

# Field Measurement of a FEL Undulator and Particle Tracking

C. Tsukishima and S. Nakata

Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp.

## ABSTRACT

A linearly polarized undulator for free electron laser (FEL) is constructed and its field is measured. The Dispersion of the peak field is less than 0.06%. This undulator can also be used as a tapered one and the dispersion of the field doesn't go worse even though the field has 10% of gradient. FEL's gain is calculated by particle tracking in measured undulator field, and is reduced to 45%, which is 70% of ideal one, by the effect of field inhomogeneity.

## FEL用アンジュレーターの磁界測定と粒子シミュレーション

### 1. はじめに

自由電子レーザー (FEL) 用アンジュレーターを試作した。試作したアンジュレーターは周期長 6 cm, 磁界強度 0.26 T の垂直磁場型であり、これに 20 MeV の電子ビームを通すことにより遠赤外域での発振を目指す。FEL 利得はビームの質及び磁場の均一度に大きく左右されるが、今回試作したアンジュレーターについて発生磁場分布を測定し計算値との比較検討を行なった。また、測定された磁場分布をもとに粒子シミュレーションを行い、ビームエミッタンス等による利得への効果を評価した。

### 2. アンジュレーター

Fig.1 に今回試作したアンジュレーターを示す。1 周期 6 cm、中心磁場強度 0.26 T、28 周期である。永久磁石には住友特殊金属の NEOMAX 35 を使用している。マグネット個々のばらつきは、磁化のばらつき 0.21% (分散)、軸方向のばらつき 20 mrad (最大値) であった。発生磁界のばらつきは各ポールに付けられた位置調整ネジにより微調される。マグネット全体の上下のギャップ間隔は、2 本の支持シャフトをインダクションモーターにより駆動調整し、ポテンシオメーターによってモニターするが、独立に動かすことによって s 方向に発生磁場をテーパを持たせることも可能である。またアンジュレーターの前後には、s 方向の磁場積分を 0 にするための回転磁石が 2 組取り付けられており、パルスモーターによりこれを駆動する。

### 3. 測定結果

磁場の測定には、F.W.BELL 社の 3 軸型 ZOB-3202 プローブを使用した。同プローブのサイズ及び安定度はそれぞれ 1.5 mm、0.04%/度である。Fig.2 に測定されたアンジュレータ中の磁場の  $B_y$  成分の s 方向分布を示す。1 回の測定ごとに各ポールの調整を行い、この作業を数回繰り返すことによりピーク磁場のばらつきを 0.06% 以下に抑えることができた。このとき、

B<sub>y</sub>成分の高次モードは2次から5次の範囲で基本モードに対して0.1%以下であった。また、周期長のばらつきは約0.1%であり、これはプローブサイズ、プローブ駆動幅の誤差範囲である。Fig.3,4は、B<sub>y</sub>のx, y方向分布である。x方向にはビームサイズに対し十分なフラットネスがあるが、Y方向についてはあまりない。このためビームサイズによってはK値に分布が生じ、利得の低下が予想される。

Fig.5はマグネット全体のギャップ幅を変化させたときのピーク磁場の分散をプロットしたものである。本装置のように各ポールの微調機構によって磁場のばらつきを抑えている場合、ギャップ幅を変化させることによってばらつきは悪くなってしまうことが分かる。

レーザー出力飽和時にはアンジュレーター磁場にテーパーを付けることによってビームエネルギーの変換効率をあげてやることが考えられている。磁場周期が28の場合、磁場に要求されるテーパーは約2.7%となる。Fig.6は、両端のギャップ幅を変化させた際のピーク磁場の勾配を示している。本装置ではテーパーを10%付けた時点においてもピーク磁場の分散を0.1%以内に抑えることが可能であることが確認された。また、これらの測定結果はすべて計算値とよく一致している。

#### 4. トラッキング

測定した磁場分布を用いて粒子トラッキング計算を行なった。MadeyによればFELの小信号利得は電子のエネルギー変化の2次のモーメントとして次式で与えられる。<sup>1)</sup>

