

CONSTRUCTION OF A BEAMLINE FOR THE STUDY OF CRYSTAL-BASED ACCELERATOR PHYSICS

Yuichi Takabayashi #, Tatsuo Kaneyasu, Yoshitaka Iwasaki
 SAGA Light Source
 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-0005

Abstract

We have developed a beamline dedicated for the study of interactions of a relativistic electron beam with crystals at the SAGA Light Source (SAGA-LS). We designed a compact two-axis goniometer, which is installed in a vacuum chamber. Two screen monitors were placed downstream of the goniometer to observe the profile of the beam transmitting through a crystal. We first plan to perform the following studies: (i) parametric X-ray radiation (PXR) from textured polycrystals, (ii) diffracted radiation from channeling electrons, and (iii) test of beam deflection using pyroelectric crystals. The details of these proposals and applications to the accelerator techniques are discussed.

電子ビームと結晶の相互作用を利用した加速器応用技術開発用ビームラインの建設

1. はじめに

結晶は原子が周期的に配列したものであり、ビームを結晶に入射すると、その周期性を反映して様々なユニークな現象が生じることが知られている。また、結晶はある特殊な条件下で強力な電場を生成するという性質を持つ。近年、このような結晶の特長を利用した応用研究が精力的に行われている。

(i) 日本大学のグループは、100 MeV の電子ビームをシリコン (Si) 単結晶に入射させてパラメトリック X 線 (PXR) を生成し、空間コヒーレンスの高い光源としてイメージング等の応用研究に利用している^[1]。

(ii) KEK のグループは、陽電子生成用の標的にタングステン単結晶を採用し、チャネリング放射を利用して陽電子の収量を約 25% 増加させることに成功した^[2]。

(iii) 広島大学のグループは、荷電粒子が結晶をチャネリングする際に強力な電場を感じることを利用し、高エネルギーの陽子・電子ビームを偏向させることに成功している^[3]。

(iv) アメリカの Brownridge は、焦電結晶に熱変化を与えたときに結晶表面付近につくり出される電場を利用して電子を加速することに成功した。そして、その電子を金属薄膜に照射して X 線を発生させ、X 線源として利用できることを示した^[4]。

本研究では、電子ビームと結晶の相互作用に関する基礎的研究と、新たなビームモニタ・ビーム操作技術への応用を目的としている。具体的に、下記の 3 テーマに関して研究を行う予定である。

- 配向した多結晶からの PXR の観測
- 回折チャネリング放射の実験的検証
- 焦電結晶によるビームの偏向試験

はじめに、新たに建設したビームラインについて述べた後、各研究テーマの内容について説明する。

最近行ったエミッタンス・ツイスパラメータの測定に関しても報告する。

2. ビームライン

図 1 にビームラインの概念図を示す。ビームラインは、SAGA Light Source (SAGA-LS)^[5-7] の 1.4 GeV 電子蓄積リングの入射器である 255 MeV リニアックと接続されている。リニアック出口からビームダンプへと続く既存のラインを改造し、ゴニオメータとスクリーンモニタを設置した。

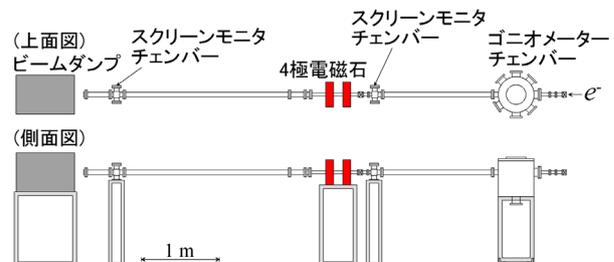


図 1 : ビームラインの概念図。

図 2 にゴニオメータの概念図を、表 1 に性能を示す。ゴニオメータとモーターは真空チェンバーの中に収納されている。結晶は、このゴニオメータに取り付けられる。結晶の角度を任意に変えられるよう、2 軸回転のゴニオメータを採用した。また、必要に応じてビーム軸から退避できるようにするため、ゴニオメータは水平移動可能なステージ上に搭載した。

