

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18749

研究課題名(和文)高繰り返しレーザーに対応可能なユニバーサル元素型低密度レーザープラズマ源

研究課題名(英文)Low density laser plasma source with various elements applicable to high repetition laser

研究代表者

長井 圭治(Nagai, Keiji)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：30280803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：ユニバーサル元素に対応する目的で、多くの金属と室温付近で合金を形成するガリウムを用い、ガリウムスズターゲットからの13.5 nm発光が純金属スズと同等の効率で起こることを確認した。また連続的にドロップレットとして、室温付近で供給できることを確認した。また、軽元素で最小質量性の高い、エアバブルをテンプレートとして、高分子電解質の表面、層間にスズをドーブしたターゲットを連続的に作成し、その一つにレーザーを照射して13.5 nmの発光を金属スズと同等に観測することができた。後者の方法は目的とした「最小質量、元素選択ユニバーサル、スケールアップ合成」を両立したものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この成果は13.5 nmのEUVのみならず次世代の6 nm EUV、炭素イオンビームほか 様々なレーザー誘起量子線用のターゲットに展開できるものである。本技術のニーズは高強度レーザー研究者から特に強く、そうした分野への展開を検討するために、最終年度には、ワークショップでレーザープラズマ型量子線発生研究者との会合をもち、共同研究の可能性を議論できた。さらに、本研究課題の成果を活用して、通常は高額な装置となるEUV光を、研究室内で利用する試みにも予備的に取り組み始めた。これらを進めることで、本成果は微細加工のみならず、低原子番号材料(生体を含む)の高空間分解能分析、医療応用に繋がる。

研究成果の概要(英文)：Low density materials can control plasma properties of laser absorption, which can enhance quantum beam generation. The recent practical extreme ultraviolet light (EUV) is the first industrial example of laser plasma source with low density targets. The easy-handling target source based on a hollow sub-millimeter microcapsule was fabricated from polyelectrolyte cationic and anionic surfactant on air bubbles. The lightweight microcapsules acted as a scaffold for surface coating by tin(IV) oxide nanoparticles (22-48%), and then dried. The microcapsules were ablated with a Nd:YAG laser (7.1×10^8 W/cm², 1 ns) to generate 13.5 nm EUV relatively directed to laser incidence. The laser conversion efficiency (CE) at 13.5 nm 2% bandwidth from the tin-coated microcapsule (0.8%) was competitive compared with bulk tin (1%). The microcapsule aggregates will be utilized as a small scale/compact EUV source, and future quantum beam sources by changing the coating to other elements.

研究分野：光エネルギー変換材料

キーワード：レーザープラズマ レーザーターゲット 高繰り返しレーザー 量子線源 極端紫外光 (EUV) 低密度材料 高分子電解質 スズ

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、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年高強度レーザーによるレーザープラズマ方式による高エネルギー粒子への変換と制御性が進歩し、これまで巨大な加速器でしか得られなかった量子線がコンパクト化され、汎用に産業や医療現場で活用される期待が高まっている。この実現に当たっては、レーザーの高出力化、低価格化もさることながら、レーザー被照射体であるターゲットの開発、特に高繰り返しレーザーに対応して、その繰り返し数に合わせて、レーザー照射部に連続供給することが求められている。最小質量、元素選択ユニバーサルをスケールアップ合成と共に両立させることは、これまで例がなかったことだが、本研究ではこの課題に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究の目的は、レーザープラズマを高繰り返しレーザーに対応して、その繰り返し数に合わせて、レーザー照射部に連続供給することを、最小質量、元素選択ユニバーサル、スケールアップ合成を両立させて行うことであった。ターゲットデザインとして、近年進歩の目覚ましい界面活性剤技術を駆使して、中空のミニマムマスタターゲットの基板を与え、そこに必要最小量のプラズマ源をコートし、さらに連続的に真空チャンバー内に導入して、連続的にレーザーにより量子線を発生させることを目的とした。

3. 研究の方法

以下の4段階を考えた。実際には、バブルターゲット以外に、合金ターゲットも並行して検討し、成功の確率を高めた。

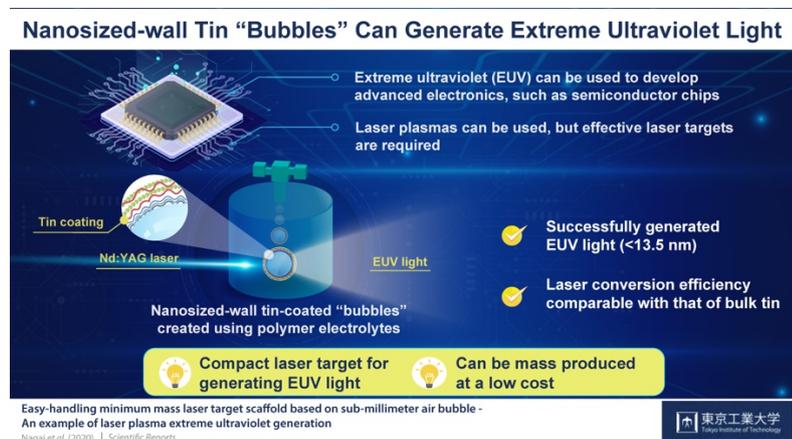
- 1) 材料の最適化：サブミリメートルサイズ制御したバブルに、高分子電解質を被覆して、厚み10nmの中空の球状基板を力学強度を維持しつつ与える。また、スズ等のナノ粒子の被覆率が100%近くなるための高分子電解質とナノ粒子表面の組み合わせを明らかにする。
- 2) 製造プロセス：流体デバイスのノズル表面処理とノズル径、気体流量の最適化により1kHz以上でレーザースポットサイズに合った単分散サイズにバブルを生成する条件を明らかにする。
- 3) 連続射出：各バブルが独立を射出させるためのバブル容器と射出キャプラリー内面の表面処理と発射のための圧力供給方法を明らかにする。
- 4) レーザー同期照射：射出タイミングをレーザーショットと同期させて、高強度レーザー照射により、量子線発生させ、その特性を明らかにする。

