

Recent Progress in the Storage Ring NIJI-IV Free Electron Laser

H. Ogawa¹, K. Yamada, N. Sei, M. Yasumoto, K. Y. Watanabe

Research Institute of Instrumentation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

Abstract

A compact storage ring NIJI-IV free electron laser (FEL) is being developed as a tunable light source which covers a wide wavelength range from the VUV to the IR. To shorten the FEL wavelength in the VUV region, the optical cavity mirror was improved and the original loss of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ multilayer mirror around 195nm was decreased 30% compared with that of the previous one. New optical cavity system equipped with two remotely interchangeable mirrors was installed for the UV/VUV FEL to stabilize the laser and also to extend the tuning range. As for construction of the IR FEL, modification of the beam transport system to make space for installation of the optical cavity was completed.

蓄積リングNIJI-IV自由電子レーザーの開発の現状

1. はじめに

産総研では小型電子蓄積リングNIJI-IVを用いて自由電子レーザー(FEL)の広帯域化(真空紫外 - 赤外域)とその利用研究を行っている。NIJI-IVは周長29.6mと蓄積リングとしては小型でありながら長尺アンジュレータを設置できるような7.25mの長直線部を持つレーストラック型をしている(図1)。この長直線部に6.3mの長尺光クライストロンETLOK-IIが設置されている。1992年に595 - 488nmの可視域でFEL発振に成功して以来、NIJI-IV FELシステムの高度化・高性能化によりFEL発振の短波長化を進めてきた。1998年には発振波長は212nm付近の遠紫外域(当時の世界最短波長)に達した。さらに、低インピーダンス型真空チャンバーの導入によりFELゲインが著しく向上した結果、2003年に198 - 205nmの波長域のFEL発振に成功し、国内で初めて真空紫外域に到達した^[1]。2004年には赤外域でのFEL発振を目指しETLOK-IIの反対側の直線部に3.6mの赤外用光クライストロンETLOK-IIIを設置した。FEL発振波長は、高次高調波の利用を含め0.4 - 10 μm を目標としてい

る。ETLOK-IIIからの自発放出光スペクトラムより導出したFELゲインは最大4%の利得が得られている^[2]。この波長域では低損失の共振器ミラーを手に入れるため、FEL発振は充分可能であると考えられ、真空紫外 - 赤外域を1台の装置で発振可能な広帯域FEL装置の実現を目指して開発を行っている。

2. VUV/IR FELの開発

2.1 VUV FEL短波長化

更なるFEL発振の短波長化を目指し、193-195nm付近での発振実験を行ってきたが現在まで発振を得るに至っていない。これは、真空紫外域で光共振器損失が急激に増大するためであり、低損失なミラーの開発が必要である。可視より短波長域ではFELゲインが小さいため誘電体多層膜ミラーを使用しており220nm以下の波長域に対しては材質として $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ を採用している。図2にアンジュレータ光照射前後の共振器損失をプロットした。初期状態が低損失なミラーでもアンジュレータからの強い放射

