

THIRD HARMONIC FEL OSCILLATIONS IN THE STORAGE RING NIJI-IV

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 storage ring free-electron laser (FEL) oscillations on the third harmonic in the near-infrared region. The measured linewidth of the third harmonic FEL was narrower than that of the fundamental FEL because of the narrower spectral width of the spontaneous emission. Our results will be useful to develop an x-ray FEL oscillator with the lower electron-beam energy.

蓄積リングNIJI-IVを用いた3次高調波FEL発振

1. 序論

第四世代光源と呼ばれる自由電子レーザー (FEL) は、周期電磁場中で相対論的電子ビームと光パルスが相互作用することで増幅し、原理的にはあらゆる波長で発振が可能である。近年、この特長を活かして、自己増幅自発放出光 (SASE) 型の FEL 開発が国家プロジェクトとして各国で進められて、FEL の発振波長は 1 Å にまで短波長化が成し遂げられている [1,2]。

FEL の発振波長は電子ビームエネルギーの 2 乗に反比例するため、FEL の短波長化に伴い装置の大型

化も必要になる。そのため、低エネルギー電子ビームでも短波長のコヒーレント放射源を創るための技術—コヒーレント高次高調波発生 (CHG) [3] や高利得高次高調波発生 (HGHG) [4] など—が以前から研究されている。高次高調波 FEL 発振もそのような技術の一つであり、FEL が実験的に次々と創られはじめた 1980 年代から発振に成功していた [5]。しかし、他の短波長化技術とは異なり、光共振器を必要とするため、真空紫外以下の波長域での開発は困難であると考えられていた。これまでの高次高調波 FEL 発振では、FEL 装置の利得特性を試験する目的で研究はされてきたが、その詳細な FEL 特性に対す