このビームラインはリニアックと真真空的につながる。リニアックの真真空度 (1×10^{-6} Pa 台) と同等以上の真真空度が得られるよう、超高真真空仕様のゴニオメータ、チェンバーを用いた。また、放射線耐性を考慮して、ケーブルの被覆にはカプトンを採用した。実際に真真空立ち上げを行ったところ、 $\sim 1 \times 10^{-6}$ Pa の真真空度を達成することができた。

takabayashi@saga-ls.jp

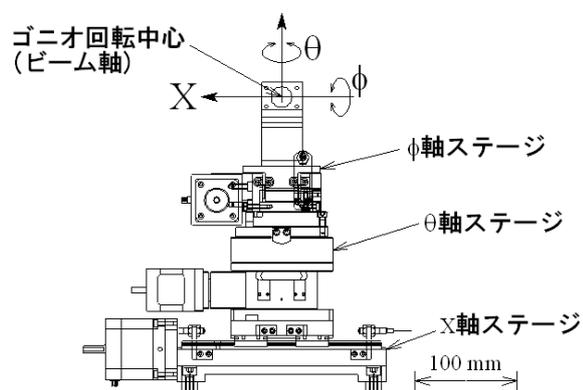


図2：ゴニオメーターの概念図。ビーム軸は紙面に垂直。

表1：ゴニオメーターの性能。

	駆動範囲	最小ステップ
θ軸	-180° - +180°	0.000069°
φ軸	-10° - +10°	0.000019°
X軸 (水平移動)	-50 - +50 mm	0.002 mm

図1に示したように、2台のスクリーンモニタを設置した。ビームエネルギーや結晶の厚さに応じて結晶透過後のビームの角度ひろがりには変化する。多様な条件に対応できるようにするため、標的に近い位置と遠い位置に1台ずつスクリーンモニタを設置することとした。スクリーンとしてアルミナ蛍光板を用いた。厚いアルミナ蛍光板を用いた場合、蛍光板内部で発生した光が散乱されて広がる効果、いわゆる“にじみの効果”により、ビームサイズが実際よりも大きく測定されることが知られている。この効果を抑制するため、厚さ 100 μm の薄いアルミナ蛍光板を採用した。

3. 研究内容

3.1 パラメトリック X 線 (PXR)

PXR とは光速に近い電子を結晶に入射させたとき、ブラッグ条件を満たす方向に X 線が放出される現象である。電子のまわっている擬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。従来、PXR の研究では標的として主にシリコン単結晶が用いられてきた。数年前に広島大学のグループは多結晶からも比較的強い PXR が放出されることを見出した^[8-10]。これは実験に用いたモリブデン多結晶薄膜の結晶粒が、ある特定の方向に強く配向していたためである。結晶粒の角度分布のひろがりには大きく、~5°程度あった。つまり、多結晶の場合、精密な角度あわせをしなくても PXR を発生させることが可能である。本研究では、この特長に着目し、ビームプロファイルモニタへの応用を念頭に、配向した多結晶からの PXR の研究を開始した。まず、

応用上重要な角度分布の測定に取り組むことにした。

標的として用いる多結晶の結晶構造を事前に把握するため、SAGA-LS の白色放射光ビームライン BL09A において X 線回折実験を行った。なお、BL09A では白色放射光だけでなく、チャンネルカットモノクロメーター (Si(111)、5-20 keV) を挿入することにより、単色の X 線も利用可能である。図3にイメージングプレートを用いて測定した単色・白色 X 線による回折パターンを示す。標的として、モリブデン (Mo) 薄膜 (厚さ 10 μm) とアルミニウム (Al) 薄膜 (厚さ 10 μm) を用いた。イメージングプレートは標的の下流 50 mm の位置に設置した。単色 X 線の回折パターンにおいて、デバイ・シェラーリングの一部のみがスポット状に観測された。これは、結晶粒が強く配向していることを示唆している。白色 X 線の回折パターンでは、様々な半径を持つデバイ・シェラーリングの重ね合わせが現れると予想される。実際に、単色 X 線の回折パターンで観測されたスポットが、白色 X 線の回折パターンでは、動径方向にのびた形で現れていた。

