

# 日本大学 LEBRA 電子線形加速器を用いた高強度テラヘルツ光源の研究開発 RESEARCH AND DEVELOPMENT OF HIGH-POWER TERAHERTZ SOURCES AT LEBRA-LINAC IN NIHON UNIVERSITY

境 武志<sup>#, A)</sup>, 清 紀弘<sup>B)</sup>, 早川恭史<sup>A)</sup>, 住友洋介<sup>C)</sup>, 早川 建<sup>A)</sup>, 田中俊成<sup>A)</sup>,  
野上杏子<sup>A)</sup>, 高橋由美子<sup>A)</sup>, 長瀬 敦<sup>D)</sup>

Takeshi Sakai<sup>#, A)</sup>, Norihiro Sei<sup>B)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Yoske Sumitomo<sup>C)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>,  
Kyoko Nogami<sup>A)</sup>, Yumiko Takahashi<sup>A)</sup>, Atsushi Nagase<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Laboratory for Electron Beam Research Application (LEBRA), Nihon University

<sup>B)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

<sup>C)</sup> College of Science and Technology (CST), Nihon University

<sup>D)</sup> Graduate School of Science and Technology, Nihon University

## Abstract

Development of an S-band electron linac for the generation of terahertz radiation (THz) has been underway at LEBRA in Nihon University as joint research with KEK and National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). We are developing Coherent Edge Radiation (CER) and Coherent Transition Radiation (CTR) sources in the THz band, and plane-wave Coherent Cherenkov Radiation (CCR) sources. For the THz-CCR source, a change to an artificial crystal-based material and an improved geometry are planned. In addition, the development of a THz-CTR vortex source with a helical CTR target geometry is currently in progress at LEBRA. In this paper, we report on the development of each THz sources and the measurement system for its application.

## 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 LEBRA では、高エネルギー加速器研究機構と産業技術総合研究所 (AIST) との共同研究において、100MeV 電子線型加速器の高度化、各光源開発を行っている。各光源開発では、自由電子レーザー (FEL) とパラメトリック X 線放射 (PXR) の光源開発、テラヘルツ波 (THz) 光源開発を行っており、光源開発と同時に学内外共同利用を進めている[1-11]。FEL ライン、PXR ラインそれぞれで THz 光源開発を進めており、2019 年度から THz 帯のコヒーレントエッジ放射 (CER) 光源開発、コヒーレント遷移放射 (CTR) 光源開発に加え、平面波コヒーレントチェレンコフ放射 (CCR) 源開発を行っている。CCR 光源には形状を工夫した中空円錐管を用いており、各基礎測定に取り組んでいる。基礎測定の結果、製作していた中空円錐管や光学系に問題があり、形状改良等を行っている。CCR 光源部上部には、CTR ターゲットの形状をらせん状にした THz 帯域の CTR 光渦光源開発を進めている。本発表では、これら各 THz 光源開発、応用利用等に関して報告する。

## 2. LEBRA における THz 光源開発

日本大学 LEBRA では、ビーム電流 200 mA (フルバンチモード) または約 2 A (バーストモード)、繰り返し 2~5 Hz、ビームパルス幅 5~20  $\mu$ s の電子ビームを利用実験に応じて加速エネルギー 40~100 MeV の間で用いている。加速された電子ビームは、FEL ビームラインまたは、PXR ビームラインに送られる[1-4]。各ビームラインで THz 光源開発を進め、FEL ラインでは、アンジュレーターを通

過した電子ビームのバンチから放射される THz 光を用いたバンチ長評価利用、FEL 制御を目指して、FEL アンジュレーター下流の偏向電磁石から発生した THz-CER を用いている。このラインでは、FEL と THz を同時に測定可能にするために、穴あきミラーを設置した輸送光学系を構築し、FEL と THz の同時測定に成功している[12]。

