

MISALIGNMENT SENSITIVITY OF AN OPTICAL RESONATOR FOR JAERI ERL-FEL

R. Nagai¹, R. Hajima, M. Sawamura, N. Kikuzawa, N. Nishimori, T. Nishitani, E. Minehara
Free-Electron Laser Laboratory, Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Research Institute
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

The misalignment sensitivity of a hole-coupling optical resonator for the JAERI ERL-FEL is estimated with a wavelength of 22 μm by an FFT-FoxLi procedure simulation code. In order to ensure the high-power and stable FEL operation, the misalignment sensitivity has to be clear, because the FEL power depends on the misalignment of the optical resonator. It is found that the hole-coupling mirror is more sensitive than the non-coupling mirror and the offset of the non-coupling mirror is compensable tilting the mirror.

原研ERL-FEL用光共振器ミスアライメントの影響

1. はじめに

遠赤外領域の自由電子レーザー(FEL)では、誘電体の損失が大きいため半透過鏡が使用できないので、光の一部を切り出す形の出力結合器が用いられる。このため余分な回折損失を生じ、光共振器からの出力効率を低下させてしまうので、出力結合器を含んだ光共振器の評価・検討が不可欠である。

FEL光を利用実験に供するためには、安定した出力で再現性の良い光を発生する必要がある。安定したFEL光を得るには、駆動源である加速器の安定度および発振部（アンジュレータおよび光共振器）が安定している必要がある。原研自由電子レーザーでは、加速器の安定性の向上について高周波系の位相安定性向上^[1-3]、電子銃のタイミングジッタ低減^[4]などについての改善を行ってきている。発振部については、アンジュレータ^[5]は永久磁石を用いているので十分に安定であるといえる。ここではFEL光の安定性に及ぼす光共振器のミスアライメントの影響について述べる。

光共振器ではミラーの設置誤差、建物の振動および歪みによってミスアライメントを生じる。このミスアライメントによる出力の低下および不安定性を最小限にするために必要なミラーの設置精度、建物の振動や歪みの影響除去の必要性を明らかにするためにミスアライメントの影響の評価を行った。

2. ミスアライメントの影響

2.1 光共振器のモデル

原研ERL-FELではセンターホール出力型の光共振器を採用している^[6]。この光共振器の主なパラメータは表1にまとめたようなものであり、ミラーは銅の基板に金をコートしたものをを用いている。また、数値計算のモデルは図1のようにアンジュレータダ

クト両端と偏向電磁石チャンバー外側の四つのアパチャを考慮にいれている。波長22 μm に対する光共振器の回折損失、出力、モード体積をFFT-FoxLi^[7]を用いたコードにより計算し、そこから自由電子レーザーの出力効率^[5]を算出した。ミラーに傾きおよび位置ずれを加えたときの出力効率の変化からミスアライメントの影響の度合いを評価した。

表1：光共振器の主なパラメータ

光共振器長	7.198 m
アンジュレータダクト長	2 m
レイリー長	1 m
ミラー半径	60 mm
ミラー反射率	99.4 %
センターホール半径	1 mm

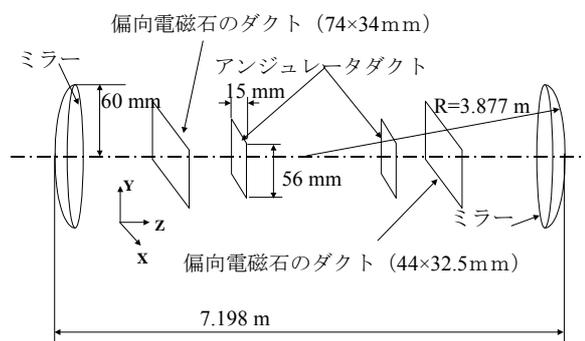


図1：光共振器のモデル

2.2 ミラーの傾きの影響

ミラーの傾きの影響を調べるために、センターホールのある出力ミラー (M1)、全反射ミラー (M2) それぞれがyz、zx (図1参照) それぞれの面内で回

¹ E-mail: r_nagai@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

転したときの出力効率の変化を計算した。完全にアラインしている状態の出力効率を100%として、その結果をプロットしたものが図2である。どの場合もほぼ同じ結果であり、出力変動を1%以下に抑えようとするならばミラーの傾きを100 μ rad程度以下にする必要があることが分かる。

