

# 日大LEBRAにおけるX線-THz重畳ビームラインの概念設計 CONCEPT DESIGN OF A THz BEAMLINE SUPERIMPOSED ON AN X-RAY BEAMLINE AT LEBRA

早川 恭史<sup>\*A)</sup>, 早川 建<sup>A)</sup>, 稲垣 学<sup>A)</sup>, 中尾 圭佐<sup>A)</sup>, 野上 杏子<sup>A)</sup>, 境 武士<sup>A)</sup>, 清 紀弘<sup>B)</sup>, 田中 俊成<sup>A)</sup>  
Yasushi Hayakawa<sup>\*A)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Manabu Inagaki<sup>A)</sup>, Keisuke Nakao<sup>A)</sup>, Kyoko Nogami<sup>A)</sup>,  
Takeshi Sakai<sup>A)</sup>, Norihiro Sei<sup>B)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University,  
Narashinodai 7-24-1, Funabashi 274-8501, Japan

<sup>B)</sup>Research Institute of Instrumentation Frontier, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,  
Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan

## Abstract

The new project of a THz-wave light source is in progress at the parametric X-ray (PXR) beamline of the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Nihon University. The THz-wave source is based on coherent transition radiation (CTR) emitted from a metal foil inserted downstream of a crystal target that is the radiator of PXR. According to preliminary experiments for CTR production, it is suggested that the most optimized electron beam from the LEBRA linac can provide sufficient photon yield to carry out THz-wave imaging. At present, however, the THz-wave beam emitted from the CTR target can not be transported to the measurement system located at the experiment hall where radiation safety is guaranteed. Thus, we have a plan to alter the PXR beamline for the transport of the THz-wave beam.

## 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA: Laboratory for Electron Beam Research and Application) では近赤外自由電子レーザー (FEL: free electron laser) を皮切りに、125 MeV 電子リニアックを用いた光源開発を行ってきた<sup>[1]</sup>。特に、パラメトリック X 線放射 (PXR: parametric X-ray radiation) を原理とした X 線源はユニークで、2015 年現在、専用ビームラインによる常設 PXR 線源を運用する施設は世界でも本施設のみである<sup>[2,3,4,5]</sup>。これらに加え、THz 領域の周波数を持つ光源の開発に着手した。これは、LEBRA の電子リニアックが FEL 用として開発され、偏向電磁石での磁気バンチング効果により 1 ps 程度の長さの電子バンチをビームラインに供給可能であることから、0.1~数 THz の領域でコヒーレント放射の効果による強度の増強が期待できるためである。まずは、FEL ビームラインの偏向電磁石で発生するコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR: coherent synchrotron radiation) の基礎研究から開始し、今では FEL 輸送用の光ビームラインを使って加速器本体室から常時立入可能な実験室への取り出しが可能となっている。この THz 波ビームを用いた、イメージング実験などの利用研究が予備的ではあるが開始されている<sup>[6,7]</sup>。

PXR ビームラインで X 線の供給を行う場合、通常は電子ビームのエネルギー広がりが小さい方が望ましいため、電子のバンチ長は 3 ps 以上と見積もられる。しかしながら、PXR ビームラインのビーム光学系の設計は FEL ビームラインに準拠しており、FEL 発振の条件と同様な電子ビームを通すことが可能である。バンチ長を短くするためにエネルギー広がりを大きくすると、偏向部に設置されたスリットでのビームロスが増加し、PXR 発生

部に供給されるビーム電流は通常の条件の 70 %程度となってしまうが、PXR の強度は電子ビームの電荷量に対して線形であるため、この程度のビーム電流の減少ならば、X 線の強度も実用性を失うまでには至らないと思われる。したがって、PXR ビームラインでもコヒーレント放射に起因する大強度 THz 波の発生が可能であり、しかも PXR の発生との料率も期待できる。こうしたことから、THz 波を常時立入可能な実験室へ取り出せるように PXR ビームラインを改造することにし、その検討を開始した。

