

Development of storage ring free electron lasers in the VUV 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 storage ring free electron lasers (SRFELs) have been advanced with the compact storage ring NIJI-IV at the AIST. The first VUV lasing in Japan was achieved with the NIJI-IV FEL system last year. Temporal and spectral characteristics of the SRFELs were measured in the UV and VUV regions. It was confirmed that SRFELs were useful as the right source of photoelectron emission microscopy (PEEM) in the preliminary experiments.

産総研における真空紫外蓄積リング自由電子レーザーの開発

1. はじめに

産総研では、自由電子レーザー専用の小型蓄積リングNIJI-IVを用いて蓄積リング自由電子レーザー(SRFEL)の広帯域化の研究を進めている。NIJI-IVには2本の7.25m長直線部があり、最近北側の長直線部に3.6mの赤外用光クライストロンを挿入した[1]。この光クライストロンETLOK-IIIは、周期数7で周期長20cmの二つのアンジュレータ部と75cmの分散部とで構成されており、最大K値は10である。目標とするSRFEL発振波長は、高次高調波の利用も含めて1-12 μ mである。SRFELはリニアックベースのFELと比較して出力は劣るが、線幅の狭さや波長安定性に優れている。そのため、赤外顕微分光などの応用で成果が得られると期待している。

一方、南側の長直線部には6.3mの光クライストロンETLOK-IIが挿入されており、1992年に可視領域で初発振を遂げて以来SRFELの短波長化を図ってきた[2,3,4]。蓄積リングの改造を重ね、ピーク電子密度は建設当初より飛躍的に増大し、2003年には遂にFEL発振波長が200nm以下になり国内で初めて真空紫外域に到達した[5]。波長200nm付近のFELを光電子顕微鏡(PEEM)の光源として使用し、走査型電子顕微鏡(SEM)のテストパターンに照射したところ、高分解能かつビデオレートで撮影できることがわかった。ここでは、真空紫外域まで到達したSRFELの性質について概説し、PEEMの予備実験で得られた結果について簡単に報告する。

2. 真空紫外域でのSRFEL発振

蓄積リングNIJI-IVの電子ビームは、比較的エネルギーが低く(~ 0.3 GeV)、真空チェンバーに異形の繋ぎ合わせやベローズが多用されていたために、シングルバンチ運転時でもマイクロウェーブ不安定性が2-3mAの電流値から発現していた[6]。電子バンチ内のピーク電子密度は 7×10^{16} /m³程度に抑制され、電流の増大と共にエネルギー拡がりも増大していた。このため波長200nmにおける最大FEL利得は約2.5%

しか得られなかった。マイクロウェーブ不安定性によるFEL利得の制限を避けるために、2002年までに大部分の真空チェンバーの更新を完了した。新しい真空チェンバーにはVATシールを採用し、形状も滑らかに変化するようにしてある。ベローズにはフィンガー状の銅板で覆うように内側を接触させ、インピーダンスの増大を抑制している。その結果、マイクロウェーブ不安定性が発現する閾電流値は12-15mAまで上昇し、ブロードバンドインピーダンスを 2Ω 程度まで減少することができた。ピーク電子密度は 1×10^{17} /m³を超え、エネルギー拡がり増大抑制の効果もあり、期待される最大FEL利得は8%以上になった[5]。

光共振器に使用したミラーはAl₂O₃/SiO₂誘電体多層膜ミラーである。このミラー素材は、NIJI-IV FELシステムが一時FELの最短波長記録となった214nmでの発振に成功したときから、深紫外以下の波長域で使用している[4]。波長200nm付近で反射率が高くなるように膜厚を最適化したミラーでは、使用前の最小共振器損失が0.7%程度である。多層膜の総数を減らすことで、透過率を上げてFEL出力を増大することができる。FEL実験では、透過率を極力抑えた低損失タイプ(透過率 $T \sim 0.05\%$)のみの組と高透過率タイプ($T \sim 0.5\%$)を一枚使用した組み合わせを用いた。前者に対する後者の有効透過率比(透過率を共振器損失で割った値)は約6.7である。

真空紫外域でのFEL発振は、2003年7月に初めて成功した。電子エネルギー0.31GeVで行ったFEL実験では、波長197.8 ~ 205.0 nmの間でFEL発振を観測できた。図1が示すように、共振器ミラーは光クライストロンからの自発放出光の照射によって劣化が生じ、照射後の最適波長から外れた波長では共振器損失が急激に悪化する。FEL発振波長域が比較的狭いのはこのためである。FEL発振波長域からは、FEL利得が3-4%程度しか得られておらず、電子ビーム特性から予想された値に比較してかなり小さいことがわかった。FEL発振時にはFELとの相互作用により電子バンチのバンチ長が増大するが、その増大率からFEL利得と共振器損失の比を求めることがで

