

# JAERI-FEL の efficiency detuning curve の detuning 長絶対測定

西森 信行<sup>1</sup>、羽島 良一、永井 良治、峰原 英介

日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター自由電子レーザー研究グループ

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

## 概要

光共振器長に対する efficiency ( $\eta$ ) detuning curve の測定を行い、その detuning 長( $dL$ )の  $0 \mu\text{m}$  付近の絶対値を高精度で求めた。繰り返し周波数が  $83.3\text{MHz}$ (光共振器長の  $1/8$  の長さに対応)のモード同期 Ti:sapphire レーザーを光共振器内に打ち込み、pulse-stacking の手法で  $dL$  を測定した。同時に FEL パワーをスクレーパーカップリングで取り出しパワーメーターで測定した。その結果、 $dL$  を  $0.1 \mu\text{m}$  以下の精度で測定することに成功した。

## 1. はじめに

光共振器を使って発振に至るオシレータータイプの自由電子レーザー(FEL)において、光共振器長の detuning 長( $dL$ )は発振機構を支配する重要なパラメーターの一つである。ここで、電子ビームの周期と完全に同期した光共振器長を  $dL=0$  として定義する。

一般に  $dL$  を  $0$  よりわずかに短くした状態では、FEL 変換効率  $\eta$  が大きくなるがゲインは低い。また、FEL パルス幅は狭くなるが、波長広がり大きい。 $dL$  をさらに短くするとゲインが徐々に高くなるが、 $\eta$  は小さくなる。FEL パルス幅は広がるが、波長広がり小さくなる。さらに  $dL$  を短くして行くと、ゲイン、 $\eta$  共に小さくなり、やがて発振が止まる。このように、 $dL$  をコントロールすることにより、様々なエネルギー、パルス幅、波長広がりを持つ FEL 光を用途に応じて簡単に供給することが可能である。

FEL の従来の枠組では"lethargy effect"(undulator 内で電子ビームが FEL に対して slippage のために遅れ、FEL の群速度が光速より遅くなること)のために、 $dL=0$  での発振は起きないものとされてきた<sup>[1,2]</sup>。ところが、最近 JAERI-FEL で  $\eta$  detuning curve の  $dL=0$  付近に鋭いピークが観測された<sup>[3]</sup>。その曲線を再現する、ショットノイズの効果を取り入れた 1D シミュレーション計算は鋭いピークが  $dL=0$  にあることを示していた<sup>[4]</sup>。

計算の予想を確かめるために、我々は  $dL$  を  $1 \mu\text{m}$  以内の精度で測定することにした。 $dL=0 \mu\text{m}$  付近に現れたピークの幅が  $1 \mu\text{m}$  程度と狭かったからである。実験の結果、 $\eta$  のピーク位置が  $dL=0.0 \pm 0.1 \mu\text{m}$  であることを確認した<sup>[5]</sup>。ここでは、光共振器長の高精度絶対測定技術に関する報告をする。

## 2. 測定システムの選定

光共振器長の絶対値を精度良く測定する方法について考えてみる。巻尺を利用して直接計る方法は簡便であるが、 $1 \mu\text{m}$  の精度は到底得られない。He-Ne レーザーと干渉形を使った方法も一般的であり、商品にもなっている。しかし、相対距離を精度良く測定するには適しているが絶対距離を測定することはできない。しかも、光共振器ミラー間の距離を直接測定することもできない。最近、FELIX で行われた FEL 光を Ti:sapphire レーザーでプローブしてやり、絶対距離を測定する手法は  $0.5 \mu\text{m}$  以下の精度で絶対距離を測定することが可能であり、有力な候補の一つである<sup>[6]</sup>。しかしながら、FEL と Ti:sapphire レーザーを同じターゲットに同時に照射する必要があるなど、測定システムが複雑になることから実験が容易ではない。

我々は外部レーザーを FEL の光共振器に打ち込み、pulse-stacking で貯め込まれた信号を使って、 $dL=0$  を計測する手法を用いることにした。この手法は Stanford 大で開発され<sup>[7]</sup>、JAERI-FEL の光共振器長測定にも利用した経験があり、 $1 \mu\text{m}$  以内の精度で  $dL$  の絶対値を測定できることは確認済である<sup>[8]</sup>。一方の共振器ミラーをホールミラーにして、その穴から外部レーザーを打ち込み、同じ穴からレーザー光を取り出して測定する。FEL をスクレーパーミラーで取り出してやれば、距離測定と FEL のパワー測定が同時に独立に測定することが可能となる。FEL の  $\eta$  detuning curve を測定しつつ、 $dL=0 \mu\text{m}$  付近の距離測定を行うのに適したシステムである。