## 3. PXR ラインの THz 光源と応用利用

### 3.1 THz 輸送ライン

LEBRA の PXR ビームラインでは、導体薄膜へ高エネルギー電子ビームを当て発生させた THz-CTR、偏向電磁石で発生する THz-CER 光源の開発を行っており、加えて 2019 年度から THz-CCR 光源の開発も始めている [10-12]。THz 輸送ラインにはトロイダルミラー (曲率半径: 水平面 2.179 m、垂直面 2.032 m) を採用し、取出し口での THz-CER のビームプロファイルを調整している。Figure 1 に PXR ビームラインと THz 輸送光学系の外観

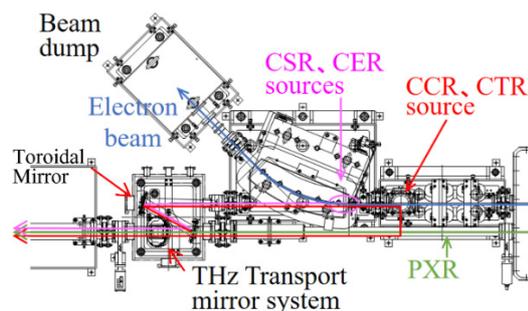


Figure 1: PXR-Beam line and the THz transport line.

<sup>#</sup> sakai.takeshi@nihon-u.ac.jp

図を示す。THz の応用利用のため、干渉計、イメージング測定用の計測器はグローブボックスを改造した測定系内に構築し、さらに超乾燥空気システムを導入することで、空気中の水の吸収による影響を受けにくい低湿度環境下で測定が可能である[13]。

### 3.2 PXR ライン THz 光源の応用利用測定系

THz 測定系のグローブボックスと取出口の間はアクリルパイプで接続し、輸送経路中も乾燥空気で満たせる構造としている。干渉計、イメージング測定系のステージなどはすべてグローブボックス内へ設置し、低湿度環境下での測定を可能としている。サンプル交換時など大気開放から低湿状態へは数分で復帰可能となっている。また本測定系では相対湿度 1%程度まで湿度を抑えられる。

PXR ラインの THz-CER を用いた応用利用は、学内外の共同研究に利用しており、利用研究として主に薬剤等の結晶多形の評価のためのテスト、生体標本サンプルイメージング、リグノセルロースの構造解析など多分野にわたり用いられている。薬剤等の結晶多形の評価を目標に、ファモチジン、イブプロフェンなどをサンプルとして測定テストを実施中である。またサンプル作製には新たに Fig. 2 に示すような卓上打錠機を導入し、薬剤等の照射サンプルのサイズ、形の安定化、作製時の圧力を容易にコントロール可能としている。



Figure 2: Tabletop tablet press for sample preparation.

### 3.3 輸送ライン及び、測定系トラブル

先に述べたように、THz 輸送ラインにはトロイダルミラーを用いている。しかしこのミラーの表面の加工時に製作過程でついでしまったヘアライン加工の影響で表面に問題があることが分かった。このミラー表面のヘアライン加工により、光学系のアライメント時にレーザーが一部散乱してしまい、測定系のアライメント作業に影響が出てスムーズに行えない問題が発生している。ただし THz 輸送時には強度低下や波面への影響が無いと、現状はそのまま利用を行っている。しかしアライメント作業に影響があることから、光学系の構築に時間がかかることなどから年度内に再加工と入れ替えを検討している。

測定系では、乾燥空気システムを導入することで、水

の吸収による影響を改善し、利用できる周波数帯域は 0.1 ~ 4 THz 弱まで広がっていたが[14]、加速ビームの調整及び測定系に用いている光学系のアンテナ等の問題から測定によっては、2.5~4 THz の帯域で強度が低下していた。そこで測定対象によってはアンテナの考慮、ビームの運転調整などの検討を予定している。

