

EXPERIMENT WITH ASYMMETRIC TARGET CRYSTALS IN LEBRA-PXR *

Yasushi Hayakawa^{† A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Manabu Inagaki,^{A)} Takao Kuwada^{A)}, Keisuke Nakao^{A)},
Kyoko Nogami^{A)}, Takeshi Sakai^{A)}, Isamu Sato^{A)}, Yumiko Takahashi^{A)}, Toshinari Tanaka^{A)}
^{A)}Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University,
Narashinodai 7-24-1, Funabashi, 274-8501

Abstract

In order to investigate the geometrical effect of a target crystal shape on parametric X-ray radiation (PXR), target crystals with a knife-edge-shaped cut surface were prepared and the experiments using such crystals have been carried out using the LEBRA-PXR system at Nihon University. The results shows that reducing the number of the emission surface of PXR improves the spatial coherence of PXR beam. In addition, the use of asymmetric cut surface for the target produces relatively intense PXR emission. Although the degradation of the spatial coherence of the PXR beam, this target condition makes it possible to obtain practical radiograph image with the measurement time less than 1 minute.

LEBRA-PXR における非対称ターゲット結晶の試験

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、相対論的荷電粒子と結晶媒質との相互作用によって発生するパラメトリック X 線放射 (PXR: parametric X-ray radiation) を利用した X 線源の研究開発を進めてきた [1]。LEBRA-PXR は 100 MeV の電子リニアックによって、エネルギー可変なコヒーレント X 線源を実現しており、実際にエネルギー分散型 X 線吸収微細構造 (XAFS: X-ray absorption fine structure) 分析や回折強調型位相コントラストイメージング (DEI: diffraction enhanced imaging) といった高度応用も提示してきた [2]。また、X 線源としての高度化としてリニアックの安定化を進めるとともに、加速器の運転条件や電子ビームの照射条件が PXR ビームの性能に及ぼす影響なども調べてきた [4, 5]。特にイメージングにおける像のボケを指標にして PXR ビームの振舞を詳しく調べた結果、電子ビームをターゲット結晶の端に照射した場合に強度がやや強くなる傾向がある半面、X 線像に 2 重になったようなブレが生ずることが分かった。結晶の端がこの現象の要因となっているかどうかを検証するため、楔形のエッジを持つターゲット結晶を用意して実験を行った。また、非対称なカット面を用いたときの PXR 発生の様子も調べる実験も行った。

2. 結晶の端と X 線像のブレ

図 1 のようなセットアップで X 線像に生ずるブレの観測をしたところ、第 2 結晶の調整によっては、図 2 のように、水平に 2 つのビームが重なったようなブ

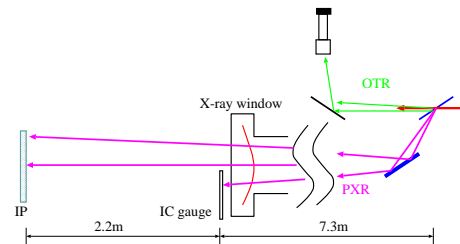


図 1: 画像による PXR ビーム性能測定。

レが観測された。従来のターゲットは図 3(a) のような Bragg 配置の対称平板結晶であった。この場合、電子ビームを端に照射すると、対称 Bragg 面だけでなく、対称 Laue 面となっている側面も電子が通過することになる。この側面の寄与により PXR 強度が増加する反面、屈折しかたの違いにより異なる 2 つの光源の重なりとなってしまふものと考えられる。これを検証するために、図 3(b) のように端を楔形にカットしてナイフエッジ状になった Si 結晶をターゲットとしてテストを行った。この結晶では、エッジの傾斜したカット面が対称な (111) 面となっており、面積の大きい平板部分は非対称カットとなっている。