## 3. 実験セットアップと結果

実験のセットアップを図 1 に示す。外部レーザーとして  $83.30000\text{MHz}$  にモードロックされた Ti:sapphire レーザー (Tsunami 3960, Spectra-Physics) を用いた。その周波数は電子ビームの繰り返し周期  $10.41250\text{MHz}$  の 8 倍で、加速器に使用している RF 信号をリファレンス信号として利用する。中心波長は基本波の  $780\text{nm}$  である。レーザーのパルス幅は  $70\text{fs}$  FWHM で Auto-correlator(409, Spectra-Physics)でモニターする。レーザーパワーは Tsunami 出口で  $150\text{mW}$  である。レーザーシステムは光共振器の据え付けてある部屋にセットされている。レーザーは空气中を数個の平面ミラーを使って約  $3\text{m}$  に渡り輸送され、真空封止用のガラス窓と上流共振器ミラー中

<sup>1</sup> E-mail: nisi@milford.tokai.jaeri.go.jp

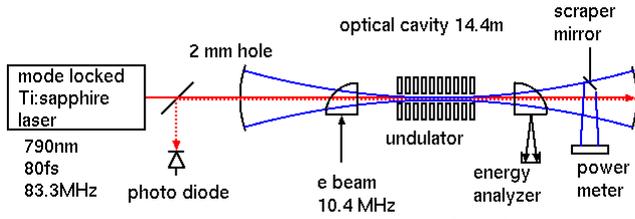


図 1 : detuning 長と FEL パワーの同時測定システムのブロック図。

の直径 2mm の穴を通して FEL 光共振器内に打ち込まれる。レーザー光は共振器内を何度か往復した後再び同じ穴から取り出され、ガラス窓を通して大気中に導かれる。ビームスプリッターにより、入射レーザーとの光路から分離し avalanche photo detector (C1536-01, Hamamatsu) で信号を検出する。ここで用いられた真空封止用のガラス窓は遠赤外の FEL 光を透過しない。従って、FEL 発振実験を同時に行った場合でも FEL 光の影響が光検出器に及ぶことはない。

Ti:sapphire レーザー光の FEL 光共振器軸に対するアラインメントは次のような方法で行うことができる。レーザー光は共振器ミラーの穴を通すので、必ず光共振器軸の一点を通過することになる。通過したレーザー光を中心軸上の位置が校正されているアンジュレーター付近のプロファイルモニターで観測し、その光の強さが最も強くなるように Ti:sapphire レーザーの入射角及び入射位置を調整する。こうすれば、レーザー光の中心が穴の位置に来ており、さらにアンジュレーター付近でほぼ光共振器軸中心を通ることから、光共振器軸に沿ってレーザーを打ち込んだことにほぼ等しい。光検出器で信号が見えたら、それが増加するように微調する。もちろん、両共振器ミラーの傾きの調整が前提だが、FEL 発振実験で FEL 光が強く得られるように調整されていけば充分である。

光検出器で観測される信号は光共振器の設定距離に従って変化する。共振器長をレーザーの繰り返し周期に対応する長さに設定すると (on resonance)、繰り返し打ち込まれる光パルスが堆積され信号が増加する。off resonance では、単一信号の寄与しかないので信号は一定値を示す。この pulse-stacking の性質を利用すれば、 $dL = 0 \mu m$  の位置を精密に測定できる。on resonance (信号最大) と off resonance (信号最小) の信号を図 2 に示す。光検出器の出力信号はデジタルオシロスコープ (TDS684B, Tektronix) で測定した。測定は 20ms/div のレンジで peak detection mode で測定した。図 2 の右横の数値を見てわかるように、オシロスコープの測定方法に従って信号の比が変化する。peak to peak や rms 値で比較した場合には 4-5 倍の差しかない。ところが、mean 値で比較すると 10 倍異なる。その理由として次のようなことが考えられる。周波数は周波数安定化回路 (3930, Spectra-Physics) により 83.30000MHz にロックされているが、10Hz のオーダーでジッターがある。これは距離に直すと  $1.7 \mu m$  のジッターに相当する。変動の無い理想的な場合には、pulse-stacking された信号は Ti:sapphire レーザーの波長  $0.79 \mu m$  周期の干渉を示す<sup>[7]</sup>。ところが、レー

