

単一サイクル FEL 原理実証用超短パルスレーザー光源の開発

ULTRASHORT LASER LIGHT SOURCE FOR DEMONSTRATING THE MONOCYCLE FEL SCHEME

貴田祐一郎^{#, A)}, 橋本智^{B)}, 宮本修治^{C)}, 富樫格^{A, D)}, 富澤宏光^{A, D)}, 岡部純幸^{E)}, 後長葵^{E)}, 金島圭佑^{E)},
田中義人^{E)}, 田中隆次^{D)}

Yuichiro Kida^{#, A)}, Satoshi Hashimoto^{B)}, Shuji Miyamoto^{C)}, Tadashi Togashi^{A, D)}, Hiromitsu Tomizawa^{A, D)},
Sumiyuki Okabe^{E)}, Aoi Gocho^{E)}, Keisuke Kaneshima^{E)}, Yoshihito Tanaka^{E)}, Takashi Tanaka^{C)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Center,

^{B)} Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo,

^{C)} Institute of Laser Engineering, Osaka University, ^{D)} RIKEN SPring-8 Center,

^{E)} Graduate School of Science, University of Hyogo

Abstract

A research project has started in 2018 at the electron-storage ring facility, NewSUBARU, aiming at demonstrating the monocycle free-electron laser scheme proposed in the past [Phys. Rev. Lett. 114, 044801 (2015)]. The project involves a sub-15-fs near-infrared laser source that modulates the energy of electrons passing through a taper undulator installed in the facility. This report describes the specification of the laser system developed and under operation for the project. A beam transport system for guiding and focusing the laser beam inside the undulator is described as well. A beam position monitor that allows simultaneous monitoring of the electron beam and laser beam positions inside the undulator has been developed, which is necessary for the fine alignment of the propagation direction of the laser beam. All the systems presented here as well as the timing-control system reported elsewhere have been successfully implemented, as verified by the detected coherent undulator radiation from a microbunch formed after the energy modulation with the laser field followed by the density modulation in a magnetic chicane.

1. はじめに

現在までに軟エックス線及び硬エックス線領域においてアト秒 X 線自由電子レーザー (FEL) が実現され、数 100 アト秒のパルス幅を有する X 線パルスが得られている [1-3]。しかしながら更なる短パルス化、具体的には単一電場周期近傍までの短縮は困難である。出力される X 線シングルスパイク幅が光スリッページによるパルス伸長効果の制約を受けるためである。この光スリッページに由来する壁が存在する一方、それを制御し、単一サイクル FEL を実現する方法が 2015 年に提案されている [4-6]。

本手法ではまず、短パルスレーザー電場、アンジュレータ、そしてシケインを併用し、電子バンチをエネルギー/密度変調し、極短電子バンチが非等間隔に並んだ電子バンチ列、すなわちチャープマイクロバンチを生成する。チャープマイクロバンチを適切な磁場分布を有するテーパーアンジュレータに入射することでコヒーレントアンジュレータ放射光を発生させる。この際、ある特定の時刻近傍でのみ、各マイクロバンチが出力する放射場が建設干渉する結果、パルス幅の短いコヒーレント放射光が出力される。パルス幅はエネルギー変調用短パルスレーザー電場の周期数に依存する。理論上、単一サイクルコヒーレント放射、つまり、単一サイクル FEL を実現できることが示されている [4]。

以上の短パルス FEL 原理を検証する実験研究プロジェクトが兵庫県立大学 NewSUBARU 放射光施設において推進されている [6]。本プロジェクトは複数の要素で

構成される。まず、電子蓄積リング [7,8]、シケイン及びそれを挟んで設置された 2 台のテーパーアンジュレータ (Modulator 及び Radiator) [9]、そして、電子バンチのエネルギーを Modulator アンジュレータにて変調するための超短パルスレーザー光源、最後に、電子バンチとレーザーパルスの到達時刻を同期させる同期系である [10]。本報告ではこれらの要素の内、超短パルスレーザー光源に関して報告する。

2. 超短パルスレーザー光源の開発

前述の通り、当該研究プロジェクトは電子バンチのエネルギーを変調するための超短パルスレーザー光源を必要とする。必要な仕様、境界条件がプロジェクトの初期に与えられ、それを受けた光源設計が為された。具体的にはパルスエネルギー 0.1 mJ、波長 800 nm、パルス幅 13 fs、ビーム直径 (半値全幅) 1 mm である。これらの数値は電子バンチのエネルギー変調に要するレーザー電場の強度と電子ビーム径を基準に設定された。光源開発上最も重要なことはこれら仕様をアンジュレータの中で満たすことである。加えて、NewSUBARU 放射光施設の他の利用実験を妨げない (透明化された) 光学系であることが求められる。これらの条件を踏まえ、以下 4 項目から成る開発を推進した。

