

## 日本大学 LEBRA における高強度 THz 波光源の開発

### RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE HIGH POWER THz LIGHT SOURCES AT LEBRA IN NIHON UNIVERSITY

境 武志<sup>#, A)</sup>, 田中俊成<sup>A)</sup>, 早川恭史<sup>A)</sup>, 住友洋介<sup>A)</sup>, 早川 建<sup>A)</sup>, 野上杏子<sup>A)</sup>,  
清 紀弘<sup>B)</sup>, 小川博嗣<sup>B)</sup>

Takeshi Sakai<sup>#, A)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Yoske Sumitomo<sup>A)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Kyoko Nogami<sup>A)</sup>,  
Norihiro Sei<sup>B)</sup>, Hiroshi Ogawa<sup>B)</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)

#### Abstract

Research of a high performance electron linac for the generation of FEL and PXR has been continued at the LEBRA of Nihon University as a joint research with the KEK. In addition, a development of THz light source has been underway at Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) at Nihon University in collaboration with National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) since 2011. Basic research on coherent transition radiation (CTR) in the THz region has been carried out using the Parametric X-ray Radiation (PXR)-beam line of LEBRA. Since fiscal year 2016, the new THz transport line has been constructed on the same axis as the PXR beam-line. Basic measurement and intensity upgrading tests has been carried out for the THz-CTR and THz-CER lights generated on the PXR-generating electron beam line. In 2016, the new superposition transport system of the THz lights to the PXR beam-line was installed in a multi-purpose vacuum chamber. The fundamental experiment of THz lights was performed at the experiment bench of the PXR output port. The average intensity of the THz-CTR lights obtained at the output port in the accelerator room has been 5 mW. However, the average intensity of the THz-CTR transported to the experimental bench of the PXR output port was less than one-tenth. On the other hand, the average intensity of THz-CER was reached to 1 mW at the PXR output-port. From the results obtained in these measurements, it was estimated that there was a problem with the mirror used in the CER-THz transport system. Construction of the new THz transport beam-line and the property of the THz lights is discussed in the report.

#### 1. はじめに

日本大学量子科学研究所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電子線形加速器の高度化を進めているが、2011 年度からは独立行政法人産業技術総合研究所との共同研究として、THz 光源の開発を行っている。これまでに既存の FEL ビームライン偏向電磁石で発生させた THz 光の基礎測定、応用利用を進めてきたが、2013 年度からはパラメトリック X 線放射 (PXR) のビームラインにおいて THz 領域のコヒーレント遷移放射 (CTR)、偏向電磁石からのエッジ放射 (CER) 等の基礎測定を行っている。2016 年には、ユーザー利用を想定し、管理区域内の常時立入可能な実験室へ輸送する光学系を製作し、PXR ビームラインに設置し、輸送試験を始めた。設置した輸送機構を用いて実験室へ輸送された THz-CER 光の出力パワーは実験室の光学ベンチにおいて 1 mW を達成している。この結果から THz-CER の輸送系はほぼ問題ないことが確認できており、ユーザー利用も試験的に始めている。しかし、THz-CTR の輸送に関しては、発生源近傍ではマクロパルス(5  $\mu$ s)当り 1 mJ が得られていたが、輸送途中で大きく減衰が発生していることがわかり、光学系の確認、改良等を行っている。本発表では構築した THz 輸送光学系と各 THz 光の測定結果に関して報告する。

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

#### 2. LEBRA 線形加速器と光源

日本大学 LEBRA のリニアックは主に 100 kV DC 電子

Table 1: Specifications of the LEBRA 125 MeV Electron Linac and Light Sources

Maximum Energy	100	MeV
DC gun voltage	-100	kV
Accelerating RF frequency	2856	MHz
Klystron peak RF power	30	MW
Macropulse duration	5~20	$\mu$ s
Repetition rate	2~12.5	pps
Macropulse beam current	200	mA
Energy spread (FWHM)	0.5~1	%
FEL wavelength*	0.4~6	$\mu$ m
PXR energy (Si(111), Si(220), Diamond)	4~60	keV
THz wavelength	0.1~2	THz
THz Power	~1	mJ