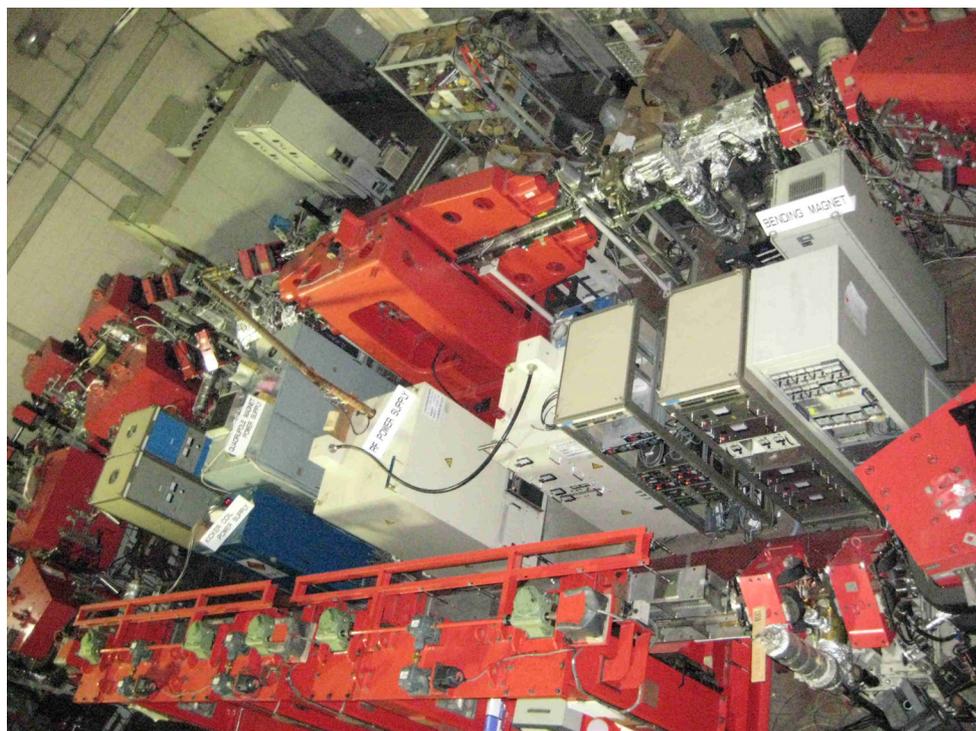


図 1: 自由電子レーザー専用電子蓄積リングNIJI-IV

¹ E-mail: sei.n@aist.go.jp

る考察がほとんどされてこなかった。だが最近、共振器型のX-FELOが提唱されて[6]、高次高調波FEL発振も着目されるようになってきた。光共振器を利用すれば、SASEのような巨大な利得は不要であり、しかも高次高調波FEL発振を利用すれば、電子ビームエネルギーも低く抑えられる。産総研ではFEL専用電子蓄積リングNIJI-IVを用いて赤外FELを開発したが[7]、ここでは開発当初から高次高調波FEL発振の研究を進めていた。既に赤外の広い波長域 852.3 ~ 1550.7 nm で3次高調波FEL発振に成功し[8]、解析を進めているところである。本稿では、実験で得られた3次高調波FELの特徴について記述する。

2. 蓄積リングNIJI-IVのFELシステム

NIJI-IVは周長が29.6mとコンパクトではあるが、7.25mの長直線部を2本備えた、世界で初めて建設されたFEL専用の電子蓄積リングである。図1にNIJI-IVの全体写真を示す。上記した長直線部の一つに光クライストロンETLOK-IIを挿入して、1992年に可視域の595nmでFELの初発振に成功し[9]、1998年には遠紫外域の212nm[10]、2003年には国内で初めてとなる真空紫外域の197.6nmで発振に成功している[11]。さらにもう一方の長直線部には周期長20cmの光クライストロンETLOK-IIIを挿入して、赤外FELの開発を進めてきた[7]。2009年には近赤外域である1450nmで発振に成功し、複数のビームラインでFEL発振に成功した初めての電子蓄積リングとなった[12]。さらに、蓄積リングFELとしては初めて中赤外域の2600nm付近でも発振し、FELの発振波長域は 837.7 ~ 2673 nmである[13]。短波長FELビームラインと併せて、真空紫外から中赤外までをカバーしている。

3. 高次高調波FEL利得

高次高調波FEL発振実験は、電子ビームのエネルギーは変えずに、光クライストロンETLOK-IIIアンジュレータ部の磁石間隙 g_u を調整して行っている。FELの1次元理論によれば、奇数 n 次の高次高調波に対するFEL利得 G_n は基本波に対するFEL利得 G_1 を用いて以下の式で与えられる[7]。

$$G_n = \frac{F_n(K_n) f_n}{F_1(K_1) f_1} n G_1 \quad (1)$$

$$F_n = \frac{4n^2 K_n^2}{(2 + K_n^2)^2} \left[J_{n+1/2} \left(\frac{nK_n^2}{4 + 2K_n^2} \right) - J_{n-1/2} \left(\frac{nK_n^2}{4 + 2K_n^2} \right) \right]^2 \quad (2)$$

$$K_n^2 = 2 \left(\frac{2 + K_1^2}{2} n - 1 \right) \quad (3)$$

ただし、 K_n は基本波FELが発振する波長となるように選ぶものと仮定する。ここで f_n は光クライストロンに特有な利得減少因子で、電子ビームの発散や光クライストロンの磁場不正の効果なども含んでいるが、主に寄与するのは以下の式で与えられる電子

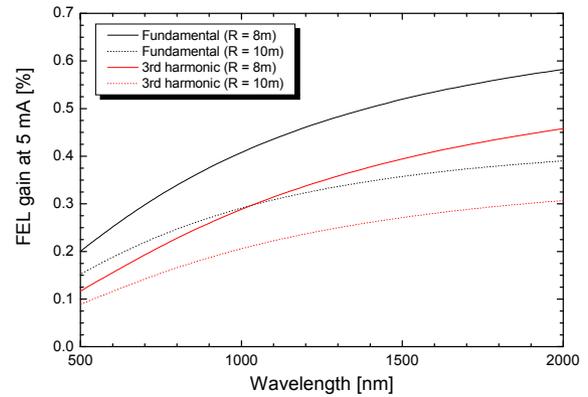


図2: FEL利得の波長依存性

ビームのエネルギー拡がりの効果である。

$$f_m = \exp \left[-8\pi^2 n^2 (N_u + N_d)^2 \left(\frac{\sigma_\gamma}{\gamma} \right)^2 \right] \quad (4)$$