## 2. PXR ビームラインにおける THz 光源

### 2.1 PXR ビームラインの利点

LEBRA の FEL ビームラインにおいては、アンジュレータに使われているネオジウム系の磁石の劣化を防ぐために、アンジュレータ付近での電子ビームロスを最小限にするような運転を行っている。そのため、蛍光板などを用いたプロファイルモニタの類は設置されていない。また、アンジュレータ中の電子ビームの進行方向には FEL 共振器ミラーが設置されているため、前方放射の観測には制約がある。そのため、現在は磁気バンチング途中の 45° 偏向部から THz-CSR を取り出して利用している。一方、PXR ビームラインは PXR を発生させるために電子ビームを結晶ターゲットに照射する前提で建設されていることもあり、FEL ビームラインに比べて制約が少ない。以下に PXR ビームラインの利点を列挙する。

- 薄い軽元素ターゲットを常時挿入して運用することが可能。
- ビームプロファイルモニタ用の駆動機構をターゲット挿入に流用できる。

\*yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

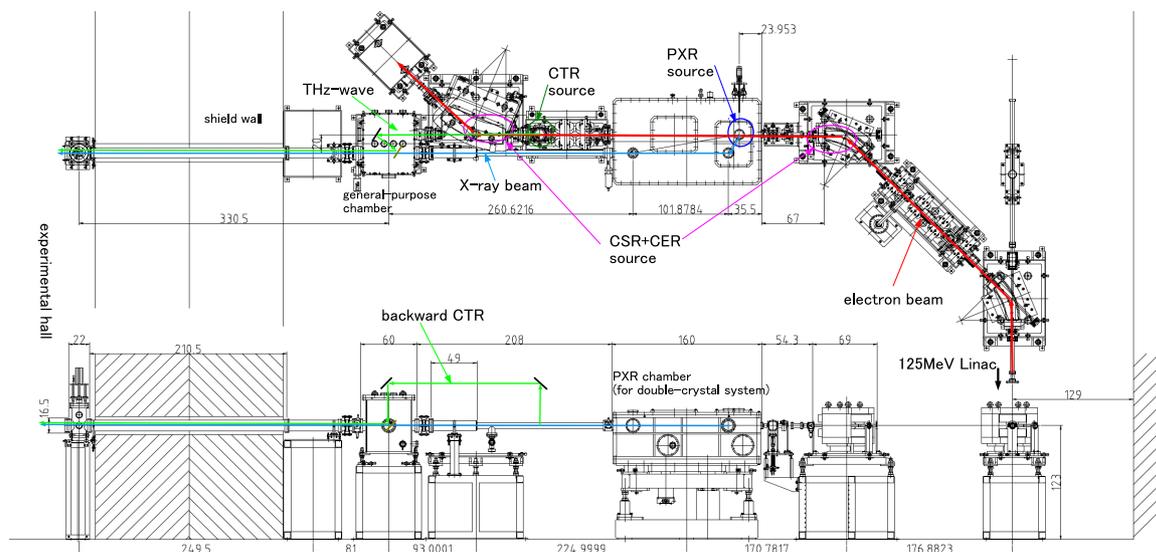


Figure 1: Possible THz-wave sources in the PXR beamline at LEBRA. The THz-wave beam from the CTR and/or the CER sources at the downstream of the PXR source will be merged to the X-ray beam using beryllium mirrors in the general-purpose chamber.

- 90° 磁気バンチング後の前方放射の観測が可能。
- 多目的真空槽が設置されており, 真空中に光学系の追加が可能。
- 光学窓用ビューポートがいくつか設置済み。
- 遮蔽壁を貫通する真空ダクトが内径 75 mm 以上あり, 回折による THz 波の損失を少なくできる。

ただし, ダクトストリーミングで輸送されるバックグラウンド放射線, 特に中性子が FEL ビームラインよりも多いため, 実験ホールで利用実験を実施する際にも試料や検出器へのバックグラウンド放射線の影響を考慮する必要がある。

## 2.2 THz 光源の種類

PXR ビームラインにおいても FEL ビームラインと同様に, 偏向電磁石で THz 領域の CSR およびコヒーレントエッジ放射 (CER: coherent edge radiation) の発生が期待できるが, それに加えて, ビームプロファイルモニタ用の駆動機構を流用して金属薄膜を挿入し, コヒーレント遷移放射 (CTR: coherent transition radiation) の光源とすることが可能である。また, PXR の放射源である Si 単結晶ターゲットも CTR 光源になりうる。Fig. 1 に PXR ビームライン上で THz 波光源になり得る箇所を示す。