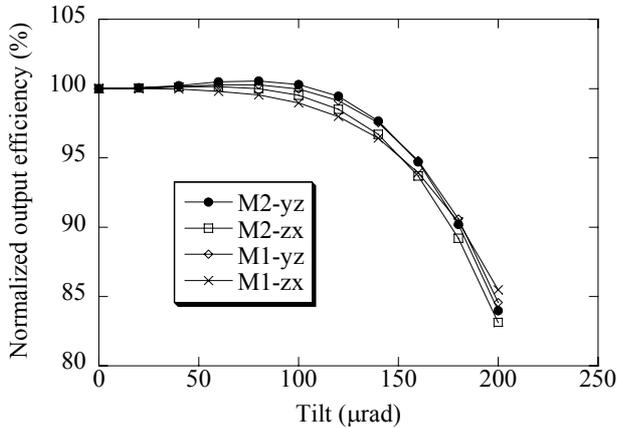


図2：ミラーの傾きの影響

対称な光共振器でのミラーの傾きの許容度 $\Delta\theta_M$ は光の波長 λ 、ミラー間隔 d 、 $g=1-d/R$ (R はミラーの曲率半径)であるとすると、

$$\Delta\theta_M \ll \left(\frac{2\lambda}{\pi d}\right)^{1/2} (1-g)^{1/4} (1+g)^{3/4} \quad (1)$$

で与えられ、原研 ERL-FEL の光共振器では $\Delta\theta_M < 378 \mu\text{rad}$ となり図2の結果と一致している。

2.3 ミラーの位置ずれの影響

ミラーの位置ずれの影響を調べるために、M1、M2それぞれがx方向、y方向それぞれの方向にずれたときの出力効率の変化を計算した。図2同様に完全にアラインしている状態の出力効率を100%として、その結果をプロットしたものが図3である。

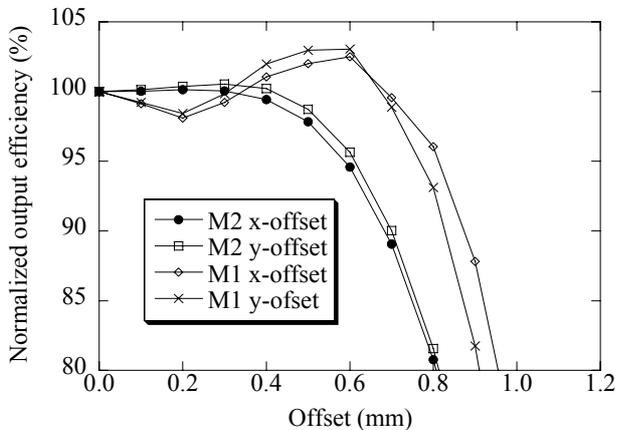


図3：ミラーの位置ずれの影響

M1についてはミラーの位置ずれの影響を非常に受けやすいことが分かり、出力変動を1%以下に抑え

ようとするならばミラーの位置ずれを0.1mm程度以下にする必要がある。このようにM1が位置ずれに対して敏感なのはセンターホールの位置ずれが光共振器内のモードに大きく影響するためと考えられる。

一方、M2についてはM1よりも位置ずれの影響を受けにくく、出力変動を1%以下にする際の位置精度はおよそ0.4mmである。この光共振器は近共中心型であるので、ミラーの傾き $\Delta\theta_M$ と位置ずれ Δ_M は

$$\Delta_M \approx R \cdot \Delta\theta_M \quad (2)$$

の関係にある。ただし、 R はミラーの曲率半径である。従って、位置ずれ0.4mmは傾き100 μ radにほぼ相当する。

2.3 ミラーの傾きによる位置ずれの影響の補償

近共中心型の光共振器ではミラーの位置ずれと傾きは、(2)式のような関係にあるので、位置ずれがあったとしても、ミラーを傾けることで補償できる可能性がある。そこで、位置ずれのあるミラーを傾けることで出力効率がどのように変化するかを計算した。

M1についての結果が図4である。位置ずれが大きくなるに連れ、ミラーを傾けることで出力効率が増加していることが分かる。しかし、平坦な部分が少なくなるので、このような状態で光共振器を使用するには、非常に高いアライメントの精度と床の振動などの擾乱を十分に小さくする必要がでてくる。したがって、安定な出力を得るためには、M1の位置精度は0.1mm以下である必要があるといえる。

