

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03478

研究課題名(和文) 高強度レーザー生成プラズマを利用したX線増幅過程の研究

研究課題名(英文) Study of X-ray amplification using laser-produced-plasma

研究代表者

犬伏 雄一 (Inubushi, Yuichi)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・XFEL利用研究推進室・主幹研究員

研究者番号：40506250

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、高強度光学レーザー生成内殻電離プラズマを用いたX線増幅の物理機構の解明である。まず、信号スペクトルと参照スペクトルを比較することでX線スペクトルの変化をシングルショットで診断することができる、空間分解シングルショットスペクトロメーターを開発した。更に、このスペクトロメーターを用いて、ハイパワーフェムト秒レーザー生成プラズマを透過したXFELのスペクトル計測を行った。X線増幅は観測されなかったが、フェムト秒～ピコ秒領域におけるプラズマ中のイオンの束縛電子の挙動を調べることができた。この成果は、プラズマ中のゲイン形成の解明のために重要な知見である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

XFEL利用研究では、超高速の化学や物質科学、生物学、X線非線形光学等の幅広い分野において顕著な成果が創出されている。従来の加速器科学ではなく、反転分布を利用するレーザー科学の方法を用いてXFELの出力増大を目指す本研究は、これからのX線レーザーの発展にとって非常に意義がある。また、そのゲイン媒質として利用するプラズマについて、本研究では、フェムト秒時間分解のX線吸収分光計測を実施し、過渡的な電離状態を明らかにした。これは、これまで計測が不可能であったプラズマの超高速現象を初めて観測したものであり、今後の高エネルギー密度科学の発展に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：The study has been performed to clarify the physics of X-ray amplification using inner-shell-ionized plasma produced by an intense laser pulse. A spatially-resolved single-shot spectrometer which can measure signal and reference spectra simultaneously was developed to diagnose changes of X-ray transmissions between plasma and solid. By using this spectrometer, XFEL spectra transmitted through a plasma produced by a high-power femtosecond laser pulse were measured. Dynamics of bound electrons in ions for a time scale of femto-picosecond could be obtained, although X-ray amplification could not be observed. This result is important to clarify a mechanism of gain formation in a plasma.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：XFEL レーザープラズマ X線分光

1. 研究開始当初の背景

近年、XFEL 利用研究では、超高速の化学や物質科学、生物学、X 線非線形光学等の幅広い分野において顕著な成果が創出されている。しかしながら、オングストローム分解能の単分子イメージング、光子-光子散乱による量子電磁気学の検証などの挑戦的な研究を行うためには、XFEL の出力(パルスエネルギー)の更なる増大が求められている。

数百メートルから数キロメートルにも及ぶ大規模施設である XFEL において、飛躍的な高出力化を目指しての加速器、アンジュレータの高性能化は容易ではない。一方、可視・近赤外領域の光学レーザーでは、発振器の後段に、外部から励起源を用いた増幅器を配置する、主発振器出力増幅器(Master Oscillator Power Amplifier: MOPA)を用いて、ペタワット級をこえる高出力レーザーが実現されている。X 線領域にもこの方式を取り入れ、XFEL をシード光として利用し、その後段の増幅器を実現することができれば、X 線レーザーの出力を飛躍的に高めることが可能となる。この増幅器の原理としては、一般の光学レーザーと同じように、外部励起源を用いて媒質中に反転分布を形成し、電子の束縛-束縛遷移における誘導放出過程を利用することが最も適していると考えられる。従って、この X 線増幅を実現するためには、外部励起源を用いて、X 線増幅のための反転分を形成することが大きな課題である。

