

日大 LEBRA-FEL マクロパルス波形の共振器長デチューニング依存性 DEPENDENCE OF FEL MACROPULSE-WAVEFORM ON OPTICAL-RESONATOR DETUNING IN LEBRA-FEL, NIHON UNIVERSITY

長瀬敦^{*A)}, 早川恭史^{B)}, 境武志^{B)}, 早川建^{B)}, 田中俊成^{B)}, 高橋由美子^{B)}, 住友洋介^{A)}

Atsushi Nagase^{*A)}, Yasushi Hayakawa^{B)}, Takeshi Sakai^{B)}, Ken Hayakawa^{B)},

Toshinari Tanaka^{B)}, Yumiko Takahashi^{B)}, Yoske Sumitomo^{A)}

^{A)} College of Science and Technology, Nihon University

^{B)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University

Abstract

In a resonator-type Free Electron Laser (FEL), the FEL gain and the saturation level depend strongly on the resonator length of the optical cavity. In the LEBRA FEL system, the resonator length is 6718 mm, which is synchronized with the acceleration frequency, and the resonator length can be controlled by using a piezoelectric element. The FEL macropulse waveforms for each detuning length were acquired using an infrared detector, and the acquired macropulse waveforms were integrated to produce a detuning curve as the macropulse energy. In addition, we applied GENESIS, a 3D FEL code, to the resonator FEL and attempted to simulate the dependence of the FEL macropulse waveform on the cavity detuning under the LEBRA-FEL condition. The qualitative changes of the FEL macropulse waveforms at each detuning length and the comparison and analysis between the observed results and the GENESIS simulations were performed.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (Laboratory for Electron Beam Research and Application:LEBRA) では、125 MeV の常伝導電子線形加速器とアンジュレーター、光共振器を用いて共振器型自由電子レーザー (FEL) を運用し、ユーザー利用に提供している。

共振器型 FEL において光共振器は蓄積光のマイクロパルスと新たな電子バンチのタイミングを合わせる役割を担い、共振器長は FEL 発振において重要なパラメータとなっている。そのため、LEBRA においても GENESIS を用いた FEL のシミュレーション結果 [1,2] が報告されている。

また、LEBRA では高効率発振の維持や、リアルタイムでの FEL データ取得のプログラムなどが導入されてきた。これにより共振器長に対するマクロパルスのエネルギーを得るデチューニングカーブの測定 [3] や空洞内での共振器損失の測定 [4] がリアルタイムで行えるようになってきた。

デチューニングカーブの測定においては FEL マクロパルス波形からのデータ処理が不十分であったため、各デチューニング長に対するマクロパルス波形を取得できるように改良した。これにより、GENESIS との比較およびデチューニングカーブの正確な測定ができるようになった。そこで LEBRA における 2534 nm、6255 nm の二つの発振波長における各デチューニング長におけるマクロパルス波形を測定し、デチューニング曲線を得た。さらに、得られた結果と GENESIS との比較を行った。

また、2 つの発振波長においてはクライストロンの加速周波数に従うフルバンチモードと電子銃の高速グリッドパルサーにより、電子ビームを間引いてバンチ当たりの電荷量を増やしたバーストモードで行った。

2. GENESIS によるシミュレーション

3次元 FEL コード GENESIS を用いてシミュレーションを行った結果を Fig. 1、2、3 に示した。各波長におけるシミュレーションに用いたパラメータを Table 1 に示した。シミュレーションにおいて電子バンチはフルバンチモードを想定しており、定量的に示したエネルギー値はすべてキャビティ内の値となっている。デチューニングカーブは各デチューニング長におけるマクロパルスのエネルギーをマイクロパルス数で合計し、デチューニングカーブを得た。

デチューニング曲線においてどちらの波長においてもデチューニング長-1 波長でエネルギーが最大となり、デチューニング長 0 にかけて値が減少している。また、-1 波長から 0 波長においてマクロパルス波形においても変化が表れており、特に 6255 nm においてはマクロパルス波形の時間幅が狭くなり波高が大きくなっていることがわかる。これは、マクロパルス幅が有限であるため、光共振器を往復する回数に限りがあり、FEL の増幅が飽和に達する前に電子ビームマクロパルスが終わっているためである。

