

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：84502

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656069

研究課題名(和文) サブ・オングスローム波長でのXFELのフル・コヒーレント化の研究

研究課題名(英文) Seeded FEL for full-coherent sub-angstrom

研究代表者

松原 伸一 (MATSUBARA, Shinichi)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・XFEL利用推進研究室・研究員

研究者番号：90532135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：X線領域のレーザー光が発生可能なFELにおいて、単色性と単パルス性(時間的にシングルモード)に優れたシードFELの技法についての研究を行った。FELのフル・コヒーレント化のための研究である。まず、ラジアル偏光レーザーを用いたシードFELの検討を行った。次に、シード光源となるラジアル偏光・高次高調波の発生を試みた。また、高度なシードFELに必要な基礎技術であるシードレーザーと電子ビームのタイミングモニターを構築した。

研究成果の概要(英文)：The aim of the research is investigation into techniques for a seeded free-electron laser (FEL). The Seeded FEL have advantageous features that output pulses are in principle fully coherent in both transverse and longitudinal axes. We researched a new seeded FEL method with a radial-polarized laser pulse for the seeding source of it. Then, the radial-polarized laser pulses, which are high-harmonic-generation, was tried to make. Then, generating of the radial-polarization was tried for using the seeding light source. Moreover, we developed one of key schemes for seeded FEL operation which is a timing monitor system. It enables to observe a timing drift between electron-bunches and laser pulses with an electro-optic sampling technique.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物理学一般

キーワード：加速器 高次高調波 シードFEL

1. 研究開始当初の背景

2011年にSPring-8サイトにおいてレーザー発振をしたSACLAを筆頭とするXFELは、波長1以下のX線領域において、フェムト秒の極短パルスや、高強度の特性が得られるレーザー光源である。XFELの実現により、物質構造解析などの利用実験の飛躍的な発展が期待されている。しかしながら、SASE-FEL (Self Amplified Spontaneous Emission FEL) である現在のXFELの出力は、波長がマルチピークになり、時間的にもマルチモードであるために、ショット毎の繰り返し出力特性の再現性に限界がある。そこで、シーディング技術により、単色性と単パルス性(時間的にシングルモード)に優れたFELパルス光源にすることが必要である。我々は既にFELのシーディングを真空紫外域で実施し、波長61.5nmでFELのフル・コヒーレント化に成功している。これはSPring-8のSCSS試験加速器(VUV FEL)で実現したものである。また、波長53.3nmにおいてFEL発振光と同じ波長のTi:sapphireレーザーの第15次高調波をシード光源として用いた結果を図1に示す。

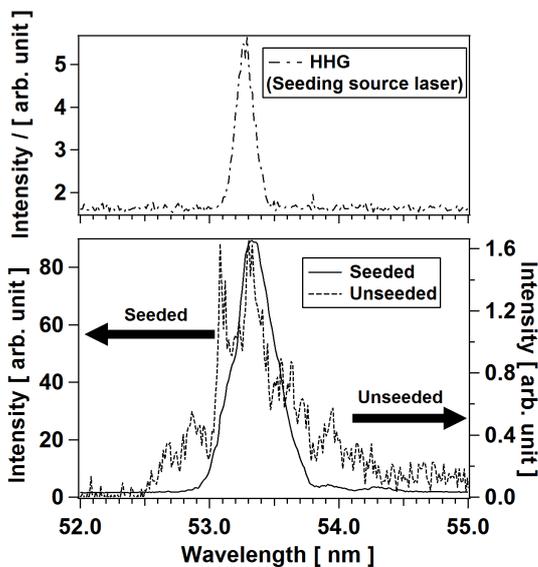


図1. SPring-8のVUV FELでのシーディング結果のスペクトル。

2. 研究の目的

SCSS試験加速器で行われた波長61.5nmのFELシーディングでは、同じ波長の直線偏光の高次高調波がシード光源として用いられた。この従来的な方法では、FEL発振を行うアンジュレータと直線偏光のレーザー光源により電子バンチに変調を掛ける。この実験では、250 MeVの電子バンチに対して、パルスエネルギー2 nJ (パルス幅: 50 fs)の光源によりシーディングを行った。一方、X線領域でのFELシーディングでは、6 GeVを超える高