\* 0.4~1.3  $\mu$ m: results obtained by nonlinear optical crystal

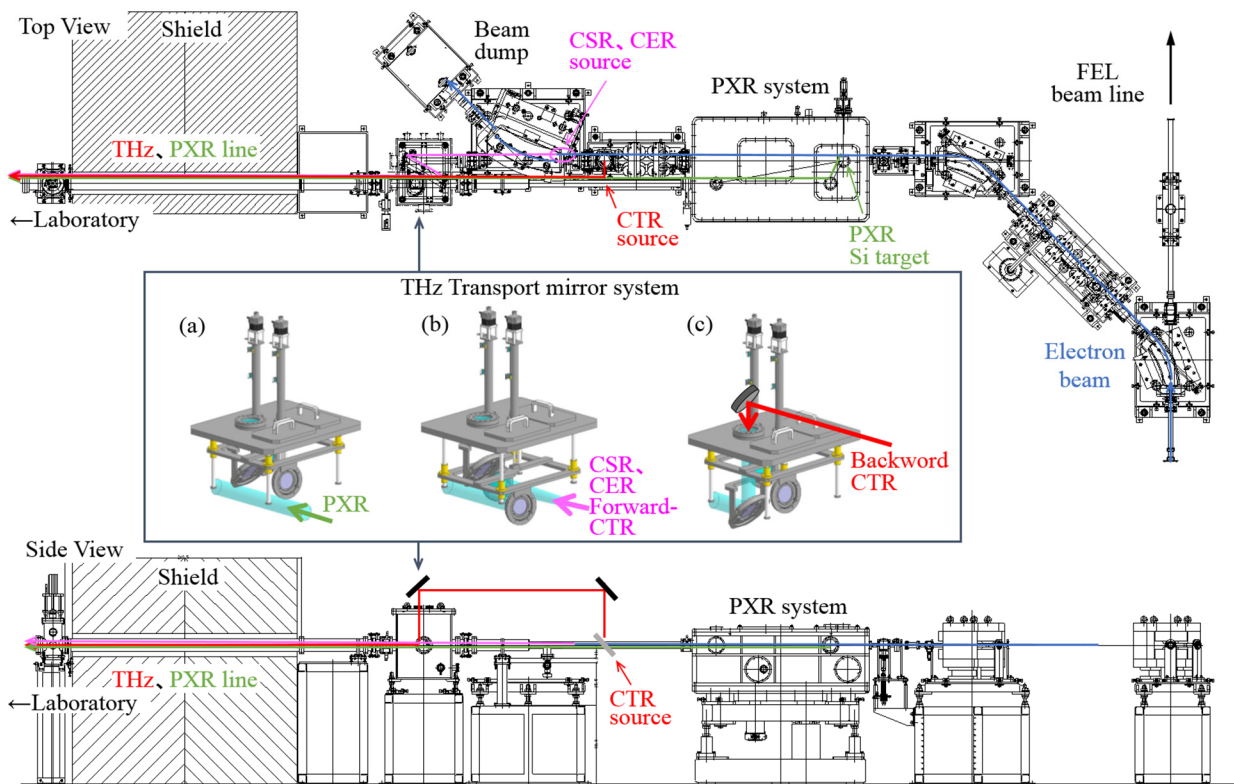


Figure 1: Top view and side view of the LEBRA-PXR beam-line and the THz transport optical system. (a): PXR transport mode. (b): CER-THz, CSR and Forward CTR transport mode. (c): Backward CTR transport mode.

