

[1 a - 2]

# Spontaneous Emission Spectra from A Staggered-Array Undulator

Shimada S., Okada K., Sobajima M., Masuda K.,  
Toku H., Yamamoto Y., Ohnishi M., and Yoshikawa K.

Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611, Japan

## Abstract

A staggered-array undulator set inside the superconducting solenoid coils is shown to be able to provide high undulator fields larger than the longitudinal magnetic fields, a small undulator period, easy tunability through the solenoid coil current, and compact and easy fabrication. The overall performance characteristics of this undulator were studied mainly with respect to iron and aluminum disk widths, and spontaneous emission spectra through the numerical calculations. The maximum undulator field is found to be obtained for the ratio of the aluminum disk width to the undulator period of 0.45. The line widths (FWHM) of the spontaneous emission spectra, however, do not show  $N_w^{-1}$  dependence on the number of the undulator period  $N_w$  for practical beams with a Gaussian distribution, compared with for a single electron. The energy spread among various parameters is seen to play an important role in reducing the FWHM with increase of  $N_w$ . The large tunability of the wavelength is proved to cover 6-10  $\mu$  m by changing the solenoid field from 0.4 T to 1.6 T.

## 超伝導ソレノイドによる自由電子レーザー用アンジュレータの 自発放射光スペクトルの解析

### 1. はじめに

超伝導ソレノイドコイルを用いたアンジュレータは最初にスタンフォード大学において小型のアンジュレータとして考案され、これまで遠赤外域での FEL 実験が行われてきた<sup>1) 2)</sup>。このアンジュレータには、(1) ソレノイド電流により波長を変えられる、(2) 短い周期長でも比較的大きなアンジュレータ磁場が得られる、(3) 制作コストが安く、制作も比較的簡単、(4) 軸方向磁場の存在により、電子ビームの閉じ込めが可能などの利点がある。特に(2)-(4)の特徴から、アンジュレータの周期数  $N_w$  をかなり大きくとることができる。

今回、我々は 2 次元の磁場解析コードを開発して超伝導ソレノイドアンジュレータ内の磁場分布を解析し、得られた磁場分布を用いて電子ビームの軌道を計算した。また、得られた電子軌道から、いくつかのパラメータの異なる電子ビームについて

自発放射光スペクトルを計算し、自発放射光の線幅の  $N_w$  に対する依存性を調べた。

### 2. アンジュレータの構造

図 1 に超伝導ソレノイドアンジュレータの概略図、図 2 に断面図をそれぞれ示す。ソレノイド内には半円盤状の鉄とアルミが交互に重ねて詰め込まれており、ソレノイド電流によりコイル内に生じた軸方向の磁束は透磁率の高い鉄に吸収され、その結果、図 2 に示すように磁場の  $y$  方向成分が生じている。

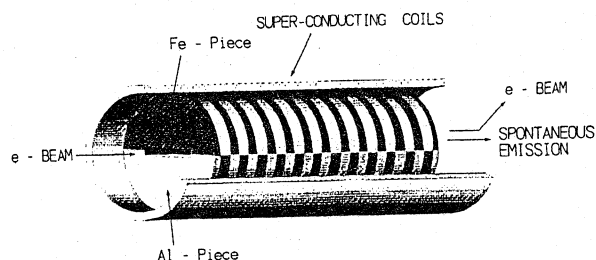


図 1: 超伝導ソレノイドアンジュレータの概略図

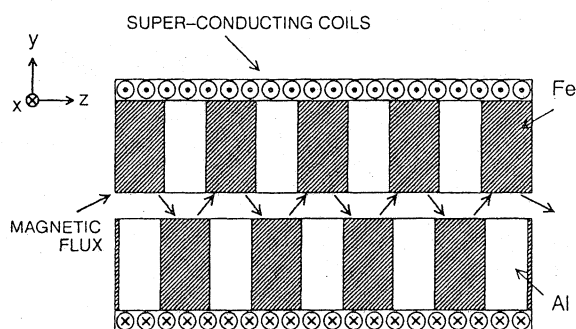


図2: 超伝導ソレノイドアンジュレータの断面図

### 3. 磁場分布計算

表1に計算に用いたアンジュレータと電子ビームの基本パラメータを示す。電子ビームはガウス分布に従うと仮定した。

磁場分布の計算には、電子ビームの通路は  $y$  方向のギャップ長に比べて  $x$  方向に十分大きいと考えて、 $y$ - $z$  平面の2次元モデルを仮定した。

表1: 計算に用いた基本パラメータ

#### 1: Undulator

Undulator Length :	$L_u = 50$ cm
Undulator Period :	$\lambda_u = 1$ cm
Gap Length :	$g_u = 2$ mm
Ratio of Spacer Length to $\lambda_u$ :	$f = 0.45$
Number of Undulator Period :	$N_u = 50$
Coil Length :	$L_c = 1$ m
Coil Radius :	$a = 1.6$ cm
Solenoid Field :	$B_c = 0.7$ T
Permeability of iron pieces :	$\mu = 3000$

#### 2: Electron Beam

Beam Energy :	$E_e = 15$ MeV ( $\gamma_r = 30.35$ )
Energy Spread :	$(\delta\gamma/\gamma)_r = 0.5$ %
Beam Size :	$(\sigma_{x,y})_r = 0.3$ mm
Normalized Emittance :	$(\epsilon_{n,x,y})_r = 15\pi$ mm mrad
Observation Point :	$z_{obs} = 3$ m (Distance from the Entrance of Undulator)

