

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：87202

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400304

研究課題名(和文)パラメトリックX線を利用した先端加速器用ビームプロファイルモニタの開発

研究課題名(英文)Development of beam profile monitors for advanced accelerators using parametric X-ray radiation

研究代表者

高林 雄一 (Takabayashi, Yuichi)

公益財団法人佐賀県地域産業支援センター九州シンクロトロン光研究センター・加速器グループ・副主任研究員

研究者番号：50450953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：従来、リニアックの電子ビームの高精度プロファイルモニタとして、可視遷移放射が利用されてきたが、ビームのバンチ長が短い場合、可視遷移放射がコヒーレントになり、プロファイルの測定に利用できないことが判明した。そこで、本研究では、より波長の短いパラメトリックX線等の結晶から発生する放射現象の利用を提案した。

本研究では下記の成果が得られた。(i)フレネルゾーンプレートを用いたビームプロファイルモニタの開発、(ii)回折遷移放射と回折制動放射の寄与の定量的評価、(iii)ダイヤモンド結晶からのパラメトリックX線の角度分布測定、(iv)回折遷移放射を利用した国際リニアコライダー用ビーム診断技術の提案。

研究成果の概要(英文)：Optical transition radiation (OTR) has often been used for beam profile monitoring for electron linacs. Recently, however, it has been found that OTR becomes coherent and thus cannot be used as a profile monitor when the beam bunch is short, for linacs dedicated to X-ray free electron laser operation. To avoid this coherence, shorter wavelength photons are required, and thus we propose to exploit parametric X-ray radiation (PXR).

In this study, the following results were accomplished: (i) We developed a beam profile monitor employing a Fresnel zone plate (FZP) to focus PXR onto an X-ray detector. (ii) We evaluated the contributions of diffracted transition radiation (DTR) and diffracted bremsstrahlung (DB). (iii) PXR angular distributions generated by a diamond crystal were measured using the 255-MeV electron beam at the SAGA-LS linac, which are in good agreement with theory. (iv) We proposed a new beam diagnostic method using DTR for the International Linear Collider.

研究分野：加速器物理，放射線物理

キーワード：パラメトリックX線 相対論的電子ビーム 結晶 ビームモニタ

1. 研究開始当初の背景

ビームのプロファイルは、ビームのエミッタンスや加速器の光学的関数を把握する上で重要であり、その測定は加速器分野において必要不可欠である。従来、リニアックの電子ビームのプロファイル測定には、可視遷移放射 (optical transition radiation: OTR) が利用されてきた。ところが、最近、X線自由電子レーザー用リニアックにおいて、ビームのパンチ長が極端に短いために、OTRがコヒーレントになり、ビームのプロファイル測定に利用できないことが判明した[1]。また、現在計画が進められている国際リニアコライダー (International Linear Collider: ILC) では、ビームサイズが数 nm と極端に小さいために、やはり OTR はコヒーレントになることが考えられる。

コヒーレントになることを避けるには、より波長の短い光を利用する必要がある。そこで、本研究では、パラメトリック X線 (parametric X-ray radiation: PXR) の利用を提案した。PXRとは、高速の電子が結晶に入射した際に、ブラッグ条件を満たす方向に X線が放射される現象である。入射電子のまわっている疑似的光子が、結晶によって回折される現象と解釈することができる。

研究代表者は、PXRを利用した電子ビームのプロファイル測定法として、(i)近接法、(ii)ピンホールカメラ法、(iii)フレネルゾーンプレート (Fresnel zone plate: FZP) 法という3つの手法を提案した。そして、近接法[2]とピンホールカメラ法[3]に関しては、すでに原理の検証実験に成功した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電子ビームと結晶の相互作用によって生じる PXR 等の放射現象を利用した新しいビーム診断技術を開発することである。主に、下記の4項目について研究を行った。

(1) FZP を用いたビームプロファイルモニタの開発

上述したように、近接法とピンホールカメラ法については、すでに原理の検証実験に成功しており、本研究では、残る FZP を用いたビームプロファイルモニタの開発を行う。