上流の偏向電磁石で発生する CSR, CER および PXR 線源上流のターゲットによる CTR の場合, 光源の位置が遮蔽壁の貫通孔から 5 m 程度離れている。回折損失を抑制するには PXR 用のゴニオメータが設置されているチャンバ周辺に光学系を設置して, ビームを平行化する必要がある。しかしながら, PXR 線源の運用に支障の無い形で THz 波の輸送を実現するのはかなり難しい。一方, PXR 線源下流で発生する CER と CTR に対しては,

貫通孔のすぐ上流にある多目的真空槽内に光学系を設置することにより, X 線ビームに重畳しての THz 波ビームの輸送が期待できる。電子ビームに沿った方向では, ターゲットで発生する CTR の前方放射と偏向電磁石で生じる CER と CSR が重なるため, 完全に分離することは困難である。しかしながら, 輸送するには放物面鏡などで平行化する必要があることを考えると, 点光源的な CER, CTR 光源については, 焦点を光源の位置に合わせるによりある程度の選別が可能である。特に CTR は可視光領域遷移放射 (OTR: optical transition radiation) をモニターすることで光源点の位置決めがしやすく, アライメントが容易であると言う面でも光源利用に適していると考えられる。Fig. 2 に, 電子バンチ長が rms で 0.5 ps となる条件で計算された, LEBRA の電子ビームから得られる CSR と CTR の放射スペクトルを示す。ここで, CTR については光源として Ti の薄膜を使うことを想定している。両者を比較すると, THz 領域の広い波長範囲にわたって CTR の方が 1 桁以上強い強度が得られる見込みとなっている。このことから, 金属薄膜ターゲットを用いた CTR が PXR ビームラインにおける THz 光源として最も有望であるといえる。

## 2.3 THz 波の観測

THz 波輸送系の設計に先立ち, PXR ビームラインの THz 光源の特性を調べるために, 各種検出器を用いた THz 波の観測を実施している。CTR の場合, 電子ビームの進行方向の前方への放射だけでなく後方放射も観測される。PXR ビームラインの下流に設置されたプロファイルモニタ機構に金属薄膜を取り付けてターゲットとした場合, CTR 後方放射は上方のビューポートから取り出して観測可能である。このモニタ機構に, 厚さ 50  $\mu\text{m}$  の Ti 薄膜を取り付けて電子ビームを照射し, 発生する CTR のスペクトル測定を行った。Fig. 3 に測定

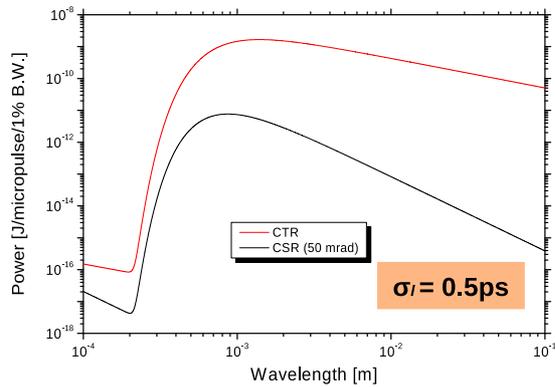
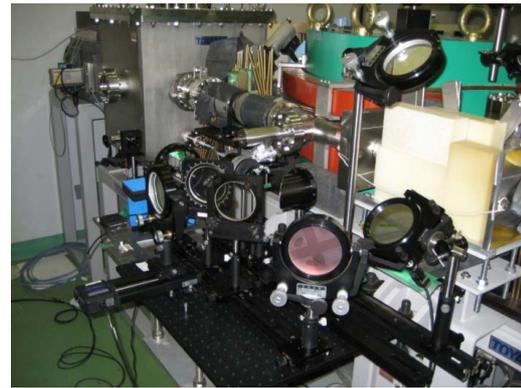


Figure 2: Calculated spectra of CSR and CTR obtained from the electron beam provided by the LEBRA linac when the electron bunch length is 0.5 ps (rms). Here, it is assumed that a Ti foil is used as the CTR source.

