

テラヘルツ帯のプリバンチド FEL に関する研究

STUDY ON PRE-BUNCHED FREE ELECTRON LASER IN THE TERAHERTZ WAVELENGTH RANGE

小林建輝^{#, A)}, 全炳俊^{B)}, 柏木茂^{C)}, 坂上和之^{A)}

Tatsuki Kobayashi^{#, A)}, Heishun Zen^{B)}, Shigeru Kashiwagi^{C)}, Kazuyuki Sakaue^{A)}

^{A)}The University of Tokyo, ^{B)}Kyoto University, ^{C)}Tohoku University

Abstract

We have been developing a pre-bunched Free Electron Laser (FEL) in the Terahertz (THz) wavelength range. In the pre-bunched FEL, the electron beam bunches are compressed to be shorter than the oscillation laser wavelength prior to injections into an undulator. As a result, a broadband spectrum and high-intensity characteristics, which cannot be realized by conventional FEL, are expected. We installed an optical cavity at THz-CUR (Coherent Undulator Radiation) in KU-FEL (Kyoto University Free Electron Laser) and performed beam tests at the frequency of 0.2 to 0.4 THz. As a result of the beam tests, we observed the coherent stacking of the coherent undulator radiation inside the cavity. However, FEL oscillation has not been achieved yet. This paper reports on our pre-bunched FEL project, experimental setup, beam test results and prospects.

1. はじめに

テラヘルツ光は波長 3 mm ~ 30 μm 、周波数 0.1 ~ 10 THz の電磁波の総称である。光と電波の中間に位置するため、電波のもつ透過性や、光のもつ直進性を併せ持ち、非破壊検査やイメージング等に利用される。またテラヘルツ光の周波数帯域は分子間振動や格子振動の周波数と一致するため、物質の同定にも用いられる[1]。近年のフォトニクスやエレクトロニクス、またナノテクノロジーの技術発展に伴い、テラヘルツ光の発生機構や検出技術が開発され、テラヘルツ光は様々な分野で応用が期待される。

加速器ベースのテラヘルツ光源の1つが自由電子レーザー (Free Electron Laser: FEL) である。FEL は相対論的速度を持つ電子ビームと電磁波とのアンジュレーター内でのエネルギー相互作用によってコヒーレントなレーザーを共振させる。広いスペクトル範囲にわたって連続的に波長可変であり、さらに高いピーク電場強度を実現できるため、幅広い科学的・産業的応用に適している。

近年、短パルス電子ビーム生成技術の発展に伴い、プリバンチド FEL[2]が注目を集めている。プリバンチド FEL は、アンジュレーター入射前にバンチ長が共振波長よりも短い電子ビームを用いた FEL 共振を指す。従来の FEL では、電子ビームのバンチ長が共振波長よりも十分に長く、アンジュレーター内部での電子ビームと電磁波の相互作用によってマイクロバンチが形成されたのち、コヒーレント放射が生成される。一方、プリバンチド FEL ではマイクロバンチングの過程をスキップできるため、従来の FEL では実現が難しい効率的な共振や、広帯域かつ高いピーク強度のレーザーパルスの生成が可能とされている[2]。実験での実証例は未だなく、本研究では初のプリバンチ電子ビームを用いた FEL 共振を実現し、高効率かつ高強度なテラヘルツ光源の開発を目標とする。

2. セットアップ

実験は京都大学の KU-FEL (Kyoto University Free Electron Laser) に設置された THz-CUR (Terahertz-Coherent Undulator Radiation) ビームライン (Fig. 1[3]) にて実施した。THz-CUR は、ECC-RF-Gun (Energy Chirping Cell-Radio Frequency-Gun)[4]、アンジュレーター、ビームダンプで構成される。また本研究では、光共振器の中でパルスを周回させながら増幅を図る共振器型 FEL を採用した。よって、アンジュレーターを含む形で光共振器の設計及び設置を行った。

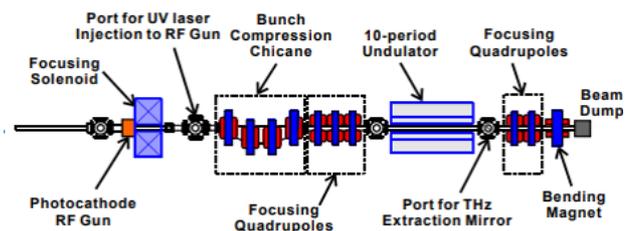


Figure 1: Schematic of THz-CUR[3].

2.1 電子銃

電子ビームは、ECC-RF-Gun を用いて生成する。この電子銃はプリバンチド FEL に適したサブピコ秒の電子ビームを生成することができる。ビームエネルギーは 3 ~ 4 MeV、バンチ電荷量は 10 ~ 40 pC、バンチ長は 500 fs 以下の電子ビームを用いる。

Figure 2 に電子ビームの電荷に対する放射光強度の依存性および 2 次のフィッティングカーブを示す。実験データはフィッティングカーブと良好な一致を示しており、アンジュレーター放射はコヒーレントであることが示された。よって ECC-RF-Gun から放出された電子ビームのバンチ長は、初期状態において放射光の波長よりも短く圧縮されており、プリバンチド FEL に適していることが確認された。

[#] kobayashi-tatsuki0714@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

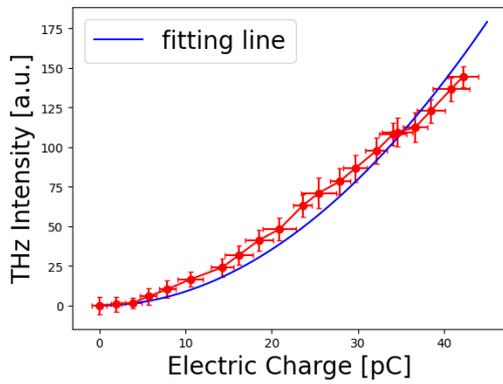


Figure 2: THz intensity as a function of electric charge and quadratic fitting curve.

2.2 アンジュレーター

永久磁石からなる平面型のアンジュレーターであり、周期数 10、周期長 7 cm、ピーク磁場強度は 0.07～0.17 T である。アンジュレーター放射光の波長および、FEL 発振における共鳴波長 λ は

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (1)$$

$$K = 93.4B_0\lambda_u \quad (2)$$

で定まる。ただし、 K は偏向定数と呼ばれ、磁場強度を示す無次元のパラメーターである。また λ_u はアンジュレーターの周期長、 γ は電子ビームのエネルギーを示す。式(1)で見られるように、電子ビームのエネルギーやアンジュレーターの磁場強度を変えることで、共鳴波長を連続的に変化させることができる。

2.3 光共振器

プリバンチド FEL 発振に向け、光を効果的に空間に閉じ込めるための光共振器を構築し、設計した (Fig. 3)。電子銃の繰り返し周波数 89.25 MHz と光の共振器 1 周にかかる周期を一致させるため、全長を 1679.5 mm としている。既存の THz-CUR ビームラインを大きく変更せず、この共振器長を実現するため、ミラーを 3 枚用いた L 字型共振器長を採用している。上流、下流側のミラーは凹面鏡であり、それぞれの曲率半径は 900 mm、1400 mm である。これらのミラーの曲率半径によって定まる光共振器内のモード径を、横軸を共振器内の位置として、Fig. 3 に示している。

上流側のミラーの中心には直径 3 mm の穴があり、電子ビームがミラーに散乱されることなく、共振器内に入ることができる。同様に下流ミラーの中心には直径 10 mm の穴があけられており、これによって光共振器内のテラヘルツ光の一部を取り出すことができる。またこれら 2 つのミラーは銅基板に金コーティングを施した反射面を持つ。中流に設置したミラーは反射面にアルミニウムを蒸着した平面型薄膜 PET フィルムを採用しており、アンジュレーターを通過した電子ビームはこのミラーを通過して、共振器外でカーボンブロックに導入される。

