



EUV SASE-FEL 利用の概要とビームラインの現状

永園充¹, 工藤統吾^{1,2}, 富樫格^{1,2}, 玉作賢治¹, 広野等子^{1,2},
登野健介¹, 矢橋牧名¹, 木村洋昭^{1,2}, 仙波泰徳², 大橋治彦^{1,2}

¹理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

²財団法人高輝度光科学研究センター

〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

要旨 SCSS 試験加速器が発生する極紫外 (EUV) 領域の自己増幅自発放射型の自由電子レーザー (SASE-FEL) のビームラインの現状と利用の概要について報告する。EUV SASE-FEL の利用は、2008年度から公募によって行われている。ビームラインの主要機器として、アッテネーター、パルスセクター、集光システム、ガスモニター、FEL 同期フェムト秒レーザーについて紹介する。また、レーザーと FEL のタイミングを測定する EO サンプリング研究の成果についても紹介する。

1. はじめに

SCSS 試験加速器は、2005年に、我が国独自の方式でのコンパクトな X線自由電子レーザー (XFEL) 建設の実現可能性評価を目的として建設された。2006年にその目的が達成され、Å 領域の XFEL 実機建設計画がスタートした後には、XFEL 加速器 (実機) の R&D に利用されてきた。2007年には、極紫外 (EUV) 領域において、自己増幅自発放射型 (Self-amplified spontaneous emission; SASE) の自由電子レーザー (FEL) の出力飽和を達成した。

SCSS が発生する光 (波長51~61 nm) は、超高輝度 (シンクロトロン放射光の10億倍)、超短パルス (フェムト秒領域)、高空間コヒーレンスという3つの大きな特徴がある¹⁾。これらは、波長は異なるが XFEL の特徴と共通するものであり、XFEL 実機のビームライン機器や実験装置の試験開発のために SCSS の利用価値は極めて高い。また、これまでにない特徴をもつ EUV 領域のレーザー光を利用した新しいサイエンスの開拓への期待も高まっている。このため我々は、SCSS 試験加速器を EUV-FEL 利用の光源とするために、加速器トンネルとは独立した「EUV レーザー実験棟」を建設し、EUV-FEL ビームラインの開発・整備を進めてきた。

EUV-FEL の利用は、レーザー出力飽和達成直後の2007年10月から2008年3月までに文科省 XFEL 利用推進研究課題の山内教授 (東大) らと上田教授 (東北大) らの2グループの協力を得て試験的に開始され、初の利用成果も得られた²⁾。この成功を受けて2008年度から公募による利用を開始した。公募は年3回のペースで行われ、利用推進研究課題のグループに加えて、一般からの応募も受け

付けている。これまでの2年半 (2008年A期から2010年B期) で実施課題数は延べ81件あり、国内グループだけでなく、フランス、ドイツ、イタリア、チェコ、オランダなど国外研究グループからの申請も含まれている。SCSS の EUV-FEL を利用した研究者はすでに100名を超えている。研究分野は、XFEL 利用基盤技術開発、原子分子科学、超高速分光、光物性、材料科学、プラズマ科学、コヒーレント散乱イメージング、半導体プロセスなど多岐にわたる。これら研究成果の一部は、すでに論文発表され、本特集号でも報告している。

本稿では、EUV-FEL 利用の概要とビームラインの現状に関して報告する。第2章では EUV-FEL の光特性についてまとめる。第3章でビームライン構成を述べた後、主な共用基盤機器の詳細について紹介する。第4章では FEL 同期フェムト秒レーザーシステムについて述べる。第5章では EO サンプリング法によるタイミング計測実験について報告する。第6章では利用の概要について述べる。

XFEL 実機のビームラインに関しては、本特集号の範囲を超えるために本稿では紹介しない。ご興味のある方は、本誌の「SPring-8 における XFEL/EUV-FEL ビームライン」³⁾および「XFEL/SPring-8 Beamline Technical Design Report」⁴⁾を参照していただきたい。

2. EUV-FEL の光特性

SCSS 試験加速器は、電子ビームエネルギー250 MeV (XFEL 実機の1/32) の線形加速器と周期長15 mm の短周期真空封止アンジュレーターを組み合わせて構成されており、SASE の原理に基づいた、最短波長が51 nm の極紫

外領域の自由電子レーザー光を生成する。自発放射を源とする SASE 型 FEL は、光強度、時間構造、スペクトル構造がパルス毎に異なる。光特性を **Table 1** に示す。中心波長 60 nm のスペクトルを **Fig. 1** に示す。青線はシングルショット、赤線は 50 ショットの平均スペクトルである。SASE-FEL は、設定波長を中心に異なったスペクトラムの光を発振し、スペクトル幅の平均は、約 1% (FWHM)

Table 1 Performance of EUV SASE-FEL from the SCSS test accelerator

Radiation wavelength at saturation condition	51~61 nm
Photon energy at saturation condition	20~24 eV
Spectral width (FWHM)	1%
Pulse energy average at ID exit	~30 μ J/pls
Photons per pulse	3×10^{12} phs/pls
Intensity fluctuation	< 10%
Pulse duration (FWHM)	~100 fs
Polarization	Horizontally linear
Repetition rate	20 Hz (Design max: 60 Hz)
Power ratio of 2nd-order harmonics to the fundamental	0.1%
Power ratio of 3rd-order harmonics to the fundamental	1%

である。

3. ビームラインの概要

EUV-FEL ビームラインの概略図を **Fig. 2** に示す。EUV 領域の光はすべての物質で強く吸収されるため、ビームラインには真空隔壁がなく、 10^{-5} Pa 以下の真空度に保たれている。加速器トンネル内のビームラインは、輸送系ビームラインと光診断システムからなる。輸送系ビームラインは、2 枚の平面ミラーにより EUV レーザー実験棟 (9 m \times 14 m) へ EUV-FEL 光を導く。上流側ミラーの光軸からの退避により、EUV-FEL 光は加速器トンネル内の光診断システムへ導かれる⁶⁾。ここで、EUV-FEL

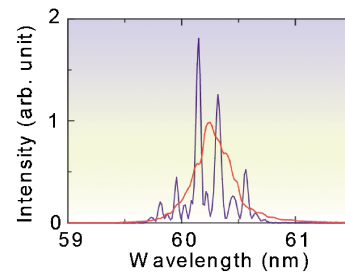


Fig. 1 Spectra of EUV-FEL. Blue and red lines show a single-shot spectrum and an average spectrum over 50 shots.