に用いた Martin-Puplett 干渉計のセットアップおよび得られたスペクトルを示す。検出器には市販のパイロ型のもの (Gentec-EO 製 THZ5I-MT-USB) を用いた。周波数 0.3 THz あたりに極大をもつが、2 THz 付近までの THz 波が観測されている。

また、Fig. 4 は得られる THz 波強度の電子ビームマクロパルス電荷量に対する依存性をプロットしたものである。LEBRA リニアックの場合、3 本の加速管の間の位相の組み合わせと偏向電磁石によって磁気バンチングを実現しており、電子のエネルギー広がりを少なくして偏向部の透過率を良くすると電子のバンチ長が伸びるのでコヒーレント放射は弱くなる。しかしながら、Fig. 4 の測定結果は、加速管の位相の組み合わせをできるだけ維持しながらビーム電流を調整して得られたものであり、CTR の強度は概ね電荷量の 2 乗のフィッティング曲線上に乗っている。このことから、観測されている THz 領域の遷移放射にコヒーレント放射の効果が確かに寄与していることがわかる。PXR ビームラインにおいては通常、電子エネルギー 100 MeV、マクロパルス幅 5  $\mu$ s、マクロパルス電流 120 mA、マクロ繰り返し 5 pps という条件で運用している。これは、マクロパルス 1 発で PXR 放射源の Si 結晶ターゲットを破壊するのを防ぐのと、放射線の許可申請の上限の平均電流 5  $\mu$ A 以下を満たすようにするためである [4]。高強度の CTR を得るためには、電子エネルギーについては 100 MeV のままでよいが、FEL の場合と同様に磁気バンチングの効果を強くかける必要がある。その場合、マクロパルス電流は 80 mA 程度が上限となる。PXR の強度は照射される電子ビーム電流に比例するため、THz-CTR と PXR の発生を両立される場合には、PXR の強度は通常の 2/3 程度となる。X 線イメージングなどの際に必要な実時間で照射時間はその分長くなるが、高々ファクター程度の違いであり、マシンタイム内に実用的な測定を実施するのは十分可能であると考えている。



vspace3mm

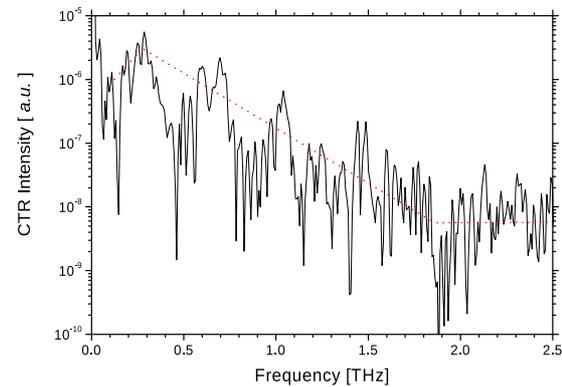


Figure 3: Setup of the Martin-Puplett type interferometer for spectroscopic measurement and the spectrum of THz-CTR actually obtained.

### 3. THz 波の輸送と X 線ビームとの重畳

PXR ビームラインにおいて、遮蔽壁貫通孔を通る真空ダクトには高エネルギー光子のダクトストリーミングを抑制するための直径 75 mm のステンレス製の絞りを挿入してある。THz 波ビームを貫通孔を通して実験ホールに輸送するには、これより十分小さいサイズの平行ビームにするか焦点距離の長い収束ビームに加工してダクトに導く必要がある。THz 波は波長が長く、ダクトに散乱された成分により意図しない干渉縞が発生しやすいことから、光源点に近いところでのビーム整形が必須である。PXR ビームライン最下流の偏向電磁石のすぐ下流に設置されている多目的真空槽の内寸が 570 mm $\times$ 470mm $\times$ 580 mm であるので、THz 波ビーム整形用の光学系を収める余地は十分ある。Fig. 5 は多目的真空槽で PXR ビームに THz 波ビームを重畳する様子を模式的に示した図である。電子ビーム前方に放射される CTR あるいは CER を放物面鏡などを使って平行化し、X 線が透過する平面鏡を用いて両者を重畳するというのが基本的な考え方である。重畳用の平面鏡の材質は、X 線の透過率や剛性などを考慮すると Be が最適である。Be 基板に粒子状の不均一があると、X 線の屈折や小角散乱の効果によって PXR の波面の乱れ、先端的なイメージング実験の妨げとなる恐れもあるので、実際の導入に際しては、材質の選定や検証が重要となる [8]。

