SINGLE-PASS SEEDED FEL EXPERIMENTS AT THE SCSS PROTOTYPE ACCELERATOR

Takanori Tanikawa[1,A),B)], Toru Hara[2,B),C)], Guillaume Lambert[B),D),E)] Yoshihito Tanaka[B)],
Kazuhiko Tahara[A),B)], Takashi Ohshima[B),C)], Naoyasu Hosoda[B),C)], Shinobu Inoue[B)],
Michel Bougeard [E)], Marie-Emmanuelle Couprie[D)], Hideo Kitamura[B),C)], Tsumoru Shintake[B)]

[A)] University of Hyogo, Graduate School of Material Science
3-2-1 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1297
[B)] RIKEN/SPring-8
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148
[C)] JASRI/SPring-8
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198
[D)] Synchrotron Soleil
L'Orme des Merisiers, Saint Aubin, 91192 Gif-sur-Yvette, France
[E)] Service des Photons Atomes et Molécules
Commissariat à l'Energie Atomique, DSM/DRECAM/SPAM, CEN Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

Abstract

The SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) prototype accelerator has been constructed as a test facility for the 8 GeV XFEL project. The machine commissioning was started in May 2006, and the amplification of spontaneous emission was confirmed in June 2006. After that, a single-pass seeded FEL (Free Electron Laser) using high-harmonic generation of a femto-second Ti;Sapphire laser was tested in collaboration with CEA in France. The seeding experiment was carried out at a wavelength of 160 nm, which is the shortest wavelength so far as a seeded FEL. As a result, the injected seed light was amplified by a factor of 500 in one 4.5 m-long undulator, and the emission of higher harmonics at 3rd (53 nm) and 5th (32 nm) was also observed.

SCSS試験加速器におけるシングルパス・シード型FEL開発の現状

１．はじめに

共振器型FELが紫外光から遠赤外までの波長領域で実現される中、近年短波長化に向け、線形加速器を用いたシングルパスFELの開発が行われている。線形加速器におけるシングルパスSASE(Self-Amplified Spontaneous Emission)-FELには、低エミッタンス・高ピーク電流の電子ビームバンチが必要である。SCSS(SPring-8 Compact SASE Source)試験加速器では、熱カソード電子銃とvelocity bunching及び磁場シケインによるバンチ圧縮器を利用することで、バンチ長1 ps以下に圧縮された低エミッタンス短バンチ電子ビームを生成し、2006年6月に真空紫外領域(波長49 nm)でレーザー発振に成功した。

原理的にSASE-FELでは、アンジュレータ内を進行する電子ビームと自発放射光の電磁場を相互作用させることで光を増幅する。しかし、電子バンチ内で独立した増幅過程が多数発生する為、電子分布の統計性によりそれぞれの光のスペクトルや強度が異なってしまう。よってSASE光のスペクトルや時間波形は多数のスパイクから成る形状を持ち、利用研究に用いる際に問題となる可能性がある。シード型FELでは、アンジュレータで発生する自発放射光の代わりにコヒーレントなシード光を注入し増幅することで、電子バンチ全体のレーザー発振を制御することができ、その結果強度が安定な狭帯域で尖頭輝度の高いレーザー光を得ることができる。

SCSS試験加速器では、SASEによるレーザー発振成功後、フランスCEAと協力して試験加速器を用いた短波長シード型FELの研究開発を行っている。シード光には、高出力フェムト秒チタンサファイアレーザー(波長800 nm)とキセノンガスの相互作用で発生する高次高調波を用いた。これまでの研究成果として、シード型FELでは世界最短波長である160 nmでのレーザー発振に成功し、シングルパス・シード型

[1] E-mail: tanikawa@spring8.or.jp
[2] E-mail: toru@spring8.or.jp

FELの実証を行った。

２．レーザーシステム、高次高調波発生装置の機器配置及び光学系配置

レーザーシステムの概要を図1に示す。CWのポン

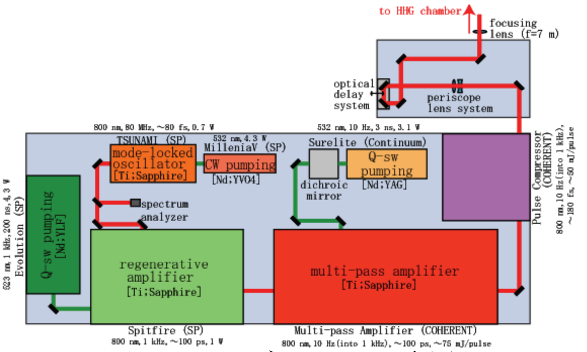

図1：レーザーシステム概略図

ンプレーザーで励起した外部同期モードロックレーザー共振器から、波長800 nm、繰り返し79 MHz、パルス幅80 fs、出力10 nJ/pulseのフェムト秒パルストレインが射出される。CPA(Chirped-Pulse Amplification)法を用いて増幅を行う為、再生増幅器内でパルス伸長を行った後、入射された光を繰り返し1 kHzで、出力1 mJ/pulseまで増幅する。その後マルチパスアンプによって1 kHzのパルストレインのうち10 Hz分を増幅し、パルス圧縮器によってパルス圧縮を行うことでパルスあたり130 fs以下、最大50 mJ/pulseの光を発生させることができる。マルチパスアンプの下流には、テレスコープと集光レンズ(f=7 m)を設置し、キセノンガスセルが置かれた高調波発生装置まで光を輸送する。また、電子ビームとレーザーパルスのタイミング調整の為のディレイライン用光学系も設置した。

