

研究終了報告書

「大気圧プラズマジェット加工法が拓く自由曲面デバイス」

研究期間：2021年10月～2024年3月

研究者：中澤 謙太

1. 研究のねらい

半導体プロセスは社会的基盤となる集積回路だけでなく機械構造物を有する Microelectromechanical systems (MEMS) においても重要な役割を果たしており、更なる発展が期待されている。MEMS は小型、低消費電力、大量生産が可能という特徴により携帯機器や輸送機器へ応用される。さらに、それらの機器だけでなく Internet of Things の発展に伴い、応用規模の拡大が予想されており、MEMS はますます重要な技術として認識されている。一方、MEMS の基盤技術は加工法であり、加工法の発展によって MEMS は発展してきたと言っても過言ではない。例えば、垂直深堀エッチング法（ボッシュプロセス等）の発明により高アスペクト比構造が求められる素子の実現化に寄与している。しかし、現在の MEMS 標準プロセスでは 2.5 次元構造のみにしか加工することができず、真の 3 次元構造の MEMS を製作することが困難であることが課題である。

近年、新規のプロセス技術として大気圧プラズマの研究が盛んに行われている。低温で高密度なプラズマを生成することができることや、真空装置を必要としないためシンプルな装置構成であるという優位性がある。なかでも大気圧プラズマジェットを用いた微細加工法の開発が注目されている。大気圧プラズマジェットを局在化することで、反応性ガスを材料と反応させて局所的に除去できるため従来は低圧下で困難であったマスクレスエッチングが可能になる。そのため、局在化した大気圧プラズマジェットを任意位置に照射し走査することで所望の形状に加工することができる。提案者はこれまでにサブミクロンに局在化した大気圧プラズマジェットによりポリマー基板に半値幅が 300 nm のライン加工することに成功し、大気圧プラズマジェットを用いて非常に微細な加工が可能であることを実証した。本成果を踏まえ、高速かつ低熱影響で分解能がサブミクロンのマスクレスドライエッチングが実現できるため、自由曲面微細加工法への応用が期待できる。

本研究ではナノ・マイクロ大気圧プラズマジェットを 3 次元的に走査することで自由曲面を創成する微細エッチング法の開発を目的とした。自由曲面が付与された MEMS を製作するプラットフォームを開発することを最終目標としており、本研究はこの中核技術となるため、発展性に優れていると考えられる。本技術はダイレクト加工により研究開発段階において迅速なプロトタイプングに用いられること、モールドを製作することで量産にも用いられることを想定している。本研究は MEMS の製法といった基盤技術を進展させることは、Society 5.x におけるリアル空間とサイバー空間の協働を強固にすることに貢献できると考えられる。

2. 研究成果

(1) 概要

本加工法を実証するための大気圧プラズマジェット加工装置を構築した。走査型プローブ顕微鏡技術を応用し、大気圧プラズマジェット照射位置を高精度に精密位置決めが可能な微細

加工装置となっている。ナノピペットが重要な要素であり、熱引き加工でガラス管を先鋭化したものである。ナノピペットは、位置決めのためのプローブと大気圧プラズマジェット局在化のためのノズルとして用いる。共振周波数で励振したナノピペットとエッチング試料を近接させると、試料とナノピペット先端の相互作用力によって振幅が減衰する。大気圧プラズマジェットは誘電体バリア放電によって生成する。本装置を用いて、大気圧プラズマジェット微細加工システムの開発を行った。具体的には次の成果をあげることができた。

1. 高アスペクト比構造の製作法の開発(特許出願)
2. 大気圧プラズマジェット自由曲面走査経路生成 CAM の開発
3. 大気圧プラズマジェット微細加工のインプロセス計測法
4. 自由曲面マイクロ光学素子製作

(2)詳細

研究テーマ「高アスペクト比構造製作法の開発」

自由曲面デバイス製作に向けてサイクルプロセスによる高アスペクト比構造の製作を行った。ここで、サイクルプロセスとは、ナノピペットの位置決めとエッチングを繰り返して実施するプロセスである。サイクルプロセスによって、従来では表面近傍のみを等方的にエッチングするのみであったが、試料の深さ方向に異方的に加工することができる。

