

スクリーンモニターにおける真空内空間マスクを用いた Coherent-OTR 光除去の改良

IMPROVEMENT TO ELIMINATE COHERENT-OTR LIGHT FOR THE SCREEN MONITOR OF SACLA

松原伸一^{#,A)}, 前坂比呂和^{B)}, 井上忍^{C)}, 大竹雄次^{B)}
 Shinichi Matsubara^{#,A)}, Toru Hara^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Shinichi Matsubara^{B)}

^{A)} JASRI

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

^{C)} SPring-8 Service Co., Ltd.

Abstract

The X-ray free electron laser facility, SACLA, requires a low-emittance and high-density electron in a bunch at the entrance of an in-vacuum undulator. In order to transmit the electron beam without degradation of the beam quality, screen monitor (SCM) systems are used. At the beginning of SACLA operation, strong coherent OTR (COTR) which made an incorrect beam profile was observed in the SCMs after the third magnetic bunch compressor. For the purpose of suppressing the COTR effect on the SCM, the spatial separation method, which uses a Ce:YAG scintillation screen and a spatial mask, was employed in SACLA. Early spatial mask was set up on the outside surface of the viewing port. The SCM with the separation method has a spatial resolution of about 10 μm . However, COTR is generated at the two materials, which are the Ce:YAG crystal and a reflecting mirror, and it is scattered out in the case of the configuration. It is important to accurate measurement of the beam profile that the contrast of intensity between the scintillation light and COTR on the CCD. In this report, our improved configuration of the spatial separation is described. It is employed a perforated mirror as the spatial mask. In the vacuum chamber of the SCM, the electron beam hits and through the Ce:YAG screen, and COTR is generated then. The electron bunch and the COTR from the Ce:YAG pass through the hole of the perforated mirror without COTR generation at the mirror. The still clearer profiles were obtained with the improvement. However, the measured beam profile with the separation method is difficult by itself to make sure of the remaining COTR effects and the true beam profile. On the other hand, the temporal separation method, which uses the difference of the emission time structures between fluorescence and the COTR, has been employed in other XFLE facilities as LCLS. We measured electron beam profiles were measured using the both separation method. The measured beam profiles with the different methods were almost same.

1. はじめに

X 線自由電子レーザー施設 SACLA^[1]では、XFEL 光を生成する為に、3 kA 以上の高いピーク電流で 1 π μm rad 程度の低エミッタンスな電子ビームをアンジュレータ区間に伝送する必要がある。熱電子銃から出射された電子ビームを、ビームチョッパーによって 1 ns に切り出し、入射部における速度変調バンチングと 3 段の磁気シケイン型バンチ圧縮器によりエミッタンスの悪化を抑えながら数 10 fs まで圧縮する。

これらの目標特性を得るために、SACLA では各所にビーム診断機器を設けて、ビームモニターをしながら加速器の調整を行なっている。特に、電子ビームの横プロファイル、エミッタンスを測定するためにスクリーンモニター (SCM) ^[2,4]を用いている。この SCM では当初、LCLS など他の FEL 施設において確認・報告がされていた coherent-OTR (COTR) の問題^[3]についての対処が用意されていなかった。それは、

SACLA では COTR の問題が発生しないと考えていたからである。ところが SACLA の運転開始後、3 段のバンチ圧縮器後の SCM において、COTR が発生してビームプロファイルが測定できない問題が生じた。SACLA の既設の SCM に出来る対策として、空間遮光マスクを用いた

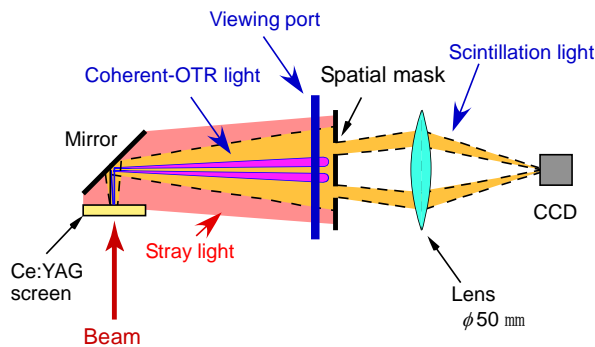


Figure 1: Configuration of the SCM to mitigate the COTR light with the early spatial mask.

