

## STORAGE RING FREE ELECTRON LASER EXPERIMENTS IN THE NEAR-INFRARED REGION AT THE AIST

N. Sei, K. Yamada, H. Ogawa, M. Yasumoto

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

### Abstract

Studies of free electron lasers (FELs) in a broad-band region have been advanced with the compact storage ring NIJI-IV at the AIST. The optical klystron ETLOK-III for the infrared FEL has been installed in the NIJI-IV, and the spontaneous emissions from the ETLOK-III have been measured by a monochromator with a photo diode array. New optical cavity chambers which can suppress low-frequency vibrations have been set at the both ends of the north straight section in the NIJI-IV. We will start the FEL experiments in the near-infrared region in this coming autumn.

### 産総研における近赤外自由電子レーザー発振実験

#### 1. はじめに

産業技術総合研究所（産総研）では、自由電子レーザー（FEL）専用小型電子蓄積リングNIJI-IVを用いて、蓄積リングFELの広帯域化及び産業利用への貢献を目指した研究を進めている。FELの短波長化においては、FEL最短波長記録の更新や国内で初めて真空紫外域で発振を実現した [1,2]。また、FELの応用実験においても、FELを光源とした光電子顕微鏡により遷移金属表面における触媒反応の実時間観測システムを開発中である [3]。そして新たに、FEL発振の長波長化に取り組んでおり、1-10 $\mu\text{m}$ という近赤外～中赤外域でのFEL発振を目指している [4]。期待されるNIJI-IV FELの平均出力は波長10 $\mu\text{m}$ において1mW程度と高くはない。しかしながら、光共振器内に閉じこめられた光パルス強度は数Wに達するため、蓄積リング電子ビームとの逆コンプトン散乱により、0.1-1MeVのエネルギーを持つ準単色X線が毎秒あたり10<sup>5</sup>程度得ることができるだろう [5]。近赤外～中赤外域の波長帯は、今では商業ベースで光パラメトリック発振器のような高出力の波長可変光源が入手できるが、電子ビームとの相互作用を調べるにはFELは有用である。

赤外FEL開発のための挿入光源である光クライストロンETLOK-IIIは、2004年にNIJI-IV長直線部の一つに挿入され、自発放出光の基本波や3次高調波が観測されている [6]。この長直線部の両端に赤外FELのための光共振器が今年2月に設置された。この光共振器には2枚の共振器ミラーを設置でき、真空を破ることなく切り替えることができる。架台には1.3tの中空の御影石を使用し、光共振機軸における床からの振動を80%以上低減できた。この振動の低減により、赤外FELは出力の安定したFEL発振が容易になると期待できる。

共振器ミラーには、近赤外域の入口である波長850nmに反射率中心を持つ誘電体多層膜ミラーを用意した。現在は高周波加速空洞の不具合のため電子ビーム蓄積が不可能であるが、今秋からFEL発振実験を開始する予定である。以下では、近赤外域FEL発振実験に至るまでの開発要素について概説する。

#### 2. NIJI-IV電子ビーム

NIJI-IVはレーストラック型をした周長29.6mの小型電子蓄積リングで、triple-bend-achromaticラティスを採用している [7]。蓄積リングNIJI-IVは二つの長直線部を有しているが、その長さは周長に比して長く7.5mである。二つの長直線部にはそれぞれ光クライストロンが設置されており、南側には紫外域用のETLOK-II、北側には赤外域用のETLOK-IIIがある。電子ビームのエネルギーは240-450MeVで運転できるが、FEL実験は入射エネルギーである310-340MeVでほとんど行われている。高周波加速空洞の共鳴周波数は162.2MHzで、マルチバンチモードでは16個のバンチが周回している。FEL実験では、バンチ間相互作用による電子ビーム品質の劣化を防ぐために、RF-KO法を用いてシングルバンチで運転しており、シングルバンチモードでの最大電流量

表1 主なNIJI-IV電子ビームの設計値

Horizontal betatron tune	2.28
Vertical betatron tune	1.21
Momentum compaction factor	0.089
Natural emittance	$5.6 \times 10^{-8}$ m rad
Energy spread	$2.6 \times 10^{-4}$

は約20mAである。ベータatronチューンは水平が2.28、垂直が1.21であり、挿入光源中央における微小電流時のビームサイズは電子エネルギー340MeVの時に、水平・垂直方向に対してそれぞれ0.8、0.2mmであった。表1にエネルギー340MeVの場合の主なNIJI-IV電子ビームパラメータの設計値を示す。

実際の電子ビームは蓄積電流の増加につれてビーム不安定性を誘起するため、バンチ内の電子密度の増加率は鈍くなる。NIJI-IVでは蓄積電流が15mAを超えるとマイクロウェーブ不安定性が発現するのだが、それでもピーク電子密度は $1.4 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ を超えることが測定された。また、ETLOK-IIを用いたエネルギー拡がりの測定でも、 $4 \times 10^{-4}$ 以下であることが明らかになり、高いFEL利得が期待できる。

