

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

Ryukou Kato^{1,A)}, Keigo Kawase^{A)}, Akinori Irizawa^{A)}, Shen Jie^{A)}, Sho Hirata^{A)}, Masaki Fujimoto^{A)},
Fumiyoshi Kamitsukasa^{A)}, Hiroki Ohsumi^{A)}, Shoji Suemine^{A)}, Goro Isoyama^{A)},
Shigeru Kashiwagi^{B)}, 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

The peak power detuning curves of the Terahertz FEL oscillator at ISIR, Osaka University were investigated with the theoretical formula and the one-dimensional, numerical simulation code FELO. By using FELO, it was confirmed that the high gain FEL oscillator without a waveguide mode was feasible in the longer wavelength region with highly optical cavity loss.

阪大産研テラヘルツ FEL 開発の現状

1. はじめに

一昨年の米国 SLAC National Accelerator Laboratory の LCLS による X 線領域での自由電子レーザー (Free-Electron Laser; FEL) 発振¹に続き、今年 RIKEN/SPring-8 の SACLA による X 線 FEL の発振²が話題となった。FEL は、電子ビームとウィグラー磁場との相互作用を増幅媒質として利用するため、媒質中での熱損失がないことから、高出力化が可能となる。また、発振波長に対する原理的な制約が無いことから、レーザー発振が可能な波長領域は X 線領域からミリ波にまで広がっている。この FEL というツールにより、高出力の半導体レーザー+非線形光学素子がカバーできなかった、真空紫外よりも短波長の EUV、X 線領域と、遠赤外からサブミリ波にかけての波長領域 (テラヘルツ波領域) での、コヒーレントで波長可変な高出力光源が利用可能になる。

大阪大学産業科学研究所 (阪大産研) では、L バンド電子ライナックを用いた FEL の開発を行っている。その目標とする波長領域は、これまで高出力で波長可変なコヒーレント光源が存在しなかったテラヘルツ波領域である。これまで、波長 70 μm (4.3 THz) でライナック改造後の再発振と出力飽和に成功した³のち、FEL の特性評価を行うとともに波長領域の拡大と出力増大に努めてきた。FEL 発振に用いるマルチバンチ・モードで利用可能なビームエネルギー範囲を拡大した結果、現時点での発振波長領域は 25 ~ 150 μm (12 THz ~ 2 THz) となり、ライナック改造前の FEL 発振範囲をほぼカバーできるようになった。マクロパルスあたりのエネルギーは、

分光器出口のユーザー利用ポートで最大 3.7 mJ に達し、このとき光共振器内に蓄積される FEL 光パルスのピークパワーは 30 MW 以上と推定される。さらに、昨年度は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) の評価が可能になった。FEL の主要なパラメータである飽和出力や、波長スペクトル幅、増幅利得などは共振器長に強く依存するため、測定結果を理論やシミュレーションと比較するにはゼロ・デチューニング位置の評価が必要不可欠である。昨年度の報告では解析的な式⁴との比較を行ったが、今回 FEL の 1 次元シミュレーションコード FELO⁵を導入したことで、より現実的な評価が可能になった。また、現在開発中の高繰返しグリッドパルサー⁶により、電子バンチの繰返し間隔を 4 倍に広げる代わりに、L バンド加速管でのビームローディングをこれまでと同じレベルに留めたまま、1 バンチあたりの電荷量を 4 倍に引き上げることが可能になる。このパルサーにより高い増幅利得を有する FEL が実現される。従来、波長 300 μm (1 THz) の領域は、共振器内の回折損失が無視できず、FEL 発振のためには導波管モードを使用して共振器損失を低く抑える必要があった。しかし、このパルサーを利用する高増幅利得 FEL により、共振器損失を上回る増幅利得が実現できるため、導波管モードを使用しなくても FEL 発振が可能になる。

本学会では、この 1 次元シミュレーションコードを用いたデチューニング解析と高増幅利得 FEL による長波長化の検討について報告する。

¹ E-mail: kato@sanken.osaka-u.ac.jp

2. デチューニング曲線

共振器型 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、デチューニング長と呼ぶ。FEL の増幅利得や飽和強度、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。昨年度、ライナックのタイミングシステムの基準周波数 27 MHz を 3 通倍した 81 MHz 繰返しに同期させた Ti:Sapphire レーザーを光共振器内に入射し、共振器内に蓄積された光パルスと入射パルスの干渉強度を測定することにより、この完全同期（ゼロ・デチューニング）位置を $\pm 1 \mu\text{m}$ の精度で同定することが可能になった。

