

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14053

研究課題名（和文）軟X線高次高調波を用いたナノメートル分解能レーザー加工プロセスの開発

研究課題名（英文）Development of nanometer-resolution laser processing using soft X-ray high-order harmonics

研究代表者

本山 央人（Hiroto, Motoyama）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：00822636

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）：本研究の目的は、フェムト秒EUVレーザーを用いたナノメートル分解能レーザー加工の確立である。フェムト秒レーザーの高次高調波としてEUVレーザーを発生させ、高精度に加工したWolterミラーでサブミクロンサイズまで集光し、試料表面に照射する。種々の金属試料に対して加工テストを実施し、照射箇所を原子間力顕微鏡で計測したところ、サブミクロン加工が進行していることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、フェムト秒EUVレーザーを用いた物質のナノメートル分解能レーザー加工が可能であることが実証された。EUVは、物質への光侵入深さが極めて短いことから、可視光よりも少ないパルスエネルギーで加工を進行させることができる。すなわち、被加工物へと投入される熱量を低減させることができる。加工装置全体を真空中に設置する必要があるものの、熱影響を避ける必要のある微細加工の需要に応えうる技術であり、産業応用への展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to establish nanometer-resolution laser processing using a femtosecond extreme ultraviolet (EUV) laser. EUV laser pulses are generated as high-order harmonics of femtosecond laser pulses, and focused to sub-micron size using a precisely figured Wolter mirror, and the focusing beam irradiated the sample surface. Processing tests were conducted on various metal samples, and atomic force microscopy measurements confirmed that sub-micron processing was achieved.

研究分野：EUV光学

キーワード：高次高調波 EUVミラー EUV

1. 研究開始当初の背景

現代の科学技術の発展は、構造物の微細加工技術によって支えられてきた。半導体回路の線幅の微細化や自然界の微細構造を模したナノ周期構造による機能性表面の創成など、微細構造が先端科学技術の発展に寄与した例は枚挙に暇がない。電子ビームリソグラフィや収束イオンビーム加工、マイクロ放電加工など、様々な微細加工技術が実用化されているが、中でもレーザー加工の研究技術開発が急速な発展と広がりを見せている。高速加工性や透明体材料の内部構造かこうなど、高付加価値製品の加工が可能である一方で、その加工メカニズムは完全に明らかにされておらず、第一原理計算を駆使した加工メカニズム解明なども精力的に行われている。このように、レーザー加工は産学両分野にわたって重要な研究開発テーマのひとつであると言える。

2. 研究の目的

本研究では、高強度フェムト秒レーザーの高次高調波として発生させた、極端紫外領域のフェムト秒レーザー光源を利用して、サブミクロンからナノメートルレベルの高分解能レーザー加工プロセスを開発することを目的としている(図1)。光の回折限界集光サイズは波長に比例するため、極端紫外領域の光を用いることで、サブミクロンサイズの集光ビームを生成することができる。サブミクロンサイズの極端紫外ビームを材料表面に照射することで、極微領域の物質を局所的に加工することができる。しかしながら、フェムト秒レーザーから高次高調波への変換効率の典型地は 10^{-6} 程度と極めて低く、ナノジュールレベルのパルスエネルギーしか得られない。物質の加工閾値を超える強度を実現するためには、微小集光によりパルスエネルギーを空間的に圧縮する必要がある。