## 4. THz 光源の新規開発

2021 年度から、PXR ラインの CTR 発生に用いているチェンバー一部を改良し、テラヘルツ波領域の CCR 光源開発を進めている[15]。この光源は、東北大学電子光物理学研究センターの t-ACTS で開発されている非破壊ビーム位置モニターと同様な形状の中空管構造を採用し[16]、THz 帯域で吸収を無視できる高抵抗 Si を中空円錐管状に加工した光源となっている。基礎測定実施の結果、本中空管を用いた光源からの CCR の発生と実験室までの輸送は確認できたが、輸送されてきている THz-CCR の強度が低いことが判明した。この原因としては、取出し面の円錐管底面で位相をそろえ、発生した THz-CCR の広がりや考慮し、抑えることができる形状にしていたことと、輸送光学系に用いているトロイダルミラーによる影響などが原因に挙げられた。またそれに加え、中空管に対する電子ビームによる損傷を考慮し、中空部分の穴径をビーム径に対して大きく取っていたことも影響していると考えられた。そこで、取出し円錐管底面の形状変更及び、中空部分の穴径をこれまでの半分へ変更し、中空円錐管の再作製を行った。なおこれまでのビーム調整から、電子ビームの径は  $\phi 1$  mm 弱であることが確認できており、PXR ビームライン上に設置している OTR のビームモニターシステムを併用することで、中空円錐管の中心を通すことが十分可能なため、ターゲットの損傷による問題は少ないと考えている。素材に関しては、THz 帯域で透明である必要があり、さらに入手性等を考慮し、高抵抗 Si から人工水晶へ切り替えを行った。改良前の高抵抗 Si 製中空円錐管と新たに作製した人工水晶製中空円錐管を Fig. 3 に示す。この新たに作製した人工水晶製中空円錐管ターゲットへの交換を予定しており、THz-CCR に関してさらなる基礎測定を進める予定である。

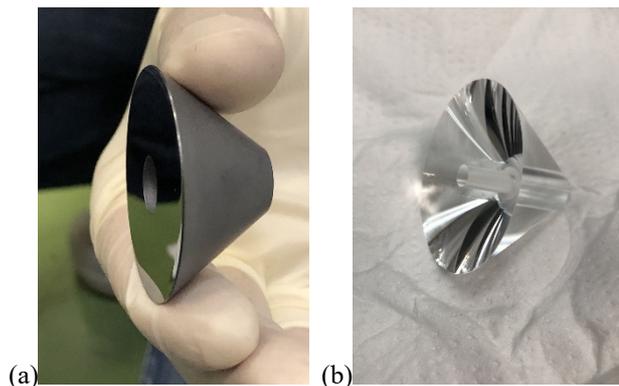


Figure 3: Coherent Cherenkov Radiation (CCR) source target. (a) High-Resistivity Silicon hollow circular truncated cone. (b) Artificial Quartz Crystal hollow circular truncated cone.

THz-CCR 光源に加え、この CCR 光源の上部に設置している CTR ターゲット部分を改良し、らせん構造の導体ターゲットを用いた THz-CTR の光渦光源開発を進めている。ターゲットのイメージ図を Fig. 4 に示す。この CTR 光渦は、加速器ベースで発生させる光源であるため、マイクロパルスあたりの強度が高いといった特徴がある。この光源のターゲット製作を進めており、さらにメカニカルシャッターを応用、改良した厚さ方向が可変なターゲット構造でも検討している。

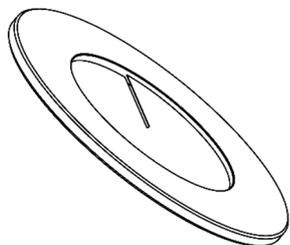


Figure 4: Conceptual diagram of THz-CTR THz vortex beam target.