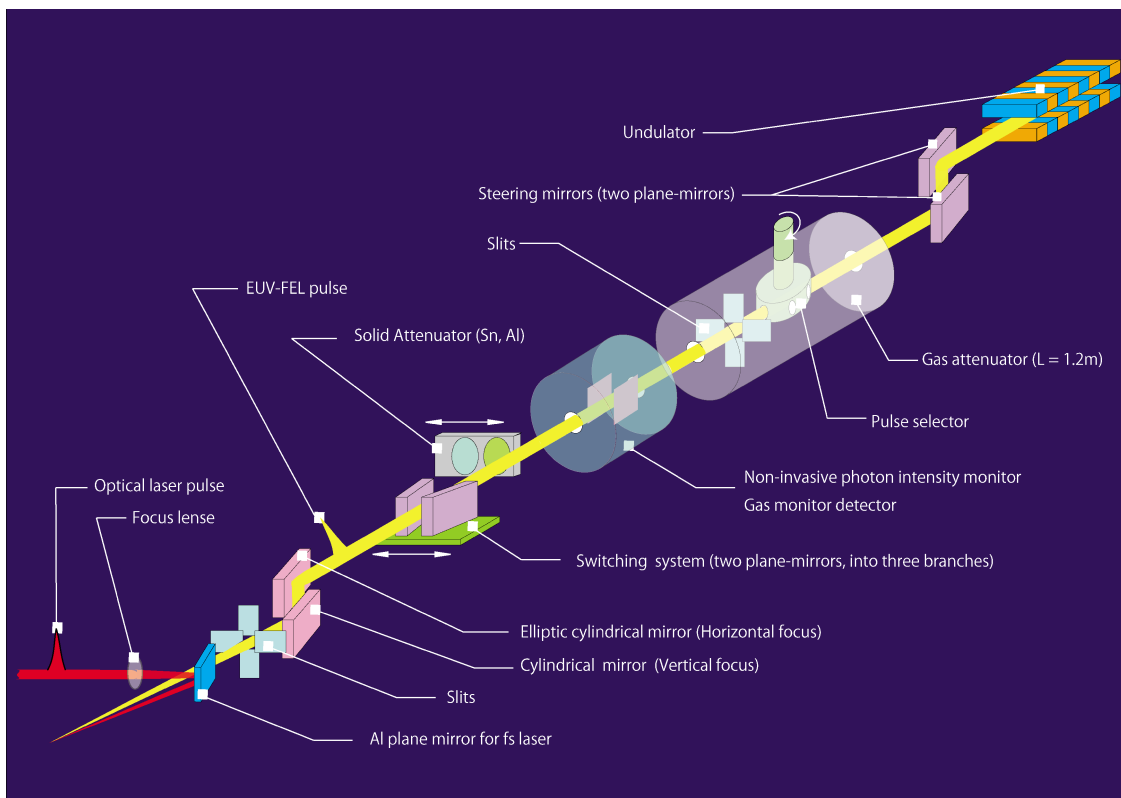


Fig. 2 Schematic layout of EUV-FEL beamline.

光のパルスエネルギーとスペクトルがそれぞれフォトダイオードと直入射分光器によって測定される。実験棟のビームライン上流端は、ID 出口の15.6 m 下流に位置する。実験棟内のビームラインには、共用基盤機器（ガスアッテネーター、パルスセクター、4象限スリット、ガスモニター、固体アッテネーター、分岐チャンバー、集光システム、光プロファイルモニター）が整備されている。ガスアッテネーターとガスモニターの上下流部に差動排気システムが配置されている。さらに、SCSS 試験加速器と同期したフェムト秒レーザーシステムが利用できる。この章では、主な共用基盤機器として、パルスセクター、アッテネーター、集光システム、ガスモニターの詳細について報告する。

3.1 アッテネーター

光強度を減衰させるために、ガスと固体の2種類のアッテネーターがビームラインに配置されている。とくに、光と物質の相互作用を観測する実験において、光強度を広範囲に制御することは非常に重要である。ガスアッテネーターは、長さ1.2 mのガスセルに Ar ガスを導入し、圧力を変えることにより EUV-FEL の基本波の透過率を100%~1%程度まで制御できる (Fig. 3)⁶⁾。Ar ガス圧は、ガス導入バルブの開閉制御で行っている。ガス圧力（濃度）が高くなると、EUV-FEL 基本波の透過率が小さくなる。透過率が1%より小さい領域では、透過 FEL 光の主成分は3次高調波となる。これは、基本波の光エネルギーが Ar のイオン化ポテンシャル付近にあり、高調波成分に比べて光吸収断面積が非常に大きいことに起因している。したがって、ガスアッテネーターは、高調波成分を通すハイパスフィルターとしても機能する。

一方、EUV-FEL のコヒーレンス性を活かすイメージング実験では、高感度 CCD 検出器を用いている。このような実験では、固体アッテネーターを用いて高調波成分も

