

## SASE-FEL EXPERIMENT IN THE FAR-INFRARED REGION USING A STRONG FOCUSING WIGGLER

Shigeru Kashiwagi<sup>1,A)</sup>, Yukiyoshi Kon<sup>A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>, Tetsuya Igo<sup>A)</sup>, Goro Isoyama<sup>A)</sup>,  
 Shigeru Yamamoto<sup>B)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>B)</sup> and Hiroyuki Sasaki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Nihogaoka, Ibaraki, Osaka, Japan, 567-0047

<sup>B)</sup> Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

### Abstract

We have developed a new type of wiggler based on the edge-focusing wiggler for free electron laser (FEL) in the infrared region at the Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University. The strong focusing (SF) scheme is adopted for the new wiggler in order to keep the beam size small along the wiggler. The period length of the wiggler is 60 mm, the number of periods is 32, and the total length is 1.938 m, including end magnet blocks for the orbit compensation. The wiggler consists of four FODO cells for double focusing. SASE-FEL experiments are performed using the strong focusing wiggler with high current electron beam. The higher-harmonics of the SASE were observed in a spectrum measurement in far-infrared region. We present the result of the beam experiments using the strong focusing wiggler in this conference.

## 強集束ウイグラーを用いた遠赤外領域でのSASE-FEL実験

### 1. はじめに

阪大産研Lバンドライナックでは、3台のサブハーモニクバンチャー (SHB) を使い、ピーク電流が1kAを超える大強度シングルバンチ電子ビームの生成が可能である。我々は、大電荷量の単バンチ電子ビームを使い遠赤外領域でのSASE-FEL実験を行っている[1]。また、これまでにSASEやFEL実験で使用する高性能ウイグラーとして、通常の直方体の永久磁石にエッジ角を付けることで電子ビームに集束力を与える集束型ウイグラーを提案し、その開発研究を行ってきた[2,3]。昨年度、ウイグラー全体にわたり平均ビームサイズを小さく保つ事でSASEやFELのゲイン長を短くする事ができる、エッジ集束効果を利用した強集束型ウイグラーを製作した。KEKで磁場測定を行った後[4]、2005年6月末に阪大産研Lバンドライナックへ設置した。現在、この強集束型ウイグラーと大強度ビームを使い、SASEの発生とハイパワー領域での動作特性の解明を目的にビーム実験を行っている。

### 2. 強集束ウイグラー

我々がSASEおよびFEL実験用に開発した強集束ウイグラーは、ビームを集束するために直方体の永久磁石にエッジ角度をつけ、そのエッジ角度の大きさによりビームに与える集束力(発散力)を変えることができるエッジ集束タイプである。また電子ビームの蛇行軌道に対して、そのエッジ角を正負ど

ちらの向きにするかによって集束か発散を決めることができる。製作したウイグラーは、直方体の永久磁石で構成される通常のプラナーウイグラーの途中にビーム集束のためのエッジ付磁石を挿入し、ビームの集束と発散を交互に行う強集束型ウイグラーである。

強集束ウイグラーの基本パラメータは、周期長=60mm、周期数=32周期、最大ピーク磁場が約0.393T (gap=30mm)、K値=1.556、端部の軌道補正用磁石を含め全長は1.938mである。磁石配列は、

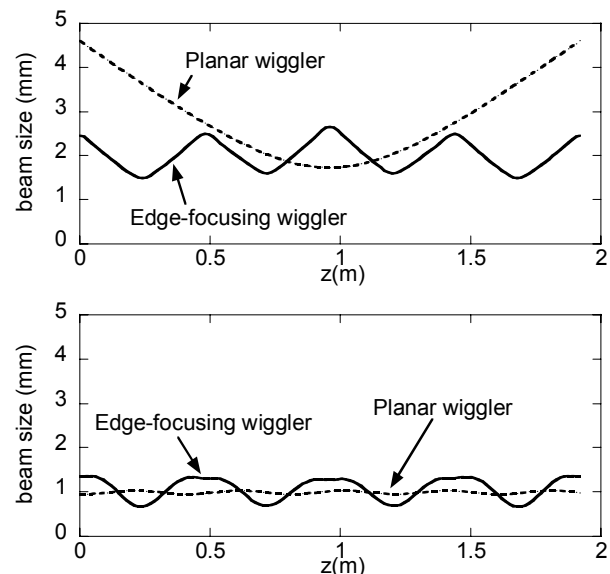


図1: ウイグラー内での水平(上) 垂直方向(下) ビームサイズ。(実線: エッジ集束型、点線: プラナーア)