## 5. まとめ

日本大学 LEBRA では THz 帯域の CER, CTR 及び、CCR 光源の開発及び共同利用を行っている。THz の応用利用のための測定系では、測定時の水蒸気吸収の影響を抑えるためにグローブボックスと超乾燥空気発生システムを導入し超低湿環境下での測定が可能となっている。加えて、サンプル作成には打錠機を新たに導入し、薬剤等の照射サンプルのサイズ、形の安定化、圧力の調整が容易となった。輸送光学系では、輸送用トロイダルミラー表面の加工時のヘアラインの影響で光学系のレーザーアライメント実施時に問題が生じており、トロイダルミラーを再加工、入れ替えを予定している。また THz-CER の利用可能周波数帯域の一部がビーム調整及び光学系のアンテナ等の問題から低下しており、ビーム調整と光学系の改良を予定している。新たな THz 光源として、THz-CCR 及び、THz-CTR の光渦光源のためのらせん構造のターゲットの製作検討及び、厚さ方向可変ターゲットを検討中である。しかし、高抵抗 Si 中空円錐管を用いた CCR 光源では発生は確認できたが、強度が低いことが分かった。この原因としては、発生源の形状、輸送光学系に問題があり、あらたに人工水晶を用いた中空円錐管で取出し面、中空部分の内径などを改良した光源を作製しており、交換及びテストを行う予定である。

## 謝辞

本研究開発の一部は JSPS 科研費 16H03912、JP19H04406、21K12539 の助成を受けて行いました。

## 参考文献

- [1] T. Sakai, "Development and application of electron linac at LEBRA in Nihon University", 放射光, Vol.34 No.3, pp.153-162, May 2021.
- [2] Y. Hayakawa and Y. Takahashi, "Diffraction-enhanced imaging and elemental imaging based on K-edge subtraction as applications of a parametric X-ray source driven by an

- electron linac", 放射光, Vol.33 No.2, pp.87-94, March 2020.
- [3] Y. Hayakawa *et al.*, "First lasing of LEBRA FEL at Nihon University at a wavelength of 1.5  $\mu\text{m}$ ", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 483 29, 2002.
- [4] K. Nogami *et al.*, "Status of electron linac operation and light sources at LEBRA in Nihon University", Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Oct. 18-21, 2022, paper TWP007, this meeting.
- [5] T. Sakai *et al.*, "Evaluation of Bunch Length by Measuring Coherent Synchrotron Radiation with a Narrow-Band Detector at LEBRA", Condens. Matter, Vol. 5, No. 2, 34, 2020;  
doi:10.3390/condmat5020034
- [6] N. Sei *et al.*, "Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA", J. Phys. D, vol. 46, p. 045104, 2013.
- [7] Y. Hayakawa *et al.*, "X-ray imaging using a tunable coherent X-ray source based on parametric X-ray radiation";  
doi:10.1088/1748-0221/8/08/C08001
- [8] N. Sei *et al.*, "Characteristics of Transported Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiation at LEBRA", Proceedings of FEL2014, Basel, Switzerland, Aug. 2014, pp.541-544.
- [9] T. Sakai *et al.*, "Development of coherent edge radiation source at FEL beam line in LEBRA", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2019, Kyoto, Japan, pp.465-467.
- [10] Y. Hayakawa *et al.*, "Project on the superposition of beamlines for parametric X-ray radiation and coherent transition radiation in the THz region at LEBRA", J. Phys. Conf. Ser. Vol. 732, p. 012013, 2016.
- [11] N. Sei *et al.*, "Millijoule terahertz coherent transition radiation at LEBRA", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 56, p. 032401 2017.
- [12] 境武志, 他, "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, Vol. 31, No. 2, pp.76-83, 2022.
- [13] T. Sakai *et al.*, "Research and Development of Terahertz Sources at LEBRA-PXR Beam Line in Nihon University", Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, Japan, Aug. 9 - 12, 2021, pp.568-571.
- [14] T. Sakai *et al.*, "Development of coherent edge radiation source at LEBRA in Nihon University", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online Japan, Sep. 2 - 4, 2020, pp.629-632.
- [15] N. Sei *et al.*, "First demonstration of coherent Cherenkov radiation matched to circular plane wave", Sci. Rep., Vol. 7(1), p. 17440, 12 Dec. 2017.
- [16] K. Nanbu *et al.*, "DEVELOPMENT OF BEAM MONITOR UTILIZING CHERENKOV RADIATION", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Sep. 2 - 4, 2020, Online, pp.482-484.