今後、同じ標的にリニアックからの電子ビームを照射し、回折パターン (PXR の角度分布) を測定する予定である。前述したように、PXR は擬似的光子の回折現象とみなすことができる。擬似的光子は、電子の運動エネルギーに相当するエネルギーを上限とする広帯域のスペクトルを持つ。よって、同じく広帯域のスペクトルを持つ白色放射光の回折パターンに近いパターンが得られると考えられる。

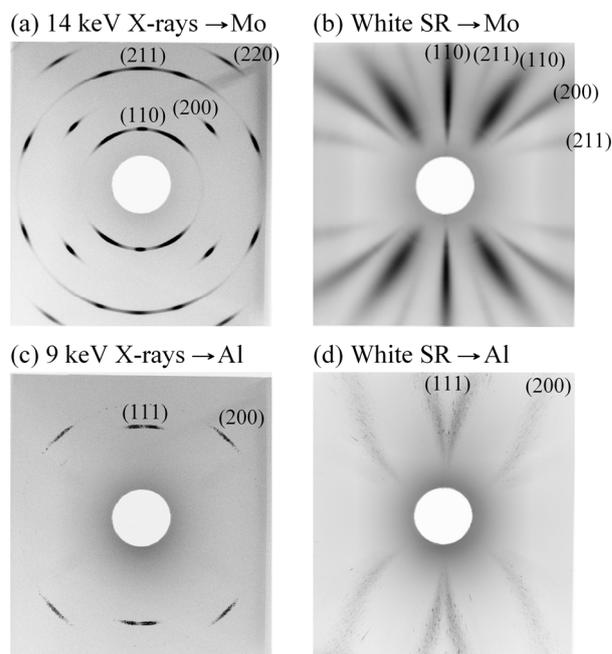


図3：単色・白色放射光による回折パターン。
(a) 14 keV X 線 → Mo、(b) 白色放射光 → Mo、
(c) 9 keV X 線 → Al、(d) 白色放射光 → Al。

3.2 チャネリング放射

PXR の他に、電子と結晶の相互作用によって生

じる放射現象の 1 つにチャネリング放射がある。チャネリングとは、荷電粒子がある角度（臨界角度と呼ばれる）よりも浅い角度で結晶の軸や面にほぼ平行に入射したときに、結晶のつくるポテンシャルによってガイドされながら進む現象である。例えば 255 MeV 電子が Si(220)面をチャネリングする場合の臨界角度は 0.43 mrad となる。このようにチャネリング観測のためには平行度の高いビームが必要とされる。

電子のチャネリングの場合、電子は原子列や原子面のつくるポテンシャルにトラップされ、横方向（進行方向と垂直な方向）のエネルギーは量子化される。そして、量子化されたエネルギー準位間の遷移に伴って光子が放出される。これがチャネリング放射と呼ばれる現象である。例として、10 MeV 電子が Si 結晶の(220)面をチャネリングする場合の面ポテンシャル・エネルギー準位と波動関数を図 4 に示す。面ポテンシャルの計算には Doyle-Turner ポテンシャル^[11]を使用した。また、エネルギー準位・波動関数の計算には many-beam 法^[12]を用いた。座標軸 x は(220)原子面に垂直で、原点が原子面の位置を示す。なお、図 4 の x 軸方向の全幅は(220)の面間距離に相当し、 1.92×10^{-10} m である。

