

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE SEEDED FEL USING HIGHER HARMONIC GENERATION IN GAS AT THE SCSS TEST ACCELERATOR

Takanori TANIKAWA^{1,A),B),D)}, Toru HARA^{C),D)}, Guillaume LAMBERT^{E)}, Yoshihito TANAKA^{C),D)},
Takashi TANAKA^{C),D)}, Hideo KITAMURA^{C)}, Tsumoru SHINTAKE^{C),D)}, Tetsuya ISHIKAWA^{C),D)},
Masahiro KATOH^{A),B)}, Marie-Emmanuelle COUPLIE^{F)}

^{A)} The Graduate University for Advanced Studies [SOKENDAI]

38 Nishigo-naka, Myodaiji, Okazaki, Aichi, 444-8585, Japan

^{B)} UVSOR facility, Institute for Molecular Science

38 Nishigo-naka, Myodaiji, Okazaki, Aichi, 444-8585, Japan

^{C)} SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, Japan

^{D)} RIKEN SPring-8 Center, Harima Institute

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, Japan

^{E)} Laboratoire d'optique appliquée, ENSTA, Ecole Polytechnique

Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau, France

^{F)} Synchrotron SOLEIL

Saint Aubin, 91191 Gif-sur-Yvette, France

Abstract

Seeding a FEL (Free Electron Laser) with a high order harmonic generation (HHG) from a Xe gas cell at the SCSS test accelerator was achieved at a wavelength of 160 nm (the 5th harmonic of a Ti: Sa laser) in December 2006. After the improvement of the accelerator performance in 2007, we have performed detailed studies of the spectral characteristics of the seeded FEL. Compared to the spiky spectrum of SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission), the seeded FEL can produce a quasi-Gaussian spectrum with a single peak. In addition, the lasing wavelength is fixed at the wavelength of the seed light, even if a K-parameter of an undulator is shifted in a certain range. This means that the spectral stability of the seeded FEL is better than that of SASE against the fluctuation of the undulator field or the electron beam energy.

SCSS試験加速器シード型FELのスペクトル特性と短波長化の現状

1. はじめに

近年のFEL開発は、真空紫外線領域よりも短波長の光を得る為に、共振器型FELからシングルパスFELに開発の中心が移ってきている。これは光共振器を組む為の有効な鏡が短波長領域では存在しない為である。シングルパスFELは、線形加速器を用いてSASE(Self-Amplified Spontaneous Emission)の原理によってレーザー発振させる。現在世界各国でSASE型FELの開発が目覚ましく、中でも米国スタンフォードのLCLS、独国ドイツシンクロトロン研究所のE-XFEL、そして我が国SPring-8のXFELにて硬X線領域のFEL開発競争が激化している。

SPring-8で開発中のXFELは、熱カソード電子銃・C-band加速管・真空封止型アンジュレータという我が国独自の技術を採用しており、これらを用いたSASE型FELの原理実証の為に、電子ビームエネルギー250 MeVのSCSS試験加速器が建設され、2006年

6月に波長49 nmでレーザー発振に成功した。

しかし、SASE型FELには原理提唱された当初から指摘されている欠点がある。それは時間コヒーレンスが良くないという点である。SASEはアンジュレータ内を進行中の電子ビームと、電子から放射される自発放射光電磁場の相互作用により光を増幅する。しかし自発放射光のコヒーレント長が電子バンチ長よりも通常短い為、電子バンチ内で多数の光増幅過程が独立して発生する。その結果、SASEの光パルスのスペクトルや時間強度分布は、電子分布の統計に依存し、パルス毎に異なる複雑なスパイク構造を持つ。これはユーザー利用時に問題となる可能性がある。そこで、電子バンチ内のマイクロバンチ形成を自発放射光ではなく、外部から注入したコヒーレント長の長いシード光を用いて行い、レーザー発振を制御しようというのがシード型FELである。その結果、発振波長が安定な狭帯域で尖頭器度の高いレーザー光を発生させることが期待される。

¹ E-mail: tanikawa@ims.ac.jp

SCSS試験加速器では、SASEによるレーザー発振成功後、チタンサファイア (Ti: Sa) レーザーと希ガスとの相互作用により発生させたガス高次高調波をシード光としたシード型FELの開発を行っている^[1]。2006年12月に波長160 nmでのシード光増幅に成功したことは昨年度の本学会で報告した^[2]。その後、試験加速器とシード光発生システムの性能向上を行い、シード型FELにおけるスペクトル特性について詳細な測定を行った^[3]。

