

STUDY ON THE SEEDED FEL AT THE SCSS TEST ACCELERATOR

Toru Hara^{1,A,B)}, Takanori Tanikawa^{B,C)}, Guillaume Lambert^{D)}, Yoshihito Tanaka^{A,B)}, Takashi Ohshima^{A)},
Takashi Tanaka^{A,B)}, Hideo Kitamura^{A)}, Tshumoru Shintake^{A,B)}, Tetsuya Ishikawa^{A,B)}, Marie-Emmanuelle Couprie^{E)}

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

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

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

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

^{C)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi 444-8585, Japan

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

Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau, France

^{E)} Synchrotron SOLEIL

Saint-Aubin, 91191 Gif-sur-Yvette, France

Abstract

Short wavelength seeded FEL has been demonstrated at the SCSS test accelerator using higher order harmonics of a Ti:Sa laser generated in gas as an external seed source. Current experiment has been carried out at 160 nm and we have succeeded to obtain a stable single peak spectrum of the amplified FEL light. Even in case the seed pulse is shorter than the electron bunch, the seeded FEL shows a stable spectrum, if the amplification is stopped immediately after the saturation of the overlapped part of the electron bunch and the seed pulse.

SCSS試験加速器におけるシード型FEL実験

1. はじめに

SASE FELは、真空紫外からX線にかけての短波長領域における有望なコヒーレント光源であるが、ノイズである自発放射光を増幅するため、光パルスの時間波形やスペクトルがランダムに変化するスパイク状の構造をもつことはよく知られている。これは、SASE光パルスの時間コヒーレンス長が、光パルス長に比べ短いことに起因する。SASEが飽和に達すると、スペクトルの積分強度はある程度安定になり、スペクトル全体を使うような利用実験であれば問題ない。しかしスペクトルの一部を分光器で切り出して使うような場合、スペクトルの内部構造であるスパイクがランダムに変化するため、分光器を通過した後の光強度は大きく変動する。そこでFEL光のスペクトル構造を安定にする1つの方法として、外部からのコヒーレント光を用いて電子バンチに光波長の規則正しい変調をかけ、FEL光の時間コヒーレンスを改善するシード型FELが考えられる。

FELの存在意義は、テーブルトップサイズのレーザー光源が提供できない波長領域において、コヒーレント光を発生できることである。よってFELがその能力を発揮できる短波長領域には、強力なシード光源は存在しない。しかしながら10 nm以下程度の

波長までであれば、強度はレーザーに劣るもののコヒーレンス特性に優れたガス高次高調波が存在する。SCSS試験加速器では、このガス高次高調波をシード光として利用した、シード型FELの研究開発を行っている^[1]。またシード型FELはスペクトル特性の改善以外に、自発放射光よりも強度の大きいシード光を増幅するため、飽和に必要なアンジュレータ長が短くて済むという利点を併せ持つ。

2. シード型FEL実験の概要

シード光源には、Xeガス中で発生させた800 nmチタンサファイアレーザー光の高次高調波を用いる。チタンサファイアレーザーは、SCSS試験加速器トンネル外に設置し、トンネル内のXeガスセルへ800 nmの光を輸送する。Xeガスセルで発生した高次高調波は、2台あるアンジュレータの1台目中央でwaistをもつようにミラー光学系で集光する。今回の実験では800 nmの5次高調波(160 nm)をシード光として用いた。図1にSCSS試験加速器の構成を示す^[2]。アンジュレータ上流には、C-band加速管暗電流等の不要な電子をカットするためのシケインがあり、このシケインを利用して電子ビームと同軸上にシード光を打ち込んでいる。