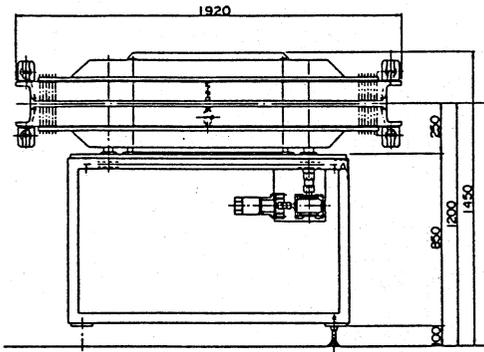
$$\langle t_f - t_i \rangle \approx \frac{1}{2} \frac{d}{dt_i} \langle (t_f - t_i)^2 \rangle \propto \frac{d}{dt_i} \left| \int_{-L/2}^{L/2} \frac{d^2}{\beta_{ii}^0} \beta_x^0 \exp\{i(\omega t^0 - k z)\} \right| \quad (1)$$

上式で、 $\gamma_i, \gamma_f$ はそれぞれアンジュレーター入口、出口での相対論的 $\gamma$ であり、 $\beta^0$ はOptical Fieldの存在しない下での電子の相対論的 $\beta$ を表わす。

前述したように、x方向の磁場分布についてはビームサイズに対しほぼ一様としていいのに対し、y方向分布についてはビームサイズによっては磁場が均一であるとは言えなくなる。従って、特にy方向についてはミスアライメントを小さくすると共に、アンジュレーター入口で適当なビームのツイスパラメータを選び、利得の低下を極力抑える必要がある。そこでy方向の位相空間上にガウス分布を与えて3次元での電子のトラッキングを行い、(1)式を用いて利得の評価を行なった。計算に用いた磁場は測定値B<sub>y</sub>(s, y)及びこれを用いてMaxwell方程式より算出したB<sub>s</sub>(s, y)である。Fig.7はx<sub>s</sub>, y<sub>s</sub>平面での電子の軌道である。特にy方向については、B<sub>s</sub>成分によって集束力が生じ自由空間上での軌道とは異なった振舞いをしているのが分かる。Fig.8は、エミッタンスを変化していった際の利得曲線の変化を示したものである。エミッタンスの増加に伴って、利得の極大値の位置は高エネルギー側へとシフトし、その極大値も徐々に減少してゆく。計算結果によれば $\epsilon_y \sim 1\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,  $\sigma/\gamma \sim 1\%$ ,  $\beta_y = 2.5$ ,  $\alpha_y = 2.6$ において利得は約45% (理想値の70%)程度となる。

#### Reference

- 1) J.M.J.Madey "Relationship between Mean Radiated Energy etc." IL NUOVO CIMENTO Vol.50B 64 (1978)



Parameters

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| Period                      | 6cm   |
| Num of periods              | 28    |
| Total length                | 1.68m |
| Gap height                  | 3cm   |
| Pole length                 | 1.5cm |
| Pole height                 | 1.5cm |
| Pole width                  | 10cm  |
| Peak vertical field on axis | 0.26T |
| K value                     | 1.4   |

