

Study of Infrared FEL using the Compact Storage Ring NIJI-IV

Hiroshi Ogawa[#], Norihiro Sei, Kawakatsu Yamada

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

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

Abstract

At AIST, Free Electron Lasers (FELs) are being developed at wavelengths ranging from the IR to VUV based on the compact storage ring NIJI-IV. In the study of infrared FELs, the first lasing was achieved 1450 nm in February last year [1]. After the first lasing experiment, we tried to extend the lasing wavelength region, and the FEL was oscillated in the mid-IR region in January this year. In addition, X-ray/ γ -ray beam in the energy of 0.7-2.1MeV was also produced by using FEL Compton backscattering.

小型蓄積リング NIJI-IV による赤外 FEL の研究

1. はじめに

産総研では周長 29.6m の小型電子蓄積リング NIJI-IV を用いて真空紫外-赤外域に渡る広帯域自由電子レーザー (FEL) の実現を目指し研究を行っている。NIJI-IV には 2 台の光クライストロン (ETLOK-II、ETLOK-III) が設置されており、初期の研究では、ETLOK-II を用いて真空紫外-可視域 FEL の開発が行われた [2-6]。ETLOK-II は全長 6.3m で 2 台の 3m アンジュレータ (周期長 42) と 216mm の分散部で構成されている。1992 年に可視域での FEL 発振に成功して以来、発振波長域を短波長側へ順次拡大させ、2003 年には最短波長 198nm での FEL 発振が可能になり、蓄積リング型 FEL としては世界で 3 番目に真空紫外域に到達した。これにより、FEL 発振波長域は、真空紫外から可視域に渡る 198-595nm を実現した。また、遠紫外 FEL を光電子顕微鏡 (PEEM) の励起光源として用い、遷移金属表面での化学反応の実時間観測等の利用研究も行ってきた [7]。

一方、赤外域での FEL 開発については、光クライストロン ETLOK-III [8] を用いて研究を展開している。各所で共同利用研究に用いられ実績がある線形加速器型 FEL と比較して、蓄積リングを用いた FEL は、FEL 強度では劣るものの波長安定性や線幅が狭いなど優れた特徴を持っている。また、10MHz 以上の高い繰り返しが可能であることからこれらの特徴を生かし顕微分光や実時間イメージングの光源としての利用が期待される。

2004 年に全長 3.6m の赤外 FEL 専用の光クライストロン ETLOK-III を ETLOK-II の反対側の長直線部にインストールした [9,10]。その後、電子ビーム輸送系の改造や高安定型光共振器システムの開発を経て 2009 年 2 月に波長 1.45 μ m の近赤外域での FEL 初発振に成功するに至った [1]。この時の発振波長域

は 1392-1502nm であり、最大出力は 0.3mW (蓄積電流 5mA の時)であった。これに加え、NIJI-IV を周回する電子バンチと光共振器に蓄積された近赤外 FEL との逆コンプトン散乱により X 線を生成させその観測にも成功している。

本稿では、蓄積リングを用いた赤外 FEL 開発に関して、昨年の初発振実験後に発振波長域の更なる拡張に取り組み中赤外域に到達したことについて述べ、それに伴い FEL コンプトン散乱により生成した X 線/ γ 線のエネルギー範囲も拡張することができたので、これらの研究の進展について紹介する。

2. 近赤外/中赤外 FEL 発振実験

光クライストロン ETLOK-III は、2 台のアンジュレータ部 (周期長 20cm, 周期数 7) とその中央に配置されている分散部 (全長 72cm) によって構成されている。アンジュレータ部の間隙を変化させることにより自発放出光の基本波長を 0.5 - 15 μ m の範囲で調整することができる。2 枚の誘電体多層膜ミラーから成る光共振器は ETLOK-III を挟んで設置されており、その共振器長は、リング周長の半分の長さの 14.8m である。光共振器の架台には低振動周波数を除振するために 1.3t の黒御影石を採用し、また、光共振器が設置されている真空チャンバーには防振ダンパー付ベローズを介して蓄積リング側のチャンバーと接続している。これにより、光共振器の振動振幅は連続 FEL 発振が可能で 0.5 μ m 以下に抑制されている。