¹ E-mail: toru@spring8.or.jp

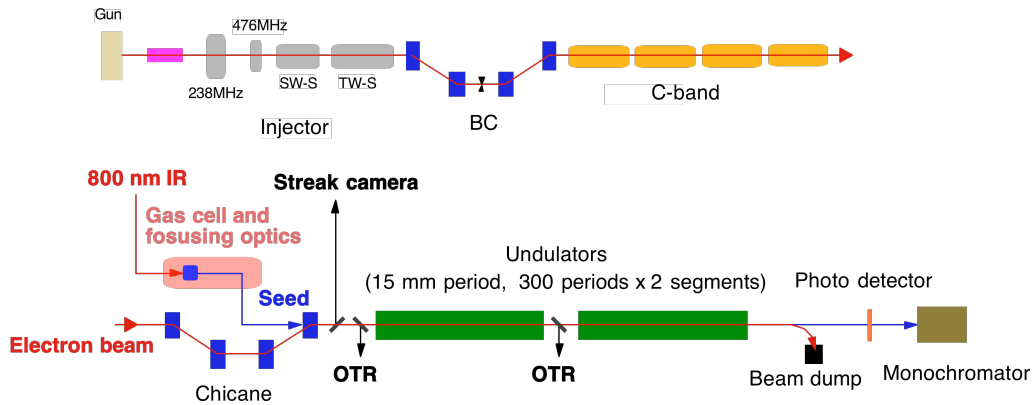


図1：SCSS試験加速器の構成。

SCSS試験加速器は、加速器全体の安定性向上のため、基準RF信号と関西電力60 Hzの両方の周波数に同期して電子バンチを加速しており、電子バンチ時間間隔は60 Hzの精度に起因する数10 μ sのジッターをもつ不等間隔になっている。このためチタンサファイアレーザーの共振器は基準RFに、後段の増幅器は60 Hzに同期させることにより、加速器電子バンチのタイミングに合わせてレーザーパルスを増幅する同期回路を組んでいる。800 nmレーザー光のパラメータは、パルスエネルギー20 mJ、パルス幅110 fs (FWHM)、繰り返し10 Hzである。

シード光と電子バンチのオーバーラップは、シード型FELで技術的に最も重要な点である。SCSS試験加速器では、OTR(Optical Transition Radiation)を用いた電子バンチ長測定用ストリークカメラ上でシード光と電子バンチのタイミングを調整し、アンジュレータ両端の電子ビーム位置測定用OTRスクリーンで横方向の位置を確認している。またアンジュレータ下流のビームラインには、フォトダイオードや分光器が設置され、光強度やスペクトルの測定を行うことができる(図1)。

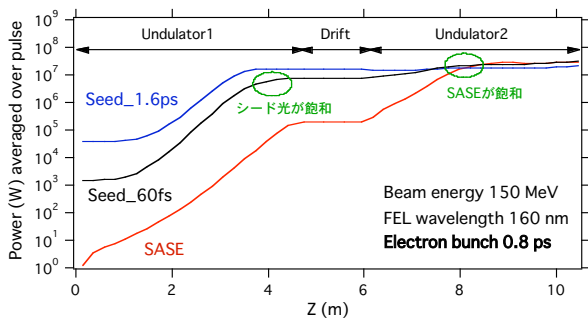


図2：FEL増幅の計算例、青線はシード光パルス幅(1.6 psFWHM)が電子バンチ(0.8 ps)より長い場合、黒線は短い場合(60 fs)、赤線はSASEを示す。計算に用いたパラメータはSCSS試験加速器160 nmシード実験を仮定。

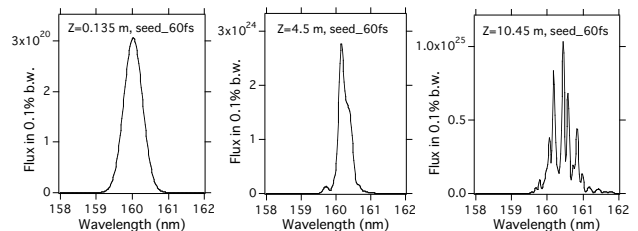


図3：シード光パルス幅が電子バンチより短い場合(図2、seed 60fsと同じ条件)のFEL光スペクトルの変化を計算した例。左図1台目アンジュレータ入口、中央図1台目出口、右図2台目出口。

3. シード型FELのスペクトル特性

シード光のパルス幅は、電子バンチ長よりも長いことが理想的である。しかしながらガス高次高調波発生には、高いピークパワーをもつレーザーパルスが必要であるため、実験では110 fsの800 nm光パルスを用いており、シード光のパルス幅は更に短く約60 fs程度である。これに対しSCSS試験加速器の電子バンチ長は約0.6 psであり、電子バンチ全体にシード光をオーバーラップさせることはできない。

図2に3次元FELコードSIMPLEXを用いて計算したシード型FELとSASEのレーザー増幅の様子を、アンジュレータ長に対して示す^[3]。図2からわかるように、シード光の効果は増幅の立ち上がりを早くするが、SASEに比べ単位アンジュレータ長さ当たりの増幅率や飽和レーザーパワーが大きくなるわけではない。シード光パルス幅がバンチ長よりも長い場合(図2、seed 1.6 ps)は、バンチ全体にわたってシード光が増幅され飽和に達する。一方シード光がバンチ長よりも短い場合(図2、seed 60fs)は、シード光と重なった部分は早く飽和に達し(図2、Z=4.5 m付近)、他の部分は遅れて飽和する(図2、Z=8 m付近)。シード光が重ならないバンチ部分からの光は、SASEと同じスパイク状のスペクトル構造をもつ。

図3はシード光がバンチ長よりも短い場合（図2の黒線）について、FEL光スペクトルの変化をSIMPLEXを用いて計算したものである。2台目アンジュレータを出た後はSASEが飽和に達しているため、シード光を入れてもスペクトルはランダムなスパイク構造になっていることがわかる。即ちシード光パルスがバンチ長よりも短い場合は、シード光の増幅が飽和に達したところで光を取り出さないと、スペクトルにSASEの影響が出てしまう。