- (1) パルス圧縮 (時間特性制御)
- (2) 蓄積リングへの入射 (空間特性制御)
- (3) 空間座標モニタ
- (4) 時空間同期検証

[#] kida@spring8.or.jp

2.1 パルス圧縮

高強度超短パルスレーザー光を得るためには比較的長いパルス幅と高パルスエネルギーを有するレーザーパルスを圧縮するパルス圧縮がよく用いられる。本プロジェクトにおいてもパルス圧縮に基づく超短パルスレーザー光源開発を実施した。パルス圧縮方法は複数存在するが、一般に二項目で構成される。1つはレーザーパルスのスペクトル幅を拡大する(a)広帯域化、もう一方は各波長成分の位相を同期させる(b)位相制御である。後者については、空気やガラス等の透明媒質中をレーザーパルスが伝搬する際に、各波長成分の相対位相が変化し、結果としてパルス幅が伸長されてしまうことを加味した設計が求められる。即ち、使用される場所において位相同期するよう機器を設計する必要がある。当該プロジェクトの場合は蓄積リングへの入射窓等の施設設備もこれに含まれる。こうしたレーザーパルスが伝搬する全素子情報が出揃い始めて超短パルスレーザー光源設計の開始点に立つことができる。超短パルスレーザー光源を時間分解分光などに応用する場合にも同じことが言える。

本プロジェクトでは既に確立され多用されている既存のパルス圧縮技術を採用・実装した [11,12]。具体的には(a)広帯域化のために希ガス充填中空ファイバーを、(b)位相制御のためにチャープミラーと呼ばれる誘電体多層膜鏡を使用した。開発・実装した実機の写真を Fig. 1 に示す。図示されていないが、本プロジェクトでは、チタンサファイア再生増幅器(繰り返し 1 kHz, 波長 800 nm, パルス幅<50 fs)の出力レーザーパルスの一部(パルスエネルギー0.6 mJ)をパルス圧縮対象として用いた。そしてこのレーザーパルスをアルゴンガスを充填した中空ファイバーへ入射した。関連機器の詳細仕様は過去に使用されたものと同等であり、割愛する [13]。中空ファイバー出口においてパルスエネルギー約 0.3 mJ の広帯域レーザー光(700 nm~900 nm)が得られた。更なる広帯域化も可能であるが、蓄積リング施設に関する制約(予想される時間特性劣化)を踏まえて前述の帯域に制限した。次に、広帯域レーザー光を平行光線へ戻した後(Fig. 1②)、チャープミラー対で複数回反射することで負の群遅延分散を付与した(Fig. 1③)。チャープミラー対直後ではレーザーパルスは圧縮されておらず、逆に引き伸ばされ、長パルス(チャープパルス)となっている。そのようなパルス幅制御が為されている理由は、前述の通り、レーザーパルスがその後アンジュレータへ入射されるま

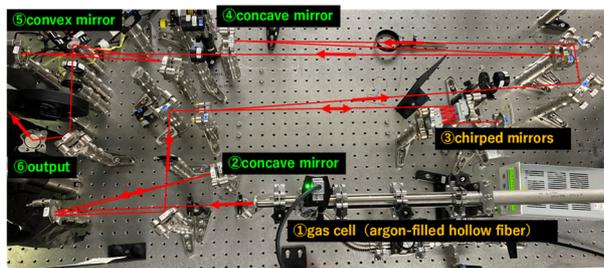


Figure 1: Developed setup delivering a femtosecond near-infrared laser pulse compressed down to 13 fs into the undulator placed inside the electron-storage ring facility, NewSUBARU.

での間空気や蓄積リングの入射窓等の透明媒質中を伝搬することにある。この伝搬中に付与される(A)正の群遅延分散及び(B)中空ファイバー中で非線形光学過程(主に自己位相変調)の結果生じる正の群遅延分散と、(C)チャープミラー対により付与される負の群遅延分散が互いに相殺し、アンジュレータの中でレーザーパルスの有する群遅延分散が正味ゼロ($A+B+C=0$)となるように、言い換えると、アンジュレータの中で各波長成分の位相が同期し最短パルスとなるよう制御されている。

