

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04770

研究課題名(和文) レーザープラズマ極端紫外光によるアブレーション加工

研究課題名(英文) Micromachining using extreme ultraviolet radiation from laser-produced plasma

研究代表者

牧村 哲也 (Makimura, Tetsuya)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：80261783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：波長が10ナノメートルの光を物質に照射し表面から削り取る実用的な加工法を確立した。10ナノメートルの波長の領域では、レンズを作るための透明な材料が存在しないため、反射を利用しアスペクト比が高い構造を加工するための光学系を開発した。また、マイクロメートルのスケールでは光の波の性質が顕著になる。このため、実際の加工形状と比較しながら、光の伝搬を制御した。これらの成果を用いて、10マイクロメートルの厚さのポリマー材料に直径が1マイクロメートルの貫通孔を作製できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

可視光や紫外光が物質に入射すると、吸収されてすぐに熱エネルギーに変換されてしまう。加工を行う場合作製した構造が崩れことになる。従って、従来10マイクロメートルより微細な加工は困難であった。本研究では、波長が10ナノメートルの光を用いることでこの困難を打破し、マイクロメートルのスケールでの加工を可能にした。この成果は、マイクロ化学分析器や細胞の操作のための構造を作製するの応用できる。

研究成果の概要(英文)：We have established a practical processing method that irradiates light with a wavelength of 10 nanometers onto a material and removes the surface region. In the 10-nanometer wavelength range, there are no transparent materials available to make lenses. Therefore, we developed an optical system based on reflection to process structures with a high aspect ratio. In addition, at the micrometer scale, the wave nature of light becomes pronounced. Therefore, we controlled the propagation of light by comparing the simulated one with the actual processed geometry. Using these results, we have shown that through holes with a diameter of 1 micrometer can be fabricated in a polymer sheet with a thickness of 10 micrometers.

研究分野：光加工

キーワード：極端紫外光 プラズマ マイクロ加工 シリカガラス ポリジメチルシロキサン 高アスペクト比 レーザー生成

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

3次元構造の微細加工には、光を被加工物に照射して、照射領域を削り取るアブレーション加工が有効である。レーザーアブレーションは、レーザー光の波長、光子エネルギー、パルス幅、物質内のエネルギー移動時間により分類することができる。

これまで、中赤外から紫外までの領域のレーザー光によるレーザーアブレーションは、盛んに研究されて、製造で利用されている例も多い。しかし、レーザーアブレーションは、アブレーションのメカニズムによる制限があり、10マイクロメートルの加工解像度に限定される。これに対し、波長が10ナノメートル程度の極端紫外光は、波長が短いので微細加工が期待できる。また、光子エネルギーが高いため既存のレーザーを用いたアブレーションとは異なる機構でアブレーションに至る可能性がある。これまでに、パルス幅がともに1ピコ秒前後のX線レーザーおよびX線領域の自由電子レーザーを用いたアブレーションについて研究されている。

X線レーザーを用いたアブレーションでは、光のエネルギーが熱に変換され、照射領域が溶融するとともに、瞬時に格子間隔が変わるため衝撃波が発生する。この衝撃波の運動に伴って溶融領域が効率的に表面から放出される動的なアブレーションが提案されている。この場合ミルククラウンのように溶融領域が変形し、その後冷却されてその形のまま固体に戻るため、精密加工を目標とするならば更なる研究が必要である。また、現在のところ、パルスごとの強度、空間プロファイル、時間プロファイルのばらつきが大きい。また、ともに国家プロジェクトとして開発や運用を行う規模の装置が必要である。従って、実用的な加工に用いるためには今後の発展を待つ必要がある。

本研究では、パルスレーザー光をターゲット材料に照射することで照射領域をプラズマ化し、そのレーザー生成プラズマから輻射される極端紫外光を加工用光源とする。これは、パルスのかつ高強度の極端紫外光源である。ただし、透過型の光学材料が存在しない。また光源から放射状に輻射される。これらのことから、高アスペクト加工に用いることは困難であった。

## 2. 研究の目的

極端紫外光を被加工物に照射し、表面を削り取るアブレーションについて研究する。これによりマイクロメートルスケールでの高アスペクト加工を実現する。

## 3. 研究の方法

レーザー生成プラズマから輻射されるナノ秒パルス極端紫外光を被加工物に照射し、表面を削り取るアブレーションについて研究した。特に、極端紫外光の光源、光学系、光のパターニングを確立し、有効な手法を用いて極端紫外光によるアブレーションについて研究した。

極端紫外光の光源として、Taターゲットにパルス幅10ナノ秒のNd:YAGレーザー光を照射した。この照射領域がプラズマ化し、そのプラズマから極端紫外光が輻射される。Taターゲットを用いると、波長が5ナノメートルから100ナノメートルの広い範囲で効率よく極端紫外光を輻射する。また、狭い波長領域に極端紫外光を得るために、パルス幅50秒の炭酸ガスレーザー光をSnターゲットもしくは固体Xeターゲットに照射した。それぞれ13ナノメートル、11ナノメートルに極端紫外光を輻射する。

レーザープラズマから輻射される極端紫外光は放射状に伝搬していく。この波長領域の光を効率よく就航するためには、多層膜反射鏡で特定の波長の光を集光するか、単層膜反射鏡で広い波長範囲の光を集光するかのいずれかになる。また、アスペクト比が高い構造を作製するためにはより指向性が高いビームに変換する必要がある。これらの観点から、斜入射反射工学系を採用した。

