

## Design study of an edge-focusing wiggler for the far-infrared FEL at ISIR, Osaka Univ.

T.Noda\*, S.Kashiwagi, G.Isoyama,  
Institute of Science and Industrial Research, Osaka University  
8-1 Mihogaoka Ibaraki, Osaka, 567-0047

### Abstract

We are developing the Edge-Focusing(EF) wiggler as an focusing wiggler. The first model of the EF wiggler has been fabricated and we demonstrated that it can produce the focusing force. As the next step, we have adopted the EF scheme in the wiggler for FEL or SASE in the far-infrared region at ISIR Osaka University. Actual EF wiggler requires to provide appropriate focusing force in the both directions over the whole range of the electron energy and the magnetic field in the wiggler. We applied the strong focusing scheme for the structure of this EF wiggler to solve this problem. In this report, the design consideration of the actual EF wiggler will be discussed.

### 阪大産研遠赤外 FEL のためのエッジフォーカスウィグラー設計

#### 1. はじめに

大阪大学産業科学研究所(阪大産研)では遠赤外領域 FEL(Free Electron Laser) の発生実験を行っており、その一環として FEL の高輝度化を目指した集束ウィグラーの開発研究も進めている。我々の提案するエッジフォーカス(EF)ウィグラーの開発研究は、これまでに数値計算による特性評価、および試作機製作とその磁場測定を終えた [1, 2]。試作機の磁場測定において、ギャップ 30mm で最大約 1[T/m] の磁場勾配を確認することができ、数値計算結果とよく一致した結果が得られている [3]。

今回、阪大産研 L バンドライナックの planar ウィグラーの更新に伴い、EF ウィグラー実機を導入することが決定した。実機では広範囲の電子エネルギー、ウィグラー磁場に対応する必要があるため、FODO による強集束方式を採用した。本研究会では、阪大産研 L バンドライナックに用いる EF ウィグラーの設計について報告する。

#### 2. EF ウィグラー実機の設計

##### 2.1 EF ウィグラーの集束力特性

EF ウィグラーは、Halbach 型 planar ウィグラーに用いる長方形永久磁石を、縦磁化磁石は台形、横磁化磁石は平行四辺形の形にしたものである。磁場勾配が発生することで電子ビームに対し水平、鉛直両方向に集束作用を与えられる。EF ウィグラーが電子ビームに与える自然集束力  $k_0$ 、および水平、鉛直両方向の集束力  $k_x$ 、 $k_y$  はそれぞれ近似的に次のように

表すことができる [4]。

$$k_0 = \frac{8 - \pi}{3\pi} \left( \frac{e}{m_0 c} \right)^2 \left( \frac{B_0}{\gamma} \right)^2 \quad (1)$$

$$k_x = \frac{4e}{m_0 c} \frac{B_0}{\gamma} \frac{\phi}{\lambda_u} = \frac{1}{B\rho} \frac{dB_y}{dx} \quad (2)$$

$$k_y = k_0 - \frac{1}{B\rho} \frac{dB_x}{dy} = k_0 - k_x \quad (3)$$

ここで、 $B_0$  はピーク磁場、 $\rho$  は曲率半径、 $\gamma$  は電子の規格化エネルギー、 $\phi$  はエッジ角である。この式で表せるように、EF ウィグラーは鉛直方向に存在する自然集束力を水平方向に分配することが可能である。

##### 2.2 基本パラメータ

産研へ新しく導入される予定のウィグラーのパラメータは、残留磁場が  $B_r = 1.26\text{T}$  であること以外は産研 L バンドライナックに現在用いられるウィグラーと同じである。導入するウィグラーの磁場特性について、パラメータを仮定した数値計算評価を行ったところ、磁場勾配の 1 周期の平均値、およびピーク磁場強度は、ギャップを  $g$ 、エッジ角を  $\phi$  とすると以下ようになった。

$$B_0 = 1.905 \times \exp(-0.0526g) \quad (4)$$

$$\frac{dB_y}{dx} = 0.761 \times \phi \exp(-0.0169g) \quad (5)$$

実機の設計では、この値を用いて考察する。

また、阪大産研 L バンドライナックでは、実験目的に応じて電子ビームエネルギーを 10 ~ 30MeV、ギャップは 30 ~ 120mm まで変えることができる。従って、EF ウィグラー実機は広範囲の電子エネルギー、ギャップにおいて電子ビームに集束効果を与える必要がある。