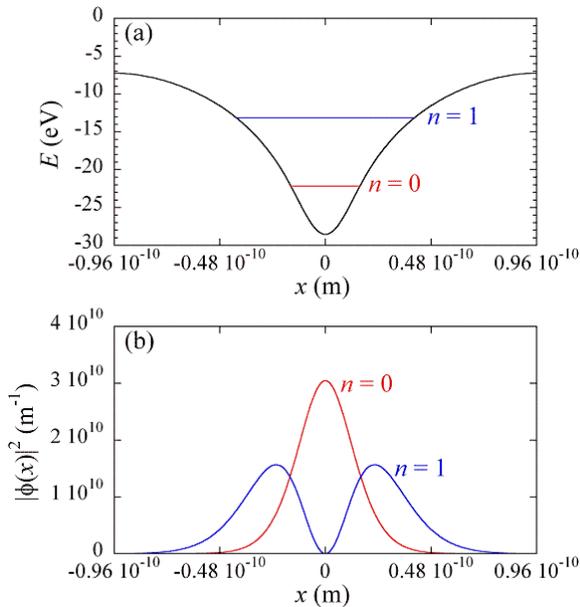


図 4 : (a) エネルギー準位、Si(220)面ポテンシャル。(b) 波動関数（振幅の絶対値の 2 乗）。

チャネリング放射のエネルギー $\hbar\omega_{CR}$ が、ブラッグ条件を満たすエネルギー $\hbar\omega_B$ に一致するとき、ブラッグ条件を満たす方向に X 線の放出されることが理論的に予言されている^[13]。この現象は回折チャネリング放射 (Diffracted Channeling Radiation: DCR) と呼ばれている。DCR は電子のまわっている擬似的なチャネリング放射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。PXR と同様、擬似的光子の回折現象であるため、パラメトリックチャネリング放射と呼ぶこともできるが、過去の文献^[14]に従い本論文でも DCR と呼ぶことにする。

DCR は Baryshevsky によって予言され^[13]、その後、新田らが理論的定式化を行った^[14-16]。しかし、まだ実験的に観測されていない現象である。

本研究では、DCR の実験的検証とビームエネルギー測定法への応用を目指している。以下、本研究で提案するエネルギー測定の原理について説明する。チャネリング放射のエネルギーは次式のように書くことができる。

$$\hbar\omega_{CR} = 2\gamma^2(E_i - E_f) \quad (1)$$

γ はローレンツ因子、 E_i と E_f はそれぞれ、チャネリング電子の始状態、終状態のエネルギー準位である。電子は光速に近い速さで進行方向に動いているので、相対論的効果により、チャネリング放射のエネルギーは $2\gamma^2$ 倍される。また、ブラッグ条件を満たすエネルギーは次式で与えられる。

$$\hbar\omega_B = \hbar c |\vec{g}| / (2 \sin \theta_B) \quad (2)$$

c は光速、 \vec{g} は逆格子ベクトル、 θ_B はブラッグ角である。DCR の生成条件 $\hbar\omega_{CR} = \hbar\omega_B$ に(1)、(2)式を代入すると、

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2(E_i - E_f)} \frac{\hbar c |\vec{g}|}{2 \sin \theta_B}} \quad (3)$$

という式が得られる。この式からわかるように、ブラッグ角 θ_B からローレンツ因子 γ すなわちビームエネルギーを決定することができる。エネルギーの絶対値の決定精度は $\sim 1\%$ 、相対的な精度は $\sim 0.01\%$ と見積もられている^[17]。従来、電子ビームのエネルギー測定では、エネルギー分析器として電磁石が用いられてきた。電磁石を用いる場合、ビームを曲げることになるので、そのためのビームラインやビームダンプ等が必要となる。一方、DCR による測定手法では、結晶を挿入できるスペースさえあればよく、ビームをまっすぐ通したままエネルギーの測定が可能である。また、薄い結晶を用いれば、半非破壊的な測定も可能となる。さらに、鏡面仕上げの結晶を用いれば、結晶表面で発生する Optical Transition Radiation (OTR) をビームプロファイルやバンチ長の測定に利用することもできる。

