。そのため、水晶ウエハの両面機械研磨による薄片化は 30 μm が限界とされてきており³⁾、現在、他の加工法による水晶ウエハの薄片化に関する研究が鋭意取り組まれている。その 1 つは、水晶ウエハをガラス等の基板に貼り合わせて、片面機械研磨を用いて薄片化する方法であり、水晶ウエハ厚さを 10 μm まで薄片化し^{4,5)}、基準周波数 155MHz の高周波水晶振動子が生産されている³⁾。さらに、両面機械研磨を施した従来の平板型的水晶ウエハにマスキング処理を行い、バッチ式の化学エッチングにより薄板部を作製する逆メサ型水晶ウエハや、逆メサ型水晶ウエハに反応性イオンエッチングと両面機械研磨による追加工を実施して、メサ部底面を凸型レンズ形状とした水晶振動子も開発されている⁶⁾。しかしながら、最終工程に機械的な研磨加工を施すと、発振周波数の経時変化の要因とされる加工面の歪み層、脆性破壊層⁷⁾が必然的に形成されてしまう。

また、機械研磨を施した水晶ウエハには、図 1 に示すような研磨圧力の分布に起因した厚さムラが見られる。水晶ウエハ上に多数の水晶振動子を形成する場合、このような厚さムラが存在すると共振周波数のバラツキが生じるため、周波数調整のた

* 原稿受付 平成 16 年 6 月 24 日

** 正 会 員 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 (吹田市山田丘 2-1)

† 正 会 員 兵庫県立工業技術センター

(神戸市須磨区行平 3-1-12)

†† 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科精密科学専攻

(吹田市山田丘 2-1)

††† 学生会員 大阪大学大学院工学研究科精密科学専攻

Fig.1 Thickness distribution of quartz wafer after double-sided polishing

Fig.2 Relationship between removal spot shape and electrode shape

- (a) Specimen AT-cut quartz wafer (25mm×20mm×80μm), He:CF₄:O₂=98.3:1:0.7, rotating speed 5.2m/s (φ 200mm rotary electrode), machining gap 500μm, RF power 500W, machining time 1min, removal rate 0.130mm³/min
- (b) Specimen AT-cut quartz wafer (25mm×20mm×80μm), He:CF₄:O₂=97.2:1, suction rate 0.6 liter /min (outer diameter φ 3mm, internal diameter φ 0.5mm, pipe electrode), machining gap 500μm, RF power 150W, machining time 1min, removal rate 7.06×10⁻³mm³/min

めに厚さをそろえる後工程が必要となる。従って、工程数を省略するためには厚さムラを解消することが望まれるが、水晶振動子の高周波化を目的とした薄片化に関する研究は上述のように数多く行われているのに対し、水晶ウエハ厚さの均一化に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。均一化の手法としては、スモールツールを用いたローカル研削⁸⁾や反応性イオンエッチング⁹⁾が考えられるが、前者に関しては研削圧力による水晶ウエハの破損や加工変質層の導入、また後者に関しては加工能率の低さやイオン衝撃による加工変質層の導入等が問題となる。特に加工変質層は水晶デバイスの振動特性を悪化させる要因となるので、その形成は極力避ける必要がある。一方、加工能率が比較的高く、加工変質層を全く形成しない手法として HF や HF・NH₃ などを用いたウェットエッチングを挙げることができるが、加工の空間的な制御性に乏しいため、水晶ウエハ厚さの均一化プロセスに用いることは困難である。これらに対して、大気圧プラズマを用いたプラズマ CVM¹⁰⁾¹¹⁾は、中性ラジカルによる化学反応を利用した無歪加工、高ラジカル密度による高加工速度、局所プラズマによるマスクレスの高空間分解能加工が可能であり、また、加工圧力の全くない非接触加工法であるため、脆性材料である極薄の高周波振動子用水晶ウエハの厚さ均一化プロセスに適しているといえる。既に、数値制御プラズマ CVM を用いて高精度加工を行った例として、平面度 10 nm オーダのシンクロトロン放射光用平面ミラー¹²⁾、形状精度