含んで透過率を1%以下に抑えることができる。現在、Sn ($t=400$ nm) と Al ($t=500$ nm) がビームラインで利用可能である。

3.2 パルスセクター

FEL の利用実験において、等間隔のパルス列から任意のパルスを選択して実験装置に導くことがしばしば必要とされる。例えば、読み出しの遅い市販の2次元検出器を用いた場合、単一パルスだけを選択して試料に照射したいというケースがある。このための装置として、任意の光パルスを選択するパルスセクターを開発した⁷⁾。パルスセクターは、ビームサイズよりやや大きい開口 ($\phi 13$ mm) を有するジュラルミン製 (1 mm 厚) の円筒が回転することでパルスを選択するものである (Fig. 4)。開口は円筒の周囲に45°間隔に均等に配置され、22.5°の回転毎に開閉状態がスイッチする。開閉の状態はセンサーによりモニターする。Fig. 5 は本装置による (a) シングルパルスセレクト、(b) ダブルパルスセレクト、(c) パルスの間引き (分周) の例である。加速器のタイミング信号から15 ms 後にセンサーが開状態を検知するとともに光パルスをセレクトしていることがわかる。ここでは光源の運転が20 Hz の場合を示したが、本装置は SCSS 試験加速器の最高繰り返しレートである60 Hz まで追従し、任意の時間構造のパルス列を作り出すことができる。

本パルスセクターはユーザー装置からのトリガーを駆動開始信号として与えることもできる。これによりたとえば CCD カメラの露光タイミングに合わせて光パルスを切りだして試料に導くことができる。また反対に、パルスセクターの開閉センサーの信号を利用すれば、ユーザー装置の制御系やデータ収集系を、切り出した光パルスに同期させることも可能である。本パルスセクターは PC からのコマンドによる制御が可能である。

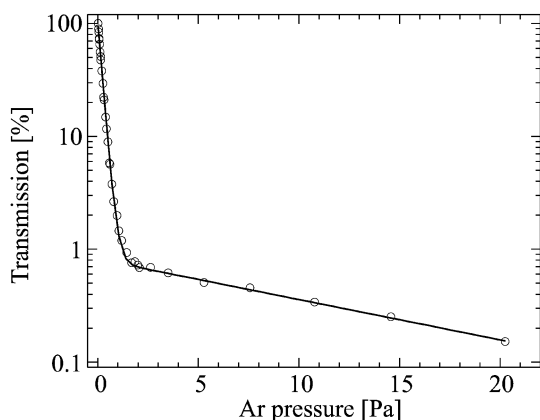


Fig. 3 Transmission of the EUV-FEL as a function of gas pressure of Ar at a wavelength of 61 nm. Open circles denote measured data. The solid curve indicates the best-fitting curve based on double exponential function.

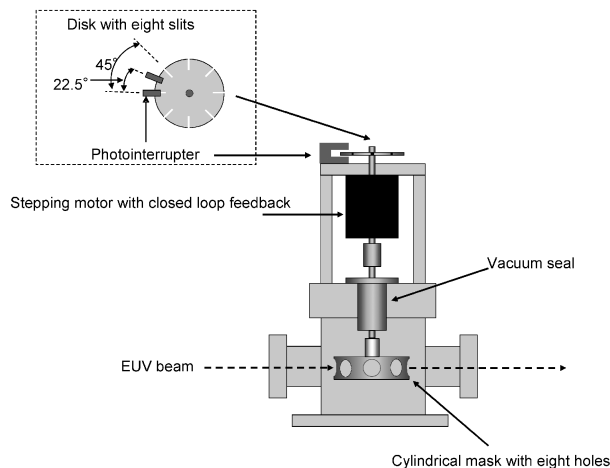


Fig. 4 Pulse selector.

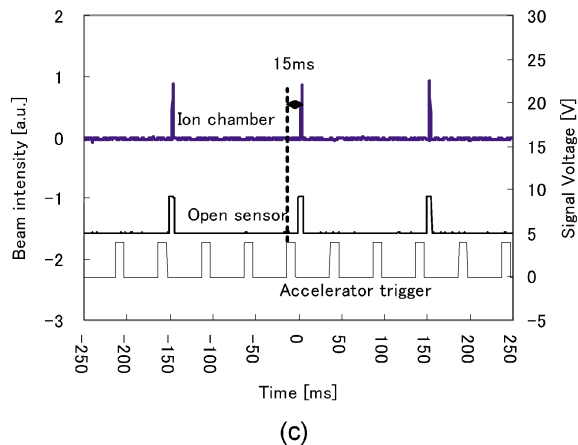
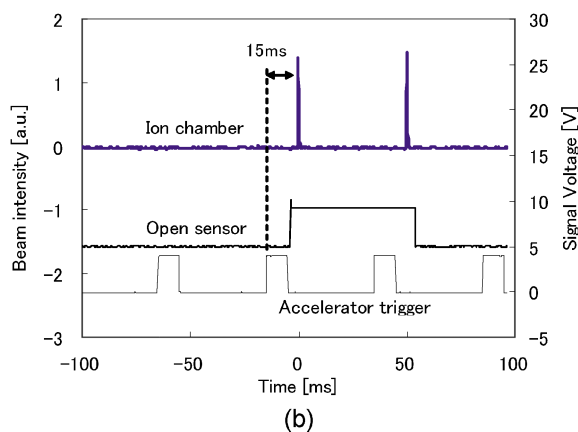
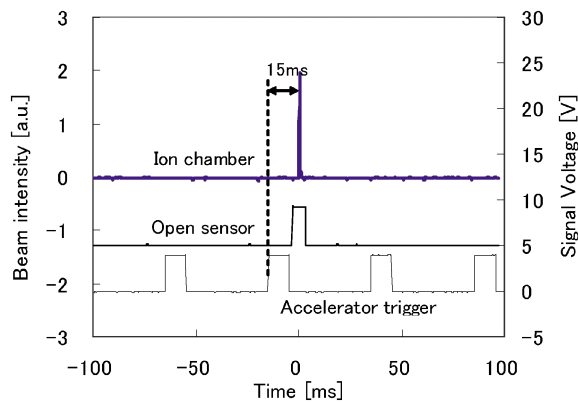


Fig. 5 Output signals of the ion chamber, the open sensor, and the accelerator trigger measured with an oscilloscope. (a) Single-pulse extraction; (b) double-pulse selection; (c) frequency division one-third.

