

EO タイミング制御による HHG シード FEL の持続的発振

SUSTAINED LASING OF HHG-SEEDED FEL BY USING EOS-BASED TIMING CONTROL

渡部貴宏^{#, A), B)}, 青山誠^{C)}, 岩崎純史^{D)}, 大竹雄次^{B)}, 大島隆^{B)}, 岡安雄一^{A), B)}, 小川奏^{B)}, 大和田成起^{D)}, 佐藤堯洋^{D)}, 富樫格^{A)}, 渡川和晃^{B)}, 原徹^{A), B)}, 田中隆次^{B)}, 富澤宏光^{A)}, 松原伸一^{A)}, 高橋栄治^{B)}, 緑川克美^{B)}, 矢橋牧名^{B)}, 山川考一^{C)}, 山内薫^{D)}, 田中均^{B)}, 石川哲也^{B)}

Takahiro Watanabe^{#, A), B)}, Makoto Aoyama^{C)}, Atsushi Iwasaki^{D)}, Yuji Otake^{B)}, Takashi Ohshima^{B)}, Yuichi Okayasu^{A), B)}, Kanade Ogawa^{B)}, Shigeki Ohwada^{D)}, Takahiro Sato^{D)}, Tadashi Togashi^{A)}, Kazuaki Togawa^{B)}, Toru Hara^{A), B)}, Takashi Tanaka^{B)}, Hiromitsu Tomizawa^{A)}, Shinichi Matsubara^{A)}, Eiji Takahashi^{B)}, Katsumi Midorikawa^{B)}, Makina Yabashi^{B)}, Koichi Yamakawa^{C)}, Kaoru Yamanouchi^{D)}, Hitoshi Tanaka^{B)}, Tetsuya Ishikawa^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} RIKEN, ^{C)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA), ^{D)} The University of Tokyo

Abstract

High-harmonic-generation (HHG) based seeded FEL experiments were demonstrated at SCSS, SPring-8. Seeded FEL has advantageous features against SASE such that there is no intrinsic nature of shot-noise fluctuation and output FEL pulses are in principle fully coherent in both transverse and longitudinal axes. In practical user experiments, however, an overlap between electron bunches and seed laser pulses in six-dimensional phase space needs to be precisely maintained for securing the stable lasing. Otherwise, the overlap could be quickly lost and the lasing is no more sustained. For the stable lasing, we have developed an EO (electro-optic) based timing control system, which enables to observe a timing drift between electron bunches and laser pulses, and compensate for it. Experimental results of the seeded FEL with and without the EO timing control are compared, and the effectiveness of the timing system is discussed.

1. はじめに

SASE (Self-amplified spontaneous emission) は、その放射メカニズム上、Spontaneous undulator radiation に比べ輝度が高く、自発的に Transverse 方向にコヒーレントになる (コヒーレントな成分だけが選択的に成長する) という重要な長所があるが、Longitudinal 方向のコヒーレンスは制限されるという生来的な性質がある。つまり、出力光パルスの時間プロファイル、あるいは等価的にスペクトルはスパイク構造となり、各スパイク内はコヒーレントだが、スパイク間はインコヒーレントとなる。更に、そのスパイク構造はショット毎に変化し、結果的にパルスエネルギーもショット毎に揺らぐ。従って、この性質は、Longitudinal 方向のコヒーレンス、及びパルスエネルギーやスペクトルの高安定度を必要とする実験にとっては好ましくない。

この問題を解消する有力な手段の1つとして、コヒーレントな光を外部から供給するシード FEL が以前から研究されている。このシード FEL では、電子バンチが Undulator に入射するのと同じタイミングで外部からコヒーレントな光を入射する。この外部から供給するシード光の強度が SASE の初期段階におけるノイズ光 (Spontaneous emission) よりも十分に強ければ、シード光が電子バンチとの相互作用によって効果的に増幅され、結果的にフルコヒーレン

トな光、つまり Transverse 方向、Longitudinal 方向ともにコヒーレントな光が出射される^[2,3]。また、これに伴って原理的にはショット揺らぎがなくなり、利用実験に対して安定した光パルスを供給出来ることが期待される。