ナノメートルオーダの硬 X 線集光用楕円面ミラー¹³⁾、Si 層厚さ 13 nm ± 5 % の超薄膜 SOI ウエハの開発¹⁴⁾等を挙げることができる。今回、我々が提案する加工プロセスは、円筒型回転電極とパイプ電極を併用した数値制御プラズマ CVM による水晶ウエハ厚さの均一化ならびに薄片化加工である。円筒型回転電極を用いた場合、図 2 に示すように単位加工痕の長さが約 10mm 程度であるため、空間波長の長い誤差成分の修正加工に適している。一方、パイプ電極を用いた場合には単位加工痕の縮小に伴って加工の空間分解能が数 mm 程度まで向上するため、より空間波長の短い形状誤差成分まで修正することができる。なお、図 2 より、円筒型回転電極を用いた場合の加工速度は、パイプ電極を用いた場合と比べて 1 桁以上速いことがわかる。そこで、水晶ウエハ厚さの均一化においては、図 3 に示すように、先ず円筒型回転電極を用いて、両面機械研磨が施された水晶ウエハの厚さムラにおける長周期形状誤差成分を短時間に修正する。その際、加工残差量を最小化するため、テーブルの走査方向に対して水晶ウエハ上の直交する 2 結晶方向(X, Z)をそれぞれ平行に合わせた状態で、水晶ウエハの片面のみ、もしくは両面の修正加工を続けて行う。次に、パイプ電極を用いて円筒型回転電極では除去できなかった少量の短周期形状誤差成分を修正することで、厚さムラが解消された高精度な水晶ウエハを高効率に製作することができる。本報では、前半の円筒型回転電極を用いた数値制御プラズマ CVM 加工について検討した。

Fig.3 Schematic diagram of proposed process of making a quartz wafer with uniform thickness variation by utilizing Plasma CVM

Fig.4 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.5 Schematic diagram of apparatus around the electrode

3. 実験方法

実験に用いたプラズマ CVM 加工装置の概略を図 4 に示す。チャンパーは、電極直下を除いて全面に設置された高周波シールド板により大きく上下 2 構造に分かれており、チャンパー上部に高周波電界を印加する円筒型回転電極（直径 200mm、幅 280mm）が設置されている。回転電極のハウジングにはパイプ電極のユニットも取り付けることが可能となっており、加工対象や目的に応じて使い分けができる。チャンパー下部には、数値制御加工を行うための XYZ 軸テーブルを設置している。ワークテーブルは、シールド板の下部と空隙（図 5 中の gs：以下、gs と称す）を保った状態で Y 軸テーブル上に積載され、ワークテーブル上面には真空チャック（60mm×75mm×20mm）を設置している。真空チャックはアルミ合金製であり、その表面は超精密ダイヤモンド旋削後、硬質アルマイト被膜処理を行い、その被膜をラップ研磨することで、耐磨耗性、耐食性に優れた表面を得ている。真空チャック上に吸着固定された加工試料は、円筒型回転電極底面と 1mm 以下の加工ギャップ（図 5 中の gp：以下、gp と称す）を保った状態で加工される。なお、加工試料には #4,000 ラップ研磨した後、ポリッシュ研磨を行い、洗浄目的にウェットエッチング（エッチング量：20nm）を施した 25mm×20mm×80μm の AT カット水晶ウエハを用いた。