3.3 集光システム

EUV-FELを集光することにより、非常に強い光電場の生成が可能となり、これまでになかった非線形光学現象や光誘起反応が期待される。多様な実験に対応するために、焦点距離の長い汎用的な集光システムの整備を行った。光学素子中心から試料までの距離を1mとし、水平面内で出射することを設計要件とした。EUV-FEL光は、2枚のミ

Table 2 Parameters of focusing mirrors

	Horizontally focusing mirror	Vertically focusing mirror
Deflection	Horizontal	Horizontal
Surface shape	Elliptic cylinder	Cylinder
Coating	SiC	SiC
Deflected angle	171 deg	170 deg
Object distance	23.434 m	23.546 m
Image distance	1.112 m	1 m

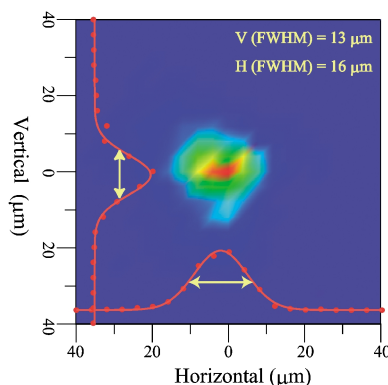


Fig. 6 The focused beam profile measured by scanning a 10- μm nickel pin hole placed in front of a gold plate. Actual vertical and horizontal sizes at the focal point were 8 μm and 12 μm , respectively, which were obtained by deconvolution of the measured sizes by the pinhole size.

ラー (**Table 2**) によりそれぞれ水平及び垂直方向に集光される。集光ミラーの下流部は、可動式アパーチャによる差圧排気チャンバーを設け、散乱光除去用4象限スリット、同期フェムト秒レーザー導入用ミラー、ビームモニター、同期フェムト秒レーザーとFELのタイミング計測用高速フォトダイオードが装備されている。

ピンホール走査 ($\phi 10 \mu\text{m}$) により集光プロファイルの評価を行った結果を **Fig. 6** に示す。集光サイズ (FWHM) は縦 8 μm 、横 12 μm であった。ここで、集光サイズは、測定値 (FWHM) 縦 13 μm 、横 16 μm からピンホールサイズをデコンボリューションすることにより得た。集光システムの透過率は56%であった。パルスエネルギー10 μJ のEUV-FEL光を集光した時、そのピーク強度は100 TW/cm²を超える。さらに、集光点にSi基板を置いてEUV-FELを照射するとアブレーションが生じた。オフラインで走査型プローブ顕微鏡を用いて表面形状を計測した。パルスエネルギー0.9 μJ の条件で、10×12 μm の領域に深さ90 nmのアブレーション痕が計測され、さらにその周辺部にデブリが観測された (**Fig. 7**)。

3.4 ガスモニターシステム

第2章で述べたように、SASE方式で発生するEUV-FEL光は、ショット毎にパルスエネルギー、時間構造、スペクトル構造が異なる。これら光特性をショット毎に計

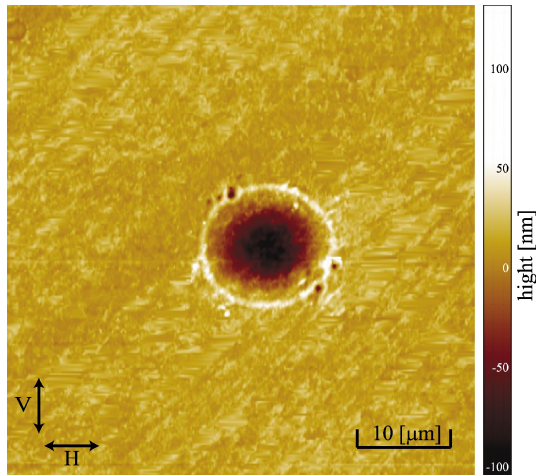


Fig. 7 Profile of a crater in silicon surface ablated by a single-shot focused EUV-FEL with a 0.9 μJ pulse energy using scanning probe microscopy. The crater shape was a cone with 10 μm (V) by 12 μm (H) and the maximum depth of 90 nm.

測することは重要である。パルスエネルギーは10%程度の変動幅があり、強度に敏感な実験(非線形光学現象など)では、ショット毎のデータが必須である。このために、我々は非破壊でパルスエネルギーが測定できるガスモニターシステムを開発した (Fig. 8)。

ガスモニターの原理は、EUV-FEL光のパルスエネルギーを光イオン量で計測する。ガスモニターシステムは、真空槽内にArガスを 10^{-2} Pa導入し、FEL照射によって生じた光イオンを電極で捕集、検出信号をプリアンプで増幅、A/Dコンバータを経てデータ収集系に送り、ショット毎に記録する。ここで、Arガスによる光吸収は1%程度であり、ほとんどの光はビームライン下流側に供給される。システムで記録された値からパルスエネルギーへの校正は、産総研・放射線標準研究室のカロリメータ、ドイツのPTB/DESYのガスモニターを用いて行われた⁶⁾。

4. FEL 同期フェムト秒レーザーシステム

EUV-FELの短パルス性を生かした利用実験として、フェムト秒レーザーパルスと組み合わせたポンプ・プローブ法による時間分解計測が期待されている。ポンプ・プローブ法は、強力なポンプ光により変化(励起)した状態を、プローブ光の遅延時間を変化させて観測することで、光励起過程におけるダイナミクスを計測する方法であり、レーザーパルスをポンプ光、FELからのEUV光をプローブ光とし、光電子分光法や、吸収分光法などで、光励起状態の電子、原子、構造の情報を得ることができる。