図 5 に新田らの理論式^[14]を用いて計算した 1 電子から放出される PXR と DCR の角度分布 $dN/(d\theta_x d\theta_y dz)$ (photons/e⁻/m)を示す。 θ_x 、 θ_y はそれぞれ水平、垂直方向の放出角度、 z は標的厚さである。 $\theta_x = \theta_y = 0^\circ$ がブラッグ角に対応する。チャネリング面は Si(220)、回折面は Si(111)とした。ビームエネルギーが 10 MeV のときに $n = 1 \rightarrow 0$ の遷移に伴う DCR が生成されるという条件のもとで計算を行った。チャネリング電子の波動関数等は図 4 で計算したものをを用いた。図 5 からわかるように、DCR は PXR の分布の中心付近に現れる。図 5 にはビームエネルギーが 9 MeV と 11 MeV にずれた場合の計

算結果も示したが、DCR は PXR と異なり、ビームエネルギーに敏感であることがわかる。

結晶をチャネリングした電子は特徴的な角度分布を持つことが知られている。図 1 に示したように、ゴニオメーターの下流にスクリーンモニタが設置されている。このスクリーンモニタを用いてビームプロファイル（角度分布）の変化を観測することにより、チャネリング条件を探索することができる。

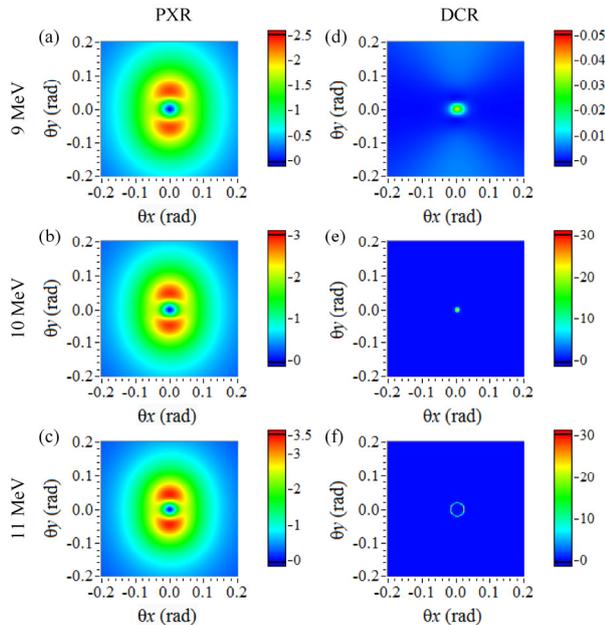


図 5 : PXR と DCR の角度分布。(a)-(c) PXR の分布、ビームエネルギーはそれぞれ 9、10、11 MeV。(d)-(f) DCR の分布、ビームエネルギーはそれぞれ 9、10、11 MeV。

3.3 焦電結晶

焦電結晶とは、熱変化を与えると分極を起し、結晶表面付近に強力な電場 ($\sim 10^6$ V/cm) を発生するものである。代表的なものに LiNbO_3 、 LiTaO_3 結晶などがある。1992 年、アメリカの Brownridge は、焦電結晶の電場を利用して加速した電子を金属薄膜に照射し、X 線を発生させることに成功した^[4]。電子を 100 keV 程度まで加速できることも示されている。この研究に触発されて、2000 年頃からウクライナの Shchagin らも同様の研究を開始した^[18]。2003 年には、Shchagin らとともに広島大学の遠藤らも焦電結晶による X 線の生成に成功している^[19]。2005 年にはアメリカの Naranjo らが中性子の生成にも応用できることを示した^[20]。

本研究では、この焦電結晶のつくり出す電場に着眼した。この電場 ($E \sim 10^6$ V/cm) を磁場 B に換算すると、 $B = E/c \cong 0.3$ T となる (荷電粒子の速さは光速 c に近いとした)。つまり、通常、高エネルギーのビームを偏向させるのに電磁石が使用されるが、その磁場に匹敵する電場を、焦電結晶は生成することが可能なのである。本研究では、この電場を利用したビームの偏向試験を計画している。図 6 に実験の概念図を示す。ゴニオメーターに焦電結晶を取り