銃、バンチャー、4 m の S バンド加速管 3 本から構成されており、ビーム電流 200 mA、繰り返し最大 12.5 Hz、ビームパルス幅 5~20  $\mu$ s で運転されている。加速した電子ビームは FEL ビームライン、もしくはパラメトリック X 線放射 (PXR) 発生用ビームラインに送られる。各光源の実績としては、FEL は非線形結晶を用いた高調波の発生方式を導入しており、0.4~6  $\mu$ m の波長領域で利用実験に用いられている[1-3]。また、PXR は Si(111)、Si(220)、ダイヤモンド結晶を用いることで 4~60 keV までの領域をカバーしている[3,4]。また 2011 年からは FEL ラインでの THz 光源の開発が産総研との共同研究で行われている[5]。FEL ラインでの THz 光源は隠蔽金属の非破壊イメージングや生物系のイメージングに用いられている[6,7]。また、FEL ラインでの THz 光源の基礎測定などを踏まえて、2016 年からは PXR ラインを用いたより高強度な THz 光源開発を進めてきた。Table 1 に日本大学 LEBRA 加速器の仕様及び、各光源パラメータを示す。

### 3. THz光源

#### 3.1 PXRビームライン THz光源開発

FEL ラインでの THz 光源の基礎測定などを踏まえ、PXR ライン上にて高強度 THz光源の開発を 2016 年から本格的に開始した。この THz光源としては主に、導体薄膜へ高エネルギー電子ビームを当てて発生させた高強度 THz-CTR 光源及び、PXR ライン偏向電磁石で発生した THz-CER 光源の開発を行っている。THz-CTR 光源には、PXR ビームライン上のビームプロファイルモニター

用に設置されていた上下駆動機構が BPM 導入後使用されていなかったため再利用し、厚さ 50  $\mu$ m、寸法 80 mm $\times$ 60 mm のチタン箱を固定し、初期テストのための発生源とした。THz-CTR 光源ターゲットは、電子ビーム軸に対して 45 度の角度で固定している。ターゲット後方に発生した THz-CTR 光は真空窓を介して、大気側に取り出される構造となっている。取り出し真空窓には、 $\phi$  100 mm、厚さ 5.5 mm の結晶石英窓(藤アイデック株式会社製[8])を用いており、CTR 取り出し時の出力低下が少ないようにしている。CTR のエネルギー測定には、テラヘルツ波長領域で校正されているパワーセンサー(Ophir 3A-P-THz[9])を使用して実施した。THz-CTR の平均出力は、光源点付近で 0.1~2.0 THz の周波数範囲において、約 1 mJ(電子ビームエネルギー:100 MeV、マクロパルス幅:4.5  $\mu$ s、繰り返し:5 pps、電荷量:23 pC)が得られている[10,11]。

#### 3.2 PXRビームライン THz輸送システム

3.1 節で述べたように、強度の強い THz 光を得ることができたが、発生点は加速器本体室側であるために、ユーザー実験などで利用したい場合、光学系の設定調整など放射線管理区域内で行うことになり、使い勝手が悪く、応用利用実験の妨げとなっていた。そこで、この測定結果に基づいて、常時立ち入り可能、アクセス自由な実験室へ THz 光を搬送するために光学ミラー系を製作、設置を行った。Figure 1 に LEBRA-PXR ビームラインと新しく製作した THz 輸送光学システムの外観図及び、各輸送モード時の輸送路を示す。PXR はリニアックから 2 つ

の 45 度偏向電磁石を介して輸送された電子ビームを Si 単結晶ターゲットに照射することによって生成され、ターゲット結晶と同じ結晶面の第 2 結晶を用いて、実験室へ輸送される[3,4]。THz の輸送光学系は、PXR ビームラインの下流側の多目的真空チャンバーに設置した。主用途である PXR ビーム輸送の妨げにならない事に加え、PXR ビームライン下流部ビームダンプ前の偏向電磁石で発生した THz-CER および THz-CSR 光、ターゲットで発生させた前方 THz-CTR、後方 THz-CTR を搬送するために、この搬送システムは目的に応じて切り替えることができ、それぞれのモードからの切り替えは数秒で可能である。チャンバー上部の後方 THz-CTR 導入用のビューポートには、発生源付近と同様に結晶石英窓を用いている。また、将来的には、この輸送系に用いている PXR ビームライン上にかかる各光学ミラーに薄いベリリウムミラー、もしくはアルミ蒸着されたマイラーなどを用いることで、THz 光と X 線の同時輸送可能な特徴有るビームラインの構築を目指している。