3. ナイフエッジ状ターゲット結晶

今回用意した結晶の非対称面の非対称角は 6.5° であり、図 3(b) の配置 (配置 1) では、17.5 keV では PXR の放出方向 (2θ 方向) からは、非対称面が見えなくなる。この状態で取得したイメージは図 4 のように水平方向についてはブレがなくなり、非常にシャープなものになる。このように PXR の出力面が 1 つとなるようにするのは空間コヒーレンスの悪化を抑制するのに効果的であることが分かった。しかしながら、得られる X 線強度は弱く、対称平板結晶を用いた場

* 文部科学省学術フロンティア推進事業 (継続) 「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」(H.17 - H.19)

[†] E-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

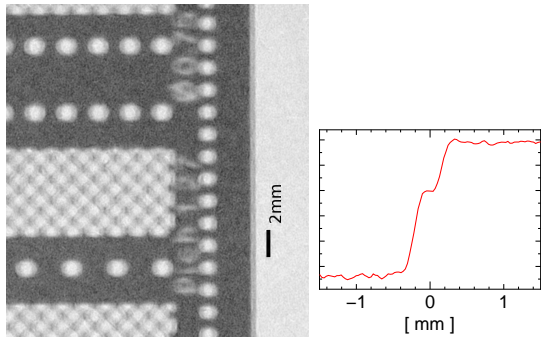


図 2: X 線像に生じるブレ。2つのビームの重なりと思われる。

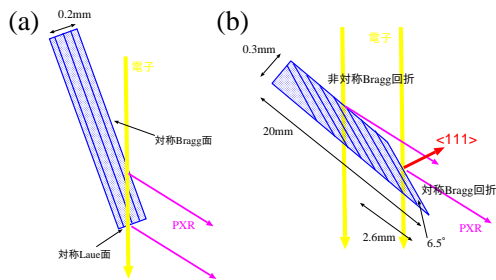


図 3: (a): 従来の対称平板結晶 (Bragg 配置); (b): ナイフエッジ状結晶 (配置 1)。

合の 1/5 程度であった。

この配置で、エネルギー分散型 XAFS 測定を行うと、図 5 のように比較的分解能の良い吸収スペクトルが得られた。Cu の吸収端 (8.91 keV) においては、エッジ部分の対称面のサイズに相当する X 線のエネルギー広がり は 3 eV 程度であり、得られたスペクトルの分解能とほぼ一致する。

以上の結果は、この配置においては非対称面の寄与が非常に少なく、対称面のみが支配的な線源となっていることを示唆する。非対称面では電子のパス長に比べ、X 線のパス長の方が長く、内部吸収を受けやすいためであると理解できるが、それに加えて X 線動力学における異常吸収に相当する現象が関与している可能性もある。

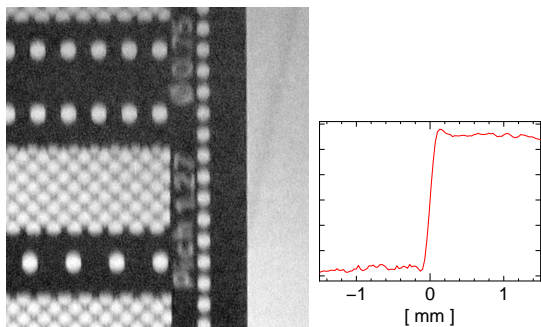


図 4: 配置 1 で取得した X 線像 @17.5 keV。水平方向の像のブレが抑制されている。

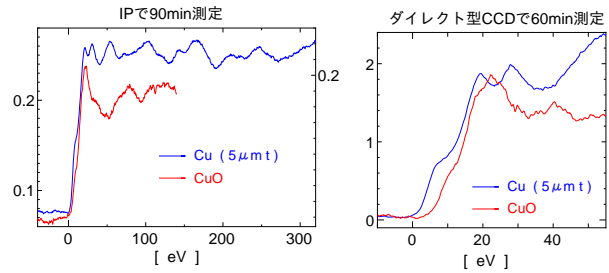


図 5: 配置 1 でのエネルギー分散型 XAFS 測定の結果。

4. 非対称面の利用による PXR 強度の向上

非対称面を用いるにあたって、上述の結晶を裏返しにした配置 (配置 2: 図 6) では、X 線のパス長が電子のパス長に比べて短くなり、より高強度の PXR を結晶外部に取り出せる可能性がある [6]。

