

CONSTRUCTION OF THE INFRARED UNDULATOR AT LEBRA

K.Hayakawa^{*)}, T.Tanaka, Y.Hayakawa, Y.matsubara, K.Sato, I.Sato
 H.Nakazawa^{A)}, K.Yokoyama^{A)}, T.Sakai^{A)}, K.Kanno^{A)}, K.Ishiwata^{A)}, H.Inokawa^{A)}, Y.Nakamura^{A)}

Atomic Energy Research Institute of Nihon University
 7-24-1 Funabashi Narashinodai 274-8501 Japan

^{A)}Graduate School of Science and Technology, Nihon University
 7-24-1 Funabashi Narashinodai 274-8501 Japan

Abstract

The new undulator has been constructed for infrared FEL at LEBRA. Pieces of permanent magnet are set on the same mount as the visible-ultraviolet undulator which magnets are damaged by radiation and removed. The period of 48mm is decided to cover the FEL wavelength range from 1 to 5 μm correspondence to the electron energy of 50 to 100MeV. To maximize small signal gain, minimum gap width is selected 29mm for obtaining the K of unity at which small signal gain is peaked. Two types of mirrors are prepared, Au courted one and dielectric multi-courtred one. The Au courted mirrors are for using wide range of wavelength. The multi-courtred mirrors are for wavelength of 1.5μm. First light was observed at May in this year.

日大FEL赤外アンジュレーターの製作

1. はじめに

昨年度、永久磁石の放射線劣化によって、可視・紫外用のアンジュレーターが使用不可能になった[1,2]。この永久磁石は放射化物となり、メーカーでは作業できないため、着磁装置から製作しなければならず、再着磁には相当の時間がかかることが予想された。新たに製作することについてはこの問題はないので、待ち時間を利用して赤外領域のアンジュレーターを新たに製作し、実験を行うことにした。ここでは永久磁石の形状及び光キャビティのパラメーターの決定過程等について報告する。

2. 小信号利得と K 値

自由電子レーザーはもともと利得が小さいので、少しでもこれを大きくする条件を作らなければならない。アンジュレーター中の光ビームの太さは、電子ビームと重なり合っている限り、小さければ小さいほど電場が強くなり、利得も大きくなる。光キャビティの中で、アンジュレーターの長さにならって光が最も平行ビームに近く、細くなる条件は、レーリー長をアンジュレーター長の半分の長さにするこゝで実現する。この条件の下で、自由電子レーザーの小信号利得 G を K 及び $I_a N$ の関数として求めると、次のようになる。

$$G = 0.54 p^2 \left(\frac{I}{I_a} \right) \frac{8K^2 N^2}{g(1+K^2)} \{J_0(\mathbf{x}) - J_1(\mathbf{x})\}^2$$

ここで $\mathbf{x} = \frac{K^2}{2(1+K^2)}$ 、これは、他の条件が同じなら

ば、利得は電子エネルギーに反比例して大きくなることを意味している。言い換えれば、共振波長の平方根に比例して利得が大きくなる。また、周期数の二乗に比例する。図1は、周期数 50 の場合に波長をパラメー

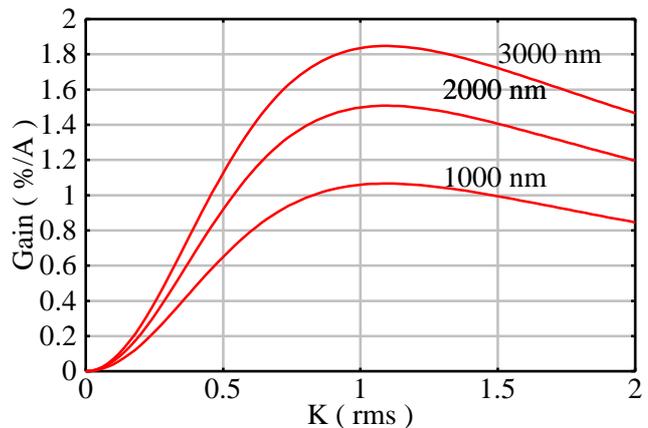


図1. $N=50$ の場合の K 値に対する利得の変化、パラメーターは共振波長

^{*)}K.Hayakawa, 047-469-5489, hayakawa@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

ターとして、 K 値(rms)と 1A あたりのゲインをプロットしたものである。この図から分かるように、利得は $K=1.1$ のあたりにピークを持つ。また、アンジュレーター放射光の基本波の強度は $K = 0.7 \sim 0.8$ あたりで最大になることを合わせて考えると、 K は 1 程度の値を持つことが有利である。但し、この利得は電子ビームが理想的な性質（エミッタンス、エネルギー幅共にゼロ）を持つ場合の計算であるから、実際にはこの半分程度の利得だと思わなければならない。

3. 各種パラメーター

小信号利得に関する以上の考察をふまえ、次のこと考慮してアンジュレーターのパラメーターを決定した。

- 1) ギャップ調整装置は可視・紫外用 (2400mm) と共用する。
- 2) 目標波長 $1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 。
- 3) ギャップをできるだけ大きくする。
- 4) $K = 1$ 前後で使用できるようにする。

