

Lasing of Near-infrared free electron laser using a storage ring

Norihiro Sei¹, Hiroshi Ogawa, and Kawakatsu Yamada

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

Abstract

We achieved the first lasing of near-infrared free electron lasers (FELs) using the compact storage ring NIJI-IV on February 12, 2009. The infrared FELs were oscillated in the wavelength region of 1392-1502 nm, and the relative linewidth was 3×10^{-4} . Moreover, we have achieved FEL oscillations in several two-bunch modes. The maximum power of the FEL transmitted through a vacuum window was about 0.8 mW, and the intracavity power was estimated to be about 5W in the two-bunch mode. Intensive quasi-monochromatic x rays by using FEL Compton backscattering were observed in the two-bunch modes.

蓄積リングを用いた近赤外自由電子レーザー発振

1. はじめに

分子に特異な振動準位が多数存在している赤外域は、自由電子レーザー (FEL) が最も利用されている波長域である。この波長域にはリニアックを用いたFEL施設が世界中に建設されており、共同利用研究が行われている。しかし、蓄積リングを用いた赤外FELの開発はこれまで行われていなかった。蓄積リングFELには波長安定性や狭い線幅という優れた特徴があり、高波長分解能を特徴とした顕微分光や実時間イメージングなどへの応用を期待できる。

また、蓄積リングFELはレーザー逆コンプトン散乱用の光源に適している。共振器型のFELでは、FEL発振のために電子ビームと共振光の時空間的な重畳を最適になるように調整するが、この状態はレーザー逆コンプトン散乱にとっても最も収量が高くなる。蓄積リングFELで使用する共振器ミラーには高い反射率のミラーを使用するので、光共振器外に射出されるFEL出力が小さくても、光共振器内には非常に高いパワーを蓄積することができる。

そこで産業技術総合研究所ではFEL専用電子蓄積リングNIJI-IVを用いて、赤外蓄積リングFELとそれを利用したFEL逆コンプトン散乱X線の開発を目指したFEL-X計画を進めていた[1]。FEL逆コンプトン散乱によって発生される準単色X線のエネルギーは100keV~2MeV程度であり、大型放射光施設でも得ることが困難なエネルギー領域である。低予算と度重なる装置の故障の影響で開発が遅れていたが、昨年よりFEL実験が開始され、今年の2月12日に波長1450nmにて初発振に成功し、準単色X線の観測にも成功した[2]。以下では、その詳細について記述する。

2. 要素技術開発

蓄積リングNIJI-IVは全長が29.6mとコンパクトであるが、二つの7.25mの直線部を有している。高周波加速空洞の共振周波数は162.2MHzであるので、蓄積リングには16個まで電子バンチが存在できる。しかし、coupled bunch instabilityによる電子密度の低下を防ぐために、FEL実験時は通常RF-KO法によってフルバンチからバンチ数を減じてシングルバンチで運転される[3]。赤外FEL実験時の電子ビームエネルギーは入射時と同じく約310MeVである。高周波加速空洞のトラブルのために加速電圧を25kV程度までしか投入できず、現状ではFEL発振実験時のシングルバンチ電流は6mA程度までしか蓄積できない。また、バンチ長は約90ps、ピーク電子密度は $1.6 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ 程度で、トラブル前の約30%しか得られていない[4]。

赤外蓄積リングFEL用の挿入光源である光クライストロンETLOK-IIIは、周期長20cm・周期数7の二つのアンジュレータ部と72cmの分散部によって構成されている[5]。全長を長直線部の半分ほどと短く抑えたために、FEL逆コンプトン散乱に対して、磁場のない衝突点を複数取ることができる。ETLOK-IIIの最大K値は10.4で、磁石間隙を調整することによって基本波波長を0.5~15 μm に調整できる。分散部の磁石間隙は、下限は42mmまで、上限はアンジュレータ部の間隙に38mmを加えた値まで調整できる。分散部には薄形のステアリングコイルと可動式ショートヨークが取り付けられており、分散部内で生じる電子ビーム軌道のずれを磁石間隙に応じて相殺できるようになっている。