そこで、 f_m を f_n と等しいと見なして良い。ここで N_u は光クライストロンアンジュレータ部の周期数を、 N_d は分散部にて電子ビームが光パルスに追い越される波長数を意味している。

NIJI-IV電子ビームはFEL実験が行われるエネルギー310MeVにおいてはエネルギー拡がりが 4×10^{-4} であるため、FEL利得を最大にする $n(N_u + N_d)$ は約200である。しかし、ETLOK-IIIの分散部はアンジュレータ部を支えるベースの内側に組み込まれており、アンジュレータ部と完全に独立して動かすことができない。分散部間隙 g_d (mm) には以下の制限がある。

$$42 \leq g_d \leq g_u + 38 \quad (5)$$

そのため、短波長領域では $n(N_u + N_d)$ を200以下にすることができず、高次高調波FEL利得は基本波FELと比較して相対的に低くなる。それでも、図2が示すように近赤外域では3次高調波FEL利得が基本波FEL利得の2/3以上あることがわかる。曲率半径が8mの光共振器ミラーを使用した場合、波長1500nmでは電流値5mAの時の3次高調波FEL利得が約0.4%になり、より容易に発振可能であることがわかる。

4. 3次高調波FELの発振

光共振器ミラーとして、低損失の $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 誘電体多層膜ミラーを使用した。曲率半径は波長860nm付近に最大反射率を持つミラーが10m、波長1530nm付近に最大反射率を持つミラーが8mである。共振器損失は時間分解能2psの2軸掃引ストリークカメラを使用して、共振光プロファイルを計測することで評価した。このストリークカメラの受感波長領域は190~880nmであるので、評価できるのは波長860nm用のミラーのみである。ミラーを光共振器に装着し

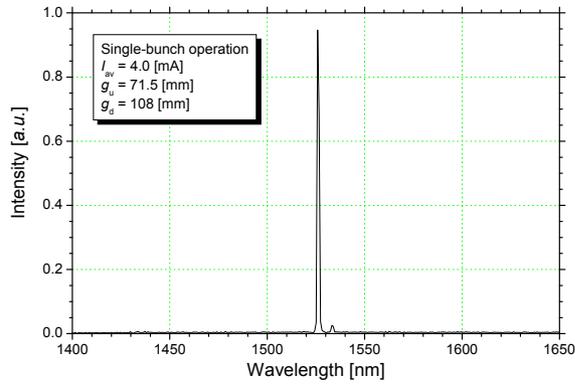


図 3: 波長1530nm付近の3次高調波FELスペクトル

た直後は最小共振器損失は860nm付近で約890ppmであったが、共振光照射後には最小共振器損失となる波長が870~880nmへ変化し、最小共振器損失も約980ppmに増大した。この共振器ミラーに対するFEL発振の閾電流値は、基本波および3次高調波についてそれぞれ1.9mAおよび3.0mAと予測できた。波長1530nm用のミラーについて実測データはないが、波長870nm用ミラーと同じ基盤を使用しているため、同程度の共振器損失であることが期待できる。