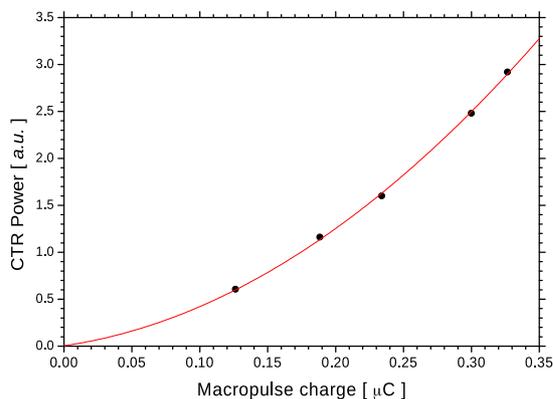


Figure 4: The observed THz power as a function of the charge of the electron macropulse which bombarded the Ti foil target.

CTR は他の相対論的電子の放射現象と同様、基本的には  $1/\gamma$  の角度広がりをもって伝搬するが、波長が長く、光源点となるターゲット上の電子ビームスポットの直径が半値幅で 2 mm 程度となるので、回折による広がりが無視できない。したがって、前方放射の場合は多目的真空槽に到達する前にダクトで散乱されて強度が弱まる可能性がある。CTR の場合は後方放射も発生するので、それを上方のビューポートから取り出し、光学系で平行化してから再び多目的真空槽の上方から THz 波ビームを導入し (Fig. 1), PXR ビームに平面鏡を用いて重畳する、というも可能である。一旦大気中に取り出す場合、途中 2ヶ所で光学窓を透過することになるので、そこでの損失は無視できないが、光源に近いところに集光光学系を設置することが可能でアライメントもし易いという利点がある。こちらのほうが現実的などところもあるので、ミラー機構などを検討している。

前方放射、後方放射のいずれを利用するにしても、PXR 線源の通常の利用においては THz 波重畳用の光学系は退避できるようにする必要がある。コスト面での制約もあり、真空槽は既存のものをそのまま利用し、重畳用光学系の駆動機構を取り付けた天蓋を新たに製作し、既存のものと交換することで実現する予定である。現状、その具体的な設計に着手したところである。

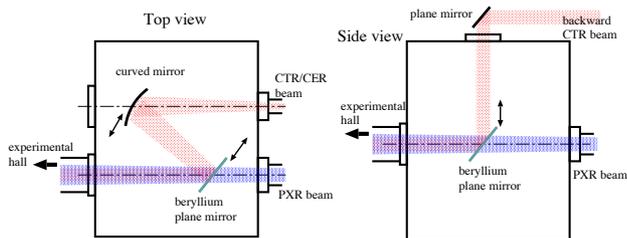


Figure 5: Schematic explanation on the mirror system to superpose the THz-wave beam on the PXR beam at the general-purpose chamber in the PXR beamline.

#### 4. 期待される応用

THz 波の応用としては吸収分光による分子の同定といったものがよく知られているが、LEBRA-FEL ビームラインの THz-CSR に関しては、今までのところイメージング実験が主な応用となっている<sup>[7]</sup>。こうしたことから、PXR ビームラインにおいても当面は THz イメージングが主要な応用になると予想される。Fig. 6 は PXR-CSR 重畳ビームを用いた典型的なイメージング実験の概念図である。Be 基板の平面鏡やアルミ蒸着ポリイミドなどを用いて THz 波のみ反射して向きを変えることができるので、イメージングデバイスを用意すれば、同一試料の X 線透過像と THz 波透過像を同時に取得できる。最近では、高性能な X 線イメージングデバイスを導入することにより、PXR ビームを用いてコンピュータトモグラフィ(CT: computed tomography)による 3 次元断層像測定が現実的なマシンタイム内で実施可能となっている<sup>[9, 10]</sup>。高性能な THz 波カメラを使うことにより、PXR による 3 次元元素マップと THz-CTR による分子状態の 3 次元分布の同時取得が期待できる。

また、PXR を用いた分散型 X 線吸収微細構造 (XAFS: X-ray absorption fine structure) 分析が可能であることから、THz 波をポンプ光としたピコ秒領域の時間分解 XAFS 測定も将来的には有望な応用と考えている<sup>[11]</sup>。

