

RECENT PROGRESS IN DEVELOPMENT OF THE TERAHERTZ FEL AT ISIR, OSAKA UNIVERSITY

Ryukou Kato^{1,A)}, Shigeru Kashiwagi^{B)}, Naoya Sugimoto^{A)}, Yoshikazu Terasawa^{A)}, Shen Jie^{A)}, Sho Hirata^{A)},
Masaki Fujimoto^{A)}, Shoji Suemine^{A)}, Goro Isoyama^{A)}, Kimichika Tsuchiya^{C)}, Shigeru Yamamoto^{C)}

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

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

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

Abstract

An absolute optical cavity length of the Terahertz FEL at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, was measured with a mode-locked Ti:Sapphire laser synchronized with the beam repetition frequency of the linac. This technique has accuracy of a few microns over the cavity length of 5.5 meters. The peak power detuning curve was well reproduced by an analytical study.

阪大産研テラヘルツ FEL 開発の現状

1. はじめに

共振器型自由電子レーザー (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状態からの共振器長のずれを、デチューニング長 (Detuning length, dL) と呼ぶ。FEL の増幅利得や最大強度、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。

大阪大学産業科学研究所 (以下、阪大産研) の FEL システムでは共振器ミラーの間隔を μm のオーダーで測定する手段がなかったため、これまでは実験ごとに FEL 出力の共振器長依存性 (デチューニング曲線) を測定し、そのピーク位置からの相対的な共振器長変化で FEL 特性を議論してきた。しかしデチューニング曲線もビームの調整に依存するうえ、経験的にそのピーク位置が 1 年間で $200\mu\text{m}$ 程度変動することが確認されていたため、精度の高い議論を行うためには共振器長の絶対値を評価することが不可欠であった。

今回、タイミングシステムの基準周波数に同期した外部レーザーを光共振器内に入射し、蓄積された光パルスの一部を測定することにより、共振器長の絶対的な基準位置 (ゼロ・デチューニング, $dL=0$) の評価が可能になった。本学会では、この共振器長測定を含む最近の進展について報告する。

2. FEL 共振器長の測定手法

共振器長の絶対値を評価する手法としては Stanford において外部レーザーとパルススタッキングによる手法が開発され¹、国内では原研 FEL でこれが実証されている²。阪大産研の光共振器長は約 5.5m であり、初段のサブハーモニックバンチャー空洞の周波数 108MHz でバンチングされた電子が放射・増幅する FEL 光を 4 パルス蓄積するように設計されている³。今回使用した外部レーザーは、 80MHz 近辺で同期可能な Ti:Sapphire レーザーである。これをタイミングシステムの基準周波数 27MHz を 3 通倍した 81MHz 繰返しに同期させて光共振器内に入射することにより、共振器内部に 3 個のレーザーパルスを蓄積することができる。この蓄積された光パルスと入射パルスの干渉を測定することにより、共振器長の $dL=0$ の評価が可能になる。

3. 阪大産研での共振器長測定

共振器長測定の実験配置を図 1 に示す。阪大産研の FEL システムでは、FEL 光を測定する場合には光共振器の上流側のミラー M1 の中心にあいた 3mm ϕ の結合穴から光を取り出す。この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輸送され、回折格子型分光器を通して大気側の検出器に入射される。ライナック系の高真空側と光輸送路の間、および分光器と大気側はダイヤモンド窓より仕切られている。また、アライメント用の He-Ne レーザーを入射するために、光共振器の下流側ミラー M0 には中心に 1mm ϕ の穴があげられている。

今回この配置をそのまま利用して共振器長を測定した。光輸送路中のミラー M2 を取り外し、そこからダイヤモンド窓を通して外部レーザーを入射する。

¹ E-mail: kato@sanken.osaka-u.ac.jp

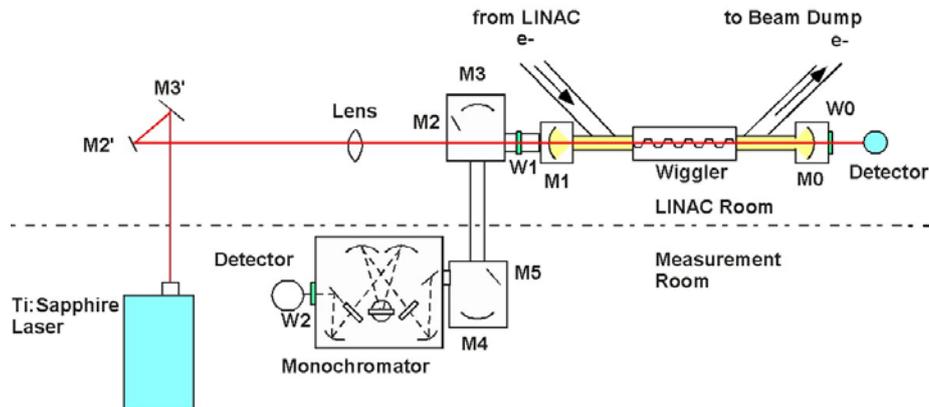


図1. 外部レーザーによる共振器長測定の実験配置。M0,M1:共振器ミラー、M2,M3,M4,M5:FEL用光輸送路ミラー、M2',M3':外部レーザー用輸送路ミラー、W0:サファイヤ窓、W1,W2:ダイヤモンド窓

