

日大 LEBRA-PXR ビームラインにおける THz 波-X線ビーム重畳システムの開発 DEVELOPMENT OF THE SYSTEM SUPERPOSING THz-WAVES ONTO AN X-RAY BEAM AT THE LEBRA-PXR BEAMLINE

早川恭史^{*A)}、早川建^{A)}、中尾圭佐^{A)}、野上杏子^{A)}、境武志^{A)}、清紀弘^{B)}、田中俊成^{A)}
Yasushi Hayakawa^{*A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Keisuke Nakao^{A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Kyoko Nogami^{A)}, Takeshi Sakai^{A)},
Norihiro Sei^{B)}, Toshinari Tanaka^{A)}

^{A)}Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University,
Narashinodai 7-24-1, Funabashi 274-8501, Japan

^{B)}Research Institute of Instrumentation Frontier, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,
Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan

Abstract

A new project of a terahertz (THz)-wave light source is in progress at the parametric X-ray (PXR) beamline of the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) at Nihon University. The THz-wave source is based on coherent transition radiation (CTR) emitted from a metal-foil target or coherent edge radiation (CER) generated at the downstream section of the PXR generator. The results of preliminary experiments for CTR production suggested that sufficiently intense THz-CTR can be obtained using the LEBRA linac. In order to realize a THz-wave source for practical application studies, we have a plan to add the extraction device for THz waves to the PXR beamline. The device is designed as a retractive mirror system and its manufacturing has been completed. The device allows users to utilize THz-wave in the experiment hall where radiation safety is guaranteed. Preliminary experiments for the performance test is in progress.

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) は 125 MeV 電子リニアックを用いた光源施設であり、最初の光源として近赤外自由電子レーザー (FEL: free electron laser) の開発に取り組み、2001 年に波長 1.5 Å でのファーストレーディングを達成した [1]。次に、相対論的な荷電粒子と結晶物質の相互作用による X 線放射源であるパラメトリック X 線放射 (PXR: parametric X-ray radiation) を原理とした X 線源を開発した [2, 3]。ともに学内共同利用者を中心に利用実験に光ビームを供給しており、様々な研究成果が得られている [4, 5]。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。元来、LEBRA の電子リニアックは FEL 用として開発され、偏向電磁石セクションでの磁気バンチングにより、1 ps 程度の長さ電子バンチを圧縮可能である。0.1~数 THz の領域でコヒーレント放射の効果による光強度の増強が期待できるため、光源として開発することにした [6]。

THz 波光源開発は日大 LEBRA と産総研 (AIST) の共同研究として行われている。最初に着手したのは、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) の特性研究とその試験的な利用研究である。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せるようにし、イメージング実験などの応用が行われている [7]。しかしながら、FEL 輸送ラインは平行化された近赤外光を運ぶことを想定して作られているため、THz 波に対しては輸送効率が悪

い。実験室に取り出せる THz 波の強度はパルス幅 20 μ s のマクロパルス当たり 100 nJ 程度であるため、イメージング実験などは集光した上で 2 次元スキャンとして実施する必要があった [8]。

一方、PXR ビームラインは X 線を生成するためのターゲットを挿入するのを前提としている。THz 波を生成するために薄膜ターゲットを追加しても、ビームラインの運用に特段の支障を来さない。こうしたことから、PXR 発生部の下流に設置されていたプロファイルモニタ用の蛍光板挿入機構を利用し、金属薄膜ターゲットから発生するコヒーレント遷移放射 (CTR: coherent transition radiation) を THz 波光源として利用する方針で光源開発に着手した。PXR ビームラインの場合、X 線源であるシリコン結晶ターゲットの損傷を防ぐためにマクロパルス幅 5 μ s で運用しているが、その条件でチタン箔に電子ビームを照射して得られる THz 領域の CTR の強度は、加速器本体室での測定でマクロパルス当たりおよそ 1 mJ であった。これを効率良く常時立ち入り可能な実験室に輸送できれば、1 ショットイメージングなど FEL ラインの CSR 光源では実施が困難であった応用が可能となる。PXR 輸送ラインは取り出し窓のところで直径 100 mm まで広がる X 線ビームを輸送できるようになっていることから、X 線ビームラインに THz 波ビームを重畳すれば少ない回折損失で輸送できると考えられる。