フェムト秒レーザーパルス列を発生するモード同期オシレータは、共振器長Lに対して($t=2L/c$ (c:光速))となるパルス間隔を持つため、同期信号に対し共振器長をフィードバック制御することで、同期したレーザーパルス列が得られる。同期信号には、加速器の238 MHz基準RF信号を3分周した79.3 MHz信号を用いている。レーザーパルス列から、電子バンチのタイミングに同期した1 kHz

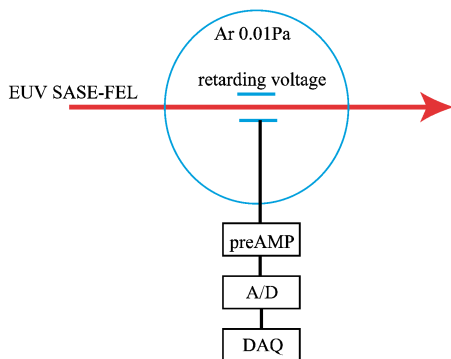


Fig. 8 Gas monitor system.

Table 3 Specification of the fs laser synchronized with the SCSS test accelerator

	Wave length	Ave. Power	Rep. Rate	Pulse duration	Energy
Oscillator	800 nm	0.7 W	79.3 MHz	50 fs	8.9 nJ
CPA	800 nm	3 W	1 kHz	30 fs	3 mJ
OPA	Idler: 2.5-1.1 μm Signal: 1.1-0.79 μm SHI: 810-570 nm SHS: 602-532 nm SFI: 602-532 nm SFS: 531-471 nm FHI: 495-395 nm FHS: 395-285 nm SH-SFI: 301-266 nm SH-SFS: 263-235.5 nm	—	1 kHz	—	50-150 μJ 50-200 μJ 1-30 μJ 10-70 μJ 25-48 μJ 27-108 μJ 1.5-2.5 μJ 0.1-8.5 μJ 2.3-8.4 μJ 4.9-8.6 μJ

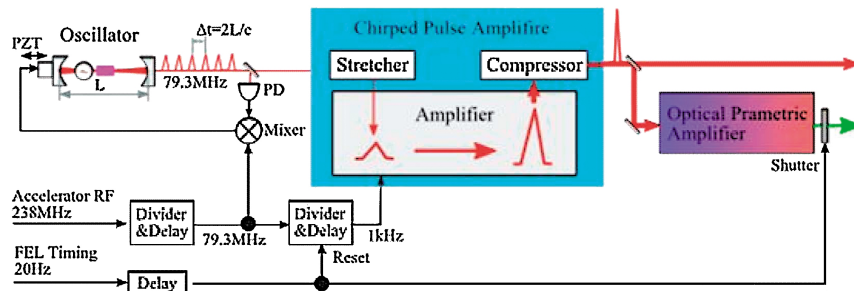


Fig. 9 System of the fs laser synchronized with the SCSS test accelerator.

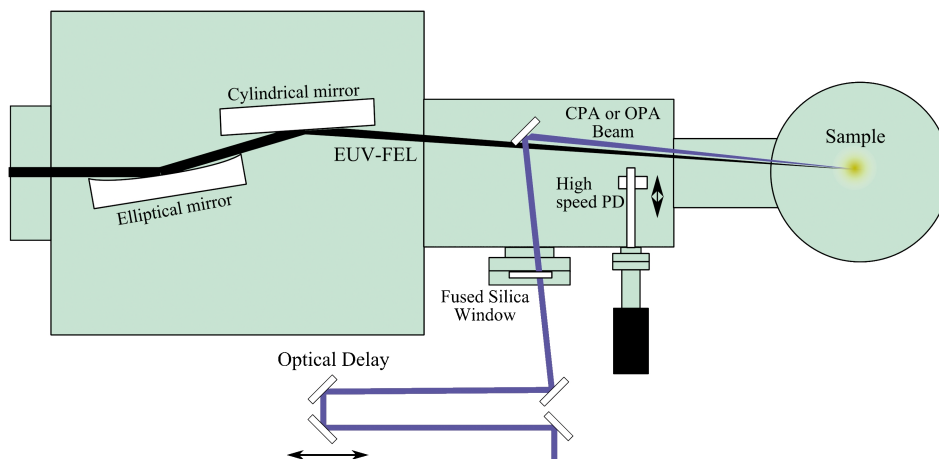


Fig. 10 Schematic layout of the pump-probe experiment combining fs-laser and EUV-FEL.

のタイミングで1パルスを切り出し、チャープパルス増幅器（Chirped pulse amplifier: CPA）で3 mJ程度まで増幅する。モード同期オシレータ及びCPAシステムは、Ti : sapphire レーザーを用いており、発生するレーザーパルスの波長は800 nmである。CPA出力を50%ビームスプリッターで2分割し、一方をFEL同期実験用に、もう一方を光パラメトリック増幅器（Optical parametric amplifier: OPA）の励起光として用いる。OPAは、光パラメトリック効果により、励起光の波長より長い波長の光を発生し、連続的に波長を走査することができる。発生したOPAパルスの2倍波及び励起光との和周波などにより、赤外～紫外光の波長可変パルス光を発生する。OPAの出力は1 kHzであるため、FELのタイミングで動作するシャッターを用いて切り出している。使用可能な波長及び出力を Table 3 に、システム全体図を Fig. 9 に示す。