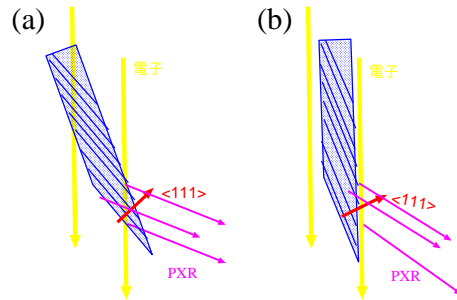


図 6: ナイフエッジ状結晶 (配置 2)。

実際、この配置では強度は向上し、従来の対称平板結晶に比べ数倍から 5 倍程度の強度が得られている。特に 16~16.5 keV では、図 6(b) のように結晶表面にヒットする電子が少ないにもかかわらず比較的強い強度の PXR が得られた。図 7 はこの配置で取得できた X 線吸収像の典型例である。サンプルを検出器 (イメージングプレート) に密着させて撮像したものであるが、リニアックの平均電流 2~2.5 μA において、1 分以下の測定時間でも比較的良好的な画像を取得することができた。

しかしながら、この配置では強度は強いものの、伝播距離を長くした画像測定では、図 8 のように水平方向に強いブレが生じた。非対称面におけるビームサイズ拡大効果は考えられるが、図 8 を見る限りは複数の X 線ビームが重なった結果のように思える。この測定を行った際、電子ビーム照射によるターゲット結晶の損傷も生じてしまったので、その影響も含めて空間コヒーレンスを悪化させる要因について調べていく必要がある。また、この配置では斜めにカットした対称面が裏側にあり、この面の寄与がどのようなものになっているのかも興味深い。

5. 非対称ターゲットでの DEI

上述の様に、配置 2 の非対称ターゲットでは、水平方向に強いブレが起こるために、伝播型位相コントラストイメージングは現実的ではない。しかしながら、2つのビームの重なりがブレの原因である場合、

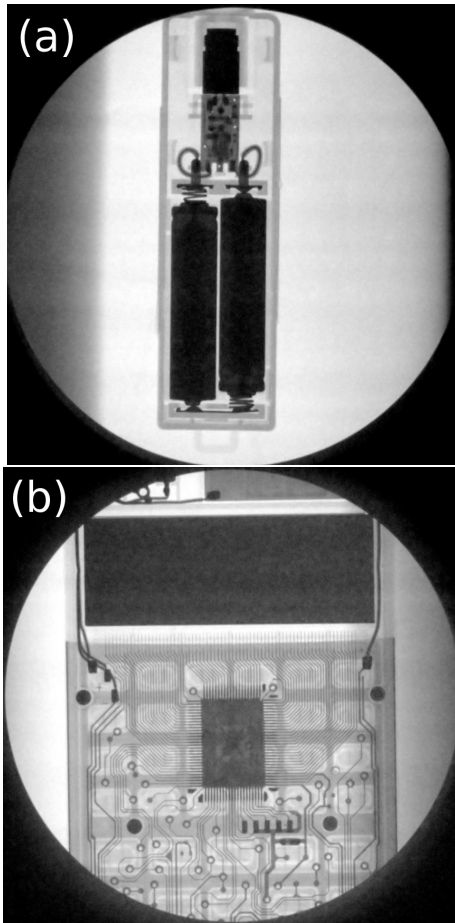


図 7: 非対称ターゲット配置 2 で測定された X 線吸収イメージ (密着像)。 (a) レーザポイント@16.5keV, 平均電流 2.5 μ A, 測定時間 30 s; (b) 電卓@16 keV, 平均電流 2.1 μ A, 測定時間 60 s。検出器は共にイメージングプレート (IP)。