上述したように、FEL発振実験はシングルバンチ運転で310MeVの電子ビームエネルギーを用いて行われた。波長870nm付近のFEL発振実験では、基本波に対しては g_u を123mm付近、3次高調波に対しては g_u を87mm付近にすることで発振に成功した。それぞれの閾電流値は2.3mAおよび3.5mAであり、共振器損失の評価から予測される値とほぼ一致していた。FEL利得が比較的小さいため、基本波FELおよび3次高調波FELの上流側光共振器真空窓から射出される平均出力は電流値5.9mAのときにそれぞれ39.9 μ Wおよび8.1 μ Wであった。一方、波長1530nm付近のFEL発振実験では、基本波に対しては g_u を103mm付近、3次高調波に対しては g_u を71.5mm付近にすることで発振した。3次高調波FEL発振スペクトルを図3に示す。基本波FELおよび3次高調波FELの閾電流値は1.0mAおよび1.6mAであり、基本波の閾電流値から共振器損失はおよそ0.13%と評価できる。1次元FEL理論によれば3次高調波FELの閾電流値は1.4mAと評価されるが、この値は実験で得られた値とほぼ一致している。波長870nm付近のFELと同様に、上流側光共振器真空窓から射出されるFEL出力を校正済みのパワーメータで測定し、電流値3mAのときの基本波及び3次高調波FELの平均出力はそれぞれ120 μ Wおよび30 μ Wであった。波長1530nmのFELの方が波長870nmのFELよりも平均出

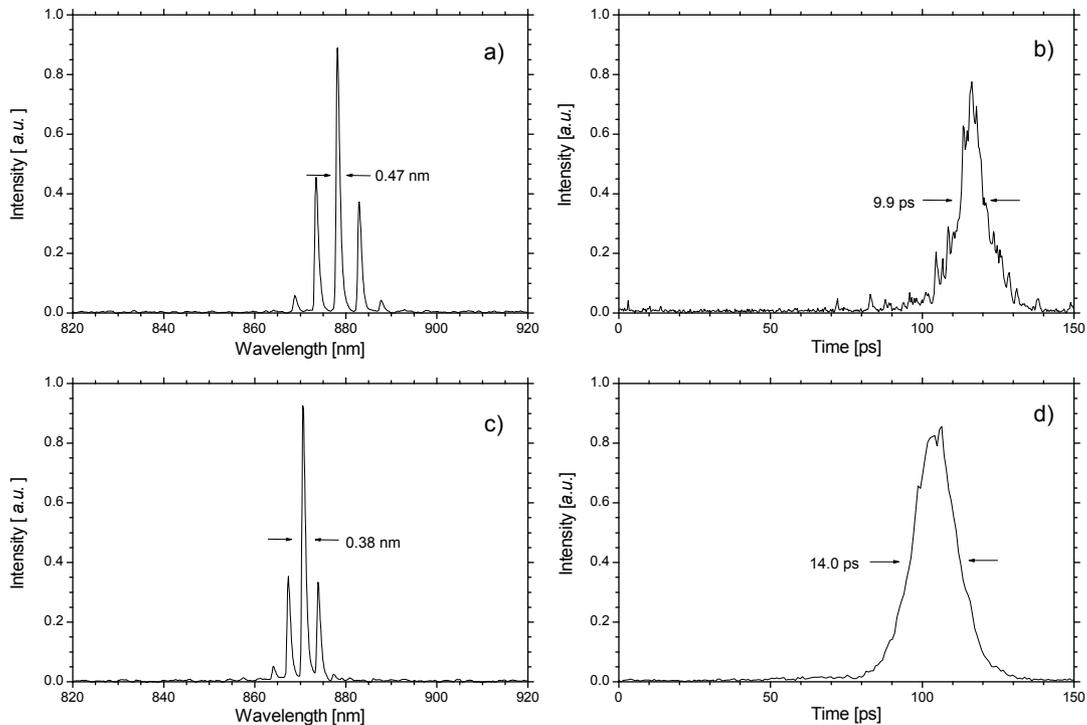


図 4: 基本波FELにおけるスペクトル(a)とパルス波形(b)、および3次高調波FELにおけるスペクトル(c)とパルス波形(d)。測定時の電流値は、それぞれ3.4mA(a)、3.1mA(b)、5.0mA(c)、4.6mA(d)であった。

