

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：84502

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05434

研究課題名(和文) 高強度光学レーザーを用いたX線増幅過程の研究

研究課題名(英文) X-ray amplification using high-intense optical laser

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) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年、X線自由電子レーザー(XFEL)が開発され、新しいサイエンスが開拓されている。しかし、より挑戦的な研究のためには更なる出力の増大が求められている。本研究では、高強度の光学レーザーにより生成された高速電子が作り出す内殻電離状態の原子を利用したXFELの増幅を実証した。銅のフォイルがゲイン媒質として利用され、チタンサファイヤレーザーを照射して高速電子を生成した。XFELの光子エネルギーは銅のKa線と同じ8.05keVであった。シングルショットスペクトル計測において、8.05keVに鋭いピークが観測され、XFELと同じ発散角をもっていた。これらの結果から、X線増幅に成功したと結論付けた。

研究成果の概要(英文)：Recent advent of X-ray Free Electron Lasers (XFELs) has opened the frontiers of various fields of science. However, a current output power of XFELs is still insufficient for conducting challenging applications. If the external amplifier scheme were applicable in the X-ray range, one could directly enhance the power of XFEL pulses.

In this study, we demonstrated an amplification of XFEL using core-hole atoms generated with intense optical laser pulse. A Cu foil was used as a gain medium. Intense Ti:Sapphire laser pulses were used to generate fast electrons. A photon energy of XFEL pulses was tuned to be 8.05 keV, corresponding to the Cu-K α line. To observe the amplification, we measured single-shot spectra of XFEL pulses through the Cu foil. Intense peak at 8.05 keV was observed, and we confirmed that the divergence of the intense signal is same as that of XFEL pulses. From these results, we conclude achievement of x-ray amplification.

研究分野：量子ビーム科学

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

X線自由電子レーザー (X-ray Free Electron Laser: XFEL) は米国の LCLS[1]、次いで我が国の SACLA[2]がレーザー発振を達成し、超高速の化学や物質科学、生物学、X線非線形光学等の分野において利用研究が進められている。現状の XFEL 出力が増大できれば、これらの利用研究において更に未踏の領域への踏み込むことが期待できる。例えば、オングストローム分解能の単分子イメージングや光子-光子散乱による量子電磁気学の検証などが可能となる。しかし、XFEL パルスエネルギーは電子ビーム特性、アンジュレータ性能で決まる FEL パラメータに制限されているために、出力を増大させるためには、加速器のアップグレード、アンジュレータの台数増加や改良という大規模な工程が必要となるため、容易ではない。一方、XFEL に先んじて広く利用されている光学レーザーの場合、外部からのエネルギー注入 (フラッシュランプ、別のレーザーなど) によってゲイン媒質を励起し増幅器を形成し、発振器から出力されるレーザーをシード光として増幅し、レーザーのパルスエネルギーを飛躍的に高めている。この外部励起による手法を XFEL に適用することができれば、XFEL 施設の大規模な改良をすることなく、XFEL 出力を増大させることができる。

2. 研究の目的

高強度光学レーザーを固体に照射すると数十〜数百 keV のエネルギーをもつ高速電子が生成し、その高速電子が固体中を伝搬する際に原子の束縛電子が電離され、内殻電離状態ができる。内殻電離状態における束縛電子の遷移エネルギーは数 keV であり、X線自由電子レーザーの光子エネルギーに相当する。本研究の目的は、高強度光学レーザー照射により生じる内殻電離状態をゲイン媒質とし、X線自由電子レーザーの増幅手法を開発することである。

3. 研究の方法

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。

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いる。内殻電離状態から放射される K α 線の光子エネルギーが X線領域にあるため