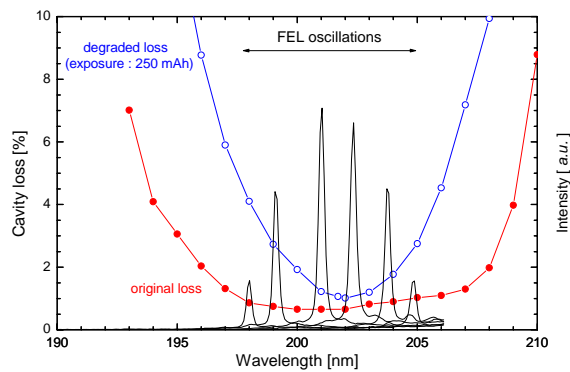


図1 低損失タイプの共振器ミラーの共振器損失とFEL発振のスペクトル

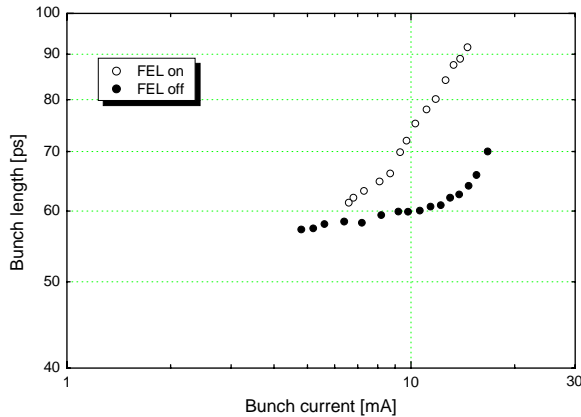


図2 FEL発振によるバンチ長増大の電流依存性

きる[7]。測定結果である図2もFEL利得が3-4%程度であったことを支持している。この理由としては、減磁による光クライストロンの磁場不正のため、電子ビームが光クライストロン内で共振光軸から折れ曲がっていることが考えられる。現在、光クライストロン磁場の調整を検討している。シングルバンチ電流値10mAにおけるFEL出力は、低損失タイプが約 $50\mu\text{W}$ であったのに対して高透過率タイプを使用した組では約 $360\mu\text{W}$ であった。この比は上述した有効透過率比とほぼ一致している。

3. SRFELのパルス特性とスペクトル特性

SRFELマイクロパルスの時間発展及びスペクトルの時間発展は、最小時間分解能 2ps の2時間軸ストリークカメラを用いて測定した[5]。SRFELでは、電子バンチと共振光パルスとの同期条件によって3種類の巨視的時間構造を持つことが知られている。ほぼ完全に同期する場合には、強度もパルス幅も一定になるcw発振するのであるが、波長 200nm 付近のFEL実

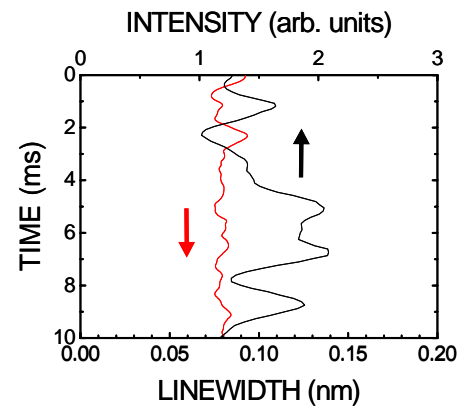
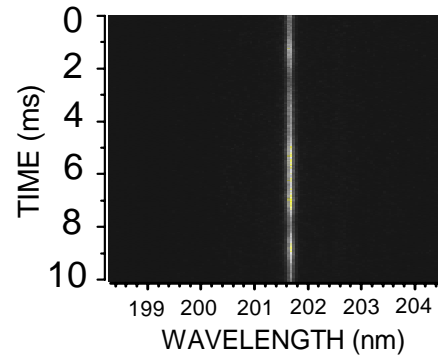


図3 完全同期条件における分光ストリーク測定結果（上段）と、それを解析して得られたスペクトルの半値全幅（下段）

験ではcw発振を観測することはできなかった。その理由としては、光共振器が安定でなく共振器長に変動があることや、マイクロウェーブ不安定性の抑制によってバンチ長が相対的に短くなったため安定領域が狭まったことが考えられる。FELは周期が3-5ms程度のマクロパルスを形成するが、パルス幅の変調は少なく、一つの種からFELが立ち上がり持続していることがわかる。測定で得られたFELマイクロパルスの半値全幅は測定系の分解能を含めて 6.7ps であった。

スペクトル測定には分解能の半値全幅が 0.04nm であったが、水銀ランプの線スペクトルを用いた測定によると、測定系の波長分解能は半値全幅で $\sim 0.06\text{nm}$ であった。一方で時間分解能は 0.1ms 以上であった。図3は完全同期条件におけるFELスペクトルの時間発展の一例を示している。強度の変動は大きいですが、線幅の変動は小さいことがわかる。測定系の分解能を含めたスペクトルの半値全幅は 0.08nm であり、相対幅が 10^{-4} のオーダーまで狭くなっており、FELを利用するのに分光する必要はない。発振波長が極めて安定であることも、図3は示している。SRFELでは電子バンチと共振光パルスとの同期のずれがある一定値以上になると、FEL強度の変動が比較的小さくなる擬cw発振モードが現れる。しかしこのモー

