

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02813

研究課題名(和文)パラメトリック増幅高調波を用いた時間空間コヒーレントプラズマX線レーザーの開発

研究課題名(英文)Development of full coherent plasma X-ray laser by using parametric high-order harmonics

研究代表者

難波 慎一(Namba, Shinichi)

広島大学・工学研究科・教授

研究者番号：00343294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、時間空間コヒーレント軟X線レーザーを発振させることを目的として実験・数値計算を行った。発振方法はパラメトリック増幅による高出力高次高調波を種光とし、これをプラズマ励起の利得媒質で大幅に増大させることとした。実験の結果、X線パラメトリック増幅により高出力の高次高調波を発生させることに成功し、そのメカニズムを量子力学的観点から初めて定量的に明らかにした。一方、超短パルスレーザーをモリブデンに照射してレーザー利得媒質を発生させ、自然放出増幅にて、波長18.9nm軟X線レーザー発振に成功した。本課題で構築した装置を組み合わせることでフルコヒーレントX線レーザー発振が実現できる目処が立った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

究極のレーザーとも呼ばれるX線レーザーは、物理学、化学、工学、医学、薬学、生命科学分野で革命的な診断・加工ツールを提供できるものとして大きな期待が寄せられてきた。本研究課題は従来、大型装置、時間コヒーレンス、出力の面で実用化の大きな障害となってきたX線レーザー開発を飛躍的に進歩させる新しい技術である。本研究をさらに進めることにより、大学の研究室レベルで維持可能なフルコヒーレントX線レーザーが実現できれば、X線顕微鏡を用いた生きた精細胞観察や極超高速時間で粒子の運動を捉えたり、機能性材料の物性研究に寄与できる。X線レーザーの社会への波及効果は計り知れない。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research was to develop a temporal and spatial coherent X-ray laser. We employed the oscillator and amplifier scheme: as the former one the high-order harmonics light was significantly amplified by means of the X-ray parametric amplification, while for the latter the lasing medium was generated by laser plasma itself. As a result, we successfully amplified the harmonics experimentally and clarify the mechanism of it by numerical simulation based on quantum mechanics. In addition, the ultrashort laser beam was incident onto the Mo target and then the amplitude of stimulated emission lasing oscillation occurred at 18.9 nm wavelength. Thus, the lasing medium for seed harmonic beam amplification was formed with the compact experimental system. These results indicated that we can realize the full coherent bright X-ray laser by combining two compact laser systems constructed in this research.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：X線レーザー 高次高調波 フルコヒーレンス レーザープラズマ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1999年、Zewailは高速化学反応ダイナミクス研究に対する業績によりノーベル化学賞「フェムト秒分光学を用いた化学反応の遷移状態の研究」を受賞した。分子反応を特徴付ける時間スケールはフェムト秒であるため、反応の進行過程をストロボ撮影できるツールが研究成功のカギを握った。分子反応解明の次に研究対象となったのは原子内の電子ダイナミクスである。分子結合と比べ原子内電子の束縛エネルギーは高いため、電子ダイナミクス解明にはフェムト秒/アト秒超短パルスX線が不可欠となる。これまでに超短パルスX線発生としては主に以下の2つの方式が採用されている。

(1) 非線形光学効果による高次高調波

超短パルスレーザーと原子の非線形光学効果で発生する高次高調波は、原子内の電子運動をも計測できるアト秒 (10^{-18} s) パルスを発生させることが可能である。この極限的アト秒X線パルスの発生と応用研究は国内では東大物性研や理研、分子研を中心に、海外ではマックスプランク研やイェーナ大、ウィーン工科大で研究が進められている [1]。

(2) プラズマ励起X線レーザー

X線レーザー開発は1980年代からLLNLやプリンストン大で大規模レーザーを用いて行われた。プラズマX線レーザーのパルス幅はフェムト秒領域にあるが、単色性・高出力特性を活かし、物性物理、原子物理、プラズマ物理への応用研究が行われている。これらの研究は国内では原子力機構や東大、海外ではコロラド州立大、フランスLOAを中心に行われている。

申請代表者は超短パルスX線開発と利用研究に従事し、以下の業績をあげた。

① X線パラメトリック増幅によるアト秒高次高調波発生と応用

X線パラメトリック増幅(X-ray Parametric Amplification: XPA)によりアト秒X線の飽和増幅に成功。このアト秒パルスで固体電子波動関数の電場歪み計測に成功。

