

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03570

研究課題名(和文) 中赤外レーザー駆動水の窓軟X線の高出力化とシングルショット撮像の実現

研究課題名(英文) High power water-window soft x-ray source driven by mid-IR laser and single-shot imaging

研究代表者

東口 武史 (Higashiguchi, Takeshi)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80336289

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,300,000円

研究成果の概要(和文)：X線顕微鏡は、バイオ科学や生命科学の分野に応用できる。しかしながら、シングルショットで動作する水の窓X線の明るい小型光源は未だに実現されておらず、シングルショット撮影は実現できていないのが現状である。そこで、レーザー生成ビスマスプラズマ光源により、シングルショット撮影に必要な水の窓X線放射出力を実現することを目的とした。

具体的には、(A) 中赤外レーザーとしての炭酸ガスレーザーを短パルス化、高強度化した。(B) 重元素多価イオンの分光計測および放射流体スペクトル解析を行い、光源出力を最適化した。(C) X線顕微鏡に接続し、顕微鏡を動作させながら撮像実験を行い、光源出力と光学系を最適化した。

研究成果の概要(英文)：X-ray microscope is applied to the biological and life science. However, there is no demonstration of a compact, high brightness, single-shot water-window soft x-ray source. We propose the improvement of the high output flux for single-shot imaging in the water-window soft x-ray spectral region by a laser-produced bismuth plasma.

In this study, we focus on three points: (A) development of the short pulse, high intensity carbon-dioxide laser as a middle infrared laser, (B) optimization of the output flux (number of photons) by analyzing the measurement of the emission from highly charged heavy element ions and the radiation hydrodynamic simulation, and (C) optimization of the source output and optical system in the water-window soft x-ray microscope system.

研究分野：光工学および光量子科学関連

キーワード：水の窓軟X線 レーザー生成プラズマ光源 X線顕微鏡 バイオイメージング

1. 研究開始当初の背景

生体の構成要素によって X 線の透過率が違う特性を生かし、水の窓領域の X 線を用いた生体細胞撮影やタンパク質等の物性構造解析に関する研究が行われている。X 線顕微鏡は、生体分子を生かしたまま、細胞の反応機構や病気の発生機構やタンパク質の構造異常などを解明することができるため、バイオ科学や生命科学の分野から大きな期待が寄せられている。X 線顕微鏡が実現されると、脱水することなく、生かしたまま高分解能での観測が可能になる。しかしながら、シングルショットで動作する水の窓 X 線の明るい小型光源は未だに実現されておらず、シングルショット撮影は実現できていないのが現状である。

これまで、水の窓領域の生体観察で強力なツールになっているのはシンクロトロン放射光や超短パルスレーザーの非線形波長変換による高次高調波、レーザー生成窒素プラズマ輝線放射などであるが、1 パルスあたりのエネルギーが小さいため、多重ショットを駆使して試料撮影を行っているのが現状であり、小さな実験室でのシングルショット撮影はできていない。また、従来の光源装置はいずれも装置規模が大型であり、レーザー装置の技術も高度で、広い意味で利用率が低く、大学や研究所での研究室レベルでの X 線光源を所有することは難しい。コンパクトで簡便かつ高輝度の水の窓領域 X 線光源が生命科学や物性研究において要求されているにも関わらず、適切な高効率・高出力で簡便なコンパクト X 線光源がないために、大型装置を使わざるを得ず、研究時間、手法、利用者が限定されているのが現状である。

そこで、本研究では、ビスマスを用いるレーザープラズマ光源方式により、シングルショット撮影に必要な水の窓 X 線放射出力を実現することを目的とした。

2. 研究の目的

ビスマスを用いるレーザープラズマ光源方式により、シングルショット撮影に必要な水の窓 X 線放射出力を実現することを目的とし、以下のような研究課題を設けた。

- (A) 高品質短パルス中赤外レーザーによる重元素多価イオン放射水の窓 X 線エネルギーを観測し、変換効率を評価する。具体的には、中赤外レーザーとしての炭酸ガスレーザーを短パルス化、高強度化する。
- (B) 重元素多価イオンの分光計測および放射流体スペクトル解析を行い、光源出力を最適化する。
- (C) X 線顕微鏡に接続し、顕微鏡を動作させながら撮像実験を行い、高出力化と光学系を最適化する。

