

## 阪大産研における FEL スペクトルの時間的振る舞い

### TEMPORAL BEHAVIOR OF FEL SPECTRUM AT ISIR, OSAKA UNIVERSITY

加藤龍好<sup>#, A)</sup>, 川瀬啓悟<sup>A)</sup>, 入澤明典<sup>A)</sup>, 藤本将輝<sup>A)</sup>, 大角寛樹<sup>A)</sup>, 矢口雅貴<sup>A)</sup>,  
船越壮亮<sup>A)</sup>, 堤亮太<sup>A)</sup>, 末峰昌二<sup>A)</sup>, 磯山悟朗<sup>A)</sup>, 柏木茂<sup>B)</sup>, 山本樹<sup>C)</sup>  
Ryukou Kato<sup>#, A)</sup>, Keigo Kawase<sup>A)</sup>, Akinori Irizawa<sup>A)</sup>, Masaki Fujimoto<sup>A)</sup>,  
Hiroki Ohsumi<sup>A)</sup>, Masaki Yaguchi<sup>A)</sup>, Sousuke Funakoshi<sup>A)</sup>, Ryota Tsutsumi<sup>A)</sup>,  
Shoji Suemine<sup>A)</sup>, Goro Isoyama<sup>A)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>B)</sup>, Shigeru Yamamoto<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

<sup>B)</sup> Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

Temporal evolution of the FEL spectrum was investigated with the Terahertz FEL at ISIR, Osaka University. The growth of the FEL optical pulse during the exponential amplification was discontinued by shortening the macro-pulse length of the electron beam, and the FEL wavelength spectra under the exponential growth were measured with a plane-reflective grating type spectrometer and a Ge:Ga photoconductive detector. The time-resolved wavelength spectra of the FEL were obtained from the noise level to the power saturation level.

#### 1. はじめに

大阪大学産業科学研究所では、Lバンド電子ライナックを駆動源とするテラヘルツ自由電子レーザー (FEL) の研究開発を行っている<sup>[1] [2] [3]</sup>。FEL は単色スペクトルを有するコヒーレント光源であるが、自発放射領域、指数関数増幅領域、および飽和領域と FEL 光が成長する中で、波長スペクトルの振る舞いは動的に変化する。FEL プロセスの初期において光パルスは、電子バンチと同程度の時間幅、アンジュレータ自発放射と同程度の波長スペクトル幅を有すると考えられる。その後、増幅プロセスを重ねることでパルス時間波形と波長スペクトルは次第に変化する。一般に指数関数増幅領域においてコヒーレントな単一の光パルスが成長するとき、FEL の増幅動作によりパルスの時間幅は減少し、時間幅とフーリエ限界の関係にあるスペクトル幅は増加すると考えられる。また、光パルスの一部が出力飽和に達した後は、それまで相対的に強度が低かった部分も飽和レベルに追い付いてくるため、時間幅は増加に転じる。この場合、スペクトル幅は逆に減少に転じることになる。他方、リミットサイクル振動やサイドバンドが現れる場合は、もはや単一の光パルスではなくなるためにフーリエリミットの関係を外れ、光パルスの時間幅とスペクトル幅は同時に増加、または周期的に振動すると考えられる。

これまでも FEL の波長スペクトルの測定は報告されているが、そのほとんどは飽和に達した後のスペクトルに関するものである。また波長スペクトルの時間分解測定も報告されているが、主な興味の対象はサイドバンドの形成にあった<sup>[4] [5]</sup>。我々は FEL の増幅プロセスに起因する波長スペクトルの中心波長

やスペクトル幅の動的変化そのものを興味の対象としている。本学会では FEL 増幅の初期過程から指数関数増幅領域、飽和領域にわたる波長スペクトルの時間的な変化について報告する。

