

高強度テラヘルツ FEL の時間形状と波長スペクトルの発展

TEMPORAL AND SPECTRAL EVOLUTION OF THE HIGH POWER TERAHERTZ FEL RADIATION

加藤龍好^{#, A)}, 川瀬啓悟^{A)}, 入澤明典^{A)}, 藤本将輝^{A)}, 矢口雅貴^{A)}, 船越壮亮^{A)},

堤 亮太^{A)}, 宮崎数磨^{A)}, 磯山悟朗^{A)}, 柏木 茂^{B)}, 山本 樹^{C)}

Ryukou Kato^{#, A)}, Keigo Kawase^{A)}, Akinori Irizawa^{A)}, Masaki Fujimoto^{A)}, Masaki Yaguchi^{A)}, Sousuke Funakoshi^{A)},
Ryota Tsutsumi^{A)}, Kazuma Miyazaki^{A)}, Goro Isoyama^{A)}, Shigeru Kashiwagi^{B)}, Shigeru Yamamoto^{C)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

^{B)} Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We report the temporal and spectral evolution of the optical pulse in the high power Terahertz FEL at ISIR, Osaka University. Autocorrelation of the FEL pulses were measured with a Michelson type interferometer and Si bolometers, and the wavelength spectra of the FEL were obtained by Fourier transform of the interferogram. The temporal and spectral distribution of the FEL optical pulse during the exponential amplification were measured by shortening of the macro-pulse duration of the electron beam.

1. はじめに

大阪大学産業科学研究所（以下、阪大産研）では L バンド電子ライナックを駆動源とする高強度テラヘルツ自由電子レーザー（FEL）の開発を行っている^[1,2,3]。FEL は加速器で生成した高エネルギー電子ビームの運動エネルギーをアンジュレータ等の周期交番磁場を用いてコヒーレントな光のエネルギーに変換する装置である。

共振器型 FEL では、数〜数十ピコ秒の電子バンチが数百個連なった電子ビームマクロパルスも駆動源として用いるため、そこで発生する FEL 光も同様のマイクロパルス〜マクロパルス構造を形成する。赤外〜テラヘルツ領域でこのマイクロパルスの時間構造を直接測定できる検出器が存在しないことから、一般的には干渉計を使った自己相関測定が用いられる。さらにこの自己相関波形は Fourier 変換することで、パワースペクトルを得ることができるため、自己相関法は時間領域情報と周波数領域の情報の両方を同時に得ることができる。

我々はこれまで平面回折格子型分光器と高速の Ge:Ga 検出器を用いて、FEL 光の時間発展を測定してきた。限られた赤外検出器のダイナミックレンジを用いて FEL 光の自発放射領域から飽和領域までの 7 桁にわたる成長を得るために、電子ビームのマクロパルス長を変えながら、FEL 光の時間発展途中での周波数分布を測定し、その時間的な成長を評価してきた^[4]。その中で、波長スペクトルのピーク波長の変化は、周波数領域でのゲイン帯域とそのパワーに対する変化により説明可能であることを示した。他方、波長スペクトルの分布は FEL 光の成長に応じて動的に変化することを観測したが、この変化を定

性的・定量的に説明するには至っていない。FEL 光の周波数空間での発展は、時間空間での発展と密接に結びついているため、一方のみの測定により議論を進めることが困難であることによる。そこで今回は、干渉計を用いた自己相関法と、電子ビームのマクロパルス長を変えて FEL 光の時間発展を測定する手法を組み合わせることで、光パルスの時間幅と周波数幅を同時に取得する方法に切り替えた。

一般的に、単一のコヒーレントな光パルスの成長過程で、その時間幅と周波数幅は Fourier 変換極限の関係を満たすようになると考えられている。FEL 光もまた特定の条件下では Fourier 変換極限の関係を満たすと考えられている^[5]。我々の FEL においてもこの関係が成り立つのかどうか評価を試みた。

2. FEL システムと測定系

阪大産研の 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 μ 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

[#] kato@sanken.osaka-u.ac.jp

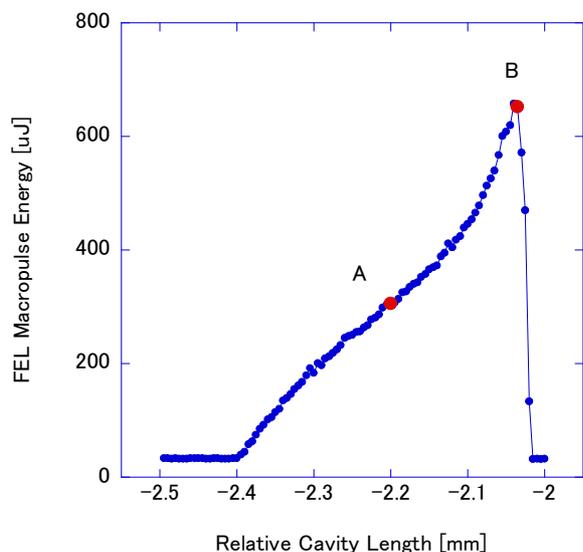


Figure 1: Pulse energies of the FEL optical pulses measured as a function of the relative optical cavity length with a joule meter.