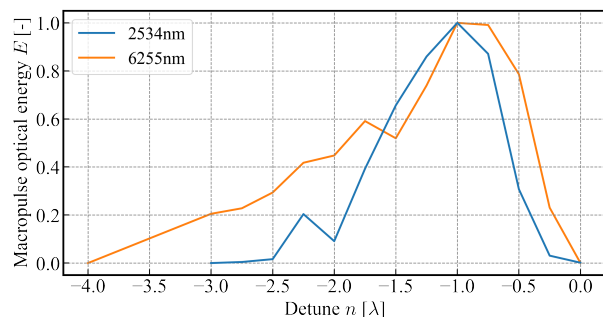


Figure 1: Detuning curve calculated by GENESIS.

* csat22003@g.nihon-u.ac.jp

Table 1: Simulation Condition

Oscillation wavelength [nm]	2534	6255
Electron energy [MeV]	86.6	53.7
Energy dispersion [%]	0.6	0.6
Peak current [A]	25.4	25.4
Bunch length [mm]	0.3	0.3
Cavity loss [%]	5	4.4
Macropulse length [μ s]	11	11
Undulator cycles [-]	49	
Undulator length [mm]	48	
Resonator length [m]	6.718	
Rayleigh length [m]	1.0702	

Table 2: Electron Beam Operation Mode

Beam mode [-]	Full bunch	Burst
Bunch interval [ns]	0.350	22.4
Peak current [A]	0.2	2
Bunch number [$1/\mu$ s]	2857	44

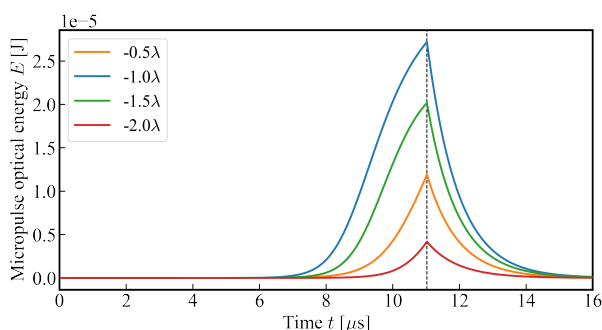


Figure 2: Macropulse waveforms at each detuning length of 2534 nm wavelength calculated by GENESIS.

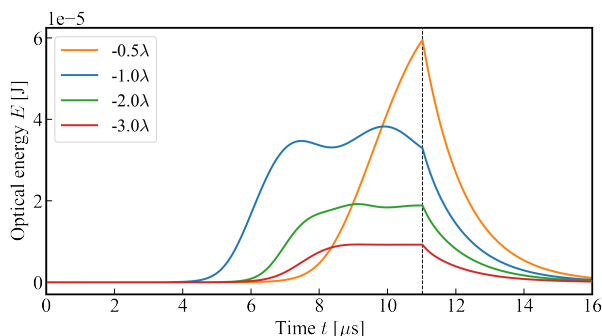


Figure 3: Macropulse waveforms at each detuning length of 6255 nm wavelength calculated by GENESIS.

3. 電子ビーム運転モード

LEBRA では 2 つの運転モードにより電子を加速している。クライストロンの加速周波数に従うフルバンチモードと電子銃の高速グリッドパルサーにより、電子ビームを間引いてバンチ当たりの電荷量を増やしたバーストモードである。バーストモードにおいて、フルバンチモードの 64 分周で加速を行っている。電子ビームモードについて Table 2 に示す。