2. 研究の目的

X 線領域における束縛-束縛遷移の利用には、K 殻電子が電離された内殻電離状態の原子が適しており、その生成には光励起と電子励起の 2 つの方法が考えられる。光励起による内殻電離原子の反転分布形成には 10^{19} W/cm² を超える強度の X 線が必要であり[1]、この強度を達成できる光源は XFEL のみであるため、XFEL をシード光として利用する本研究には適さない。一方、高強度の光学レーザーを物質に照射すると、高エネルギー電子(高速電子)が生成され、その高速電子との衝突により内殻電離状態のプラズマが生成される。内殻電離プラズマ中に反転分布が形成できれば、XFEL をシード光として誘導放出を起こし、X 線を増幅することができる。本研究課題の目的は、高強度光学レーザー生成内殻電離プラズマを用いた X 線増幅の原理実証である。

これまでの研究で、数十 mJ のフェムト秒レーザーにより生成したプラズマを使って X 線増幅が観測されている[2]。更に増幅で得られるエネルギーを増大させるには、プラズマを生成するためのレーザーのエネルギーを上げる必要がある。本研究では、10 J クラスのハイパワーフェムト秒レーザーを用いて実験を実施した。

3. 研究の方法

X 線自由電子レーザー施設 SACLA の BL2-EH6 にはハイパワーフェムト秒レーザーと XFEL を組み合わせた実験プラットフォームが整備されている。本研究の実験はそこで実施した。ハイパワーフェムト秒レーザーを銅薄膜に照射してプラズマを生成し、そこに XFEL を入射することで X 線増幅を試みた。X 線増幅の診断のため、プラズマを透過した XFEL のスペクトルを計測した。

SACLA の EH6 では、従来ベリリウムレンズにより XFEL を集光し、楕円ミラーと分光結晶を用いたシングルショットスペクトロメーターを利用してきた。しかし、ベリリウムレンズにおける XFEL の散乱がスペクトル計測のデータを著しく劣化させることが本研究の実験において明らかとなり、新たなシングルショットスペクトル計測法が必要となった。

そのため、本研究では、信号スペクトルと参照スペクトルの同時計測が可能な新たなシングルショットスペクトロメーターを開発した。そして、そのスペクトル計測法を用いて、プラズマを透過した XFEL スペクトルの計測を、X 線増幅の診断、プラズマの過渡的状态の診断を行った。

4. 研究成果

本研究では、まず、楕円ミラー2つと分光結晶、X 線 CCD カメラを組み合わせ、空間分解能を有する新たなシングルショットスペクトロメーターを開発した。図 1 に示すように、第 1 楕円ミラーで XFEL をサンプル上に直線集光する。このとき、ハイパワーレーザーで生成されるプラズマよりも直線集光された XFEL のほうが長ければ、固体状態のサンプルを透過した参照スペクトルと、プラズマを透過した信号スペクトルを同時に計測することができる。第 2 楕円ミラーは、空間分解能を高めるためにビームを拡大し、結晶で分光したのち、X 線 CCD カメラで空間分解 X 線スペクトルを取得できる。信号スペクトルと参照スペクトルを比較することで X 線増幅の有無をシングルショットで診断することができる。また、同様の実験セットアップで、シ

