

[13P-31]

OPTIMIZATION OF OUTPUT COUPLER OF OPTICAL RESONATOR FOR THE JAERI FAR-INFRARED FREE-ELECTRON LASER

R. Nagai, R. Hajima, N. Nishimori, M. Sawamura, N. Kikuzawa, T. Shizuma and E. Minehara

Free-Electron Laser Laboratory, Advanced Photon Research Center, JAERI
2-4, Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki 319-11, Japan

Abstract

Optimum output coupler of optical resonator for the JAERI far-infrared free-electron laser was studied using a Fox-Li procedure optical mode calculation code. The output coupler was evaluated by efficiency factor of the optical resonator. The efficiency factor was calculated by the amount of output coupling and diffractive loss. It was found that the scraper output coupler was most efficient in far-infrared region free-electron laser.

原研遠赤外自由電子レーザー用光共振器出力結合の最適化

1. はじめに

日本原子力研究所（原研）では、15MeVの超伝導リニアックを用いて、遠赤外線領域での自由電子レーザー（FEL）において、当初の目標¹⁾である1kWを超える強度での発振に成功した²⁾。この成功には光共振器の出力結合の最適化が必要不可欠であった。

光共振器からのFEL光の取出しのための出力結合としては誘電体多層膜部分透過ミラーやブリュスタ板等を用いる方法、その他に出力側ミラーに設けた穴や出力側ミラーの直前におかれたスクレーパミラーで光の一部を切り取って出す方法がある。誘電体多層膜部分透過ミラーやブリュスタ板は誘電体の特性上、遠赤外線領域においては適当ではないので遠赤外線領域FELでは光の一部を切り出す方法が用いられる。

この方法の利点は光共振器の波長特性が非常に広い波長範囲において均一であることである。部分透過ミラーやブリュスタ板を用いた光共振器では誘電体の特性のため良好な特性の得られる波長範囲が限定されてしまうが、この方法で

はその様なことがなくFELの波長可変性が光共振器で制限されない。しかし、この方法にはいくつかの欠点がある。この様に出力結合器で光の一部を切り出すと、出力結合器の端で光が散乱され光共振器内での損失が大きくなってしまう。光の波長が変わると結合する部分での面積比が変わってしまうので、出力結合が波長の変化に伴い変化してしまう。また、出力結合する光の面積が波長に対して十分大きくない場合には、光を実験室等まで輸送する際の回折が問題となる。

これらの欠点を改善し、遠赤外線領域での最適な出力結合器について調べるために、センタホール型及び可変挿入スクレーパ型の出力結合器について比較検討を行った。また、可変挿入スクレーパ型については挿入する方向による相違点についても調べた。

2. 光共振器の評価

Fox-Liの手法³⁾を用いたコードにより、波長22 μm における光共振器内の固有モードを計算する。この固有モードより、出力結合及び回折

損失を算出する。算出された出力結合及び回折損失と反射損失から求められる光共振器の損失係数を用いて光共振器の評価を行った。

光共振器の損失係数は以下のようにして定義した。FEL の効率

$$\eta_{fel} = \eta_{out} \eta_{ext} = \frac{P_{fel}}{P_{beam}}$$

で定義され、 η_{out} 、 η_{ext} 、 P_{fel} 、 P_{beam} はそれぞれ光共振器の出力結合効率、FEL のエネルギー変換効率、FEL 出力、電子ビーム電力である。光共振器の出力結合効率は

$$\eta_{out} = \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{loss}}$$

で定義され、 α_{out} 、 α_{loss} はそれぞれ出力結合、光共振器の全損失である。また、パンチ長がスリッパ長と同程度以下でのスパイクモード発振の FEL のエネルギー変換効率は

$$\eta_{ext} \cong \rho \sqrt{\frac{L_b}{\alpha_{loss} L_c}} = \sqrt{\frac{4\pi N_w \rho^3}{\alpha_{loss}}}$$

で表され⁴⁾、 ρ 、 L_b 、 L_c 、 N_w はそれぞれ FEL パラメータ、パンチ長、コオペレーション長、アンジュレータの周期数である。FEL パラメータ、パンチ長、コオペレーション長は光共振器に無関係なので、光共振器の性能をあらわす効率係数 η_{opt} が

$$\eta_{opt} = \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{loss}^{3/2}} = \frac{P_{fel}}{P_{beam} \sqrt{4\pi N_w \rho^3}}$$

のように定義される。

次に示す原研 FEL 用光共振器においてセンタホール型、可変挿入スクレーパ型の出力結合器を用いた場合について光共振器の効率係数を計算した。光共振器は図 1 に示すような構成であり、主なパラメータを表 1 にまとめて示す。

出力結合器については図 2 に示すようなセンタホール型及び可変挿入スクレーパ型について検討した。また、可変挿入スクレーパ型についてはアンジュレータダクトの断面形状が図 3 の