一方、実際の実験では、SASE よりも複雑な体系が要求される。つまり、何らかの方法で安定なシード光を生成し、それを Undulator 内の電子ビームと6次元位相空間 (x, x', y, y', t, E) 上で正確にオーバーラップさせる必要がある。この際、十分な FEL ゲインを稼ぐために電子ビーム及びシード光の6次元位相空間サイズは極力小さくしてあるため、高精度なオーバーラップを実現・維持することが実験における克服課題の1つとなる。オーバーラップに短期的なジッターあるいは長期的なドリフトがあった場合、出射光は事実上揺らぐことになる。

現在、主流となっているシード FEL は大きく分けて2種類あり、1つは、上段の SASE で生成された光のうちの1スパイクだけを抽出し、これを後段のシード光として用いる「Self-seeding」という手法である^[4]。もう1つは、固体レーザーなど外部レーザーで別途生成したコヒーレントな光をシード光として用いる手法である。本稿で示す実験は後者に相当する。

2010年、SCSS では61nm という短波長でシード FEL を発振させることに成功したが^[5]、この際、数十分オーダーで起きる電子バンチとシード光のタイミングドリフトによって、一旦得られたオーバー

[#] twatanabe@spring8.or.jp

ラップが容易に外れてしまい、FEL の発振が持続しないという現象が観測された。そこで、EO サンプリングによって電子バンチとシード光とのタイミングを計測し、これに基づいてレーザーのタイミングにフィードバックを掛けるシステムを構築した。

本稿では、構築されたシステムの概略を示し、タイミング制御システムの導入によっていかにシード FEL の安定性が改善されたか、実験結果に基づき定量的に議論する。

2. シード FEL 及び EO タイミング制御の構築と 6 次元位相空間オーバーラップ

以下の条件式を満たす時、Undulator 内で蛇行する電子とシード光は効果的に相互作用し、シード FEL が発振する。

$$\lambda_r = \frac{\lambda_u(1+K^2/2)}{2\gamma^2} \quad (1)$$

ここで、 λ_r はシード FEL および出力 FEL の波長、 λ_u は Undulator period、 K は蛇行の大きさを表す K 値、 γ は Normalized electron energy で、Undulator は Planar 型を仮定している。

式(1)を満たすため、Table 1 に示すようなパラメータを選択した。電子バンチ長については、SASE 光を抑制し、且つタイミングのオーバーラップ (同期) を安定化させる目的で 約 600fs (FWHM) まで伸長させ、電子エネルギーと K 値の微調整については、SASE の波長がシード光の波長 61.5nm に一致するよう、実験中に最適化を行なった。

シード光については、Ti:sapphire レーザーにより生成された中心波長 800nm、パルス長 180fs (FWHM)、パルスエネルギー 120mJ の基本波を Xe のガスセルに照射し、そこで生成される High-harmonic generation (HHG)^[6] の 13 次光 (波長 61.5nm) を Undulator に導いた。この際、シード光は 2 枚の白金コート凹面ミラー (R=8m) により Undulator の入口付近に集光させ、Undulator 入口におけるシード光のパルスエネルギーは 2nJ となった。

6 次元位相空間のうち、Transverse 方向 (x, x', y, y') のオーバーラップについては、Undulator 入口および出口において、電子ビームが発する OTR の短波長成分とシード光を Phosphor+MCP のスクリーン上で確認した。エネルギー (E) については、式(1)を満たすように電子エネルギーによる粗調整と K 値による微調整を行なった。時間 (t) については、ストリークカメラ (時間分解能 ~500fs) で粗調整を行い、最終的にはレーザーオシレータのタイミングを決める遅延回路のスキャンを行いながらシード FEL の発振状態により確認した。

EO サンプリングについては、電子バンチが放射する電場を用いる手法と、電子の周りのクーロン場を用いる手法があるが、本実験では後者を採用した。つまり、電子バンチが EO 結晶 (ZnTe) 近傍を通過する際、そのクーロン場によって印加される電界がポッケスル効果を引き起こし、複屈折によって直線偏光で入射したプローブ光が楕円偏光化する。偏光は電子が EO 結晶近傍を通過している間だけ楕円偏光化しており、この偏光状態の変化のタイミングを Spectral decoding と呼ばれる手法^[7]で観測することでタイミングドリフトを割り出し、これを元にレーザーのタイミングを調整した。電子はほぼ非破壊で EO 結晶の横を通過するため、シード FEL 実験と併行してタイミング計測・調整を行なうことが出来る。なお、プローブ光は、シード光発生のための基本波を Xe ガスセルの前で一部分岐させ、これを EO 結晶に導くことで、分岐した 2 つのレーザーパルス間の伝送系におけるジッターを最小限にするよう留意した。