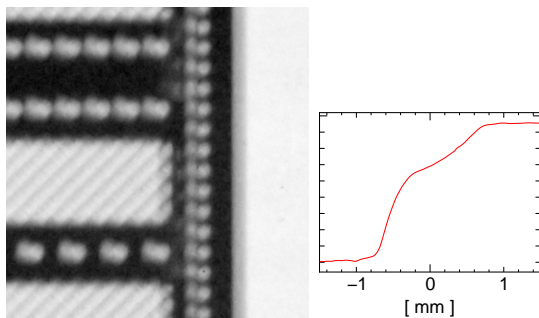


図 8: 配置 2 で取得した X 線像@14 keV。水平方向に強いブレが生じている。

回折型の位相コントラストイメージング (DEI) ならば位相コントラスト像自体は取得でき、サンプル-検出器間の距離をできるだけ短くすることによってブレの影響を抑制できる。図 9 は 16.5 keV において、トカゲをサンプルとした DEI 測定の結果である。アナライザー結晶での回折幅が広がり、位相検出感度は悪くなるものの、深刻な反射率の低下は認められず、吸収コントラストよりも高コントラストな像が

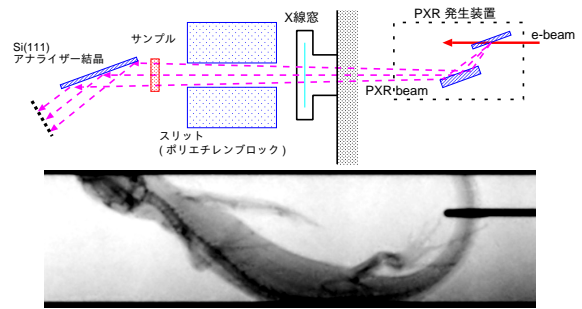


図 9: 配置 2 での DEI 測定結果@16.5keV。サンプルはトカゲ、測定時間は IP を用いて 5 分。

比較的短時間で得られた。この結果から、伝播距離を長くした場合の像のブレが本質的なコヒーレンスの低下によるものではないことが示唆される。また DEI が可能ならば、多少感度が低下しても伝播型と同程度以上の位相像の取得が期待でき、X 線強度の向上の恩恵を受けることができる。

6. まとめ

非対称なカット面をもつナイフエッジ状の結晶を PXR のターゲットとして用いた試験を行った。その結果、結晶の端の様に境界条件の異なる面は、異なる線源として振舞うことが分かった。したがって、高品質な PXR を得るには、ターゲット結晶の形状を工夫し、2 つ以上の面の寄与が無いようにする必要がある。また、非対称なカット面を用いることにより、強い PXR 強度が得られ、実際に短時間での X 線イメージングが可能になった。X 線ビームの質が悪くなる現象も見られたが、電子ビーム電流以外の手段による PXR 強度の向上が実証されたことは、PXR ベースで普及可能な X 線源の開発を目指す上では重要な成果であったといえる。今後は、ターゲット結晶の形状の最適化により、強度とコヒーレンスを両立させる解を模索することが重要となる。

参考文献

- [1] Y. Hayakawa et al., Nucl. Instr. and Meth. B 252 (2006) 102.
- [2] Y. Hayakawa et al., Proceedings of SPIE Vol. 6634 (2007), 663411 (DOI: 10.1117/12.741898).
- [3] Y. Hayakawa et al., "Dependence of PXR beam performance on the operation of the pulsed electron linac", Nucl. Instr. and Meth. B (to be published), (DOI: 10.1016/j.nimb.2008.02.042).
- [4] T. Sakai, 非破壊検査第 57 号 6 号 (2008) 282.
- [5] Y. Hayakawa et al., "日大 LEBRA-PXR ビームラインの活動状況", 第 4 回日本加速器学会年会・第 32 回リニアック技術研究会 (2007) 145.
- [6] A. S. Lobko and O. M. Lugovskaya, Proceedings of SPIE Vol. 6634 (2007), 663415 (DOI: 10.1117/12.741933).