

EVALUATION OF THE FEL GAIN BY MEASUREMENT OF THE POWER DEVELOPMENT IN THE WIDE RANGE

Masaki Fujimoto^{#,A)}, Keigo Kawase^{A)}, Ryukou Kato^{A)}, Akinori Irizawa^{A)}, Fumiyoshi Kamitsukasa^{A)}, Hiroki Ohsumi^{A)}, Masaki Yaguchi^{A)}, Shigeru Kashiwagi^{B)}, Shigeru Yamamoto^{C)}, Goro Ioyama^{A)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

^{B)} Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University
1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai, Miyagi, 982-0826

^{C)} Institute of Materials Structure Science, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We have developed a new method to measure evolution of the FEL power using a silicon bolometer, which has a large dynamic range of detection with very high linearity. The detector has the time resolution of $\sim 200 \mu\text{s}$, which is much longer than the FEL macropulse of a few μs , so that it measures energy in the macropulse. The number of amplifications is changed by varying the macropulse length of the electron beam and energy in the FEL macropulse is measured at a wavelength $\sim 100 \mu\text{m}$ with the bolometer and appropriate Teflon absorbers. The development of the macropulse energy of FEL is measured over eight orders of magnitude from a very low power level close to the incoherent radiation up to the FEL power saturation. The temporal development of the FEL power is derived from the energy development as a function of the number of amplifications and then from the power development the FEL gain is derived with the number of amplifications. We measured some power developments with varying resonator length and evaluated the FEL gains at some resonator lengths. The maximum FEL gain thus evaluated is about 56 percent, which agrees with calculation by the Super-Mode theory.

広い強度領域での FEL パワー発展測定による増幅率評価

1. はじめに

我々は、L バンド電子ライナックを用いたテラヘルツ (THz) 領域の自由電子レーザー (FEL) で FEL 物理の実験研究を行っている。FEL 実験では、電子銃で発生したパルス長 $8 \mu\text{s}$ の電子ビームを 108、216 MHz 各 1 台のサブハーモニックバンチャーおよび 1.3 GHz のプレバンチャーとバンチャーを用いて 9.2 ns 間隔のバンチ列を発生し、L バンド加速管で約 12~18 MeV まで加速した後、周期長 6 cm で 32 周期のウィグラーと長さ 5.531 m の光共振器より構成される THz-FEL に入射し、2~3 THz (25~150 mm) で FEL 発振を得る。

FEL 増幅率は、FEL の特性や性能を表す重要な指標の一つであり、多数のマイクロパルスからなる FEL マクロパルスの時間発展を測定することにより求めることができる。従来は、10 ns 程度の早い応答を持つ Ge:Ga 半導体検出器を用いて約 3 ms のマイクロパルス形状を測定し、増幅率を求めてきた。この手法には、検出器の線形応答性や感度とダイナミックレンジ、時間分解能などによる制限がある。

我々は、電子ライナックの電子銃から入射する電子パルス長を変えて電子バンチ数、即ち FEL の増幅回数を制御する手法を開発した。熱型検出器でかつ広いダイナミックレンジを持つ Si ボロメータにより

FEL マクロパルスのエネルギーを増幅回数関数の関数として測定し、その差分を用いて FEL のパワー発展を求める。この研究の中間結果を昨年度加速器学会で報告した^[1]。

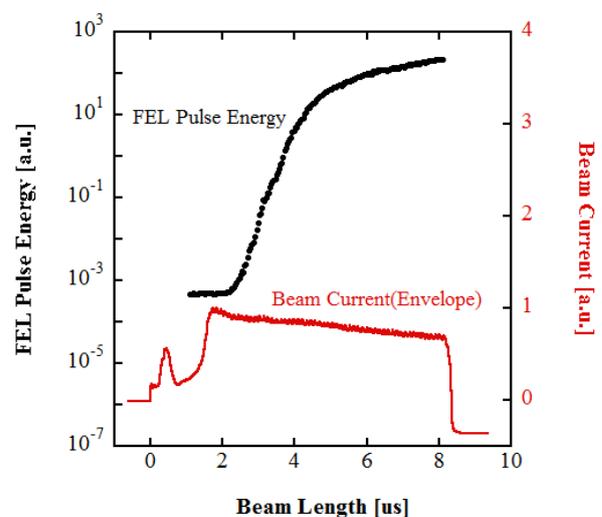


図 1 FEL エネルギー発展と光共振器内電子ビーム

[#] mfmoto25@sanken.osaka-u.ac.jp

しかし、初期の実験では図1の赤線で示す光共振器に入射する電子ビームの時間構造には、先頭部に短いピークが見える。Si ボロメータは、電子ビームの先頭部分が出す光も同時に計測するため、後続の電子ビーム本体部分が引き起こす FEL 発振のエネルギー測定の下限を制限する。そこで今回、電子ビームの加速管への入射タイミングを調整することによって先導のピークを消し、FEL エネルギーの測定範囲を拡大した。