付け、ビームに近づけていき、ビームが偏向される様子を下流のスクリーンモニタで観測することを考えている。焦電結晶はコンパクトであり、また電磁石と異なり大電流電源、冷却水を必要としない点がメリットである。

本研究ではビームの偏向に目的を絞ったが、前述したように焦電結晶の電場を利用して 100 keV 程度のビームを生成することも可能である。100 keV 級の電子源・イオン源・X 線源への応用についても検討を開始している。

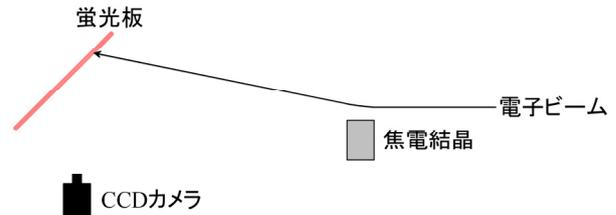


図 6 : 焦電結晶の電場によるビーム偏向試験の概念図。

4. ビームパラメータ

ビームと結晶の相互作用研究において、ビームの質は重要である。そこで、Q スキャン法 (4 極電磁石の強さを変えていきビームサイズを測定する方法) を用いて、エミッタンス・ツイスパラメータを評価した。図 7 に測定結果を示す。なお、電子ビームのエネルギーは 255 MeV である。リニアック出口付近に設置されている 4 極電磁石を用いて Q スキャンを行った。また、図 1 に示した上流側のスクリーンモニタを用いてビームプロファイル (ビームサイズ) を測定した。図 7 の実線は転送行列から求まる計算式へのフィットを示す。このフィットから、規格化エミッタンスは $\epsilon_x = 21$ 、 $\epsilon_y = 50 \pi$ -mm-mrad と求まった (x は水平、 y は垂直)。また、標的位置におけるツイスパラメータは、 $\beta_x = 1.8$ m、 $\alpha_x = -0.4$ 、 $\beta_y = 4.6$ m、 $\alpha_y = 1.3$ と求められた。これらの値からビームの角度ひろがり σ'_x 、 σ'_y は、両者とも

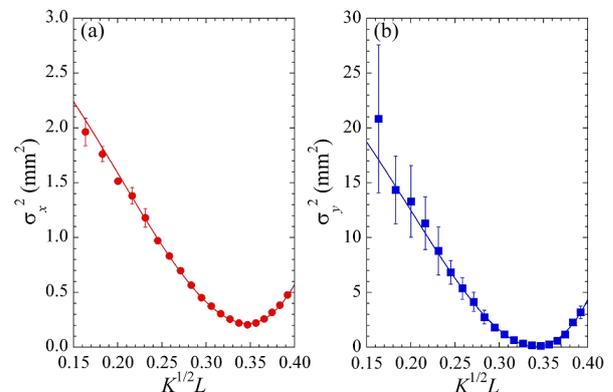


図 7 : Q スキャン法の測定結果。横軸 : $K^{1/2}L$ (K は 4 極電磁石の K 値、 L は磁石長)、縦軸 : ビームサイズ σ の 2 乗。(a) 水平方向、(b) 垂直方向。実線は転送行列から求まる計算式へのフィットを示す。

0.2 mrad と見積もられる。これは、チャネリングの臨界角度よりも十分小さい値である。

最近、Si 結晶からの OTR の観測に成功した。OTR の場合、アルミナ蛍光板で問題となるにじみの効果はない。今後 OTR を利用したビームサイズの測定も行う予定である。