シングルショット X 線吸収分光計測も可能であり、XFEL を使った高エネルギー密度科学の研究に大いに貢献することが期待される。

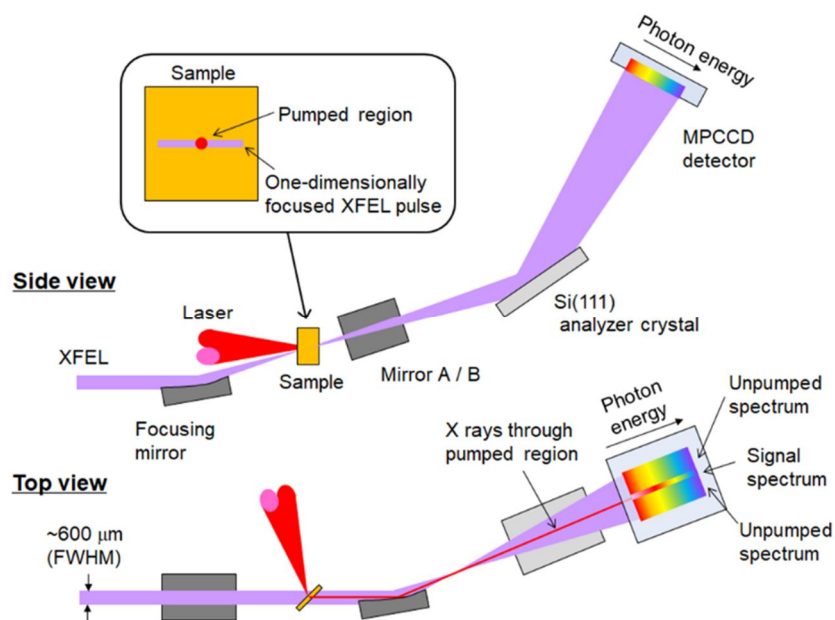


図 1 . 空間分解シングルショットスペクトロメーターの概念図 .

このスペクトロメーターの性能試験として、銅 (Cu) のプラズマの X 線吸収分光計測を実施した。XFEL の光子エネルギーは Cu の K 吸収端に合わせた。得られた透過スペクトルのイメージを図 2(a) に示す。このデータの解析を進めることで、図 2(b) に示す空間分解透過率のイメージを導出することができた。プラズマを透過した部分の透過率が変化しており、特に、K 吸収端の高エネルギー側の透過率が大きく上昇している。ハイパワーレーザー照射から XFEL 入射までの遅延時間を変えながら取得した透過率を図 3 に示す。ハイパワーレーザー照射後 500 フェムト秒程度で透過率が急激に変化し、その後は数ピコ秒に渡ってあまり変化がないことがわかった。これはプラズマ中の Cu の外殻電子の電離の時間発展を示すものである。

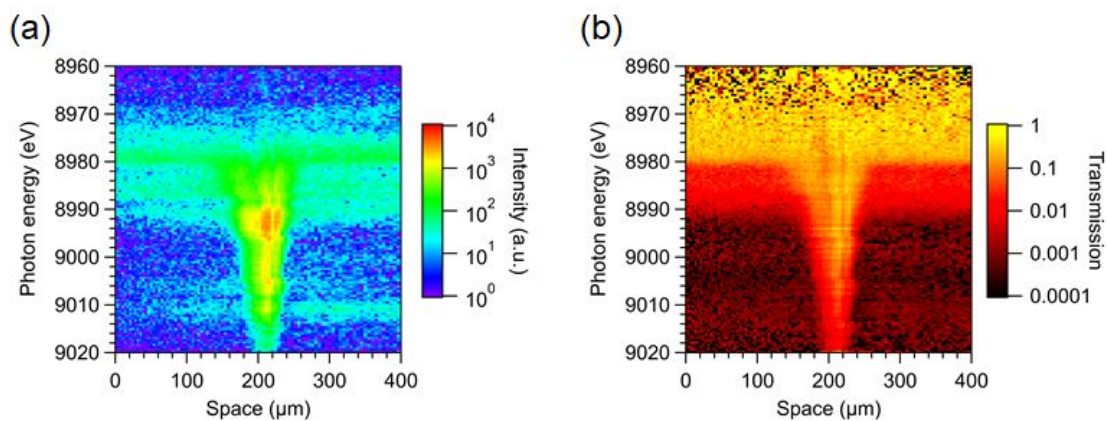


図 2. (a) プラズマを透過した空間分解 X 線スペクトル .
(b) 左のイメージを透過率に変換したもの .