3. 研究の方法

(A-1) 高品質短パルス中赤外レーザーの高強度化と多価イオン軟 X 線光源の高効率化・高輝度化

これまで開発してきた Q スイッチ炭酸ガスレーザー (波長: 10.6 μm , パルス幅 10 ~ 15 ns, パルスエネルギー: 100 ~ 300 mJ) を短パルス化し、高強度化した。図 1 に示すようなリング型発振器と 14 パスによるマルチパス増幅により構成した。ビーム品質は良好であった。短パルス化を進める上で、発振器と増幅器の間に Ge 基板によるレーザー誘起半導体スイッチ (固体プラズマミラー) を挿入し、パルス幅を制御した。このことにより、パルス幅は 3 ~ 15 ns で連続的に変化できるようにした。パルス幅を可変にしたあと、14 パス増幅器によりパルスエネルギーを増幅した。

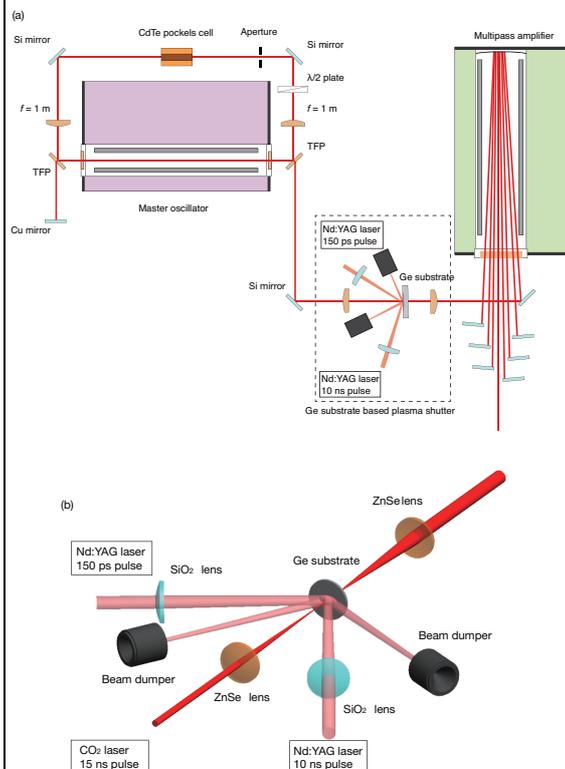


図 1: (a) レーザーシステム, (b) Ge 基板によるレーザー誘起半導体スイッチ (固体プラズマミラー)

(A-2) 重元素多価イオンの放射の高効率化・高輝度化

ビスマスによる多価イオンプラズマからの UTA (unresolved transition array) 帯域放射による X 線光源開発と特性評価実験を行った。光学的に薄い多価イオンからはスペクトル幅が狭く、帯域内放射効率がよくなる。そこで、Photon Factory (高エネ研) で較正された斜入射分光器 (2400 本/mm の回折格子と X 線 CCD カメラで構成されている) と帯域内放射エネルギーメーターを同時に使い、重元素多価イオンからの UTA 放射の出力 (光子密度) を評価した。