また、FEL パルスの時間構造モデルに基づいてエネルギーから FEL パルスのピークパワーを抽出する手法を導入し、より正確なパワー発展を得た。

本学会ではこれらの手法の導入による新しい増幅率評価の現状について報告する。

2. 実験の背景

2.1 Si ボロメータと計測システム

熱型検出器である Si ボロメータの時間分解能は 200 μ s 程度であるため、数 μ s の FEL パルスに対してエネルギーを計測する。Si ボロメータの信号波形は出力強度変化に対して一定であるため、オシロスコープで計測した波形に対して Si ボロメータの信号波形モデルによる回帰分析を行い、ノイズの影響を軽減した出力強度を評価している。この手法により約 5~6 桁にわたる検出器ダイナミックレンジを得る。また、光強度の小さな領域では 1000 倍のアンプを用いて信号波形を増幅する。

検出器出力が飽和する光強度の大きな領域では、数種類の厚みのテフロンを用いて光を減衰する。波長特性を考慮してテフロンの減衰率は定期的に評価している。テフロンは厚み約 5 mm で光強度を半減する。

計測は 12 ビットオシロスコープを使用し、強度レンジ切換をなるべく避けることで計測の短時間化を図っている。また実験パラメータ変更とデータ収集は、プログラムによって自動化している。これらによる実験の短時間化は FEL の長周期変動の影響を軽減する。

2.2 実験パラメータ

今回の実験で用いたパラメータを表1に示す。

表1 実験パラメータ

電子ビームのピークエネルギー	15.0 MeV
ウィグラーギャップ	30.0 mm
発振 FEL のピーク波長	105.8 μ m
光共振器損失率	11 % / 1 pass

光共振器損失率については、Ge:Ga 検出器で FEL パルス強度の時間スペクトルを計測し、光共振器への電子ビーム入射終了後の減衰過程から評価する。

今回の実験で、Ge:Ga 検出器を用いて測定した detuning 曲線を図2に示す。エネルギー発展の測定は、detuning 曲線を基に、図2に赤丸で示した4点の光共振ミラー位置を選択して行う。

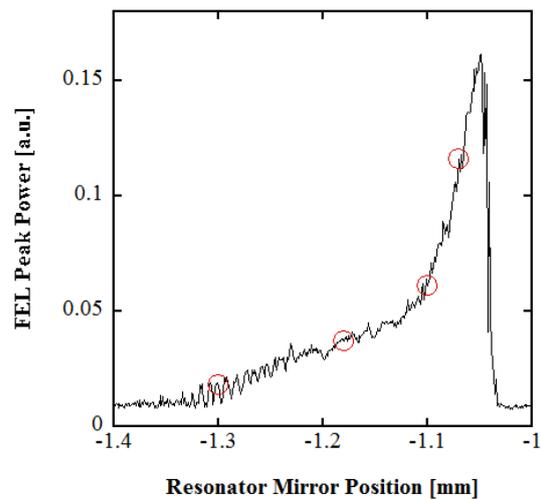


図2 detuning 曲線

また、電子ビームの加速管への入射タイミングを調整することで光共振器内電子パルスが矩形に近づけた。加速された電子ビーム先頭はビームローディングによりエネルギーが高く、偏向磁石によって光共振器へ入射する前に欠落する。このため、光共振器内電子ビームは加速器内電子ビームに比べて 1 μ s 程度短くなる。

3. エネルギー発展の測定

3.1 エネルギー発展の測定

電子銃から入射する電子パルス長を変えながら FEL パルスのエネルギーを Si ボロメータで計測した。各点で 20 ショットを計測し、平均と標準偏差を求めた。電子パルス長の関数として FEL パルスのエネルギー発展を図3に示す。