(2) 回折遷移放射と回折制動放射の寄与の評価

PXR 以外に、ブラッグ方向に放出される X線として、回折遷移放射 (diffracted transition radiation: DTR) と回折制動放射 (diffracted bremsstrahlung: DB) がある。DTR とは、電子が結晶に入射した際に前方に放射された遷移放射が、その後、結晶によって回折されたものである。また、DB とは、結晶内部で発生した制動放射が結晶によって回折されたものである。実験条件によって DTR と DB の寄与は重要であり、理論計算により、その評価を行った。

(3) ダイヤモンド結晶からの PXR の角度分布測定

ダイヤモンド結晶は、Si 結晶よりも大強度ビームに耐えられると言われている。ただし、一般的に、ダイヤモンド結晶は Si 結晶よりも結晶の質が劣ることが知られている。ダイヤモンド結晶の利用可能性を追求するため、ダイヤモンド結晶からの PXR の角度分布測定を行った。

(4) 回折遷移放射を利用した ILC 用ビーム診断技術の提案

DTR を利用した ILC 用の新しいビーム診断技術を提案した。

3. 研究の方法

(1) FZP を用いたビームプロファイルモニタの開発

図1に、実験装置の概念図を示す。結晶標の上における PXR の像を、FZP を用いて X線検出器上に結像させることにより、ビームのプロファイルを得る手法である。FZP とは、X線の透過帯と不透過帯が同心円状に交互に配置されたものであり、干渉の効果によって、X線を集束する働きがある。 n 番目のゾーンの半径は、 $r_n = \sqrt{nf\lambda}$ と表される。 f は焦点距離、 λ は X線の波長である。FZP の焦点距離は $f = 2r_N \Delta r_N / \lambda$ と表される。 N は全ゾーン数、 Δr_N は最外殻ゾーンの幅である。図1(b)に示した焦点距離 f は、X線のエネルギー 7.1 keV に対する値である。アブソーバーは非回折光 (0次光) を除去するために用いられる。

図1には、FZP を1枚と2枚用いた場合の例を示したが、最初から FZP を2枚用いるのはアライメントが困難であると考え、まず FZP1枚のみを用いて PXR を結像する実験装置を構築した。用いた FZP の直径は 416 μm 、焦点距離は 7.1 keV の X線に対して 205 mm である。

初めに、FZP 等各素子のアライメント法を習得するため、九州シンクロトロン光研究センター (SAGA Light Source: SAGA-LS) の放射光ビームライン BL09 からの X線を利用して実験を行った。図2にセットアップの概念図を示す。アブソーバーとして簡易的に、直

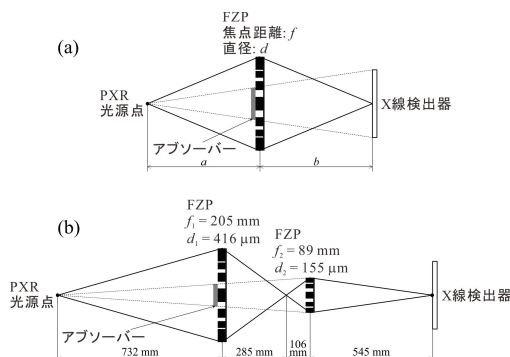


図1: FZP 法の実験装置の概念図。(a)FZP を1枚用いた場合、(b)FZP を2枚用いた場合。

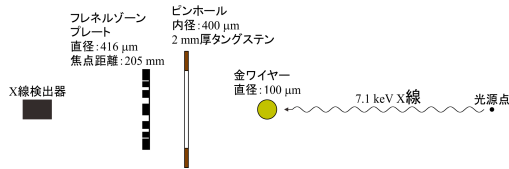


図 2：放射光 X 線を用いた各素子のアライメント（上面図）。

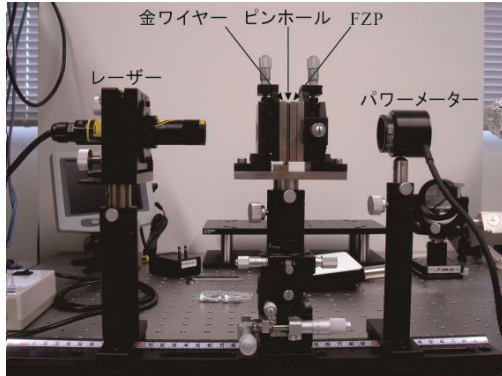


図 3：可視レーザーを用いた各素子のアライメント。

径 100 μm の金ワイヤーを用いることにした [4]。ピンホールは、X 線を FZP だけに入射させるために必要である。X 線検出器として、PIN フォトダイオードを用いた。X 線を利用したアライメント方法は、予想以上に時間がかかることがわかったため、新たな手法として、可視レーザーを用いるアライメント法も考案した。そのセットアップを図 3 に示す。可視レーザーとして波長 635 nm の半導体レーザーを使用した。各素子を透過するレーザーの強度をパワーメーターで測定することにより、アライメントを行った。