(B) 多価イオン生成の放射流体シミュレーションとスペクトル効率の向上

放射流体シミュレーションを行った。このため、衝突放射 (CR) モデルまたは局所熱平衡 (LTE) モデルで計算し、原子コードによる振動子強度などを計算した。

(C) 波長 4 nm に最適化されたミラーによる軟 X 線顕微鏡の構築・撮影時の光子密度の評価・生体細胞のフラッシュ撮影の実証

図 2 の軟 X 線顕微鏡を構築し、撮像試験を行った。

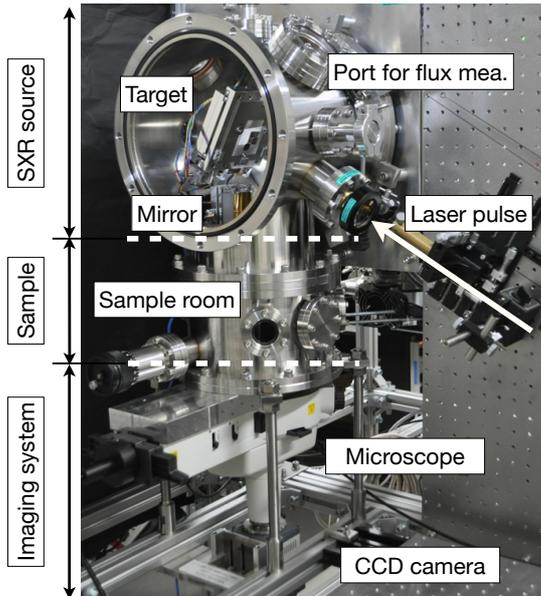


図 2: 本研究で用いた水の窓軟 X 線顕微鏡

4. 研究成果

(A-1) 高品質短パルス中赤外レーザーの高強度化と多価イオン軟 X 線光源の高効率化・高輝度化

Ge 基板を用いて光スイッチによるパルススライスする。波長 1064 nm の Nd:YAG レーザーによるコントロールパルスを Ge 基板に照射すると、多光子吸収により Ge 基板に自由電子のキャリアによるプラズマが生成される。このプラズマ密度が CO₂ レーザーの臨界密度以上になると Ge 基板表面は CO₂ レーザーを反射するミラーの役割を果たす。タイミングよくコントロールパルスを Ge 基板に照射することで Ge 基板を透過する CO₂ レーザーパルスを切り出すことができる。本研究ではコントロールパルスにパルス幅 150 ps の Nd:YAG レーザーとパルス幅 10 ns の Nd:YAG レーザーを使用した。パルス幅が 150 ps の Nd:YAG レーザーによる高いキャリア密度をパルス幅 10 ns の Nd:YAG レーザーによって長時間持続させることにより、CO₂ レーザーを切り出した。この方法により、最小パルス幅が 3 ns の短パルス CO₂ レーザーを実証した。

その後、14 パスのマルチパス増幅器により、CO₂ レーザーパルスを増幅することで、高出力の短パルス CO₂ レーザーを得た。図 3 はパルス幅が 3 ns の CO₂ レーザーパルスの時間波形である。本研究で用いている CO₂ レーザーの増幅器は大気圧で動作する TEA レーザーであることから、バンド幅は約 500 MHz である。このことから予想される最短パルス幅は 2 ns であることから、本研究で得られたパルス幅は、これ以上短くできないパルス幅に近いところまで短パルス化できたことを意味している。14 パスのマルチパス増幅後のパルスエネルギーを測定し、パルスエネルギーから評価されるレーザー強度 (パワー密度) は 10¹¹ W/cm² のオーダーであり、本研究に必要なパワー密度にやや不足しているものの、実験には使うことができる状況になった。

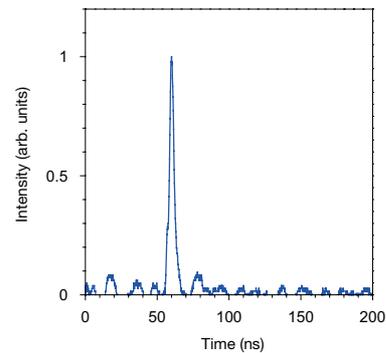


図 3: 短パルス化 (3 ns) された CO₂ レーザーの時間波形

(A-2) 重元素多価イオンの放射の高効率化・高輝度化

本研究を進める過程で、短パルス高強度 CO₂ レーザーでは、光学的に薄い高温プラズマを生成でき、多価イオンを生成できることが明らかになっているが、水の窓軟 X 線顕微鏡の駆動用レーザーとしては高温化することと光源サイズを小さくし、水の窓軟 X 線を高輝度化することは難しいことがわかった。そこで、固体レーザーを駆動用レーザーとすることで、この問題を解決した。レーザー生成多価イオン放射による生体細胞の写真撮影に適した元素 (特に Bi) に二重レーザーパルス照射法を組み合わせ、水の窓軟 X 線への高効率エネルギー変換を実現し、高出力化した。ここでは、紙面の都合から、光源の更なる高出力化のための二重パルス照射法の実験結果を示す。