### 3.3 後方 THz-CTR と THz-CER 輸送

設置した THz 光の輸送系光学系を用い、THz-CER 光輸送モードで常時立ち入り可能な実験室への輸送テストを行った。電子ビーム条件としては、加速電子ビームエネルギー: 100 MeV、ビーム電流: 75 mA、マクロパルス幅: 5  $\mu$ s、繰り返し: 5 pps で行った。パワー測定には Ophir 3A-P-THz を使用し、測定の結果、平均パワーとして 1 mW が得られた。また取り出しポート横に干渉計を構築し、周波数測定を行った。Figure 2 にスペクトル波形を示す。測定に用いた干渉計とその周囲には、覆いをかぶせ、空気の流れなどを極力少なくはしているが、大気中の水蒸気除去対策を行っていないため、水の吸収による影響が見えている。また室温等の影響による周期的な変動も若干見られたが、モニター信号も同時測定しているため、ある程度は抑えられている。これらの影響を受けてはいるが、観測された波長範囲としては、0.1~2.0 THz 弱であった。測定結果から、平均パワーが 1 mW、波長範囲も 2 THz 付近まで得られていることから、試験的にユーザー利用実験を開始している。これまでに薬剤及び、生体サンプルでの測定を行っており、今後も増やしていく予定である。また上で述べたように、現在の測定系では、室温変化、大気中水蒸気等の影響を抑える必要があり、乾燥空気で置換された測定ケースを設置予定である。

後方 THz-CTR 輸送系のテストに関しては、Ti 箔ターゲットを固定治具に強く押さえつけて固定する方式を採用していたため、固定時にターゲットに歪みが生じてしまい、またビーム照射を繰り返すうちにさらに歪みが大きくなってしまった。そのため、THz 光発生点における波面が乱れ、輸送効率が低下し、輸送途中で強度が 1 割以下に減衰する問題が生じた。そこで、CTR 用の Ti 箔ターゲットから、PXR ターゲット結晶に用いる Si 結晶板 ( $\phi$ 76 mm, t0.2 mm) に Al を 10  $\mu$ m スパッタ成膜したターゲットへ交換した。また、交換後は、ターゲット面精度が向上し、アライメントが容易になった。交換設置後のターゲットの様子を Figure 3 に示す。ターゲットは

歪まないように薄い板で挟み込み軽く抑え、治具に軽く置いた状態で、ターゲット上部を薄い板で軽く押さえる方式へ変更した。ターゲット交換後、再度後方 THz-CTR 輸送試験を行ったが、交換後も輸送率の大きな改善はみられなかった。再度ミラー系の確認、スペクトル測定などを行い確認したところ、輸送ライン中の真空槽内に設置されている輸送用ミラーで減衰している事が示唆されたため、交換及び、再測定を予定している。

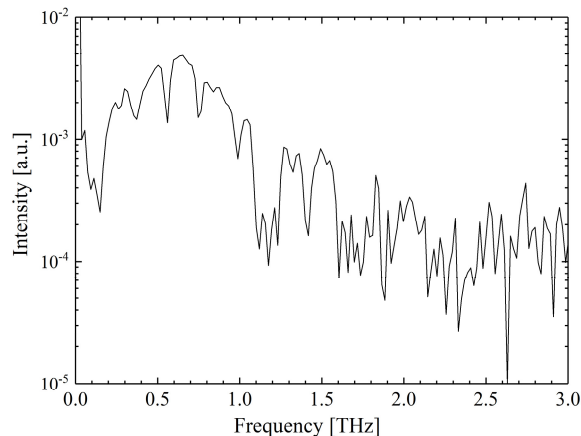


Figure 2: The spectrum of THz-CER. The output power of 1 mW (Beam energy: 100 MeV, Macropulse beam current: 75 mA, macropulse duration: 5  $\mu$ s, repetition rate: 5 pps) and a spectrum at a peak of 0.5 THz up to around 2.0 THz.