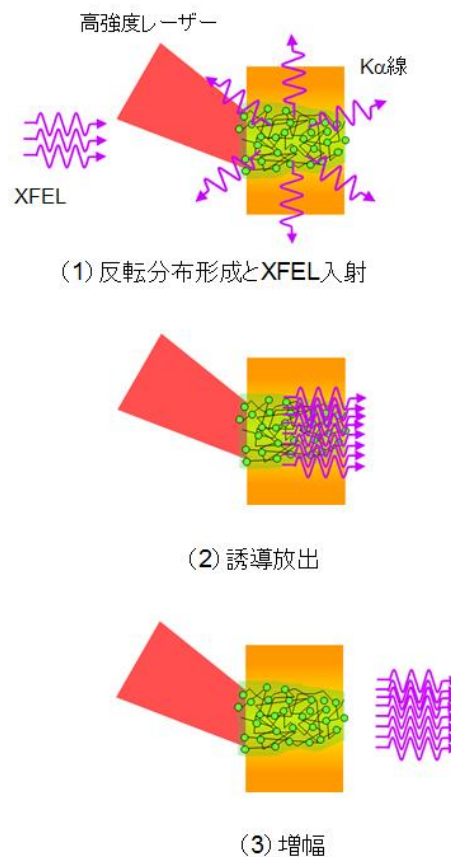


図1 高強度レーザーを用いた X線増幅

ある。内殻電離状態の生成には光励起と電子励起の2つの方法がある。光励起による内殻電離原子の反転分布形成には 10^{19} W/cm^2 を超える強度の X線が必要であり[3]、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、K α 線が等方的に放射される。従って、図1に示すように、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、K α 線放射のエネルギーを指向性を持たせて XFEL パルスに付加することで XFEL パルスが増幅され、大幅な出力の増大が期待できる。

誘導放出による放射エネルギーは(1)式で表される。

$$E_{\text{stim}} \propto I_{\text{K}\alpha} d\Omega \left(1 + \frac{c^2}{2h\nu^3} I_v \right) \quad (1)$$

c は光速、 h はプランク定数、 ν は X線の周波数、 $I_{\text{K}\alpha}$ は K α 線の強度、 I_v はシード光 (XFEL) の強度である。ここでは媒質中での輸送を考慮していない。顕著な誘導放出のためには(1)式の中の $(c^2/2h\nu^3)I_v$ が1を超える必要がある。本研究では、ゲイン媒質として銅 (Cu) を用いた。Cu の K α 線は 8 keV であり、XFEL パル

スの $K\alpha$ 放射のバンド幅内に相当する強度が 10^8 W/cm^2 以上であることが必要であった。この強度を実現できるのは XFEL だけである。

4. 研究成果

実験は、XFEL 施設 SACLA の BL3[2,4]にて実施された。実験セットアップを図 2 に示す。20 μm の厚さの Cu のフォイルをサンプルとして使用した。XFEL の光子エネルギーは、Cu の $K\alpha$ 線と一致するように、8.05 keV とした。XFEL のパルス幅は 10 fs 以下であった。XFEL パルスは KB 光学系を用いて 10 μm まで集光され、Cu フォイルの法線方向から照射された。このときの XFEL パルスの集光の収束角（全角）は 250 μrad であった。典型的な XFEL のパルスエネルギーはおよそ 45 μJ 、バンド幅はおよそ 40 eV（半値全幅）であった。 $K\alpha$ 線の自然幅（2 eV）に相当する範囲のパルスエネルギーはおよそ 2 μJ 、強度は 10^{14} W/cm^2 であり、上述の増幅のために必要な 10^8 W/cm^2 を上回っていた。

XFEL と同期したチタンサファイアレーザーを用いて内殻電離状態の生成を行った。Cu フォイルの法線から 25 度の方向からレーザーを集光照射した。その強度は $7 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ であった。この強度から見積もられる高速電子温度は 70 keV であり、Cu の K 吸収端のエネルギー 9 keV を上回っているため、K 殻電子を電離し、内殻電離状態の原子を生成することができる。

X 線増幅を計測するために、エネルギー分

散型のシングルショットのスペクトロメーターをサンプルの下流側に設置した（図 2）。このスペクトロメーターは楕円ミラーと Si(111) の分光結晶、マルチポート X 線 CCD カメラ（MPCCD）を組み合わせたものである[5, 6]。エネルギー分散型スペクトロメーターの観測範囲 ΔE は下記の式で与えられる。

$$\Delta E = \frac{\Delta\theta \cdot E}{\tan(\theta_B)} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\theta$ は分光結晶上における X 線の発散角、 E は光子エネルギー、 θ_B はブラッグ角である。広い観測範囲を得るために、楕円ミラーを用いて XFEL の発散角は $\Delta\theta=2.6 \text{ mrad}$ まで広げられた。その結果、 $E=8.05 \text{ keV}$ （このとき、 $\theta_B=14.2^\circ$ ）において観測範囲 $\Delta E=82 \text{ eV}$ を得ることができた。