光共振器は長直線部の両端に設置され、その

¹ E-mail: sei.n@aist.go.jp

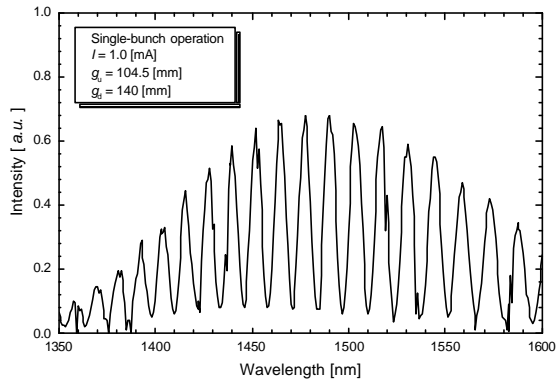


図1 ETLOK-III自発放出光スペクトルの一例。

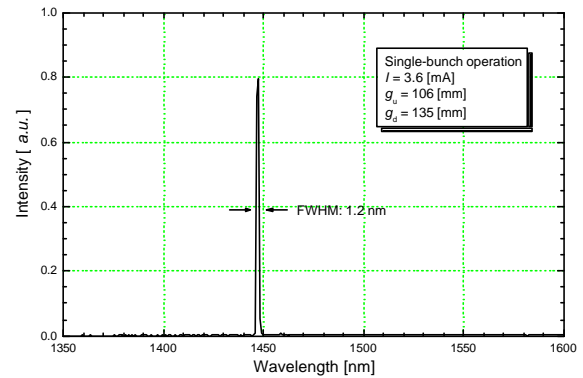


図2 赤外蓄積リング自由電子レーザーの発振スペクトル

間隔は蓄積リング周長の半分に相当する14.8mである。架台には1.3tの御影石を使用し、蓄積リング真空チェンバーとの接続には防振ダンパーを挿入して、低周波振動を抑制できるようになっている[4]。共振光のビーム軸上における振動を測定したところ、振動振幅は0.5 μ m以下であった。この値は紫外FELが連続発振できる条件を満たしているため、赤外FELでも連続発振を期待できることがわかった。共振器ミラーは、中心波長が850nmと1450nmの二種類をまず用意した。共振器損失は、共振器長をディチューニングして共振光パルスの波形を観測することで評価できる。波長850nmのミラーは約0.21%、波長1450nmのミラーは3次高調波に相当する波長490nmにおいて約0.18%であった。一般に誘電体多層膜ミラーに使用されている光学材料は、近赤外域の方が可視域よりも消費係数が小さいので、波長1450nmにおける共振器損失は0.18%よりも小さいことが期待できる。そこで、FEL発振実験は波長1450nmのミラーを使用することになった。このミラーの曲率半径は8m、透過率は約160ppmである。

自発放出光スペクトルの観測は、波長分解能が約1.1nmの小型分光器（BTC261）を使用して行った。アンジュレータ磁石間隙（ g_u ）が104.5mm、分散部磁石間隙（ g_d ）が140mmの時の自発放出光スペクトルを図1に示す。スペクトルの微細構造の間隔からパラメータ N_d の値は107.5と評価されたが、この値は計算値110.7にほぼ一致していた。波長1450nmにおける最大FEL利得は電流値が5mAのときに0.51%であると評価され、共振器損失が0.18%の場合には閾電流値は1.6mAになることがわかった。

3. 赤外蓄積リングFEL発振

FEL発振実験では、共振光の横モードを調整するため、光軸上に焦点を合わせた光学系とCCDカメラを使用して3次高調波の共振光をモニタした。共振器長は、ストリークカメラを使用し、やはり3次高調波のパルス波形を観測することで

調整した。これらの準備を経て、2月12日に波長1450nm付近で赤外蓄積リングFELの初発振に成功した[2]。図2が示すように、測定されたFELスペクトルの線幅は、測定系の分解能を考慮すると0.5nm以下であった。相対線幅は 3×10^{-4} に相当し、この波長帯におけるFELの最小線幅になっている。図2の g_d はFEL利得にとって最適な値ではない。FEL発振実験からは、 g_d の最適値は115~120mmであることがわかった。この値は図1の自発放出光スペクトルから予測される値よりも少し大きく、FEL発振に実効的なエネルギー拡がり、実際のエネルギー拡がりよりも少し大きくなっていることがわかる。 g_d が120mmの時の発振閾電流値は0.9mAであった。

FEL発振波長は g_u を変化させることで調整できる。今回使用した共振器ミラーでは、波長域1392~1502nmの範囲でFEL発振することができた。広い波長域で千倍を超える増幅率が得られており、最も利得の高い1450nm付近の波長では、一万倍近い最大増幅率が得られている。有効FEL利