このような事情により、PXR ビームに THz 波ビームを重畳して輸送するための機構を PXR ビームラインに追加することとなった [9]。経費を抑えて実現するために、既存の多目的真空槽の天板に光学ミラー挿入機構を取り付ける形で計画を進めた。このミラー駆動系の設計・製作は 2015 年度中に完了し、2016 年度から THz 波

*yahayak@lebra.nohon-u.ac.jp

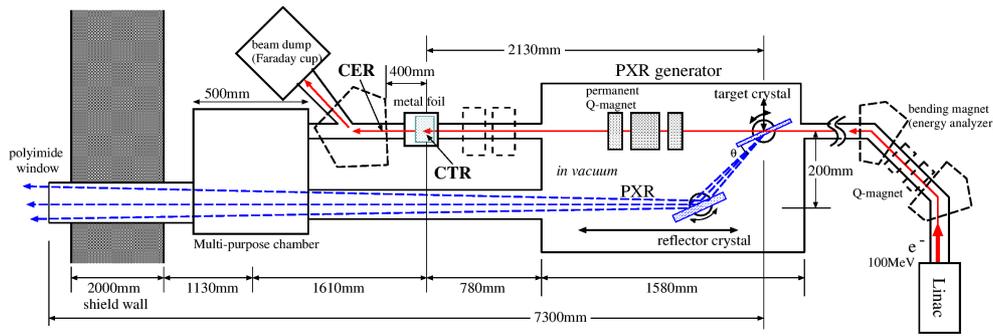


Figure 1: Schematic top view of the LEBRA-PXR beamline. The source points of THz-CER and THz-PXR in the PXR beamline are indicated by arrows.

ビームを常時立入可能な実験室へ取り出して観測する実験を開始している。

2. PXR ビームラインの仕様と THz 波源

LEBRA-PXR ビームラインは FEL ビームラインと平行に設置されており、電子ビームは 90° 偏向部を介して 2 つのビームラインに振り分けられる。Figure 1 に PXR ビームラインの概略図を示すが、PXR 発生源である 2 結晶システムの下流にプロファイルモニタ用の挿入機構がある。これを用いて金属薄膜を挿入することにより、CTR の光源とすることができる。また、その直後にビームダンプへ電子ビームを導くための偏向電磁石があり、その磁場の入口はコヒーレントエッジ放射 (CER: coherent edge radiation) による THz 波光源になり得る [10]。さらに下流の遮蔽壁直前のところに、多目的用途として用意された真空槽が設置されている。この多目的真空槽は内寸が 570 mm×470mm×580 mm であり、挿入・退避機能を備えた装置を設置するのに十分な大きさである。

LEBRA のリニアックおよび PXR ビームラインのパラメータを、Table 1 に示す。PXR の場合、FEL の様に偏向部で強くバンチ圧縮する必要がないため、通常は 3 ps 程度のバンチ長で運転している。しかしながら、FEL 発振の条件と同様の電子ビームを通すことも可能であるため、偏向部でのビームロスの増加と引換えに、コヒーレントな効果による THz 波の増強が期待できる。

PXR ラインにおける THz 波源として、最も実用性が高いと考えられるのが、金属薄膜ターゲットからの CTR である。周波数 ω の遷移放射の強度は、入射電子のエネルギー E とターゲット物質のプラズマ振動数 ω_p に依存する。1 個の電子から線幅 $\Delta\omega$ で放射円錐内に放射される強度 $I(\omega)$ は、

$$I(\omega) = \frac{\alpha}{\pi} \left[\left(1 + \frac{2\omega^2}{\omega_p^2 \gamma^2} \right) \ln \left(1 + \frac{\omega_p^2 \gamma^2}{\omega^2} \right) - 2 \right] \frac{\Delta\omega}{\omega}, \quad (1)$$