これら CPA ビーム及び OPA ビームは、それぞれ光学遅延器を経て実験装置に導きかれ、FEL ミラーチャンパー内に設けたレーザー用ミラーを用いて、FEL ビームに対し約 2° の角度で照射される (Fig. 10)。レーザーパルスと FEL パルスの照射タイミングは、レーザー用ミラーの下流に設置した高速フォトダイオードを用いて、～10 ps の精度で測定可能である。タイミング調整には、電気

的な位相遅延器と光学遅延器を用いており、それぞれ 1 ps, 7 fs の精度で調整できる。

5. EO サンプリング法によるタイミング決定

同期レーザーを使ったポンプ・プローブ測定は、EUV-FEL の可能性を大きく広げる。しかし、現存の技術による同期精度は数百フェムト秒程度に限界がある。この限界を回避するために考えられた方法が、“ポストプロセス”である。つまり、測定とは別にショット毎のタイミングを決定しておくことで時間精度を向上させる訳である。

ポストプロセスの具体的な方法は幾つか考えられるが、我々は EO (electro-optical) サンプリングとして知られるもの^{8,9)}を用いた。ここでは FEL パルスではなく、その元となる電子ビームと同期レーザーパルスのタイミングを決定する。EO 効果とは、電場がかかると屈折率が変化する非線形光学現象である。今の場合、電子ビームは相対論的なので、Lorentz 変換により電場は進行方向に垂直な面内に集中する。従って、電子ビームの近傍に EO 効果のある結晶を置くと、電子ビームが通った瞬間だけ屈折率が変化する。これを同期レーザーにより検知すれば、電子ビームとの相対的なタイミングを知ることが出来る。なお、結晶

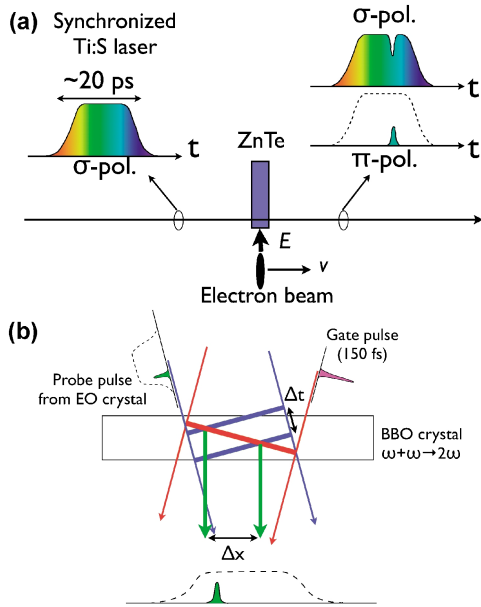


Fig. 11 Principle of the timing measurement. (a) EO sampling. The electric field induces birefringence, changing the polarization of laser pulse from linear to elliptical. (b) The cross-correlator converts the time structure into the spatial one to be measured by the ICCD.

の応答速度は十分速い。

さて、EO 効果により同期レーザーパルスに電子ビームのタイミングを刻印し、それを読み出す方法にも幾つか種類がある^{8,9)}。我々は得られる情報量が最も多い方法—temporal decoding 法¹⁰⁾—を利用した。Fig. 11(a)のようにチャープさせてパルス幅を引き延ばしたレーザーパルス内に、EO 効果で電子ビームの位置(タイミングに相当する)と形状を刻印する。その後、レーザーパルス内に刻まれた情報をシングルショットクロスコレレータで読み出す(Fig. 11(b))。クロスコレレータにより時間情報を空間情報に変換することが出来る。

我々は Fig. 11 の光学系を試験加速器のトンネル内に構築し、タイミングの測定を行った。ただし、この時使用したのは、前章の EUV レーザー実験棟内のレーザーとは違うシーディング用のシステムである。また、EO 結晶には ZnTe を、クロスコレレータには BBO を、BBO からの高調波の観測にはイメージインテンシファイア付きの CCD (ICCD) カメラを利用した。その結果、Fig. 12(a) 下のようなクロスコレレータからの出力画像を得た。筋状の部分は偏光子で消しきれなかったプローブ光で、これが時間窓に相当する。中央付近に強度の強い、電子ビームによる信号が見られる。この画像を縦方向に積分したものが、Fig. 12(a) 上のグラフである。ピークの場合が電子ビームに対する同期レーザーのタイミングを与える。また、ピークの形状が電子ビームの形状に対応すると考えられる。残念ながら、時間分解能が不十分なため FEL 発振に関する鋭いピークは見られていない。

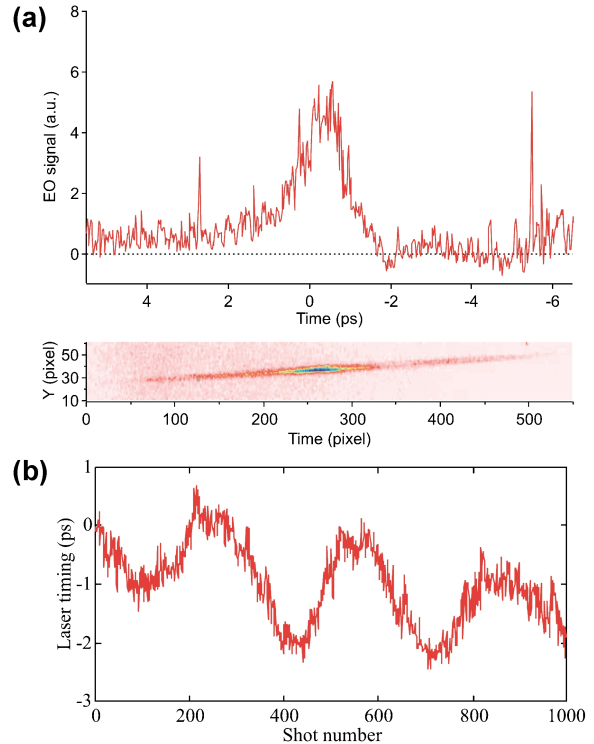


Fig. 12 Timing determination. (a) The typical single-shot image measured by ICCD (the lower panel). The upper panel shows the integrated intensity of the image in the vertical direction, which corresponds to the electron beam distribution. (b) The relative timing between the synchronized laser and the electron beam.