アンジュレータ内で実際に最短パルスが得られているか否かを知るためにはパルス幅を計測する必要がある。しかし直接パルス幅を計測すること(アンジュレータと蓄積リング真空槽を撤去すること)はできないため、アンジュレータへ至るまでの伝搬光路と等価な光路(同一の群遅延分散を生じる光路)を別途用意し、この代替光路を伝送した後のレーザーパルスのパルス幅を計測することで間接的に評価した。結果、パルス幅 12-13 fs が得られた。この数値については日ごとの再現性が確認されている。日々パルス圧縮光学系を調整することなく、チタンサファイア再生増幅器出力レーザー光軸の微調のみにより光源特性が再現されることも確認されている。

2.2 入射光学系(空間特性制御)

次に上述のレーザーパルスを蓄積リングの真空槽内へ入射する入射光学系について述べる。略図(Fig. 2)に示された通り、蓄積リング収納部内に設置されたアンジュレータ(Modulator)内部においてレーザー光が集光されること、また、集光ビーム直径(半値全幅)が 1 mm であることがプロジェクト初期に境界条件として与えられたことは冒頭で述べた。これらの境界条件を満たすようレーザービームの発散角、ビーム径を制御する光学系を設計、開発、実装した。ところで、Fig. 2 中の蓄積リング真空槽用ビューポート直前の平凸レンズは本プロジェクトに関するものではなく、他のビームライン利用者専用の光学素子である。しかしながら本プロジェクトのレーザーパルスも当該レンズ及びその直後のビューポートを介して真空槽内部に入射する必要があった。そのため本レンズを一要素として含む光学系を設計し、実装した。結果として他の利用実験に対して完全に透明化された入射光学系が実装されている。

上記を実現するために Fig. 2 中に示された 2 種の光学素子(④⑤,凹面鏡及び凸面鏡)を新たに設置した。こ

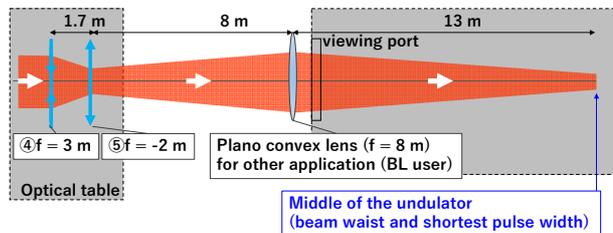


Figure 2: Schematic diagram of the optical setup guiding the compressed laser pulses into the storage ring, involving a plano-convex lens for other user application with a focal length optimized for it. Components labeled ④ and ⑤ are the same as those in Fig. 1.

これら光学素子の曲率半径及び設置間隔を変数とすることで、レーザービームの発散角及び直径の二特性を制御可能である。また、光学設計においては、前述のレンズの材料及び曲率半径、Fig. 1 に示された凹面鏡(②)直後のレーザービーム直径及び発散角、光学素子を設置可能な光学定盤上の空間とレンズまでの距離、非点収差を可能な限り低減すること、設計と実際に得られるレーザービーム特性が解離した場合の補正を可能にする冗長性を光学系に持たせること等を総合的に考慮しながら、ガウスビーム伝搬に関する光線追跡を利用して基本光学配置を決定した。

Figure 2 に示した通り、実装された入射光学系は全長約 20 m である。換言すれば非常に緩やかにレーザービームを集光する光学系である。このことは設計に考慮されていない何らかの誤差が現実の光学部品に存在すれば、無視できない影響をもたらされることを意味する。本プロジェクトも例外ではなく、光学系調整初期には設計と実機の集光特性間に大きな差異が見られた。具体的には平面鏡であるべきチャープミラーが凸面鏡として作用し、レーザーパルスの波面曲率が変化し、結果として、入射光学系が創出する波面曲率変化を相殺してしまいレーザービームがアンジュレータの中で集光されなくなるという事象が生じた。そこで集光状況を評価しながら光学配置変更と光線追跡を反復し、最終的に、Fig. 2 に示された入射光学系を実装した。その光学系の一部が Fig. 1 の写真上にも示されている。

2.3 空間座標モニタ

以上パルス幅 13 fs のレーザーパルスを入射する一連の光学系について述べた。次に、アンジュレータ中に入射される電子バンチに対してレーザーパルスを空間的に重ね合わせる方法について述べる。時間軸上においても重ね合わせる必要があるが、これに関しては他所で報告されており、ここでは割愛する [10]。

電子バンチがアンジュレータ中を蛇行する際自発放射が放射される。この放射光は点光源である個々の電子が放射する光で構成され、その空間位置・形状はバンチの位置・空間分布を反映する。そのため自発放射光とレーザー光の両方を蓄積リング下流の実験ハッチまで伝送し、結像レンズを用いてカメラ上に結像すれば、アンジュレータ中の電子バンチとレーザーパルスの相対位置がわかる。この考え方に基き Fig. 3 に図示した結像光学系を実装した。実用的なモニタであることが本プロジェクトにおける利用を通じて確認されている。電子バンチとレーザーパルスの相対座標を確認しながら実時間でレーザービーム位置座標を調整することが可能である (Fig. 4)。このモニタは集光レンズ、バンドパスフィルタ、