実験では、XFEL とレーザーの間のタイミングを変化させながらデータを取得した。その中で、タイミングが一致する場合のみ、シングルショットスペクトロメーターにおいて、図 3(a)に示すような鋭いピークを持つスペクトルが得られた。SASE-XFEL 特有のスパイク構造の中で Cu- $K\alpha$ の光子エネルギーに相当する部分に非常に強いピークが見えている。図中の黒破線は、レーザー無しの場合の通常 SASE-XFEL のみの場合の平均スペクトルであり、レーザーと組み合わせて得られたピークが通常 SASE とは大きく異なることがわかる。また、増幅したショットを 10 パルス分積算したシングルショットスペクトロメーターの画像が図 3(b)である。横方向が光子エネルギー、縦方向が空間に該当する。図中の明るい部分が $K\alpha 1$ に一致した光子エネルギーであり、その発散角は入射した XFEL と同じ、およそ 250 μrad であった。通常 $K\alpha$ 線放射は等方的であるため、このように方向分布が制限されることはなく、MPCCD の空間方向全域にわたって信号が観測されるはずである。これらの結果から、誘導放出により、指向性をもって X 線増幅が達成されていると結論付けることができた。このときのピークのゲインは、通常 SASE-XFEL と比較して、およそ 8 倍であった。増幅されたパルスにおいて光学レーザーから XFEL に付加されたエネルギーの変換効率はおよそ 2×10^{-5} であった。通常、高強度レーザーで生成されたプラズマから放射される $K\alpha$ 線は、レーザーからの変換効率が $10^{-3} \sim 10^{-4}$ といわれており、本実験では $K\alpha$ 線の放射エネルギーのうち数パーセント程度を誘導放出として XFEL パルスに付加したことになる。

また、増幅スペクトルは、タイミングが一致する実験条件においても 10%程度ショット数しか観測されなかった。これは、XFEL とレーザーのタイミングジッターのためである。

増幅スペクトルの幅は 600 meV 程度であった。これは $K\alpha 1$ の自然幅（2 eV）やプラズマ発光からのスペクトル幅（およそ 5 eV）と比較してかなり狭いことが分かった。この増幅幅は、本研究におけるゲイン形成にはプラズ

