

## ハイパワーFELの増幅率測定

### GAIN MEASUREMENT OF HIGH POWER FEL

藤本将輝<sup>#, A)</sup>, 川瀬啓悟<sup>A)</sup>, 加藤龍好<sup>A)</sup>, 入澤明典<sup>A)</sup>, 矢口雅貴<sup>A)</sup>, 船越壮亮<sup>A)</sup>, 堤 亮太<sup>A)</sup>, 磯山悟朗<sup>A)</sup>  
Masaki Fujimoto<sup>#, A)</sup>, Keigo Kawase<sup>A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>, Akinori Irizawa<sup>A)</sup>, Masaki Yaguchi<sup>A)</sup>, Sousuke Funakoshi<sup>A)</sup>,  
Ryota Tsutsumi<sup>A)</sup>, Goro Isoyama<sup>A)</sup>

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

#### Abstract

We have developed a novel method to measure the gain of a free electron laser (FEL) using the method used for modulation spectroscopy. The number of FEL amplifications is periodically and repeatedly varied by varying the number of electron bunches so that the number electron bunches is varied using the grid pulser for the thermionic electron gun. Because the intensity of the FEL grows from spontaneous radiation to saturation by eight orders of magnitude or higher, we use a silicon (Si) bolometer, which measures the macropulse energy of the FEL and shows a linear response over this large intensity range. Macropulse energies at number of amplifications of  $n$ ,  $n - 3$ , and  $n - 6$ ,  $n - 3$  are repeatedly measured and variations of the measured macropulse energy is analyzed using the Fourier transformation to derive the power and the gain of the FEL as well as their variations in the lasing process. In the high power mode of the THz-FEL, the gain variation is measured from the onset of lasing to power saturation and the maximum gain reaches  $\sim 200\%$ .

#### 1. はじめに

我々は阪大産研 L バンド電子線形加速器を用いたテラヘルツ自由電子レーザー(THz-FEL)の研究開発を行っている。THz-FEL の高度化の一つとして、従来の 4 倍の電荷量をもつ多バンチ電子ビームの発生に成功し<sup>[1]</sup>、これを用いてテラヘルツ FEL の高出力運転が実現している。ハイパワーFEL の動作特性を調べるため、FEL の基本的な特性の一つである増幅率の評価が必要である。

光共振器を用いる FEL の増幅率は、光共振器を往復する FEL パルスと電子バンチが相互作用を 1 回した後の FEL パルスのエネルギー増加率、あるいは減少率と定義される。FEL パルスは光共振器の往復毎にエネルギーの一部が取り出されて FEL ミクロパルスとその連なりであるマクロパルスを形成するため、増幅率はマクロパルスパワーの変化率から求めることができる。FEL の増幅率とその変化を発振開始直後の小信号領域からパワー飽和までの広い動作領域で測定することは容易ではない。

我々は、増幅率を測定するため、広いダイナミックレンジを持つ検出器を用いて FEL の発振から飽和に至る広い強度範囲で測定するため増幅回数を変えながら光マクロパルスのエネルギーを計測する方法や、適当な光減衰材とアンプを組み合わせてながら高速検出器でパワーの変化を計測する手法を開発してきた<sup>[2]</sup>。しかし、前者については増幅率を導出する際に現象論的モデルを用いるため測定結果にモデル依存性が生じ、後者については高速検出器の線形応答領域が小さいことに加え、アンプを用いることで時間分解能が低下するため、高ゲインパルスの立ち上がりを捉えることが難しい。そこで今回、分光解析に広く利用されている変調分光法を用いて、増幅

回数を周期的に変化させながら Si ボロメータで計測したエネルギーから直接的に増幅率を求める新しい手法を開発し、発振から飽和までの増幅率の時間変化を測定した。

#### 2. 実験装置

##### 2.1 テラヘルツ FEL

阪大産研 L バンド電子線形加速器は熱電子銃、108 MHz 駆動のサブハーモニックバンチャ(SHB)2 台および 216 MHz 駆動の SHB1 台、L バンドプリバンチャ、バンチャ、および加速管から構成される。27 MHz モードと呼ぶハイパワーの FEL 運転モードでは 27 MHz の高速繰り返しで電子銃からパルス幅 5 ns でパルス間隔 36.8 ns の電子パルス列を最長 8  $\mu$ s を取り出す。電子ビームは、SHB と L バンドバンチングシステムを通過し、3 m の加速管で最大 20 MeV まで加速される。27 MHz モードでのバンチあたりの電荷量は 4 nC で、バンチの時間幅は約 20 ps であるため、ピーク電流は 200 A と見積もる。