サイクルプロセスによって加工した深穴加工痕のレプリカの走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を取得した。レプリカはポリジメチルシロキサンを深穴に流し込み、硬化させた後に剥離することで得た。深さは 396 μm 、半値幅は 104 μm であった。加工に用いるナノピペットの開口直径は加工幅よりも小さく、ナノピペット開口直径程度の加工幅となることを想定していたが、想定よりも幅の大きな加工がされた。より加工幅を小さくするためにナノピペットの開口直径を減少させたが、加工幅を低減することはできなかった。加工幅が大きくなる原因として、プラズマが環境空気に含まれる酸素を励起し、拡散するためであると考えた。環境空気中に含まれる酸素の影響を小さくするため、加工中のナノピペット周辺に窒素ブローし、酸素の密度を低下させた。その時の深穴加工痕のレプリカの SEM 像を取得した。加工幅は減少し、周辺空気から酸素密度を減少させることが有効であることが示された。

加工深さによってナノピペットの位置決めが正しくなされていないことがわかった。サイクル数が複数回以上ではエッチングを行ってもエッチングされていないサイクルが現れる。サイクル数が増加するに従い、アプローチカーブの勾配が緩やかになった。これは、試料やナノピペットがプラズマを照射することで帯電することに起因する。軟 X 線式の帯電除去装置を導入することで本課題を解決した。

研究テーマ「大気圧プラズマジェット自由曲面走査経路生成 CAM の開発」

複雑な自由曲面を加工するための大気圧プラズマジェットを走査する経路を自動生成するプログラムの開発を行った。製作する形状は形状最適化プログラムを援用して設計する。設計した CAD ファイルからエッチングして除去すべき座標を同定し、その座標から走査経路を得る。設計した形状は代表的な 3 次元形状ファイル形式の STL 形式で出力する。STL 形式は 4 面体で表現されており、この表現形式をボクセル形式に変換する。ボクセルは正 6 面体であるため重心の座標より、加工すべき 3 次元座標を得ることができる。STL 形式からボク

セル形式に変換するために、学術研究でも良く用いられるオープンソースウェアの Visualization Toolkit (VTK) を Python 開発環境で用いた。エッチング基板最表面から順にナノピペットをステップングモーターステージを用いてラスタースキャンし、除去する座標において大気圧プラズマジェットを照射する。

研究テーマ「大気圧プラズマジェット微細加工のインプロセス計測法」

大気圧プラズマジェットを照射してエッチングが進行している部分のエッチング深さをインプロセスモニタリングが可能な共焦点レーザー変位計を開発した。開発した共焦点レーザー変位計を用いて、エッチングが進行して加工点の深さが増加していくことをモニタリングすることに成功し、目的のエッチング深さに達した時に大気圧プラズマジェット照射を停止することでエッチングの精度を向上させた。共焦点レーザー変位計は、計測に用いる光源波長に対応した狭帯域フィルタを用いてプラズマ発光を遮断することで発光によるノイズを低減した。また、スポット位置を 90 Hz で変調することで、電磁ノイズに起因する信号のノイズをフィルタによって除去した。

開発した共焦点レーザー変位計の応答時間をステップ変位試験によって計測した。0.2 μm の変位を計測試料に与えた場合に、応答時間は 0.11 s であった。ステップ変位を 0.2 μm , 0.15 μm , 0.10 μm , 0.05 μm , 0.005 μm と変化させた場合、0.01 μm のステップ変位も十分に判別することができ、分解能は 0.01 μm とした。エッチング深さをモニタリングし、目標エッチング深さに達した時にエッチングを停止した時、複数回実施したエッチング深さの平均値が 10.0 μm , 最大値が 10.7 μm , 最小値が 9.2 μm となった。なお、モニタリングしない場合は、平均値が 9.6 μm , 最大値が 10.7 μm , 最小値が 7.2 μm となった。モニタリングすることで標準偏差は 50% 減少し、インプロセスモニタリングによってエッチングの精度を向上させることを示すことができた。