<sup>1</sup> E-mail: shigeruk@sanken.osaka-u.ac.jp

エッジ角の付いた1周期分の集束用磁石ユニットの間に3周期の通常の直方体型磁石が配置され、8周期で1つの集束発散のビーム光学セル（FODOセル）、ウイグラー全体では4つのFODOセルが形成されている。ビーム集束のための磁石のエッジ角度は5度とした。ウイグラーギャップ=30mmの時に、エッジ付磁石部で水平・垂直の両方向とも最大約3.2 T/mの磁場勾配が通常のウイグラー磁場と共に作り出されていることを磁場測定により確認した。

図1にウイグラー内での水平・垂直方向のビームサイズ変化の計算例を示す。計算に用いたビームパラメータは、エネルギー10MeV、規格化エミッタンス $150\pi\text{mm mrad}$ である。図1（上）より、水平方向ビームサイズは、プラナーウイグラーに比べ強集束ウイグラーの方が十分小さいことが分かる。FEL1次元モデルよりウイグラー内での平均のビームサイズからゲイン長（ $L_g$ ）を求めると、プラナーウイグラーは0.162m、強集束ウイグラーは0.154mという計算結果が得られ、強集束ウイグラーのゲイン長の方が約5%短い。（ここで、ビーム電荷量は30nCを仮定した。）これらのゲイン長からウイグラー全体での光のゲインを見積ると強集束ウイグラーでは約 $2.6 \times 10^5$ 、この値はプラナーウイグラーの場合の約2倍である。また、Genesisコードを使いSASE出力の比較を行った。ウイグラーが短いためSASEは飽和には達しないが、強集束ウイグラーの方がプラナーウイグラーに比べ、ウイグラー出口で約5倍の大きなゲインが見込まれる。ここで、Genesisより求まる両者のゲイン差の方が平均ビームサイズから求まるゲイン差の値よりも大きいのは、Genesisではウイグラーに沿ってのビームサイズ変化を考慮に入れているため、ウイグラー入口での光の成長の差がウイグラー全体でのゲインに顕著に表れていると思われる。

### 3. 阪大産研SASE-FEL実験

#### 3.1 実験セットアップ

図2に阪大産研Lバンド電子ライナックのFEL用ビームラインのレイアウトを示す。加速管出口からウイグラーまでのビーム輸送ラインには、45度偏向電磁石2台、四極電磁石8台（トリプレット1組とシングルレット5台）、軌道補正用のステアリングコイルが設置されている。ビーム診断装置は、蛍光スクリーンを用いたプロファイルモニターがウイグラーまでのビーム輸送ラインに3台とウイグラー内に3台の計6台、ビーム電流を測定する電流モニターが入

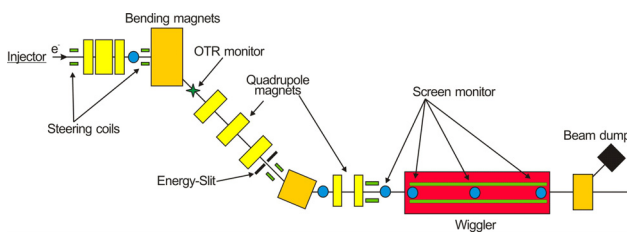


図2：阪大産研FEL用ビームラインレイアウト

射部出口に1台とウイグラー上流・下流に各1台の計3台、ストリークカメラを用いたバンチ長測定のためのOTRモニターが45度偏向電磁石の下流に1台設置されている。また、ビーム輸送路途中の分散部（ $\eta \approx 0.2\text{m}$ ）に、エネルギーがバンチ内の平均から大きくずれている電子を取り除くためエネルギーリットを設置した。スリット幅は20mm、スリットを通過するエネルギー幅は約2%である。