Fig. 12(a) のような画像をショット毎に測定し、タイミングデータに換算した結果を Fig. 12(b) に示す。ここでは 10 Hz の運転に追従して、1000 ショットのタイミングを測定することに成功した。このタイミングデータを利用することにより、フェムト秒の時間分解能が達成可能に分かる。また、Fig. 12(b) を見ると、実験に利用した同期レーザーは 500 fs 程度のジッターを持つことが分かる。さらに 30 s で 2 ps 程度の周期的変動があり、長期的には -0.02 ps/秒程度のドリフトがある。

以上のように同期レーザーのタイミングを EO サンプリングにより測定することに成功した。しかし、装置の運用を考えたとき、その使いやすさや安定性に問題があることが判明したため、現在はより安定な装置に向けた研究開発を続けている。

6. 利用の概要

EUV-FEL 利用の最大の目的は、XFEL 実機の R&D であり、推進本部内部と文科省利用推進課題の研究グループが、XFEL 利用に関係する機器開発を積極的に行ってきた。この成果として、本稿のビームライン機器開発、EO サンプリング法、そしてコヒーレント散乱イメージング

(本特集号の西野氏らと Park 氏らの記事)などが得られた。また、超高解像度検出器や高速シンチレーター(それぞれ、福田氏ら、猿倉氏らの本特集号記事)も XFEL 利用への展開が期待できる。一方、EUV-FEL によるサイエンスの展開が期待され、公募による一般利用が行われてきた。EUV-FEL の光子エネルギーは、ヘリウム以外の全元素のイオン化領域であり、従来の光学レーザーで観測されてきた多光子吸収などの非線形光学現象の過程とはまったく異なった物理過程が生じることが予想され、新しい科学を拓く可能性は十分にある。実際、原子、分子、クラスター、そして固体の非線形光学過程が個々に観測され、従来にない現象であると報告している(それぞれ、彦坂氏ら、山内氏ら、永谷氏ら、米田氏の本特集号記事)。さらに、同期レーザーと FEL による Pump-Probe 実験による超高速な化学反応研究も行われている(小城氏らの本特集号記事)。さらに、EUV リソグラフィーの応用物理分野の研究も進められている。

多くのユーザーは、EUV-FEL 利用のために実験装置を新しく開発し、実験棟に持ち込んでビームラインに接続して実験を行っている。一方で、我々は、試料だけを持ち込んで、EUV-FEL 照射実験や EUV 発光分光が行える共用実験装置の開発も進めている。

公募は年3回(A期:4月~7月, B期:9月~12月, C期:1月~3月)のペースで行っている。ビームタイムの割り当て日数は、1課題あたり1~5日となっている。利用運転時間は、平日(月曜~金曜)の午前10時から午後7時までである。利用にご興味のある方は、利用グループ事務局までぜひご連絡いただきたい⁵⁾。

7. おわりに

EUV-FEL の利用目的は、(1) XFEL 利用のための基盤機器の R&D、(2) EUV 領域の新しいサイエンスの展開として行われてきた。利用開始から2年が経過したが、(1)は、本稿で紹介したパルスセレクター、集光の評価法、光

強度校正、同期レーザーを利用したポンプ・プローブ法など、XFEL 利用に発展できる成果が得られている。一方(2)は、本特集号で紹介されているように、原子・分子さらに固体の非線形現象や、高速発光現象の観測など、新しい分野が展開されていることがわかるであろう。

あと1年余りでスタートする XFEL 利用においては、さらに興味深く新しいサイエンスが拓けると期待できる。若手も含めて誰もが世界トップに踊り出るチャンスがここにある。

謝辞

本研究は XFEL 計画推進本部・SCSS 試験加速器運転グループのサポートを頂いている。ガスモニターは、産業技術総合研究所・放射線標準研究室(齋藤グループ)とドイツ PTB/DESY との共同研究により校正がなされた。ここに深く感謝を申し上げます。EO サンプリング法に関する研究は、文科省 X 線自由電子レーザー利用推進研究課題の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) T. Shintake et al.: Nature Photonics **2**, 555 (2008).
- 2) T. Sato et al.: Appl. Phys. Lett. **92**, 154103 (2008).
- 3) 矢橋ら: 放射光 **22**, 56 (2009).
- 4) XFEL 計画合同推進本部利用グループ, XFEL/SPring-8 Beamline Technical Design Report Ver. 1.0 (2008).
- 5) M. Yabashi et al.: Proceedings of FEL 2006, 785-792 (2007).
- 6) M. Kato et al.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **612**, 209-211 (2009); N. Saito et al.: Metrologia **47**, 21 (2010).
- 7) T. Kudo, T. Hirono, M. Nagasono and M. Yabashi: Rev. Sci. Instrum. **80**, 093301 (2009).
- 8) X. Yan et al.: Phys. Rev. Lett. **85**, 3404 (2000); I. Wilke et al.: Phys. Rev. Lett. **88**, 124801 (2002); A. L. Cavalieri et al.: Phys. Rev. Lett. **94**, 114801 (2005).
- 9) G. Berden et al.: Phys. Rev. Lett. **93**, 114802 (2004).
- 10) 利用グループ事務局 xfeluser@spring8.or.jp ; 利用グループホームページ <http://xfeluser.riken.jp/> ; 合同推進本部ホームページ <http://www.riken.jp/XFEL/jpn/index.html>.