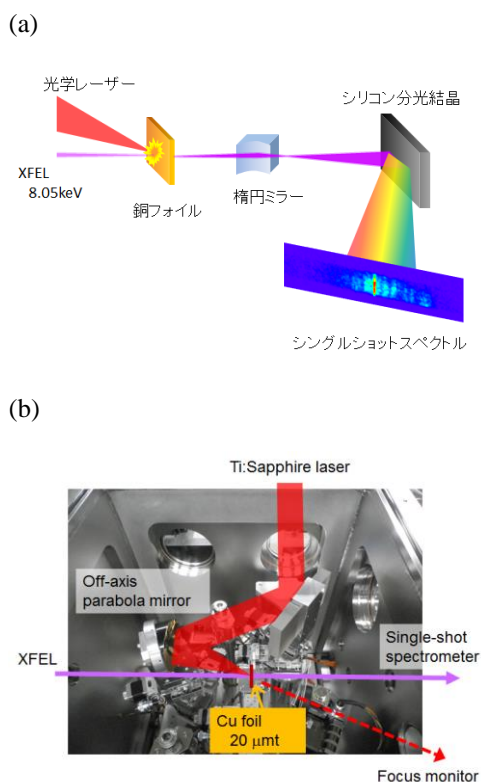


図 2 (a)実験セットアップ。

(b)実験チャンバー内の写真。

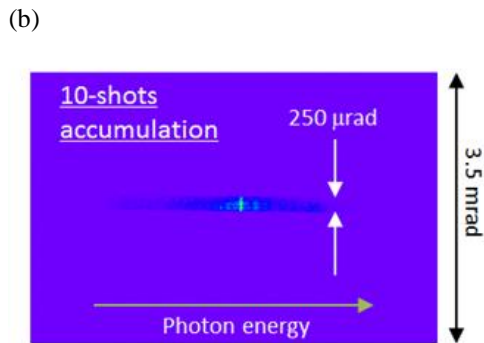
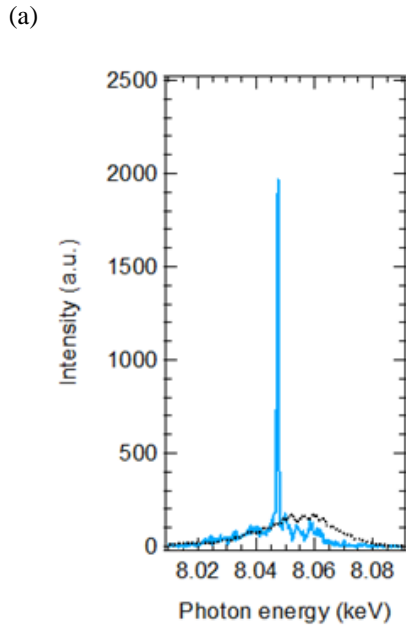


図3 (a)増幅スペクトル。(b)増幅スペクトルの方向分布 (10ショット積算)。

マ中のごく短時間の過渡的なエネルギーレベル変動が影響していることを示唆しているが、未だ詳細は明らかとなっておらず、今後の研究が必要である。

また、本実験では、入射 XFEL の強度を変化させた場合、入射 XFEL に対して増幅 X 線が比例することが明らかとなっている。これは通常の光学レーザーの光増幅器と同じ特性であり、本手法が X 線領域における増幅器の実現へ向けた非常に有力な手法である。更に、本研究成果は強力な光学レーザーを多段で用いることで飛躍的に X 線パルスを増幅することが可能であることを示している。

<引用文献>

- ① P. Emma, *et al.*, *Nature Photon.* **4**, 641 (2010).
- ② T. Ishikawa, *et al.*, *Nature Photon.* **6**, 540 (2012).
- ③ H. Yoneda, *et al.*, *Nature*, **524**, 446-449 (2015).
- ④ K Tono, *et al.*, *New J. Phys.* **15** 083035 (2013).
- ⑤ Y. Inubushi, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 144801

(2012).

- ⑥ Y. Inubushi, *et al.*, *Appl. Sci.* **7**, 584 (2017).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Y. Inubushi, I. Inoue, J. Kim, A. Nishihara, S. Matsuyama, H. Yumoto, T. Koyama, K. Tono, H. Ohashi, K. Yamauchi, M. Yabashi, "Measurement of the X-ray Spectrum of a Free Electron Laser with a Wide-Range High-Resolution Single-Shot Spectrometer", *Appl. Sci.* **7**, 584 (2017). 査読有. doi.org/10.3390/app7060584.

[学会発表] (計 5 件)

- ① Y. Inubushi, K. Tono, T. Togashi, S. Owada, T. Yabuuchi, T. Katayama, A. Kon, I. Inoue, T. Osaka, M. Yabashi, "Current status and future perspectives of SACLA", International Conference on X-ray Optics and Applications 2017, Yokohama, Japan, 19-21 April, 2017.
- ② Y. Inubushi, K. Ogawa, I. Inoue, T. Yabuuchi, S. Owada, T. Togashi, K. Tono, H. Yoneda, M. Yabashi, "Amplification of x-ray free electron laser using core-hole atoms generated with intense optical laser pulse", The 15th International Conference on X-Ray Lasers, Nara, Japan, 22-27 May, 2016.
- ③ Y. Inubushi, "X-ray amplification using intense optical laser pulse", 7th Ringberg Workshop on Science with FELs, Ringberg, Germany, 7-10 February, 2016.
- ④ Y. Inubushi, K. Ogawa, I. Inoue, T. Togashi, S. Owada, T. Kameshima, K. Tono, T. Katayama, H. Yoneda, and M. Yabashi, "Amplifier for x-ray free electron laser using intense optical laser", International Workshop on Warm Dense Matter 2015, Kurashiki, Japan, 7-12 June, 2015.
- ⑤ 犬伏雄一, 登野健介, 富樫格, 片山哲夫, 小川奏, 大和田成起, 矢橋牧名, "X 線自由電子レーザーSACLA を用いた高エネルギー密度科学研究" Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ, 新潟, 2015年11月18-21日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

犬伏 雄一 (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