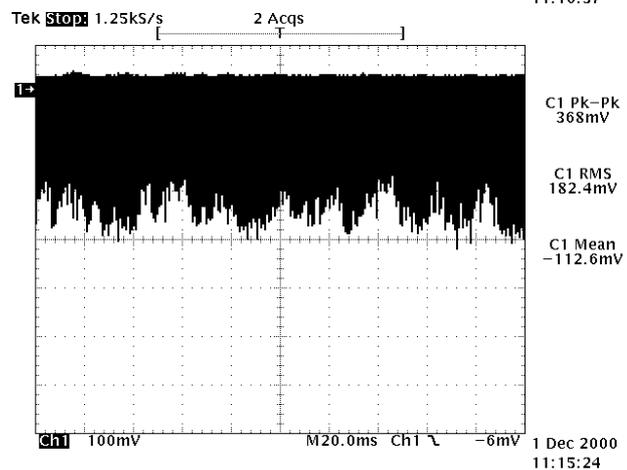
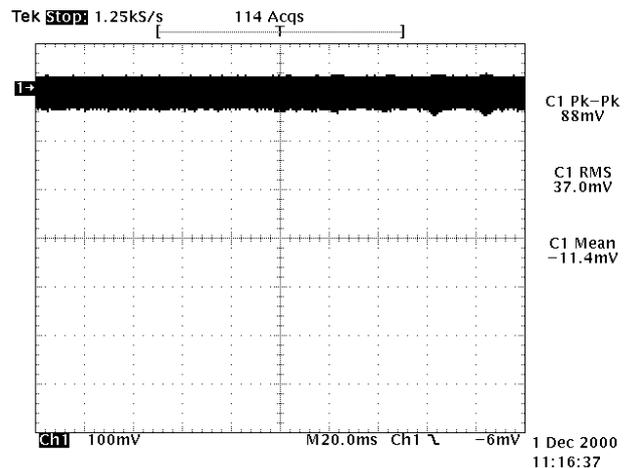


図 2 : オシロスコープで観測された pulse-stacking 信号。上は off resonance、下は on resonance。

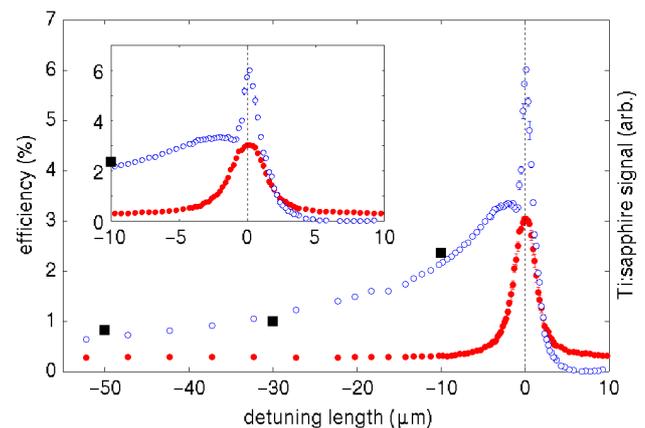


図 3 : FEL  $\eta$  detuning curve (○) と Ti:sapphire 信号 (●)。左上に  $dL=0 \mu m$  付近の拡大図を示す。

ザーの周波数ジッターにより pulse-stacking 信号にも変動を生じる。その変動の影響を小さくするには平均値で比較するのがこのデジタルオシロスコープでは最もよかつたのである。

実験では FEL パワーをオシロスコープの別のチャンネルに入れ、Ti:sapphire 信号との同時測定を各  $dL$  において 5 回繰り返した。実験データを図 3 に示す。エラーバーは 5 回の測定データの rms 値である。ピ

ーク  $\eta$  付近では  $0.2 \mu\text{m}$  ステップで測定を行なった。Ti:sapphire データのピーク付近をガウス分布で fitting することによりピークの横軸位置を求めた。ピーク位置精度は  $0.01 \mu\text{m}$  である。FEL の  $\eta$  detuning curve のピーク位置はデータ測定のステップ精度以下程度で決定出来ることから、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$  の精度でピーク位置が決まると考えられる。図から、FEL の  $\eta$  detuning curve のピーク位置は  $dL = 0.0 \pm 0.1 \mu\text{m}$  である。

以上のような高精度 dL 測定実現のために、技術的に解決しなければならなかった問題として、光共振器長の温度ドリフトの問題があった。 $14.4\text{m}$  を  $0.1 \mu\text{m}$  の精度で測定するには、測定中の光共振器長の変動をできるだけ小さくしなければならない。各 dL での測定時間は 3 秒程度で、およそ 2 分でピーク付近のデータを計測できるので、その間の変動が無視できるほど小さいことが必要となる。変動を計測するために Ti:sapphire 信号が最大となるように、光共振器長をセットし、Ti:sapphire 信号の測定を 10 分に渡って続けた。実験の当初は図 4 の上図のように、長い周期を持つ大きな変動があった。原因は光共振器ダクトの温度変化によるものであることがわかり、温度変化の原因として次のようなものが考えられた。  
 1)ダクトに直接当たっている空調器からの送風。  
 2)FEL 相互作用を終えたエネルギーの広がった電子ビームが、偏向電磁石でビームダンプに捨てられる際にダクトに当たり温度変化を生じる。そこで、両光共振器ミラーに最も近いベローを固定せずにフリーにした。すると、図 4 の下図のように、Ti:sapphire 信号は 10 分程度の時間内ではほぼフラット(rms 2%)に保たれるようになった。

