

[1 a - 3]

## OPTICAL GUIDING EFFECTS IN FREE ELECTRON LASER

Masaaki Sobajima, Kiyoshi Yoshikawa, Masami Ohnishi, Yasushi Yamamoto,  
Kai Masuda, Takeshi Nakamura\*

Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611, Japan  
\*Spring-8, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, Japan

abstract

In order to further broaden the fields of FEL application, it is necessary to generate short wavelength FELs as well as to make the bandwidth much narrower. These call for why self-amplified spontaneous emission and long undulators are conceived. However, such methods require the precise evaluation of the optical guiding effects. For this reason, we have developed a three dimensional numerical FEL code based on ELFIN. The numerical results have shown clearly optical guiding effects in the FEL experiments at Free Electron Laser Institute (FELI), and the effectiveness of the long undulator as well.

### 自由電子レーザーにおける光ガイド効果

#### 1. はじめに

FELの応用範囲をさらに広げるには、短波長領域での発振とレーザー光スペクトルの狭帯域化が必要である。それらを実現する方法の一つとして長アンジュレータの利用があるが、光の回折による広がりのため電子との相互作用の効率が低下することが予想された。しかし電子ビームが光ファイバーのように光を電子ビーム付近に集中させる光ガイド効果<sup>1-3)</sup>が見出され長アンジュレータの可能性が検討されている。この光ガイドの効果を解析できるシミュレーションコードとして3次元マルチ周波数のFRED<sup>4)</sup>などがあるが、我々はELFIN<sup>5)</sup>をもとにワークステーションで計算可能な3次元単一周波数のシミュレーションコードを開発した。

本論文では自由電子レーザー研究所(以下FELI)のFELにおける光ガイド効果を評価し、長アンジュレータの可能性について検討し、レーザー場の発展における3次元的な効果について述べる。

#### 2. 解析方法

我々のシミュレーションコードでは単一周波数のレーザー場のベクトルポテンシャル、およびその複素振幅を次式のように仮定している。

$$A_L(x, y, z) = x |A_L(x, y, z)| \times \cos \{k_L z - \omega_L t + \phi_L(x, y, z)\} \quad (1)$$

$$A_L(x, y, z) = |A_L(x, y, z)| \exp \{i \phi_L(x, y, z)\} \quad (2)$$

ここで $k_L$ 、 $\omega_L$ 、 $\phi_L$ はそれぞれレーザー場の波数、角周波数、位相を表す。また電子ビームの進行方向に $z$ 軸をとっている。このベクトルポテンシャルを

マクスウェル方程式に代入してSVAP近似を用いてさらにレーザー場の一周期で平均をとることでより次式が得られる。

$$\left( -\frac{i}{2k_L} \nabla_{\perp}^2 + \frac{\partial}{\partial z} \right) a_L(x, y, z) = s(x, y, z) \quad (3)$$

$$s(x, y, z) = \sum_{j=1}^{N_e} s_j \delta(x - x_j) \delta(y - y_j) \quad (4)$$

$$s_j = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m c^2 \gamma_j} \times \left\{ |a_{uj}| \left( J_0(\xi_j) - J_1(\xi_j) \right) \exp(-i\zeta_j) + i a_L \right\} \quad (5)$$

$$\xi_j = |a_{uj}|^2 / \left\{ 2(1 + |a_{uj}|^2) \right\} \quad (6)$$

$$\left( a_L = \frac{eA_L}{\sqrt{2}mc}, \quad a_{uj} = \frac{eA_{uj}}{\sqrt{2}mc} \right)$$

ここで $N_e$ は電子の総数、 $J_N$ は $N$ 次のベッセル関数、 $a_L$ 、 $a_{uj}$ はそれぞれレーザー場とアンジュレータ場の無次元化されたベクトルポテンシャルの複素振幅を表す。また $x_j$ 、 $y_j$ 、 $\gamma_j$ はそれぞれ $j$ 番目の電子の $x$ 座標、 $y$ 座標、及びローレンツ因子を表し、それらはすべてアンジュレータの一周期で平均された値である。