計測したエネルギー発展は約 8 桁にわたる。電子パルス長が 2.5 μ s を超えたあたりからエネルギーは指数関数的に発展する。その後、FEL 増幅が飽和して発展が緩やかとなる。これは、飽和後の FEL パルスのピークパワーは一定であると考えられるが、電子パルス長の増加により FEL パルス長は成長し、FEL パルスのエネルギーが増大するためである。

電子パルス長が 2.5 μ s 以下では発展が線形関数的であり、自発放射光パルスのエネルギー発展を示していると考えられる。しかし、図3の赤線に示すよ

うに光共振器に電子ビームは既に入射しているため、FEL 増幅による指数関数的な発展が自発放射光強度に埋もれていると考えられる。このため、FEL 発振の開始する強度を評価する。

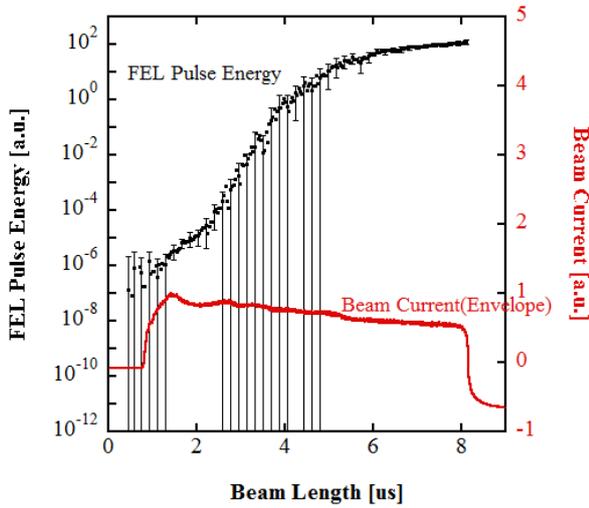


図3 FEL エネルギー発展と光共振器内電子ビーム

3.2 FEL 発振開始位置の評価

測定した FEL エネルギーの発展から、FEL 発振の開始する電子パルス長と強度を評価した。FEL 発振開始位置は FEL パワーの時間発展を求める際に必要である。

自発放射光を種光として増幅が開始するとし、

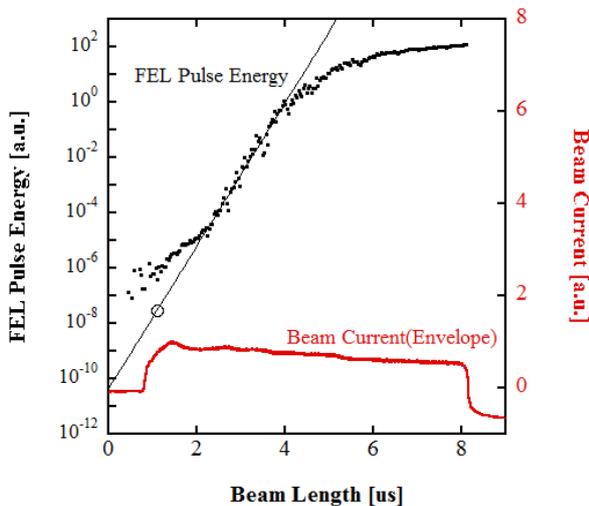


図4 FEL 増幅開始位置の評価

エネルギーの線形関数的な発展領域に対して線形関数による回帰分析を行い、その回帰曲線の値が 0 に最も近づく電子パルス長で FEL 発振が開始するとした。光共振器内には、評価した電子パルス長の前後から電子ビームが入射しており、自発放射と共に FEL 発振が開始するタイミングとして適切であると考えられる。次に、指数関数的な発展領域に対して指数関数による回帰分析を行い、回帰曲線の発振開始の電子パルス長での値を求めた。この値を FEL 発振の開始する強度とする。

