

### 6.12.3 大気開放型プラズマ CVM 法の開発

#### (1) 緒言

当該研究グループでは、大気圧プラズマを利用した新しい超精密加工法である Plasma Chemical Vaporization Machining 法(PCVM)を開発し[6.12.3-1,2]、これまでに、硬 X 線集光用の楕円面ミラー(長さ 100mm)の作製においては形状誤差 3nm p-v 以下[6.12.2-3]、SOI における Si 層の薄膜均一化においては膜厚均一性 13nm±2nm[6.12.2-4]、さらに高周波水晶振動子用 AT カット水晶ウエハの厚み均一化においては 14nm p-v の板厚均一性を達成し[6.12.2-5,6]、光学素子や機能材料の加工においてナノメートルの形状精度を実現した実績がある。しかしながら、従来の PCVM プロセスはプロセス圧力こそ大気圧であったが、加工雰囲気すべてをプロセスガスで置換するために、大型のチャンバーや高価な排気系を必要としたため、このことが汎用的な超精密加工法として普及する上での障害となっていた。本研究においては、PCVM 法の優れた加工特性を有しながら、加工形態としては完全な大気開放型である超精密無歪ナノ精度大気圧プラズマ加工プロセスを開発し、ものづくり産業への導入への障壁とならないような安価で高精度な加工システムを構築することを研究目的としている。

#### (2) 実験装置

図 6.12.23 に大気開放型 PCVM 装置の概略図と外観を示す。RF( $f = 13.56\text{MHz}$ )電圧を印加した直径 3mm のアルミ合金製電極の周囲に同軸状にテフロン製のカバーを設置し、電極とカバーの間隙からマスフローコントローラによって組成と流量を制御したプロセスガスを供給することで、電極先端部の雰囲気をプロセスガスに置換している。被加工物は XY テーブル上に設置され、シミュレーションによって得られた速度データに基づいて速度制御走査を行う。図 6.12.24 にプラズマが発生している様子と得られた加工痕形状を示すが、大気開放下においても安定したプラズマを生成することに成功した。