研究テーマ「自由曲面微細光学素子製作」

大気圧プラズマジェットを用いた加工の空間分解能に強く影響するのはナノピペットのノズル外径であると考えている。電磁界解析を用いるとナノピペット先端で電界が集中し、加工試料表面まで放射的に電界分布を形成する。これまでに、ナノピペットの内径を小さくすることでは加工分解能が小さくならず、外径を変化させることが空間加工分解能に影響していることを実験的に確認している。したがって、ミクロンサイズに加工分解能を保つためには、先鋭化したナノピペットを用いる必要がある。しかし、シリコンやガラスを除去するために用いるフッ素系プラズマでは、ナノピペットもエッチングされてしまうという問題点がある。また、ナノピペットのように先鋭化したノズルを製作することは、現在用いている熱引き加工でないと難しい。そこで、石英製のナノピペット表面にフッ素系プラズマへ耐性のある薄膜を成膜した。

開発したシステムを用いて、代表例としてシリコン基板上に円錐形状をもつ直径 0.6 mm のアキシコンレンズを製作した。走査経路は基板平面方向のラインピッチが 50 μm , 基板厚さ方向に 13 μm ピッチで 5 層と設定した。製作したレンズを白色干渉顕微鏡によって表面形状を計測した。加工形状は直径 0.6 mm 円錐形となっており、3 次元加工に成功した。

3. 今後の展開

MEMS はリアル空間を把握するセンサ, リアル空間に反映するアクチュエータの役割を果たし, サイバー空間とリアル空間を繋ぐインタラクションハードウェアである. 本研究は MEMS の基盤技術を進展させるため, Society 5.x の実現に向けて貢献できると考えられる. 特に, 自由度の高い設計パラメータを与えることで, 多くの MEMS の分解能や可動範囲などの性能を極限的に向上させることができるため波及効果は大きく, MEMS の価値をさらに高めることができる.

4. 自己評価

コロナ禍を通じて, 医療サービスのキャパシティの課題が根本的な問題として浮き上がってきた. しかし, 医療従事者や医療機関の数を増加させることが財政や人口減少の側面から最善ではなく, 人工知能などのテクノロジーと協働することでキャパシティを増加させることが望ましい. 人工知能にとって MEMS は眼, 耳, 口, 手などに相当する感覚機能に対応する役割を果たすため, 必ず本研究成果は社会に還元されると考えられる.

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 8件(主著: 4件)

1. T. Tomita, **K. Nakazawa***, T. Hiraoka, Y. Otsuka, K. Nakamura, and F. Iwata, “In-process monitoring of atmospheric pressure plasma jet etching by a confocal laser displacement sensor”, *Microsys. Technol.* **29**, 1107-1116 (2023)

大気圧プラズマジェットを用いて微細加工する行程中に独自開発した共焦点レーザー変位計でエッチング深さを計測し, 加工精度・正確さを向上させた.

3. S. Yamamoto, **K. Nakazawa**, A. Ogino, and F. Iwata*, “Sub-micrometer plasma-enhanced chemical vapor deposition using an atmospheric pressure plasma jet localized by a nanopipette scanning probe microscope”, *J. Micromech. Microeng.* **32**(1), 015006 (2022)

大気圧プラズマジェットを用いて, マイクロスケールにマスクレスで化学気相堆積する手法を提案した.

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1件(特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主な学会発表

1. **K. Nakazawa** and F. Iwata, “Development of deep etching method by atmospheric pressure plasma jet”, The 10th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2023), ASPEN2023P_008 (2023), Hong Kong
2. **中澤謙太**, 岩田太, “大気圧プラズマジェットを用いた垂直深堀エッチング法の開発”, 2023年度精密工学会春季学術講演会, D09 (2023)
3. T. Tomita, **K. Nakazawa**, T. Hiraoka, Y. Otsuka, K. Nakamura, F. Iwata, “Development of atmospheric pressure plasma jet etching for trimming of micro-machined devices”, 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, C2-2-01(2022), Japan

受賞

Young Researcher Award, 受賞者: Kenta Nakazawa, 授与機関: Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology