

LEBRA FEL ビームラインにおけるテラヘルツ波光源開発

DEVELOPMENT OF TERAHERTZ SOURCE AT LEBRA FEL BEAM LINE

境 武志^{#A)}, 清 紀弘^{B)}, 早川恭史^{A)}, 住友洋介^{C)}, 早川 建^{A)}, 田中俊成^{A)}, 野上杏子^{A)}, 高橋由美子^{A)}
Takeshi Sakai^{#A)}, Norihiro Sei^{B)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Yoske Sumitomo^{C)}, Ken Hayakawa^{A)}, Toshinari Tanaka^{A)},
Kyoko Nogami^{A)}, Yumiko Takahashi^{A)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research Application (LEBRA), Nihon University

^{B)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{C)} College of Science and Technology (CST), Nihon University

Abstract

At the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University, collaborative studies with the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) and the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) have been carried out to upgrade a 100-MeV electron linear accelerator and to develop free-electron lasers (FEL), parametric X-ray radiation (PXR), and terahertz (THz) radiation sources. Along the FEL beamline, a combined FEL-THz transport system has been constructed, enabling simultaneous measurements of FEL and THz waves. Using an ultrafast detector, THz radiation variations on the micro-pulse scale during FEL oscillation can now be resolved. However, absorption of THz waves by water vapor has presented a serious limitation to these measurements. To mitigate this effect, a newly designed glove box was introduced, drawing upon experience gained from the PXR beamline. The glove box allows efficient sample exchange and detector replacement, thereby improving measurement throughput. This paper reports on the development of the THz light source along the FEL beamline and the construction of its measurement system.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 LEBRA では、KEK と産業技術総合研究所との共同研究により、100 MeV 電子線型加速器の高度化、FEL、パラメトリック X 線放射とテラヘルツ波 (THz) 光源開発を行っている。THz 波光源は FEL ライン、PXR ラインそれぞれで開発しており、学内外の共同利用研究に用いている。PXR ラインでは、超乾燥空気システムを用いた低湿度環境下での測定が可能なグローブボックスを改良した測定系が構築され、測定時の空気中の水分の吸収影響を抑えられるようにしている。FEL ラインでは FEL と THz の重畳ビームラインが構築されており、FEL と THz の同時測定が可能である。特に THz 測定は超高速検出器を用いるなどで FEL 発振時の THz ミクロパルスの変化測定が可能となってきている。しかし、FEL ラインの THz 測定は大気中で行っているため、測定時に水の吸収の影響を受ける問題が発生していた。そこで PXR ラインを参考に、新たにグローブボックスを構築することとした。これまでの測定時の作業効率を考慮して、サンプル交換や測定器の入れ替えなどがスムーズにできるように、グローブボックスの開放が最小になるようにするなど工夫した。本発表では、FEL ラインでの THz 光源開発とその測定系等に関して報告を行う。

2. LEBRA テラヘルツ波光源

日本大学 LEBRA では、KEK との共同研究により、100 MeV の電子線形加速器の高度化を進め、赤外 FEL とパラメトリック X 線放射の光源開発とその共同利用研究

[#] sakai.takeshi@nihon-u.ac.jp

を行っている。各ビームラインでは、THz 光源開発も進めており、THz 帯域のコヒーレントエッジ放射 (CER) をメインに共同利用に用いている[1-3]。その他、新たな THz 光源開発として、チェレンコフ放射、遷移放射、遷移放射光渦光源開発も精力的に進めている。それぞれのビームラインには、THz の重畳光学系を構築し、実験室へ輸送して利用実験に用いている。特に FEL ラインの THz-CER 輸送系には全反射凹面ミラーと穴あき凹面ミラーの 2 枚ミラー構成とし、FEL ビームの回折損失なしに、アンジュレター内の光共振器内から取出しが可能であり、FEL と THz-CER の同時測定に成功するなど成果を上げている[2, 3]。同時測定が可能となったことから、THz 及び、FEL 用の GHz 帯域での高速検出可能な測定系の構築を進めている。THz-CER の試験計測を始めており、FEL 発振時のミクロパルスからの THz-CER 測定が可能となった。Figure 1-(a)に FEL ラインから取り出し、重畳輸送した THz 波のマクロパルス全体の波形の様子を示す。また、Fig. 1-(b)にマクロパルス波形の前半付近の 1 ミクロパルスに対する測定例を示す。この波形は、約 350 ps (加速周波数 2856 MHz)の間隔で取り出される電子ビームを高速グリッドパルスで 64 分周し、22.4 ns の間隔に間引いたバーストモード運転時に発生させた THz-CER を高速検出器により測定した波形例である。用いている電子銃システムでは、高速グリッドパルス幅は半値幅で約 600 ps あり、移相器を用いたタイミング調整による 1 バンチまたは 2 バンチ加速運転が可能である[4]。1 バンチモード運転の場合、両隣のバンチがサテライトビームとして加速されており、THz 波形も電子ビームのバンチ構造に対応した波高の違う 3 つのミクロパルス波形が観測されている。後述する THz と FEL の測定系構築中のため、詳細な測定はまだ行えてはいないが、加速位相

