

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01880

研究課題名(和文)協同的トムソン散乱法を用いた多価電離プラズマ生成条件と放射スペクトルの関係解明

研究課題名(英文) Investigation of the relationship between the conditions of High-Z ionised plasma production and radiation spectra using collective Thomson scattering.

研究代表者

富田 健太郎 (Tomita, Kentaro)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70452729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：協同的トムソン散乱法を用いて、レーザー生成プラズマの電子密度・電子温度・平均イオン価数・速度場の2次元空間分布及び時間進展の非接触計測を実現した。これらの計測は比較的計測が容易な平板炭素ターゲットを中心に進めた。その成果を基に、波長6nm帯の光源として期待されている、Gdターゲットを用いたトムソン散乱計測を進めた。Gdプラズマでは、高レーザーパワー密度による、高温状態の実現が期待されているが、圧力勾配によるエネルギーの損失(膨張損失)が増大することが予想された。工学的には、投入レーザー強度と電子温度の関係を明らかにすることが重要であり、それを明らかにすることを念頭に、実験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軟X線およびEUV領域における半導体露光光源として、レーザー生成プラズマ光源の開発は重要である。そこでは不透明なプラズマが、非一様・非定常に存在している。光の発生や輸送過程はプラズマの密度・温度で決定されるため、光源プラズマ内の密度・温度計測は現象把握に必須項目でありながら、計測が技術的に困難であり達成されてこなかった。本研究ではそれを打破できる新たな協同的トムソン散乱システムを基軸として、レーザープラズマの密度・温度だけでなく、流体運動で重要な速度場をも実計測可能とした点で学術的な意義は大きい。さらに実用的な軟X線光源について、投入レーザー強度と電子温度の関係を明らかにした点も意義がある。

研究成果の概要(英文)：In-situ measurements of the two-dimensional spatial profiles and time evolution of the electron density, electron temperature, averaged ionic charge, and velocity field of laser-produced plasmas (LPPs) were successfully performed using the collective Thomson scattering technique. These measurements were carried out mainly on a solid carbon target, which is relatively easy to measure. Based on these results, Thomson scattering measurements were performed to a Gd target, which is expected to be a light source in the 6 nm wavelength band, and where the high laser power density of the Gd plasma is expected to realise high temperature conditions. The energy loss due to pressure gradients (expansion loss) is expected to increase. From an engineering point of view, it is important to clarify the relationship between the input laser power and the electron temperature. We clarified the relations.

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

研究分野：プラズマ科学

キーワード：トムソン散乱 レーザー生成プラズマ 電子温度 電子密度 軟X線 EUV

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

軟 X 線 (Soft X-Ray: SXR) 及び極端紫外線 (Extreme Ultra-Violet: EUV) (波長 1-20 nm 程度) は、生体その場観測 (水の窓領域、波長 2.4-4.4 nm) 次世代半導体露光 (波長 6.x nm, 13.5 nm) などに利用可能であることから、大きな注目を集めている。この領域の光源方式は様々あるなかで、レーザー生成プラズマ (Laser-Produced Plasma: LPP) 方式は、大光量である上、加速器と比較し、圧倒的に小型である。最先端半導体露光 (波長 13.5 nm) では LPP が採用されており、その他の用途でも LPP 方式への期待が高まっている。

ここで、プラズマの生成条件 (レーザーパワー密度やパルス幅、波長、ターゲット元素等) から光出力 (放射スペクトル分布や強度) が正確に予測できれば、LPP は SXR/EUV 光源として極めて魅力的なものとなる。しかし、LPP は原子物理・プラズマ物理・流体力学が相互に関連する複雑な現象であり、生成条件と光出力の関係は不明確である。学術的知見を基にして、両者はどこまで定量的に関連付けが可能か、そして「生成条件から光出力の予測は可能であるか」を問うのが、本研究課題の核心部分となる。

LPP からの SXR/EUV 光は電子遷移放射なので、光出力は電子温度 (T_e)・密度 (n_e)・イオン価数 (Z) の時間変化・空間構造に依存する。従って、上記の「問い」への一つのアプローチ手法として、プラズマ生成条件ごとに、 T_e, n_e, Z (以下、平均イオン価数) の時間変化・空間構造を測定することで、生成条件と光出力を、物理量を媒介として定量的に関連付けることは、有効であると考えられる。