4. 実験結果と考察

4.1 シールドギャップとチャンパー内インピーダンスの相関

反応種を生成するプラズマへの実投入電力は、チャンパー内の構造物によって形成される高周波回路によって異なる。特にワークテーブルの移動に伴うインピーダンス変化の影響は大きいと考えられる。そこで、図 5 のようにワークテーブルが移動する際には、できるだけ広い面積でシールド板の下部と容量結合するような構造を採用した。シールドギャップ gs を小さくして結合容量を大きくすれば、ともに設置されたシールド板とワークテーブルによって閉じた高周波回路が形成されるため、ワークテーブルの移動に伴うインピーダンスの変動が抑制される。その結果、プラズマに供給されるエネルギーが一定となるため、加工特性が安定すると考えられる。そこで、gs を変化させて実際に加工実験を行い、テーブル位置による加工量の変化を評価した。実験結果を図 6 に示す。図中の横軸は、X 軸テーブル（走査速度制御軸）の位置を表し、25mm ピッチに加工試料を設置して、その直上に電極があるようにワークテーブルを移動させ、加工試料の中央部で単位加工痕を取得した。そして、電極の回

Fig.6 Influence of the removal area on the gap (gs) between shield plate and work table

Fig.7 Relationship between surface profile of specimen and surface profile of vacuum chuck
(a) Surface profile of specimen machined by Plasma CVM
(b) Surface profile of vacuum chuck machined by grinding

Fig.8 Relationship between surface profile of specimen and surface profile of vacuum chuck
(a) Surface profile of specimen machined by Plasma CVM
(b) Surface profile of vacuum chuck machined by diamond turning

回転軸と平行な方向における加工深さを平均化して、テーブルの走査方向（電極の回転軸と直交方向）に沿う加工痕の断面積を導出し比較した。図から、gs を 200 μ m まで狭くすると、 $\pm 10\%$ 以上あった加工量の変動幅が $\pm 5\%$ 以内に収まることになる。以後、gs を 200 μ m に設定して実験を行った。

4.2 真空チャックの表面粗さと加工表面粗さとの相関

本研究では、水晶ウエハの全面を加工対象領域とするため、真空チャックにより水晶ウエハを保持している。当初、平面研削によって仕上げた真空チャックを用いて加工実験を行ったところ、図 7(a)に示すように加工面には周期 0.3~0.4mm 間隔、高さ 2~3 μ m の凸形状のうねりが形成された。これを図 7(b)に示す真空チャックの表面粗さと対応させると、真空チャックの表面に存在する深さ 10 μ m 程度の溝がある位置と、加工面での高さ 2~3 μ m の凸形状の位置が一致することがわかる。本装置では、円筒型回転電極と真空チャックとの間に印加した高周波電界によってプラズマを発生・維持させているが、加工試料が誘電体でかつウエハ厚さが 80 μ m と薄いことから、下地の真空チャック表面の溝部分では周囲より電界強度が弱くなり、プラズマ中で生成される反応種の密度が減少することによって加工速度が低下したものと考えられる。次に、真空チャックの表面を超精密ダイヤモンド旋削加工で鏡面仕上げたものを使用した。図 8(b)に鏡面化した真空チャックの表面粗さを示すが、周期が約 1mm で pv 60~80nm の表面粗さが存在する。この真空チャックを用いて加工実験を行うと、図 8(a)に示すように加工面には周期 1mm、pv 約 100nm 程度の表面粗さが生じた。これらの結果により、真空チャックの表面における、わずか 100nm 程度の凹凸でも加工面の表面粗さに影響することが分かった。なお、使用した真空チャックは鏡面仕上げのアルミ合金製であるためスクラッチ傷がつきやすく、新たな加工ムラの原因となってしまう。そこで、超精密ダイヤモンド旋削加工で鏡面化した真空チャックの表面に硬質アルマイト被膜処理を施した後、精密ラップ加工を行った。製作した真空チャックの表面粗さを図 9(b)に、加工面の表面粗さを図 9(a)に示す。本加工結果からは上述したチャック面粗さと加工面粗さとの相関は見られない。また、硬質アルマイト被膜処理を施すことで真空チャック表面のアルミ下地が絶縁膜で覆われることになり、下地の表面形状に起因する電界強度ムラが緩和されているものと推察される。以後、この真空チャックを用いて加工実験を行っている。