外部レーザーとして Spectra-Physics 社製の Ti:Sapphire レーザー (Tsunami 3941C-S1W) を使用した。この Ti:Sapphire レーザーの波長は 790 nm、パルス幅は 80 fs 以下である。L バンドライナックの基本周波数 1,300 MHz の 1/16 である 81.3 MHz に同期したパルスを CW で出力し、そのパワーは 5 W である。レーザーは上流側 3 mm φ の穴を通して共振器内に蓄積され、その一部は下流側の 1 mm φ の穴を通して取り出される。サファイヤ窓を通して大気側に出た光は PIN フォトダイオード (ThorLabs 社製 DET10A/M) により検出される。

フォトダイオードで測定された Ti:Sapphire レーザー波形を図 2 に示す。ミラー間隔がビーム繰り返しの共振位置 $dL=0$ からずれている場合には、共振器内に蓄積された光パルスと入射したレーザーパルスが入射したレーザーは干渉することなく取り出され、検出される (図 2 (左))。他方、ミラー間隔が $dL=0$ 近傍にあるとき、共振器内に蓄積された光パルスと入射したレーザーパルスが重なり合って干渉する。レーザー波長 790 nm に対し、共振器ミラーを駆動する光学ステージの最小ステップは 1 μm である。本来であればこのシステムで入射レーザーと蓄積光の干渉を制御することはできない。し

かし、レーザー自体の jitter によりパルス間で位相が変動するため、干渉により強めあったり弱めあったりすることによる強度変動がランダムに発生する。それをオシロスコープ (TDS3054B) のエンベロープモードを用いて測定すると、図 2 (右) のような波形信号が得られる。

この光共振器は 50-150 μm の波長の光をターゲットとして設計されているため、光取り出しの結合穴は 3 mm φ と大きい。そのため可視レーザーに対しては Q 値が低く、干渉しても大幅な強度の増強は望めない。しかし、この手法で共振器の共振位置を探すことが可能となる。PIN ダイオード検出器出力の最大値をミラーステージ移動量の関数としてプロットすると図 3 のようになり、およそ 1 μm 程度の精度で共振器の $dL=0$ 位置を評価できる。

4.共振器長の変動

共振器は様々な要因によりその長さが変動する。この変動にはエアコンからの風の吹き出しやクーリングタワーFAN の ON/OFF などによる短周期のもの、ライナック機器の運転・停止や日照に伴う 1 日周期のもの、年間を通じた季節変動などが考えられる。われわれの共振器長測定システムでは FEL と

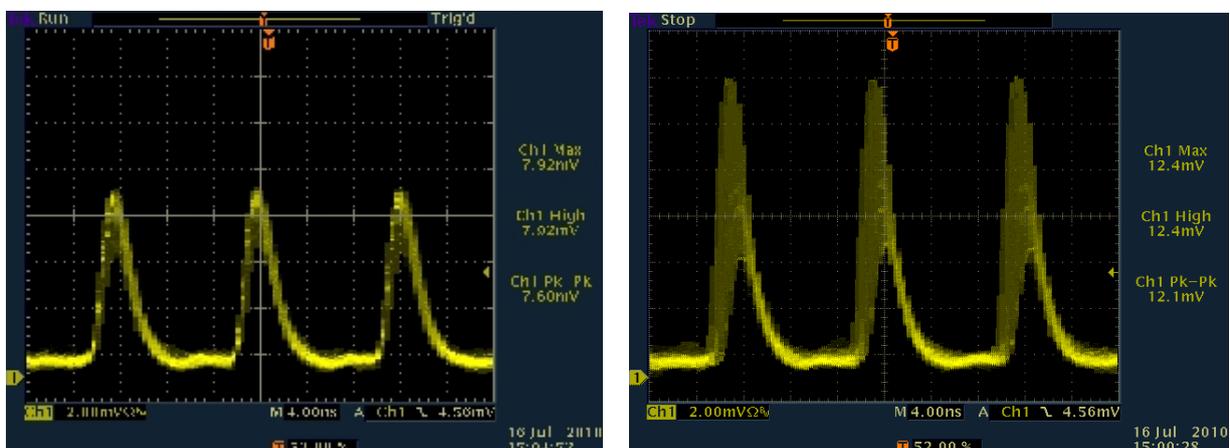


図2. PIN フォトダイオードの出力信号。共振長が $dL=0$ からずれている場合(左)、 $dL=0$ 近傍(右)。

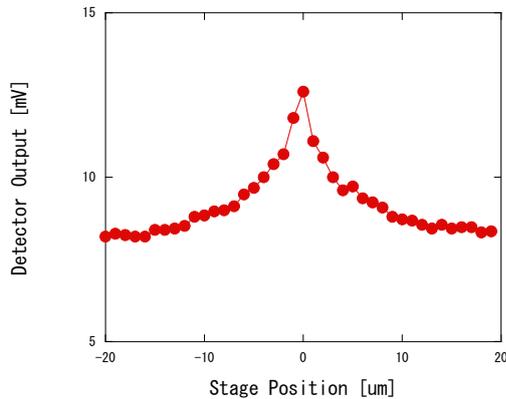


図3. PIN フォトダイオード出力信号ピーク値の共振器長依存性。

Ti:Sapphire レーザーの同時測定ができないため、1日の中で共振器長がどの程度の変動するのかあらかじめ評価しておくことは重要である。図4に共振器長の日周変化の測定結果を示す。時間の原点は夜中の零時で、2時間毎に36時間に渡って測定を行った。