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・シミュレーションとの比較が可能になった。図 1 に示すのは電子ビームエネルギーが 15 MeV の場合のデチューニング曲線である。ウィグラーギャップを 30、32、34 mm と変えることにより 3 種類の発振波長について測定した。波長の実測値はスペクトルのピーク付近で各々 106、95、84 μm である。横軸は Ti:Sapphire レーザーの共振位置を基準としたデチューニング長 (dL)。ただし我々のシステムでは FEL の光輸送路の途中のミラーを外して Ti:Sapphire レーザーを導入するため、FEL 光と共振器長の同時測定ができない。横軸の評価には測定時刻の間隔に応じた数 μm 程度のずれが含まれていると考えられる。縦軸は FEL 出力強度である。図中の赤丸は高速型 Ge:Ga 検出器で測定した FEL 出力パルスのピーク電圧値であり、最大値で規格化されている。緑の破線は理論値で、Dattoli らによって導出された式⁴を用いている。青の実線は 1 次元シミュレーションコード FELO の計算結果である。理論値と計算値の導出では共振器損失として、各々 6、4、3% の値を使用した。電子ビームのパラメータは共通で、バンチ電荷 1 nC、バンチ長 20 ps、規格化エミッタンス 1×10^{-4} m-rad、エネルギー拡がり 1% である。K 値はウィグラーギャップに応じて、各々 1.55、1.4、1.26 である。また、このシミュレーションでは共振器内を FEL 光パルスが往復する round trip number を 240 まで計算し、各々のデチューニング位置での最大値をプロットしている。

測定値と理論計算、シミュレーションを比較すると、ピーク位置とゼロ・デチューニング近傍のスロープ位置、マイナス側テールの拡がりには違いが見受けられる。理論はゼロ・デチューニングを扱うことができないため、 $dL=0$ に向かって漸近的に FEL 強度がゼロにならざるを得ない。そのためピーク位置とそれに連なるプラス側のスロープ位置は測定値よりも少しマイナス側によっている。この点はシミュレーションのほうが測定値をよく再現している。他方、マイナス側はシミュレーションがかなり広範囲にテールをひいているのに比べて、理論はあると

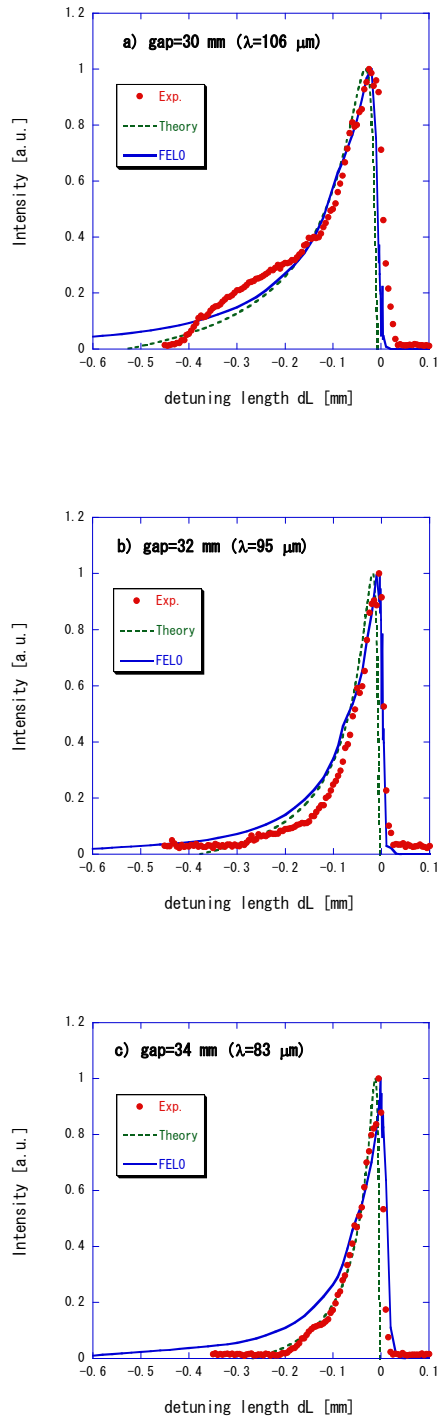
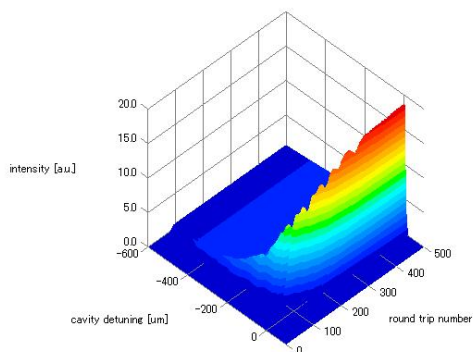