5. まとめ

電子ビームと結晶の相互作用研究を目的としたビームラインの建設を行った。超高真空仕様のコンパクトな 2 軸回転ゴニオメーターを設計・製作した。本研究では基礎研究だけでなく、加速器技術への応用も念頭においている。多結晶からの PXR の観測（ビームプロファイルモニタへの応用）、DCR の実験的検証（ビームエネルギーモニタへの応用）、焦電結晶によるビーム偏向試験（ビームディフレクターへの応用）という 3 テーマに関して研究に着手した。2010 年 9 月以降、リニアックからの電子ビームを用いて、PXR の実験から開始する予定である。

謝辞

PXR の研究に関して助言を下された、ウクライナ国立ハリコフ物理工学研究所の A. V. Shchagin 氏に感謝いたします。また、放射光を用いた実験でご指導・ご協力いただいた九州シンクロトロン光研究センタービームライングループの石地耕太郎研究員に感謝いたします。本研究を行う機会を与えて下さった、同センター加速器グループの江田茂主任研究員、吉田勝英氏（前加速器グループ長）、冨增多喜夫氏（前光源整備チームリーダー）に感謝いたします。

本研究の一部は科研費（21740217）の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 早川恭史, “日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) におけるパラメトリック X 線源開発”, 日本加速器学会誌 Vol. 6, No. 2, 166 (2009).
- [2] 諏訪田剛, “タングステン単結晶を利用した陽電子源”, 日本加速器学会誌 Vol. 4, No. 1, 7 (2007).
- [3] 飯沼昌隆, 澤田真也, ストロコフセルゲイ, 高橋徹, “結晶による粒子ビームの操作”, 日本加速器学会誌 Vol. 3, No. 4, 354 (2006).
- [4] J. D. Brownridge, *Nature* **358**, 287 (1992).
- [5] K. Yoshida *et al.*, *AIP Conference Proceedings* **879**, 179 (2007).
- [6] T. Tomimasu *et al.*, *AIP Conference Proceedings* **879**, 184 (2007).
- [7] T. Kaneyasu, Y. Takabayashi, Y. Iwasaki, S. Koda, *AIP Conference Proceedings* **1234**, 583 (2010).
- [8] I. Endo, D. Iseki, T. Ohnishi, C. Moriyoshi, A. V. Shchagin, *Nucl. Instr. and Meth. B* **217**, 666 (2004).
- [9] Y. Takabayashi, I. Endo, K. Ueda, C. Moriyoshi, A. V. Shchagin, *Nucl. Instr. and Meth. B* **243**, 453 (2006).
- [10] S. Nawang *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75**, 124705 (2006).
- [11] P. A. Doyle and P. S. Turner, *Acta Cryst.* **A24**, 390 (1968).
- [12] J. U. Andersen, K. R. Eriksen and E. Lægsgaard, *Physica Scripta* **24**, 588 (1981).
- [13] V. G. Baryshevsky and I. Ya. Dubovskaya, *J. Phys. C* **16**, 3663 (1983).
- [14] R. Yabuki, H. Nitta, T. Ikeda, Y. H. Ohtsuki, *Phys. Rev. B* **63**, 174112 (2001).
- [15] T. Ikeda, Y. Matsuda, H. Nitta, Y. H. Ohtsuki, *Nucl. Instr. and Meth. B* **115**, 380 (1996).
- [16] Y. Matsuda, T. Ikeda, H. Nitta, H. Minowa, Y. H. Ohtsuki, *Nucl. Instr. and Meth. B* **115**, 396 (1996).
- [17] Y. Takabayashi, *AIP Conference Proceedings* **1234**, 579 (2010).
- [18] V. I. Nagaychenko, V. M. Sanin, A. M. Yegorov, A. V. Shchagin, *Problems of Atomic Science and Technology, Series “Nuclear Physics Investigations”*, Kharkov, V. **43(2)**, 214 (2004).
- [19] 吉田拓生, A. V. Shchagin, 森吉千佳子, 遠藤一太, 大西健広, 高林雄一, “焦電結晶の温度変化による電子放出”, 日本物理学会 2003 年秋季大会.
- [20] B. Naranjo, J. K. Gimzewski and S. Putterman, *Nature* **434**, 1115 (2005).