2. シード光発生装置と輸送光学系

ガス高次高調波発生に用いるTi: Saレーザーは、中心波長800 nm、出力20 mJ、パルス幅110 fs、繰り返し10 Hzで、ガス媒体はキセノンガスを使用した。ガスセル (2 cm × 2 cm × 長さ9cm程度) 内の圧力は、キセノンガス流量をリークバルブで変えることにより調節している。Ti: Saレーザーの800 nmは、焦点距離7.5 mの集光レンズを用いた緩い収束系によりガスセル内で集光させている。ガス高次高調波は、2枚の凹面鏡 (SiC) と2枚の平面鏡 (160 nm用誘電多層膜) を経てアンジュレータ内へ輸送される。凹面鏡はアンジュレータ内のシード光集光点位置を調整する為に、平面鏡はシード光の横方向位置の調整に用いている。また同時に、シード光波長以外の高次高調波成分や基本波である大強度800 nm光は、誘電多層膜平面鏡により大きく減衰される。輸送光学系の途中には、160 nm用狭帯域バンドパスフィルターと真空紫外用フォトダイオードを設置している。シード光発生装置及び輸送光学系は加速器真空と接続されており、差動排気によって加速器接続部では 10^{-6} Paを維持している。

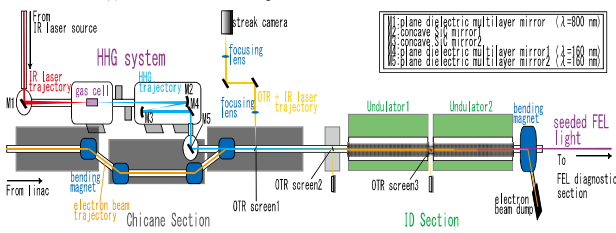


図1: シード光発生装置と加速器の配置

3. シード光と電子ビームの重ね合わせ

700 fsの電子バンチと数10 fsのシード光パルスを時間的に重ね合わせるには、高精度の時間同期が必要である。電子バンチの射出タイミングにTi: Saレーザーのパルス射出タイミングを同期させる為、時間同期モジュールや遅延時間調整モジュールを使用した。同期システムの一部を改善した結果、加速器基準RF信号5712 MHzに対するレーザーパルスの時間ジッタは1.3 ps RMS程度 (検出器の測定限界近く) となった。

電子バンチとシード光の横方向の重ね合わせは、アンジュレータ上下流にある電子ビームプロファイルモニターで確認した。また、電子ビームとシード光の時間タイミングの調整は、ストリークカメラ (時

間分解能1 ps程度) を利用した。

4. 実験結果

実験時の電子ビームエネルギーは150 MeV、電子バンチ当たりの電荷量は0.3 nCである。電子バンチとシード光の時間同期をより安定にする為、加速器通常運転時の電子バンチ長 (700 fs) よりもバンチ長を伸ばした条件 (4 ps) で測定を行った。

4.1 シード型FEL光のスペクトル

図2と図3に、アンジュレータ1台及び2台によるシード光増幅後のスペクトルを、同じ条件で測定したSASE、及びシード光のスペクトルと共に示す。図2に示したシード型FEL光のスペクトル幅は、SASEに比べ狭くなっており、シード光のスペクトル幅と比べても若干狭帯域化している。図3ではシード型FEL光スペクトルの狭帯域化がより顕著に表れている。これらのスペクトル幅より、シード型FELの時間コヒーレント長はSASEよりも長くなっていることがわかる。

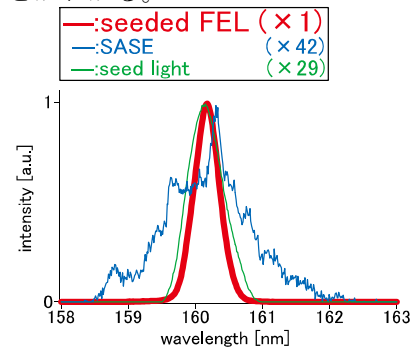


図2: アンジュレータ1台によるFEL増幅時の光スペクトル

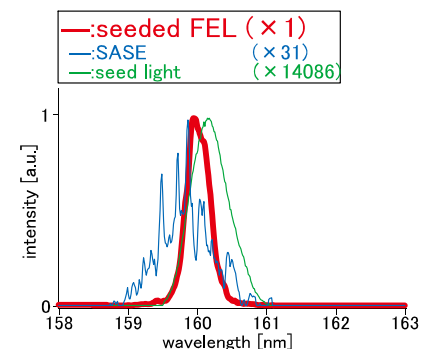


図3: アンジュレータ2台によるFEL増幅時の光スペクトル

4.2 アンジュレータK値とシード型FEL光の発振波長及び強度の相関

アンジュレータ1台によるFEL増幅時にK値を変化させた時、シード型FELとSASEの発振波長がどう変わるかを測定した結果を図4に示す。K値に比例してSASEの波長は変化しているが、シード型FEL光の場合、K値の変化が一定範囲以内であれば、発振波長がシード光の波長に固定されていることがわ