(2) 回折遷移放射と回折制動放射の寄与の評価

以前 SAGA-LS で行われた、255 MeV 電子ビームを厚さ 20 μm の Si 結晶に入射させた際に、(220)面によって 32.2°方向に生成された PXR の角度分布の測定結果 [6] とシミュレーション結果の比較を行った。海外共同研究者である Belgorod National Research University の Vnukov 氏らが開発したシミュレーションコード [5] を用いて、DTR と DB の寄与を評価した。

(3) ダイヤモンド結晶からの PXR の角度分布測定

実験装置の概念図を図 4 に示す [7]。実験は、SAGA-LS のリニアックからの 255 MeV 電子ビームを用いて行った。標的として、厚さ 50 μm のダイヤモンド結晶 (type-IIa) を用いた。ダイヤモンド結晶は、真空チェンバー内に設置された 2 軸回転ゴニオメーターに取り付けた。結晶の $\langle 001 \rangle$ 軸は結晶表面に垂直で、(220) 面が鉛直になるように結晶を配置した。発生

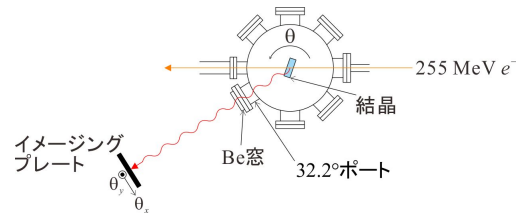


図 4：ダイヤモンド結晶からの PXR の角度分布測定（上面図）。

した X 線は、32.2°方向に設置された厚さ 250 μm のベリリウム窓を通して、大気中へと取り出した。X 線検出器として、イメージングプレートを採用した。イメージングプレートは、面積が大きい、強度のリニアリティが高い、位置分解能が高いなどの特長があり、高精度な X 線の角度分布測定を可能とする [6]。

(4) 回折遷移放射を利用した ILC 用ビーム診断技術の提案

本研究にも、上述した Vnukov 氏らが開発したシミュレーションコードを用いて、DTR の角度分布の計算を行い、DTR を利用した ILC 用の新しいビーム診断技術を提案した [8]。

4. 研究成果

(1) FZP を用いたビームプロファイルモニタの開発

FZP、ピンホール、アブソーバーのアライメント実験の測定例を図 5 に示す。実験は、SAGA-LS の放射光ビームライン BL09 において行った。FZP の位置に対して、ピンホールとアブソーバーの位置をスキャンし、透過 X 線の強度を測定した。予想通り、FZP に対してピンホールの位置が合ったところで、透過 X 線の強度が増加する様子が観測された。また、アブソーバー（金ワイヤー）の位置が合ったところでは、透過 X 線の強度が減少する様子が観測された。

このように、放射光 X 線を用いて各素子をアライメントできることがわかったが、測定に相当の時間を要することが判明した。また、放射光利用のビームタイムも限られているため、簡便なアライメント法として、可視レーザーを利用する手法も考案した。可視レーザーを用いた場合も、図 5 と同様の結果が得られることがわかった。可視レーザーを用いることにより、アライメントの時間を大幅に短縮することに成功した。

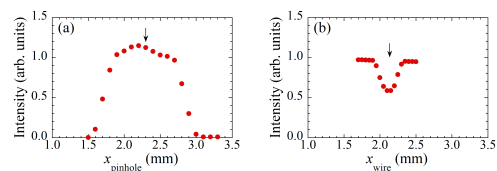


図 5：放射光 X 線を用いたアライメント結果。(a) ピンホールの x 方向位置スキャン、(b) アブソーバー（ワイヤー）の x 方向位置スキャン。

次に、この実験装置を SAGA-LS のリニアック室に持ち込んで、実際に PXR を用いて実験を行う予定であったが、ビームタイムの関係で、そこまでには至らなかった。実験装置の構築はすでに完了しているので、今後実験を継続する予定である。