4. 実験結果

FEL 波長 2534 nm、6255 nm において、各電子ビーム運転モードにおいて下流側ミラーの位置を変化させ、各ミラー位置のマクロパルス波形を測定し、測定した波形を積分することでデチューニング曲線を得た。フルバンチモードにおいてはピエゾ素子に印加する電圧を 1 V ずつ変化させ、0.13 μ m ごとのマクロパルス波形を測定し、バーストモードにおいては下流側ミラーのステージを 0.4 μ m ごとに変化させ、マクロパルス波形を測定した。マクロパルス波形の測定には InSb 光導電素子の赤外線検出器（浜松ホトニクス、P6606-310）を、マクロパルスエネルギーの測定にはパワーメーター（Coherent、Field-MaxII-TO）を用いた。各波長、各電子ビーム運転モードにおけるパラメーターを Table 3 に、波長 2534 nm の各電子ビーム運転モードにおけるデチューニング曲線を Fig. 4 に、波長 6255 nm の各電子ビーム運転モードにおけるデチューニング曲線を Fig. 7 に示した。また、各波長、各電子ビーム運転モードにおけるマクロパルス波形を Fig. 5, 6, 8, 9 に示した。

GENESIS の結果からデチューニング長-1 波長でマクロパルス積算エネルギーが最大となるため、結果よりマクロパルス積算エネルギーが最大となる下流側ミラーの位置をデチューニング長-1 波長とした。グラフより電子ビーム運転モードによらず波長が長い場合はデチューニング曲線のピークがシミュレーションのものより尖っており、ゼロデチューンの傾向が得られていることがわかる。また、フルバンチモードの場合はデチューニング曲線の幅がある程度整合しているが、バーストモードだとデチューンが短い方においてかなり長いテールを引いている。これはバーストモードが電子ビームを間引いてバンチ当たりの電荷量を多くしているため、バンチ長が長くなり発振の様子が異なるためと考えられる。

Table 3: Experiment Condition

wavelength [nm]	2534		6255	
Beam mode [-]	Full	Burst	Full	Burst
Electron energy [MeV]	86.6	86.6	53.7	52.9
Peak current [mA]	72.5	31.8	72.5	32.8
Half gap length [mm]	12.04	12.05	12.04	12.03
Macropulse length [μ s]	11.04	10.98	11.04	10.06
Peak energy [mJ]	10.1	4.25	0.597	2.41

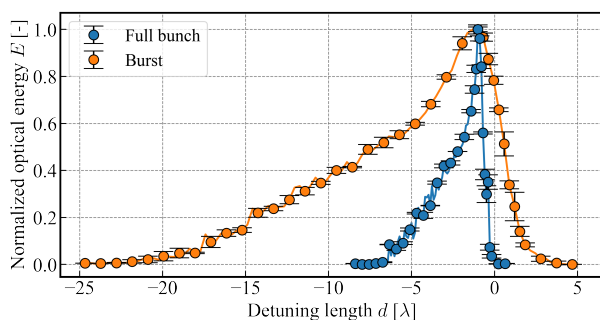


Figure 4: Detuning curves for each mode at 2534 nm wavelength.

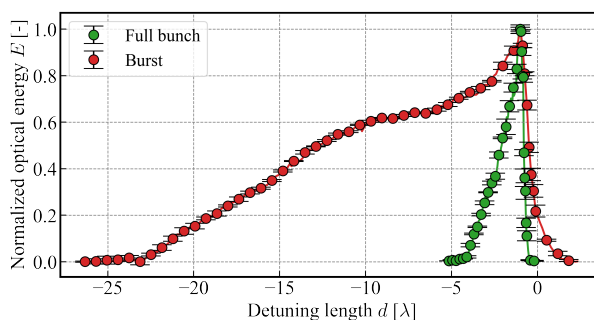


Figure 7: Detuning curves for each mode at 6255 nm wavelength.

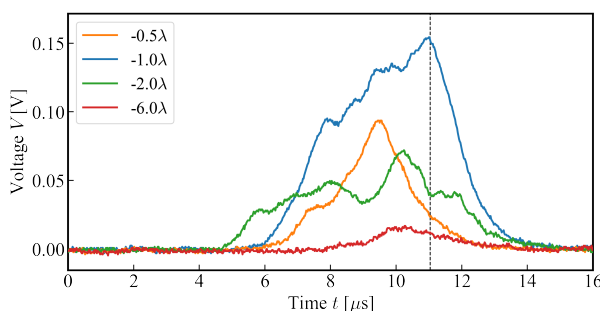


Figure 5: Macropulse waveforms for each detuning length in full bunch mode at 2534 nm wavelength.