さらに $xy$ 平面内に $L_a \times L_a$ の正方形の計算領域をとり、 $128 \times 128$ 個の正方形メッシュに分割し、メッシュ点でのレーザー場の複素振幅の値から、高速フーリエ変換を用いて $128 \times 128$ 個のフーリエ係数を求め、(3)式をフーリエ係数に対する常微分方

程式に変換して解いている。このときレーザ場に対しては周期境界条件、

$$a_L(x, y, z) = a_L(x + L_a, y, z) = a_L(x, y + L_a, z) \quad (7)$$

が課せられる。

### 3. 計算結果

シミュレーションでは、電子ビームのピーク電流が比較的大きく、顕著な光ガイド効果が期待できる FELI のパラメータ (表 1) を用いた。図 1 にアンジュレータ内での  $x$  軸方向のスポットサイズの変化の様子を、図 2 に  $z=0, L/3, 2L/3, L$  における、 $x$  軸上のレーザ場の強度分布をそれぞれ示す。図 1 で描かれている点線は電子がない場合にミラ

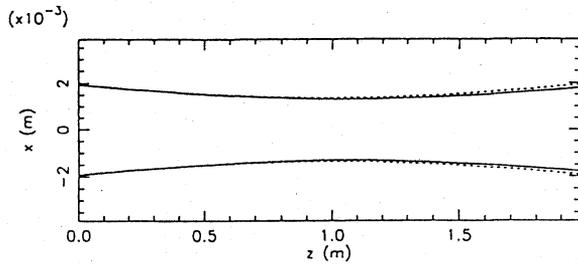


図 1 スポットサイズの変化

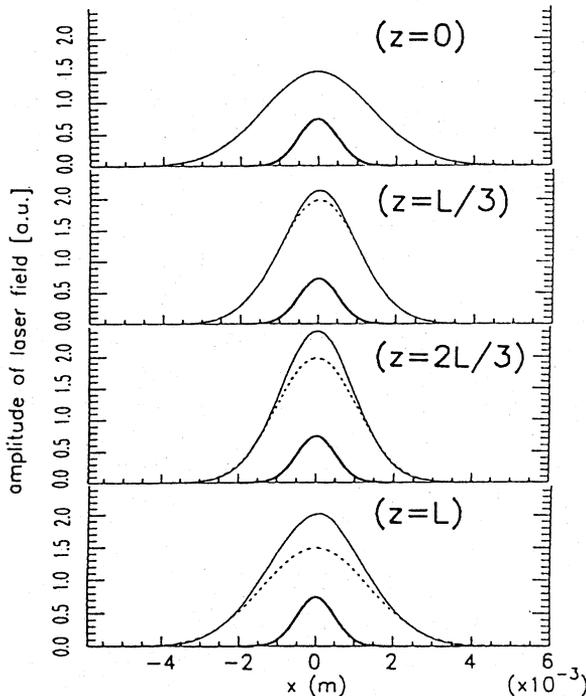


図 2 レーザ場の  $x$  軸上での強度分布

間で共振するガウシアンビームのスポットサイズを、太線は電子の分布をそれぞれ示している。これらの図からレーザ場が電子の存在する領域で増幅されてパワーが集中し、スポットサイズが減少していることが分かる (光ガイド効果)。また、 $y$  軸方向に関しても  $x$  軸方向とほぼ同じ結果が得られる。

図 3 にアンジュレータ長に対する、ゲイン  $G$  と次式で表される光ガイド効果の大きさ  $E_g$  の変化を示す。

$$E_g = \frac{w_0^2}{w_x w_y} \quad (8)$$

ここで  $w_0$  は電子ビームがない場合、 $w_x, w_y$  は電子ビームがある場合のアンジュレータ出口での  $x, y$  方向のスポットサイズをそれぞれ表す。光が電子ビームにより収束するほど、一般に  $E_g$  は大きくなると考えられる。

図 3 から光ガイド効果、ゲインともにアンジュレータ長が FELI の 7 倍まで大きくなると飽和する傾向が見られる。これは光の回折によるアンジュレータ両端付近でのレーザ場強度の急激な減少のためである。従ってアンジュレータ長を FELI の 7 倍以上にしてもゲイン向上は期待できない。