(2) 回折遷移放射と回折制動放射の寄与の評価

以前、SAGA-LS において測定した PXR の角度分布を図 6 に示す[6]。標的は厚さ 20 μm の Si 結晶、回折面は(220)面であったが、それ以外の条件は図 4 の実験と同様である。ブラッグ方向が 0° 方向に対応する。図 7 に PXR, DTR, DB の角度分布の計算結果を示す。なお、この計算には、ビームの角度拡がりは考慮されているが、ビームの大きさは考慮されていない。 0° 付近では、DTR と DB の寄与が無視できないことがわかった。図 8 に測定結果と計算結果の比較を示す。計算結果には、DTR と DB の寄与が含まれている。測定結果と計算結果はよく一致することが確認された。

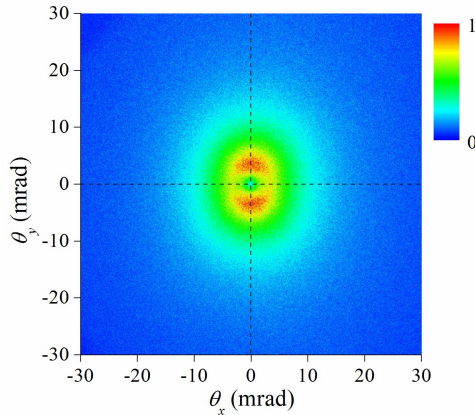


図 6 : Si 結晶からの PXR の角度分布。

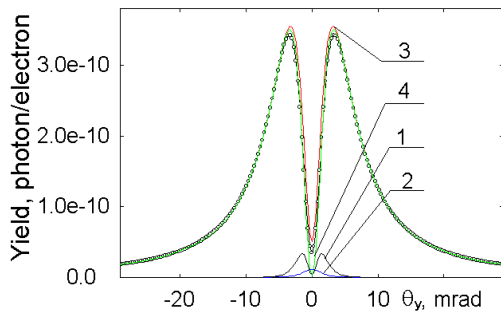


図 7 : Si 結晶からブラッグ方向に放出される X 線の角度分布の計算結果。丸印: PXR, 1: DTR, 2: DB, 3: PXR + DTR + DB, 4: ビームの角度拡がりを無視した場合の PXR。

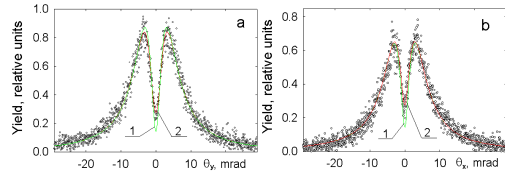


図 8 : X 線の角度分布の測定結果と計算結果の比較。(a) y 方向 (鉛直方向), (b) x 方向 (水平方向)。1 の緑線: ビームの大きさを考慮していない計算結果, 2 の赤線: ビームの大きさを考慮した計算結果。

(3) ダイヤモンド結晶からの PXR の角度分布測定

図 9(a) に PXR の角度分布の測定結果を示す[7]。この図では、バックグラウンドの強度は引かれていない。Si 結晶の場合と同様、コーン状の角度分布が観測された。図 9(b) には、電子ビームの大きさ・角度拡がりを畳み込んだ計算結果 $I^{\text{conv}}(\theta_x, \theta_y)$ を示したが、測定結果をよく再現していた。

図 9 の点線で示した位置における鉛直方向 (y 方向) の角度分布を図 10 に示す。この図では、バックグラウンドを差し引いた。図 10 の矢印は、下記の式で表される PXR の特徴的な角度拡がり θ_{PXR} を表す。

$$\theta_{\text{PXR}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\hbar\omega_p}{\hbar\omega}\right)^2} \quad (1)$$

γ はローレンツ因子, $\hbar\omega$ は X 線のエネルギー, $\hbar\omega_p$ は結晶のプラズマエネルギーである。角度分布のピーク位置は、矢印の位置とよく一致していた。