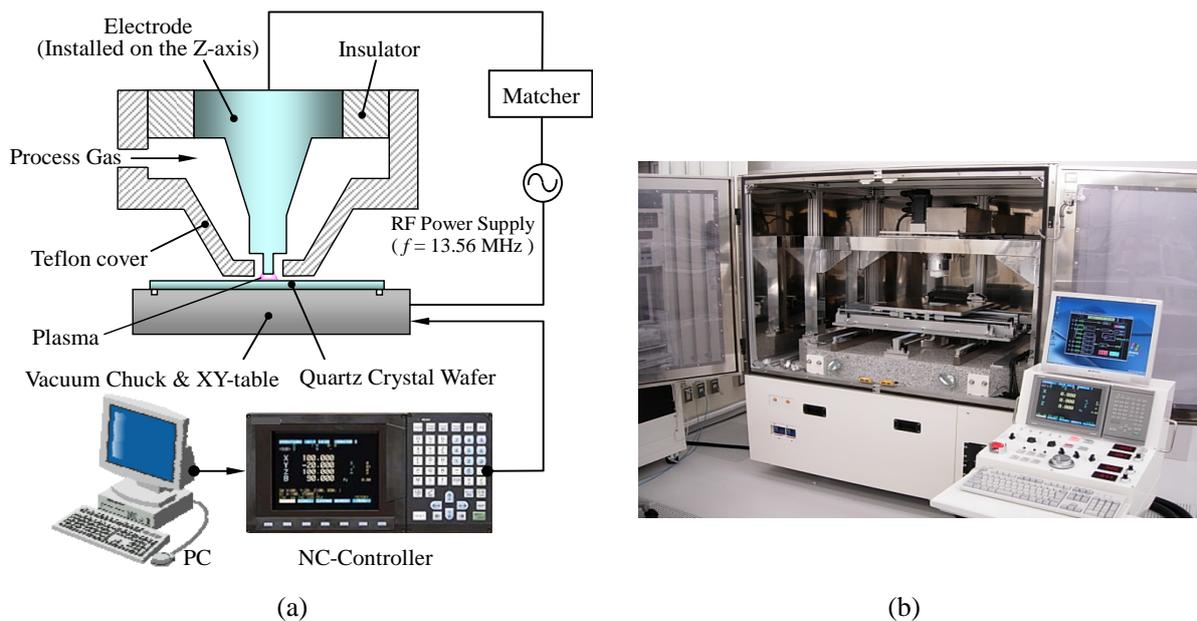


図 6.12.23 大気開放型 PCVM 装置の(a)概略図, (b)外観

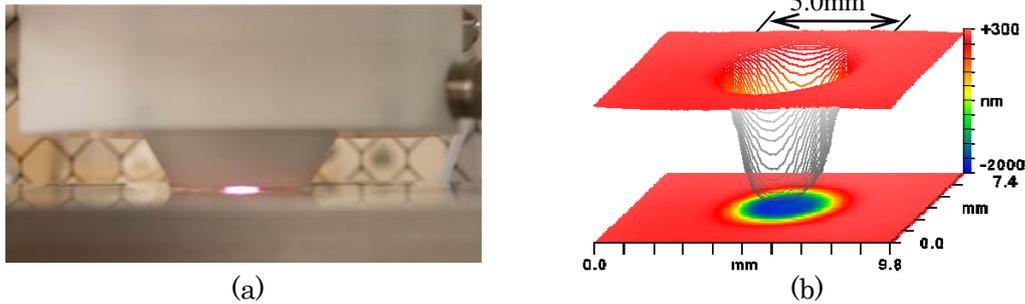


図 6.12.24 (a)プラズマが発生している様子, (b)加工痕形状の一例

### (3) 実験結果と考察

図 6.12.25 に体積加工速度の  $O_2/CF_4$  比依存性を示す。本結果は、静止加工痕を顕微干涉計で測定することによって得た。一般に、 $O_2$  と  $CF_4$  をプロセスガスに用いた低圧下のプラズマエッチングでは、解離した  $O$  原子による引き抜き反応により  $F$  ラジカル密度が増加することが知られているが[6.12.2-7]、大気圧下においても同様の傾向が得られた。本結果より、以後の数値制御加工においては最大加工速度が得られる  $O_2/CF_4=0.2$  のガス組成を適用した。

図 6.12.26 に一軸の走査加工において、1 パスあたりに形成される溝の断面積と走査速度の逆数の関係を示す。走査速度の逆数は加工物上におけるプラズマの滞在時間に対応するため、加工量は王らず間の滞在時間に対して正確に比例することが分かる。すなわち、本加工プロセスにおいてはワークテーブルの走査速度の制御のみで加工物上の加工量分布を制御できる。