[#] matsubara@spring8.or.jp

COTR 光の除去方法を考案し、昨年の加速器学会で報告を行った⁴⁾。その際の構成を Figure 1 に示す。

この構成では、ターゲットに Ce : YAG 蛍光スクリーンを用いて、光軸上に空間遮光マスクを加えた。指向性を持たない蛍光に対して、COTR は $\sim 1/\gamma$ rad の円錐状強度角度分布を持つため、光軸中心に遮光マスクを置くことで、COTR 光だけを遮光することができる。SCM 真空チャンバー内に設置された Ce:YAG スクリーンからの蛍光は、45 度に傾け設置した平面ミラーによりビーム軸から 90 度に反射されて、石英窓を通過して真空より取り出す。この取り出した蛍光を光学レンズで結像して CCD カメラで撮像することにより、ビームプロファイルを得る。この構成では、COTR 光が、蛍光スクリーンの表面と反射ミラーの表面の 2 箇所が発生していた。Figure 1 に示すように、ビーム軌道に垂直に設置した蛍光スクリーンを電子が通過する際と、それを通過した電子ビームが反射ミラーに当たった際に発光される。これらの COTR 光が石英窓を通過する際に、窓材の境界 2 面で表面反射があり、10% 程度の COTR 光が真空チャンバー内に戻り、乱反射し迷光となる。COTR 光は蛍光と比べて桁違いに光量が強く、COTR 光からこの迷光の一部が、蛍光と共に CCD カメラに入射するとプロファイルが測定できない。そのため、空間遮光マスクは光軸中心の COTR 光の除去と、外側に迷光の回り込みを遮光出来る形のものにする必要があり、ビューポートに取り付けた。これにより、COTR 光の除去を行い 10 μm の分解能を確認することができた。

しかしながら複数の SCM に適応を試みた際、COTR 光からの複雑な迷光を同一形状の遮光マスクでは十分に除去できなかった。そこで、遮光方法に改良を加え、COTR 光の迷光の発生自体も抑制するようにした。また、他の COTR 光の除去手法と比較測定を行い、この測定結果の信頼性を確かめたので、本稿において報告をする。

2. 光空間遮マスクを用いた光マスク COTR の抑制の改良

SACLA には 50 台余りの SCM が加速器に沿って設置されており、入射部に設置された 14 台以外の C-band 主加速器、アンジュレータビームラインに設置された残りの SCM で COTR によりビームプロファイルが測定できなかった。そこで、昨年報告した空間遮光マスクによる COTR 光の除去を実施した。ところが、チャンバー内で乱反射している COTR の複雑な迷光を除去するためには、1 台ずつ遮光マスクの形状の最適化が必要となった。調整には、加速器を停止し、マスクの調整を行い、加速器を立ち上げ、確認をし、再度調整と繰り返し確認をする。1 台ずつこの工程を行うのは困難なため、抜本的に遮光構成の再検討を行った。

新しい SCM の空間遮光構成を Figure 2 に示す。

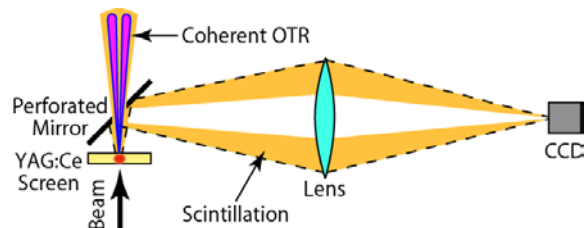


Figure 2: Configuration of the SCM to mitigate the COTR light with a perforated mirror.



Figure 3: Photo of the perforated mirror.