エネルギーの電子バンチに変調を与えることになり、更なる高強度のX線シード光源が必要になる。このような高次高調波を発生させることは困難である。そのため、新しいFELのシーディング方法を研究する必要がある。

そこで、ラジアル偏光レーザーの集光で発生するZ偏光により、電子バンチにエネルギー変調を与える新しい手法を検討した。この手法により、波長・時間領域でシングルモードのフル・コヒーレント光源ができるうえ、繰り返し出力の再現性も向上する。そして、XFEL利用実験の再現性、信頼性、精度などの質的な向上とともに、高強度による新しい領域での利用実験の開拓につながることを期待される。

3. 研究の方法

サブ・オングストローム波長でXFELをシーディングするには、まず、第59次高調波(13.5 nm)のラジアル偏光を集光して生成されるZ偏光電場により、30 MeV程度の低エネルギーの電子バンチにエネルギー変調を与える。その後、7.5 GeV以上の高エネルギーに加速するとともに、バンチ圧縮技術を用いて、このエネルギー変調を密度変調へと変換しながら150倍圧縮することにより、シード光源の波長よりも2桁も短いFEL波長でのシーディングを実現する。システムの概念構成を図2に示す。本研究により、外部レーザー光源を用いたXFELのシーディングの実現が可能になる。

(1)シミュレーションによりシーディング手法について検討を行う。

(2) Ti:Sapphireレーザーの基本波において、新しい偏光制御光学素子である8分割波長板を開発し、可視光から深紫外光までのラジアル偏光レーザー光を生成する。しかしながら、

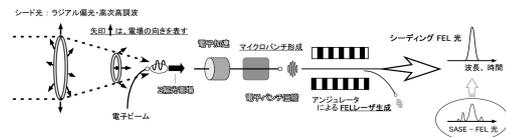


図2. ラジアル偏光レーザーを用いたFELシーディングの概念構成。

真空紫外より短い波長域においては、光学素子の制限があるので新規の偏光制御方法を検討する必要がある。そこで、波長800nmのラジアル偏光レーザー光を真空中に集光して、真空紫外域の高次高調波・ラジアル偏光を直接発生させる(図3)。

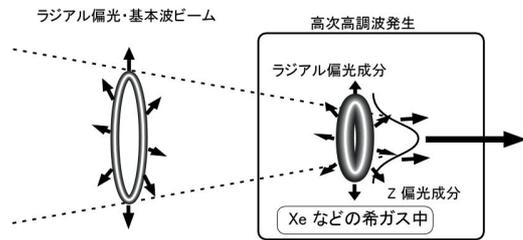


図 3. ラジアル偏光・高次高調波の発生機構.

(3) FEL のシーディングを実現するための技術についての研究開発を行う。その技術の1つとして、タイミングモニターの開発を行った。FEL のシーディングのためには、加速器中で電子ビームとシーディングを行う外部レーザを空間・時間において重ね合わせる必要がある。再現性が高く、継続的にシード FEL を実現するために必要な技術として、図 4 に示すタイミングモニターを備えたシード FEL 構成を構築した。この際のシード FEL は従来の直線偏光の外部レーザ光源を用いて行った。

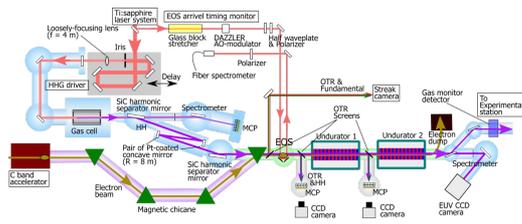


図 4. EO サンプリングによるタイミングモニターとシード FEL の構成.

4. 研究成果

(1) シーディング手法の検討

研究の当初では、電子ビームとラジアル偏光の外部光学レーザを同軸で重ねるシード FEL を構想した。しかしながら、シミュレーションの結果、外部光学レーザが集光されてできる Z 偏光の電場により、電子ビームが加速と減速が繰り返されるだけで、シード FEL に必要なエネルギー利得が得られないことがわかった。電子ビームが直線的に運動する場合の実効的なエネルギー利得は 0 であった。そこで、Z 偏光の電場が付近に磁場を印加し、電子ビームを円軌道に沿って運動させることを検討した。円軌道にすることによって、集光点から遠ざかるにつれて電子ビームの光軸方向の速度が減少するため、位相スリップが大きくなる。電子のエネルギーを 50 MeV、印加する磁場強度を 1.2 Tesla としたときの、電子軌道と位相スリップを考慮し