加速器トンネル内に設置された高調波発生装置と光学系の配置を図2に示す。SCSS試験加速器では、２台のアンジュレータを用いてFEL光を発生させる。シード光は、アンジュレータ手前に設置された電子ビームのシケインを利用し、４台目の偏向電磁石から電子ビーム軌道上へ入射する。レンズでキセノンガスセル中に集光したレーザー光から発生した高次高調波は、上流アンジュレータ内で集光点をもつように調整した2枚の凹面鏡(SiC)と、2枚の誘電体多層膜平面ミラー(波長160 nm用)で反射され電子ビーム軌道へ入射される。ガスセルと凹面鏡が設置された真空槽の間には差動排気部を設け、加速器真空（~10^{-6} pa）と接続している。

３．シード光と電子ビームの重ね合わせ

電子バンチ長1 psのうちでレーザー発振が起きる数100 fs程度の部分とシード光パルスを、時間的に重ね合わせるには高精度の時間同期が必要となる。まず、レーザー共振器のモードロック基準信号である79 MHzには、電子バンチと同期した加速器RFの238 MHzを1/3分周して用いる。分周した79 MHzから更に1 kHzと10 Hzに分周したものを、各々再生増幅器とマルチパスアンプのトリガーとして入力した。蓄積リングのように電子バンチのタイミングが等間隔であれば上記のシステムで問題ないが、試験加速器ではLINACの安定化のため、電子バンチを関西電力の60 Hzに同期させて運転を行っている。このため電子バンチの間隔は、μsオーダーで変化する。この変化にレーザーを追従させるため、電子銃からのバンチ射出タイミング信号を分周器カウンターのリセット信号として入力し、関西電力の周波数変化に合わせてレーザーを同期させるシステムを構築した。加速器を含めたこの辺りのタイミングシステムは、シード型FELだけでなく、将来FELとレーザーを用いたポンププローブ実験などを見据えて検討の余地があると思われる。レーザー共振器用の79 MHzは時間ジッターの少ない遅延器（浜フォト，C1097）、psオーダーのジッターが問題とならない1 kHzと10 Hzの信号についてはDG535(Stanford Research)を用いて、信号の遅延を粗く調整できるようにしている。

マルチパスアンプ後の800 nmレーザーパルスとRF信号（5712 MHz）間の時間ジッターを、時間応答の早い光検出器で計測したところ、1σで約1.8 psであった。この値は検出器の立ち上がりジッターで決まる測定限界に近く、レーザーの時間同期システムがほぼ期待した精度で動作していることが確認できた。

実験時の電子バンチとレーザーパルスの時間的な重ね合わせは、シケインセクション直後に設置したバンチ長測定用OTR(Optical Transition Radiation)スクリーンを用いて確認した。電子バンチから発生するOTR光と、800 nmレーザー光を加速器収納部外へ取り出し、ストリークカメラ上で２つのパルスが重なるようにレーザーのタイミングを調整する。しかし、

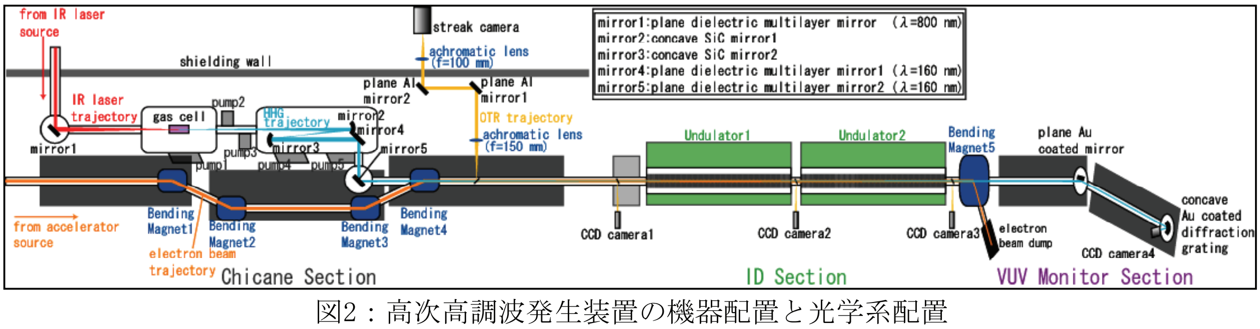

図2：高次高調波発生装置の機器配置と光学系配置

ストリークカメラのOTR光に対する時間分解能が1 ps程度である為、最終的な微調整はFEL光の強度を見ながら光ディレイライン(時間分解能10 fs)を用いて調整した。