### 3. 挿入光源

赤外FEL用挿入光源である光クライストロンETLOK-IIIは、既存の3m平面アンジュレータを改造して製作された [4]。分散部とアンジュレータ部は独立にその磁石間隙を制御できるが、分散部の磁石間隙はアンジュレータ部のそれに38mmを加えた大きさを超えることはできない。磁石間隙の可動域は、アンジュレータ部が36~150mmで、分散部が42~188mmとなっている。アンジュレータ部は周期長が20cmで、片側に7周期ある。磁場測定から評価した最大K値は10.4であり、図1が示すように、近赤外以下の波長域では磁石間隙と自発放出光の中心波長との関係が計算とほぼ一致した。NIJI-IVのエネルギー拡がりは比較的小さいので、分散部を大きく取れるとFEL利得にとって有効である。最大波長である $\sim 10 \mu\text{m}$ においてパラメータ $N_d$ が90以上とれるように、分散部の長さを72cmとした。しかし、分散部磁石内で電子ビームが大きく蛇行するため、分散部磁石磁場が水平方向に一様でないことが原因となり、磁石間隙が狭い時には電子ビームが分散部で偏向を生じてしまう。この影響を取り除くため、分散部にはステアリングコイルと磁石両端にショートヨークが取り付けられている。

ETLOK-IIIから放射された自発放出光スペクトルの測定には、フォトダイオードアレイを連結した空間分解能0.2nmの分光器を使用した。フォトダイオードの有効感度波長は可視から $1 \mu\text{m}$ 付近までなので、それ以上の波長に対しては基本波ではなく可視領域の3次高調波を観測した。軸対称な自発放出光が得られるように、4重極磁石付近に取り付けられたポジションモニターを使用して、電子ビーム軌道がアンジュレータ軸と平行になるように調整している。基本波の波長が $2 \mu\text{m}$ 以下の領域では、良好なモジュレーションを持つ自発放出光スペクトルが得られており、測定系の影響を取り除いて評価したエネルギー拡がりは $2.7 \sim 3.1 \times 10^{-4}$ であった [6]。長波長になる

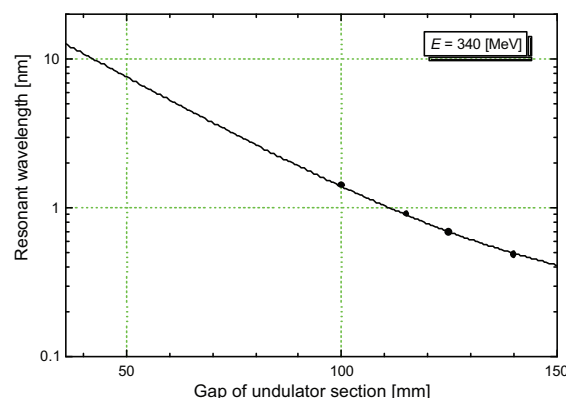


図1 磁場測定から評価した磁石間隙と共振波長の関係(実線)と観測結果(黒丸)。電子エネルギーは340MeVである。

ほどその評価値が増大傾向にあることから、分散部における電子ビーム偏向の効果が現れていたと考えられる。上記した電子ビーム偏向に対する補正を用いて自発放出光スペクトルをまだ測定しておらず、早急にその測定を行いたいと考えている。

### 4. 光共振器

利得の小さいFEL装置で安定なFEL発振を実現するには、振動の少ない光共振器が不可欠である。蓄積リングFELでは、電子バンチと共振器内の光パルスとの同期に数 $\mu\text{m}$ のずれがあると、マクロパルスを形成してしまいcw発振しないことが観測されている [8]。FEL利得が3~4%、共振器損失が1~2%であった蓄積リングNIJI-IVの紫外FEL実験の場合、FELの線幅が一定となるcw発振を維持するには、電子バンチと光パルスとの同期を $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以内に調整する必要があった [9]。赤外FELでも同程度のFEL利得と共振器損失の比を期待できるため、光共振器の共振機軸に対する振動許容量は約 $0.5 \mu\text{m}$ であると考えられる。

そこで、図2が示すような、1.3tの重量を持つ御影石の架台に据え付けられた光共振器を開発した。この架台には中央に穴が開けられており、共振器ミラー駆動部の重心を低くできる。蓄積リングの真空チェンバーとの接続部には防振ダンパーを挿入することで、蓄積リングからの低周波振動を除去することができる。重い架台を採用した理由は設置場所において振幅の大きい低周波振動が観測されたことである。図3は上流側光軸方向における光共振器設置前の床面上と光共振器設置後のミラーチェンバー上での振動スペクトルを示している。この図が示すように、4Hz以下の周波数帯に大きな振動成分が観測されていたが、設置した光共振器上ではその成分が十分に抑制されていることが確かめられた。