光のパターニングを行うために、被加工物の前にマスクを設置して、そのマスクの開口を通過した光を被加工物に入射した。マスクとしては、反射型のマスクもしくは透過型のマスクがあり得る。被加工物がアブレーションされる程度の強度の極端紫外光がマスクに入射するため、十分な耐性が要求される。ナノ秒極端紫外光を用いて、有機材料やガラス材料をアブレーションするためには、金属マスクが有用であることを明らかにした。実用上は、マスクもしくはピンホールを通過した光を、再度結像もしくは集光し、パターニングを行えばよいと考えられる。

## 4. 研究成果

(1) 初めに、極端紫外光ビームの伝搬を数値計算により求め、マスク開口の形状の検討を行った。第一に波長とアスペクト比の関係を調べた。波長が10ナノメートルの極端紫外光が直径1マイクロメートルの開口に入射した場合、その後20マイクロメートル伝搬しても、幾何光学で

期待される領域にビームが留まっている。それに対して、波長が 150 ナノメートルの光は、10 マイクロメートル伝搬すると、おおよそ幾何光学で期待される領域の外側に回折する。10 マイクロメートルの厚さのシートに直径 1 マイクロメートルの貫通孔を開ける場合、波長が 10 ナノメートルの光が有用であると言える。第二に開口形状とビームプロファイルの関係を調べた。開口が円形の開口に垂直に光が入射し、その後伝搬すると、光軸（開口の中心を通り開口に垂直な軸）上で強度分布が強くなり、その後回折により広がっていく。例えば波長が 10 ナノメートルの光が、1 マイクロメートルの開口を通過した後 10 マイクロメートル伝搬すると、中心で強度が強くなる。実験的にも、マイクロメートルスケールの開口を通して極端紫外光を照射すると中心部分が深く削られる。これは、加工の観点からは、よい特性ではない。数値計算により、開口形状を四角形にして開口の対称性を崩すと、中心に光が集まる回折を減らせることを明らかにした。実験的にも、四角形の開口を用いた場合、中心だけさらにアブレーションされることはなかった。これらの検討から、マスク形状の設計が重要であることが明らかになった。

(2) 次に、マイクロメートルスケールでの高アスペクト加工について調べた。10 マイクロメートルの厚さのシリコンゴムでできたシートに、2 マイクロメートルの開口のマスクを通して極端紫外光を照射した。これにより貫通孔を作製することができた。既存のレーザー光によるアブレーションでは実現が困難であった、高アスペクト比のアブレーション加工が実現できたことを強調したい。

(3) ①極端紫外光の波長について調べた。そのために研究の方法で挙げた 3 種類の極端紫外光源からの光をシリコンゴムに照射し、アブレーションを行った。どの光源を用いても極端紫外光の試料上での強度に対して、同じ深さでアブレーションされることを明らかにした。特に注目すべきは、11 ナノメートルの光子はポリジメチルシロキサンの主鎖を構成するシリコン原子の内殻の 2p 電子を励起できる。一方、13 ナノメートルの光子は 2p 内殻電子を励起できない。従って、励起後速やかに価電子帯と伝導体に電子・正孔のペアに緩和し、その後アブレーションに至ることが示唆される。②また、シリコンゴムと骨格が同一のシリカガラスのアブレーションを行った。原子状に分解されたイオンが多く観測された。このことは、光電子が大きな運動エネルギーを持ち表面から脱出するため、表面がイオン化し、クーロン反発力によりアブレーションに至ることを示唆する。

(4) 本研究では、パルス幅が 10 ナノ秒の極端紫外光を用いてアブレーションを行った。シリカガラスの場合アブレーション後表面粗さが 1 ナノメートル程度で、精密な加工に適すると期待できる。パルス幅が短い X レーザーとは、アブレーションの機構が異なると考えられる。本研究の成果は、半導体プロセスを適用するのが困難な生体適合性材料の高アスペクトマイクロ加工に極めて有用であると考えられる。3 次元マイクロ流体回路の作製や、細胞培養基板への応用が期待される。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>Kotaro Oguchi, Erika Kira, Hikari Urai, Tetsuya Makimura                   |
| 2 . 発表標題<br>Ablation of polydimethylsiloxane elastmer using laser-plasma EUV radiation |
| 3 . 学会等名<br>16th International Conference on Laser Ablation (国際学会)                     |
| 4 . 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Jiang Yuan, Kotaro Oguchi, Tetsuya Makimura                                 |
| 2 . 発表標題<br>High-aspect micromachining of PDMS sheets using laser plasma EUV radiation  |
| 3 . 学会等名<br>The 22nd International Symposium on Laser Precision Microfabrication (国際学会) |
| 4 . 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>Makimura Tetsuya; Urai Hikari; Kira Eriko; Niino Hiroyuki  |
| 2 . 発表標題<br>Microfabrication of PDMS structures based on wave optics using EUV radiations from laser-produced plasma |
| 3 . 学会等名<br>The 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing/ (国際学会)                            |
| 4 . 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Makimura Tetsuya; Torii Shuichi; Niino Hiroyuki               |
| 2 . 発表標題<br>Silica ablation process induced by nanosecond EUV irradiation |
| 3 . 学会等名<br>SPIE Optics + Optoelectronics 2019 (国際学会)                     |
| 4 . 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Tetsuya Makimura, Shuichi Torii, Hiroyuki Niino                                |
| 2. 発表標題<br>Silica nano-ablation mechanism under irradiation with nanosecond EUV radiation |
| 3. 学会等名<br>SPIE Photonics West (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|