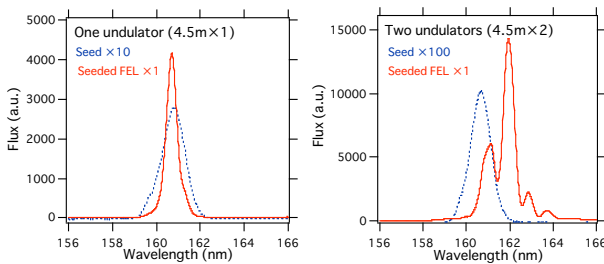


図4：SCSS試験加速器において測定したシード型FELスペクトルの変化。左図はアンジュレータ1台による増幅後、右図は2台による増幅後のスペクトル。青点線はシード光のスペクトル。

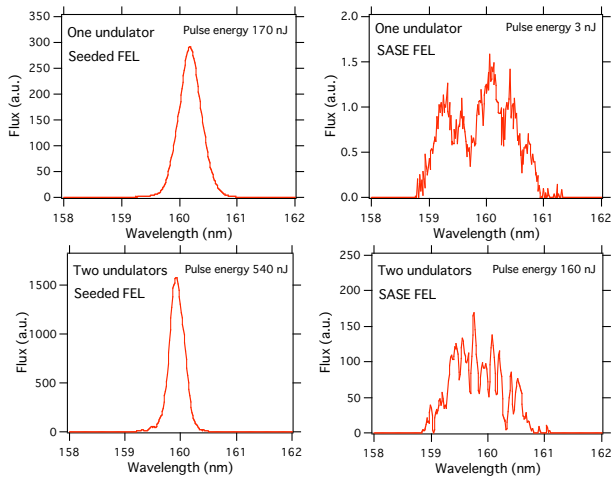


図5：電子バンチ長を4 psまで伸ばすことによりFELゲインを下げた測定したスペクトル。左上図と左下図は夫々アンジュレータ1台および2台によるシード光増幅後のスペクトル、右側図は各々対応するSASE FELのスペクトル。各図右上にフォトダイオードと分光器を用いて測定したパルスエネルギーも合わせて示す。

4. シード光によるFELスペクトルの改善

図4にSCSS試験加速器において、実際に測定したシード型FEL光のスペクトルを示す。アンジュレータ1台目出口では、シード光がそのまま増幅されスペクトルはシングルピークであるが、2台目出口では光パルス全体の強度は上がっているものの、スペクトルは崩れていることがわかる。

次に電子バンチ長を伸ばすことにより、FELゲインを下げた測定した場合のスペクトルを図5に示す。この場合、2台目アンジュレータを出た後においても、シード光と重なっていないバンチ部分からのSASEがまだ十分増幅されないため、スペクトルは強度、中心波長とも安定したシングルピークのみである。図5の右側図に示したSASEのスペクトルと比べると、その違いは明らかである。

発振波長についても、シード型FELはSASEよりも安定した振る舞いを示す。FELゲインは、ゲインが最大となる中心波長の回りにスペクトル幅をもつ。SASEはビームエネルギーやアンジュレータ磁場が変化すると、それに応じて発振波長も変わる。一方シード型FELの場合、シード光波長とゲイン中心波長がずれても、シード光波長における増幅の立ち上がりの方が早いため、発振波長はシード光波長に固定される^[4]。

5. まとめと今後の課題

SASE FELの欠点である光パルスのスペクトルや時間強度分布のランダムスパイク構造は、シード型FELのように電子バンチに光波長周期の規則的な変調を与えることによって、解消することができることを実験により示した。今回のシード光源をそのままX線領域で使うことはできないが、シード光に限らず何らかの方法で電子バンチに変調がかけられればよい。バンチ全体に変調をかけることが理想的であるが、今回示したようにバンチの一部に対してでもよい。但しこの場合、光を早く取り出すことにより、電子バンチの中で変調がかかった部分のみを使い、後は捨てる必要がある。このようなスペクトルや時間強度分布の制御は、SASEによるX線FELが実現した後の大きなテーマになると予想される。

SCSS試験加速器のシード実験は、これまで160 nmで行ってきたが、今後ユーザー運転で使われている60 nm付近まで短波長化する予定である。また現在使用しているレーザー同期回路は、1 ps程度の時間ジッターを持ち、電子バンチとの安定した同期が得られていない。同期回路の改善や、シード光パルス幅の伸長は今後の課題である。

参考文献

- [1] G.Lambert 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] H. Tanaka et al., in these proceedings.
- [3] SIMPLEX, <http://radiant.harima.riken.jp/simplex/>.
- [4] T. Tanikawa et al., in these proceedings.