図 1: 測定されたデチューニング曲線と理論計算、およびシミュレーションとの比較。赤丸は FEL 出力パルスのピーク電圧値、緑の破線は理論値、青の実線は 1 次元シミュレーションコード FELO の計算結果。

a)



b)

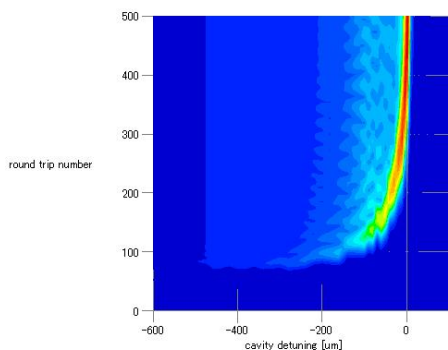


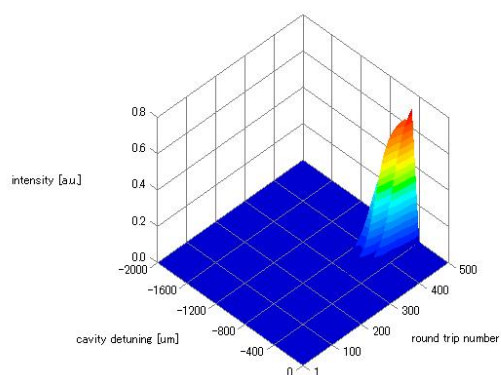
図 2: FEL 発振の全体像。a)各デチューニング毎の FELO 出力を連結した 3 次元グラフと、b)それを上からみたもの。

ここで値がゼロに落ちている。この位置は測定値のそれと非常に近い。細かな点で相違があるものの、全体的に見て三者は良い一致を示している。

3. FEL 発振の全体像

前節の測定値との比較では、シミュレーションの値として、round trip number 240 までを計算し、その最大値をデチューニング位置の関数としてプロットした。ここではそのほぼ倍の 500 まで計算し、その出力を連結して 3 次元グラフ化することで、FEL 発振の全体像を評価した(図 2)。デチューニング長が $-300 \mu\text{m}$ 近傍で最も速く FEL 発振が立ち上がる。デチューニング曲線のピークは時間とともに $dL=0$ に近づいていき、ほぼ round trip number が 400 以上でゼロ・デチューニング位置に重なる。これは以前、原研 FEL で観測された $dL=0$ での高効率の発振⁷と考えられる。我々のパラメータでもこの $dL=0$ の発振を実現することは可能であるが、そのためにはマクロパルス長を倍程度に増やす必要があることが理解できる。デチューニング・ピークの左側に広が

a)



b)

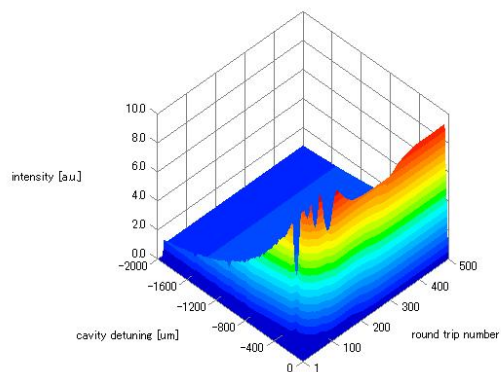


図 3: 波長 $200 \mu\text{m}$ (1.5 THz) での発振シミュレーション。共振器損失として 33%を仮定。a) 現在の電子銃グリッドパルサー (バンチ電荷 1 nC) を使用した場合、b) 開発中のグリッドパルサー (バンチ電荷 4 nC) を使用した場合の比較。

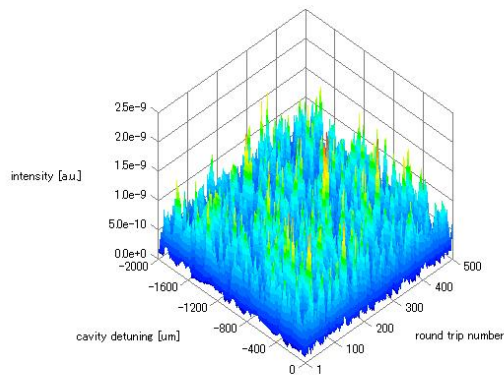
鱗状の部分は、飽和時に FEL 出力が周期的に変動する Limit Cycle 振動である。