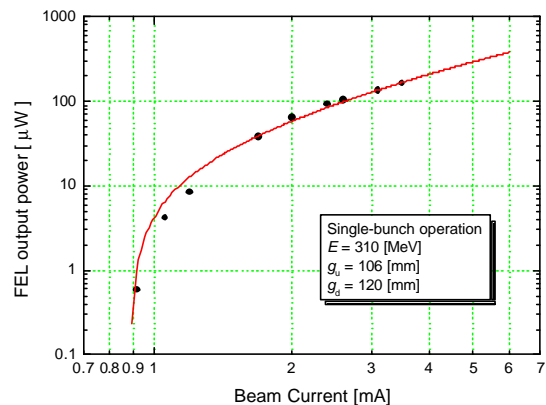


図3 FEL出力の電流依存性。実線は理論から計算された電流依存性を示している。

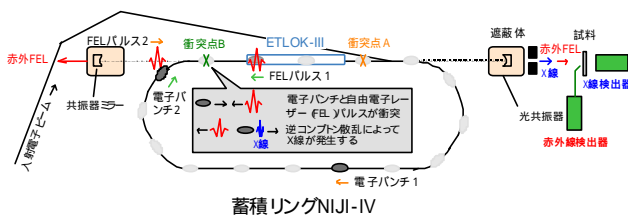


図4 蓄積リングNIJI-IVを用いたFEL逆コンプトン散乱X線発生概念図

得は最大でも0.4%程度であるので、この大きな増幅率は光共振器が安定であることを示している。

光共振器外に射出されたFELの出力は、上流側真空窓の直後でCoherent社のパワーメータOP-2IRを使用して測定した。測定したFEL出力の電流依存性を図3に示す。FEL利得が光共振器損失のおよそ2倍となるあたりでFEL出力の傾きが急変していることがわかる。蓄積リングFELの理論によれば、FEL出力はFEL利得と共振器損失の比の対数に比例しており、実験結果はその特性をよく表している。シングルバンチモードで得られた最大電流値はFEL実験時に約5mAなので、片側の真空窓から射出されるFEL出力の最大値は、シングルバンチモードの場合は0.3mWである。

4. FEL逆コンプトン散乱X線の発生

蓄積リングFELが光共振器外へ射出する出力は比較的小さく、電子ビームエネルギーの小さいNIJI-IVにおいては、サブミリワットのオーダーであった。しかし、光共振器に使用している共振器ミラーの反射率が非常に高いために、光共振器内には数ワットのFELパワーが蓄積されている。しかも、電子ビームと光共振器内に蓄積された光パルスとの時空間的な重畳は最良となるように調整されており、赤外FELによる逆コンプトン散乱は高収量の高エネルギー光子ビーム発生に適している。NIJI-IV FEL システムの場合、FEL逆コンプトン散乱を行うには少なくとも2つ以上の電子バンチが必要である。FELパルスは一つでも良いが、二つのパルスがあれば、FEL逆コンプトン散乱で生じるX線の収量も2倍になる。そこで我々は、各電子バンチの電流量を6mA以上蓄積した2バンチモードでFEL発振実験を行い、FEL発振させることに成功した。観測した中で最大の光共振器外FEL出力は0.8mW以上で、光共振器内出力は5W以上に相当する。

FEL逆コンプトン散乱で準単色なX線を発生させるには、その衝突点の選択が重要である。蓄積リング電子バンチは通常数十ps以上のバンチ長を持つため、この衝突点が挿入光源の中にあれば、挿入光源の電磁場による電子バンチの横

方向の運動のために、FEL逆コンプトン散乱X線の準単色性が劣化してしまう。図4が示すように、FEL逆コンプトン散乱X線の衝突点は電子バンチのバンチ間隔によって選択でき、NIJI-IV FEL システムの場合は挿入光源の長さを意図的に短くしたために、磁場のない複数の衝突点が存在する。我々は複数のバンチ間隔の2バンチモードでFEL発振を行い、FEL逆コンプトン散乱X線の発生に成功した。電子ビームの寿命からX線の収量はおよそ 10^6 Photon/s と評価されている。詳細は別の論文に記述されているが、図5が示すような単色性の良いX線ビームを観測している。

5. 今後に向けて

詳細が報告されている物としては、おそらく初めてであろう赤外蓄積リングFELの発振に成功した。また、複数の蓄積リングFELパルスを発振させ、複数の衝突点で逆コンプトン散乱X線の発生にも成功した。現在では既に発振波長域を840nmまで拡張し、高次高調波FELの特性についてもほぼ測定を終えたところである。高次高調波FELは、リニアックFELを中心に多数の発振報告はあるが、FEL特性や電子ビームへの影響について詳細な報告は少なく、FEL物理の発展に重大な寄与をできると考えている。今後はFEL波長域を中赤外域まで拡張し、1MeV以下のエネルギー領域で準単色X線ビーム発生を行うことを予定している。赤外線とX線との高収量複合光ビームの同時利用研究を開始したところではあるが、資金不足であり今後の研究は予算を許さない。

謝辞

本研究にあたって、X線検出器および測定を当所の豊川弘之氏および大島永康氏より借用しました。また、80MWクライストロン故障の際にはJASRIの花木博文氏および小林利明氏にお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] N. Sei *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. A **483** (2002) 429.
- [2] N. Sei *et al.*, Opt. Lett. **34** (2009) 1843.
- [3] T. Yamazaki *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. A **331** (1993) 27.
- [4] N. Sei *et al.*, Infrared Phys. Technol. **51** (2008) 375.
- [5] N. Sei *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1595.