また、発生したSASE光は光学ミラーを使い加速器室外まで輸送し、クロス・ツェルニターナー型遠赤外分光器とGe:Ga半導体検出器を使い測定される。分光器の波長分解は、分光器内のスリット幅から約 $1.5\mu\text{m}$ である。光輸送路および分光器内は、空気中の水による遠赤外光の吸収を避けるため、ロータリーポンプを使い真空（ $10^{-2}$  torr程度）に維持されている。加速器ビームライン側の超高真空と光輸送路とはダイヤモンド窓により区切られている。

#### 3.2 電子ビーム調整

SASE-FEL実験における入射部出口での電子ビームパラメータは、エネルギー10~11 MeV、1バンチあたりの電荷量が約30 nC、時間幅約20-30 ps（FWHM）、エネルギー拡がり2~3%（FWHM）である。上記のエネルギーにおいてウイグラーギャップを最小の30 mmにした場合、発生するSASEの波長が測定システム（分光器およびGe:Ga半導体検出器）の長波長側の感度の無い範囲に入ってしまうため、ビーム調整はウイグラーギャップを32 mmに設定して行った。この時のピーク磁場は約0.354 T、K値=1.4である。

ビーム軌道やウイグラー内でのプロファイルは、電流モニターやスクリーンモニターを使い調整される。そして、SHBとバンチャー位相を変えることによるバンチ圧縮調整と最終的なビーム輸送ライン光学系の微調整は、SASEの出力信号をオシロスコープで観測しながら行う。上記のエネルギースリットがビーム輸送路途中にあるため、実際にウイグラーに入射する電荷量は20 nC程度であると考えられる。

#### 3.3 SASEスペクトラム測定結果

SASEの波長スペクトルは、50 から240  $\mu\text{m}$ の範囲を1  $\mu\text{m}$ ステップで分光し測定された。図3に測定さ

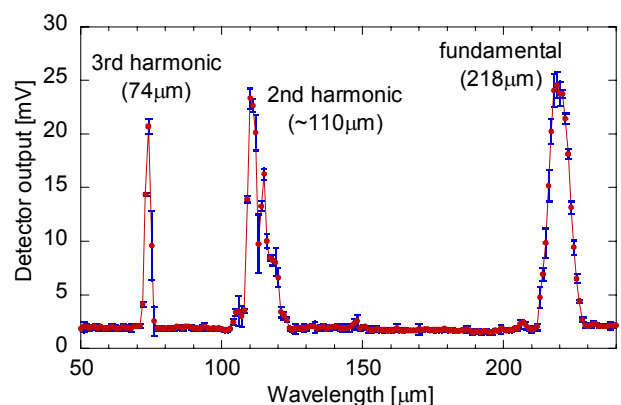


図3：測定されたSASEの波長スペクトル

れたSASEの波長スペクトルを示す。測定では、波長が約220 $\mu\text{m}$ のSASEの基本波とその非線形高調波が観測された。観測された2次および3次高調波の波長は、それぞれ110 $\mu\text{m}$ と74 $\mu\text{m}$ であった。図3のプロットとエラーバーは、各波長で30パルスのSASEに対して測定を行い、そのうち強度の強い5つのパルスの平均値とその標準偏差を表わしている。また、今回使用したGe:Ga半導体素子、分光器、光輸送路を含めた測定システムに関して190 $\mu\text{m}$ よりも長い波長範囲では校正を行っていないので、図3に示した検出器からの信号強度は、検出器および分光器の波長依存性を考慮していない。図3では、2次高調波と3次高調波の強度が基本波の強度とほぼ同じ大きさとして測定されている。しかし、検出器の感度および分光器の測定効率100 $\mu\text{m}$ 付近で最も高いので、基本波と3次高調波の強度は2次高調波に比べ十分大きいと考えられる。これまでに50~190 $\mu\text{m}$ の範囲で行った測定システムの感度校正をもとに長波長側の検出感度を見積り、それを使って基本波に対する2次および3次高調波の強度比を概算すると、それぞれ1/35と1/10となる。