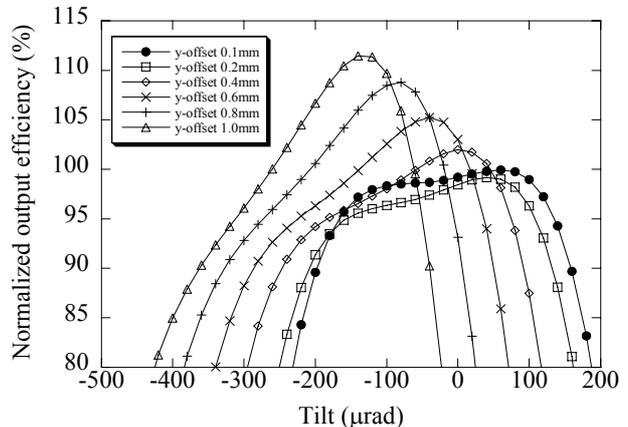


図4：傾きによる位置ずれの影響の補償 (M1)

M2についての結果が図5である。M2はたとえ1mmの位置ずれがあってもミラーを傾けることで補償でき平坦な部分を確保できることが分かる。

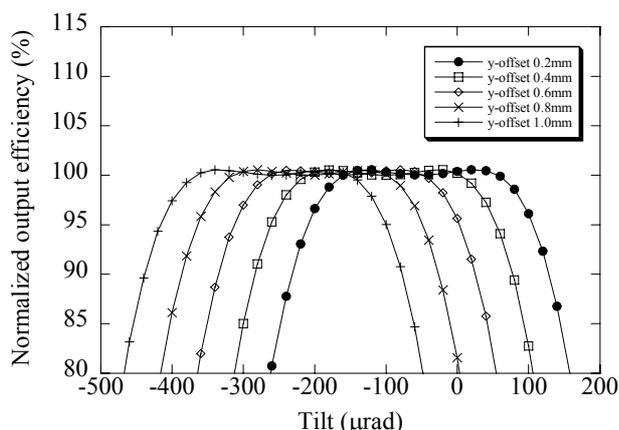


図5：傾きによる位置ずれの影響の補償 (M2)

3. ミラーの設置精度および床の振動

ここまでの評価の結果、出力変動を1%以下にするためには、位置、傾きの精度をそれぞれ0.1mm、100μrad以下にする必要があることが分かった。ミラーの設置誤差および床の振動によるミスアライメントはこれ以下にする必要がある。

ミラーの設置位置についてはレーザートランジット等を用いることで十分に0.1mm程度以下の精度を確保できる。傾きについては、He-Neレーザーを用いたアライメント系により20μrad以下の精度を実現している。

床の振動については加速度計により計測したところ1μm以下であった。床の振動の影響がどのように現れるかは明確ではないが最も影響が大きいのは、その振動がそのままジンバルに伝わってミラーが傾く場合である。ジンバルの腕の長さが約12.5cmであるので、この場合の傾きは8μradであるので十分に

無視できる量であると言える。

その他、建物の歪みなどによるミスアライメントについては現在調査・検討中である。

4. まとめ

原研ERL-FELではセンターホール出力の光共振器を採用している。この光共振器のミスアライメントの影響をFFT-FoxLiのコードにより評価を行った。その結果、出力変動を1%以下にするためには、位置、傾きの精度をそれぞれ0.1mm、100μrad以下にする必要があり、設置精度、床の振動によるミスアライメントはこの値以下であり、原研ERL-FELの光共振器は出力変動1%以下を実現するために十分なミスアライメントに対する許容度を有していることが分かった。

また、全反射ミラーについては位置ずれをミラーの傾きにより補正できること、出力ミラーについては位置をずらし、傾けることで出力を10%以上増加できる可能性があることも分かった。

参考文献

- [1] 永井良治、他、Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (2003) 315-317.
- [2] 永井良治、他、Proc. of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology (2003) 362-364.
- [3] 永井良治、他、"原研ERL-FEL用RFローレベル制御装置の改良"、本論文集
- [4] N. Nishimori, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A445** (2000) 432-436.
- [5] R. Nagai, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A358** (1995) 403-406.
- [6] R. Nagai, et al., "Optical Resonator Optimization of JAERI ERL-FEL", to be published in Proc. of FEL2003.
- [7] 永井良治、他、Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (2003) 381-383.