となる [11]。ここで $\gamma = E/mc^2$ (m : 電子の静止質量) であり、 c と α はそれぞれ光速と微細構造定数である。ここで、 N 個の電子が進行方向に波長と同程度の長さのバンチを形成している場合、CTR の強度 $I_C(\omega)$ は、

$$I_C(\omega) = N [1 + (N - 1) f(\omega)] I(\omega). \quad (2)$$

Table 1: Typical Parameters of the Linac and the PXR Source of LEBRA

electron energy	100 MeV (typ.)
accelerating frequency	2856 MHz (S-band)
macropulse beam current	70 – 135 mA (typ.)
macropulse duration	4 – 5 μ s (typ.)
macropulse repetition rate	5 pps
average beam current	1 – 3.5 μ A
electron bunch length	1 – 3 ps (rms)
electron bunch charge	25 – 47 pC
electron beam size	0.5 – 2 mm in dia. (FWHM)
PXR energy range	
Si(111) target:	4.0 – 20.5 keV
Si(220) target:	6.5 – 34 keV
irradiation field @X-ray exit	100 mm in diameter
total X-ray photon rate	$\sim 10^7$ /s @ 17.5 keV

となる。ここで、 $f(\omega)$ はバンチの進行方向の形状因子であり、

$$f(\omega) = \left| \int F(z) e^{i\frac{\omega}{c}z} dz \right|^2, \quad (3)$$

($F(z)$: バンチの進行方向の規格化された分布) と定義される [12, 13]。式 (1) によると THz 領域ではプラズマ周波数が高い物質の方が放射強度の面で有利であるが、熱的な耐久性や電子ビームロスの問題を考慮すると、チタンやベリリウムの薄膜が適していると思われる。当面、チタン箔で予備実験を行いながらベリリウム箔の準備を進めることにした。

金属箔ターゲットを電子ビームに対して 45° 傾けて挿入する場合、CTR は電子の進行方向に沿った方向 (前方放射) と、電子ビームラインに垂直な方向 (後方放射) に放射が起こる。CTR の後方放射は、光学窓を取り付けた光源直近のビューポートから大気中に取り出すことができる。偏向電磁石入口で発生する CER にも前方放射と、その逆向きの後方放射があるが、後方放射を取り出すことができる窓はかなり遠方になってしまうため、実用的な光源として用いるのは難しい。したがって、CTR の前方および後方放射、CER 前方放射が現実的に

取り出し可能な THz 波源と考えられる。

3. THz波-PXR 重畳システムの開発

PXR ビームラインの主用途は X 線ビームを用いた利用研究であるため、THz 波の輸送系には X 線の実験を妨げないことが要求される。そのため、THz 波輸送用のミラーは退避可能にし、X 線の透過率の良い材質を用いたミラーを使って THz 波ビームを PXR ビームに重畳できるようにする方針で設計を進めた。THz 波の放射方向として CTR および CER の前方放射と CTR 後方放射の 2 方向あるので、どちらの方向の放射も取り出し可能にするために、2 系統のミラー系を切り替え可能とすることも要件とした [14]。幸い、PXR ビームライン下流の多目的真空槽には十分な深さがあることから、真空槽天板内側にミラー系を取り付け、それを大気中のモータから動力を導入して上下動させることにより、退避とビームラインの切り替えを実現することにした。詳細な設計および機器の製作は (株) トヤマに依頼した。

3.1 THz 波輸送用ミラー系の概要

THz 波輸送用のミラー系は、Fig. 2(a) のように取り付けられる。この機構が多目的真空槽天板として設置され、ミラー系は真空下に置かれる。この図においては水色の円柱は X 線ビームを表しており、THz 波用のミラー系は上方に退避している。この状態は従来の PXR 利用実験を実施していたのと同じ状態である。駆動用のモータは 2 種類のミラー系の各々に用意されており、独立して動作可能となっている。

3.2 前方 CER モード

Figure 2(b) は前方放射用のミラー系を下ろしてビームラインに挿入した場合の図である。THz 波ビームは図中の水色ビームのように輸送される。THz 波ビームを最初に受けるミラーの材質は通常のガラスにアルミコートをしたものでよい。今回、THz 波の広がりを抑制して輸送するために、焦点が THz 波源の付近となる曲率半径 2 m の球面鏡を用いることにした。このミラーの開口は直径 76 mm である。