NIJI-IV は通常 310 - 340MeV の電子エネルギーで運転され RF 空洞の共振周波数は 162.2MHz で、ハーモニック数は 16 である。FEL 発振をさせる時は、coupled bunch instability によるビーム不安定性を抑制する必要があり、これまでの実験ではリングに存在する 16 個の電子バンチを RF-KO 法によりシングルバンチに減らし運転していた。従来の NIJI-IV の RF-KO 装置は、シングルバンチ生成のみに対

[#]ogawa.h@aist.go.jp

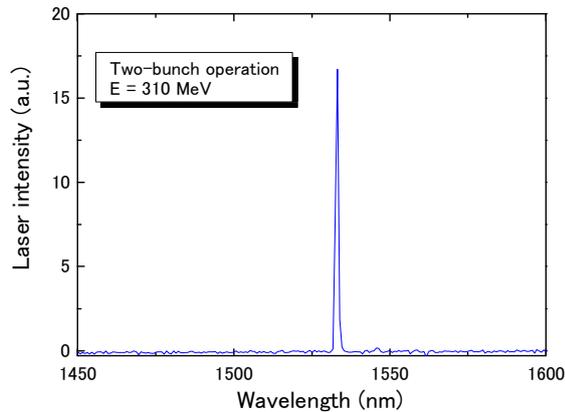


図 1 : 近赤外 FEL 発振スペクトル

応したシステムであったが、次節で述べる FEL コンプトン散乱実験および多バンチ化による FEL 発振強度の増強のため当 RF-KO 装置を改良し複数バンチで運転できるようにした。具体的には、新たに導入したパルスパターンジェネレータ (Agilent 81110A)により設定したフィリングパターンで RF-KO を行ない、任意の複数の電子バンチ構造での運転が可能になった。

適切なフィリングパターンを選択する等により、2バンチおよび3バンチでの FEL 発振を実現した。図 1 に 2バンチで運転した時に得られた FEL スペクトルの例を示す。観測された発振スペクトルの線幅は分光器の分解能(1.1nm)を考慮すると 0.5nm 以下 (相対線幅 3×10^{-4} 以下) であり、シングルバンチ運転の FEL 発振で得られた値と同等であった。電子バンチ数を増やすことにより出力が増大し、3バンチ運転時の FEL 最大出力が 1.5mW 得られるようになった。

赤外 FEL の発振波長域を拡張する研究にも取り組み、まず、技術的に容易な短波長化を行った。反射率の最適化波長を短波長側にシフトした誘電体多層膜ミラーを用いて波長 $0.8 \mu\text{m}$ 台での FEL 発振に成功し、近赤外領域で $0.84 \mu\text{m}$ - $1.58 \mu\text{m}$ の波長域で発振させることができた。これに続き、FEL の長波長化の研究を進めた。光共振器および電子ビーム軌

	ETLOK-II	ETLOK-III
Total length [m]	6.288	3.55
Magnetic period		
Undulator section [mm]	72	200
Dispersive section [mm]	216	720
Number of period Nu	42×2	7×2
Deflection factor K	< 2.29	< 10.4
Lasing wavelength [μm]	0.198-0.595	0.84 - 2.65

表 1 : 光クライストロンの特性と発振波長

道の調整に必要な中赤外領域での微弱な光信号を捉えられる分光器を開発する等により、本年 1 月に波長 $2.6 \mu\text{m}$ の中赤外領域の FEL 発振に成功するに至った。

最後に 2 台の光クライストロンの特性および現在までに実現している FEL 発振波長を纏めたものを表 1 に示す。

3. 共振器内 FEL コンプトン散乱実験

上記で発振に成功した赤外 FEL と蓄積リングを周回する電子バンチとの逆コンプトン散乱により X 線/ γ 線ビーム生成の研究を行った。共振器には誘電体多層膜ミラーを使用しているため、赤外域での損失が 100-1000ppm オーダーの高反射率ミラーを用いることができる。したがって、共振器内に高いパワー (10W 以上) の FEL の蓄積が可能である。FEL 発振時には、電子バンチと FEL パルスの時空間的な重畳が取れているためレーザー逆コンプトン散乱の収量が最適になる条件が自動的に満たされている [11-13]。そこで、NIJI-IV を用いた FEL 逆コンプトン散乱 X 線の開発を計画し、研究を行ってきた [4,8,14]。NIJI-IV の電子ビームは蓄積リングとしては低エネルギーであり、赤外 FEL を用いることから大型放射光施設でも生成が困難なエネルギー領域を含む 100keV-2MeV のコンプトン散乱 X 線/ γ 線の発生を目指して開発を進めている。