Table 1: Main parameters of seeded FEL experiment

Electron energy	250 MeV
Electron charge	280 pC/bunch
Undulator period	1.8 cm
K	1.39
Radiation wavelength	61.5 nm

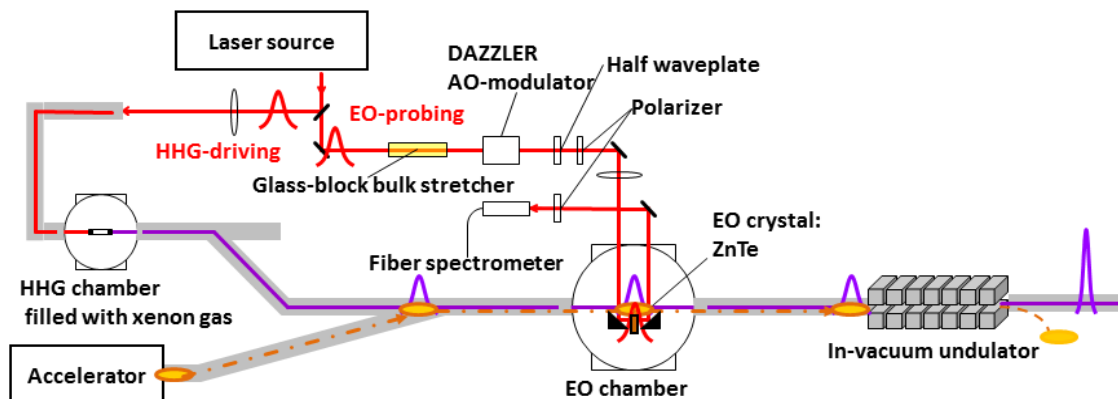


Figure 1: Experimental setup of seeded FEL with EOS timing system.

3. シード FEL 実験

3.1 EO タイミング制御がない場合

2010 年に行なわれた実験では、61.2nm という短波長でシード FEL が発振することを観測した（詳細は参考文献[5]参照）。この際、シード光のパルスエネルギー2nJ に対し、出力 FEL 光のパルスエネルギーは 1.3μJ 程度となった。従って、650 倍のゲインを得たことになる。なお、この時の SASE の出力は 0.7uJ であった。一方、電子ビームとレーザーパルスとの間のタイミングドリフトが原因となり、以下の2つの問題が確認された。

- 十分オーダーのタイミングドリフトに伴ってオーバーラップが外れ、FEL 発振が持続しない。
- 時間以外の5次元 (x, x', y, y', E) のオーバーラップ調整を行なっている間もタイミングドリフトが起き、詳細な最適化、および調整のアクセプタンスの確認 (x, y, E 方向にどの程度ずらしても発振するかの確認) が困難。

FEL 発振の持続の程度を定量的に評価するため、ここでは有効ヒット率という指標を用いることとする。まず、シード光を入射していない状態で観測される SASE の spectral peak intensity のショット平均を I_{SASE} とし、揺らぎの root-mean-square (rms) 値を σ_{SASE} とする。あるショットにおけるシード FEL の出力 I_{seed} と SASE の平均値との差が SASE の強度揺らぎ σ_{SASE} よりも十分に (4 倍以上) 大きい時を「ヒット」と定義する。

$$4\sigma_{SASE} < I_{seed} - I_{SASE} \quad (2)$$

この定義によって算出された有効ヒット率は 0.3% 程度であった。なお、この値には、ショット毎に揺らぐタイミングジッターと、長周期 (~十分オーダー) で起きるドリフトの影響が含まれている。

利用実験にとって有効ヒット率 0.3% という値は小さく、且つ、既述の通り 0.3% の有効ヒット率の中で残りの5次元の最適化を行なうのは困難である。

従って、EO によるタイミング制御を導入した。

3.2 EO タイミング制御がある場合

シード FEL に関する体系は 3.1 と同等であるが、Ti:sapphire レーザーの基本波を Xe ガスに打ち込む前に一部だけ取り出し、EO サンプリングの体系に光を導いた。EO プロブ光は伝送途中で、主にバルク・ストレッチャー (高分散ガラスロッド) でパルスを粗く伸長させ、Acousto-Optic (AO) modulator (FASTLITE 社製、DAZZLER) で分散を微調するによって最終的に 5ps 程度にした。