② プラズマ励起X線レーザーの開発と応用研究

波長13.9 nm、パルス幅7 ps、出力 μ JのX線レーザーを開発。その利用研究としてX線非線形光学効果の観測、内殻光電離誘起強結合プラズマの発生に成功。

超短パルスX線の高度利用には、時間空間コヒーレンスと高出力化が不可欠であるが、これらを同時に実現することは容易でない。例えば、上記光源①高調波は時間空間コヒーレントフェムト/アト秒X線であるが、帯域が広く、特定次数の出力はnJ以下である。一方、②のプラズマX線レーザーはパルス幅数100 fsであるが、単色光で出力は μ Jに達する。ただし、空間コヒーレンスは高いが時間コヒーレンスを高めることはできない。

上記①、②の研究で、XPA高次高調波を種光(シード)とし、これをプラズマX線レーザー媒質(アンプ)に入射すれば、高調波の時間空間コヒーレンスを維持したままシード光が増幅される究極のプラズマX線レーザーが開発できるのではないかと、という着想に至った。

2. 研究の目的

【XPAによる高次高調波の高指向性・高出力化】

超短パルスレーザーを2つのガスジェットに集光する。Neガスジェットで微弱高次高調波を発生、Heジェットでこの高調波をXPA増幅する。ジェット間隔、ガス密度、レーザービーム径・強度の調整で位相整合を満たし、高調波を高指向性化・高出力化する。数値目標はビーム発散角0.5 mrad、出力3 nJ@13.9 nmとする。

【時間空間コヒーレントプラズマX線レーザー発振】

上記①の高次高調波をシード光としてアンプ媒質であるレーザー生成銀プラズマに入射する。アンプ媒質の特性はこれまでの実績から、利得 35 cm^{-1} @13.9 nm、利得長積13.6、自然放射光増幅率5500を達成指標とする。これにより完全に時間空間コヒーレントな高出力X線レーザーを発振させる。目標レーザー特性は波長: 13.9 nm、ビーム発散角: 0.4 mrad以下、パルス幅はフーリエ限界パルス: 400 fs、出力: 2 μ J以上とする。

3. 研究の方法

【XPAの集光光学系構築】

高次高調波は超短パルス高強度レーザーと希ガスとの非線形相互作用により発生する。この高調波を高指向性化・狭帯域化・高出力化できるのがXPAである。XPAの実験配置、高調波スペクトル、11 nm高調波イメージを図1に示す。通常の高調波発生はガスジェットが1つなのに対し、XPAでは2つのガスジェット(Ne・He)を用いる。最初の

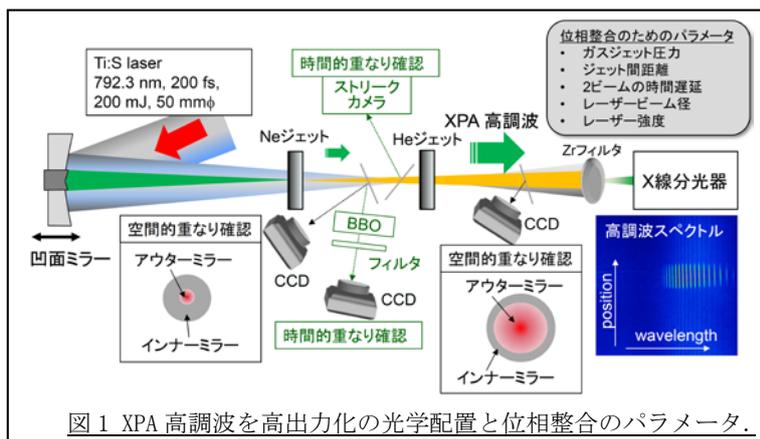


図1 XPA高調波を高出力化の光学配置と位相整合のパラメータ。

Ne ジェットでビーム発散角が大きく (~2mrad), 微弱高調波を発生させる. 続く He ジェットでこの低品質高調波は XPA 現象により 10~100 倍増大し, 発散角は ~0.4mrad と狭くなる. 本研究では集光に同軸凹面ダブルミラーを用いる. これは焦点距離が異なるインナーミラー (20mm 径) とアウターミラー (75mm 径) からなる. インナーミラーは低強度レーザーを Ne ジェットに, アウターミラーは高強度レーザーを He ジェットに集光する. ジェットへの集光強度, ビーム集光 F 値を独立に変化できるため, 高調波出力が増大することが申請者らの計算で示されている (図 1).