図4の黒丸に FEL エネルギー発展から評価した FEL 発振開始位置を示す。自発放射光を種光とした FEL エネルギー発展は、約 10 桁の範囲にわたる。

4. パワー発展の導出と増幅率評価

4.1 パワー発展の導出手法について

Si ボロメータは光パルスのエネルギーを計測するため、各パルス長の電子パルスが発振する光パルスのエネルギーを計測し、増幅回数についてのエネルギーの差分から FEL パルスの時間構造モデルに基づいてパワーを求める。

n 回の増幅を受けた光パルスのピークパワー P_n とエネルギー E_n は、

$$E_n = P_0 + \sum_{i=1}^n P_k + \sum_{j=1}^n (1-l)^j P_n \quad \text{式1}$$

をみます。ここで、 P_0 は FEL 発振開始のパワー、 l は光共振器損失率である。式1の第二項は発展過程のエネルギーを示す。また、第三項は減衰過程のエネルギーを示し、光のマイクロパルスが光共振器内で無限に往復するとした無限等比級数で近似する。式1より P_n は、 E_n の差分 D_n を用いて、

$$P_n = (1-l)P_{n-1} + lD_n \quad \text{式2}$$

と書ける。

また、前節で求めた FEL 発振開始のエネルギー E_0 は、

$$P_0 = lE_0 \quad \text{式3}$$

をみます。

4.2 パワー発展の導出

測定した FEL エネルギーの発展から式2により FEL パワーの時間発展を導出した。図5に増幅回数の関数とした、約 9 桁にわたる FEL パワーの発展を示す。

導出した FEL パワーは増幅回数が 30 回を超えたあたりから指数関数的な発展を示した。約 80 回から発展は緩やかとなり、やがて飽和した。一方、増幅回数が 30 回を下回る領域でも緩やかな発展を示した。この領域は FEL エネルギー発展で自発放射光パルスの強度が支配的と考えられる領域に相当する。この領域の差分もまた FEL パワーに比べて十分に大きいため、自発放射光の強度変化に FEL パワー発展が埋もれていると考えられる。

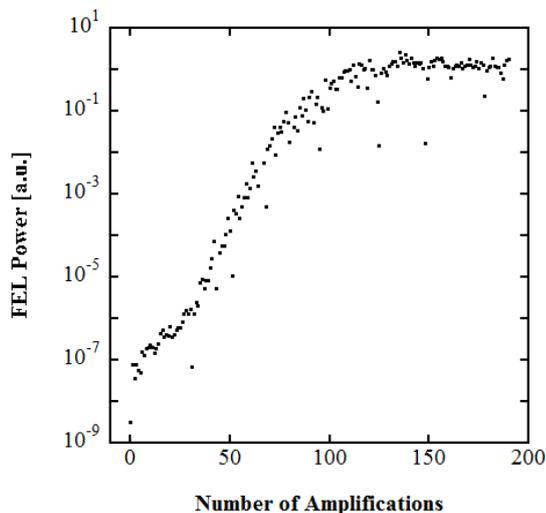


図5 FEL パワーの時間発展

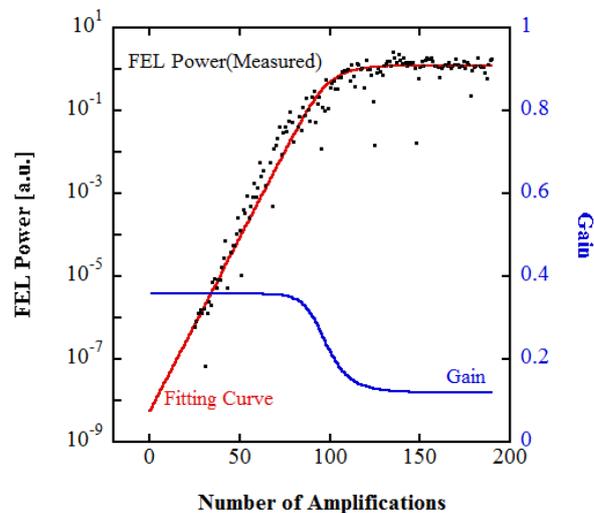


図6 パワー発展の回帰分析と FEL 増幅率

5. 増幅率の評価

増幅率は FEL パワーの増幅回数による変化率から求めることができる。すなわち増幅率 g_n は、

$$\frac{P_n}{P_{n-1}} = G_n = (1 + g_n)(1 - l) \quad \text{式 4}$$

をみます。ここで、 G_n は光共振器損失を含む増幅率である。しかし、測定した FEL パワーの時間発展は変動が大きいため、式 4 によって求められる増幅率の時間変化も大きな変動を示した。