\* E-mail: noda25@sanken.osaka-u.ac.jp

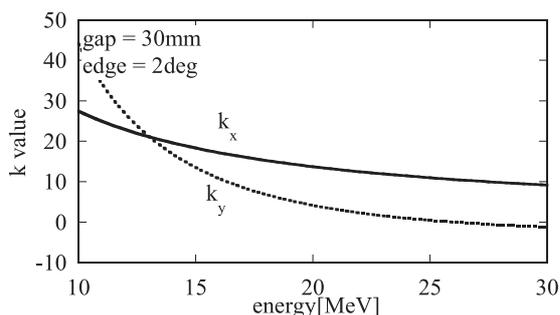


図 1: 集束力と電子ビームエネルギーとの関係

### 2.3 弱集束型 EF ウィグラー

最初に弱集束型 EF ウィグラーについて考察する。これは試作機と同様に全ての永久磁石ブロックのエッジ角が等しい構造であり、ウィグラー全体に渡り式 (2)、(3) で表せる集束力が発生する。 $k_x$ 、 $k_y$  を共に正とすることで、電子ビームに対して鉛直、水平両方向に同時に集束力を与える。ただし十分な自然集束力がない場合は  $k_y \leq 0$  となり、電子ビームに対し鉛直方向に発散作用が働く。両方向の集束力の変化を調べるために電子エネルギーの依存性を示したグラフが図 1 である。電子エネルギーが高くなるにつれ鉛直方向の集束力が弱くなり、発散作用が働く可能性があることを示している。また、比較的高いエネルギーを持つ電子に対しては鉛直、水平両方向に対しても集束力がほとんど与えられなくなることもわかる。従って、弱集束型 EF ウィグラーは低い電子ビームエネルギーに対しては非常に有効であるものの、高エネルギー電子ビームには十分な集束力を与えることができない。

### 2.4 強集束型 EF ウィグラー

一般に高エネルギー電子に十分な集束力を与えようとすると磁場勾配を強くする必要がある。EF ウィグラーにおいて磁場勾配を強くするためにはエッジ角を大きくとる必要があるが、式 (3) より電子ビームに対し鉛直方向に発散作用が働くようになる。そこで集束四極磁石と発散四極磁石を交互に等間隔で並べた FODO 構造のように、エッジ角の大きさは等しいが、その正負が互いに逆向きになる 2 種類の EF ウィグラーを交互に配置する構造を取り入れる。

まず低エネルギー電子ビームに与える集束作用について述べる。FODO ラティスと同様に考えると、ビームが安定して EF ウィグラー内を通過するためには、phase advance  $\mu$  の最大値を 76 度付近に設定すれば良い。FODO のセル数を  $N_{\text{cell}}$ 、セル長を  $L = 1.92/N_{\text{cell}}$ 、EF 部の長さを  $l$  とすると、phase advance は

$$\sin \frac{\mu}{2} = KL \quad (6)$$

$$K = kl \quad (7)$$

と表せるので、式 (1) から式 (3) よりエッジ角と phase advance との関係は図 2 のようになる。また、水平方

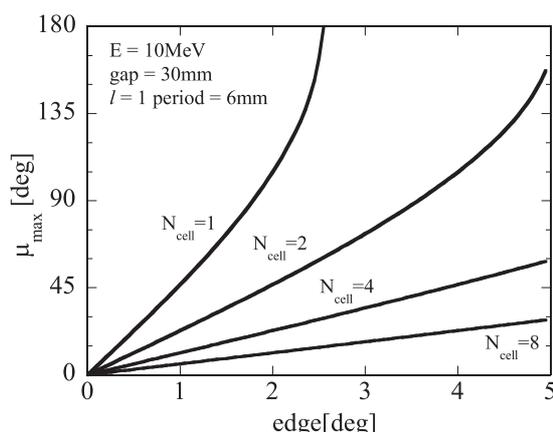


図 2: phase advance とエッジ角との関係

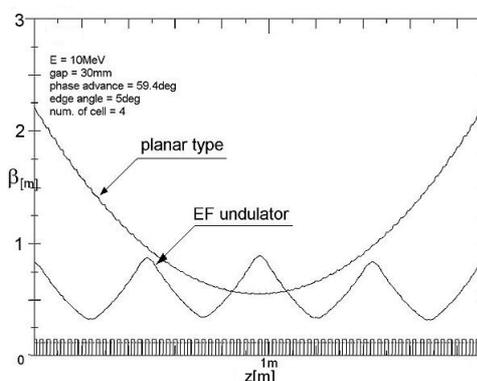


図 3: 低エネルギー電子におけるベータatron関数の変化

向のビームサイズは次のような式で表せる。

$$\sigma = \sqrt{L/\mu} \quad (8)$$

セル長  $L$  が短いほどビームサイズは小さくなるが、EF ウィグラーの構造は複雑になる。以上より、エッジ角を大きくとり、かつセル数の多い構造が適していることがわかる。

次に EF ウィグラーによる集束作用を planar ウィグラーと比較するため、シミュレーションによってベータatron関数の変化を求める。例として EF ウィグラーのパラメータを  $N_{\text{cell}} = 4$ ,  $l = 1$  [period],  $\phi = 5$  [deg] と設定した場合を考える。電子エネルギー 10 MeV、ギャップ 30 mm での電子ビームのウィグラー内のベータatron関数の変化は図 3 のようになる。ただし planar ウィグラーのパラメータに関してはエッジ角を 0 として EF ウィグラーと同じパラメータとし、電子ビームの入射パラメータは planar ウィグラー、EF ウィグラー共に、ウィグラー内でビームサイズの平均値が最小になるように設定したものである。EF ウィグラーによってベータatron関数が抑えられることがわかる。