2 番目のミラーは THz 波の輸送とともに PXR ビームへの重畳の役目を担うものである。X 線が透過する材質である必要があるため、薄いベリリウムの平板を用いることにした。試験的な意味合いもあり、厚さ 0.1 mm の板を用意して使用したが、コスト的な面もあって鏡面仕上げまでできず、表面処理はヘアライン加工止まりとなった。このベリリウムミラーの開口も直径 76 mm である。

このモードで対応する光源は CTR および CER の前方放射であるが、CTR の放射源である金属箔ターゲットは退避可能であるが、CER の光源である偏向電磁石は常時機能し、CTR 前方放射のみを利用する状態にはできない。しかしながら、長波長領域の遷移放射や回折放射にはシャドウ効果と呼ばれる問題があり、上流の光源による遮蔽効果により下流の光源での放射が抑制されるという現象が報告されている [15, 16]。このため、CTR ターゲットを挿入すると、CTR 前方放射の発生と引換えに CER の強度が弱くなる可能性がある。また、CER の方が光源点から球面ミラーまでの距離が近く、CTR 前

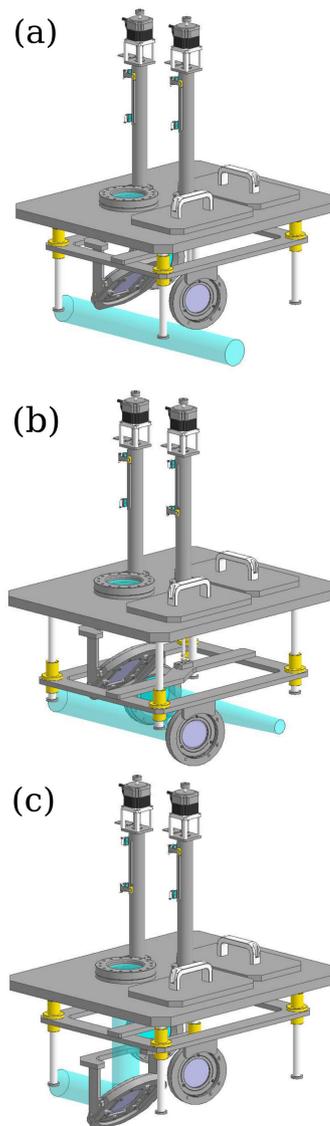


Figure 2: Three-dimensional drawings of the mirror system superposing the THz-wave beam onto the PXR beam; (a) without THz-wave transport; (b) forward CER mode; (c) backward CTR mode.

方放射の方がダクトやチェンバーによる回折損失が大きくなると考えられる。したがって、前方放射に関しては CTR ターゲットを退避した状態で CER を光源と利用した方がより実用的であると思われる。ここでは便宜上、このモードを前方 CER モードと呼ぶことにする。

3.3 後方 CTR モード

CTR の後方放射は、光源の近くにある光学窓から取り出すことが可能で、通常の光学ミラーを用いて大気中を運ぶことができる。この CTR 後方放射を再び多目的真空槽天板の光学窓を介して真空中に導入し、PXR ビームに重畳して輸送する状態が Fig. 2(c) である。このモードを後方 CTR モードと呼ぶことにする。真空中で用いるミラーは 1 枚だけであり、PXR ビームとの重畳のため、これも厚さ 0.1 mm のベリリウム板を用意した。このミ

ラーの開口は矩形となっており、寸法は 76 mm×116 mm である。

後方 CTR モードの場合、大気中で曲面ミラーを用いたビーム整形や平面ミラーによる方向の調整が可能であるため、前方 CER モードに比べて自由度が高い。光学窓での損失を考慮しても、THz 波光源として主力となるものと期待している。大気中の THz 波ビーム輸送を模式的に表したのが Fig. 3 である。

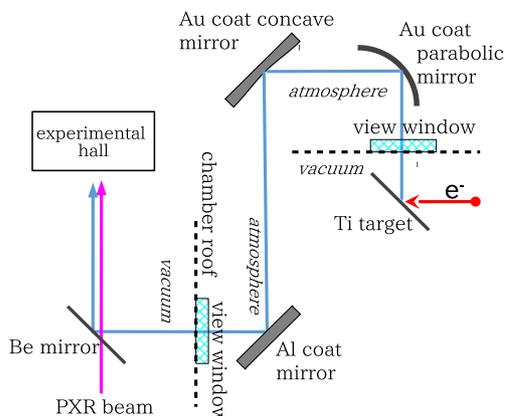


Figure 3: Schematic explanation of the transport of the backward CTR beam which is temporarily extracted to the atmosphere and reenters the vacuum via the chamber roof.