【XPA 高次高調波高指向性化・高出力化実験】

本研究では Ti:S レーザーを用いる. エネルギー 200 mJ, ビーム径 50 mm 以下, パルス幅は 80 fs とする. またプラズマ X 線レーザーの発振波長が 13.9 nm なので, Ti:S レーザーの基本波は 792.3 nm に調整する. この時の高調波次数は 57 次である. 目標高調波特性は波長 13.9 nm でビーム発散角 0.5 mrad 以下, 出力 3 nJ である.

【レーザープラズマ発生とアンプ媒質特性評価】

斜入射励起法により高効率レーザー媒質を発生させる. まず Ti:S レーザーを銀ターゲットに直入射で線集光する (プリパルス, パルス幅: 120 ps, エネルギー: 0.2 J). これでプリプラズマを発生させる (低温低密プラズマ: Ni-like 銀イオン基底状態を生成). 次にプラズマ発生領域にメインパルスレーザー (8 ps, 1 J) をターゲットに対し 45° 方向から線集光する. これにより Ni-like イオンの基底状態電子を一気に励起し (過渡的電子衝突励起法), レーザー媒質を発生させる. 一台のレーザーを用いてプラズマを発生させるため, 時間ジッターは問題にならない (図 2). 目標プラズマアンプ媒質特性は電子密度: $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 利得: 35 cm^{-1} , 利得長積 (gL 積): 13.6, 自然放射光増幅率: 5500 とした.

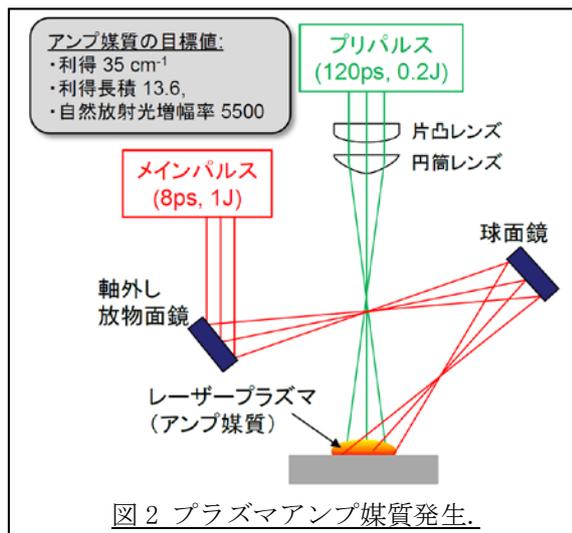


図 2 プラズマアンプ媒質発生.

【プラズマアンプ媒質中での XPA シード高調波の増幅実験】

XPA シード高調波を発生するプラズマアンプ媒質に入射する. 図 3 に概略図を示す. nJ レベルの XPA 高次高調波 13.9 nm を MoSi 多層膜凹面鏡・平面ミラーでプラズマアンプ媒質に集光し, ここで X 線を大幅に増幅させる.

シード高調波はプラズマ中での密度勾配により屈折するため, あらかじめ銀ターゲットは傾ける. どの程度傾けるかは様々な要因に依存するため, ターゲットを回転ステージに設置して X 線レーザー出力が最大になるよう調整する. 申請者らはこのアライメント手法に習熟しており, 問題なく屈折問題を解決できる. 目標 X 線レーザーの特性は, ビーム発散角 0.4 mrad 以下, パルス幅 400 fs, 出力 $2 \mu\text{J}$ 以上 @ 13.9 nm とする.

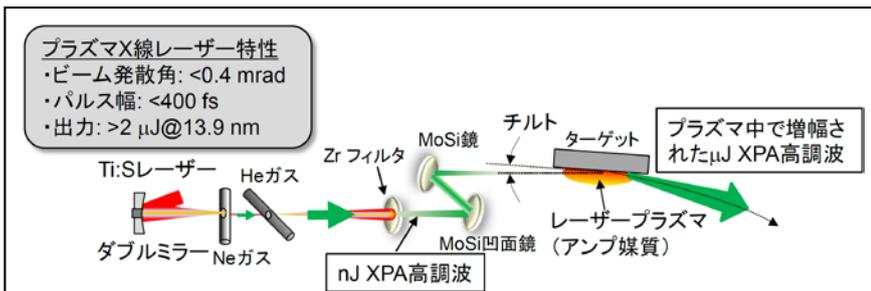


図 3 プラズマアンプ媒質中での XPA シード高調波の増幅実験配置図.

