

(様式第5号)

ミリ秒オーダーX線トモグラフィのためのマルチビーム光学素子の高反射率化

Development of high-reflectivity multi-X-ray-beam optics for millisecond order X-ray tomography

矢代航¹、Wolfgang Voegeli²、白澤徹郎³、梁暁宇¹、米山明男⁴
Wataru Yashiro¹、Wolfgang Voegeli²、Tetsuroh Shirasawa³、Xiaoyu Liang¹、and
Akio Yoneyama⁴

¹東北大多元研、²東京学芸大教育、³産総研計量、⁴九州シンクロトロン
¹IMRAM, Tohoku Univ., ²Faculty Edu., Tokyo Gakugei Univ., ³NMI, AIST,
⁴SAGA-LS

1. 概要 (注：結論を含めて下さい)

超伝導ウィグラーからの白色放射光を用いて、試料を回転せずに高速トモグラフィを実現するためのマルチビーム光学素子の改良に向けた基礎実験を行った。単結晶二枚重ね、成膜単結晶の利用などについてテスト実験を行い、新たな知見を得ることができた。今後、光学素子の改良を進めるための新たな着想を得ることができた。

(English)

Experiments for improving the multi-beam X-ray optics, which was designed to realize X-ray tomography without sample rotation, were carried out by using the white synchrotron radiation beam from the superconducting wiggler at BL07 in SAGA-LS. From the experimental results, new knowledge on how to improve the performance of multi-beam X-ray optics was obtained.

2. 背景と目的

我々は、これまで先駆的に開発を進めてきた高感度X線イメージング法の一つであるX線回折格子干渉法[1-4]を発展させて、マイクロ秒オーダー高速X線イメージング、ミリ秒オーダーの高速4DX線トモグラフィ(3D+時間軸)に成功してきた(例えば[3])。繰り返しが不可能な非平衡系のダイナミクスのその場観察ができるという特色を活かして、材料の破壊制御や、動的バイオミメティクスなどの基礎・応用研究において新たなフロンティアの開拓につながると期待している。

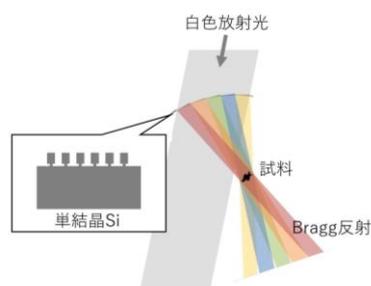
しかしながら、ミリ秒トモグラフィにおいては、試料を高速(数万rpm)で回転しなければならないという制約から、応用対象が限定的であるという問題があった。そこで、試料を回転せずにミリ秒4Dトモグラフィを実現するための基盤技術の一つとして、広角(大湾曲)硬X線用マルチビーム光学素子を開発し、ミリ秒時間分解能でX線トモグラフィを実現することを目指している。

本申請では、これまでの単結晶1枚からなる硬X線用マルチビーム光学素子をさらに改良し、高反射率化を狙った。具体的には、複数毎の単結晶を重ねて湾曲させたり、表面に成膜して歪みを与えたりすることによって、Bragg反射の反射角度幅を広げる改良を行い、高反射率化を実現することを目指した。

3. 実験内容(試料、実験方法、解析方法の説明)

図1(a)にマルチビーム光学素子の概略図を示す。本研究で開発を目指すマルチビーム光学素子は、ポリクロメータと呼ばれる、単結晶を湾曲して白色ビームをBragg反射により集光する光学素子を、図1(a)中の左図のようにつくり抜いて、上部を複数のブレード状にしたものである。すべてのブレード

からの反射ビームによる投影像を、減衰時間の短いシンチレータと高速CMOSカメラで同時に取得することで、試料を回転せずに、ミリ秒時間分解能の4DX線位相トモグラフィを実現することを目指している。図1(b)に、2019A期のビームタイムのために開発した $\pm 70^\circ$ の範囲をカバーできる32ビームのマルチビーム光学素子の写真を示す。ダイレクトビームを含めると33ビーム光学系になる。本申請では、この三段型マルチビーム光学素子の三段目（ショートフォーカスと呼ぶ）のみ分離して評価に用いた。ショートフォーカスビームは、散乱角が大きいため、反射率が弱いという問題がある。本申請では、反射率増強に向けて、Si単結晶の複数枚重ね、Si単結晶表面への成膜などの効果を調べるための基礎実験を行った。



(a)



(b)

図1: (a) マルチビーム光学素子の概念図。(b) 開発した三段型マルチビーム光学系の写真

図1(a)の試料を軸とする 2θ ステージを用意し、 2θ ステージ上にシンチレータから構成される間接撮像型のレンズカップリング型X線画像検出器を構成した。これにより各反射ビームの強度などを評価した。

4. 実験結果と考察

図2にショートフォーカスマルチビーム光学素子ホルダーに2枚のSiを重ねて反射ビームを取得した結果を示す。LaueケースのBragg反射を利用したため、Bormannファンの効果により、わずかな入射角の違いが増幅されて、異なる方向に反射ビームが生じることが確認された。強度増強のためには、これらの反射ビームが完全に重なる必要があり、本実験のホルダーよりも精度の高い調整機構が必要であることが明らかになった。一方で、2つの反射ビームは1 m程度離れば完全に分離するため、反射ビーム数を容易に増やすことができることが明らかになり、マルチビーム光学素子ホルダー設計のための新たな着想を得ることができた。なお、表面に成膜した結晶については、結晶の湾曲によって拡大あるいは縮小投影光学系が構成できることも明らかになった。

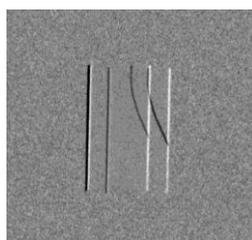


図2 二枚重ねマルチビーム光学素子からの反射ビームによるタングステンワイヤーの透過率像（グレースケール：0.7~1.3）

5. 今後の課題

二枚重ね型、および表面成膜型ショートフォーカスマルチビーム光学素子の評価を行った結果、前者はビーム数の増大に、後者は拡大あるいは縮小投影光学系の実現に利用できることが明らかになった。今後は、Braggケースショートフォーカスマルチビーム光学素子の開発の可能性も含めて、今回のビームタイムで得られた知見をマルチビーム光学素子の設計に活用していきたいと考えている。

6. 参考文献

[1] X線物理学の基礎（講談社サイエンティフィック）

7. 論文発表・特許（注：本課題に関連するこれまでの代表的な成果）

[2] A. Momose, W. Yashiro et al., JJAP 45 (2006) 5254.

[3] W. Yashiro et al., APEX 10 (2017) 052501.

[4] W. Yashiro et al., OPEX 18 (2010) 16890.

8. キーワード (注: 試料及び実験方法を特定する用語を2~3)

X線イメージング、回折格子、ポリクロメータ

9. 研究成果公開について

① 論文 (査読付) 発表の報告 (報告時期: 2021年 4月)