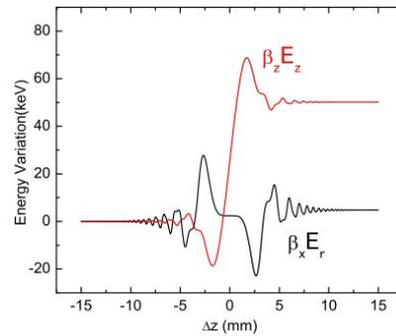


図 5. Z 偏光レーザによる電子のエネルギー変化 (動径軸成分と軸成分に由来するものに分解).

計算を行った。外部光学レーザのピークパワーを 100 MW とし、集光点付近で Z 偏光の偏光電場が 40 MV/m 得られる条件とした。その電子エネルギー変化の計算結果を、動径軸成分 E_r によるものと、外部光学レーザの光軸成分 E_z について図 5 に示す。50 KeV 程度のエネルギー利得が得られることが見積もられた。入射する電子ビームのエネルギー幅がこの値に対して十分に小さければ、ラジアル偏光の外部光学レーザを用いたシード FEL が可能となることがわかった。

(2) ラジアル偏光の高次高調波発生

ラジアル偏光を発生させるための 8 分割偏光制御光学素子を開発した。この光学素子を用いて、波長 800nm の Ti:Sapphire レーザからラジアル偏光光源を構築した。パルスエネルギーは 1mJ、パルス幅は 50 fs であった。図 3 に示すように円環状のビームプロファイルである。この光源を気中に集光することで、高次高調波を発生させて、偏光特性の評価を行った。発生された高次高調波も基本波と同じ円環形状であった。評価は、3 次高次高調波である波長 266 nm において行った。現状で、所望のラジアル偏光の高次高調波を確認することが出来ていない。高次高調波を発生させる非線形媒質を大気や Ar、集光サイズを変えるなどをして試みたが、本研究期間内では確認することができなかった。Strong-field approximation model を使ったシミュレーションでは、ラジアル偏光の高次

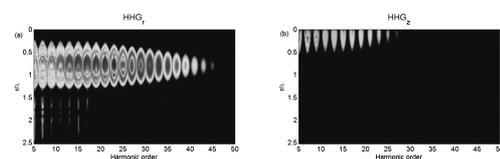


図 6. ラジアル偏光レーザを基本波に用いた高次高調波生成のシミュレーション結果.

高調波が発生することを確認できている。その計算結果を図6に示す。実験的に、ラジアル偏光の高次高調波発生させるための最適な実験条件をみつける必要がある。

(3) シード FEL のための研究開発

本研究のシード FEL を実際に実現するためには、極短バンチの電子ビームと超短パルス外部光学レーザをある位置で、空間・時間・エネルギーにおいて最適に調整する必要がある。特にタイミングをサブピコ秒の精度で安定に合わせる必要がある。そこで、シード FEL を実現するための基礎技術の1つとして、タイミングモニターを検討・実施した(図4)。

タイミングモニターは E0 サンプリング法により構築した。電子ビームの軌道近傍に E0 結晶を設置し、シードに用いる超短パルスレーザ光を数 ps まで線形チャープにより広げて、その E0 結晶内へ入射する。広げられたレーザパルス光のなかで、電子ビームとタイミングが合った波長の光は、E0 効果により偏光が回転する。その偏光が変化した波長をショットごとに観測することで、レーザと電子ビームのタイミングをモニターすることができる。測定イメージを図7に示す。