実験室系での正面衝突によるコンプトン散乱 X 線のエネルギー E_γ は FEL の光子エネルギー E_L を用いて次式で与えら得る。

$$E_\gamma = \frac{(1 + \beta)E_L}{1 - \beta + (2E_L / m_e c^2) \sqrt{1 - \beta^2}} \quad (1)$$

NIJI-IV で通常運転されている電子エネルギー 310MeV と 340MeV の場合に生成可能なコンプトン散乱による光子エネルギーを図 2 にプロットした。

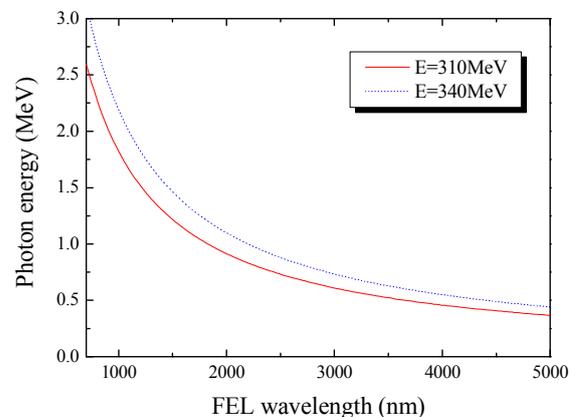


図 2 : FEL コンプトン散乱により生成される光子エネルギー

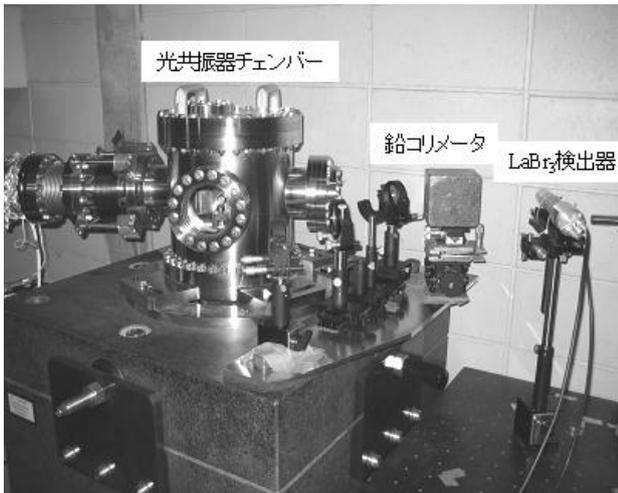


図3：FEL コンプトン散乱実験の測定系

今回の実験では、電子エネルギー310MeV で運転したので、発振可能な波長の FEL を用いて 0.7 - 2.1MeV の X 線/ γ 線ビームの生成を目標とした。

電子バンチと FEL パルスのコンプトン散乱の衝突点は、光共振器の位置と電子バンチ間隔で正確に決定されており、NIJI-IV の場合、その衝突点の間隔は約 0.9m である。有限の磁場中に衝突点がある場合は、電子バンチが横方向の運動を受けるため、コンプトン散乱により生成される X 線エネルギーの単色性が悪くなり、前方方向での収量も減少する。蓄積リング FEL では、一般に衝突点のある直線部を光クライストロンが主に占めるため磁場の無い空間に衝突点を設けることが難しいことが多い。しかし、NIJI-IV では、光クライストロン ETLOK-III を直線部の約半分の長さに設計してあるため ETLOK-III の外側の磁場が無い領域に複数の衝突点が存在する。これにより、単色性の良い FEL コンプトン散乱 X 線の生成が可能である。