4. 試験的な運用と問題点

今回製作した THz 波ミラー系を実際に PXR ビームラインの多目的真空槽に組み込み、THz 波光源として試験する実験を 2016 年度から開始した。

まずは、今回の機構が PXR の利用実験の障害とならないかの確認を行ったが、退避モードでは特に X 線ビームが欠けるといった問題は見られなかった。次に、THz 波-X 線ビーム重畳用のベリリウムミラーを挿入した場合の影響を調べるために、PXR 発生器の第 2 結晶を角度スキャンしながら実験室の X 線窓直後の PXR 強度を電離箱で測定した。各モードでの所謂ロッキングカーブを比較したのが Fig. 4 である。X 線が透過するベリリウムの実効厚は後方 CTR モードの方が少し厚く、0.14 mm 程度であるが、それによる X 線の減弱は X 線のエネルギーが 20 keV の場合で 0.6 %、7 keV の場合で 4 %程度である。PXR エネルギーが 20 keV の場合、退避モード (黒線) に対して前方 CER モード (青線) には有意な違いは見られなかった。後方 CTR モード (赤線) の場合、バックグラウンドの低減は見られたが、それを差し引いた X 線のピークに違いは認められなかった。バックグラウンドの低減は、ミラーホルダーや駆動機構の位置が偶々バックグラウンド源を遮蔽する位置に来たからと考えられる。7 keV の場合は若干の X 線の減弱は見られたものの傾向としては同様であり、X 線の減弱率も計算による予測と矛盾しないものであった。また、いずれの場合も PXR のビームプロファイルに欠損は見られなかった。以上より、新たに設置した THz 波輸送に PXR ビームの進路を妨害する箇所は無く、THz 波と X 線の同時利用の支障にならないことが確認できた。

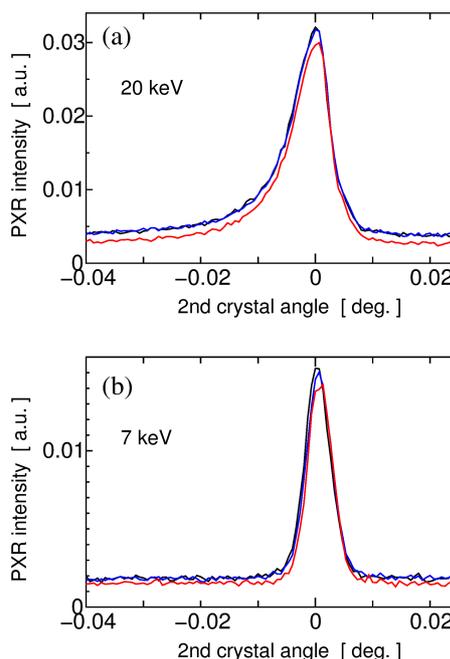


Figure 4: The PXR intensities extracted from the exit window as functions of the 2nd crystal angle of the PXR generator, where the PXR energies are (a) 20 keV and (b) 7 keV, respectively. The black lines show the cases without THz-wave beam. The blue and red lines show the cases of the forward CER mode and the backward CTR mode, respectively.

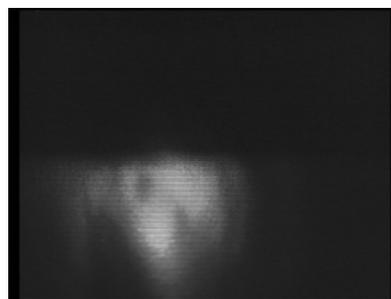


Figure 5: A typical single-shot image of the backward CTR beam profile observed at the experimental hall.