以上を統合して、サイズのサブミリメートルへの大型化と1kHzから100kHzへの高繰り返し照射に対応できる精密なスケールアップを、組成のパラエティを持ちつつ行うことを計画した。カーボンの量を最小化するために、ポリビニルアルコールを用いずに、エアバブルを製造する。この際に流体デバイスによりサブミリメートルサイズ制御する。その表面に、LbL被覆して補強する。LbLの層数と力学強度の相関を調べ、できるだけ薄い膜で次のプロセスに進めるようにする。このプロセスの、高分子電解質粘度も最適化する。

4. 研究成果

初年度に、並行して検討した合金法について、リチウム[1]、ガリウム[2]といった低融点金属との合金化により、スズを室温付近でドロップレット化し、それを連続的に発射することと、レーザーターゲットとすることで、13.5nmの発光が得られることを示した。ガリウムが室温付近で種々の金属と合金を形成することを鑑みると、ユニバーサルな重元素に対してこの方法でEUV、X線を発生できることが期待できる。

最終年度には、さらに軽元素で最小質量性の高い、エアバブルをテンプレートとして、高分子電解質の表面、もしくは層間にスズをドープしたターゲットを連続的に作成し、その一つにレーザーを照射して13.5nmの発光を金属スズと同等に観測することができた[3]。この方法は目的とした「最小質量、元素選択ユニバーサル、スケールアップ合成」を両立したものであり、今



東工大ニュースから成果を全世界に発信

後13.5nmのEUVのみならず次世代の6nmEUV、炭素イオンビームほか様々なレーザー誘起量子線用のターゲットに展開できるものである。本研究課題の成果を活用して、通常は高額

な装置となる EUV 光を、研究室内で利用する試みにも予備的に取り組み始めた。

当初計画した(1)~(4)のうち、(3)まで実行できた。(4)については、新たな課題と思いがけない解決策の糸口が見つかった。これらについては、13.5 nm を利用する研究に移りつつ、詳しく検討するのが良いと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Keiji Nagai, Christopher S A Musgrave, Naoaki Kuwata, Junichi Kawamura	4. 巻 3
2. 論文標題 Electrochemically synthesized tin/lithium alloy to convert laser light to extreme ultraviolet light	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 12422-12427
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI. 10.1021/acsomega.8b01220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Christopher S A Musgrave, Nan Lu, Rie Sato, Keiji Nagai	4. 巻 9
2. 論文標題 Gallium-tin alloys as a low melting point liquid metal for repetition-pulse-laser-induced high energy density state towards compact pulse EUV sources	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RSC Adv.	6. 最初と最後の頁 13927-13932
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI: 10.1039/c9ra01905g	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Christopher S. A. Musgrave, Shuntaro Shoji, Keiji Nagai*	4. 巻 10
2. 論文標題 Easy-handling minimum mass laser target scaffold based on sub-millimeter air bubble -An example of laser plasma extreme ultraviolet generation-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5906
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-62858-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 長谷川香織、野村壮真、Christopher SA Musgrave、長井圭治
2. 発表標題 レーザー生成高エネルギー密度プラズマ実験用極低密度ターゲットの連続供給に関わる材料開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長井圭治、Christopher S A Musgrave、桑田直明、河村純一
2. 発表標題 Li/Sn合金ターゲットを用いた極端紫外線発生
3. 学会等名 第28回MRS-J年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村壮真、長谷川香織、庄司俊太郎、Christopher SA Musgrave、長井圭治
2. 発表標題 レーザープラズマ量子線源用低密度高分子材料のナノ構造制御
3. 学会等名 第28回MRS-J年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiji Nagai, Christopher S A Musgrave, Shuntaro Shoji, Kaori Hasegawa, Nan Lu
2. 発表標題 Target Fabrication and Supply for High Repetition Laser Application
3. 学会等名 The Eleventh International Conference on Inertial Fusion Science and Applications (IFSA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長井圭治
2. 発表標題 高繰り返し用ターゲット材料
3. 学会等名 高繰り返しターゲット供給・アライメント・計測技術に関する研究会、光産業創成大学院大学（浜松市）（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Website 長井研究室 <http://ime.res.titech.ac.jp>
東工大ニュース 高分子電解質のシャボン玉を使ってEUV（極端紫外線）発生に成功
<https://www.titech.ac.jp/news/2020/046722.html>
EE Times, Yahoo News 4月16日
<https://news.yahoo.co.jp/articles/4c2495632254a7afc259aea2f98481b86f5c5501>
<https://eetimes.jp/ee/articles/2004/16/news020.html>
その他海外website 6件で紹介
化学工業新聞 2020/4/6 朝刊1面 「EUV光源を安価に 高分子電解質を活用」
子供の科学 2020年7月号 で紹介

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
研究協力者	マスグレイブ クリストファー (Musgrave S A Christopher)		