#### 2. FEL システムと測定系

大阪大学産業科学研究所の L バンド電子ライナックは 108 MHz 空洞 2 台と 216 MHz 空洞 1 台で構成される 3 段式のサブハーモニックバンチャー (SHB) システムを有し、大電荷量の単バンチビームを加速することができる。FEL 実験時には、ライナックはマルチバンチモードで動作し、このとき熱陰極電子銃 (Eimac, YU-156) で発生した加速電圧 100 kV でピーク電流 600 mA、パルス長 8  $\mu$ s の連続ビームが SHB システムに入射される。SHB システムでは 2 番目の 108 MHz 空洞 1 台と 216 MHz 空洞 1 台が使用され、9.2 ns 間隔でパルス長 500 ps のマイクロパルス列が形成される。このマイクロパルスは L バンド (1.3 GHz) のプリバンチャー、バンチャーにより 20 ps までバンチングされ、3 m の L バンド主加速管で必要なエネルギーまで加速される。FEL 実験時の典型的なビームエネルギーは 12.5~21 MeV である。

この電子ビームはアクロマティックビーム輸送系を通じて FEL システムに導かれる。FEL システムで使用されているウィグラーは、エッジ集束方式を用いた平面型強集束ウィグラーである。磁極間隔を 30 mm から 120 mm まで変化させることで K 値を 0.01 から 1.54 まで変化させることができる。

光共振器は 2 枚の球面ミラーで構成される開放形 ファブリ・ペロー共振器である。光パルスは 5.531 m の長さの光共振器に蓄積され、マルチバンチ電子ビームにより繰り返し増幅される。光共振器内に蓄積された光の一部は上流側共振器ミラーの中央に設けられ直径 3 mm の結合穴から取り出される。

<sup>#</sup> kato@sanken.osaka-u.ac.jp

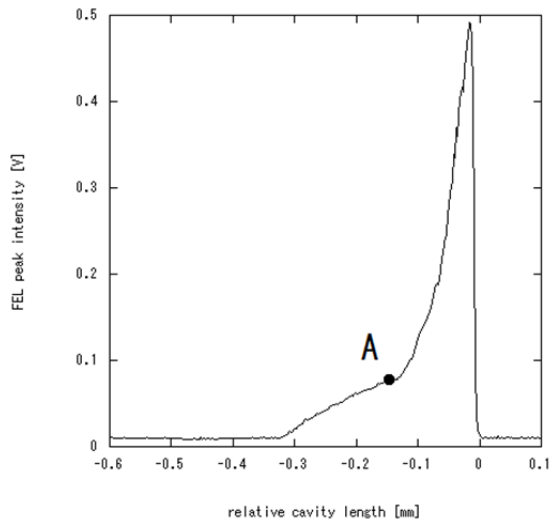


Figure 1: Peak intensities of the FEL optical pulses measured as a function of the relative optical cavity length with a Ge:Ga photoconductive detector. Wavelength spectra were measured at the point A on the detuning curve.

FEL 光は真空排気された光輸送路により加速器室から測定室に運ばれる。高真空の FEL システムと低真空の光輸送路は直径 20 mm で厚さ 0.2 mm の合成ダイヤモンド窓により仕切られている。この真空窓の透過率は 5  $\mu\text{m}$  近傍の吸収域を除いてほぼ 70% である。光輸送路は真空のまま測定システムの分光器に接続されている。

分光器は、平面反射型回折格子を用いたクロス Czerny-Turner 型単色計であり、回折格子の交換により様々な波長域の分光に対応できる。現在はアルミ材から削り出した 5 grooves / mm の回折格子を用いて、50~150  $\mu\text{m}$  を分光している。波長分解は回折格子の刻線数とスリット幅によって決まり、前述の回折格子を幅 3 mm の入射スリットで用いた時の波長分解は計算上約 1  $\mu\text{m}$  となる。

高速の光検出器として用いているのは、Ge:Ga 半導体検出器 (QMC 社製) である。これは波長 105  $\mu\text{m}$  近辺に最高感度を有し、長波長側で急速に感度が減少する。窓材と短波長カットフィルターにより、短波長側の測定範囲は 50  $\mu\text{m}$  までに制限される。Ge:Ga 検出器の素子単体での時間分解は 10 ns (FWHM) であり、アンプを用いた時は 200 ns 程度まで悪化する。この検出器は FEL 光の時間成長の測定に用いられる。また、Ge:Ga 検出器を線形応答性の良いところで使用するために、入射光を 100 mm の厚さの Teflon ブロックで減衰させると同時に 100 倍のアンプを使用して測定している。また、大気中の水蒸気吸収を抑えるために分光器窓と検出器窓の周囲を乾燥空気で充填している。