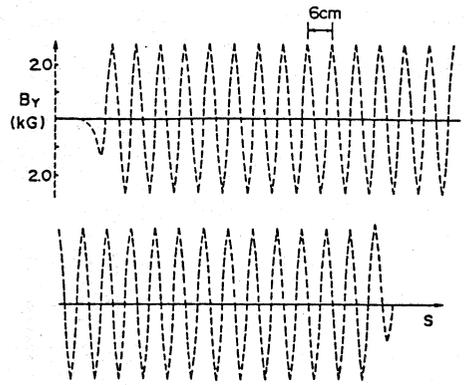


Fig.1 Undulator

Fig.2 Measured magnetic field on s axis

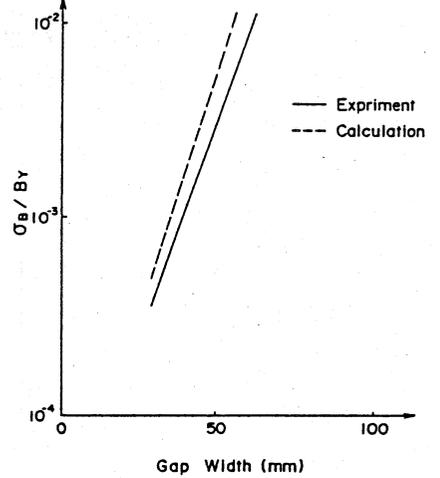
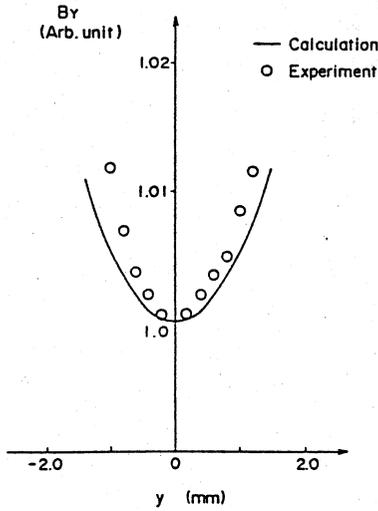
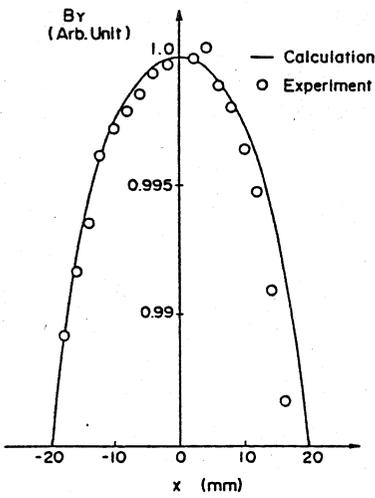


Fig.3 Measured magnetic field on x axis

Fig.4 Measured magnetic field on y axis

Fig.5 Dispersion of the peak field vs. gap width

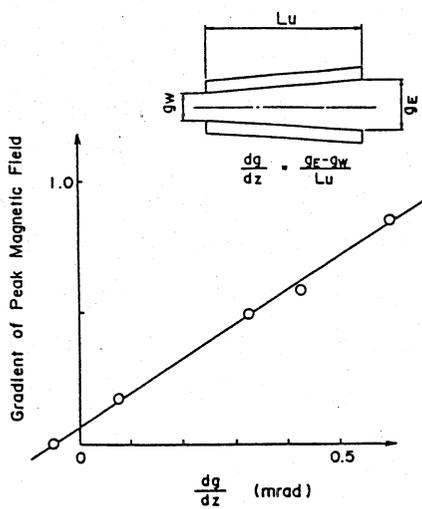


Fig.6 Gradient of peak field vs. gradient of gap width

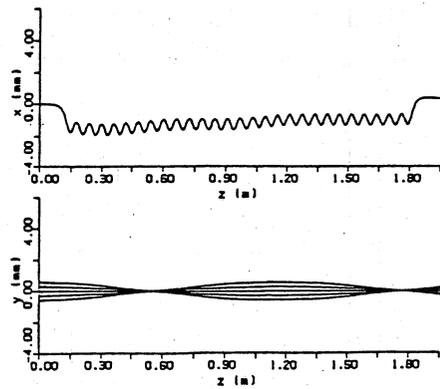


Fig.7 Electron trajectory in the undulator

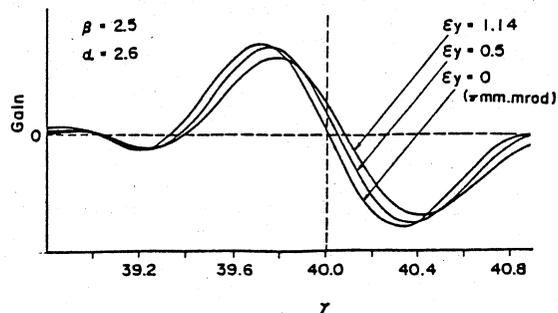


Fig.8 The dependence of beam emittance on gain curve