実験結果を Figure 2, 3 に示す。Figure 2 は出力 FEL 光の spectral peak intensity を、そのピーク波長の関数でプロットしたものである。図中、赤い点は式(2)に示すヒットの条件を充たしたものであり、青い点はその条件を充たさなかったものである。

Figure 2 から分かる通り、ヒットした時はピーク強度が高く、その波長は 61.5nm から 62.0nm の範囲

内に収まっている。一方、ヒットしなかった際はピーク強度が低く、スペクトルが 2.5nm 以上揺らいでいる。これは次のように説明出来る。シード FEL のピーク波長は、シード光の中心波長でほぼ決まる (厳密に言うと、出射光の Longitudinal phase space distribution は電子ビームの Longitudinal phase space distribution や FEL ゲインの効果が影響する) が、HHG によって生成されたシード光の中心波長の揺らぎは 1nm よりも十分に小さい。また、シード FEL は Longitudinal 方向にコヒーレントなため、出力バンド幅はパルス幅のフーリエ限界で決まる値に相当し、この値を計測した結果、半値幅で 0.06nm であった。一方、Longitudinal mode が1つではない SASE は、上記フーリエ限界よりもバンド幅が広い。且つ、その広いバンド幅の中でスペクトル形状はショット毎に揺らぎ、ピーク波長は SASE のバンド幅の範囲内で大きく揺らぐ。更に、電子ビームのエネルギージッターはそのまま SASE の中心波長の揺らぎに影響するが、シード FEL では基本的に、出力スペクトルに大きな影響を与えない。このスペクトル安定性もシード FEL の特徴と言える。

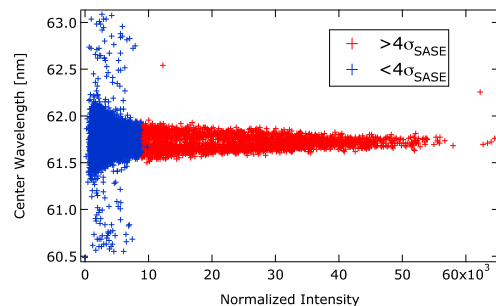


Figure 2: Spectral peak intensity distribution as a function of its peak wavelength for 10,000 shots.

一方で、0.5nm の範囲内でスペクトルが揺らいでおり、これは FEL のゲイン幅の範囲内における電子エネルギーの揺らぎが原因であると考えられる。

Figure 2 から EO タイミング制御がある場合の有効ヒット率を算出した結果、24%程度という結果を得た。この値は、EO タイミング制御がない場合に比べ約 80 倍改善されたことになる。また、タイミング制御がなかった時の最大パルスエネルギーが 1.3uJ だったのに対し、制御がある場合は 10 倍以上の 20uJ が得られた。これらは、FEL が持続的に発振し、且つ、タイミングのオーバーラップが保証されているため、残りの5次元のオーバーラップについても最適化調整が十分になされたためであると考えられる。

Figure 3 は、シード FEL の出力パルスエネルギーを 1.5 時間、ショット毎にプロットしたものである。この図からまず、シード FEL が持続的に発振していることが分かる。パルスエネルギーは最大で 20uJ (ゲイン~10⁴) に達し、この値も大きくドリフトしてない。Figure 4 は、この間、EO で計測された電子ビームとレーザーパルスとの相対的なタイミングの

推移であり、(a)は EO タイミング制御がない場合、(b)がある場合である。HHG によって生成された 13 次光のパルス幅は 50fs 程度、電子バンチ長は 600fs 程度であることを考慮すると、タイミング制御システムがない場合は数分足らずで FEL 発振が失われることになり、EO タイミング制御システムによって発振を持続していることが分かる。

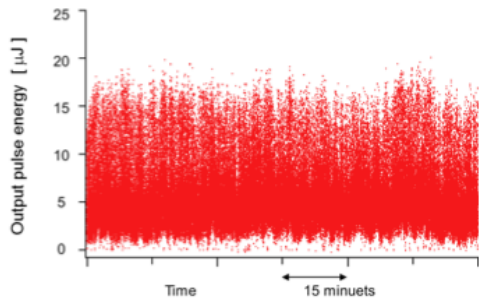


Figure 3: Shot-by-shot output pulse energies for 1.5 hours.