PXR の角度分布の計算値と測定値を比較するため、下記のフィット式を用いた。

$$I_{\text{calc}}(\theta_x = 0, \theta_y) = F \cdot I(\theta_x = 0, \theta_y) + I_{\text{BG}} \quad (2)$$

$$I_{\text{calc}}^{\text{conv}}(\theta_x = 0, \theta_y) = F \cdot I^{\text{conv}}(\theta_x = 0, \theta_y) + I_{\text{BG}} \quad (3)$$

$I(\theta_x, \theta_y)$ はビームの大きさ・角度拡がりを畳み込んでいない計算値, $I^{\text{conv}}(\theta_x, \theta_y)$ はそれらを畳み込んだ計算値, F, I_{BG} は測定値と比較するために導入したフィッティングパラメータである。図 10 の青の実線は $I_{\text{calc}}(\theta_x = 0, \theta_y)$, 黒の実線は $I_{\text{calc}}^{\text{conv}}(\theta_x = 0, \theta_y)$ を示す。 $|\theta| > \theta_{\text{PXR}}$ の範囲では、どちらの計算値とも、測定値とよく一致した。 $|\theta| < \theta_{\text{PXR}}$ の範囲では、 $I_{\text{calc}}^{\text{conv}}(\theta_x = 0, \theta_y)$ の方が測定値に近づいた。中心付近で、計算値 $I_{\text{calc}}^{\text{conv}}(\theta_x = 0, \theta_y)$ と測定値との間にわずかな違いが見られたが、これは計算値が DTR と DB の寄与を考慮していないためである。今後、Si 結晶の場合に用いたものと同じシミュレーションコードを用いて、DTR と DB の寄与も評価する予定である。

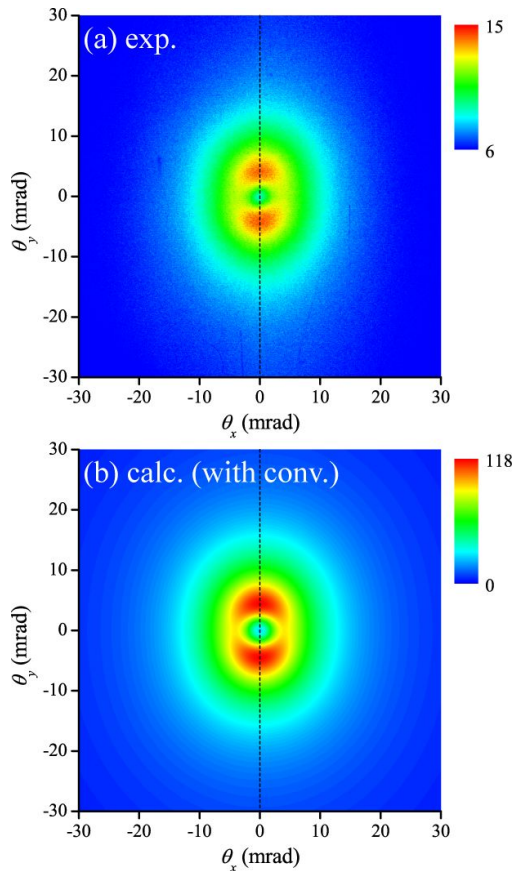


図9:ダイヤモンド結晶からのPXRの角度分布。(a)測定結果,(b)計算結果(ビームの大きさ・角度拡がりを畳み込んだもの)。

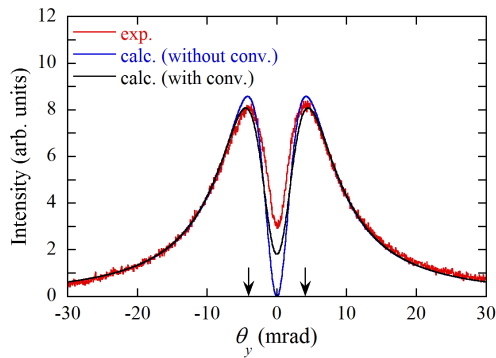


図10:ダイヤモンド結晶からのPXRの角度分布。赤線:測定値,青線:ビームの大きさ・角度拡がりを畳み込んでいない計算結果,黒線:それらを畳み込んだ計算結果。

(4) 回折遷移放射を利用した ILC 用ビーム診断技術の提案

ILC では、衝突点におけるビームサイズが nm オーダーと極端に小さいために、その測定は非常に困難である。ILC のビームサイズ測定法として有力視されているのが新竹モニタ[9]である。新竹モニタでは、ビームとレーザーの干渉縞標的とのレーザーコンプトン散乱によって生じる γ 線が利用される。そのため、高安定度のレーザーやビームを掃引するための電磁石が必要となる。