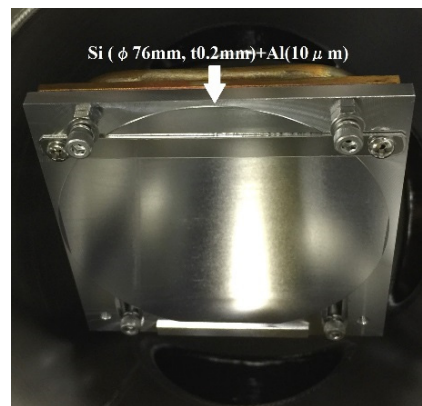


Figure 3: The new target of a silicon wafer ( $\phi$ 76 mm, t0.2 mm) has been formed by sputter deposition with a thickness of 10  $\mu$ m aluminium.

## 4.まとめ

産総研との共同研究として、PXR ライン上に導体薄膜へ電子ビームを当てて発生させた、高強度な THz-CTR 光源開発や偏向電磁石で発生した THz-CER 光源開発とその応用利用を進めている。光源点付近での後方 THz-CTR 強度は、波長範囲 0.1~2 THz において 1 mJ に達しており、応用利用研究を広げるため、常時立入可能実験室へ輸送する光学系を構築し、PXR ビームラインを妨げないように駆動機構を製作し設置した。この光学

系では、PXR ライン偏向電磁石で発生させた THz-CER 光も輸送可能とし、将来的には各 THz 光と X 線の同時照射可能な特徴あるビームラインを目指している。

THz-CER 輸送系では、常時立ち入り実験室での取出しポート付近で、波長範囲 0.1~2 THz、平均パワー1 mW を達成した。現状では出力強度に、室温、大気中水蒸気等の変動や吸収の影響が有るが、薬剤、生体サンプルなどのスペクトル測定など試験的にユーザー利用実験を開始している。ただし、後方 THz-CTR 輸送系では、輸送効率が悪く、発生源付近強度の 1 割程度であることが判明した。原因として、発生源のターゲット歪み、輸送部の面精度の影響があり、Si 板(φ76 mm、t0.2 mm)に Al スパッタ成膜(10 μm)したターゲットへ交換したが、交換後も大きくは改善しておらず、真空槽内設置の輸送ミラーの一部で大きく減衰している可能性があり、今度交換を計画している。ミラー交換に合わせて、室温、大気中水蒸気等の影響を抑えるため、乾燥空気測定箱などの設置も検討しており、後方 THz-CTR の輸送率の向上、本格的な THz 光源のユーザー利用実験拡大を計画している。

## 謝辞

本研究開発の一部は JSPS 科研費 JP16H03912 及び、JP16K17539 の助成を受けて行いました。

## 参考文献

- [1] K.Hayakawa *et al.*, “Operation of Near-infrared FEL at Nihon University”, in Proceedings of FEL 2007, Novosibirsk, Russia, pp. 114-117.
- [2] Y. Hayakawa *et al.*, “First lasing of LEBRA FEL at Nihon University at a wavelength of 1.5 μm”, 2002 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 483 29.
- [3] Y.Hayakawa *et al.*, “Dependence of PXR beam performance on the operation of the pulsed electron linac”, NIMB, Vol 266, Issue 17, 2008, pp. 3758-3769.
- [4] K. Nogami *et al.*, “STATUS OF ELECTRON LINAC AND LIGHT SOURCE AT LEBRA IN NIHON UNIVERSITY”, in these proceedings.
- [5] N. Sei *et al.*, “Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA”, J. Phys. D, 46 (2013) 045104.
- [6] 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.
- [7] N. Sei *et al.*, “Characteristics of Transported Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiation at LEBRA”, in Proceedings of FEL2014, Basel, Switzerland, (2014) pp. 541-544.
- [8] Fuji Ideck, Inc.; <http://www.fuji-ideck.co.jp/>
- [9] Ophir Optronics Solutions Ltd.; <http://www.ophiropt.com/laser--measurement/laser-power-energy-meters/products/Laser-Thermal-Power-Sensors/High-Sensitivity-Thermal-Laser-Sensors/3A-P-THz>
- [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”, Journal of Physics: Conference Series 732 (2016) 012013.
- [11] N. Sei *et al.*, “Millijoule terahertz coherent transition radiation at LEBRA”, Jpn. J. Appl. Phys. 56, 032401 (2017).