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 1.54 から 0.01 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。

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 μm 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干渉分光計に接続されている。

我々が使用している干渉分光計は、マイケルソン型干渉計を用いた Fourier 変換分光計であり、光ビームスプリッターとしてマイラ膜とワイヤグリッドが使用できる。今回の実験では厚さ 6 μm のマイラ膜をスプリッターとして使用している。FT-R による周波数分解は干渉計の可動鏡の可動距離で決まる。この干渉計の場合可動距離は最大 50 mm なので、最小周波数分解は 3 GHz となる。

干渉分光計に入射する前の光パルスを前述のものと同様のスプリッターで分岐、それをモニター用の光検出器で測定し、その値で干渉波形を規格化することで FEL 光の強度変動の影響を軽減している。

高感度の光検出器として用いているのは、2 台の Si ボロメータ検出器 (Infrared Laboratories 社製) である。これは熱型検出器であるため波長依存性がほとんどなく赤外からミリ波 (15 μm ~ 2 mm) まで広い範囲で利用可能である。実際には検出器の窓材と短波長側の熱雑音を抑えるための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 μm までに制限される。また、Si ボロメータの飽和を抑え線形

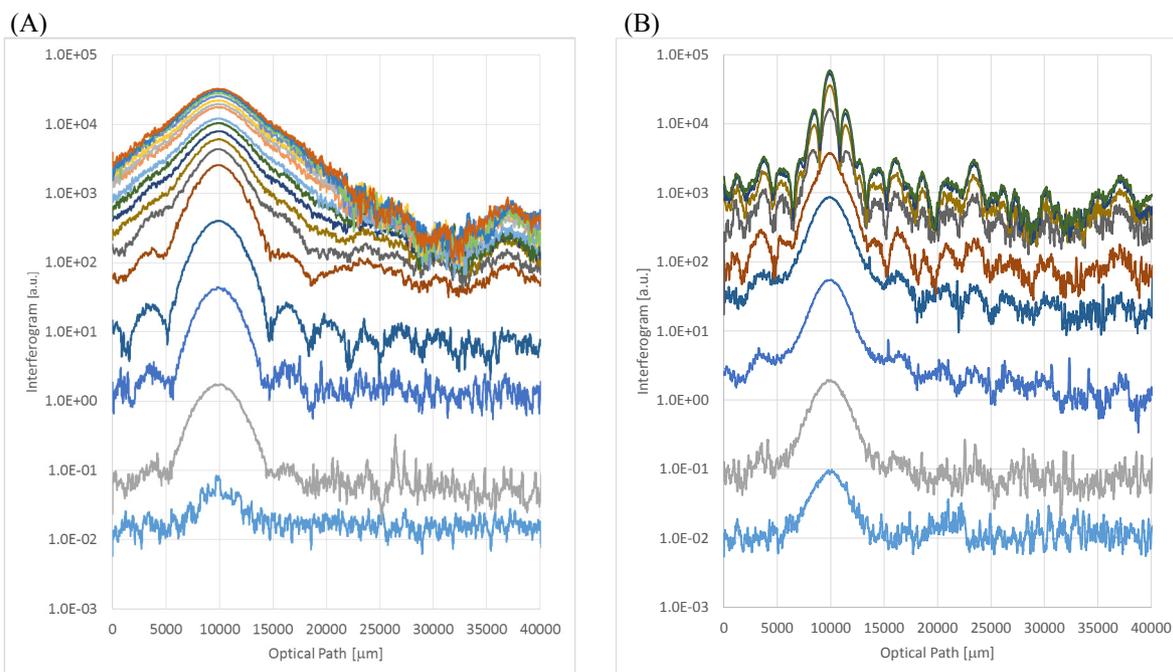


Figure 2: Envelopes of the autocorrelation of the FEL optical pulses measured with a Michelson interferometer. (A) The autocorrelations were measured at the cavity length A in the Figure 1, when the macropulse duration of the electron beam is changed from 2.2 to 8.1 μs . (B) The autocorrelations were measured at the cavity length B in the Figure 1, when the macropulse duration of the electron beam is changed from 2.6 to 8.1 μs .