4. 長波長化へのアプローチ

現在開発中の高繰返し電子銃パルサーにより、電子バンチの繰返し間隔を 4 倍に広げる代わりに、1 バンチあたりの電荷量を 4 倍に引き上げることが可能になる。このパルサーにより実現される高い増幅利得を利用することで、従来、導波管モードを使用した光共振器でしか発振できなかった長波長領域でも FEL 発振が可能になることを、シミュレーションにより検討した。

図 3 は波長 $200 \mu\text{m}$ (1.5 THz) での FEL 発振のシミュレーションである。この波長では別のシミュレーションにより共振器損失が 33%になることが示されている。図 3a は現在使用している電子銃パルサーを使用した場合の FEL 発振の全体像である。

a)



b)

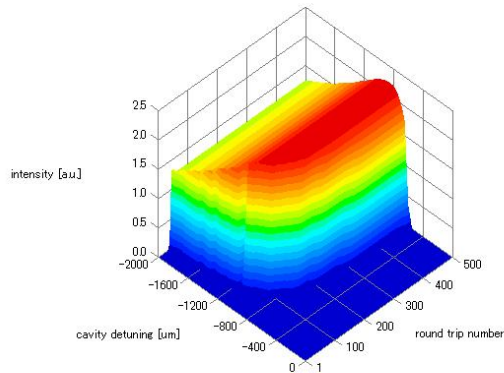


図 4: 波長 $300 \mu\text{m}$ (1 THz) での発振シミュレーション。共振器損失として 60% を仮定。a) 現在の電子銃グリッドパルサー (バンチ電荷 1 nC) を使用した場合、b) 開発中のグリッドパルサー (バンチ電荷 4 nC) を使用した場合の比較。

バンチ電荷が 1 nC なのに対し共振器損失が 33% もあるため、ゆっくりとした成長となる。最終的に飽和に到達することが可能であるが、現状の倍程度のマクロパルス長を必要とする。また唯一 FEL 発振可能なデチューニング領域は $dL = -400 \sim -800 \mu\text{m}$ となる。図 3b は開発中の電子銃パルサーを使用した場合の FEL 発振である。バンチあたりの電荷量を 4 倍に増やすことができると予想されるため、広い範囲で光の増幅が見られる。また最終的に $dL=0$ 近傍で達成される飽和時出力は現行の電子銃パルサーを用いた場合の 10 倍程度になる。

図 4 は波長 $300 \mu\text{m}$ (1 THz) での FEL 発振のシミュレーションであり、このときの共振器損失は 60% に達すると予想される。従来のグリッドパルサーを使用した倍には、図 4a に示されるように、出力飽和に達することはおろか、わずかな増幅さえ観測されない。開発中のグリッドパルサーを使用した場合は、図 4b に示されるように、デチューニン

グ長が -1 mm の近傍で FEL 発振が可能となる。共振器長の変化に対してかなり鈍感な飽和現象が観測されると予想される。重要なのは、これまで導波管モードを使用しなければ FEL 発振が実現できなかった波長領域でも、従来型の共振器を用いて FEL 発振が可能になるという点であり、この結論は今後のテラヘルツ FEL 開発の自由度を高めることになる。

5. まとめ

波長 $100 \mu\text{m}$ 近傍で実際に測定された FEL 光出力のデチューニング長依存性を Dattoli らにより導出された解析的な式、および 1 次元数値シミュレーションコード FELO と比較し、FELO の信頼性を確認した。また現在開発中のグリッドパルサーを用いた高増幅利得 FEL は、共振器損失が顕著な長波長領域でも導波管モードを利用すること無しに FEL 発振が可能なることを、FELO を用いた計算で示した。

参考文献

- [1] P. Emma, Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada, 3115-3119 (2009).
- [2] “Lasing achieved at SACLA, Japan’s X-ray free-electron laser facility”, J. Synchrotron Rad. 18, 686–687 (2011).
- [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] B.W.J. McNeil, G.R.M. Robb, D. Dunning and N.R. Thompson, Proceedings of FEL 2006, BESSY, Berlin, Germany, 59-62 (2006).
- [6] N. Sugimoto, K. Kawase, S. Jie, S. Kashiwagi, R. Kato, A. Irizawa, Y. Terasawa, S. Hirata, M. Fujimoto, F. Kamitsukasa, H. Osumi, A. Tokuchi, S. Suemine, G. Isoyama, PASJ 8, Tsukuba (TUPS108).
- [7] N. Nishimori, R. Hajima, R. Nagai and E.J. Minehara, Phys. Rev. Lett. 86, 5707 (2001).