加速した電子ビームはビーム輸送路を通じてウィグラーに入射し蛇行運動をすることで自発放射光を発生する。ウィグラーの前には光共振器が配置され、後続の電子バンチはウィグラー中で自発放射光と相互作用して誘導放射を生じ、光を増幅する。共振器中に蓄積された光パルスは後続の電子ビームによって飽和するまで繰り返し増幅される。共振器の基本長は約 5.5 m であり、1 つの光パルスを蓄積する。また、電子パルスの繰り返し数、すなわち電子ビームの長さを変えることで増幅回数を変えることができる。

共振器中を往復する毎に光パルスは光共振器上流ミラーのカップリングホールから約 1%が外部へ取り出される。共振器から取り出された光パルスはパルス列、すなわち光マクロパルスを構成して真空排

<sup>#</sup>mfmoto25@sanken.osaka-u.ac.jp

気した光輸送路を通じて実験ステーションへと輸送される。

## 2.2 光検出器

光検出器には Si ボロメータを用いた。Si ボロメータは約 6 桁のダイナミックレンジをもち、このレンジ内で線形な応答を示す。また、自発放射光を計測する感度をもつ。時間分解能は約 200  $\mu\text{s}$  であり、FEL マクロパルスに比べて十分に応答速度が遅いため、パルスの全光子量、すなわちエネルギーを計測する。

光強度が大きい際には適当な光減衰材を用いて検出器への入射光強度を落とし、検出器の飽和応答を避ける。光減衰材の減衰率は波長によって異なるため、FEL 発振波長で較正を行なう。

Si ボロメータからの出力信号波形は 12 ビット高分解能オシロスコープを用いて計測し、波形モデルによる回帰分析を経て高精度に波高値を求める。

## 3. 測定手法

変調分光法は光学物性の測定で広く用いられる手法であり、計測対象の状態を周期的に変化させて周波数解析を行うことで、周期的操作に伴う変化のみを抽出する。このため、変調に非同期な成分、すなわちノイズに影響されない測定が可能である。

増幅率を求めるため光マクロパルスのエネルギー計測に変調分光法を応用する。電子バンチの繰り返し数、すなわち電子ビーム長を周期的に変えることで、増幅回数を変えながら発振した光マクロパルスのエネルギーを計測し、フーリエ解析を用いて増幅によるエネルギーの変化量を得る。

増幅率は、増幅によるパワーの変化、すなわちエネルギーの増幅回数についての 2 階微分から求まる。このため、2 段階で増幅回数を切り替えてエネルギーを計測する、2 階の変調分光法を考えることにより、エネルギーからパワー、そしてパワーの変化量、すなわち増幅率を得る。

ある増幅回数  $n$  に対する増幅率を求める場合、増幅回数  $n$  と  $n-1$ ,  $n-2$ ,  $n-1$  のマクロパルスエネルギー  $E$  をパルス毎に切り替えて繰り返し測定する。このとき、 $I$  をマイクロパルスエネルギー、 $g$  を増幅率とすれば、

$$\begin{aligned} I_n &= E_n - E_{n-1}, \\ I_{n-1} &= E_{n-1} - E_{n-2}, \\ g_n &= (I_n - I_{n-1})/I_{n-1} \end{aligned} \quad (1)$$

の関係がある。一方、前述のマクロパルスの計測回数を  $N$  とすると、信号の変動やノイズが無い場合、 $N$  回目の測定でのマクロパルスエネルギーは、測定の周期性によりパラメータ  $a$ ,  $b$ ,  $c$  を用いて、

$$E(N) = a + b\cos(2\pi N \times 1/4) + c\cos(2\pi N \times 1/2) + b\cos(2\pi N \times 3/4)$$

と表すことができる。このため、各増幅回数のエネルギーは、

$$\begin{aligned} E_n &= a + 2b + c, \\ E_{n-1} &= a - c, \\ E_{n-2} &= a - 2b + c \end{aligned}$$

と書ける。これらを式(1)に代入すると、マイクロパルスエネルギーと増幅率は、

$$\begin{aligned} I_n &= 2b + 2c, \\ I_{n-1} &= 2(b - c), \\ g_n &= 2c/(b - c) \end{aligned}$$