力が高いのは、FEL利得が相対的に高く、かつ共振器ミラーの透過率が高いためである。波長1530nmのFEL実験ではFEL-Compton散乱による準単色X線発生のために3バンチ運転でFEL発振させたが、1.5mW以上のFEL出力が得られている。

5. 線幅及びパルス幅

波長870nm付近のFELの線幅とパルス幅について、波長分解能0.83nmの小型分光器と時間分解能2psの2軸掃引ストリークカメラを使用して測定した。基本波FELと3次高調波FELの特性を比較できるように、同じ有効利得の時に測定したスペクトル及びパルス波形を図4に示す。測定系の分解能の影響を取り除いた基本波FELおよび3次高調波FELの線幅は、それぞれ0.47nm ($\Delta\lambda_{F1}$) および0.38nm ($\Delta\lambda_{F3}$) であった。3次高調波FELの線幅が基本波FELの線幅よりも狭くなったのは、大きな $n(N_u+N_d)$ のために、3次高調波の自発放射光スペクトルにおける微細構造の波長幅 ($\Delta\lambda_{p3}=3.3$ nm) が基本波のそれ ($\Delta\lambda_{p1}=4.6$ nm) に比べて狭いためである。小型分光器の分解能が充分でないために $\Delta\lambda_{F1}/\Delta\lambda_{F3}$ の値は $\Delta\lambda_{p1}/\Delta\lambda_{p3}$ の値よりも少し低くなっているが、分光システムを改良した最近の計測では、両者の比がほぼ一致することがわかっている。一方で、測定系の分解能の影響を取り除いた基本波FELおよび3次高調波FELのパルス幅は、それぞれ9.9ps (Δt_1) および14.0ps (Δt_3) であった。 $\Delta t_1/\Delta t_3$ の値は $\Delta\lambda_{p1}/\Delta\lambda_{p3}$ の値の逆数と一致する。

これらの事実は、共振器型FELは自発放射光の特性を反映して増幅・飽和に至っていること、高次高調波FELを利用することによって同じ波長であっても線幅やパルス幅を変えることができることを示している。

6. 結論

FEL専用電子蓄積リングNIJI-IVを用いて、わずか0.1%程度のFEL利得で、蓄積リングFELとしては初めてとなる3次高調波FEL発振に成功した。870nm付近及び1530nm付近という二つの波長帯において、FELの1次元理論から導いた3次高調波FEL利得が正しいことを実験的に示した。さらに、高次高調波を利用することで、FELの線幅・パルス場を変えることができることを示した。

本成果から演繹される重要な命題とは、当然のことではあるが、高次高調波FELは共振器損失を少しでも上回れば発振するということだ。加速器技術の向上と光学材料の開発により、X-FELOに限らず極端紫外域でも共振器型FELの開発が早晚行われると考えられる。そこでは、SASE型FELの電子ビームよりエネルギーを抑えることができ、短い挿入光源で発振が可能になる高次高調波FELが採用されるであろう。

謝辞

本研究は、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。

参考文献

- [1] P. Emma *et al.*, Nature Photonics **4** (2010) 649.
- [2] http://harima.riken.jp/topics/sacla_lasing_update.html (2011).
- [3] G. De Ninno *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 104801.
- [4] L.-H. Yu *et al.*, Science. **289** (2000) 932.
- [5] S. V. Benson *et al.*, Phys. Rev. A **39** (1989) 1579.
- [6] K. J. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 244802.
- [7] N. Sei *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. A **483** (2002) 429.
- [8] N. Sei *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 093501.
- [9] T. Yamazaki *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. A **331** (1993) 27.
- [10] K. Yamada *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. A **445** (2000) 173.
- [11] K. Yamada *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. A **528** (2004) 268.
- [12] N. Sei *et al.*, Opt. Lett. **34** (2009) 1843.
- [13] N. Sei *et al.*, accepted to Opt. Lett.