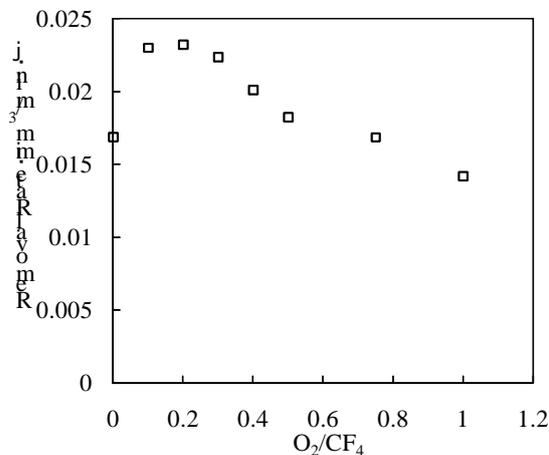


図 6.12.25 体積加工速度の  $O_2/CF_4$  比依存性

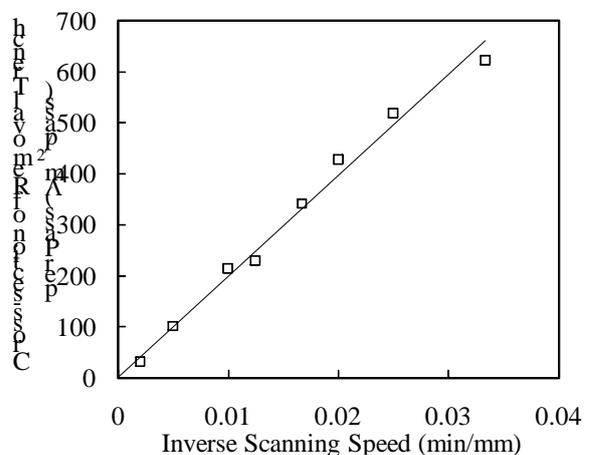


図 6.12.26 溝加工における 1 パスあたりに形成される加工断面積と走査速度の逆数との関係

次に、試作した大気開放型数値制御 PCVM 装置を用いて水晶ウエハの厚みムラの修正加工を行った結果について述べる。水晶ウエハは硬脆材料であり極めて薄い ( $100\mu m$  以下) ため、通常の機械的手法では破損し易く、また加工変質層が必然的に形成されてしまうため、化学的な非接触加工である本加工法の適用は極めて有用である。修正加工前後における水晶ウエハの厚みムラの 2 次元分布を図 6.12.27 に、平均厚さからの偏差分布を図 6.12.28 に示す。修正加工を施したウエハは  $40 \times 40 mm^2$ 、厚さ約  $100\mu m$  ( $f_0=16MHz$ ) の AT カットウエハであり、アルミナを溶射した試料台上に真空チャックにより吸着保持した。

反応ガスにはヘリウムで希釈した  $\text{CF}_4$  と  $\text{O}_2$  ( $\text{He}:\text{CF}_4:\text{O}_2=1500:20:4$ , それぞれ  $\text{cc}/\text{min}$ ) の混合ガスを用い、加工ギャップは  $250\text{mm}$ 、投入電力は  $160\text{W}$  とした。修正前には  $250\text{nm}$  あった厚みムラを修正後には約  $60\text{nm}$  に向上することに成功した。また、このときの修正に要した時間は  $8$  分であり、実用化する上で十分な結果が得られた[6.12.2-8]。

#### (4) 結言

真空排気プロセスを必要としない超精密プラズマ加工法の開発を目的として、大気開放型プラズマ CVM 装置を製作した。本装置を用いて AT カット水晶ウエハの厚み修正加工を行い、厚みムラを  $1$  桁向上することに成功した。本結果は、水晶振動子の作製プロセスにおいて、イオンビームを用いた発振周波数の微調工程時間を短縮できることを意味するものであり、実用的にも極めて有意義な結果である。