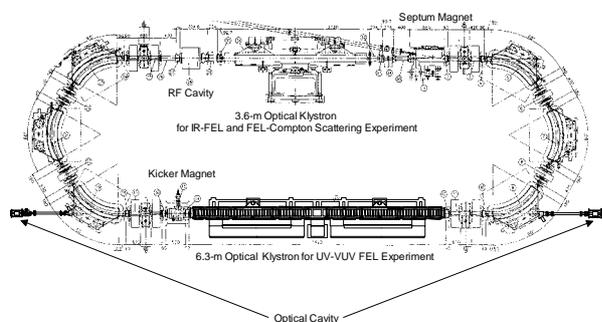


図1: NIJI-IV FELシステム

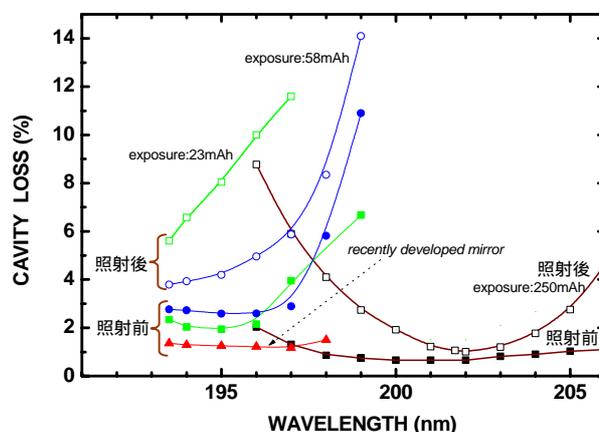


図2: 共振器損失の波長依存性

¹ E-mail: ogawa.h@aist.go.jp

光にさらされると、ミラー表面に微量のカーボンが堆積したり、誘電体内部に欠陥が生じることで損失が大きくなる。参考のため202nm付近に反射率を最適化した共振器ミラーの照射前後の共振器損失を示した。202nm付近では光照射後でもほとんど劣化が進まないミラーが作成できているが、195nm付近に最適化したミラーでは、これまで異なる誘電体蒸着条件で2種類のミラーを製作したが、光照射後に急激な損失の増大が起っていた。そこで新たに蒸着条件を変えミラーを製作したところ、初期特性が共振器損失で1.2%と従来と比較して約30%低損失なミラーが得られるようになった。今後、このミラーを用いてアンジュレタ光照射によって生ずるミラーの劣化を測定し、195nm以下のFEL短波長化実験を行う予定である。

2.2 UV/VUV光共振器

FEL発振の時間構造にこれまで不安定性が観測されており、発振スペクトル・時間構造の安定化を図るため高安定な光共振器システムを製作した(図3)。以前のシステムで脆弱であった架台を重量約2トンの御影石製にすることにより振動を抑制した。さらに誘電体多層膜ミラーの有限な反射率特性で制限されていたFEL発振波長のチューニング幅を拡張するため光共振器用真空チャンバーを改良した。このチャンバーでは反射率の中心波長が異なる2種類の誘電体多層膜ミラーを真空中でリニアガイドにより位置再現性良く交換できる構造になっている。5軸の駆動ステージはNewport社のM-MTM100PP.1、M-ILS50PP、M-MVN80、SL20ANを用いた。14.8mの共振器長を $0.1\mu\text{m}$ の精度で、またミラーアライメントを $0.8\mu\text{rad}$ の精度で調整可能である。現在、光共振器の設置が完了し動作確認試験を行っている。FEL発振の安定化と広帯域化により、光電子放出顕微鏡などのFEL利用研究において利便性の向上が期待できる。



図3：UV/VUV FEL光共振器システム

2.3 IR FELの開発

通常、中赤外域のFELでは加速器としてリニアックが用いられているが、蓄積リングFELはリニアックFELと比べ出力では劣るものの、FEL発振の線幅は 10^{-4} と1桁良く、波長の安定性にも優れている。また、平均出力は波長 $10\mu\text{m}$ で1mW得られ、光子数では 10^{17} photons/sあり一般的なシンクロトロン放射光に比べ十分大きな出力が得られる。そこでNIJI-IVではETLOK-IIIを用いてIR FELを開発している^[3]。

これまで、北側の長直線部に3.55mのETLOK-IIIを挿入後、コミッショニングを行い200mA以上の電子蓄積に成功している。ETLOK-IIIの自発放射光スペクトルから導出した利得は2%以上あり、この波長域では高反射率なミラーが入手可能なため、FEL発振が充分可能と考えられる。現在、IR FEL用の光共振器の設計を行っている。設計ではUV/VUV FEL用のミラー径は30mmであるのに対し、回折によるFEL利得損失を考慮してIR FEL用では50mmのミラー径とし、真空中で2枚のミラーを交換できる仕様を考えている。またUV/VUV FEL用に比べミラー径を大きくしたため必然的に真空チャンバーが大きくなり、その結果重量が増加するため、位置調整用の駆動ステージの耐加重を強化している。