FEL コンプトン散乱で生成された X 線/ γ 線ビームは、光共振器ミラーと CaF₂ 光学窓等を通過した

後、大気に取り出され鉛コリメータにより立体角を制限することにより準単色化し、LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器により観測した(図3)。昨年には、波長 0.88 μ m - 1.5 μ m の FEL と電子バンチ (E=310MeV) のコンプトン散乱により、2.1 - 1.2MeV のエネルギー領域で γ 線発生を観測した。FEL 波長 1.5 μ m の時 (γ 線最大エネルギー=1.2MeV) にコリメータ径 10mm を用いて観測された γ 線スペクトラムの例を図4に示しているが、半値幅が 11%と単色性の良いビームが得られていることが分かる。(800ch 以上の信号がコンプトン γ 線スペクトラムであり、800ch 以下の大部分は検出器の応答による成分である。) また、今年になり波長 2.6 μ m の中赤外 FEL が発振したことに受けて、コンプトン散乱実験を行い、本年 2 月に 0.7MeV の X 線ビーム生成に成功した。

4. まとめ

昨年 2 月に波長 1450nm 付近で初めて近赤外 FEL の発振に成功して以来、発振波長域の拡張および出力増大を行った。今年 1 月には、波長 2.6 μ m の中赤外域での FEL の発振に成功し、1 台の小型蓄積リングにより真空紫外-中赤外(発振波長:0.198-2.65 μ m)をカバーする広帯域 FEL を実現した。更に、FEL コンプトン散乱により単色性の良いエネルギー 0.7-2.1MeV の X 線/ γ 線を生成できた。また、ここでは述べなかったが、これらの基本波 FEL 発振に加え、蓄積リングによる高次高調波の FEL 発振および、その FEL 特性の観測にも成功した[15]。

本研究の一部は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。X 線/ γ 線の計測では、産総研の豊川弘之氏および大島永泰氏にご尽力いただきました。ここに感謝の意を表します。

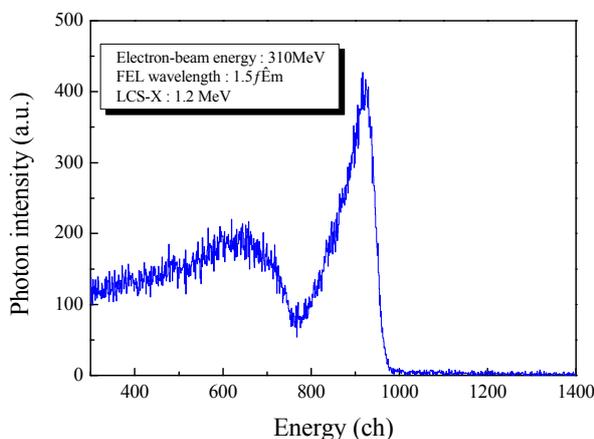


図4：観測された γ 線スペクトラム

参考文献

- [1] N. Sei, H. Ogawa, K. Yamada, Opt. Lett. 34 (2009) 1843.
- [2] T. Yamazaki et al., Nucl. Inst. and Meth. A331 (1992) 27.
- [3] T. Yamazaki et al., Nucl. Inst. and Meth. A358 (1995) 353.
- [4] T. Yamazaki et al., Nucl. Inst. and Meth. B144 (1998) 83.
- [5] K. Yamada et al., Nucl. Inst. and Meth. A445 (2000) 173.
- [6] K. Yamada et al., Nucl. Inst. and Meth. A528 (2004) 268.
- [7] H. Ogawa et al., Nucl. Inst. and Meth. A593 (2008) 17.
- [8] N. Sei et al., Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 1595.
- [9] N. Sei et al., Infrared Phys. and Technol. 51 (2008) 375.
- [10] N. Sei et al., Proc. 30th Free Electron Laser Conf., Gyeongju, 2008, p.150
- [11] M. Hosaka et al., Nucl. Inst. and Meth. A393 (1997) 525.
- [12] D. Nutarelli et al., Nucl. Inst. and Meth. A 407 (1998) 459.
- [13] H.R. Weller et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 62 (2009) 257.
- [14] H. Ohgaki et al., Proc. 18th Free Electron Laser Conf., Nucl. Instr. and Meth. A 393 (1998) II-14.
- [15] N. Sei et al., submitted to J. Phys. Soc. Jpn.