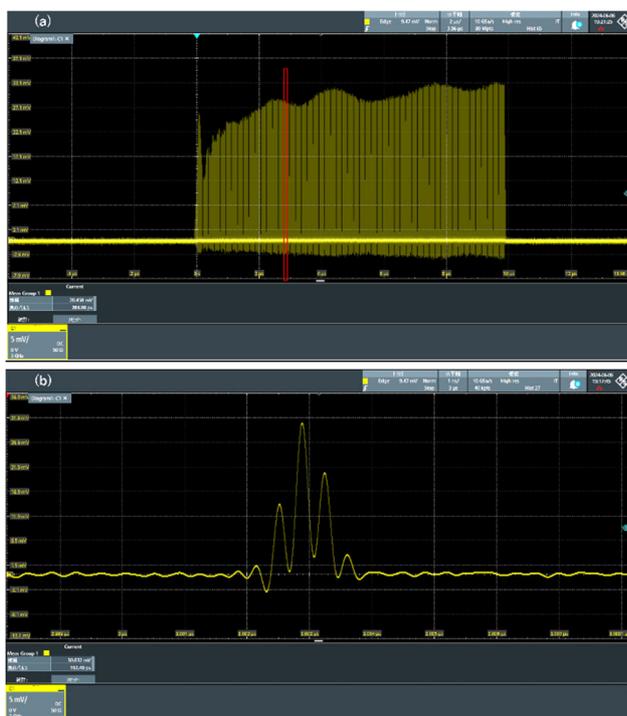


Figure 1: (a) Overview of the entire macropulse of the THz radiation in the combined transport line. (b) Example of a single micropulse observed in the leading part of the macropulse (corresponding to the red box in (a)).

などの調整を行いながら、マクロパルス波形の各時間別におけるマイクロパルスの測定を行うと、マクロパルスの前半から後半にわたり、マイクロパルスの構造が一定ではなく、時間によって強度が変化することが分かってきている。今後は加速器の調整と電子ビームのバンチ変化、FELの発振状態や発振強度、発振波長の変化、THz波の出力波形構造の関連性を見るため、同時複合測定を行う予定である。

これまで FEL ラインの測定系には、PXR ラインで導入しているような超乾燥空気環境システムが設置されていなかったため、空気中の水蒸気吸収の影響で、取り出した THz 波の強度が低下するなどの問題が生じていた。そこで、PXR ビームラインでのユーザー利用実験で構築した、グローブボックスを改良した超乾燥空気環境システム[5-12]の経験を応用することとした。

従来の PXR ライン測定系では、サンプル交換や光学系のアライメント修正などの作業時に、ボックス上面全体を取り外して開放する必要があり、低湿状態へ復帰するのに時間を要するという課題があった。また、開閉時に光学系をずらしてしまい、再度アライメントが必要となる場合もあった。

そこで FEL ラインに新規構築中の測定系では、アズワン製の一般的なグローブボックスを改良して製作した。アライメントやサンプル交換時にボックス上面全体を開放せず、両サイドのパネルを簡易的に取り外せる構造とした。またこのパネルにはパッキンを取付けており、気密性を十分維持できる構造としている。作業時に全開放せずに対応でき、アライメント後やサンプル交換後には短時間で低湿度環境へ戻すことが可能となった。Figure 2 に

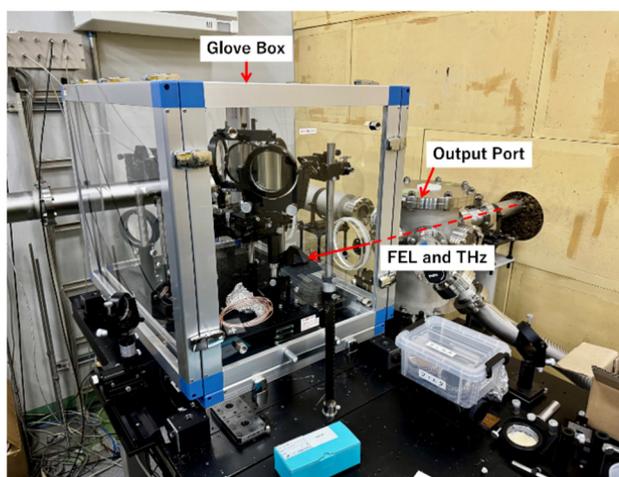


Figure 2: Glove box under construction on the FEL beamline for measurements in an ultra-low humidity environment.

構築中の新しい測定系を示す。奥側には加速器本体室から輸送される FEL および THz 波の導入ポートがあり、直ちに乾燥空気ボックスへ取り込めるように設計されている。ボックス内のおおよそのサイズは、高さ 600 mm、幅 665 mm、奥行き 420 mm となっており、FEL の測定系、THz 用の干渉計等をまとめて設置できる空間を確保している。乾燥空気は横側の面に取付けたポートから導入できるようにしてあり、測定中は常時乾燥空気を導入しながら測定を行える構造としている。乾燥空気の発生装置には CKD 製のヒートレスエアドライヤを用いており、PXR ラインの測定系と共有している。

今後は、FEL 発振時のマクロパルス全体にわたる THz-CER のマイクロパルスごとの出力変化や、THz・FEL のスペクトル、発振強度など複合的計測への応用を目指し、ps オーダーでの測定を可能にするための整備を進める。具体的には、既存の検波器に加えて、高速応答が可能な検出器の導入を検討している。候補としては、FEMTO 社製超高速フォトレシーバー HSA-X-S、TeraSense 社製 Ultrafast THz 検出器、Virginia Diodes 社製ゼロバイアスショットキーダイオード検出器 WR1.5ZBD (0.5 - 0.75 THz)、雄島試作研究所製ホーンアンテナ、浜松ホトニクス製 THz イメージングインテンシファイア C17198、THz PMT モジュールなどがあり、試験測定を行いながら選定、導入を進めている。

3. まとめ

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、THz 帯域のコヒーレントエッジ放射、遷移放射、コヒーレントチェレンコフ放射、遷移放射渦光源の開発と共同利用を進めている。FEL ラインには FEL と THz 波の重畳輸送系を構築しており、FEL と CER の同時測定が可能となっている。この重畳輸送系を用いることで、FEL 発振を維持しつつ、THz エッジ放射によるマクロパルス全体にわたるマイクロパルスごとの時間発展の計測を進めている。そのために、PXR ラインで構築した超乾燥空気環境グローブボックスの経験を活かし、改良型の乾燥空気置換観測系を整備中である。

今後は、本測定系を用いてスリッページの短い近赤外超放射 FEL 発振時の CER 観測を目指し、THz および FEL 用の高速応答検出器を導入しながら、発振時のマクロパルス内の時間変化、スペクトル、発振強度などを対象とした複合計測応用を検討していく予定である。

謝辞

本研究開発の一部は JSPS 科研費 16H03912、JP19H04406、21K12539、23H03671、24K21543 の助成及び、公益財団法人 JKA の競輪の補助を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] T. Sakai, “Development and application of electron linac at LEBRA in Nihon University”, 放射光, May 2021 Vol.34 No.3, pp.153-162.
- [2] N. Sei *et al.*, “Observation of terahertz coherent edge radiation amplified by infrared free-electron laser oscillations. Sci Rep 11, 3433 (2021).
- [3] T. Sakai *et al.*, “日本大学電子線利用研究施設におけるコヒーレントエッジ放射の光源開発”, 日本赤外線学会誌, 2022, 31, 2, pp.76-83.
- [4] K. Nakao *et al.*, “LASING OF FEL WITH THE BURST MODE BEAM AT LEBRA NIHON UNIVERSITY”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan), pp.1051-1053.
- [5] H. Kinoshita *et al.*, “Repeatability Evaluation of Medicine Absorption Peaks Using Terahertz Waves at LEBRA”, presented at ICEE2022, Seoul, Korea, Jun-Jul. 2022, 4-0492.
- [6] R. Yamazoe *et al.*, “Study on absorption reduction and absorption correction of water vapor in terahertz wave spectroscopy”, in Proceedings of Technical Meeting on Perception Information, IM21-033, IEE Japan (61-80), pp. 47-52, Dec. 2021.
- [7] T. Sakai *et al.*, “Development of terahertz sources at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2024, Yamagata, pp.912-914.
- [8] T. Sakai *et al.*, “Research and development of coherent terahertz sources at LEBRA linac, Nihon University”, 32nd Linear Accelerator Conference (LINAC2024), Chicago, IL, USA, pp.611-614.
- [9] Takeshi Sakai *et al.*, “Development and Application of Coherent Terahertz Sources at LEBRA, Nihon University”, The 33rd (FY2024) Annual Meeting of the Japan Society of Infrared Science and Technology, OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, October 10-11, 2024, pp.108-109.
- [10] 谷野麻糸, 大谷昭仁, “テラヘルツ波分光法を用いた高精度湿度測定に関する基礎測定”, 電気学会 令和6年度基礎・材料・共通部門大会, 2-P2-17.
- [11] 境 武志 他, “LEBRA におけるコヒーレントテラヘルツ光源と応用利用”, 第 38 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, (11P-08).
- [12] 住山 智基 他, “高精度光学湿度計測の実現に向けたテラヘルツ帯水蒸気吸収スペクトルの測定”, 2024 年度日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設ユーザーズミーティング, (p-14).