図 4 に上流側ミラー位置における  $x$  軸上でのレーザ場強度分布の周回数 200 に対する変化を示す。(a) はミラーに直径 1mm の取り出し穴がある場合で、(b) はない場合である。穴のある場合、飽和強度はない場合の 75% 程度となり、また  $z$  軸から離れた

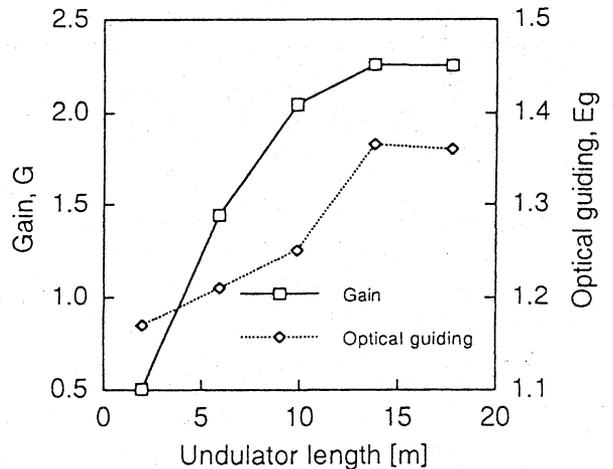


図 3 アンジュレータ長に対する光ガイド効果とゲインの変化

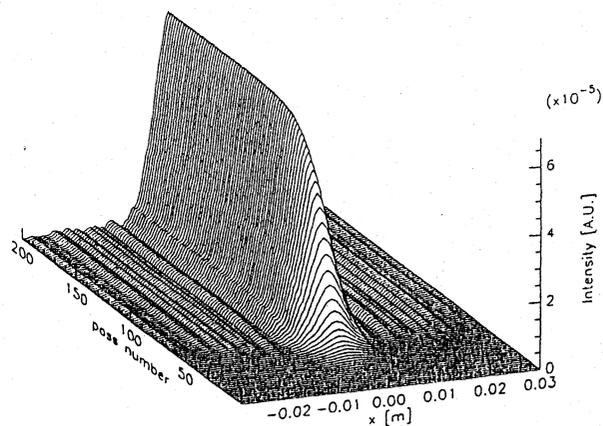
所で強度分布に多少の脈動が見られる。

#### 4. まとめ

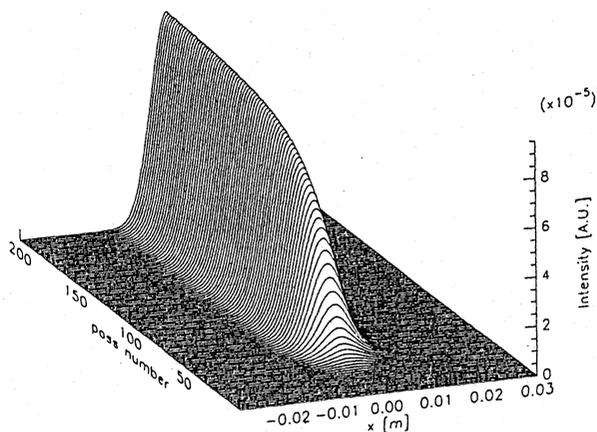
3次元 FEL シミュレーションコードを開発し、そのコードを用いた計算により、光ガイド効果やアンジュレータ長とゲイン及び光ガイド効果の関係が明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) P. Sprangle and C.M. Tang, Appl. Phys. Lett. 39(1981)667.
- 2) N.W. Kroll, P.L. Morton and M.N. Rosenbluth, IEEE J. Quantum Electron. QE-17 (8) (1981) 1436.
- 3) R.W. Warren and B.D. McVey, Nucl. Inst. and Meth. A259(1987) 154.
- 4) G. Travish, Nucl. Inst. and Meth. A358(1995)48
- 5) T. Nakamura, Proc. of the 14th Linear Accelerator Meeting in Japan(1989)236 in Japanese.



(a) 穴がある場合



(b) 穴がない場合

図4 ミラー位置でのレーザー場強度分布の変化