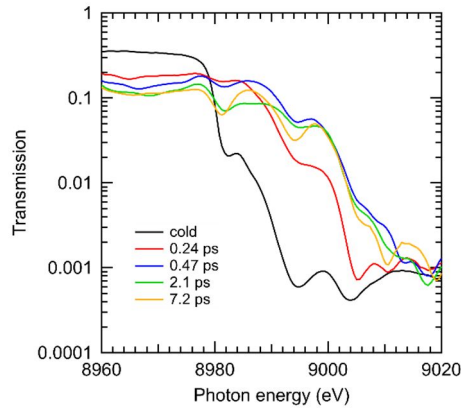


図 3 . Cu プラズマの K 吸収端近傍の X 線透過率 .

開発した空間分解シングルショットスペクトロメーターの性能が充分であることがわかり、X線増幅実験を実施した。XFEL の光子エネルギーは K 線と同じ 8.05 keV に合わせて、プラズマに入射し、その下流側でスペクトルを計測した。この結果を図 4 に示す。これは、プラズマを透過した XFEL の透過率を示したものである。増幅が成功すると、透過率が 1 を超えるはずである。しかし、ハイパワーレーザー照射と XFEL 入射の間の遅延時間を変えながら計測を行ったが、増幅には至らなかった。これまでに増幅が観測されたテーブルトップレーザーとは、レーザーの条件が異なるため、プラズマ状態が異なっていることが理由だと考えられる。

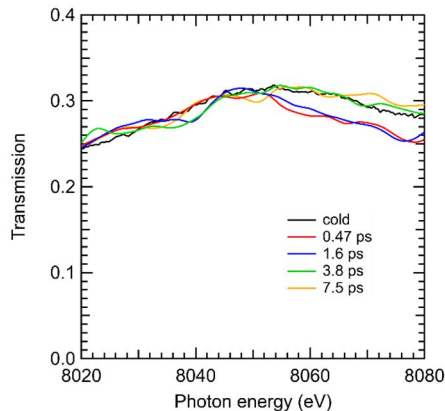


図 4 . Cu プラズマの K 線近傍の X 線透過率 .

プラズマ中のイオンの電離状態を調べるために、X線吸収分光法が有用である。本研究で実施した実験は、フェムト秒の時間分解能で実施した X線吸収分光実験に相当するため、これらのデータの解析を更に進めた。その結果、図 3 に示す K 吸収端近傍の X線吸収分光結果からは、プラズマ中のイオンの外殻電子が、ハイパワーレーザー照射後 500 フェムト秒程度の中に急激に電離し、その電離状態が 10 ピコ秒以上持続することがわかった。対照的に、K 線近傍の X線吸収分光の結果から、2p の電子はレーザー照射後 4 ピコ秒程度は電離しているが、その後はその空孔が再結合や脱励起により埋まることがわかった。これらの結果は、ハイパワーレーザー生成プラズマのフェムト秒～ピコ秒の過渡的な電離状態を明らかにする貴重なデータであり、X線増幅のゲイン生成の知見を得るために重要である。また、この過渡状態の急激な透過率変化を利用したプラズマデバイスの開発等、今後の高エネルギー密度科学の発展に寄与することが期待される。

参考文献

- [1] H. Yoneda, Y. Inubushi, et al., *Nature*, **524**, 446 (2015).
- [2] 犬伏雄一ほか, *SPring-8/SACLA 利用研究成果集*, **9**, 262(2021).
- [3] Y. Inubushi, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 053534 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 犬伏 雄一、小川 奏、富樫 格、大和田 成起、井上 伊知郎、大坂 泰斗、藪内 俊毅	4. 巻 9
2. 論文標題 高強度光学レーザーを用いたX線増幅	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SPRING-8/SACLA利用研究成果集	6. 最初と最後の頁 262 ~ 265
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18957/rr.9.4.262	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 -

1. 著者名 Inubushi Yuichi, Yabuuchi Toshinori, Miyanishi Kohei, Sueda Keiichi, Togashi Tadashi, Kubota Yuya, Tono Kensuke, Yabashi Makina	4. 巻 92
2. 論文標題 Spatially resolved single-shot absorption spectroscopy with x-ray free electron laser pulse	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 053534 ~ 053534
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0040899	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0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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