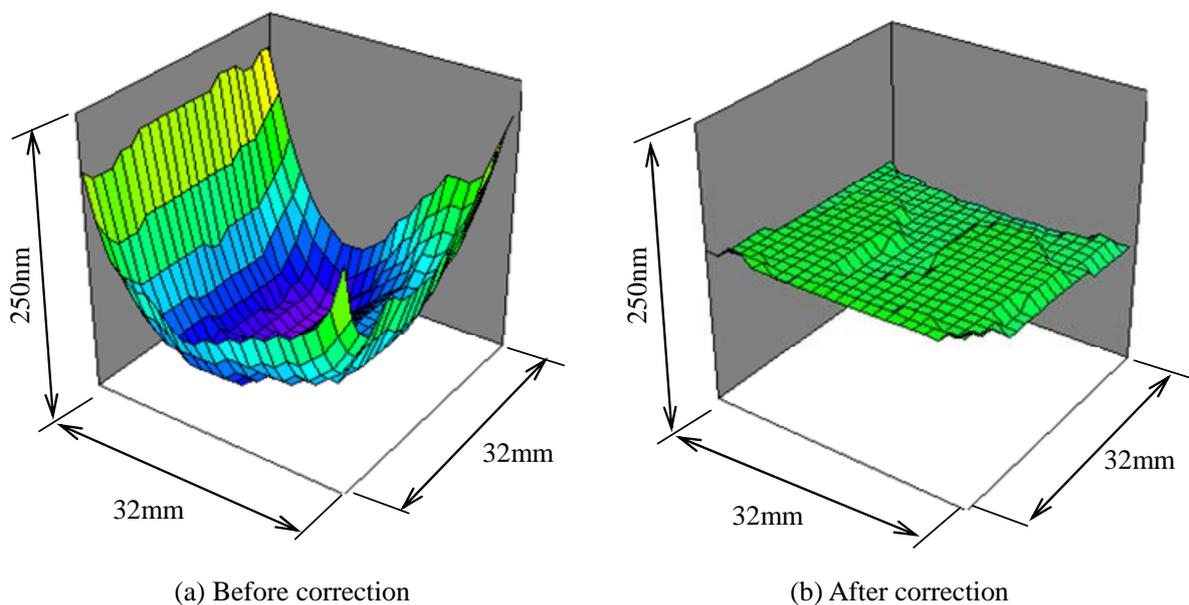


図 6.12.27 AT カット水晶ウエハの厚みムラ修正結果

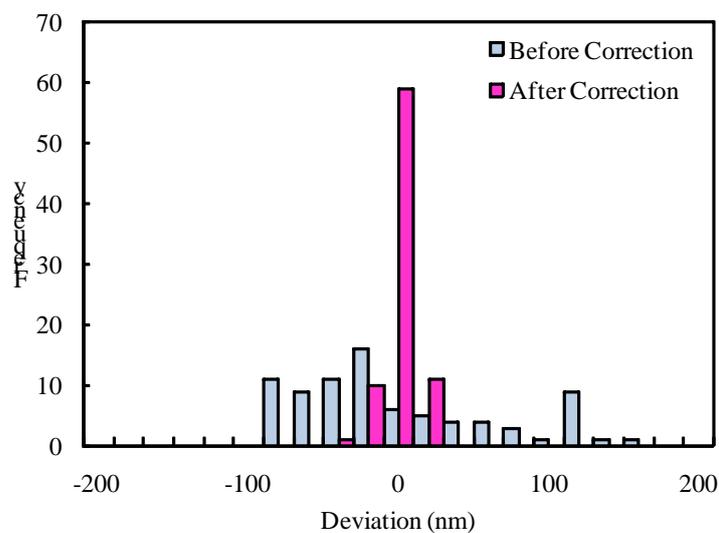


図 6.12.28 修正加工前後における厚み偏差

## 参考文献

- [6.12.3-1] Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura and Y. Sano, "Development of the machine for the x-ray mirror fabrication," *Rev. Sci. Instrum.* **71**, (2000) 4627.
- [6.12.3-2] Y. Mori, K. Yamamura and Y. 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.
- [6.12.3-3] K. Yamamura, K. Yamauchi, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori et al., "Fabrication of elliptical mirror at nanometer-level accuracy for hard x-ray focusing by numerically controlled plasma chemical vaporization machining," *Rev. Sci. Instrum.*, **74**, (2003) 4549.
- [6.12.3-4] Yuzo Mori, Kazuya Yamamura and Yasuhisa Sano, "Thinning of silicon-on-insulator wafers by numerically controlled plasma chemical vaporization machining," *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, (2004) 942.
- [6.12.3-5] M. Shibahara, K. Yamamura, Y. Sano, T. Sugiyama, K. Endo and Y. Mori, "Improvement of thickness uniformity of quartz crystal wafer by numerically controlled plasma CVM," *Proc. SPIE* **5869**, (2005)58690I.
- [6.12.3-6] M. Shibahara, K. Yamamura, Y. Sano, T. Sugiyama, K. Endo and Y. Mori, "Improvement of the thickness distribution of a quartz crystal wafer by numerically controlled plasma chemical vaporization machining," *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, (2005) 096103.
- [6.12.3-7] C. J. Mogab, A. C. Adams and D. L. Flamm, "Plasma etching of Si and SiO<sub>2</sub> –The effect of oxygen additions to CF<sub>4</sub> plasmas," *J. Appl. Phys.*, **49**, (1978) 3796.
- [6.12.3-8] K. Yamamura, M. Shibahara, Y. Sano, Y. Yamamoto, T. Morikawa and Y. Mori, "Improvement of the Thickness Distribution of AT cut Quartz Crystal Wafer by Open-air Type Plasma Chemical Vaporization Machining," *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* **5** (2007) 41.