現状では、THz 波ビームは PXR ビームと同様に 2 m の遮蔽壁を通過して、実験室にある X 線窓 (0.125 mm 厚ポリイミド膜) から大気中に取り出す仕様である。ミラー駆動機構に大きな問題はなかったが、用意したベリリウム板の表面が荒く、板の歪みも無視できないものであった。そのためレーザーアライメントの精度も悪く、THz 波の輸送効率も散乱などにより低くなってしまい、実験室で十分な強度が得られなかった。そのため、暫定的にベリリウムミラーを通常の金属コートミラーに置き換えて、実験室での THz 波の観測を試みた。Figure 5 は X 線窓から取り出した後方 CTR ビームを赤外用カメラ (Electrophysics 製 PV320L2) で観測したものである。THz 波源であるチタン箔の平面性が良くないためにプロファイルの形状が歪んでおり、カメラの同期ずれ

の問題もあったが、強度的にはマクロパルス 1 発ずつのイメージが取得できた。THz 波輸送機構の性能については、当初の計画通りのものとなったと考えている。また、前方 CER モードにおいても実験室への THz 波ビームの取り出しを確認した。

5. 今後の課題

試験的な運用では THz 波の常時立ち入り可能な実験室への輸送が確認できた。現在、干渉計を用いたスペクトル測定や、予備的な応用実験の検討などを行っているが、これまでに改善すべきところや更なる検証が必要な点がいくつか明らかになっている。

まず、前述の様にベリリウムミラーの平面性の問題がある。今回は板を薄くするのにこだわりすぎた面があり、解決策として厚さ 0.5 mm 程度のベリリウム板にアルミ蒸着を施したものをミラーに用いる、といったことが考えられる。たわみの問題を解決できれば、アルミを蒸着したポリイミド膜を代替ミラーとすることも考えられる。また、CTR ビームのプロファイルは放射源の金属箔ターゲットの表面状態にも強く依存するため、鏡面仕上げにしたベリリウム板を用意してチタン箔の代わりのターゲットとする予定である。

利用実験のための THz 波源としては自由度の高い後方 CTR モードが有用と考えているが、加速器本体室で大気中を輸送する箇所があるため、1 THz 付近の成分が水蒸気による吸収で大きく減衰してしまう。この周波数領域は応用面で需要が高いと考えられるため、輸送経路や光学系を囲い、乾燥した空気に置換して水蒸気による減衰を抑制する必要がある。

今回の THz 波輸送系の設計思想として重視されたのは PXR 利用実験との両立である。特に THz 波-X 線同時利用を特徴としているので、これに関する実験的な検証が必要である。懸念すべき問題の 1 つが PXR 放射源である結晶ターゲットによるシャドウ効果であり、この効果により 0.1 THz あたりの低周波領域において CTR および CER の発生が抑制される可能性がある。実験的に THz 波-X 線の発生が両立する条件を調べるとともに、低周波領域で問題が生じた場合には PXR ターゲットの形状を工夫するなどの対策をとることになる。

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, Aug. 2004, pp. 60, 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] 清紀弘 他., 日本赤外線学会誌 **25** (2015) 97.
- [7] N. Sei *et al.*, J. Phys. D **46** (2013) 045104, doi: 10.1088/0022-3727/46/4/045104.
- [8] N. Sei *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **31** (2014) 2150, doi: 10.1364/JOSAB.31.002150.
- [9] Y. Hayakawa *et al.*, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 2015, pp. 1370, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP1/THP128.pdf
- [10] G. Andonian, A. Cook *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **12** (2009) 030701.
- [11] V. G. Baryshevsky and I. D. Feranchuk, Nucl. Instrum. & Meth. **228** (1985) 490.
- [12] C. J. Hirschmugl, M. Sagurton and G. P. Williams, Phys. Rev. A **44** (1991) 1316.
- [13] C. Yim, J. Ko, S. Jung *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15** (2012) 030706.
- [14] Y. Hayakawa *et al.*, J. Phys.: Conference Series (to be published).
- [15] X. Artru and C. Ray, Nucl. Instrum. & Meth. B **266** (2008) 3725.
- [16] G. Naumenko, X. Artru, A. Potylitsyn, Y. Popov, L. Sukhikh and M. Shevelev, J. Phys.: Conference Series **236** 012004.