SASEのそれぞれのピーク付近を、波長ステップ0.2 $\mu\text{m}$ でスペクトル測定を行った。その測定結果より、基本波のスペクトルに対してガウスフィットしたスペクトル幅を求めると、標準偏差で約3.82 $\mu\text{m}$  (1.75%) という結果が得られた。また一方、FELパラメータ ( $\rho$ ) とウイグラー周期数 $N_w$ から、下の(1)式を使いスペクトル幅を求めると約1.9%となる[6]。

$$dw = \sqrt{\frac{9\rho}{2\pi\sqrt{3}N_w}} \quad (1)$$

測定から求まるスペクトル幅の方が僅かに狭いのは、実際のビーム実験においてウイグラー内でのビームサイズが計算に用いた値よりも大きく、FELパラメータが小さいことが予想される。同じく2次、3次高調波についても測定結果よりスペクトル幅を求め

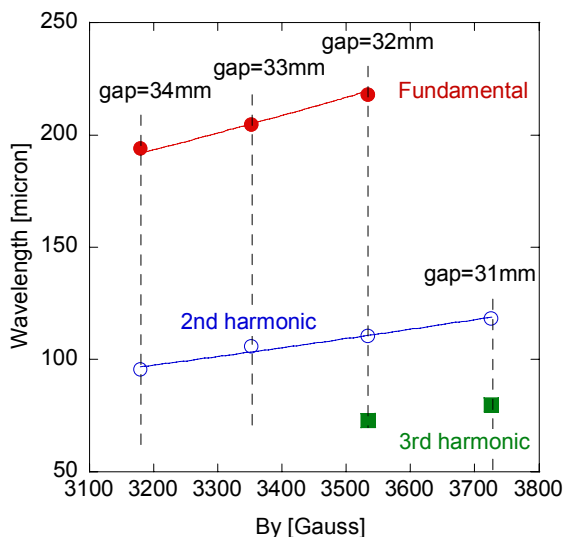


図4：ウイグラー磁場強度とSASEのピーク波長

ると、それぞれ1.17%、1.04%という値が得られた。高調波のスペクトル幅と次数の関係については現在考察中であるが。

また、ビーム状態を一定のままウイグラーギャップを31mmから34mmの間で変化させスペクトル測定を行った。それぞれのギャップでの磁場強度と発生したSASEの基本波、2次、3次高調波のピーク波長をプロットしたものを図4に示す。図4において、ギャップ31mmの時に基本波のスペクトルが測定されなかったのは、基本の波長が測定システムの長波長側の感度が極めて小さい範囲に入ってしまったためと考えられる。また、ギャップを33mmと34mmに広げた場合に、3次高調波が観測されなかったのは、3次光の出力がウイグラー入口でのビーム適合条件が変わったために下がってしまった事と3次のSASE波長が短くなり測定システムの感度の短波長限界から外れた可能性が考えられる。図4にある測定された基本波と2次高調波の波長と磁場強度を使って、電子ビームのエネルギーをフィッティングより求めると、約10.3 MeV ( $\gamma = 20.1$ ) という結果が得られた。ここで、それぞれ基本波と2次高調波のフィッティングから求まるエネルギーは大変良い精度で一致した。

### 3. まとめと今後の予定

昨年度、産研Lバンド電子ライナックに導入した強集束ウイグラーを使い、遠赤外領域でのSASE実験を行った。スペクトル測定では、波長220 $\mu\text{m}$ のSASE基本波と共に、2次高調波 (110 $\mu\text{m}$ ) と3次高調波 (74 $\mu\text{m}$ ) も観測された。

今後、高次高調波のスペクトル幅や角度分布などの詳細な測定を行っていく予定である。また、SASEの統計的な強度揺らぎについて、ビームパラメータとSASEの同時測定を行うことにより、加速器の不安定性に起因する揺らぎを除外した評価をしたいと考えている。強集束ウイグラー内でのビームサイズとSASE出力 (ゲイン) の関係についても調査を行っていく予定である。

### 参考文献

- [1] R. Kato et al., Nucl. Instr. and Meth. A 475 (2001) 334.
- [2] G. Isoyama et al., Nucl. Instr. and Meth. A 507 (2003) 234.
- [3] S. Kashiwagi et al., Proceedings of the 26th International FEL Conference, Trieste, Italy, (2004), p458.
- [4] S. Kashiwagi et al., Proc. the 27th Inter. Free Electron Laser Conf., Stanford, CA, USA (2005) p199.
- [5] S. Umezono et al., Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2005) p188.
- [6] Kwang-je Kim, Nucl. Instr. and Meth. A 250 (1986) 396.