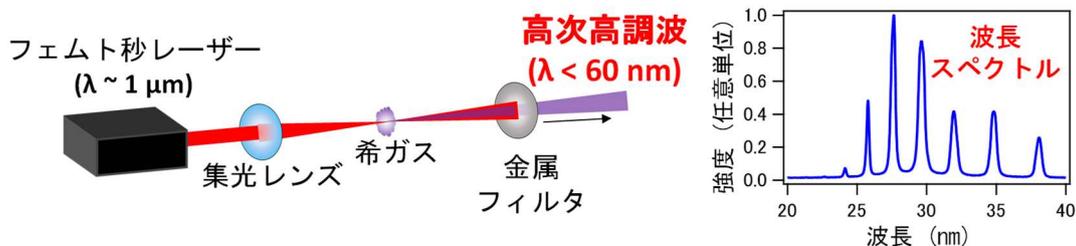


図1. 高次高調波の発生手法の模式図と典型的な波長スペクトル

3. 研究の方法

極端紫外域の光には、高透過率と高屈折率を両立する材料は存在しない。そのため、表面が球面や楕円形状に湾曲したミラーが用いられることが多い。本研究では、楕円面と双曲面を組み合わせるウォルターミラーを集光ミラーの形状として採用した(図2)。楕円ミラーや球面ミラーと異なり結像条件を擬似的に満たすため、光源点の位置変動や光線のミラーへの入射角誤差に対してロバストな集光が可能とされている。研究を遂行した高次高調波ビームラインに合わせて設計したウォルターミラーを用いることで、サブミクロンサイズの集光ビームを形成できる。また、本ミラーは受光可能なビームサイズが $5 \sim 6 \text{ mm}$ 程度と広めに設計されており、そのため発散角度の大きい高次高調波光源においても比較的高いスループットを確保することができる。先行研究で用いていた回転楕円ミラーの場合、集光強度の最大値は 2 mJ/cm^2 程度であった[1]。回転楕円ミラーをウォルターミラーに交換することで集光強度 100 mJ/cm^2 を安定的に形成することが可能となった。

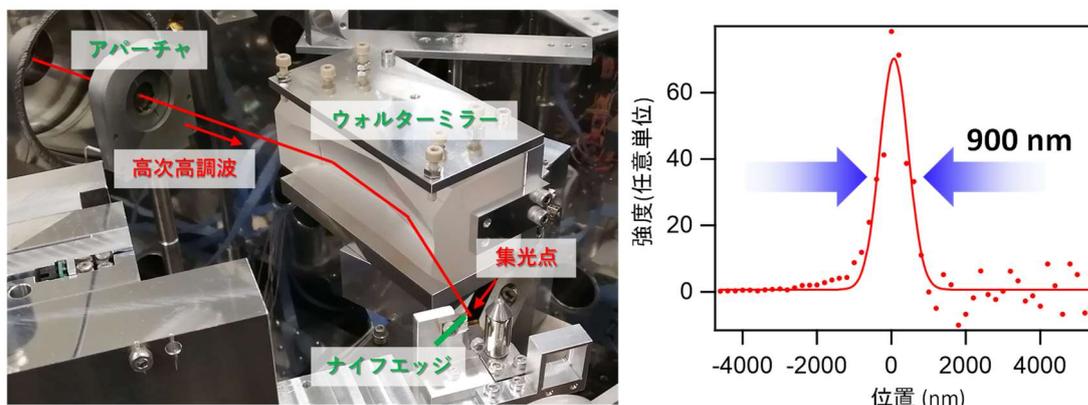


図2. 集光装置内に配置されたウォルターミラーの写真(左)と集光強度プロファイルの典型例(右)

被加工物は集光装置内の 3 軸走査ステージに設置した。高次高調波と同軸を伝搬するように調整した HeNe レーザを用いて被加工物を高次高調波の集光点に一致させる。集光ビームの焦点深度は数 10 μm レベルであるため、被加工物は面内方向だけでなく光軸方向にも走査して、加工試験を実施した。

4. 研究成果

種々の金属材料に対して加工試験を実施した結果、金属材料の加工が可能であることが示された。例として厚さ約 100 nm のニッケル薄膜に集光ビームを 100 ショット照射した結果を示す。照射箇所を原子間力顕微鏡で計測したところ、加工が進行していることが明らかとなった(図 3)。また、特定の条件下では、単純な穴あけ加工だけではなく照射箇所に、溝に囲まれた隆起構造が現れることも判明した[2]。