4.3 水晶ウエハの全面加工における加工量分布

ワークテーブルをプラズマに対して一定速度で走査させると、加工試料の加工量分布は本来均一になるはずである。よって、均一な加工量分布が得られるかどうかは加工装置の性能を表す尺度となる。表 1 に示す加工条件下で、図 10(a-1)に示すように加工試料を真空チャックの中央部に 1 枚だけ設置して加工実験を行った。図 10(a-2)に実験結果を示すが、 $\pm 10\%$ 程度の加工量分布が存在していることが分かる。そこで、その対応策として加工試料周辺の境界条件について着目し、図 10(b-1)に示すように、加工試料を加工試料の周囲にダミー水晶ウエハを配置した。図 10(b-2)に実験結果を示すが、加工試料の加工量分布を $\pm 5\%$ 以内に向上させることができた。これは、ダミー材に同一厚さ、同一材質の水晶ウエハを用いることにより、加工試料周辺における電界強度の急激な変動が緩和されたため、加工量分布が改善されたものと考えられる。

4.4 加工速度の走査速度依存性

数値制御加工においては、加工量がプラズマの滞留時間に対

Fig.9 Relationship between surface profile of specimen and surface profile of vacuum chuck
(a) Surface profile of specimen machined by Plasma CVM
(b) Surface profile of vacuum chuck machined by lapping

Table 1 Machining conditions

Reactive gas	He:CF ₄ :O ₂ = 98.3:1:0.7
RF power density	8.3 W/mm
Machining gap	500 μ m
Rotation speed	5.2 m/s
Scanning speed	10 mm/min
Scanning pass	100

Fig.10 Improvement of removal depth distribution by placing dummy wafers
(a-1),(b-1) Boundary condition around the objective specimen
(a-2),(b-2) Removal depth distribution of specimen machined by Plasma CVM

して比例する加工特性を有することが要求される。そこで、ワークテーブルの走査速度の逆数をプラズマの滞留時間として捉え、ワークテーブルを種々の速度で走査させた時の走査 1 回当たりの加工量を調べた。表 2 に加工条件を、図 11 に実験結果を示す。図から、プラズマの滞留時間と加工量との間に線形関係が存在することが分かった。しかし、水晶と同じ化学組成の石英ガラスを加工したところ、プラズマ滞留時間と加工量との間には非線形関係が認められた。また、50%HF によるウェットエッチングの実験結果 (22℃) でも、水晶の加工速度が 6 $\mu\text{m}/\text{h}$ であるのに対し、石英ガラスの加工速度は 190 $\mu\text{m}/\text{h}$ と大幅に増加したことから、単結晶構造の水晶とアモルファス構造の石英ガラスとでは化学的な反応性が大幅に異なることがわかった。なお、加工試料である水晶ウエハの厚さが 80 μm と薄いことから、水晶ウエハを介してもプラズマからワークテーブルへの熱伝導性が良好であると考えられる。そのため、本実験条件の範囲では、水晶表面の温度上昇が抑制され、化学反応速度の急激な増加が見られなかったと考えられる。以上の結果は、本装置を用いた水晶ウエハの数値制御加工が安定に行えることを示すものである。