較正された斜入射分光器の回折効率および X 線 CCD カメラの量子効率を考慮して時間積分スペクトルから水の窓軟 X 線領域の波長 2.3 ~ 4.4 nm の出力を評価し、二重パルスの遅延時間依存性を明らかにしたのが図 4 である。各遅延時間で水の窓出力は、プリパルス無しの際の水の窓出力で規格化されている。遅延時間が 7 ns のとき、プリパルスが無いときよりも水の窓軟 X 線の出力は

20%増加した。これは、プリプラズマとメインパルスレーザーが効率的にエネルギー結合したことに起因していると考えている。このことから、プラズマ生成と加熱を分けて遅延時間を能動的に制御することにより、出力を制御できることが分かった。一方、遅延時間が100 nsのときは水の窓軟X線の出力はプリパルスが無いときよりも60%減少した。これは、光源プラズマが膨張した結果、密度勾配が長くなり、オパシティーの効果が効いて再吸収された結果、光量が減少したものと考えている。

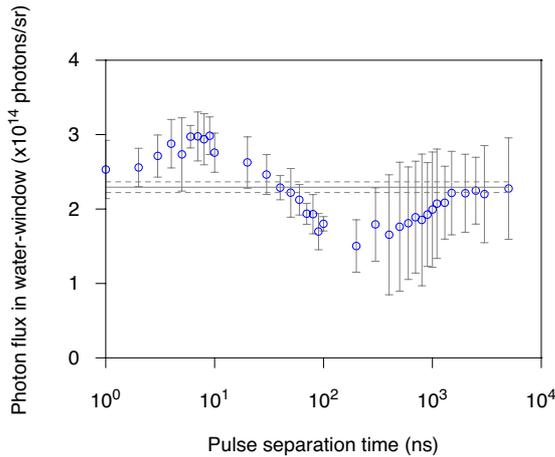


図 4 : 二重パルス照射法による水の窓領域出力の遅延時間依存性

(B) 多価イオン生成の放射流体シミュレーションとスペクトル効率の向上

図 4 の実験結果を計算的に再現、評価するためには、放射能率と吸収係数を組み込んだ放射流体数値解析が必要であることから、図 5 に示すように、衝突放射モデルにより放射能率と吸収係数の電子温度依存性を評価した。また、この結果を用いて放射流体シミュレーションを進めている。