下流側ミラーは、光軸に沿って前後の移動が可能な

駆動機構に設置しており、共振器長の微調整が可能となっている。また光軸調整のため、yaw 軸、pitch 軸に対して回転可能としている。また、上流側および中流側ミラーは、ビーム軸上への挿入取り出しが可能となっているとともに、yaw 軸、pitch 軸に対して角度調整可能な構成とした。

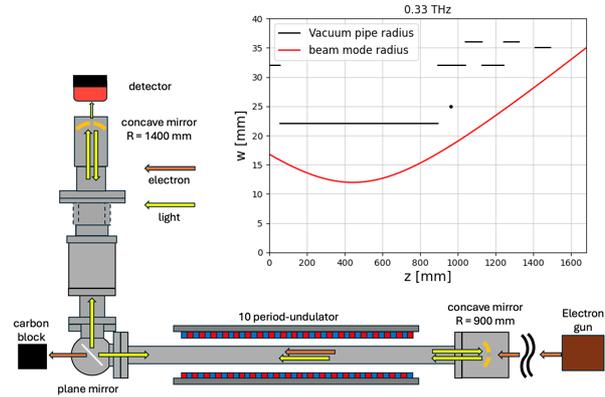


Figure 3: Schematic of the optical cavity and the mode radius.

Figure 3 に示したモード径とビームダクトの径から計算されたフィネス[5]は 10.6 であり、共振器 1 周における光の強度損失は 44.7%と予測された。これらの値はのちの実験結果から得られる値と比較する。

3. ビーム試験結果

すべてのミラーを設置して、光共振器の光軸調整を実施した後にビーム試験を実施した。アンジュレーターギャップを 57 mm として、中心周波数 0.33 THz の光を下流ミラーの取り出し穴より射出させ、大気中に設置した焦電検出器(PYD-1, PHLUXi)を用いて測定した。

まず下流ミラーを光軸に沿って徐々に動かすことで共振器長をスキャンして、テラヘルツ光強度を測定した。この操作によって共振器内を周回する各電子ビームからの放射パルスの重なり合う位相関係を変化させることができる。Figure 4 に測定結果を示す。この時、電子ビームは 24 バンチ、総電荷量は 340 pC である。

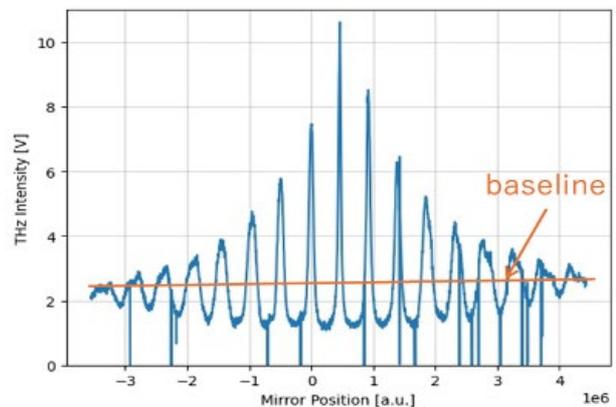


Figure 4: Measurement of THz intensity scanning the cavity length.

干渉の起きていない時の強度 (base line) を基準に、Fig. 4 中央付近では、増加の割合が減少に比べて大きい。このことから光共振器内を周回するテラヘルツパルスは互いに重なり合って増強され、コヒーレントスタッキング[6]が実現されていると言える。また干渉縞からフィネスを計算したところ、値は 11.5 であり、実験前のモード径から計算したフィネスと良好な一致を示し、共振器が設計通りに構築できたと考えられる。Figure 4 内のテラヘルツ光強度の局所的な減少は、電子銃内の真空中に発生する約 100 MV/m という非常に高い RF 加速場によって誘発された確率的な放電によるものである。