4. 研究成果

【パラメトリック増幅による高次高調波の高出力化実験】

X 線パラメトリック増幅による高次高調波の高出力化実験を行った. これは通常の高調波発生方法であるシングルガスジェットとは異なり, 2つのガスジェットを図 1 に示したように同軸に配置し, 位相整合を取るにより実現される. 当初の計画ではシード光発生用の第 1 ガスジェットに Ne ガスを用いる予定であったが, この場合目標とする X 線レーザーの波長よりも長い波長域 (15-16 nm 付近) で強い高調波が発生することが判明した. その結果を

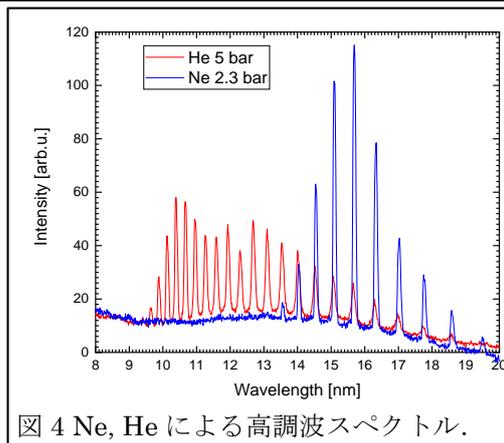


図 4 Ne, He による高調波スペクトル.

図 4 に示す. He ガスではより短波長 (10-15 nm 域の次数) の高調波が発生しているのが分かる. したがって, 第 1, 第 2 ジェットともに He ガスを用いることとし, ガス圧, ジェット間距離, 集光位置からの相対的距離, を最適化することにより, 高調波の高出力化を行った.

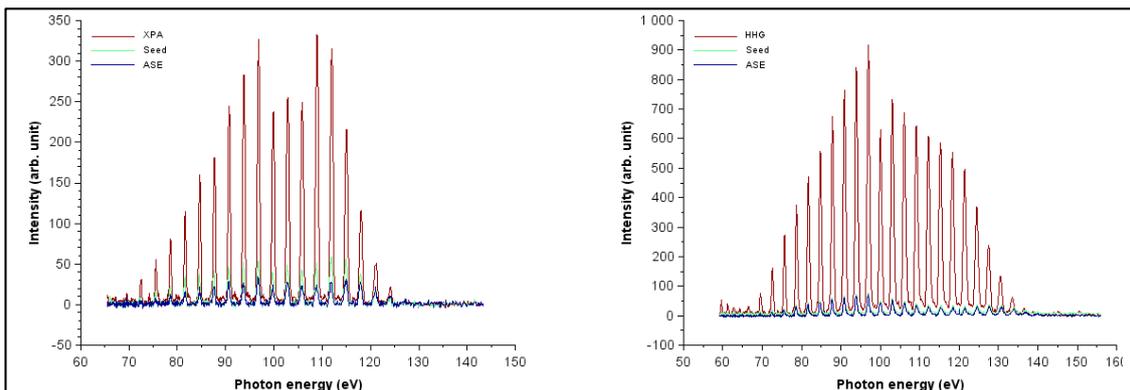


図 5 XPA 高次高調波のスペクトル. 左図 $z=-14$ mm, $d=2$ mm, 右図 $z=0$ mm, $d=-3$ mm. He ガスジェットの背圧は共に 0.5 気圧とした.