5. 結 言

本研究では超高周波水晶振動子用の高精度水晶ウエハの製作工程において、両面機械研磨後に残存する水晶ウエハの厚さムラを数値制御プラズマ CVM によって解消することを提案するとともに、加工実施に向けた実験装置の製作・性能確認を行った。本研究によって得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 円筒型回転電極による長空間波長誤差成分の除去と、パイプ電極を用いた短空間波長誤差成分の除去を併用した高効率な水晶ウエハ厚さの均一化プロセスを提案した。
- (2) 高周波シールド板を設置し、ワークテーブルとシールド板との間隙を適正化することで、ワークテーブルの移動に伴うチャンパー内インピーダンスの変動を抑制し、安定した加工が可能となった。
- (3) 超精密ダイヤモンド旋削加工で鏡面化したアルミ合金製真空チャックの表面にアルマイト被膜処理を施した後、精密ラップ加工を行った結果、真空チャックの表面粗さに起因する加工面上の特異な表面粗さの生成を抑制することができた。
- (4) 加工試料の周辺にダミー水晶ウエハを配置して電気的な境界条件を安定させることで、加工試料上の加工量分布を改善することができた。
- (5) プラズマ滞留時間と加工量との間に線形関係が得られ、数値制御によって水晶ウエハの厚さムラを解消しながら薄片化が可能であることが分かった。

謝 辞

本研究の実施に際して研究の機会を与えて頂いた兵庫県立工業技術センター次長兼ものづくり開発部長 松井 博 博士に深く感謝致します。また、本研究遂行にあたり試料提供にご協力頂いた東洋通信機(株)トヨコムデバイス技術本部の関係者の皆様に深く感謝致します。

Table 2 Machining conditions

Reactive gas	He:CF ₄ :O ₂ = 98.3:1:0.7
RF power density	10 W/mm
Machining gap	500 μm
Rotation speed	5.2 m/s (500 rpm)

Fig.11 Relationship between dwelling time of plasma and removal depth per scanning

なお、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（若手研究 (A) 15686007）および 21 世紀 COE プログラム (H12) の援助を受けて行われたものであり、ここに記して深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本水晶デバイス工業会編：水晶デバイスの解説と応用，日本水晶デバイス工業会 (2002) 50.
- 2) 佐藤雄一，細川康範，西田公昭，小山光明：光伝送用電圧制御水晶発振器の提案，電気学会電子・情報システム部門大会講演論文集，**2**，(2001) 215.
- 3) 佐藤佐千雄：通信用水晶加工技術，精密工学会誌，**64**，1 (1998) 71.
- 4) 萩野 隆，峠 睦，渡邊純二，大瀧慶史：砥粒加工による超薄型水晶の加工技術，精密工学会誌，**66**，1 (2000) 69.
- 5) Mitsuaki Koyama, Akio Chiba, Koji Koizumi, Yuuji Sato : Fundamental mode 155MHz with flat blank in the crystal unit using VCXO, Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp., **53**, 1 (1999) 338.
- 6) 横溝精一：両面研磨盤を用いた高周波用水晶振動子の加工技術，機械技術，**48**，8 (2000) 33.
- 7) 岡野庄太郎：水晶周波数制御デバイス，テクノ (2001) 25.
- 8) 沢田 潔，山本 明，大森 整，山形 豊，守安 精，村松 優：水晶素板の ELID 研削加工について，マイクロファブリケーション研究の最新動向，**6**，(2000) 58.
- 9) Y. Nagaura and S. Yokomizo: Manufacturing Method of High Frequency Quartz Oscillators Over 1 GHz, Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp., **53**, 1 (1999) 425.
- 10) 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**, 4 (1993) 225.
- 11) 森 勇藏，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.
- 12) 森 勇藏，山村和也，佐野泰久：数値制御プラズマ CVM による X 線ミラーの加工に関する研究 (第 1 報) -X 線ミラー加工用装置の開発-，精密工学会誌，**67**，1 (2001) 131.
- 13) K. Yamamura, K. Yamauchi, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa, and Y. Mori : Fabrication of elliptical mirror at nanometer-level accuracy for hard x-ray focusing by numerically controlled plasma chemical vaporization machining, Rev. Sci. Instrum., **74**, 10 (2003) 4549.
- 14) 森 勇藏，山村和也，佐野泰久：数値制御プラズマ CVM (Chemical Vaporization Machining) による SOI の薄膜化 -加工装置の開発と超薄膜 SOI ウエハの試作-，精密工学会誌，**68**，12 (2002) 1590.