一方、本研究では、ビームの角度拡がりが

数 $10 \mu\text{rad}$ 程度と比較的大きいことに着目し、ビームサイズの代わりに、ビームの角度拡がりを測定することを提案した。ビームサイズ σ を知りたい場合は、ビームの角度拡がり σ' から、 $\epsilon = \sigma \times \sigma'$ の関係式を通して求めることができる。 ϵ はエミッタンスで、計算値を用いるか、リニアックの上流側における測定で求めることができる。

当初、PXR の利用を検討したが、式(1)で表されるように、PXR の角度拡がりはビームの角度拡がりよりも大きく、本測定には適していないことがわかった。例えば、ビームエネルギー 200 GeV 、標的 Si 結晶、X 線エネルギー 16.55 keV の場合、 $\theta_{\text{PXR}} = 1.9 \text{ mrad}$ と計算され、ビームの角度拡がりよりもはるかに大きくなる。

一方、1 電子からの DTR の角度拡がりは $1/\gamma$ (γ はローレンツ因子) で表される。 200 GeV の場合、 $2.6 \mu\text{rad}$ となり、ビームの角度拡がりよりも十分小さく、DTR の角度分布からビームの角度分布を求めることができると考えられる。

図 11 に DTR の鉛直方向角度分布の計算結果を示す[8]。電子ビームのエネルギー 200 GeV 、標的 $50 \mu\text{m}$ 厚 Si 結晶、回折面(220)、観測角度 22.5° 、結晶と X 線検出器の距離 2 m 、X 線検出器のピクセルサイズ $10 \mu\text{m}$ という条件で計算を行った。比較のため、PXR の角度分布も示した。PXR のピーク強度は DTR よりも 5 桁以上小さく、PXR の角度分布はビームの角度拡がりにほとんど依存しなかった。

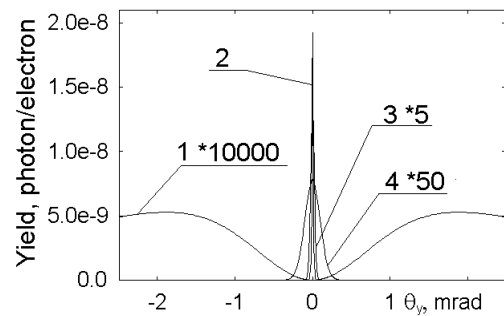


図 11: PXR と DTR の角度分布の計算結果。1: PXR, 2: DTR, $\theta_e \ll \gamma^{-1}$, 3: DTR, $\theta_e = 20 \mu\text{rad}$, 4: DTR, $\theta_e = 100 \mu\text{rad}$ 。

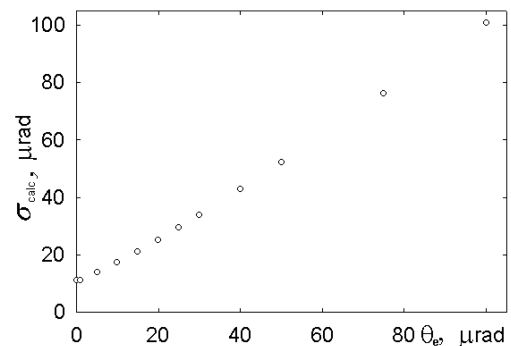


図 12: ビームの角度拡がり θ_e と DTR の角度分布の拡がり σ_{calc} の関係。

一方，DTR の角度分布は，入射電子ビームの角度拡がり θ_e に応じて変化の様子が見てとれる。

これらの計算を基に，ビームの角度拡がり θ_e とDTRの角度分布の拡がり σ_{calc} の関係をプロットしたものを図 12 に示す。この図の関係を通して，観測された DTR の角度分布の拡がりから，ビームの角度拡がりを求めることができる。