Figure 5 に QOD (Quasi-Optical Detector, Ultrafast, TeraSense) を用いて測定した短い時間領域におけるパルスの周回数ごとのテラヘルツ光強度の測定結果を示す。QOD は時間分解能が高く、テラヘルツパルスを経路共振器周回ごとに計測することが可能である。電子ビームは 48 バンチ、600 pC の条件で行った。この結果から、飽和時に元のアンジュレーター放射の約 10 倍の強度の光がコヒーレントスタッキングによって生成されたことが分かる。一方で、通常 FEL 発振で見られる光強度の指数関数的増幅は本結果では見られず、FEL 発振には達していないと考えられる。

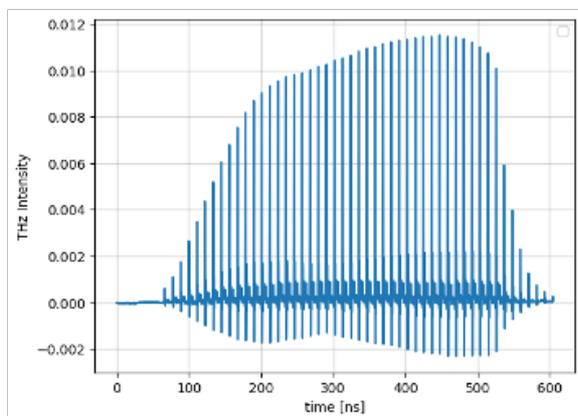


Figure 5: Temporal evolution of THz intensity measured by QOD.

Figure 6 にターン数ごとのパルスに対してマイケルソン干渉計を用いて得た干渉縞を示す。プリバンチド FEL では前方に時間幅の短く高いピーク強度を持つレーザーが得られるとされており、発振した場合のパルスをマイケルソン干渉計に通すと、中央付近が局所的に高い干渉縞が得られると考えられる。そこで今後のビーム形状を診断するシステムとして、Fig. 6 のデータを試験的に取得した。現状、期待されるような干渉パターンは得られず、また干渉計ミラーの動作間隔が粗いことが判明した。今後、より正確なデータ取得を行う予定である。

4. 考察

ビーム試験の結果として、テラヘルツ光のコヒーレントスタッキングによって元のアンジュレーター放射の約 10 倍の強度増強に成功した。また実験結果から計算されたフィネスは予測値と良好な一致を示し、設置した光共振器は概ね設計通りに機能したと考えられる。一方で期待されるような光強度の指数関数的増幅は見られず、FEL

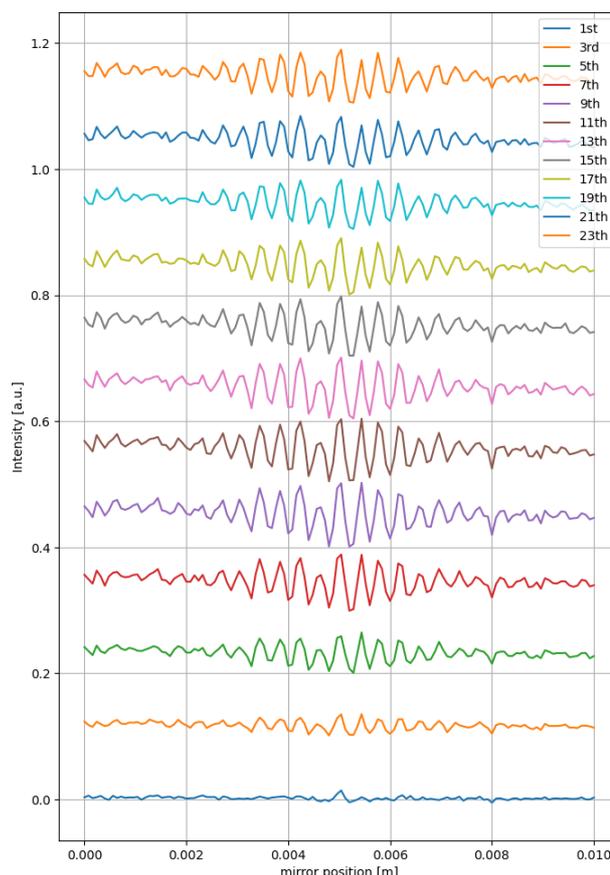


Figure 6: The Interference fringes of the Terahertz pulse obtained by using a Michelson interferometer.