ダブルガスジェットでの高調波スペクトル例を図 5 に示す. ここで, 位置 z を集光点からの距離 (マイナスは集光点手前) とし, d をジェット間距離とし, 様々な条件下で高調波のスペクトルを 10 秒間 X 線 CCD カメラで計測した. 左図は $z=-14$ mm, $d=2$ mm, 右図は $z=0$ mm, $d=-3$ mm ので, 第 1, 第 2 ガスジェットの背圧は共に 0.5 気圧とした. Seed は第 1 ジェットのみ, ASE (Amplified spontaneous emission, 自然放射増幅光) は第 2 ジェットのみ, HHG は両ジェットを駆動させたときである. 左右の図で縦軸が異なる点に注意されたい. この結果から分かるように, ジェット位置, 間隔, 圧力を最適化することにより, XPA 高調波を劇的に高出力化することに成功した. この時の高調波出力エネルギーを CCD カメラ, Zr フィルタ, Mo/Si 多層膜鏡 (共に感度補正されている) で評価したところ, 約 1 nJ であった. 一方, CCD イメージ広がりから評価されたビーム発散角は 63 次付近の高調波で 0.52 mrad であった. したがって, 本研究で目標としていたフルコヒーレント X 線レーザー実現のためのシード光の性能をほぼ満たすことができた.

この実験データに関する数値計算は研究協力者のカタルーニャ工科大 Serrat 博士が行い, 増幅メカニズムを XPA で量子力学的に説明できることを明らかにして Opt. Lett. 誌, Phys. Rev. A 誌にて報告した [2, 3].

【レーザー励起による X 線レーザー媒質の発生実験】

図 2 に示した実験方法により, X 線レーザー利得媒質を発生させた. ただし, 励起レーザーの都合上, 今回はプリパルスとして YAG レーザーの 2 倍波 (532 nm, 10 ns, 100 mJ) を用い, メインパルスとしては Ti:S レーザー (800 nm, 2 ps, 700 mJ) とした. ターゲットは通常は銀のテープターゲットを用いるが, 回転が遅いためレーザー繰り返し周波数 10 Hz に追従できない. そこで, より硬い金属である Mo を用いた. この場合, 同じ位置を 30 ショットレーザー照射しても毎回ほぼ同じプラズマが発生するため, テープターゲットの問題を無視できる.

図 6 に得られた X 線スペクトルを示す. 共振波長は 18.9 nm である. 図中の (a) はプリパルス,

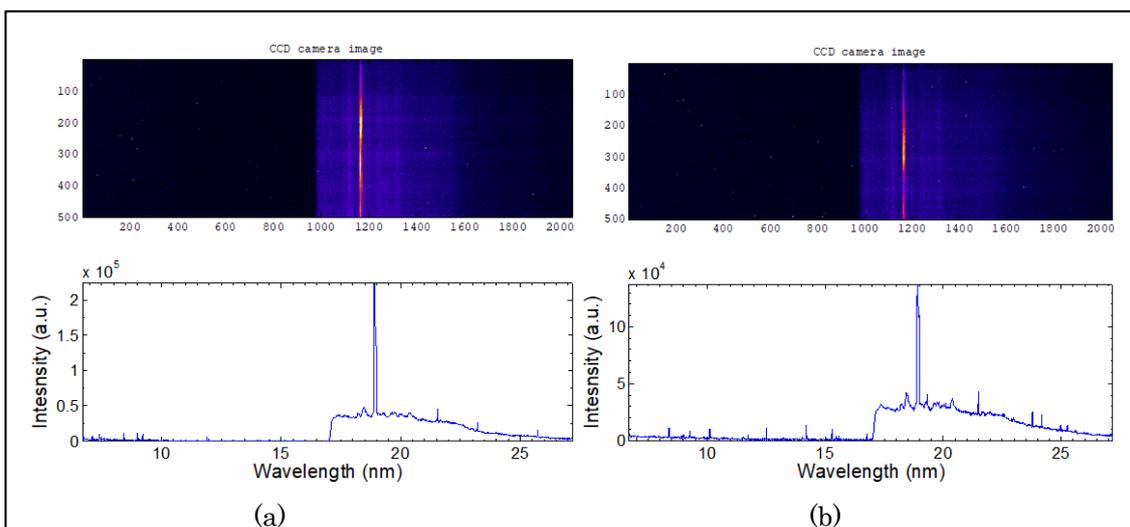


図 6 Mo をターゲットとして X レーザー媒質を発生させたときのスペクトル. (a) プリパルスある場合, (b) プリパルスなしの場合. 下図は対応するスペクトルになる. プリパルスありではピークカウンタ数が 2 倍以上増大する.

