

日本大学 LEBRA-FEL における光共振器損失の測定 Measurement of Cavity Loss at LEBRA-FEL in Nihon University

○廣原匠¹, 境武志², 早川恭史², 住友洋介²*Takumi Hirohara¹, Takeshi Sakai², Yasushi Hayakawa², Yoske Sumitomo²

Abstract: Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Nihon University, we are aiming to achieve oscillation at a zero detuning length so as to the high extraction efficiency of the Free Electron Laser (FEL). In order to achieve this goal, various systems has been constructed to measure the electron beam current and the state of the optical cavity. However, in the current measurement system, the cavity loss was calculated after the fact and cannot be measured all times. Therefore, in this study, we have constructed the cavity loss measurement system using LabVIEW. In this paper, we report the measurement results using the constructed cavity loss measurement system.

1. はじめに

日本大学電子線利用施設 (LEBRA) では、125 MeV 電子線形加速器で加速された電子ビームを用いて、アンジュレーターと光共振器から構成される共振器型自由電子レーザー (Free Electron Laser: FEL) を運用している。この共振器型 FEL は、連続可変波長赤外光を生成することができ、ユーザー利用に提供している。

日本原子力研究所 (現: 量子科学技術研究開発機構) や京都大学では、FEL の発振状態において完全同期長発振という、レーザー発振時に非常に効率の高い発振状態の発生に成功している[1, 2]。LEBRA-FEL においてもその兆候が得られ始めており、完全同期長発振の実現を目指している。LEBRA ではこの高効率発振状態達成のため、FEL 発振状態の測定系強化を進めている。そこで本研究では、FEL 発振状態の共振器損失測定系を National Instruments 社の LabVIEW[3]を用いて構築し、構築した測定系を用いて共振器損失の測定を行った。

2. 共振器型 FEL

FEL とは、電子ビームをアンジュレーターと呼ばれる装置の中で蛇行運動させながら、電子からアンジュレーター放射光を放出させ、光と電子ビームの相互作用により、その光を増幅させることでレーザー発振に至る波長可変な単色光のことである。

共振器型 FEL は、アンジュレーター、共振器で構成される。アンジュレーターは周期的磁場を作り、電子に蛇行運動を与える装置であり、共振器は光を反射し、アンジュレータを往復することで増幅率を高める装置である。電子ビームをアンジュレーターに入射することで、高いエネルギーをもつ電子がビームの前方へ、

低いエネルギーをもつ電子が後方へ移動する。これは蛇行運動の振幅が違うためである。ある程度電子ビームが、アンジュレーターを進むと局所的に集群化した電子の塊 (マイクロバンチ) が形成される。マイクロバンチからコヒーレント放射光が発生し、この光を共振器で蓄積する。同じようにコヒーレント放射光との相互作用により、電子ビームにマイクロバンチ形成が進行する。光はアンジュレーターを通過する度に増幅され、増幅率が共振器損失 (鏡の散乱, 吸収, 回折損失など) を上回るとレーザー発振が起こる。

3. LEBRA-FEL

LEBRA では、FEL, パラメトリック X 線放射, テラヘルツ波光源開発を行っており、ユーザー利用に提供している。主な LEBRA 電子線形加速器と FEL の仕様を Table 1 に、共振器型 FEL の概略図を Fig .1 に示す [4]。LEBRA における共振器型 FEL は、電子線形加速器, ハルバック型アンジュレーター, 光共振器によって構成されている。

Table 1. Specifications of the LEBRA Linac and FEL

Accelerating RF Frequency	2856 MHz
Beam Energy	40~125 MeV
Repetition Rate	2~12.5 Hz
Macropulse Duration	5~20 μ s
Macropulse Beam Current	200 mA
Undulator Configuration	Halbach type Planar
Magnet Material	Dysprosium-containing Nd-Fe-B
FEL Wavelength Range	1.3~6.7 μ m
Number of Periods	49
Period of Undulator Field	48 mm
Resonator Length	6718.04 mm

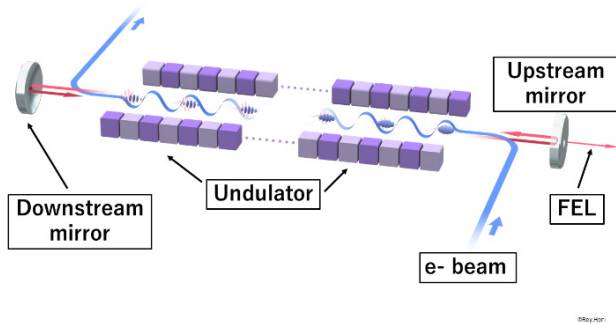


Figure 1. Schematic layout of the LEBRA-FEL.