図3に  $z$  軸付近の磁場分布図を示す。磁束が鉄片に吸い寄せられ、1つの鉄片からその向かい隣の鉄片に磁束が流れている様子が分かる。

次にアンジュレータの周期長に対するアルミの割合  $f$  を変化させて、 $z$  軸上でのアンジュレータ磁

場のピーク値を計算した。その他のパラメータは基本パラメータを用いた。その結果、 $f = 0.45$  の時にアンジュレータ磁場は最大値となった。

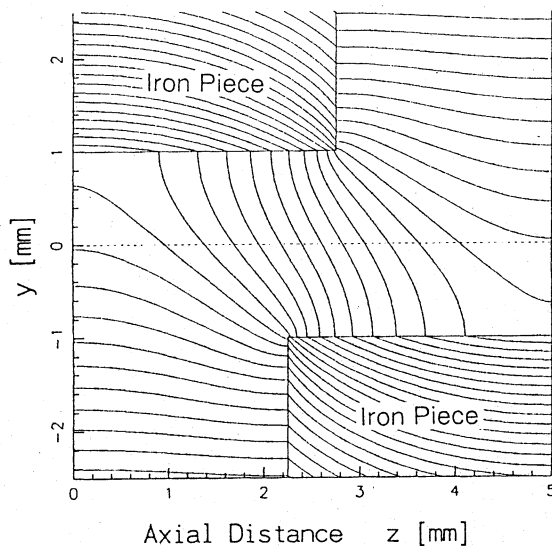


図3:  $z$  軸付近での磁場分布

### 4. 電子軌道 及び 自発放射光計算

電子軌道計算は先に計算した磁場分布を使い、電子の相対論的運動方程式から求める。ただし、アンジュレータ内でのエネルギー変化は無視し、微分方程式は Runge-Kutta-Gill 法を用いて解いている。また、自発放射光の計算には Lienard-Wiebert の公式を用い、高速フーリエ変換によりスペクトルを計算している。

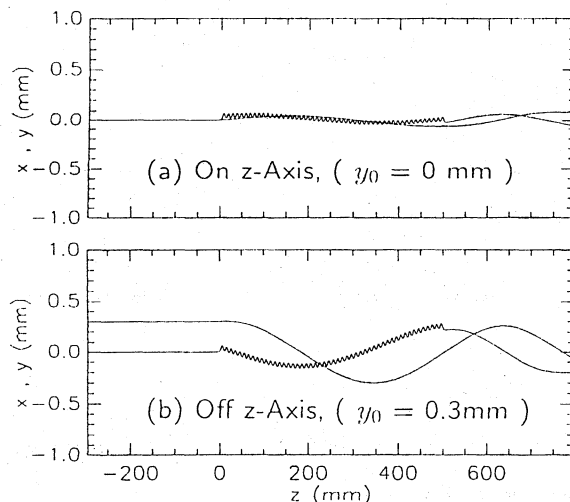


図4: 電子軌道

図4に軌道計算結果を示す。図4(a)はz軸上に入射した電子軌道、図4(b)は0.3mmほど軸からy方向にそれて入射した電子軌道を示している。ただし電子の初速はともにz方向成分のみである。z軸上に入射した電子は、x-y方向にわずかに低周波の振動をしているだけである。一方、y方向に軸をそれた電子の軌道は図のように、z軸に近づくように収束力を受ける。また軸からそれるほど、この収束力は強い。このために、電子はz軸からy方向にそれて入射してもアンジュレータの壁衝突することはほとんどないが、軌道は大きく振動する。

図5自発放射光の線幅とアンジュレータの周期数との関係を示す。一電子からの自発放射光の線幅は $N_w$ に反比例している。一方、電子ビームからの線幅は一電子と同じようには減衰しない。特に $N_w$ が大きくなるとほとんど変化しなくなる。これに対し、電子ビームのパラメータを変化させてそれぞれグラフに表した。この結果から、エネルギー広がりがビームのパラメータの中で最も影響が大きいと考えられる。

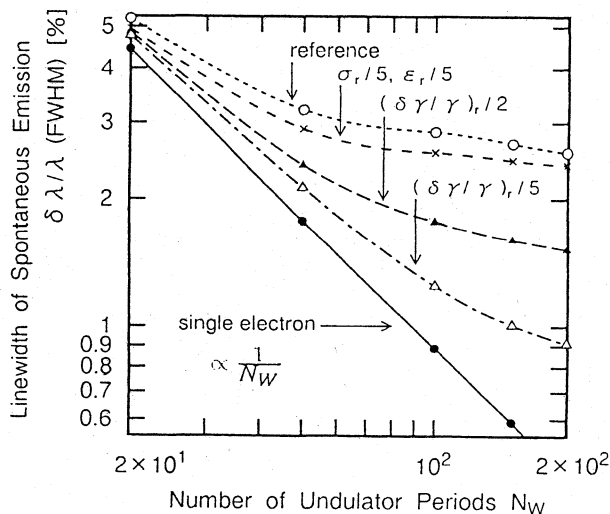


図5：自発放射光スペクトルの線幅と $N_w$

## 5. まとめ

アンジュレータ磁場のピーク値は、 $f = 0.45$ の時に最大値をとる。

入射位置によらず、電子がアンジュレータ内の壁に衝突する可能性は低い。

自発放射光スペクトルの線幅を $N_w^{-1}$ に比例させて減らすためには、電子ビームのエネルギー広がりを小さくすることが重要である。

## 参考文献

- [1] Y.C.Huang, et al., "Compact Far-IR FEL design," Nucl. Instr. Methods in Phys. Res. A318, 765-771(1992).
- [2] Y.C.Huang et al., "A Staggered-Array Wiggler for Far-Infrared, Free-Electron Laser Operation," IEEE J. of Quant. Elect., 30, 1289-