メインパルスを最適な時間遅延でターゲットに照射した場合、(b)はメインパルスのみ照射した時の結果である。(a)ではASEによるレーザー発振強度は(b)の2倍以上となり、プリパルス(プリプラズマ)により、良好なレーザー媒質が(a)の場合には発生することが分かる。以上より、10 Hzで発生するXPA高次高調波発生用TiSレーザーと時間的に完全に同期できる、TiS励起のX線レーザー媒質を発生させることに成功した。

【プラズマアンブ媒質中でのXPAシード高調波の増幅実験】

量研機構でのTiSレーザー装置の大幅な改修が3年目に行われたため、図3に示す光学系での実験を行うことができなかった。ただし、令和元年度までに高性能化したTiSレーザーを用いたXPA高調波ビームラインを新たに構築し、高調波増強実験は実施済みである。また、レーザー媒質発生についてもほぼ整備は終わっている状況である。したがって、令和2年度には独自に提案してきたseed-amplifier実験を遂行し、フルコヒーレントX線レーザーが実現できると考えている。

参考文献

1. “Attosecond sublevel beating and nonlinear dressing on the 3d-to-5p and 3p-to-4s core transitions at 91.3 eV and 21.0 eV in Krypton”, E. Seres, J. Seres, S. Namba, J. Afa and C. Serrat, *Opt. Exp.* **25**, pp.31775 (2017).
2. “Extreme-ultraviolet coherent pulse amplification in argon”, C. Serrat, J. Seres, E. Seres and S. Namba, *Phys. Rev. A* **99**, 063425 (2019).
3. “Parametric attosecond pulse amplification from high order harmonic generation in He⁺ far from the ionization threshold”, C. Serrat, J. Seres, E. Seres, T-H. Dinh, N. Hasegawa, M. Nishikino and S. Namba, *Phys. Rev. A* (under review).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 John Christian, Kishimoto Maki, Johzaki Tomoyuki, Higashiguchi Takeshi, Kakunaka Noboru, Matsumoto Yasuhiro, Hasegawa Noboru, Nishikino Masaharu, Ejima Takeo, Sunahara Atsushi, Endo Takuma, Namba Shinichi	4. 巻 44
2. 論文標題 Enhancement of water-window soft x-ray emission from laser-produced Au plasma under low-pressure nitrogen atmosphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 1439 ~ 1439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.44.001439	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 Arai Goki, Hara Hiroyuki, Hatano Tadashi, Ejima Takeo, Jiang Weihua, Ohashi Hayato, Namba Shinichi, Sunahara Atsushi, Sasaki Akira, Nishikino Masaharu, O' Sullivan Gerry, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Intense water-window soft x-ray emission by spectral control using dual laser pulses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 27748 ~ 27748
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.26.027748	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 Ohashi Hayato, Hara Hiroyuki, Arai Goki, Hatano Tadashi, Ejima Takeo, Suzuki Chihiro, Namba Shinichi, Sasaki Akira, Nishikino Masaharu, O' Sullivan Gerry, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 124
2. 論文標題 Spectral dynamics of soft X-ray emission in dual-laser-produced medium-Z plasma	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics B	6. 最初と最後の頁 193-193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00340-018-7061-3	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 Hara Hiroyuki, Kawasaki Hiromu, Tamura Toshiki, Hatano Tadashi, Ejima Takeo, Jiang Weihua, Ohashi Hayato, Namba Shinichi, Sunahara Atsushi, Sasaki Akira, Nishikino Masaharu, O' Sullivan Gerry, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 43
2. 論文標題 Emission of water-window soft x-rays under optically thin conditions using low-density foam targets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 3750 ~ 3750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.43.003750	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 Seres Enikoe, Seres Jozsef, Namba Shinichi, Afa John, Serrat Carles	4. 巻 25
2. 論文標題 Attosecond sublevel beating and nonlinear dressing on the 3d-to-5p and 3p-to-5s core-transitions at 913 eV and 2104 eV in krypton	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 31774 ~ 31774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.25.031774	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 Serrat C., Seres J., Seres E., Namba S.	4. 巻 99
2. 論文標題 Extreme-ultraviolet coherent pulse amplification in argon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63425
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.99.063425	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 Lokasani Ragava, Kawasaki Hiromu, Shimada Yuta, Shoji Misaki, Anraku Kyoya, Ejima Takeo, Hatano Tadashi, Jiang Weihua, Namba Shinichi, Nikl Jan, Zeman Michal, O' Sullivan Gerry, Higashiguchi Takeshi, Limpouch Jiri	4. 巻 27