このような背景のもと、申請者らは本研究課題を通じ、主に協同的トムソン散乱のイオン項スペクトル計測を行うことで、 n_e, T_e, Z に加え、流れ場 v の計測を進めた。また、光出力も同時に計測可能なシステムの構築を進めた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、様々な生成条件にて、レーザープラズマ状態を密度や温度、速度場等の物理量で明らかにすることにある。同時に、光出力 (特に軟 X 線や EUV 領域のスペクトル) も同時に計測可能な環境を整え、レーザー生成条件、プラズマ物理量、光出力の 3 者の関係性を明らかにするための研究基盤を整えることにある。

3. 研究の方法

本研究の核となる計測手法である、協同トムソン散乱システムの概要を図 1 に示す。本課題の申請当時、プラズマの密度や温度など、スカラー量のみの計測を予定していたが、散乱光のドップラーシフトの空間分布解析を工夫することで、速度場 (ドリフト速度) の計測も十分に可能であることが分かってきた。速度場の計測はプラズマの流体的挙動を議論するうえで重要であり、その計測が可能となったのは、申請当時の計画内容を上回る、特筆すべき成果と言える。

速度場はベクトルであり、大きさと方向を持つ。現時点では、トムソン散乱計測器は 1 セットしかなく、特定の波数ベクトル成分しか観測できない。このような状況でも速度場 (速度の大きさと方向) が決定できるように、プラズマの軸対称性 (プラズマ生成用のレーザー軸に対して軸対称) を仮定した。

4. 研究成果

本研究で最も詳しく測定を行ったレーザー生成炭素プラズマの T_e, n_e の 2 次元空間分布及び時間変化の一例を図 2 に示す。別途求めた速度場の計測により、ここで生成した炭素プラズマは、空間 1 次元的な膨張であることがわかり、流体シミュレーションとの比較が容易であることが分かった。得られた結果を 1 次元等温膨張過程モデルと比較した結果を、論文として報告した (Y. Pan, K. Tomita et al., J. Phys. D 2022, DOI: 10.1088/1361-6463/aca6f5)。