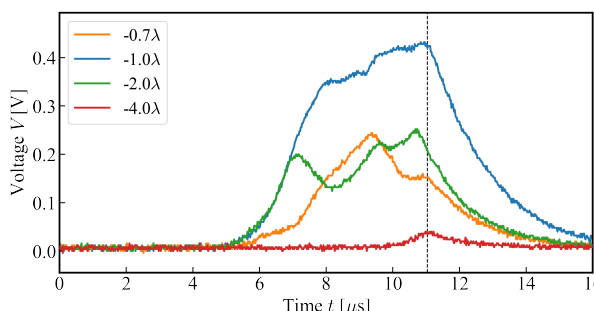


Figure 8: Macropulse waveforms for each detuning length in full bunch mode at 6255 nm wavelength.

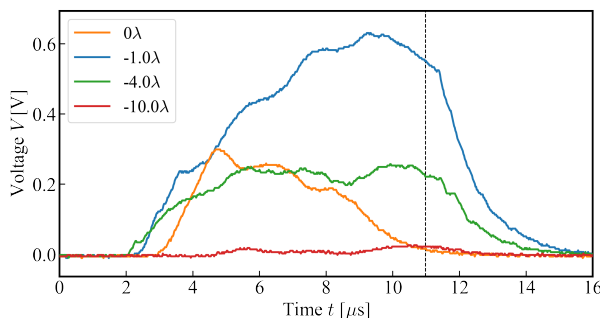


Figure 6: Macropulse waveforms for each detuning length in burst bunch mode at 2534 nm wavelength.

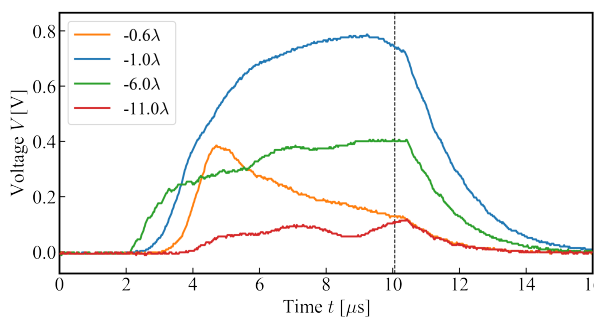


Figure 9: Macro pulse waveforms for each detuning length in burst mode at 6255 nm wavelength.

5. 結論

測定プログラムの改善により各波長、運転モードにおけるマクロパルス波形を測定し、デチューニング曲線を得ることができた。GENESIS によるシミュレーションと実験の側面から常伝導共振器型 FEL におけるマクロパルス波形の変化を確認し比較することができた。

特にデチューン-1 波長からゼロデチューンにおいてはマクロパルスエネルギーが急激に減少し、さらにマクロパルス波形も異なることがわかった。この特性を利用し、画像認識などを用いて下流側ミラーの位置を制御することができるのではないかと考えられる。

実験の結果デチューニング曲線において、電子ビーム運転モードによりデチューニングの幅が異なることがわかった。これはモードによりバンチ当たりの電荷

量が異なるため、バンチ長の差によるものだと考えられるが、この結果により電子ビーム運転モード別による電子バンチの状態が分かるのではないかと考えられる。

参考文献

- [1] Y. Hayakawa *et al.*, “GENESIS による日大 FEL の利得飽和の分析”, Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, Aug, 2004, pp. 652-654. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj1_1am29/WebPublish/5P75.pdf
- [2] Y. Sumitomo *et al.*, “日大共振器型 FEL における動的位相変調を用いた完全同期長発振シミュレーション”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug, 2018, pp. 850-853. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/THP0/THP027.pdf

- [3] 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, 日本大学大学院.
- [4] 廣原 匠, “日本大学 LEBRA 赤外自由電子レーザーにおける共振器損失の測定”, 2021 年度修士論文, 日本大学大学院.