### 3. 測定結果

#### 3.1 デチューニング曲線

共振器型 FEL では、先行する電子バンチが放射・

増幅した光パルスの後続の電子バンチと相互作用させることによりレーザー増幅を行う。電子バンチの繰返し周期と共振器内を光パルスが一往復する周期が整数倍になる完全に同期した位置をゼロ・デチューニングと呼ぶ。このゼロ・デチューニング位置からの共振器長のずれを、デチューニング長と呼んでいるが、FEL の増幅利得や飽和強度、波長スペクトル、マイクロパルス長などの主要なパラメータはこのデチューニング長に強く依存している。そのため今回波長スペクトルを評価するにあたり、最初に FEL のピーク強度のデチューニング長依存性 (デチューニング曲線) を測定した。この時の典型的な FEL 中心波長は 105  $\mu\text{m}$  である。このとき測定したデチューニング曲線を Figure 1 に示す。

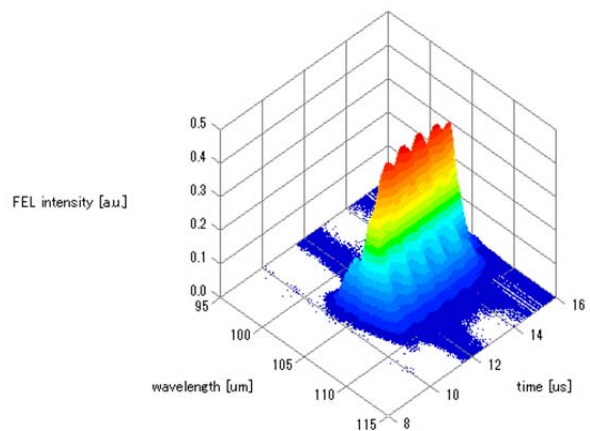


Figure 2: Time-resolved wavelength spectrum measured at the point A in the Figure 1. The FEL power reaches saturation rapidly and the peak has stayed in almost the same wavelength around 105  $\mu\text{m}$ . The spectrum width has slightly narrowed after the saturation, and oscillates periodically.

#### 3.2 時間分解波長スペクトル

回折格子分光器で単色化し、Ge:Ga 検出器を用いて FEL パルスの波長ごとの時間波形を測定する。波長を掃引しながらこの測定を行い、得られた時間波形を波長方向に連結して 3 次元グラフ化することで、時間情報を含んだ FEL 波長スペクトルを再構成できる (Figure 2)。ここでは測定点として、最も速く FEL 発振が立ち上がる FEL 増幅利得が最大の点 (Figure 1 中の A 点) を選んだ。一方の横軸は波長、もう一方の横軸はタイミングシステムの基準トリガーからの時間であり、縦軸は Ge:Ga 検出器の出力である。この手法で観測できる波長スペクトルの時間変化は Ge:Ga 検出器の線形応答性によって制限される。そのため FEL 光の成長過程全体にわたる波長スペクトルの変化を評価するためには次節で述べる手法が必要となる。

#### 3.3 FEL 波長スペクトルの時間変化

FEL プロセスの初期の状態から出力飽和に至る光

の成長を観測するために、FEL を駆動する電子ビームのマクロパルス長を制御することで指数関数的に増幅される FEL の成長を停止させ、各々の時点での FEL の時間分解波長スペクトルを測定した。そのとき減衰材である Teflon ブロックの厚さは光強度に応じて適宜調整した。測定された時間分解波長スペクトルから適切な時間間隔の波長スペクトルを選び出し、測定時に使用した Teflon ブロックによる強度の減衰を補正して、ひとつのグラフにまとめたものを Figure 3 に示す。