発振には至らなかったと結論付けた。発振を妨げる主要因として以下の2つが考えられる。

1つ目は、共振器内往復中の光強度の損失が大きいことである。実験結果から得られたフィネスから共振器1周あたりの光の強度損失を計算したところ、約 42%と推定された。この強度損失は、上流・下流側ミラーの中心の穴によるものに加えて、Fig. 2 右上部分のモード径計算結果に示されるように、テラヘルツ光は波長が長く、空間的に広がりやすいため、その一部が共振器を構成する真空パイプによって削られることに起因する。共振器1周のゲインがこの損失を上回ることができず、FEL 発振には至らなかったと考えられる。

2つ目は共振器1周あたりのキャリアエンベロープシフト (CEP-shift) [5]である。この位相シフト $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = 2(\phi_{(L/2)} - \phi_{(-L/2)}) \quad (3)$$

で求められる。ただし $\phi_{(z)}$ は gaussian ビームにおける Gouy 位相、 L は共振器長であり、式(3)は対称共振器におけるものである。実験結果から CEP-shift は 1.47π と計算され、光電場の位相が共振器1周ごとに少しずつずれ、広帯域での発振を阻害する要因となっていると考えられる。特にプリバンチド FEL では、広帯域でのコヒーレント放射が鍵となるため、この CEP-shift による位相ずれはゲインの制限となりうる。

5. まとめ

本研究の目的はプリバンチド FEL によるレーザー発振ならびに、高効率かつ高強度なテラヘルツ光源の開発である。これに向け、THz-CUR にて光共振器を設計・設置し、ビーム試験を実施した。結果として、光共振器は機能し、コヒーレントスタッキングが実現し、元のアンジュレーター放射の 10 倍の強度をもつテラヘルツ光の生成に成功した。一方で FEL 発振には至らず、原因として共振器 1 周の強度損失が大きいことや、共振器 1 周における光の位相ずれを示す CEP-shift が 1.47π であり、これらが重ね合わせによる効果的な増幅を阻害していると考えられる。これらを改善すべく、光共振器やシステム全体の再設計を行い、引き続きプリバンチド FEL によるレーザー発振の実現を目指す。

謝辞

本研究の遂行にあたり、高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設本田洋介准教授には、ご多忙の中ご助言を賜り、ここに深謝の意を示します。

本研究は JSPS 科研費 23K25894 の助成を受けたものです。This work is also supported by the Joint

Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (2023A-13, 2024A-30, 2025A-27).

参考文献

- [1] T. Sasaki, “映像情報メディア”, Vol. 67, No. 6, pp. 460~464, 2013.
- [2] H. Hama *et al.*, “Intense coherent terahertz generation from accelerator-based sources”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, vol. 637, no. 1, pp. 57-11, May. 2011.
- [3] A. Alpha *et al.*, “Development of compact THz coherent undulator radiation source at Kyoto university”, in Proc. FEL’17, Sant Fe, NM, USA, pp.144-147, Aug. 2017.
- [4] Y. Koshiba *et al.*, “High-charge ultrashort electron bunch generation by an energy chirping cell-attached rf electron gun and its measurement using transverse deflecting cavity”, Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 24, no. 9, p. 083401, Aug. 2021.
- [5] F. Della Valle *et al.*, “Extremely long decay time optical cavity”, Opt. Soc. America, vol. 22, no. 10, pp.11570-11577, May. 2014.
- [6] Y. Honda *et al.*, “High-efficiency broadband THz emission via diffraction-radiation cavity”, Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 22, p. 040703, Apr. 2019.