かる。これは電子ビームエネルギーやアンジュレータ磁場の変動に対し、シード型FEL光はSASEよりも発振波長が安定することを示唆している。

次にアンジュレータ2台で光を増幅し、1台目のアンジュレータK値を固定した時の、2台目アンジュレータK値に対する発振波長の変化を図5に示す。この場合、発振波長は1台目アンジュレータで決まり、2台目アンジュレータK値を変化させても発振波長は変わらなかった。しかしシード型FEL光の方が、SASEよりも発振波長のふらつきが少ないことがわかる。

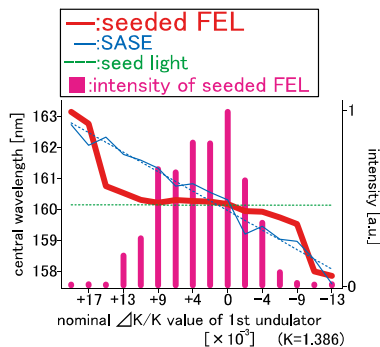


図4：1台目アンジュレータK値に対する発振波長依存性、2台目アンジュレータのギャップはオープン

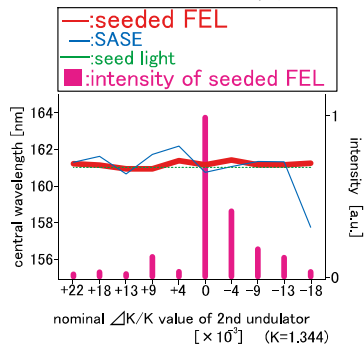


図5：2台目アンジュレータK値に対する発振波長依存性、1台目アンジュレータのK値はK=1.386に固定

4.3 シード型FELとSASE型FELのFEL高次高調波強度 (NLH) の比較

アンジュレータ2台を使用した時のFEL高次高調波の強度を、シード型FELとSASEについて測定し比較したものを表1に示す。SASEの高次高調波は3次 (波長53.3 nm) までしか確認できなかったが、シード型FELでは7次 (波長22.9 nm) の高調波まで確認することができた。ただし、4次については分光器の回折格子の回折効率が悪く、確認することができなかった。

wavelength	NLH intensity [a.u.]	
	seeded FEL	SASE
1st NLH (161.0 nm)	3.0×10^2	1
2nd NLH (80.5 nm)	5.6×10^{-2}	2.3×10^{-3}
3rd NLH (53.7 nm)	1.6×10^0	2.2×10^{-2}
4th NLH (40.3 nm)	no signal	
5th NLH (32.2 nm)	3.8×10^{-1}	no signal
6th NLH (26.8 nm)	1.3×10^{-2}	no signal
7th NLH (23.0 nm)	6.2×10^{-3}	no signal

表1：FEL高次高調波強度の比較

5. シード型FELの短波長化

SCSS試験加速器の通常ユーザー運転時の電子ビームエネルギー250 MeV、発振波長50~60 nmに対応したシード型FELを実現する為、シード光の短波長化を急いでいる。波長60 nm付近のシード光を発生させる為に、ガスセルへの800 nm集光レンズを焦点距離7.5 mのものから4 mに変更し、ガスセルにおける800 nmレーザー光の単位面積あたりの尖頭輝度を向上させた。加えて輸送光学系の平面鏡を160 nm用誘電多層膜からSiCに変更し、キセノンガスを最適な流量に調整した結果、僅かであるが波長62 nm付近のシード光をアンジュレータ下流に設置している分光器上で確認することができた。今後はガスセル長の調整や、輸送光学系の鏡を波長60 nm用誘電多層膜鏡に変更することで、アンジュレータにおけるシード光強度を上げることを検討している。

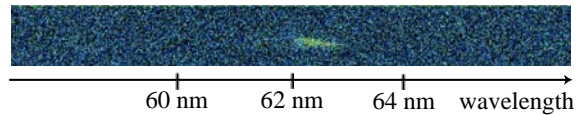


図6：波長62 nmシード光のスペクトルプロファイル

6. まとめ

SCSS試験加速器において、波長160 nmのシード型FELスペクトル特性について詳細な測定を行った。シード型FELのスペクトルは、バンド幅がSASEよりも狭く、シングルピークのスペクトルを得ることができた。また、アンジュレータK値や電子ビームエネルギーの変動に対し、シード型FELはSASEよりも発振波長が安定であることを確認した。

参考文献

- [1] G.Lambert, T.Hara, T.Tanikawa, et al., "Injection of harmonics generated in gas in a Free-Electron-Laser providing intense and coherent extreme-UV light", Nature Physics, VOL4, P.296-300, 2008.
- [2] T.Tanikawa, et al., "SINGLE-PASS SEEDED FEL EXPERIMENTS AT THE SCSS PROTOTYPE ACCELERATOR", 第4回日本加速器学会・第32回リニアック技術研究会Proceedings, P.266-268, 2007.
- [3] T.Hara, T.Tanikawa, et al., "STUDY ON THE SEEDED FEL AT THE SCSS TEST ACCELERATOR", in these proceedings.