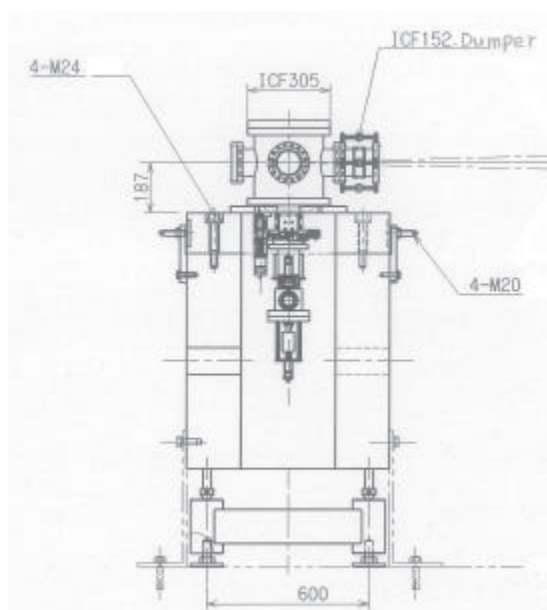


図2 赤外用光共振器の立面図。重量の調整とミラー駆動部で生じる熱の放散のために穴が設けられている。

上流・下流共に床の振動を80%程度除去しており、光軸上の変位振幅を0.5 $\mu\text{m}$ 以下にすることが可能になるであろう。

ミラーチェンバーは真空内にミラーホルダーを格納しており、このミラーホルダーは3軸並進について独立に位置制御できる。2回転については干渉を補償するように制御することで独立した動きを実現している。光軸方向に対する位置分解能は0.1 $\mu\text{m}$ 、回転角の分解能は4 $\mu\text{rad}$ 以下である。また、ミラーホルダーには2インチまでの2枚のミラーを装着でき、真空中で切り替えることができる。透過口径は46mmあり、波長10 $\mu\text{m}$ でも光共振器による回折損失はほぼ無視することができる。

最初の近赤外FEL実験用に波長850nmを中心とする2種類の誘電体多層膜ミラーを用意した。曲率半径はいずれも10mである。反射率の高い方のミラーでは一枚あたりの反射率は99.9%以上で、透過率は600ppmである。このミラーは波長770nmでも99%以上の反射率があるため、ストリークカメラを用いた従来の共振器長調整が可能である。

## 5. まとめ

産総研で進めている蓄積リングNIJI-IVを用いた近赤外FEL実験について概説した。赤外用光クライストロンETLOK-IIIをNIJI-IVに設置し、可視域で自発放出光の基本波及び3次高調波スペクトルの測定を行った。それらから評価されたエネルギー拡がり、設計値のそれとほぼ一致していた。電子ビーム特性から計算された最大FEL利

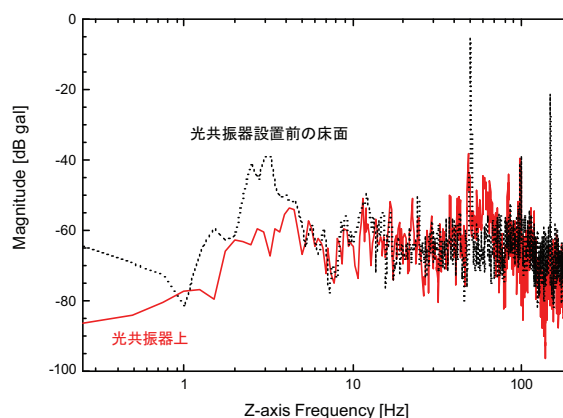


図3 光共振器設置前における床面上と設置後のミラーチェンバー上との振動スペクトル。

得は、曲率半径が10mの共振器ミラーを使用しても、近赤外域では15mAの電流値で1.2%以上あることがわかった。共振器ミラーの曲率半径を短くすることで、最大FEL利得は2%以上にすることができる。低振動の光共振器を開発し、NIJI-IVの赤外FELビームライン上に設置した。この光共振器は共振器軸方向の振動振幅を80%程度抑制している。99.9%以上の高反射率をもつ共振器ミラーを入手し、今秋以降に850nmを中心とした近赤外FEL実験を開始する予定である。

## 参考文献

- [1] K. Yamada *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A445** (2000) 173.
- [2] K. Yamada *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A528** (2004) 268.
- [3] H. Ogawa *et al.*, Proc. of FEL2006, Berlin, 2006, pp. 357-377.
- [4] N. Sei *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1595.
- [5] N. Sei *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A483** (2002) 429.
- [6] N. Sei *et al.*, Proc. of FEL2004, Trieste, 2004, pp. 307-310.
- [7] T. Yamasaki *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A331** (1993) 27.
- [8] M. Billardon *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. **21** (1985) 805.
- [9] N. Sei *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) 3644.