2. 論文標題 Soft X-ray spectral analysis of laser produced molybdenum plasmas using the fundamental and second harmonics of a Nd:YAG laser	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 33351 ~ 33351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.033351	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 Shimada Yuta, Kawasaki Hiromu, Watanabe Kanon, Hara Hiroyuki, Anraku Kyoya, Shoji Misaki, Oba Toru, Matsuda Masaru, Jiang Weihua, Sunahara Atsushi, Nishikino Masaharu, Namba Shinichi, O' Sullivan Gerry, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Optimized highly charged ion production for strong soft x-ray sources obeying a quasi-Moseley's law	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 115315 ~ 115315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5127943	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 Namba S., John C., Morishita T., Kubo N., Kishimoto M., Hasegawa N., Nishikino M.	4. 巻 36
2. 論文標題 Observation of gain coefficients of 15.47nm Li-like Al soft x-ray laser in a recombining plasma pumped by a compact YAG laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100790 ~ 100790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.hedp.2020.100790	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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 S. Namba
2. 発表標題 Anomalous enhancement of water window X-rays emitted from laser produced Au plasma under low-pressure nitrogen atmosphere
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kakunaka, C. John, M. Kishimoto, Y. Matsumoto, N. Hasegawa, M. Nishikino, T. Higashiguchi, T. Ejima, A. Sunahara, F. Nakajima, T. Johzaki and T. Endo, S. Namba
2. 発表標題 Water window soft X-ray emission from Au plasmas generated with a picosecond laser pulse
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C. John, N. Kakunaka, Y. Matsumoto, M. Kishimoto and S. Namba
2. 発表標題 Observation of water-window soft X-ray emitted from laser plasmas generated in N2 gas atmospheres
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. MATSUMOTO, C. JOHN, N. KAKUNAKA, T. MORISHITA, J. YU JIN, M. KISHIMOTO and S. NAMBA
2. 発表標題 Observation of enhancement in water window laser plasma X-ray under nitrogen atmosphere
3. 学会等名 60th Annual meeting of the American Physical Society, division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 難波慎一, J. Seres, E. Seres, C. Serrat, 長谷川登, 岸本牧, 錦野将元
2. 発表標題 X線パラメトリック増幅を用いたプラズマX線レーザー
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 難波慎一, Dinh Thanh Hung, 長谷川登, 岸本牧, 錦野将元, Jozsef Seres, Carles Serrat
2. 発表標題 パラメトリック増幅高調波を用いたフルコヒーレントプラズマX線レーザー
3. 学会等名 Plasma 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 難波慎一, 久保暢明, 佐藤祐太, 長谷川登, 岸本牧, 錦野将元
2. 発表標題 リチウム様アルミイオンにおける再結合型軟X線レーザーの発生
3. 学会等名 レーザー学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. MORISHITA, Y. MOTSUMOTO, C. JOHN, M. KISHIMOTO, K. MATSUKADO, T. JOUZAKI and S. NAMBA
2. 発表標題 Observation of keV X-ray emitted from laser produced Au plasmas by using a crystal spectrometer
3. 学会等名 61th Annual meeting of the American Physical Society, division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. MATSUMOTO, C. JOHN, T. MORISHITA, M. KISHIMOTO, S. Namba
2. 発表標題 Characteristics of soft x-ray emissions from Au plasmas generated with various driving laser pulse durations
3. 学会等名 61th Annual meeting of the American Physical Society, division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. WANG, K. MURAKAMI, R. SHINMORI, M. KISHIMOTO, and S. NAMBA
2. 発表標題 Lithium-like aluminum ion recombination plasma X-ray laser at 15.5 nm
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 難波慎一	4. 発行年 2017年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 10
3. 書名 プラズマ産業応用技術 - 表面処理から環境, 医療, バイオ, 農業用途まで -	

〔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	岸本 牧 (Kishimoto Maki) (40360432)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究 所 量子生命科学研究部・上席研究員(定常) (82502)	
研究分担者	長谷川 登 (Hasegawa Noboru) (50360409)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研 究所 光子科学研究部・主幹研究員(定常) (82502)	
研究分担者	錦野 将元 (Nishikino Masaharu) (70370450)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研 究所 光子科学研究部・グループリーダー(定常) (82502)	
研究協力者	セラット カルレス (Serrat Carles)		
研究協力者	セレス ヨーゼフ (Seres Jozef)		