NIJI-IVの周長の半分である14.8mに共振器長を設定する予定であるが、NIJI-IVの電子ビーム輸送系が蓄積リングに接近して設置されていたためIR FEL用の光共振器を導入するスペースがこれまでなかった。また、輸送系が蓄積リングに近すぎたため輸送系の偏向磁石の漏れ磁場により蓄積電子軌道が約0.2mmシフトすることが観測されていた。そこで図4に示すようにビーム輸送系を従来の位置から約2.5m蓄積リングの外側へ移動する改造を行った。現在、新輸送系にビームを通しコミッショニングを行っている途中である。



図4：電子ビーム輸送系

3 . DUV FELの利用研究

DUV/VUV FEL利用実験として、200nm付近のFELに光電子放出顕微鏡(PEEM)を組合せ、遷移金属表面における触媒化学反応の実時間観測の研究に着手した^[4]。この利用研究のため200nm付近のFEL発振後出力の増大に取り組み、共振器ミラーの透過率を0.5%に増加させるとともに、蓄積電子ビームエネルギーを310MeVから340MeVに上げることで、従来に比べ出力が約1桁増大しその結果0.5mW得られるようになった。FEL-PEEM装置を図5に示す。大気中を輸送したFEL(波長202nm)をレンズで真空中の試料表面に集光し照射した。表面の仕事関数の違いに依って得られる光電子のコントラストは、電子レンズ系で拡大されてMCP上に結像されると同時に増幅され、蛍光スクリーン上に投影される。その像をCCDカメラでモニターし、リアルタイムの実空間映像が得られる。

一例として遷移金属Pd(111)面に吸着したCOの酸化反応($2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$)の実時間観測の予備実験を行った。Pd表面でのCOおよびO₂ガスの吸着分子の存在により、場所による光電子量の差からCOとO₂が反応する様子を観測した(図5挿入図)。基板温度、反応ガス分圧をパラメータとして、COとO₂の吸着、CO₂の脱離を実時間観測することに成功している。このように、FELとPEEMを組み合わせた本システムが動的現象のイメージングツールとして有効であることを示すことができた。現在、本格的なPEEM実験に向けて、FELの更なる波長可変幅の拡大と出力の増大に取り組んでいる。

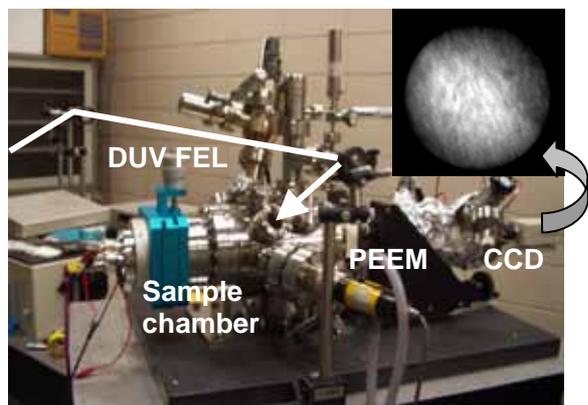


図5 : FEL-PEEMシステム

4 . まとめ

小型電子蓄積リングNIJI-IV FELの現状について述べた。VUV FELの開発では195nm以下でのFEL発振の短波長化を目指し、誘電体多層膜ミラーの高度化を行った。また、UV/VUV FELの発振スペクトル・時間構造の安定化のため高安定な光共振器システムを導入した。さらにIR FELの開発では、光共振器導入のためビーム輸送系の改造や光共振器の製作・設

置を今年度中に行うなど、現在、IR FEL発振に向けた準備を進めている。

参考文献

- [1] K.Yamada, N.Sei, H.Ogawa, M.Yasumoto, T.Mikado, Nucl. Instr. and Meth. A528 (2004) 268.
- [2] N.Sei, K.Yamada, H.Ogawa, M.Yasumoto, K.Y.Watanabe, Proceedings of the 27th International Free Electron Laser Conference, 2005, 469.
- [3] N.Sei, K.Yamada, H.Ogawa, M.Yasumoto, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2005, 681.
- [4] H.Ogawa, K.Yamada, N.Sei, M.Yasumoto, K.Y.Watanabe, Proceedings of the 27th International Free Electron Laser Conference, 2005, 467.