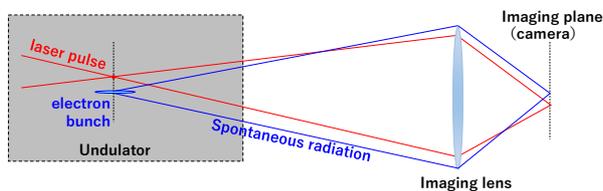


Figure 3: Schematic drawing of the spatial position monitor built for the two beams inside the undulator.

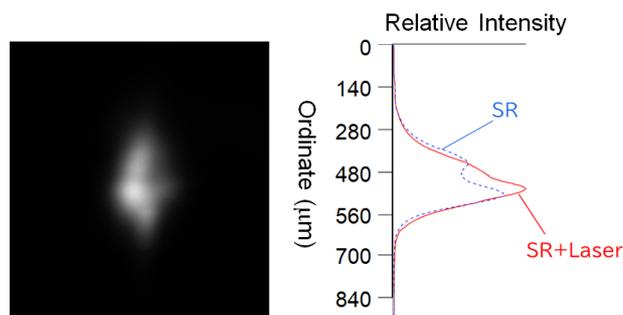


Figure 4: A CMOS-camera image showing the spatial intensity distributions of the laser beam and SR (synchrotron radiation generated in the undulator), which are overlapped with each other. A cross sectional view along the ordinate is shown on the right, depicting the intensity distributions in cases with (solid line) and without (broken line) the laser beam for clarity.

カメラ等、容易に入手可能な市販品のみで構成されている。

2.4 時空間同期検証

前述の空間位置モニタに加え、電子バンチとレーザーパルスの相対到達時刻を制御するタイミング制御機器も開発された(本報告では割愛) [10]。また、同期状況については、前節の空間モニタの場合と同様に、アンジュレータから出力される自発放射光とレーザー光成分の内、共通波長成分のみを取り出し、ストリークカメラで同時検出することで確認できる(Fig. 5)。これらモニタと制御系を駆使した上で、実際に、電子バンチにエネルギー変調を与えるに足る精度で時空間同期が達成されているか否かを最終確認するためには、相互作用の結果出力されるコヒーレント放射光を検出して確認すればよい。つまり、電子バンチとレーザー場が時空間軸上で高精度に重なっている時に限り、電子バンチがエネルギー変調され、それが、直後に配置されたシケイン中で密度変調

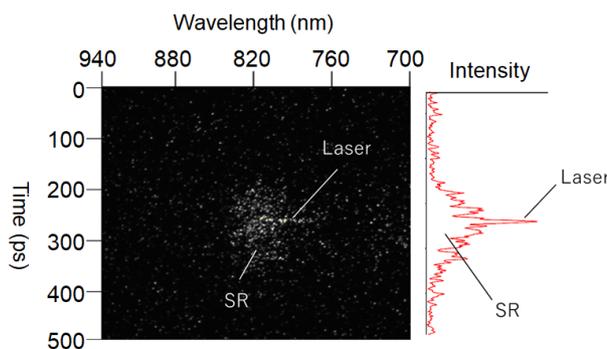


Figure 5: A streak-camera image visualizing the temporal intensity distributions of the laser pulse and SR (synchrotron radiation emerging from the undulator) which are overlapped with respect to each other. A cross sectional view along the time axis (ordinate) is also shown on the right for clarity.

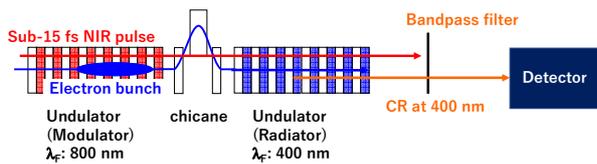


Figure 6: Schematic diagram of the detection scheme for the coherent undulator radiation. CR and λ_F stand for coherent radiation and fundamental wavelength of an undulator, respectively.