#### 4. 電子ビームジッターの評価

JAERI-FEL の 1 マクロパルス内での電子ビームのジッターが detuning curve から逆算できる。図 3 を参照してわかるように、 $\eta$  detuning curve は幅  $1 \mu\text{m}$  程の急峻なピークを持つ。この実験時のロス率は 7.5% なので、光共振器の Q 値は 13 である。この場合、 $dL = 1 \mu\text{m}$  の違いは FEL 光が共振器内で  $1/e$  に decay するまでに  $26 \mu\text{m}$  の違いに相当する。一方ジッター  $100\text{fs}$  は  $30 \mu\text{m}$  の光共振器長の変動に相当する。これらの区別はつかなくなり、 $1 \mu\text{m}$  幅の鋭いピークは消えるはずである。従って、1 マクロパルス内での電子ビームのジッターは  $100\text{fs}$  以下であることが推定できる。このように、FEL をモニターとして電子ビーム性能を評価することが可能である。

#### 5. まとめ

FEL  $\eta$  detuning curve の dL を高精度で測定することに成功し、JAERI-FEL において  $\eta_{\text{max}}$  が  $dL = 0.0 \pm 0.1 \mu\text{m}$  に位置することを示した。dL の絶対値測定には外部レーザーを用いた pulse-stacking 法を用い、FEL 光をスクレーパーカップリングで取り出し dL との同時測定を行っている。dL の高精度測定実現のためには、外部レーザーの周波数変動と光共振器長の

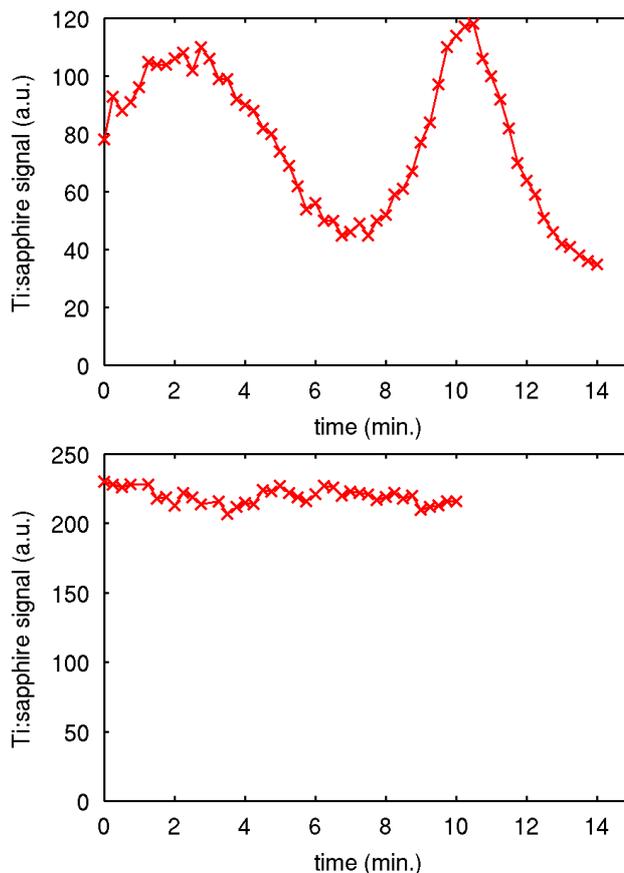


図 4 : Ti:sapphire 信号の時間変動。上は改善前、下は改善後。

温度ドリフトの影響を小さくしてやることが重要であった。また、現在 JAERI-FEL で得られている FEL の  $\eta$  detuning curve から 1 マクロパルス内での電子ビームジッターが  $100\text{fs}$  以下と評価できる。

#### 参考文献

- [1] W.B. Colson, in Laser Handbook, (North Holland, Amsterdam,1990), Vol.6, pp. 176-180.
- [2] Nicola Piovello, Phys. Rev. E 51, 5147 (1995).
- [3] N. Nishimori et al., Proceedings of the 22nd international FEL conference, North Carolina, 2000 (to be published).
- [4] R. Hajima et al., Proceedings of the 22nd international FEL conference, North Carolina, 2000 (to be published).
- [5] N. Nishimori, R. Hajima, R. Nagai, and E.J. Minehara, Phys. Rev. Lett. 86, 5707 (2001).
- [6] G.M.H. Knippels et al., Phys. Rev. Lett. 83, 1578 (1999).
- [7] K.W. Berryman, P. Haar, and B.A. Richman, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 358, 260 (1995).
- [8] N. Nishimori et al., Rev. Sci. Instrum. 69, 327 (1998); N. Nishimori et al., Proceedings of the 21st Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokyo, (1996), pp. 314-316.