応答性の良いところで使用するために、入射光を適切な厚さの Teflon ブロックで減衰させると同時に 1000 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干渉計窓と検出器窓の周囲を乾燥空気充填している。

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、最初に FEL の積分強度の共振器長依存性（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 $110 \mu\text{m}$ 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。ゼロ・デチューニング位置は我々の装置環境下では一日の中で $20 - 30 \mu\text{m}$ ほど変化するため、横軸は相対共振器長で示している。これまでの経験から、曲線が長共振器長側でほぼ 0 に落ちる位置がゼロ・デチューニング位置と推測される。以下の測定は FEL 動作上で特徴的な FEL 利得が最大になる点（図中、A）と積分強度が最大となる点（図中、B）の 2 点で行った。

3.2 FEL 光パルスの自己相関波形の時間変化

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 光パルスの自己相関波形を測定した。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。マイケルソン型干渉計で測定した自己相関波形は波長スケールでの振動を含むため、光パルスの時間幅を評価するのに適さない。そこで Hilbert 変換を用いて干渉波形からその包絡線を抽出した。電子ビームマクロパルス長を変化させた時の自己相関波形の包絡線の変化を Figure 2 に示す。光減衰材として用いた Teflon による減衰量を補正して、時間形状だけでなく相対的な強度変化も正しく反映させている。ここでは測定点として、(A) 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）と (B) デチューニング曲線のピーク付近（Figure 1 中の B 点）を選んだ。このときの FEL 中心波長は $110 \mu\text{m}$ である。(A) は電子ビームマクロパルス長を $2.2 \mu\text{s}$ から $8.1 \mu\text{s}$ まで、 0.367 ns 毎に変化させた時の包絡線であり、(B) は $2.6 \mu\text{s}$ から $8.1 \mu\text{s}$ まで、 0.734 ns 毎に変化させた時の包絡線を示している。

3.3 波長スペクトルの時間変化

測定した自己相関波形を Fourier 変換することで周波数領域でのパワースペクトルを得ることができる。これを Figure 3 に示す。(A) は電子ビームマクロパルス長を $2.2 \mu\text{s}$ から $8.1 \mu\text{s}$ まで、 0.367 ns

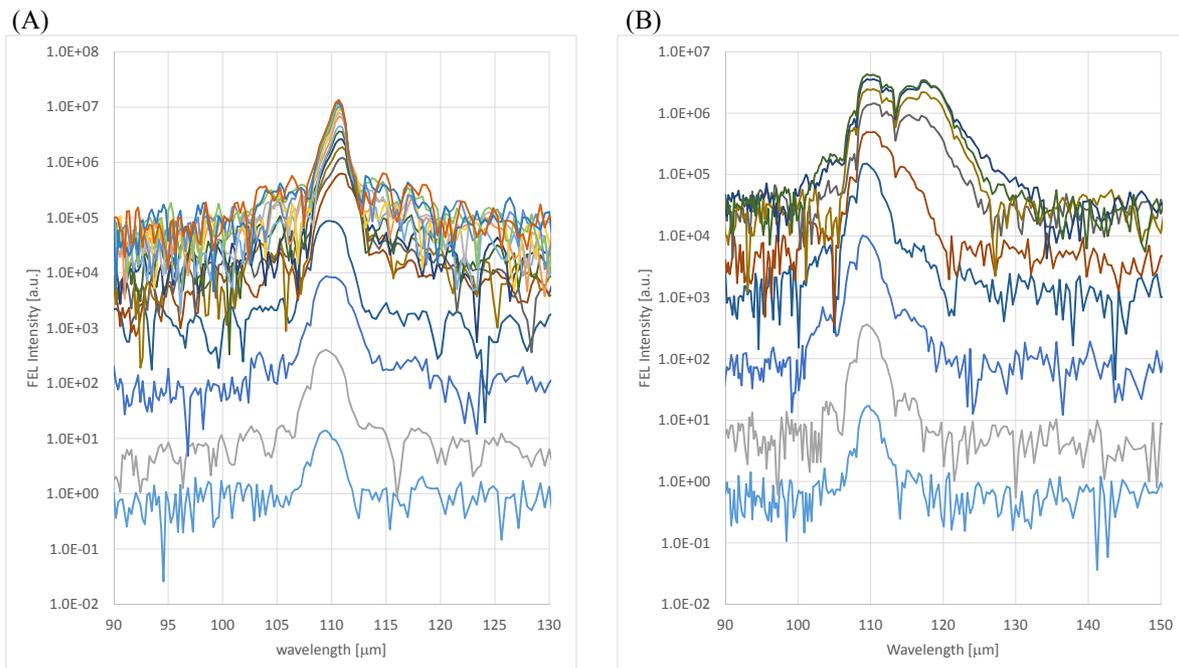


Figure 3: Wavelength spectra obtained by the Fourier transform of the autocorrelation of the FEL optical pulses as shown in Figure 2. Panels (A) and (B) were measured at the cavity lengths A and B in the Figure 1, respectively.