へと変換され、マイクロバンチが生じ、2 つ目のアンジュレータ (Radiator) においてコヒーレント放射光が発生する。注意すべきことは、見込まれるコヒーレント放射光の強度はレーザーパルス強度に比して非常に低いという事実である。レーザーパルスを遮断する設備がシケイン中に実装されていればそれを利用してレーザーパルスを遮断すればよいが、本プロジェクトにはその設備がない。結果として、高強度のレーザーパルスがそのまま下流計測点までコヒーレント放射光と共に伝送されてしまう。加えて、シケイン励磁量の制約上、2 者が時間軸上で十分分離されず、後者が前者の中に埋もれる。ストリークカメラで時間分解することも、フェムト秒レーザーパルスと非線形光学効果を併用して時間分離することも有効ではない。そのため類する放射光実験研究で採用されているように、レーザーパルスとは異なる波長のコヒーレント光を発生させて分光検出せざるを得ない [14]。Figure 6 に本プロジェクトのコヒーレント放射光検出スキームの概略を示す。コヒーレント放射光を発生させるアンジュレータ (Radiator) の基本波長を 400 nm とし、下流のバンドパスフィルタにて波長 800 nm のレーザーパルスを除去した上でストリークカメラへ入射し、検出するスキームが採用されている。

3. まとめ

2018 年度より NewSUBARU 放射光施設において自由電子レーザーに関する新たな光源手法の原理検証プロジェクトが推進されており、それに要するサブ 15 fs 超短パルスレーザー光源に関する開発を推進してきた。パルス幅、エネルギー、ビーム直径いずれも当初の要求を満たし、実機としてすでに運用されている。安定性についてもこれまでの研究開発において問題が生じない程度の安定性が得られており、日毎の再現性も良く、円滑なプロジェクト推進につながっている。また、蓄積リングへ入射する入射光学系や電子バンチとレーザーパルスの相対位置を確認するモニタ等についても述べた。これらも全て実装済みであり、本プロジェクトにおいて使用されている。

最後にコヒーレント放射光検出方法について触れたが、示した光学系を利用し、実際にコヒーレント放射光が既に検出されている。開発したシステムを利用し、確立された手順を繰り返すことでコヒーレント放射光を容易に発生・検出できる段階までプロジェクトが進捗している。

今後はコヒーレント放射光の時間幅を評価する診断系の開発、そしてプロジェクトの主題である光スリッページ相殺原理の検証へ推移していく予定であり、プロジェクトは佳境を迎えている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18H03691 の助成を受けています。

参考文献

- [1] S. Huang *et al.*, "Generating Single-Spike Hard X-Ray Pulses with Nonlinear Bunch Compression in Free-Electron Lasers", *Phys. Rev. Lett.* 119, 154801 (2017).
- [2] A. Marinelli *et al.*, "Experimental demonstration of a single-spike hard-X-ray free-electron laser starting from noise", *Appl. Phys. Lett.* 111, 151101 (2017).
- [3] J. Duris *et al.*, "Tunable isolated attosecond X-ray pulses with gigawatt peak power from a free-electron laser", *Nat. Photonics* 14, 30–36 (2020).
- [4] T. Tanaka, "Proposal to generate an isolated monocycle x-ray pulse by counteracting the slippage effect in free-electron lasers", *Phys. Rev. Lett.* 114, 044801 (2015).
- [5] Y. Kida *et al.*, "Synthesizing high-order harmonics to generate a sub-cycle pulse in free-electron lasers", *Appl. Phys. Lett.* 109, 151107 (2016).
- [6] T. Tanaka *et al.*, "ニュースバルにおける単一サイクル自由電子レーザー原理実証実験計画", *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, FROL02* (2018).
- [7] A. Ando *et al.*, "Isochronous storage ring of the New SUBARU project", *J. Synchrotron Radiat.* 5, 342–344 (1998).
- [8] S. Hashimoto *et al.*, "ニュースバル放射光施設の現状", *Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THP057* (2021).
- [9] T. Tanaka *et al.*, "Development of an undulator with a variable magnetic field profile", *J. Synchrotron Radiat.* 28, 404–409 (2021).
- [10] Y. Tanaka *et al.*, "Laser-SR synchronization for laser seeding to generate monocycle FEL radiation at NewSUBARU", *Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment (LSC2020)* (2020).
- [11] M. Nisoli *et al.*, "Generation of high energy 10 fs pulses by a new pulse compression technique", *Appl. Phys. Lett.* 68, 2793–2795 (1996).
- [12] S. Sartania *et al.*, "Generation of 0.1-TW 5-fs optical pulses at a 1-kHz repetition rate", *Opt. Lett.* 22, 1562–1564 (1997).
- [13] Y. Kida "Transient grating in a thin gas target for characterization of extremely short optical pulses", *Opt. Lett.* 45, 2231–2234 (2020).
- [14] X. Deng *et al.*, "Experimental demonstration of the mechanism of steady-state microbunching", *Nature* 590, 576–579 (2021).