炭素プラズマの密度・温度・速度場計測のほかに、多価電離のプラズマの計測を進めた。具体的には、波長 6nm 帯の光源として期待されている、Gd ターゲットを用いたトムソン散乱計測を進めた。Gd プラズマでは、高いレーザーパワー密度 (10^{12}W/cm^2) による、高温状態の実現が期待されているが、それに伴い、プラズマのサイズはさらに小さくなり、圧力勾配によるエネルギーの損失 (膨張損失) が増大することが予想された。工学的には、投入レーザー強度と電子温度の関係を明らかにすることが重要であり、それを明らかにすることを念頭に、実験を進めた。実験では、レーザー強度をパラメータとし、トムソン散乱計測により電子温度のレーザー強度依存性を初めて実測した。その結果を放射流体シミュレーションと比較した。上記で示した炭素ターゲットよりもレーザースポットサイズが小さく、3 次元的なプラズマ膨張の効果が顕著であることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kaneko Toshiro, Kato Hiromitsu, Yamada Hideaki, Yamamoto Muneaki, Yoshida Tomoko, Attri Pankaj, Koga Kazunori, Murakami Tomoyuki, Kuchitsu Kazuyuki, Ando Sugihiro, Nishikawa Yasuhiro, Tomita Kentaro, Ono Ryo, Ito Tsuyohito, Ito Atsushi M., Eriguchi Koji, Nozaki Tomohiro, Tsutsumi Takayoshi, Ishikawa Kenji	4. 巻 61
2. 論文標題 Functional nitrogen science based on plasma processing: quantum devices, photocatalysts and activation of plant defense and immune systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA0805 ~ SA0805
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac25dc	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Kouge Kouichiro, Tomita Kentaro, Hotta Junya, Pan Yiming, Tomuro Hiroaki, Morita Masayuki, Yanagida Tatsuya, Uchino Kiichiro, Yamamoto Naoji	4. 巻 60
2. 論文標題 Time-resolved spatial profiles of electron density and temperature in hydrogen plasmas induced by radiation from laser-produced tin plasmas for extreme ultraviolet lithography light sources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 066002 ~ 066002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abfadc	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Kouichiro Kouge, Kentaro Tomita, Junya Hotta, Yiming Pan, Hiroaki Tomuro, Tatsuya Yanagida, Kiichiro Uchino, Naoji Yamamoto.	4. 巻 61
2. 論文標題 Feasibility study on reactive ion etching occurrence in EUV-induced photoionized hydrogen plasmas based on electron temperature and electron density measurements.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers	6. 最初と最後の頁 056001-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5d25	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Morita T., Tomita K., Sakai K., Takagi M., Aihara K., Edamoto M., Egashira S., Higuchi T., Ishizaka N., Izumi T., Kakuchi S., Kojima T., Kuramitsu Y., Matsukiyo S., Nakagawa Y., Minami T., Murakami H., Nishioka Y., Ota M., Sano T., Sei S., Sugiyama K., Tanaka S.J., Yamazaki R., Sakawa Y.	4. 巻 36
2. 論文標題 Local plasma parameter measurements in colliding laser-produced plasmas for studying magnetic reconnection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100754 ~ 100754
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2020.100754	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Pan Yiming, Tomita Kentaro, Uchino Kiichiro, Sunahara Atsushi, Nishihara Katsunobu	4. 巻 14
2. 論文標題 Time-resolved two-dimensional measurements of the electron density, electron temperature, and drift velocity of laser-produced carbon plasmas using the ion feature of collective laser Thomson scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 066001 ~ 066001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abfec	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Sakai K., Isayama S., Bolouki N., Habibi M. S., Liu Y. L., Hsieh Y. H., Chu H. H., Wang J., Chen S. H., Morita T., Tomita K., Yamazaki R., Sakawa Y., Matsukiyo S., Kuramitsu Y.	4. 巻 27
2. 論文標題 Collective Thomson scattering in non-equilibrium laser produced two-stream plasmas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 103104 ~ 103104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0011935	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Pan Yiming, Tomita Kentaro, Yamagata Yukihiro, Sunahara Atsushi, Nishihara Katsunobu	4. 巻 56
2. 論文標題 Investigation of dynamics of laser-produced carbon plasma during the laser irradiation using collective Thomson scattering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 025201 ~ 025201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aca6f5	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Tomita Kentaro, Pan Yiming, Sunahara Atsushi, Kouge Kouichiro, Mizoguchi Hakaru, Nishihara Katsunobu	4. 巻 13
2. 論文標題 Observation of plasma inflows in laser-produced Sn plasma and their contribution to extreme-ultraviolet light output enhancement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1825
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-28500-8	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 5件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kentaro Tomita, Yiming Pan, Atsushi Sunahara, Katsunobu Nishihara
2. 発表標題 Observation of two-dimensional plasma flows toward higher temperature regions in laser produced tin plasmas for extreme ultraviolet (EUV) light sources
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kentaro Tomita
2. 発表標題 Thomson scattering studies of atmospheric-air streamer discharges and Extreme-ultraviolet (EUV) light sources
3. 学会等名 The 39th Symposium on Plasma Processing (SPP-39) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kentaro Tomita
2. 発表標題 Recent progress of laser Thomson scattering studies for industrial plasmas -Measurements of EEDF of air-streamer discharge and 2D velocity field in laser produced EUV sources-
3. 学会等名 The 12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-12) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Tomita
2. 発表標題 Thomson scattering diagnostics of a streamer discharge in atmospheric-pressure air and laser-produced plasmas for light sources
3. 学会等名 The 73rd Annual Gaseous Electronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Tomita
2. 発表標題 Recent Diagnostics Results of EUV Source and EUV Induced Plasmas
3. 学会等名 2020 Source Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究分担者	砂原 淳 (Atsushi Sunahara) (00370213)	大阪大学・レーザー科学研究所・招へい准教授 (14401)	
研究分担者	西原 功修 (Katsunobu Nishihara) (40107131)	大阪大学・レーザー科学研究所・名誉教授 (14401)	

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
---------	---------