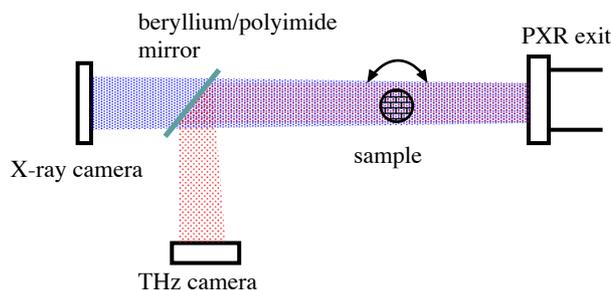


Figure 6: Schematic drawing of THz/X-ray simultaneous imaging experiments using the PXR-CTR superposed beam.

#### 5. まとめと今後の予定

日大 LEBRA では既存の PXR ビームラインにおいて、CTR を放射源とする THz 光源の開発を計画し、常時立入可能な実験ホールへの輸送光路の検討を開始した。1 本の電子ビームで PXR と THz-CTR をで同時に発生させ、それらを重畳して輸送する方針である。重畳ビームを用いた、X 線-THz 波同時照射実験が期待できる。

基礎的な実証実験の段階では CTR 放射源に Ti 箔ターゲットを用いているが、直接的な制動放射の発生および、多重散乱に起因する電子ビーム発散に伴うビーム損失を考慮すると、Be のような Ti よりも原子番号の小さな軽金属を用いる方がバックグラウンド放射線の低減に有利である。また遷移放射の発生についても、発生する電磁波の振動数  $\omega$  が物質のプラズマ振動数  $\omega_p$  に比べて十分小さくなる THz 領域の場合、その発生強度  $N$  には

$$N \propto \left[ \ln \left( 1 + \frac{\omega_p^2 E^2}{\omega^2 m^2 c^2} \right) - 2 \right] \frac{\Delta\omega}{\omega},$$

PASJ2015 THP128

( $m$  と  $E$  はそれぞれ電子の静止質量とエネルギー) という依存性がある<sup>[12]</sup>。対数的ではあるが、ダイヤモンドや Be のような電子密度の高い物質の方が有利であると考えられる。これらの物理的な面とコストや入手性を合わせて考慮すると、Be 箔が現実的なターゲットと考えられる。近日中に、可能な限り薄さと平面性を両立した Be ターゲットを用意し、CTR 放射源として試験する予定である。

参考文献

- [1] Y. Hayakawa et al., Nucl. Instrum. and Meth. A **483** (2002) 29, doi: 10.1016/S0168-9002(02)00281-4.
- [2] Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, Nucl. Instrum. and Meth. B **227** (2005) 32, doi: 10.1016/j.nimb.2004.06.028.
- [3] 早川恭史, 加速器 **6** (2009) 166.
- [4] Y. Hayakawa et al., Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi (2004) 60, [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj1\\_lam29/WebPublish/4B05.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj1_lam29/WebPublish/4B05.pdf)
- [5] Y. Hayakawa et al., J. of Instrumentation **8** (2013) C08001, doi: 10.1088/1748-0221/8/08/C08001.
- [6] N. Sei et al., J. Phys. D **46** (2013) 045104, doi: 10.1088/0022-3727/46/4/045104.
- [7] N. Sei et al., J. Opt. Soc. Am. B **31** (2014) 2150, doi: 10.1364/JOSAB.31.002150.
- [8] S. Goto et al., Proc. SPIE 8139, Advances in X-Ray/EUV Optics and Components VI, 813910 (September 28, 2011), doi: 10.1117/12.894506.
- [9] Y. Hayakawa et al., Nucl. Instrum. and Meth. B **309** (2013) 230, doi: 10.1016/j.nimb.2013.01.025.
- [10] Y. Hayakawa et al., Nucl. Instrum. and Meth. B **355** (2015) 251, doi: 10.1016/j.nimb.2015.03.010.
- [11] M. Inagaki, Y. Hayakawa et al., Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 8081, doi: 10.1143/JJAP.47.8081.
- [12] V. G. Baryshevsky and I. D. Feranchuk, Nucl. Instrum. & Methods **228** (1985) 490.