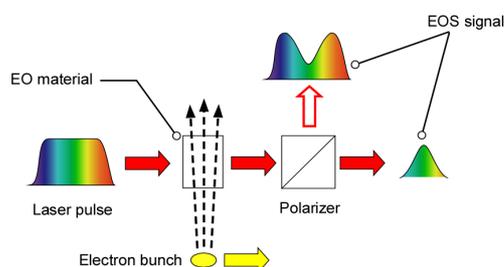


図7. EO サンプリングによるタイミング測定イメージ

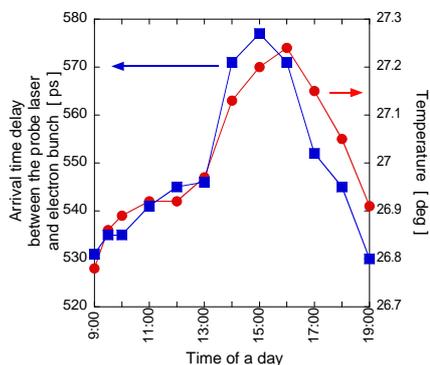


図8. EO サンプリングによるタイミング測定例

このシステムを用いて、SCSS 試験加速器

において、電子ビームとレーザとのタイミングを半日測定した結果を図8に示す。この測定システムにより半日の間に、50 ps のタイミングドリフトがあることが測定できた。施設の環境温度の変動は1度程度に抑えていても大きなタイミングドリフトがあり、シード FEL の効率的な実施にはこのようなモニターシステムが必要である。

直線偏光の外部光学レーザをシード光源とするシード FEL の構成により、このモニターシステムの有効性を確認した。FEL の発振波長は 61.8 nm である。その結果を図9に示す。このタイミングモニターを用いたタイミングフィードバックを行わない場合、電子ビームとシードレーザが重なるシード FEL の有効ヒット率は 0.3% (4) であった。それに対して、タイミングモニターを導入することで、有効ヒット率を 24% まで向上することができた。更に、安定的なシード FEL を実現することによって、シードレーザ光源の位置、角度、エネルギーの最適化を行うことができた。これにより、1 μJ 程度だったシード FEL のパルスエネルギーを 20 μJ まで向上することができた。

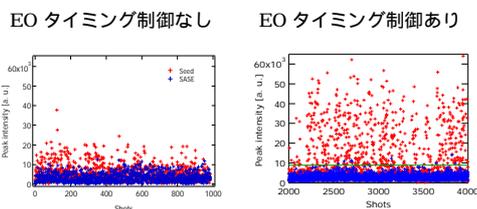


図9.シード FEL の安定化の結果。青：SASE-FEL 発振、赤：シード FEL 発振

本研究期間内では、ラジアル偏光のレーザ光源を用いるシード FEL の実施までしていない。これは、ラジアル偏光の高次高調波の発生まで至らなかったためである。しかし、シード FEL の検討、波長 800 nm のラジアル偏光光源の構築、シード FEL のための基礎技術の蓄積が行えた。

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 0 件)

[学会発表](計 3 件)

— S. Matsubara, A. Iwasaki, S. Owada, T. Sato, K. Ogawa, T. Togashi1, E.J. Takahashi, M. Aoyama, Y. Okayasu, T. Watanabe, and H. Tomizawa, "EO-SAMPLING-BASED TEMPORAL OVERLAP CONTROL SYSTEM FOR A SEEDED FEL", IBIC2012 Tsukuba, Japan, Oct.1 2012.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松原 伸一 (MATSUBARA Shinichi)
(公財) 高輝度光科学研究センター・X F
E L 利用研究推進室・研究員
研究者番号: 90532135

(2) 研究分担者

富澤 光宏 (TOMIZAWA Hiromitsu)
(公財) 高輝度光科学研究センター・X F
E L 利用研究推進室・副主幹研究員
研究者番号: 40344395

(3) 研究分担者

高橋 栄治 (TAKAHASHI Eiji)
独立行政法人理化学研究所・緑川研レーザ
物理工学研究室・専任研究員
研究者番号: 80360577

(4) 研究分担者

岡安 雄一 (OKAYASU Yuichi)
(公財) 高輝度光科学研究センター・加速
器部門・研究員
研究者番号: 90509910

(5) 連携研究者

富樫 格 (TOGASHI Tadashi)
(公財) 高輝度光科学研究センター・X F
E L 利用研究推進室・研究員
研究者番号: 60415239

(6) 連携研究者

田中 隆次 (TANAKA Takashi)
独立行政法人理化学研究所・放射光科学総
合研究センター・専任研究員
研究者番号: 30321780

(6) 連携研究者

佐藤 堯洋 (SATOU Takahiro)
独立行政法人理化学研究所・放射光科学総
合研究センター・特別研究員
研究者番号: 30599113