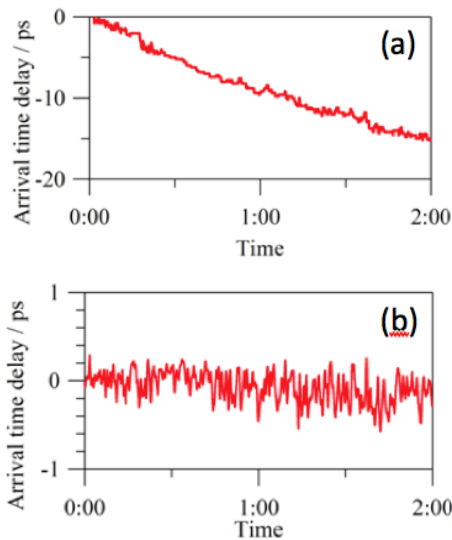


Figure 4: Timing drift (a) without, and (b) with EO timing control.

一方、シード FEL が発振している間も、その出力パルスエネルギーがショット毎に揺らいでいる。このジッターは Figure 4(b)でも見られており、高速かつ概ねランダムに揺らいでいる。このジッターを観測してからそのパルス自身にタイミングフィードバックを掛けることは困難であり、別の方策が必要となる。具体的には、電子バンチ長やシード光のパルス幅を拡げる、タイミングジッター源のジッター自体を抑制することなどが考えられる。

3.3 高次高調波 FEL 発生

ここまで述べた体系では、短波長シード FEL を実現すべく、シード光を HHG によって短波長化させたが、FEL ゲインにおける高次高調波発生による短

波長化も在る。これは、FEL の基本周波数の発振が成長した際、高次の bunching factor が急速に増加し、高調波が発生するという原理である。軸上を仮定した理論では奇数次のみを扱うが、軸外には偶数次も存在する^[8]。本実験では、61.5nm の基本波 FEL の 2 次高調波 (30.8nm) のシード FEL 発振を確認し、SASE の 2 次高調波よりも強度が大きいことを確認した。スペクトルを Figure 4 に示す。シード光の波長から更に短波長化を行なうための補足的な役割として期待できる可能性がある。

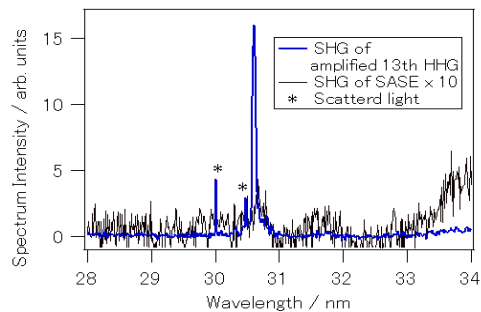


Figure 4: Spectrum of higher harmonic FEL at 30.8 nm.

4. まとめ

安定かつフルコヒーレントな FEL 光を供給する手法として期待されるシード FEL の実験を行なった。実験における最大の課題は、いかに電子ビームとシード光とのオーバーラップを確認・維持するかであり、特に、両者間の相対的なタイミングがドリフトする現象を抑制することが重要であることが確認された。

そこで、EO サンプリングによってタイミングを常時観測し、これをもとにドリフトを補正するシステムを構築した。その結果、タイミングドリフトの補正、及びオーバーラップの最適化が可能となり、有効ヒット率換算では、タイミングシステム導入前の 0.3% に対し 24% 程度まで改善することが出来た。更に改善するにはショット毎のタイミングジッターを抑制する必要があり、その為には電子バンチ長やシード光のパルス幅を拡げる、タイミングジッターの原因を根本的に改善するなど別の方策が必要であると考えられる。

また、短波長化の 1 つの手法である高次高調波 FEL の発振により、30.8nm のシード FEL 発振を確認した。

参考文献

- [1] E.L. Saldin et al., "The Physics of Free Electron Lasers", Springer (2010).
- [2] J. Wu et al., J. Opt. Soc. Am. B, **24**, 484-495 (2007).
- [3] J.B. Murphy et al., BNL-75807-2006-JA.
- [4] J. Feldhaus et al., Opt. Comm. **140**, 341 (1997).
- [5] T. Togashi et al., Optics Express, **19**, 317-324 (2011).
- [6] e.g., T. Takahashi et al., Opt. Lett. **27**(21), 1920-1922 (2002).
- [7] B. Steffen et al., PRST-AB **12**, 032802 (2009).
- [8] T. Watanabe et al., Proc. of FEL2005, MOPP031 (2005).