電子ビームとシード光の空間的な重ね合わせについては、上流側アンジュレータの出入口にあるOTRスクリーン上で、800 nmレーザー光と電子ビーム位置が重なるようレーザーの光軸を合わせた。

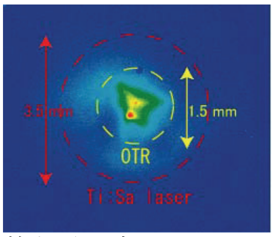

図３：空間的な重ね合わせ、スクリーン上のレーザースポットは800 nmのスポットで、高次高調波のスポットサイズはこれよりも小さい

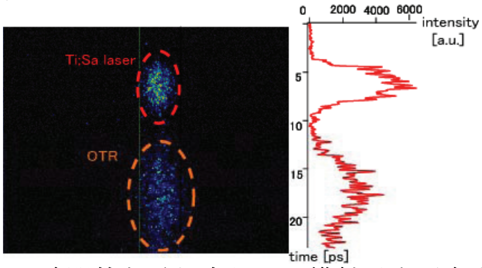

図４：時間的な重ね合わせ、横軸が水平方向の空間分布、縦軸が時間

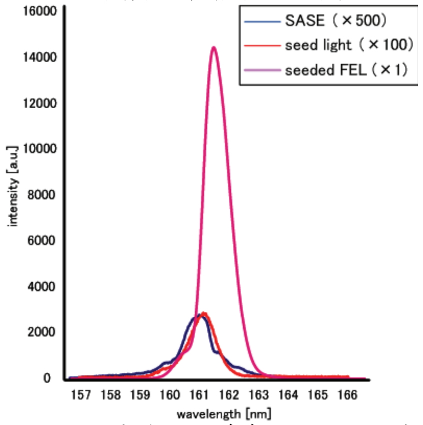

図５：シード光注入の有無によるFEL光強度の比較

４．実験結果

実験時の電子ビームエネルギーは147 MeV、アンジュレータは上流の1台のみを用い、K値は1.24に設定した。高出力フェムト秒レーザーは、光学系の損傷を考慮して出力を20 mJ/pulse程度に下げてガス高調波発生に用いた。

図３はビームプロファイルモニターで観測したフェムト秒レーザーと電子ビームの空間的な重ね合わせ、図４はストリークカメラで測定した時間的な重ね合わせ(写真は電子ビームとフェムト秒レーザーのタイミングをずらしており、測定されたパルス幅は集光レンズにより伸びている）である。

図５は、SASEを含んだ自発放射光、シード光、およびFEL増幅後のシード光のスペクトル強度を比較したものである。実験時には、加速器パラメータを最適化する時間的余裕がなく、電子ビーム輝度が通常運転時よりも下がっていたため、アンジュレータ1台からのSASE強度は非常に弱い。しかしながらこのような状態においてもシード光の注入により、増幅の立ち上がりが早めてやると、明瞭なFEL増幅が観測でき入射したシード光に対する増幅のゲインは約500であった。スペクトル幅も若干狭くなっている。アンジュレータ1台では飽和までは達していないが、自発放射光強度をもとにFEL増幅されたシード光のエネルギーを見積もると、0.1 μJのオーダーであると思われる。またFEL光の高次高調波についても、波長160 nmに対して3次（53 nm）と5次（32 nm）において観測された。

５．まとめと今後

高出力フェムト秒レーザー(波長800 nm)とキセノンガスとの相互作用で発生する短波長高次高調波(波長160 nm)シード光を、アンジュレータ内部で電子ビームと重ね合わせることで、シード光を増幅させることに成功し、ガス高次高調波を用いたシード型FELの実証を行った。また同時に、現状のシステムにいくつかの問題点があることがわかった。

まず、シード光のポインティング・スタビリティーである。ビームプロファイルモニター上で、1~2 mm程度の空間的なシード光のふらつきが見られる。主な原因は高調波発生装置に付随しているスクロールポンプの振動であり、チャンバーを介してミラーが振動している。また時間的にも、レーザー共振器のモードロック用フィードバックに使用しているフォトダイオードに問題があり、数分から数時間のゆっくりとした位相ドリフトが見られる。

FEL光の発振波長はシード光波長と必ずしも一致せず、ずれる場合がある。これは電子ビームエネルギーのふらつきなのか、FELゲインの波長依存性なのか今のところ実験的にはっきりしていない。

今回の実験で、シード光の安定性に問題があることがわかったため、今後レーザーシステムの安定化を行い、5次高調波（160 nm）を用いた実験を進める。その後ビームエネルギーを250 MeVまで上げ、13または15次高調波（波長62または53 nm）をシード光とした、真空紫外域での短波長シード型FELの実現を目指す。同時にシード型FELについてシミュレーションコードの開発を行い、今後の実験の評価を行っていく指針としたい。

参考文献

[1] Guillaume Lambert, et al, “First Lasing in Seeding Configuration at 160 nm Using High order Harmonic Generated in gas on the FEL of the SCSS Prototype Accelerator”, to be presented at international FEL conference 2007.