そこで、FEL 増幅モデル^[2]を用いた回帰分析を行い、増幅率の時間変化を求める。増幅率 g_n は、

$$g_n = \frac{0.85g_0}{1 + P_{n-1}/P_s - 0.14 P_{n-1}/P_s (1 - P_{n-1}/P_s)} \quad \text{式 5}$$

で表される。ここで、 g_0 は小信号増幅率係数 (small signal gain coefficient)、 P_s は $g_n = g_0/2$ となるときの FEL パワー (saturation intensity) である。また、FEL パワーは式 4 より、

$$P_n = (1 + g_1) \cdots (1 + g_n)(1 - l)^n P_0 \quad \text{式 6}$$

をみますため、式 5、6 より FEL パワーの時間発展モデルを構築する。

線形関数的な発展領域を除いた FEL パワーの時間発展に対してこのモデルによる回帰分析を行い、小信号増幅率と FEL 増幅率の時間変化を求めた。図 6 にパワー発展に対する回帰曲線と増幅率の時間変化を示す。

増幅回数が約 70 回まで増幅率は一定値を保った後急落し、光共振器損失率に近い値へと収束した。これは、FEL 増幅と光共振器による FEL パワーの損失の平衡、すなわち増幅飽和に達したことを示す。

また、各光共振器長での小信号増幅率を同様に求めた。光共振器長を完全同期長からの変化量、すなわち detuning 量に換算し、detuning 量に対する小信号増幅率を図 7 の黒丸に示す。

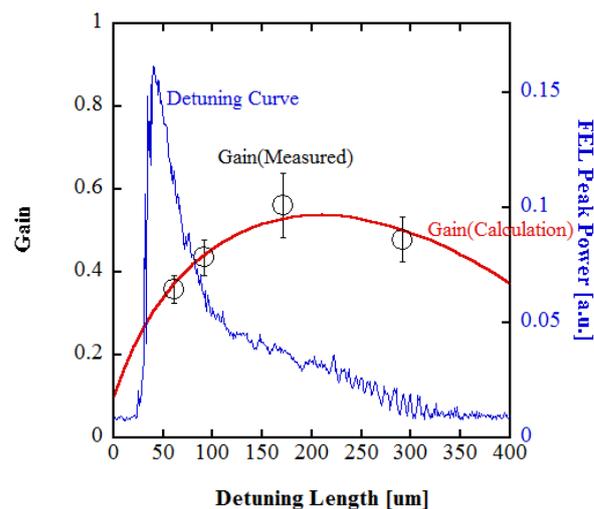


図7 各光共振器長での小信号増幅率

本実験において、FEL 増幅率は detuning 曲線の中腹にあたる光共振器長で最大となり、このとき FEL パルスは 1 回の増幅で約 56% 増幅されたことがわかった。

また、図 7 の赤線に Super-Mode 理論^[3]から計算した小信号増幅率を示し、測定による増幅率と比較す

る。本実験から評価した FEL 増幅率は、絶対値ばかりではなく光共振器長に対すると変化も理論による計算値とよく一致した。

6. まとめ

我々は、広いダイナミックレンジをもつ Si ボロメータを用いて FEL パワー発展を測定する手法を開発してきた。今回の実験では FEL パルスのエネルギーを、電子パルス長を変えながら約 8 桁にわたって計測した後、FEL 発振開始位置を評価することで約 9 桁にわたる FEL パワーの時間発展を得た。増幅率は、FEL 増幅モデルを用いた回帰分析によって評価した。光共振器長を変えて増幅率を評価した結果、増幅率は detuning 曲線中腹にあたる光共振器長で最大となり、約 56%を示した。また、Super-Mode 理論による小信号増幅率の計算値ともよく一致した。

今後は安定した FEL 発振を行うとともに、より高度な計測手法を追求して増幅回数の少ない領域の正確な測定と解析を進める予定である。これらによって FEL 発振初期の増幅プロセスを直接測定し、FEL の発振から飽和までの解析を目指す。

参考文献

- [1] M. Fujimoto, et al., “FEL パワーの時間発展による増幅率の評価”, Proceedings of the 8th Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [2] G. Dattoli, et al., “Simple model of gain saturation in free-electron lasers”, IEEE J. Quantum Electron; Phys. Rev. A **44**, 8433 (1991).
- [3] G. Dattoli and A. Renieri, “LASER HANDBOOK”, edited by M. L. Stitch and M. S. Bass (North-Holland, Amsterdam, 1985), Vol. 4.