一方、高エネルギー電子ビームに対しては、ウィグラー入射時の電子ビームのツイスパラメータを調整することでビームサイズを小さく抑えることが可

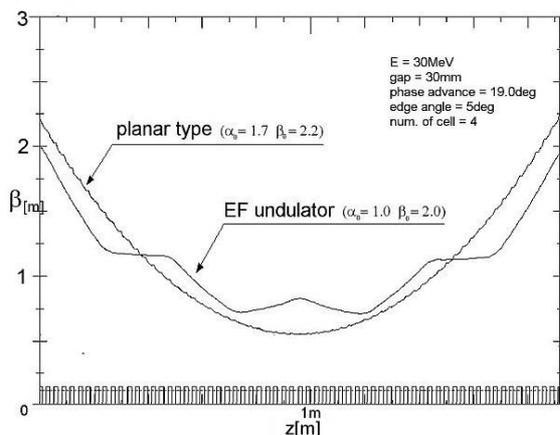


図 4: 高エネルギー電子におけるベータatron関数の変化

能になる。図 4 は電子エネルギー 30 MeV、ギャップ 30 mm を仮定した場合の電子ビームのベータatron関数の変化である。EF ウィグラーのパラメータは図 3 を求めるときに指定した値と同じである。

### 3. 実機の構造

以上の考察を基に、実機のパラメータを表 1 のように決定した。構造は図 5 のようになっており、planar ウィグラー部 3 周期ごとに EF ウィグラー部が 1 周期混合されている。磁場、および磁場勾配は図 6、図 7 のようになる。ギャップ 30 mm における磁場勾配は、最大 3.35 T/m、1 周期の平均は 2.43 T/m である。また、ウィグラーの両端には 9mm の横磁化磁石を設置している。

### 4. まとめ

阪大産研 L バンドライナックで用いる EF ウィグラーの設計を行った。広範囲の電子ビームエネルギー、ギャップで実験を行うため、弱集束型の EF ウィグラーは適しておらず、強集束の原理を用いて実機を設計した。実機は 2005 年 3 月に製作され、4 月から 5 月にかけて KEK で磁場測定が行われた [5]。6 月下旬より、本研究で設計した EF ウィグラーを用いて SASE 発生実験を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] M.Fujimoto, et al., Symposium on Accelerator Science and Technology (2001) 461
- [2] A. Mihara, et al., Symposium on Accelerator Science and Technology (2003) 2P-071
- [3] 野田孝典 他, 本概要集
- [4] G. Isoyama et al., Nucl. Instr. and Meth. A 507 (2003) 234
- [5] 柏木茂 他, 本概要集

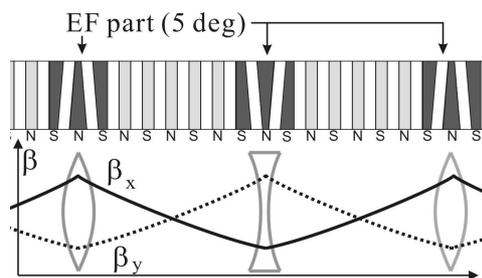


図 5: EF ウィグラー実機の構造

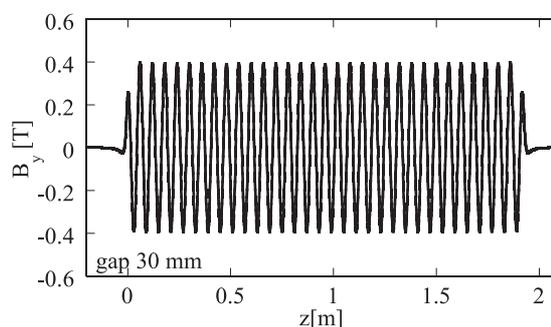


図 6: 実機の磁場強度分布 (ギャップ 30 mm)

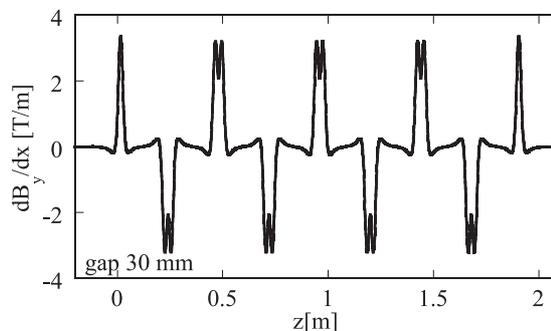


図 7: 実機の磁場勾配分布 (ギャップ 30 mm)

ブロックサイズ		90 × 20 × 15mm <sup>3</sup>
ギャップ	g	30 ~ 120mm
残留磁場	B <sub>r</sub>	1.26 T
ピーク磁場	B <sub>0</sub>	0.39 T (gap 30 mm)
周期長	λ	60 mm
周期数	N	32
全長		1.938 m
エッジ角	φ	5 deg
FODO セル数	N <sub>cell</sub>	4
最大 phase advance	μ <sub>max</sub>	59 deg

表 1: EF ウィグラー実機のパラメータ