現在製作可能な永久磁石の残留磁束密度は 1.28T 程度でなので、この値を基にギャップ間隔と K 値との関

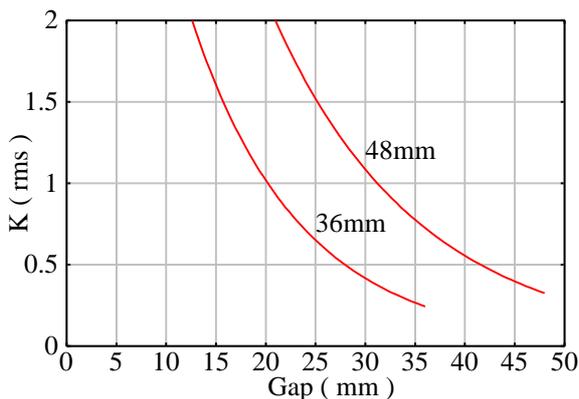


図 2. 各周期長に対するギャップと K 値の関係。

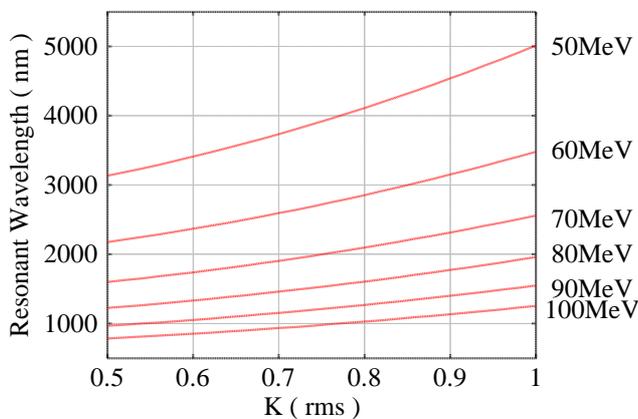


図 3. 共振波長と K 値の関係、パラメーターは電子エネルギー。

係を計算した。周期長 36 mm と 48 mm の場合について図 2 に示す。 $K = 1$ となるギャップの大きさは、周期長 36mm 及び 48mm の場合、それぞれ 20mm 及び 31mm となる。この計算では、磁石片の高さ、すなわちギャップ方向の長さが 35mm の場合の計算であるが、この寸法はこれ以上大きくしてもほとんど結果に影響しない。アンジュレーター長を一定とした場合、当然周期長が短いほど周期数が多くなる。先に示したように自由電子レーザーの利得は、周期数の二乗に比例し、また、同じ波長の光を得るのにも低い電子エネルギーでよく、これも利得を大きくする。この点からは周期

表 1 赤外用アンジュレーターのパラメーター

周期長	48	mm
周期数	50	
ギャップ	> 29	mm
K	< 1.1	

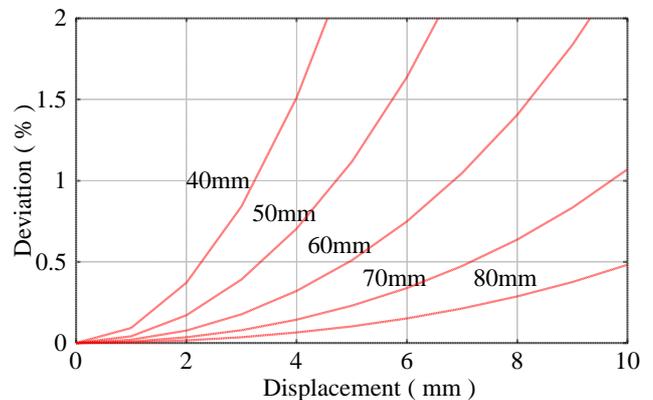


図 4. 中心軌道からのずれに対する磁場の変化。パラメーターは磁石片の幅。

長 36mm としたほうが良い。しかし、より長波長まで使えるように、また可視・紫外用アンジュレーター永久磁石の放射線劣化の経験を踏まえて、ギャップ間隔を大きくできるように、周期長 48mm を採用することにした。従って周期数は 50 となる。表 1 に決定したパラメーターを示す。また、電子ビームエネルギーをパラメーターとした K 値と基本波の共振波長の関係を図 3 に示す。この図から分かるように、エネルギーを 50MeV まで下げることができれば、 $5 \mu\text{m}$ までの実験が可能になる。

次に、永久磁石片の寸法を決めなければならない。ハルバッハ型の構成にすると軸方向の寸法は 12mm に決まってしまう。高さは先に述べたようにあまり磁場分布に影響しないので、紫外・可視用の場合と同じ 35mm とした。幅すなわち軸に垂直方向の寸法は中心面上で、軸に垂直方向の磁場分布に影響する。この関