● 著者紹介 ●

**永園 充**

理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ SCSS 試験加速器利用チーム チームリーダー
E-mail: nagasono@spring8.or.jp
専門：軟 X 線分光，分子科学，表面科学

【略歴】

1993年横浜国立大学大学院工学研究科物質工学専攻博士課程前期修了，1997年論文博士(理学・総合研究大学院大学)，1993年分子科学研究所研究技官，1999年スウェーデン・放射光施設 MAX-lab 博士研究員，2001年日本学術振興会特別研究員 (PD)，2002年京都大学大学院工学研究科助手，2004年ドイツ・ハンブルク大学実験物理学研究所上級研究員，2007年理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部利用グループ研究員を経て，2008年4月より現職。

**工藤統吾**

財高輝度光科学研究センター 制御情報部門 副主幹研究員
理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ データ処理系開発チーム 研究員
E-mail: kudo@spring8.or.jp

専門：放射光科学における基盤技術開発，エレクトロニクス，放射光ビームモニター

【略歴】

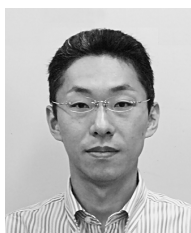
1987年筑波大学第二学群農林学類生物応用科学主専攻卒業，1989年筑波大学大学院修士課程医科学研究科医科学専攻修了(医科学修士)，2008年総合研究大学院大学論文博士(工学)，1989年住友製薬株式会社，1992年ツジ電子株式会社，1996年財団法人高輝度光科学研究センター，2007年5月より理研 X 線自由電子レーザー計画推進本部兼務。

**富樫 格**

鈷理化学研究所・財高輝度光科学研究センター X 線自由電子レーザー計画合同推進本部利用グループ 研究員
E-mail: tadashit@spring8.or.jp
専門：非線形光学，量子エレクトロニクス，光物性

【略歴】

1996年東京理科大学理学部応用物理学科卒業，1998年東京理科大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了，2001年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了，博士(工学)，同年～2004年理化学研究所基礎科学特別研究員，2004年～2008年鈷理化学研究所播磨研究所研究員，2008年より鈷理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部利用グループ，2009年より財高輝度光科学研究センター利用研究促進部門研究員，鈷理化学研究所・財高輝度光科学研究センター X 線自由電子レーザー計画合同推進本部利用グループ兼務，現在に至る。

**玉作賢治**

理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター 専任研究員
E-mail: tamazaki@spring8.or.jp

専門：X 線光学

【略歴】

1996年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。博士(工学)。1996年4月より現職。

**広野等子**

財団法人高輝度光科学研究センター 制御・情報部門 研究員
E-mail: hirono@spring8.or.jp

専門：ビームライン制御

【略歴】

2000年名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻博士課程前期課程修了，同年より現職。

● 著者紹介 ●



登野健介

理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ ビームライン建設チーム 研究員

E-mail: tono@spring8.or.jp

専門：クラスター科学

【略歴】

1997年東京大学理学部化学科卒業，2002年博士課程修了，理学博士，同年豊田理化学研究所・研究員，2003年日本学術振興会・特別研究員，2006年東京理科大学理学部・助手，2009年より現職。



矢橋牧名

理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ ビームライン建設チーム チームリーダー

E-mail: yabashi@spring8.or.jp

専門：X線光学

【略歴】

1996年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻，2003年博士（工学），1996年財団法人高輝度光科学研究センター，2007年理化学研究所研究員を経て，2008年4月より現職。



木村洋昭

財高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門 主幹研究員

理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 加速器建設グループ 建設チーム 研究員

E-mail: kimura@spring8.or.jp

専門：軟X線光学，加速器土木，加速器・ビームラインアライメント

【略歴】

1993年総合研究大学院大学数物科学研究科放射光科学専攻博士課程修了，博士（理学）。同年理化学研究所 SR 研究協力員，1995年から財高輝度光科学研究センター。2008年4月より理研 X線自由電子レーザー計画推進本部加速器建設グループ建設チームを兼務。



仙波泰徳

財高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門 研究員

E-mail: ysenba@spring8.or.jp

専門：放射光ビームライン工学

【略歴】

2001年広島大学大学院理学研究科物理科学専攻博士課程修了，博士（理学）。同年より日本学術振興会（未来開拓学術研究推進事業）研究員，2003年より現職。



大橋治彦

財高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門 光学系グループ グループリーダー

E-mail: hohashi@spring8.or.jp

専門：放射光ビームライン工学

【略歴】

1992年豊橋技術科学大学システム情報工学専攻単位修得済退学，1992年分子科学研究所，1996年総合研究大学院大学・構造分子科学専攻 博士（理学），1996年財団法人高輝度光科学研究センター，2007年8月より現職。

The present status of EUV-FEL beamline at SPring-8

Mitsuru NAGSONO¹, Togo KUDO^{1,2}, Tadashi TOGASHI^{1,2}, Kenji TAMASAKU¹,
Toko HIRONO^{1,2}, Kensuke TONO¹, Makina YABASHI¹, Hiroaki KIMURA^{1,2},
Yasunori SENBA², Haruhiko OHASHI^{1,2}

¹RIKEN, XFEL Project Head Office, Kouto 1-1-1, Sayo Hyogo 679-5148

²JASRI, Kouto 1-1-1, Sayo Hyogo 679-5198

Abstract A beamline at the SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) test accelerator is described. The SCSS provides coherent, brilliant and ultra-short pulses based on a self-amplified spontaneous emission free-electron laser (SASE-FEL) scheme at wavelength 51 to 61 nm in the extreme ultraviolet (EUV) spectral region. To utilize the characteristic features of this EUV radiation, we have constructed the EUV-FEL beamline. A laser system synchronized with the EUV-FEL pulses has been installed and operated for users. An electro-optic sampling (EOS) system to measure a time jitter between the synchronized laser and the electron bunch has been tested.