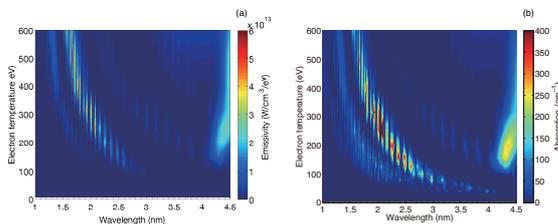


図 5 : ビスマス多価イオンの (a) 放射能率と (b) 吸収係数の電子温度依存性

(C) 波長 4 nm に最適化されたミラーによる軟 X 線顕微鏡の構築・撮影時の光子密度の評価・生体細胞のフラッシュ撮影の実証

図 2 の軟 X 線顕微鏡を構築し、撮像試験を行っている。この光源に適したトロイダル鏡を開発した。このことで、光源部からサンプル部へのスルーputは約 10^4 倍向上した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- ① B. Li, T. Otsuka, E. Sokell, P. Dunne, G. O'Sullivan, H. Hara, G. Arai, T. Tamura, Y. Ono, T.-H. Dinh, and T. Higashiguchi, "Characteristics of laser produced plasmas of hafnium and tantalum in the 1-7 nm region," *Eur. Phys. J. D* **71**, 278 (2017).
- ② H. Hara, H. Ohashi, B. Li, P. Dunne, G. O'Sullivan, A. Sasaki, C. Suzuki, N. Tamura, H. Sakaue, D. Kato, I. Murakami, T. Higashiguchi, and LHD Experiment Group, "Spectral evolution of soft x-ray emission from optically thin, high electron temperature platinum plasmas," *APL Photon.* **2**, 081301 (2017).
- ③ R. Lokasani, E. F. Barte, P. Gavrilov, P. Hribek, A. Jancarek, D. Kos, M. Nevrkla, L. Pina, T. Higashiguchi, G. O'Sullivan, and J. Limpouch, "High ionization states observed in soft x-ray spectra from plasmas of second row transition elements produced by femtosecond laser pulses," *J. Phys. B* **50**, 145001 (2017).
- ④ J. Sheil, P. Dunne, T. Higashiguchi, D. Kos, E. Long, T. Miyazaki, F. O'Reilly, G. O'Sullivan, P. Sheridan, C. Suzuki, E. Sokell, E. White, and D. Kilbane, "Analysis of soft x-ray emission spectra of laser-produced dysprosium, erbium and thulium plasmas," *J. Phys. B* **50**, 065006 (2017).
- ⑤ C. Suzuki, I. Murakami, F. Koike, N. Tamura, H. A. Sakaue, S. Morita, M. Goto, D. Kato, H. Ohashi, T. Higashiguchi, S. Sudo, and G. O'Sullivan, "Extreme ultraviolet spectroscopy and atomic models of highly charged heavy ions in the Large Helical Device," *Plasma Phys. Control. Fus.* **59**, 014009 (2017).
- ⑥ T. Wu, T. Higashiguchi, B. Li, G. Arai, H. Hara, Y. Kondo, T. Miyazaki, T.-H. Dinh, F. O'Reilly, E. Sokell, and G. O'Sullivan, "Analysis of unresolved transition arrays in XUV spectral region from highly charged lead ions produced by subnanosecond laser pulse," *Opt. Commun.* **385**, 143 (2017).
- ⑦ T.-H. Dinh, Y. Kondo, T. Tamura, Y. Ono, H. Hara, H. Oikawa, Y. Yamamoto, M. Ishino, M. Nishikino, T. Makimura, P. Dunne, G. O'Sullivan, S. Ohta, K. Kitano, T. Ejima, H. Tadashi, and T. Higashiguchi, "Evaluation of a flat-field grazing incidence spectrometer for highly charged ion plasma emission in soft x-ray spectral region from 1 to 10 nm," *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 123106 (2016).