ドでは、FELマイクロパルスがしばしば複雑な内部構造を持ち、パルス幅がcw発振モードよりも広くて変動も大きいことが知られていた。これは、FELが幾つもの種から立ち上がっていることを意味している。線幅についても擬cw発振モードでは比較的広がるが、パルス幅ほど大きくないことがNIJI-IV FELシステムの実験によって観測された。例えば、共振器長が完全同期条件より3.6 μm 長い場合、スペクトルの半値全幅は0.10nmにしかならない。一方でパルス幅はcw発振モードの3-4倍にもなる。また、線幅に関して変動が生じていることも観測された。

4 . SRFELの応用

波長200nm付近におけるFEL発振で最も高い強度である波長202nmのFELを光源として用いて、PEEMの予備実験を行った。大気中を輸送したFELを石英窓を通じて真空中の試料に照射し、発生した光電子を拡大しつつ増幅し、ビデオレートで画像処理を行った。PEEM装置の概要を図4に示す。FEL輸送系での損失が大きいため、試料に照射されるFELは100 μW 程度であったと考えられる。PEEMの空間分解能は理想的な調整では80nmであるが、本測定ではそれよりも大きく100-200nm程度であった。試料に用いたのは、SEMのテストパターンで、クォーツの基板に二酸化クロムを載せてあり、最小パターンの線幅は1 μm であった。

予備実験では、最小パターンを動画レートで鮮明に観測することができた。このことは光源を含めたPEEM装置の最小分解能が数百nm以下であることを意味している。遠紫外 - 真空紫外の波長域においてリアルタイム観測が可能であったことで、物質界面や境界の存在で生じる表面の仕事関数の変化をマッピングすることができるだろう。さらに、SRFELの波長可変性と線幅の狭さを活かして、選択的なマッピングもできる。本格的なPEEM実験に向けて、波長可変幅の拡大とFEL出力の増大に取り組んでいる。

5 . まとめ

国内で初めて観測された真空紫外域FELの発振特性や、それを光源として用いたPEEMの予備実験について概要を説明した。光クライストロンの磁場不正のために波長200nmにおけるFEL利得は3-4%しか得られていないが、発振波長は197.8nmまで短くすることができた。FEL波長は数十msの時間では極めて安定しており、スペクトルの半値全幅も測定系の分解能を含めて0.08nm程度まで狭いことが観測された。共振器ミラーの透過率を調節して得られたFEL出力は数百 μW 程度であったが、SEMのテストパターンを用いたPEEMの予備実験でもリアルタイムで数百nmの分解能が得られており、SRFELはPEEMの光源として有望であることを示した。

NIJI-IV FELシステムは、真空紫外域における更なる短波長化を行っているだけでなく、赤外域の

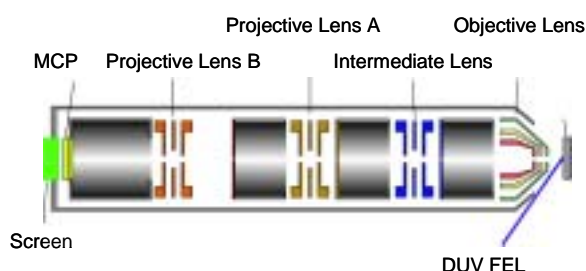
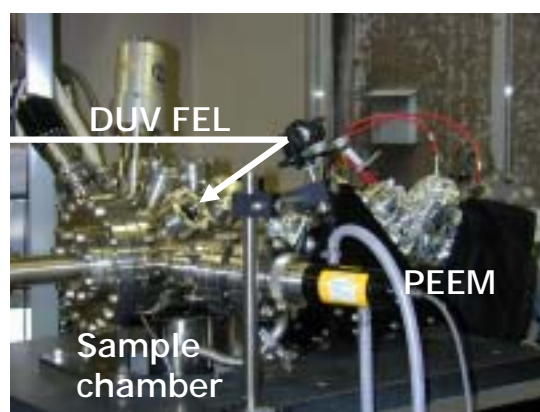


図4 PEEM装置全体とFEL導入部との関係（上段）と、PEEMの概略（下段）

SRFEL開発にも取り組んでいる。これらが新たな光源として広く利用されることを目指し、FELの基本性能の改善と共に、PEEMや光電子分光測定への応用を進展させていく予定である。

参考文献

- [1] N. Sei *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1595.
- [2] T. Yamazaki *et al.*: Nucl. Inst. and Meth **A331** (1993) 27.
- [3] T. Yamazaki *et al.*: Nucl. Inst. and Meth **A358** (1995) 353.
- [4] K. Yamada *et al.*: Nucl. Inst. and Meth **A445** (2000) 173.
- [5] K. Yamada *et al.*: to be published in Nucl. Inst. and Meth.
- [6] N. Sei *et al.*: Nucl. Inst. and Meth **A429** (1999) 185.
- [7] N. Sei *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) 5848.