をみだす。すなわち、増幅回数を周期的に切り替えながら計測したマクロパルスエネルギーを、フーリエ解析を行うことでパラメータ  $a$ ,  $b$ ,  $c$  が得られ、これらのパラメータからパワーと増幅率が求まる。

この計測と解析を、増幅回数  $n$  を変えながら行うことにより、増幅回数の関数として FEL パルスのエネルギー発展と増幅率の時間変化を導出する。

## 4. 実験と解析

### 4.1 実験パラメータ

実験は、27 MHz モードと呼ぶ FEL の高出力運転モードで行った。電子ビームのエネルギーは 15 MeV、ウィグラーギャップは 30 mm とした。このとき FEL は波長 105  $\mu\text{m}$  で発振した。電子ビームの最大長は 4  $\mu\text{s}$  である。

### 4.2 計測と解析

FEL を 5 Hz で運転し、電子ビーム長を変えながら、FEL マクロパルスのエネルギーを同じく 5 Hz で計測した。増幅率が低い動作領域では増幅率の差が 1 回

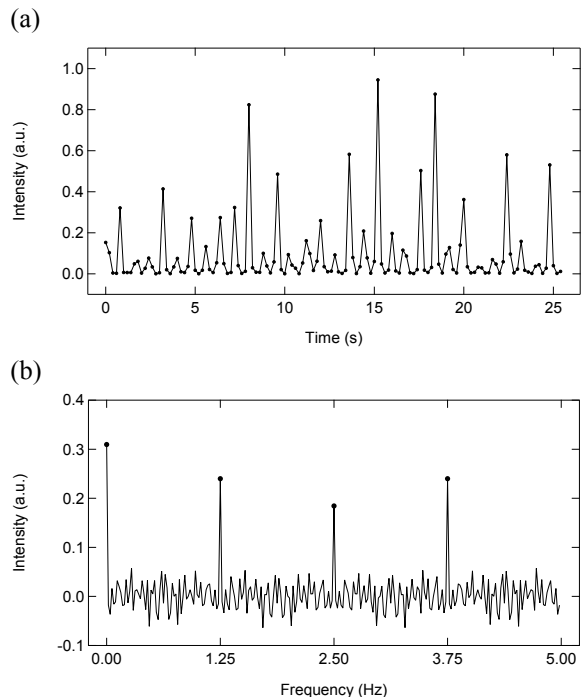


Figure 1: Macropulse energy measured to derive FEL gain using the modulation method (a) and its Fourier transformation (b). The number of FEL amplifications is repeatedly and periodically changed from  $n$  through  $n-3$  to  $n-6$  at intervals of 3, and then reversely to the initial value to  $n$ , at a repetition frequency of 5 Hz. The peak at 0 Hz corresponds to  $a$ , the peaks at 1.75 and 3.75 correspond to  $b$ , the peak at 2.5 Hz to  $c$  in Eq. (1).

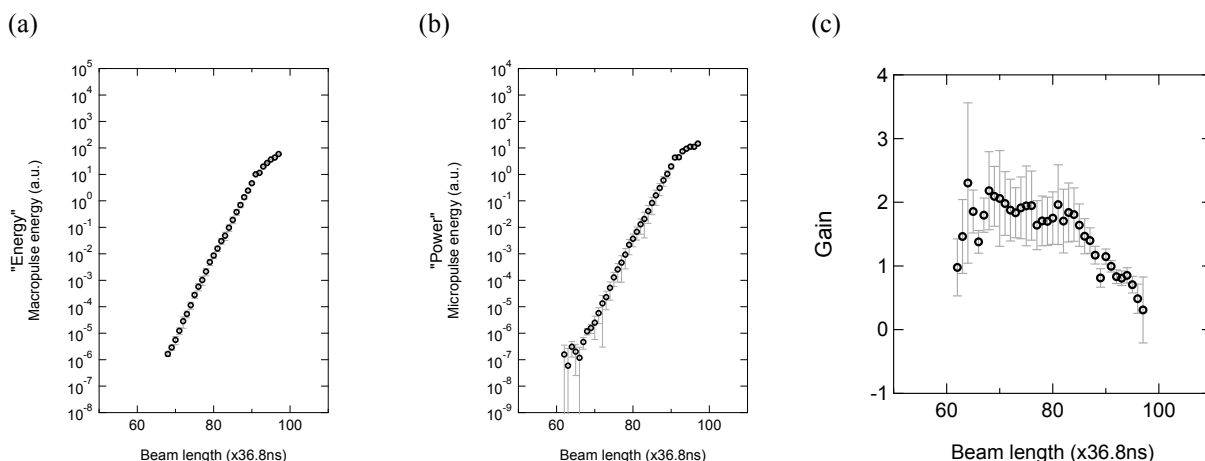


Figure 2: Results of analysis. The macropulse energy (a), the micropulse energy (b), and FEL gain as a function of the electron beam length or equivalently the number of FEL amplifications (c).