Lバンドライナックは毎朝8時に冷却水システムをスタートさせ9時からビーム調整が始まる。共振器の $dL=0$ 位置は、この間ステージのプラス方向に移動し続け夕方18時くらいから安定な状態になる。この測定の時には21時くらいに運転が終了したが、 $dL=0$ 位置は少し送れて変化しはじめ、マイナス側に移動する。この変動は夜中1時から3時の間に反転する。この測定の際の1日あたりの共振器長の変動は15~20 μm であった。

5. デチューニング曲線

共振器長を評価できるようになったことにより、測定されたデチューニング曲線と理論との比較が可能になった。図5に示すのはエネルギー15 MeVの

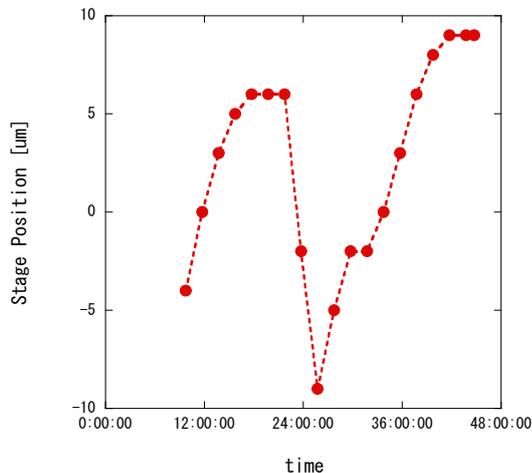


図4. 共振器長の日周変化。縦軸は変化する共振器長を補正するためのステージ移動量

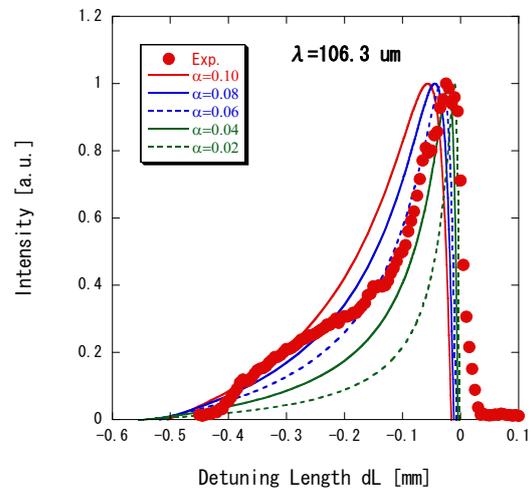


図5. デチューニング曲線の測定例。図中の赤丸が測定値、破線、実線は共振器損失 α の値が2,4,6,8,10%のときの理論曲線。電子ビームエネルギーは15MeVでFEL波長は106.3 μm 。

電子ビームを用いて測定された波長は106.3 μm のときのデチューニング曲線とDattoliらによって導出された理論曲線⁴との比較である。横軸がTi:Sapphireレーザーで測定したデチューニング長 dL 、縦軸は最大値で規格化した強度である。実験値を再現するのは共振器損失が6%の場合であり、これは他の手法を用いて評価した値とよい一致を示す。ただし先に述べたようにこのシステムではFELとレーザーの同時測定ができないため、横軸の評価には測定時刻の間隔に応じた1~2 μm のずれが含まれていると考えられる。

またウィグラーの磁極間隔を広げて、波長を短波長側に変化させた場合には dL がわずかに0よりも小さい場所に幅の狭いピークが観測されている。このピークが以前原研FELで観測された $dL=0$ での高効率の発振⁵と同一の現象であるかどうか確認を進めている。

参考文献

- [1] K.W. Berryman, P. Haar, B.A. Richman, Nucl. Instr. Meth. A358, 260-263 (1995).
- [2] N. Nishimori, E.J. Minehara, M. Sugimoto, M. Sawamura, R. Nagai and N. Kikuzawa, Rev. Sci. Instrum. 69, 327 (1998).
- [3] G. Isoyama, R. Kato, S. Kashiwagi, T. Igo and Y. Morio, Infrared Phy. & Technol. 51, 371-374 (2008).
- [4] G. Dattoli, A. Renieri and A. Torre, "Lectures on the Free Electron Laser Theory and Related Topics", World Scientific (1993).
- [5] N. Nishimori, R. Hajima, R. Nagai and E.J. Minehara, Phys. Rev. Lett. 86, 5707 (2001).