係を図4に示す。この寸法が小さいと、中心軸から外れた場所に於ける磁場の変化が大きく、実効的にKの値が変化し、スペクトルを悪化させると考えられる。ギャップ調整装置に取り付けられる限界のサイズ80mmを採用した。この場合中心から5mmずれた位置で約0.1%の変化である。

4. 光共振器

光共振器のミラーホルダーは紫外・可視用アンジュレーターを共用するものとする、ミラー間隔は6.178mである。アンジュレーターの中心は光共振器の中心から0.11mほど上流側にずれているが、前後の鏡は同じ曲率半径にして、光ビームのウエストは光共振器の中央にできるようにした。鏡は広帯域で使えるAuコートミラーと1.5 μ m専用の誘電体多層膜ミラーを製作した。前述したように、アンジュレーター中で、光ビームが平行ビームに近く、最も細くなる条件はレーリー長 Z_R をアンジュレーター長の半分の長さにする事である。すなわち、 $Z_R=1.2$ mである。これに対応する鏡の曲率半径は3.788mとなる。一方、光が安定に鏡の間を往復する条件の曲率半径の限界が空洞長の半分すなわち、3.359mなので、 $Z_R=1.2$ mとする鏡に曲率半径はこれより大きく、安定条件を満足している。

4.1 金コートミラー

自由電子レーザーを波長可変にして使うには、広い帯域にわたって高い反射率を持つ鏡が必要である。Auコートは赤外領域の広い帯域に対して高い反射率を持っているので(1 μ mで98%、>1.5 μ mでは99%以上)、この用途に適している。光の取り出しは一方の鏡の中心に穴を穿つ方法を採用した。取り出された光は光共振器にとってはロスとなるので、あまり大きくすることはできない。鏡メーカーで標準品として持っている最小穴径が0.5mmであったので、この値を採用することにした。取り出される光の量は穴の大きさを決めれば、鏡の場所に於けるスポットサイズで決まる。鏡の曲率半径を上記の最適条件に近い3.7mとしたとき、レーリー長は1.37mとなる。ガウシャンビームを仮定すると、1 μ mの光では取り出される割合は3.3%となる。またキャビティー中心に於けるスポットサイズは1.3mmである。この波長に対しては穴の大きさがやや大きすぎたと思われる。

4.2 誘電体多層膜ミラー

このアンジュレーターによる最初の発振実験は、既存のモノクロメーター及びディテクターを使うことを前提に考えて、1.5 μ mで行う。金属コートミラーのように、鏡に穴をあけて光を取り出す方式は、波長が短

い場合には制約が多いので、この波長専用の誘電体多層膜ミラーを製作することにした。誘電体多層膜ミラーは狭い帯域に対しては反射率を自由にコントロールできるので、最適な条件を作り出すことができる。曲率半径4m、反射率99.25%のものを2枚製作して使用することにした。

5. アンジュレーター放射光

今回製作した赤外アンジュレーターの放射光のスペクトルを評価した。Kパラメーターの値は1.1、電子ビームの条件は、エネルギー100MeV、エネルギー幅 $\pm 0.5\%$ 、エミッタンス0.15mm.mrad、最小ビーム半径0.5mm、電流200mAである。電子ビームのアンジュレーター内でベータートロン振動は考慮していない。電子ビームの進行方向真正面から見た時に得られるスペクトル例を図5に示す。

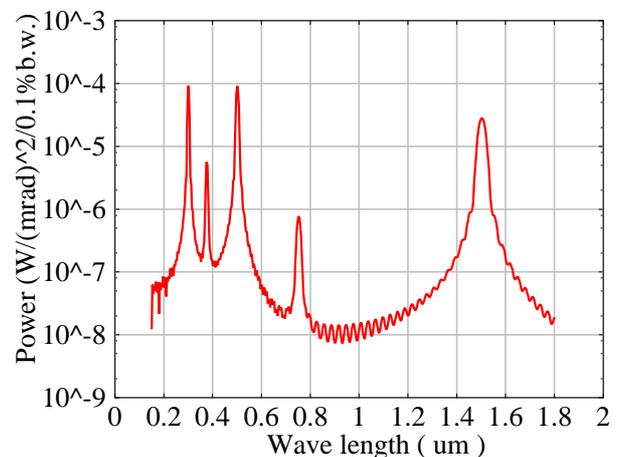


図5. 100MeVの電子ビームによる赤外用アンジュレーターからの放射光のスペクトル。

6. まとめ

今回製作した赤外アンジュレーターを使った実験は5月から開始され、アンジュレーター放射光を観測した[3]。発振波長を1~5 μ mと設定したが、短波長側は鏡の取り出し穴の関係で、共振器のロスが大きく発振は難しそうである。これは本質的な困難ではないが、当面1.5 μ m以上の波長での運用になりそうである。長波長側は、電子エネルギーをビームの性質を悪化させずにどこまで下げられるかによる。これはまだ試みていないので、今後の課題である。

参考文献

- [1] I.Sato, et al. Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, Wako (1999) 37
- [2] I.Sato, et al. Proceedings of this meeting.
- [3] Y.Hayakawa, et al. Proceedings of this meeting