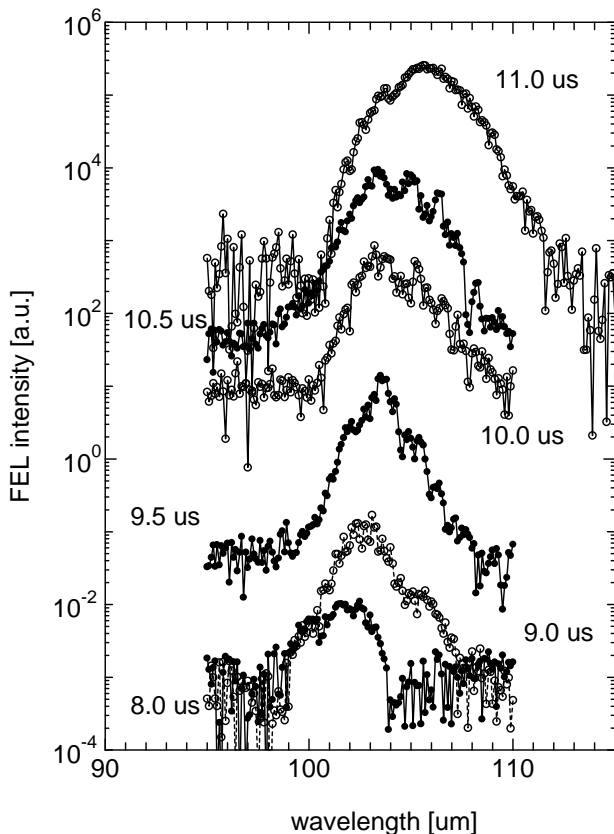


Figure 3: Temporal evolution of the wavelength spectrum measured from the noise level to the power saturation level. Times in figure show passage times from the reference trigger of the timing system.

この図では加速器のタイミングシステムの基準トリガーからの経過時間で  $8 \mu\text{s}$  から  $11 \mu\text{s}$  のあいだの FEL 波長スペクトルの変化が示されている。この  $3 \mu\text{s}$  に FEL の光強度は 7 桁以上増幅され飽和に達している。この間にピーク波長の位置は  $5 \mu\text{m}$  程度長波長側にシフトしている。これらの変化は、光成長過程の初期状態においては、自発放射波長領域から FEL 増幅バンドの最大利得波長へのシフト、FEL パワーの飽和領域においては、飽和に伴う FEL 増幅バンドの最大利得波長の長波長側へのシフトとして解釈できる。

#### 4. まとめ

FEL を駆動する電子ビームのマクロパルス長を制御し、指数関数的に増幅される FEL の成長を停止させ、各々の時点での波長スペクトルを測定することで、FEL 増幅の初期過程から指数関数増幅領域、飽和領域にわたる波長スペクトルの時間的な変化について測定した。この波長スペクトルの変化は定性的には従来考えられてきた物理的な解釈と合致している。

#### 参考文献

- [1] R. Kato, S. Kondo, T. Igo, T. Okita, T. Konishi, S. Suemine, S. Okuda, G. Isoyama, Nucl. Instrum. Methods in Physics Research A 445 (2000) 169.
- [2] G. Isoyama, R. Kato, S. Kashiwagi, T. Igo, Y. Morio, Infrared Physics & Technology 51 (2008) 371-374.
- [3] K. Kawase, R. Kato, A. Irizawa, M. Fujimoto, S. Kashiwagi, S. Yamamoto, F. Kamitsukasa, H. Osumi, M. Yaguchi, A. Tokuchi, S. Suemine, G. Isoyama, Nucl. Instrum. Methods in Physics Research A 726 (2013) 96.
- [4] W. P. Leemans, M.E. Conde, R. Govil, B. van der Geer, M. de Loos, H. A. Schwettman, T. I. Smith, and R. L. Swent, "Time-resolved study of sideband generation and transition to chaos on an infrared FEL," LBL-36109, CBP Note-102.
- [5] J.C. Frisch, J.E. Edighoffer, Nucl. Instrum. Methods in Physics Research A 296 (1990) 9.