真空チャンバー内の反射ミラー中心に、空間マスクとなる $\Phi 3 \text{ mm}$ の穴を設けた。蛍光ターゲットからの COTR 光と、蛍光ターゲットを通過した電子ビームは、このミラーの穴を通り、下流へ通過する。この構成だと、反射ミラー表面での COTR が発生しない。また、蛍光ターゲットで発生した COTR 光は真空ダクト後方へ伝搬するため、COTR 光がビューポートへ向かうことが無く、迷光となり得ない。これにより、蛍光に対して COTR の光量を小さくすることができる。真空チャンバー内に設置した穴あきミラーを Figure 3 に示す。以上の改良により、SACLA の SCM において、ビームプロファイルの測定を行なっている。

3. 空間、時間方向の 2 つの分離方法による COTR 光除去の比較

前章に示した空間マスクの改良により、COTR の特徴であるショット毎の強度ゆらぎ、スペックルが無いビームプロファイル像が得られた。しかしながら、SCM によって得られるビームプロファイルの真偽をその撮像データだけから判断するのは困難である。そこで、LCLS などの他の研究機関で用いられている時間による COTR 光の除去方法⁵⁾と、本除去方法とで測定比較を行った。他の測定方法と比較を行うことで、我々の測定方法の信頼性を確かめた。

比較を行った時間による COTR 光の除去方法は、COTR 光と蛍光との発光時間の差を利用して、2 つの光を分離するものである。COTR 光の発光時間は、電子バンチ長と同じ数 10 fs 程度であり、Ce:YAG の蛍光寿命は約 60 ns である (Figure 4)。ナノ秒以下の精度でトリガー制御出来る高速

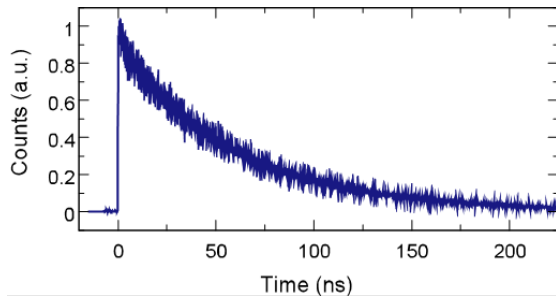


Figure 4: Fluorescence time of a Ce:YAG scintillator.

CCD カメラが必要である。本測定では、イメージインテンシファイアと CCD カメラを組み合わせた高速ゲートカメラ (C7972-01, Hamamatsu Photonics, Japan) を用いて測定を行った。このカメラの撮像シャッターのジッターは、数 10 ps である。

実験セットアップは、1 つの SCM 真空チャンバーに、穴なしの反射ミラーと穴付の反射ミラー 2 つを用意し、任意に差し替えて、空間による COTR 光の除去有り無しの条件で撮像出来るようにした。また、全ての撮像は上述の高速ゲートカメラを用いて行い、COTR 光が確実に撮像出来るトリガータイミングと、それより 5 ns 遅いトリガータイミングで撮像することで、時間領域で COTR 光の除去を行った。この測定構成により、4 つの条件のビームプロファイルを測定した。

シングルショットで測定したプロファイル画像を Figure 5 に示す。Figure 5-a は穴なしミラーを用いて、COTR 光を含む時間で測定した画像、Figure 5-b は穴なしミラーを用いて、COTR 光を含まない時間で測定した画像である。Figure 5-c は穴あきミラーを用いて、COTR 光を含む時間で測定した画像、Figure 5-d は、穴あきミラーを用いて、COTR 光を含む時間で測定した画像である。

Figure 5 の測定は全て同一の条件で行なっており、Figure 5-a の COTR 光を含む画像が飽和しないように、高速ゲートカメラ前で 1,000 分の 1 のアッテネーターを挿入している。他の画像とのコントラストの違いから、COTR 光が桁違いに強いことがわかる。また、プロファイルにスペックルによる縦縞が確認できる。Figure 5-c では、円弧形の影が現れており、穴あきミラーの穴のエッジで COTR 光の散乱があることが確認できる。COTR 光を時間的に含まない Figure 5-d ではこの影がないため COTR 光起因だと断定できる。