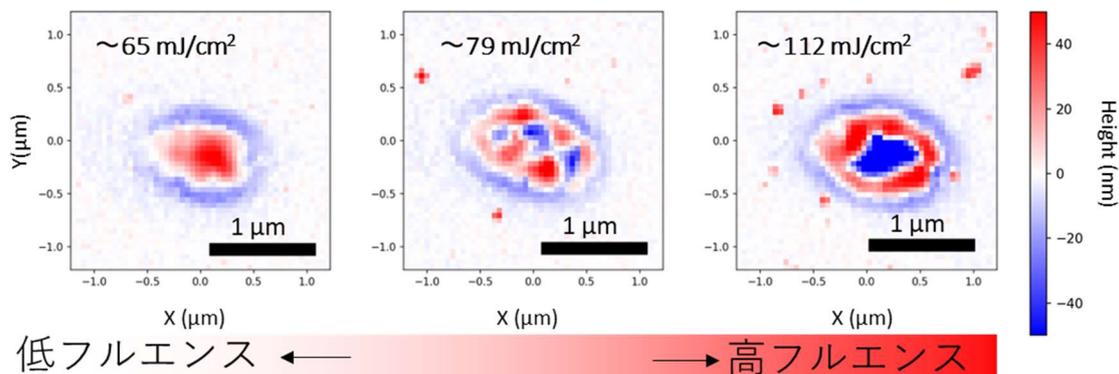


図 3. ニッケル薄膜に集光ビームを照射した際に形成された表面形状を原子間力顕微鏡で計測した結果

また、特定の半導体材料においても加工が進行した。図 4 に GaAs ウエハに集光ビームを照射した場合の照射箇所の形状を示す。10 ショット、100 ショットの場合は隆起形状が見られ、1000 ショット、10000 ショットの場合は深穴加工が進行する様子が見て取れる。ショットに応じて穴加工が進行し始めることから、隆起形状の形成にともなう加工閾値の低下、あるいは蓄積された熱エネルギーによる温度上昇の結果、材料の融点を越えたと推測することができる。

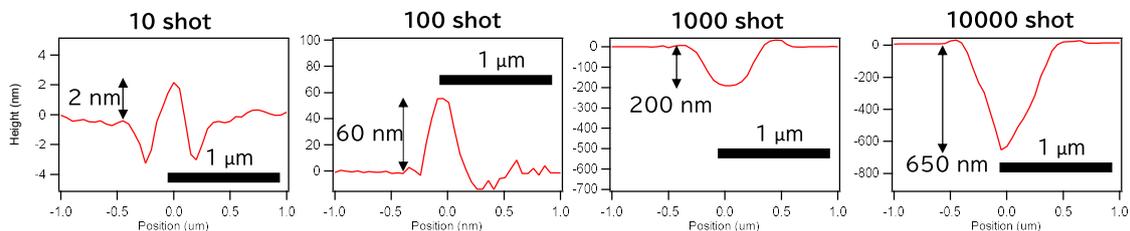


図 4. GaAs ウエハに対して 10, 100, 1000, 10000 ショットの集光ビームを照射した場合の、照射箇所の断面形状。

本研究では、極端紫外領域のフェムト秒レーザーパルスをウォルターミラーで集光して試料表面に照射する装置を構築し、種々の材料に対して加工試験を実施した。その結果、金属材料や一部の半導体材料に対してサブミクロン分解能での加工が可能であることを示した。

集光ミラーの加工技術の日々進歩しており、より小さな集光ビームを極端紫外領域で形成可能になることが予想される。本技術はマスクレスで任意のサブミクロン構造を試料表面に形成するものであり、今後、微細加工技術の分野において、新たな加工手法として利用されるようになることが期待される。

<引用文献>

- [1] K. Sakaue, H. Motoyama, R. Hayashi, A. Iwasaki, H. Mimura, K. Yamanouchi, T. Shibuya, M. Ishino, T.-H. Dinh, H. Ogawa, T. Higashiguchi, M. Nishikino, R. Kuroda, Surface processing of PMMA and metal nano-particle resist by sub-micrometer focusing of coherent extreme ultraviolet high-order harmonics pulses. *Opt. Lett.* 45, 2926-2929 (2020).
- [2] H. Motoyama, A. Iwasaki, H. Mimura, K. Yamanouchi, Submicron structures created on Ni thin film by submicron focusing of femtosecond EUV light pulses. *Appl. Phys. Express.* 16, 016503 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Motoyama Hiroto, Iwasaki Atsushi, Mimura Hidekazu, Yamanouchi Kaoru	4. 巻 16
2. 論文標題 Submicron structures created on Ni thin film by submicron focusing of femtosecond EUV light pulses	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 016503 ~ 016503
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/acaebe	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 A. Ansai, H. Motoyama, A. Iwasaki, H. Mimura, K. Yamanouchi
2. 発表標題 Submicron structures created on metal thin films by submicron focusing of femtosecond EUV light pulses
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroto Motoyama, Atsushi Iwasaki, Hidekazu Mimura, and Kaoru Yamanouchi
2. 発表標題 Development of tight focusing optics in the XUV wavelength region for investigation of multiphoton ionization of atoms and molecules
3. 学会等名 Pacifichem 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroto Motoyama, Atsushi Iwasaki, Hidekazu Mimura, and Kaoru Yamanouchi
2. 発表標題 Processing of Ni thin film by sub-micron focusing of high-order harmonic pulses in the XUV region
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 紫外光による半導体材料の微細加工	発明者 山内薫、本山央人、 安齋哲央、三村秀 和、岩崎純史	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2022-187697	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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
---------	---------