- ⑧ H. Hara, G. Arai, Y. Kondo, T.-H. Dinh, P. Dunne, G. O'Sullivan, T. Ejima, T. Hatano, W. Jiang, M. Nishikino, A. Sasaki, A. Sunahara, and T. Higashiguchi, "Characteristics of the soft X-ray emission from laser-produced highly charged platinum plasmas," *Appl. Phys. Express* **9**, 066201 (2016).
- ⑨ H. Hara, G. Arai, Y. Kondo, T.-H. Dinh, P. Dunne, G. O'Sullivan, T. Ejima, T. Hatano, W. Jiang, M. Nishikino, A. Sasaki, A. Sunahara, and T. Higashiguchi, "Characteristics of the soft X-ray emission from laser-produced highly charged platinum plasmas," *Appl. Phys. Express* **9**, 066201 (2016).
- ⑩ T. Wu, T. Higashiguchi, B. Li, G. Arai, H. Hara, Y. Kondo, T. Miyazaki, T.-H. Dinh, P. Dunne, F. O'Reilly, E. Sokell, and G. O'Sullivan, "Spectral investigation of highly ionized bismuth plasmas produced by subnanosecond Nd:YAG laser pulses," *J. Phys. B* **49**, 035001 (2016).
- ⑪ H. Hara, G. Arai, T.-H. Dinh, W. Jiang, T. Miura, A. Endo, T. Ejima, B. Li, P. Dunne, G. O'Sullivan, A. Sunahara, and T. Higashiguchi, "Numerical evaluation of a 13.5-nm high-brightness microplasma extreme ultraviolet source," *J. Appl. Phys.* **118**, 193301 (2015).
- ⑫ T. Wu, T. Higashiguchi, B. Li, Y. Suzuki, G. Arai, T.-H. Dinh, P. Dunne, F. O'Reilly, E. Sokell and G. O'Sullivan, "XUV spectral analysis of ns- and ps-laser produced platinum plasmas," *J. Phys. B* **48**, 245007 (2015).
- ⑬ T.-H. Dinh, Y. Suzuki, G. Arai, B. Li, P. Dunne, G. O'Sullivan, S. Fujioka, N. Hasegawa, T. Kawachi, M. Nishikino, and T. Higashiguchi, "Temporal behavior of unresolved transition array emission in water window soft x-ray spectral region from multiply charged ions," *Appl. Phys. Lett.* **107**, 121101 (2015).
- ⑭ B. Li, H. Hara, Y. Suzuki, G. Arai, T. Higashiguchi, H. Ohashi, W. Jiang, T. Makimura, H. A. Sakaue, C. Suzuki, D. Kato, I. Murakami, P. Dunne, E. Long, P. Sheridan, X. Chen, and G. O'Sullivan, "Properties of the extreme ultraviolet emission from germanium and gallium plasmas," *J. Appl. Phys.* **118**, 073302 (2015).
- ⑮ T. Wu, T. Higashiguchi, B. Li, Y. Suzuki, G. Arai, T.-H. Dinh, P. Dunne, F. O'Reilly, E. Sokell, L. Liu, and G. O'Sullivan, "Analysis of extreme ultraviolet spectra from laser produced rhenium plasmas," *J. Phys. B* **48**, 165005 (2015).
- ⑯ G. O'Sullivan, B. Li, R. D'Arcy, P. Dunne, P. Hayden, D. Kilbane, T. McCormack, H. Ohashi, F. O'Reilly, P. Sheridan, E. Sokell, C. Suzuki, and T. Higashiguchi, "Spectroscopy of highly charged ions and its relevance to EUV and soft x-ray source development," *J. Phys. B* **48**, 144025 (2015).
- ⑰ H. Ohashi, T. Higashiguchi, Y. Suzuki, G. Arai, B. Li, P. Dunne, G. O'Sullivan, H. A. Sakaue, D. Kato, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, F. Koike, and C. Suzuki, "Characteristics of x-ray emission from optically thin high-Z plasmas in soft x-ray region," *J. Phys. B* **48**, 144011 (2015).
- ⑱ G. O'Sullivan, B. Li, P. Dunne, P. Hayden, D. Kilbane, R. Lokasani, E. Long, H. Ohashi, F. O'Reilly, J. Sheil, P. Sheridan, E. Sokell, C. Suzuki, E. White, and T. Higashiguchi, "Sources for Beyond Extreme Ultraviolet Lithography and Water Window Imaging," *Phys. Scr.* **90**, 054002 (2015).
- [学会発表] (計 12 件)
- ① T. Higashiguchi, "Homework of laboratory-scale EUV & soft x-ray sources and various applications," 4th Research Workshop: Collaboration between UCD & Utsunomiya University, Extreme Ultraviolet Source Development For Lithography, Surface Morphology & Water Window Imaging, 9:15-9:45, University College Dublin, Dublin, Ireland (2017.11.3). [invited]
- ② T. Higashiguchi, "Compact, Efficient Short Wavelength Light Source in Laser-produced Plasmas by Heavy Elements," OSA Laser Congress, Laser Applications Conference (LAC), LM2B-3, Convention Center Nagoya, Nagoya, Aichi, Japan (2017.10.2). [invited]
- ③ 東口 武史, 山内 駿, 篠崎 夏美, 小倉 拓人, 藤井 雄介, 江島 丈雄, 坂上 和之, 魚本 幸, 島津 武仁, MOCEK Tomas, 「高平均出力水の窓軟 X 線光源のための薄ディスクレーザーの開発」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 5p-S44-7, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市) (2017.9.5).
- ④ 東口 武史, 田村 賢紀, 小野 祐一, 原 広行, 近藤 芳希, 荒居 剛己, 江 偉華, 羽多野 忠, 江島 丈雄, 「水の窓軟 X 線領域で高繰り返し動作可能なターゲット元素の選定」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 5p-S44-6, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市) (2017.9.5).
- ⑤ 東口 武史, 小野 祐一, 田村 賢紀, 陳 文博, 小倉 拓人, 原 広行, 近藤 芳希, 若山 俊隆, 羽多野 忠, 江島 丈雄, 「水の窓軟 X 線顕微鏡による高分解能撮像