ではマクロパルスエネルギーの差が小さすぎるため、増幅回数を3回おき、即ち $n$ 回、 $n-3$ 回、 $n-6$ 回のマクロパルスエネルギーを測定した。Figure 1 (a)に、5 Hz で 25 秒間測定したマクロパルスエネルギーの変化を示す。得られたエネルギー変化に対して高速フーリエ変換を行い、得られた周波数スペクトルを Figure 1 (b)に示す。Figure 1 (b)から 0 Hz、1.25 Hz、2.5 Hz、3.75 Hz にピークをもつことが確認できる。これらのピーク値と式(1)によってパワーと増幅率を求めた。このときの増幅率は  $180 \pm 50\%$  である。誤差は、フーリエ解析によって得られるピーク値の誤差は変調への非同期成分、すなわち 5 Hz の非分周波数成分の標準偏差より評価した。

#### 4.3 測定結果

上述の計測と解析を各増幅回数について行い、増幅回数の増加にともなうエネルギー発展、パワー発展、そして増幅率の時間変化を得た。Figure 2 (a), (b), (c)に各結果を増幅回数に対応したビーム長の関数として示す。いずれの測定結果も誤差や変動が抑えられ、増幅率の時間変化については FEL の理論モデルを用いた解析を行わずとも、その様子を知ることができる。

エネルギーないしパワーは電子ビーム長約  $90 \times 36.8\text{ns}$  あたりから発展が緩やかになる。これは FEL 増幅が飽和したことを示している。また、エネルギーとパワーの発展はビーム長  $60 \times 36.8\text{ns}$  あたりから始まる。これは、電子バンチがウィグラー中ではビーム長  $60 \times 36.8\text{ns}$  のあたりから存在するためである。このことから、今回の実験では FEL 発振の開始から飽和の開始までの増幅の過程を測定することができた。パワーの発展は飽和に至るまで約 8 桁に至るまで発展を示すことがわかる。

また、得られた増幅率の時間変化から、増幅率はほぼ一定値を保った後に単調に減少する過程を示す。これを同時に得られたパワー発展と比較してみれば、増幅率が一定な領域ではパワーは関数的な発展を示

し、一方、増幅率が単調に減少していく過程ではパワーの発展が徐々に緩やかになることがわかる。すなわち、増幅率の時間変化はパワー発展の様相を反映している。今後は、この変調分光法を用いた測定を基に、パワーと増幅率の物理的な関係を詳しく調べていきたい。この手法を用いて測定した FEL 増幅率は最大で約 200% であり、従来の発振の 4 倍程度であった。これは従来の運転モードからの電荷量の増大におよそ比例している。

#### 5. まとめ

変調分光法を応用した FEL 増幅率の新しい測定手法を開発した。この手法を用いて、阪大産研で現在実現しているハイパワー FEL の増幅率を測定した。今回の実験では、FEL 増幅の理論モデルに依存した解析を行わずとも増幅率の時間変化を直接測定することができた。増幅率の時間変化は同時に得られた FEL のパワー発展をよく反映している。また、ハイパワー FEL の最大増幅率は約 200% であり、従来の運転モードに比べてバンチ電荷量の増大に比例した高い増幅率を示すことを確認した。

今後は、発振波長や共振器長などの動作点を変化させて増幅率測定を行うことでハイパワー FEL の増幅特性を明らかにするとともに、高増幅率で発振する FEL の物理についても調べていきたい。

#### 参考文献

- [1] K. Kawase, et al., "STUDY OF THZ-FEL WITH 27 MHZ ELECTRON BEAM OPERATION", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 3-5, 2013, Nagoya, Japan).
- [2] M. Fujimoto, "EVALUATION OF THE FEL GAIN BY MEASUREMENT OF THE POWER DEVELOPMENT IN THE WIDE RANGE", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 8-11, 2012, Osaka, Japan).