Figure 5 の水平軸方向の射影プロファイルサイズ (rms) を比較すると、Figure 5-a が 106 μm 、Figure 5-b が 49 μm 、Figure 5-c が 46 μm 、Figure 5-d が 51 μm であった。COTR 光を含む Figure 5-a だけが大きく異なり、その他 3 つの測定では 10% 程度の差異に収まっている。Figure 5-b、c、d でのサイズの違いは、違うショットであるための変

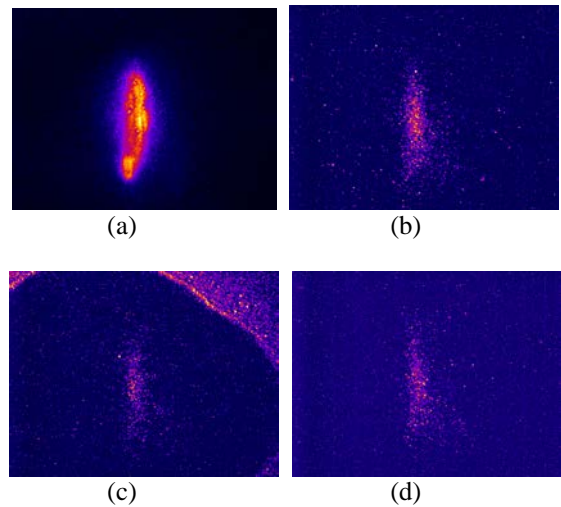


Figure 5: Beam profile images with the SCM. (a): an image including COTR light with on time trigger of electron beam and a normal mirror. (b): an image with delayed trigger timing and a normal mirror. (c): an image with on time trigger and a perforated mirror. (d): an image with delayed trigger timing and a perforated mirror.

動も含まれている。

以上の結果より、空間と時間それぞれの領域で COTR 光を分離してビームプロファイルを測定する方法で同様なビーム形状、サイズが得られることが確認できた。これにより、SACLA の SCM では、蛍光スクリーンと空間遮光マスクを用いることにより、COTR 光を除いてビームサイズ、エミッタンスの測定をすることができている。

4. まとめ

SACLA の SCM において COTR 光の問題を抑制する方法として、真空チャンバー内で穴あきミラーを用いて空間的に分離する改良を行った。これにより、SCM での COTR 光の発光低減と迷光の発生抑制を実現した。

COTR 光の分離を確かめ、測定したビームプロファイルの信頼性を確認するために、他の研究機関で採用されている時間的に COTR 光を分離する方法との比較を行った。この測定において、我々の空間的に分離する方法と時間的に分離する方法で、同様なビームプロファイルを得ることができた。また、COTR 光がビームプロファイルに現れていないことが確認できた。

我々の空間的に分離する方法は、既設の SACLA の SCM に簡易な改良を加えるだけで実現できる。設置されている OTR フォイルを、Ce:YAG スクリーンと穴あきミラーに変えるだけである。SACLA の停止期間に、随時ターゲットスクリーンの交換を行なっている。

参考文献

- [1] T. Ishikawa, et al., “A Compact X-ray Free-electron Laser Emitting in the Sub-angstrom Region”, *Nature Photonics* 6, 2012, pp. 540-544.
- [2] K. Yanagida, *et al.*, “Development of screen monitor with a spatial resolution of ten micro-meters for XFEL/SPring-8”, *Proceedings of LINAC’08 (2008)*.
- [3] H. Loos et al., “Observation of Coherent Optical Transition Radiation in the LCLS Linac”, *FEL’08, Gyeongju, August 2008, THBAU01*.
- [4] 松原伸一 他, “SACLA のビームプロファイルモニターにおける Coherent-OTR 光除去への取り組み”, *加速器学会 2012*.