- に向けて」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 5p-S44-5, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市) (2017.9.5).
- ⑥ T. Higashiguchi, “Unresolved Transition Array (UTA) Emission from Highly-charged Ions in Heavy-element Plasmas by a Dual-laser Pulse Irradiation,” International Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources (2016 Source Workshop), S44, Amsterdam Science Park Congress Centre, Science Park, Amsterdam, Netherlands (2016.11.9). [invited]
- ⑦ T. Higashiguchi, “Recent results in Utsunomiya University: from laboratory experiments to extreme condition experiments,” Ireland Japan Collaboration Workshop, 2:05-2:35, University College Dublin, Dublin, Ireland (2016.11.3). [invited]
- ⑧ T. Higashiguchi, “Efficient EUV and soft x-ray sources with unresolved transition array from highly charged ions in high-Z plasmas,” 23rd International Conference on Spectral Line Shapes, Tu.O.1.11, Culture and Congress Centre Jordanki, Toruń, Poland (2016.6.21). [invited]
- ⑨ 東口 武史, 「レーザー生成多価イオンプラズマ水の窓軟 X 線光源」, 放射光学会第 8 回若手研究会 “軟 X 線イメージングの描く未来”, 16:30-17:00, 分子科学研究所 明大寺キャンパス (愛知県岡崎市) (2015.9.8). (依頼講演)
- ⑩ 東口 武史, 「小型レーザー生成多価イオンプラズマ光源と水の窓軟 X 線顕微鏡応用」, レーザー学会, 第 480 回研究会 「レーザー応用」, 11:00-12:00, 北九州学術研究都市・産学連携センター (福岡県北九州市) (2015.9.7). (レーザー学会九州支部特別講演)
- ⑪ T. Higashiguchi, “Efficient EUV & soft x-ray sources by laser-produced high-Z plasmas,” The 7th Asian Workshop on Generation and Application of Coherent XUV and X-ray Radiation (7th AWCXR), P-9, the Center for Relativistic Laser Science of Institute for Basic Science, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Gwangju, Korea (2015.8.31). [invited]
- ⑫ T. Higashiguchi, “Efficient extreme ultraviolet emission in highly ionized high-Z laser-produced plasmas,” The 4th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS’15), ALPS6-3, Conference Center, PACIFICO Yokohama, Yokohama Japan (2015.4.23).

[図書] (計 4 件)

- ① Y. Kondo, T.-H. Dinh, T. Tamura, S. Ohta, K. Kitano, T. Ejima, T. Hatano, and T.

Higashiguchi,

“Evaluation of a flat-field grazing incidence spectrometer for highly charged ion plasma emission in 1-10 nm,” X-Ray Lasers 2016, Chap. 62, pp. 409-412 (2018). [ISBN 978-3-319-73024-0]

- ② T. Ejima, Y. Kondo, Y. Ono, T.-H. Dinh, T. Higashiguchi, and T. Hatano, “Development of Soft X-Ray Microscope in Water Window Using Laser-Produced Plasma Light Source,” X-Ray Lasers 2016, Chap. 59, pp. 395-399 (2018). [ISBN 978-3-319-73024-0]
- ③ R. Amano, T.-H. Dinh, A. Sasanuma, G. Arai, Y. Fujii, A. Takahashi, D. Nakamura, T. Okada, T. Miura, and T. Higashiguchi, “A 10-Hz short pulse CO₂ laser system for extreme ultraviolet source,” X-Ray Lasers 2016, Chap. 54, pp. 367-371 (2018). [ISBN 978-3-319-73024-0]
- ④ T. Higashiguchi, P. Dunne, and G. O’Sullivan, “Laser-Produced Heavy Ion Plasmas as Efficient Soft X-Ray Sources,” in the book “Plasma Science and Technology - Progress in Physical States and Chemical Reactions” edited by T. Mieno, ISBN 978-953-51-2280-7 (InTech, 2016).

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 広帯域レーザー出力装置

発明者: 東口 武史

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許願 2016-127278

出願年月日: 2016 年 6 月 28 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://photonics.sixcore.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東口 武史 (HIGASHIGUCHI, Takeshi)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80336289

(2) 研究分担者

牧村 哲也 (MAKIMURA, Tetsuya)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号: 80261783