ような長方形をしているので、その挿入方向の差による性能の差についても検討した。

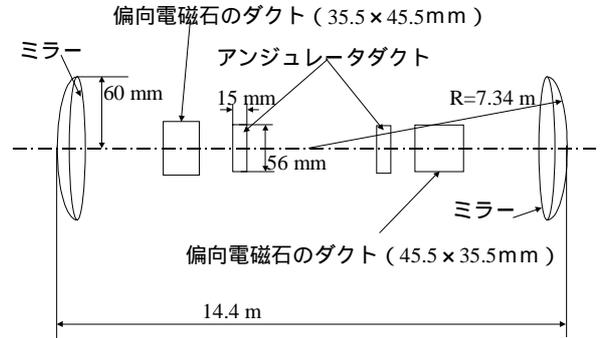
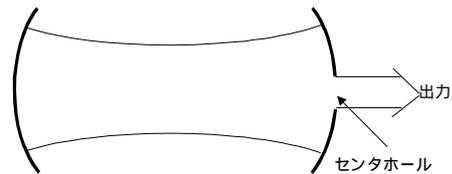


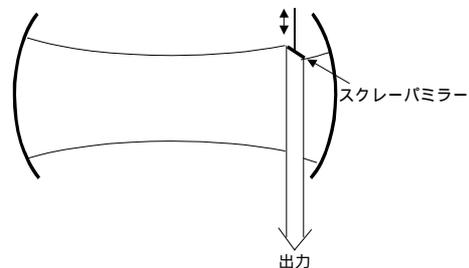
図 1 . 光共振器の構成

表 1 . 光共振器の主なパラメータ

光共振器長	14.4 m
ミラー半径	60 mm
ミラーの曲率半径	7.34 m
アンジュレータダクトの長さ	2 m
スクレーパミラー半径	20 mm
反射率	99.4%



(a) センタホール型



(b) 可変挿入スクレーパ型

図 2 . 出力結合器

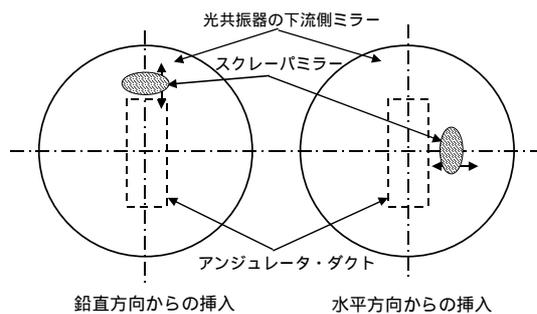


図3．可変挿入スクレーパ型の挿入方向

3．結果

センタホール型についてはホール径を変化させ、また可変挿入スクレーパ型では挿入位置を変化させて効率係数を計算した。効率係数の全損失に対する変化を図4に示す。ただし、反射損失を1.2%とした。この図から可変挿入スクレーパ型で鉛直方向から挿入した場合が最も効率的であることがわかる。いずれの場合の計算でも全損失が4%程度のところが最適値である。

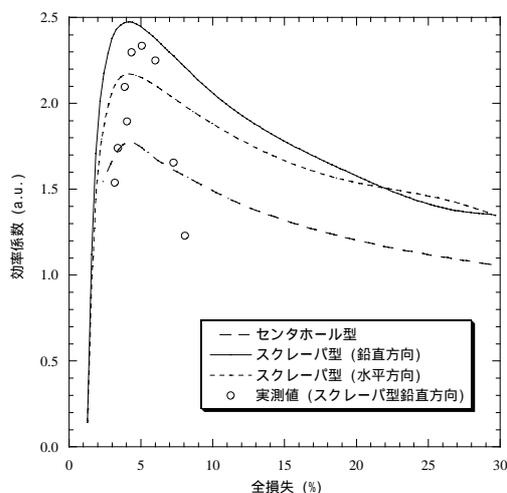


図4．光共振器の効率係数

出力結合器の端で光が散乱され、このために回折損失を生じて効率を悪くする。通常、出力結合器の端で散乱された光の多くはアンジュレータダクトで失われる。図4において可変挿入スクレーパ型では出力結合器の端での散乱がセンタホール型に比べて少ないために効率が良くなっている。また、アンジュレータダクトの開口の

大きい方向から、それを挿入することにより散乱された光の損失をさらに減らすことができていることがわかる。

スクレーパ型を鉛直方向から挿入した場合の実測値も図4に示す。全損失の少ない部分での変化の様子は計算結果とよく一致している。ピークが全損失の大きい方にシフトしているのは光共振器のミスアライメント等のために損失が増えているためである。また、全損失が大きくなってくると効率が悪くなるのは、正味のゲインが減りスパイクモード発振から通常の発振へと移行しているためと思われる。

4．まとめ

以上の結果から、原研遠赤外自由電子レーザーの光共振器に最適な出力結合器は可変挿入スクレーパ型を鉛直方向から挿入するものであり、全損失を4%程度とする挿入位置が最適な条件であることがわかった。

また、可変挿入スクレーパ型出力結合器を用いた光共振器では、非常に広い波長範囲において、スクレーパの挿入位置を調整することによって容易に最適な条件にすることができる。この利点により、下流側のミラーを3倍波だけを反射するものに交換しただけで3倍波の発振にも成功した。さらにセンタホール型に比べて出力結合の面積が大きいので、光を実験室等まで輸送する際の回折を少なくできる。

参考文献

- (1) E. Minehara, et al.: Nucl. Instr. and Meth. **A445** (2000) 183-186.
- (2) N. Nishimori, et al.: "Improvement of JAERI high power FEL", in this proceedings.
- (3) G. Fox and T. Li: The Bell System Technical Journal **40** (1961) 453-488.
- (4) N. Piovela, et al.: Phys. Rev. **E52** (1995) 5470-5486