4. FEL 測定概要

LEBRA では、高効率発振状態の達成のために FEL 発振状態の測定系強化を進めている。詳細な電子ビームや光共振器の調整状況などに関しては、ビーム電流、ビーム位置、FEL の発振波形、FEL のパワー、FEL のスペクトル、共振器長に対する FEL 出力の変化（デチューニングカーブ）、テラヘルツ波のパワーなどの測定系が構築されている[4, 5]。ただし、共振器損失に関しては、FEL の発振波形から定期的に手動で求める測定系しかなく、常時モニターできていない状況であった。しかし、FEL 発振状態の共振器損失を常時モニターすることで、電子ビームや共振器のミラー調整の指標に用いることができ、精密な運転調整に応用可能である。そこで本研究では、LabVIEW を用いて共振器損失の測定系構築を行った。測定系は、発振した FEL を上流側ミラーから取り出し、実験室まで輸送し、赤外線検出器によって電圧変換された発振波形をオシロスコープ（KeySight, DSO-X 3014T）を用いて測定している。測定器は LAN に接続しており、イーサネットを用いて構築した測定系を LabVIEW で制御する。

Figure 2 にビーム電流波形と FEL の発振波形測定例を示す。FEL 発振波形の解析方法として、以下の①から③のように行う。①：電子ビームの波形と FEL 発振波形を取得する。②：ビーム電流波形の立ち下がり開始時間の(a)の付近から、立ち下り終了時間の(b)の付近ま

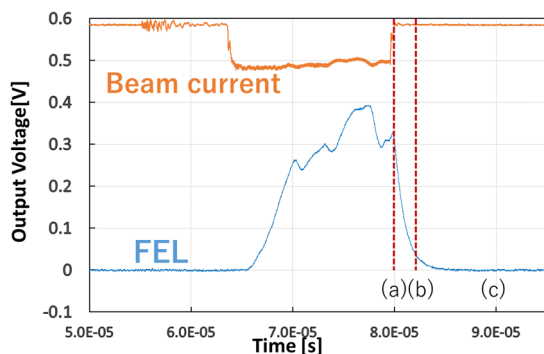


Figure 2. Measurement example of electron beam and FEL waveform.

での間で解析範囲を決定する。③：②で決定した範囲において解析し、共振器損失を算出する。

5. 解析結果

構築した測定系の動作確認のため、過去に測定した FEL 発振波形の数値データから共振器損失を算出し、評価を行った。解析に使ったデータはビームエネルギー 74.1 MeV、ビームパルス幅 17 μm 、FEL 波長 3.67 μm である。解析結果例を Fig. 3 に示す。

発振波形は Fig. 2(c)の部分においてノイズが大きくなるため、今回の解析では、(b)の位置を手動で固定した。この測定条件の下、共振器損失は 4.67%と求められ、本測定系を用いて、共振器損失を算出することが確認できた。

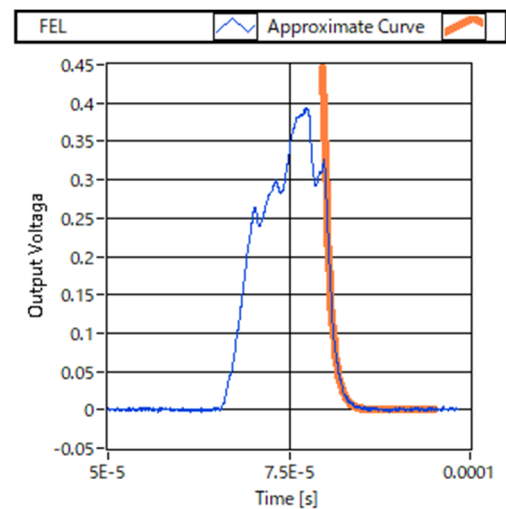


Figure 3. FEL waveform and analyzed approximate curve.

6. まとめ及び今後の展望

LabVIEW を用いた共振器損失測定系を構築し、FEL の発振波形から共振器損失を算出できることが確認できた。

今後は、ビーム電流波形から解析範囲の決定、FEL のパルスごとの解析を行えるように測定プログラムの改良を行い、共振器損失の測定を行う予定である。

7. 参考文献

- [1] N. Nishimori *et al.*, “Sustained Saturation in a Free-Electron Laser Oscillator at Perfect Synchronism of an Optical Cavity”, PHYSICAL REVIEW LETTERS Vol. 86, No. 25, pp. 5707-5710, 2001.
- [2] Heishun Zen *et al.*, “Record high extraction efficiency of free electron laser oscillator”, Appl. Phys. Express 13, pp. 102007, 2020.
- [3] National Instruments “LabVIEW”; <https://www.ni.com/ja-jp/shop/labview.html>
- [4] 境武志：「日本大学 LEBRA 共同利用施設における加速器開発とその応用利用」, 日本大学放射光学会誌, Vol. 34, No. 3, pp.153–161, 2021.
- [5] 木村将記：「日本大学 LEBRA-FEL におけるデチューニングカーブの測定」, 2019 年度修士論文.