本手法の測定対象はビームの角度拡がりであり，測定対象がビームサイズである新竹モニタとは相補的であるといえる。また，新竹モニタと異なり，(i)ビーム掃引用の電磁石を必要とせず結晶を挿入できる直線部があれば適用可能，(ii)低コスト，(iii)モニタが複数設置可能ななどの特長がある。

しかし，大強度のビームが結晶に入射した場合，結晶は破壊されることが予想される。そこで，研究代表者らは，ビームを結晶に入射させず，結晶表面近傍を通過させる方法の検討も開始した。電子が結晶に入射しなくても，電子のまとう電磁場の一部は結晶中に侵入するため，同様の放射現象は生じると考えられる。現在，理論的検討を続けており，結果がまとまり次第，論文として公表する予定である。

参考文献

- [1] H. Loos *et al.*, Proc. of FEL08, 485 (2008).
- [2] Y. Takabayashi, Phys. Lett. A **376**, 2408 (2012).
- [3] Y. Takabayashi, K. Sumitani, Phys. Lett. A **377**, 2577 (2013).
- [4] K. Sumitani, E. Magome, Y. Hirai, IOP Conf. Ser. Mat. Sci. Eng. **24**, 012018 (2011).
- [5] Yu.A. Goponov, S.A. Laktionova, O.O. Pligina, M.A. Sidnin, I.E. Vnukov, Nucl. Instrum. Methods B **355**, 150 (2015).
- [6] Y. Takabayashi, A.V. Shchagin, Nucl. Instrum. Methods B **278**, 78 (2012).
- [7] Y. Takabayashi, K.B. Korotchenko, Yu.L. Pivovarov, T.A. Tukhfatullin, Nucl. Instrum. Methods B **402**, 79 (2017).
- [8] Yu.A. Goponov, M.A. Sidnin, K. Sumitani, Y. Takabayashi, I.E. Vnukov, Nucl. Instrum. Methods A **808**, 71 (2016).
- [9] T. Shintake, Nucl. Instrum. Methods A **311**, 453 (1992).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Y. Takabayashi, K.B. Korotchenko, Yu.L. Pivovarov, T.A. Tukhfatullin, “Angular distributions of parametric X-ray radiation from a diamond crystal”, Nucl. Instrum. Methods B **402**, 79–82 (2017), 査読有
DOI: 10.1016/j.nimb.2017.02.080

Yu.A. Goponov, M.A. Sidnin, K. Sumitani, Y. Takabayashi, I.E. Vnukov, “Ultrarelativistic electron beam spatial size estimation from angular distribution emission in thin crystals”, Nucl. Instrum. Methods A **808**, 71–76 (2016), 査読有
DOI: 10.1016/j.nima.2015.11.031

Y. Takabayashi, K. Ishiji, “Observation of channeling effects for relativistic electrons in a polycrystal”, Nucl. Instrum. Methods B **355**, 53–56 (2015), 査読有
DOI: 10.1016/j.nimb.2015.02.012

〔学会発表〕(計 4 件)

Y. Takabayashi, K.B. Korotchenko, Yu.L. Pivovarov, T.A. Tukhfatullin, “Angular distributions of parametric X-ray radiation from a diamond crystal”, Channeling 2016, 2016 年 9 月 25 日–9 月 30 日, Sirmione–Desenzano del Garda (Italy) .

高林雄一, “相対論的電子ビームと結晶の相互作用研究と加速器技術への応用 II”, 第 12 回日本加速器学会年会, 2015 年 8 月 5 日–8 月 7 日, プラザ萬象 (福井県敦賀市) .

Y. Takabayashi, “Observation of channeling effects for relativistic electrons in a polycrystal”, Channeling 2014, 2014 年 10 月 5 日–10 月 10 日, Capri (Italy) .

高林雄一, “相対論的電子ビームと結晶の相互作用研究と加速器技術への応用”, 第 11 回日本加速器学会年会, 2014 年 8 月 9 日–8 月 11 日, リンクステーションホール青森 (青森県青森市) .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高林 雄一 (TAKABAYASHI, Yuichi)
九州シンクロトロン光研究センター・加速器グループ・副主任研究員
研究者番号：5 0 4 5 0 9 5 3

(2) 研究分担者

隅谷 和嗣 (SUMITANI, Kazushi)
高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・研究員
研究者番号：1 0 4 1 6 3 8 1