毎に変化させた時の波長スペクトルであり、(B)は 2.6 μs から 8.1 μs まで、0.734 ns 毎に変化させた時の波長スペクトルを示している。両者とも指数関数増幅領域では中心波長は 110 μm で成長し続けているが、飽和到達後のスペクトルの広がりには大きな差がみられる。

4. Fourier 変換極限

前述の自己相関波形の包絡線から時間幅を、波長スペクトルから周波数幅を求める。ここでは特定の分布を仮定してフィットできるような分布形状が得られていないため、自己相関波形中心、ピーク周波数中心の周りの 2 次のモーメントを求めてその平方根を時間幅、周波数幅とした。また、パワーの時間分布がガウス型の場合、その電場の時間分布の自己相関波形は元のガウス分布の 2 倍の時間幅になることから、その半分を時間幅と仮定した。両者を各々のマクロパルス長のタイミングで評価し、その積をひとつのグラフにまとめたものを Figure 4 に示す。時間幅と周波数バンド幅の積 (Time-Bandwidth Product; TBP) は、両者の分布がガウス型でかつチャープしていないとき、上記定義では 0.079 となると予想される。今回の測定結果では、TBP が最小になるのは共振器長がゲイン最大の位置で、かつ、指数関数増幅の途中であった。その時の値は、0.16 であり、予想値のほぼ 2 倍となっている。

このずれの原因として考えられるのは、平均化された測定、チャープの存在、飽和後の複数パルスの存在の 3 点である。まず 1 点目は、我々の測定では、単一ショットでの測定ができないため、時間幅、周波数バンド幅ともに時間的に平均化された値を評価していることである。単一ショット内ではより狭いパルスが実現されていても、その位置や幅が安定していないと評価が困難となる。2 点目はチャープの

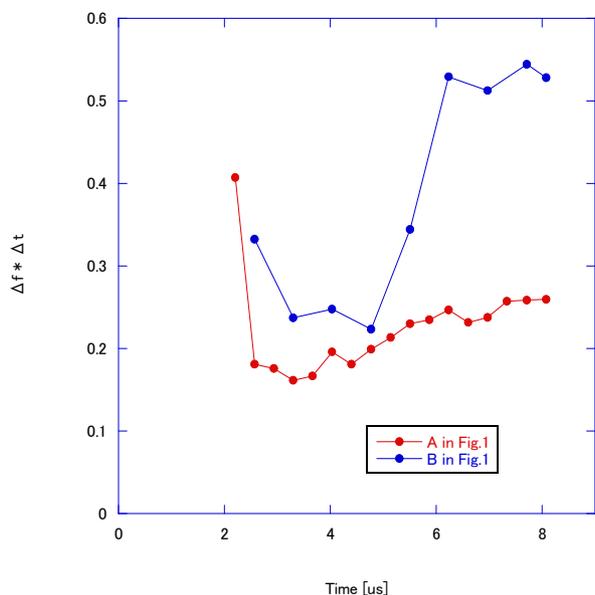


Figure 4: Time band-width product of the FEL optical pulses.

ある場合、到達可能な TBP はチャープの無い場合よりも大きな値になることである。これについてはガウス型や sech^2 型のチャープパルスについて到達可能な TBP が解析的に求められた例がある^[6]。3 点目は、飽和に達すると複数の光パルスが同時に出現することである。複数パルスの存在は TBP の値を押し上げる要因に成り得る。しかし、複数のパルスが出現するのは、飽和到達後であり、指数関数増幅途中の TBP を増加させる要因に成るとは考えにくい。

最後に 1 次元のシミュレーションコード FELO により、実験データの再現を試みた。FELO では飽和時に顕著なチャープがあり、かつ複数パルスが出現する場合でも、指数関数増幅領域の後半では、TBP が Fourier 変換極限に達するという結果が得られている。

5. 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、各々の時点での自己相関波形を測定することで、FEL 増幅の初期過程から指数関数増幅領域、飽和領域にわたる自己相関幅と波長スペクトルの時間的な変化について測定した。その時間幅と周波数バンド幅について Fourier 変換極限の関係が成り立つのかどうか評価を試みた。

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] R. Kato, K. Kawase, A. Irizawa, M. Fujimoto, H. Ohsumi, M. Yaguchi, S. Funakoshi, R. Tsutsumi, S. Suemine, G. Isoyama, S. Kashiwagi, S. Yamamoto, "Temporal Behaviour of FEL Spectrum at ISIR, Osaka University", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 3-5, 2013, Nagoya, Japan)
- [5] K.-J. Kim, "The evolution and Limits of Spectral Bandwidth in Free Electron Lasers", LBNL-29724.
- [6] P. Lazaridis, G. Debarge, and P. Gallion, Optics Letteres 20 (1995) 1160.