

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 9 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21604006

研究課題名（和文） 放射光X線用ソフトフォーカシング光学素子の開発

研究課題名（英文） Development of weak focusing optical devise
for synchrotron radiation X-rays

研究代表者

籠島 靖 (KAGOSHIMA YASUSHI)

兵庫県立大学・大学院物質理学研究科・教授

研究者番号：10224370

研究成果の概要(和文):放射光は高精度X線分析のX線源として不可欠なツールとなっている。その放射光をより効率よく利活用するためには、放射光X線を試料へと導くビームラインの高度化が重要である。本研究では、既存の放射光ビームラインの光軸上に挿入するだけで、簡便かつ安価に試料位置でのX線密度を数倍向上させることができる新規のX線光学素子を開発した。プロトタイプを設計・製作・性能評価し、X線の密度利得で3.1を達成した。X線光学素子としての原理検証に成功した。

研究成果の概要(英文): An X-ray optical device that operates in a transmission arrangement is preferable for increasing the photon flux density at a sample position of existing synchrotron radiation beamlines with as little reconstruction as possible. The study aimed to develop that new X-ray optical devise. The prototype device was designed, fabricated and the optical performances were measured. A photon flux density gain of 3.1 was achieved. The present optical device can be used to improve beamlines for experiments that do not require microfocusing such as X-ray absorption fine structure spectroscopy, powder diffraction, and small-angle scattering experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：X線光学、放射光、ビームライン

1. 研究開始当初の背景

X線の波長は0.1 nm前後と原子の大きさと同程度であるため、X線レンズを用いてX線を結像することによって原子スケールの空間分解能で物質の構造を直接見ることが原理的に可能である。これを究極の目的とする学問分野としてX線顕微法(X-Ray

Microscopy)がある。X線顕微法では、実空間における高空間分解能化をメインストリームとして、X線光学素子の開発、X線マイクロビームの高度化、X線顕微鏡装置の開発などの研究が世界的に進められている。申請者も、非破壊分析プローブというX線の特長を活かすために、位置分解分析への適用を主

な目的として、大型放射光施設 SPring-8 において X 線マイクロビームの高度化や X 線顕微鏡システムの開発研究を進めてきた。これまでに、サブ 100 nm サイズの X 線マイクロビームの実用化とその応用研究、X 線顕微干涉計の開発と定量位相計測法の確立 (T. Koyama *et al.*, JJAP 2004)、200 nm の空間分解能を有する X 線マイクロ位相 CT の開発と非破壊 3 次元内部微細構造可視化を実現した (T. Koyama *et al.*, JJAP 2006)。また、10 nm スケールの空間分解能を実現するための新しい X 線光学素子の開発研究プロジェクトも進めている (JST 先端計測分析技術・機器開発事業; 平成 21 年度で終了)。

一方、粉末 X 線回折や X 線小角散乱などの構造分析法では、入射光がマイクロビームである必要は無く、サンプルへの入射強度を上げて実験データの精度を高めるために、緩やかに集光する X 線ビームが望ましい。放射光の X 線ビームラインでは、この目的のために全反射ミラーが広く用いられている。既存のビームラインに全反射ミラーを追加する場合、反射光学系なので出射ビームの方向が変わってしまい、ビームラインの大幅な改造が必要になる。仮に 2 枚を配置して平行出射にしてもオフセット分だけビーム位置が変わってしまう。さらに、調整機構を含めて全反射ミラーの導入自体にも多額の費用を要する。SPring-8 や PF などの放射光施設では、施設の存在価値を維持・向上するためにはビームラインの高度化が不可欠であるが、我が国の財政状況では現有施設の高度化の予算は期待できない。このような状況を打破するために、簡便かつ安価な X 線集光光学系の開発が望ましく、数年来その実現方法を模索してきた。

2. 研究の目的

本研究では、X 線を緩やかに集光する、放射光ビームライン用の屈折型 X 線光学素子 (微小プリズムアレイ) を開発する。透過配置で機能するため既存の放射光ビームラインの光軸上に挿入するだけで (光路変更を伴わないで)、簡便かつ安価に試料位置での光子密度を数倍向上させることが期待できる。これにより、極めて簡便かつ安価に既存ビームラインの高度化が可能となる。特に、入射ビームの微小化が必ずしも必要で無い粉末 X 線回折や X 線小角散乱ビームライン等の高度化に大きく寄与する。

3. 研究の方法

(1) 研究実施体制: 申請者 (籠島) と当該研究室の高野助教 (連携研究者) が連携・協力して本研究を遂行する。大学院生が実験補助を行う。

(2) 研究項目と進め方: 微小プリズムアレイ

(PA) の開発を①設計、②製作、③性能評価の 3 項目に分けて、効率的・効果的に研究を推進する。

①設計 (籠島が担当): PA の材質 (アクリル) の屈折率をもとにスネルの法則を用いて PA の溝の先端角を決定する。溝数、溝ピッチ、溝深さ、先端角、傾斜角などの必須パラメータを最適化する。幾何光学に基づく光線追跡プログラムを開発し、試料位置でのビームサイズや利得などの主要な性能の期待値の計算精度を高める。

②製作 (業者に依頼): 金型を製作し、アクリル板にプレス加工によって PA を整形する。

③性能評価 (主担当: 高野、副担当: 籠島、実験補助: 大学院生)

- ・光学顕微鏡・SEM による断面形状の観察・評価: PA が設計値通りに成型されているか、光学顕微鏡ないし SEM で PA 断面の拡大像を撮影し、寸法を測定する。設計値と異なる場合には、製作者者にフィードバックし、金型を再製作する。

- ・放射光を用いた集光特性評価: 目標とする焦点距離は 10~20 m である。SPring-8 の兵庫県 ID ビームライン (BL24XU) の実験ハッチ A1 と A2 はタンデム構成となっており、最長 15 m 程度のカメラ長が得られる。A1 ハッチ上流部に FL を置き、A2 ハッチ下流部に測定系を設置して、PA が正しく集光素子として機能しているか、屈折角や焦点距離は所望の値になっているかを確認、ビームサイズ、入射強度の利得等を測定する。

4. 研究成果

①設計: PA 用の光線追跡プログラムを開発した。光源は SPring-8 のアンジュレタ放射光を前提としているが、他の光源も適用可能な仕様とした。プロトタイプ PA を設計した。図 1 と表 1 に設計パラメータを示す。

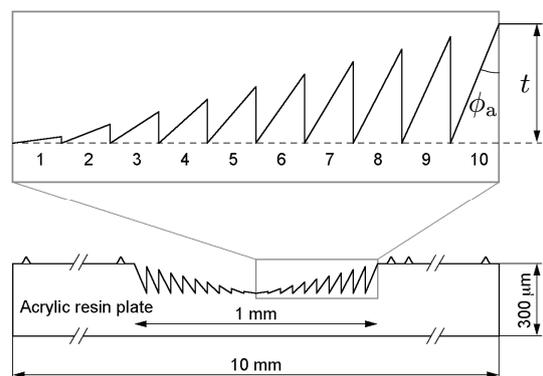


図 1. PA の設計図

50 μm 幅の微小直角プリズム 10 個を、プリズムの頂角が外側へ向かうほど小さく (鋭角に) なる PA を対向配置させる設計とした。

表 1. PA の設計パラメータ

プリズム No.	頂角 (度)	厚さ (μm)
1	82.66	6
2	68.89	19
3	57.22	32
4	48.01	45
5	40.81	58
6	35.23	71
7	30.85	84
8	27.39	97
9	24.58	109
10	22.22	122

従ってビーム受光幅は 1 mm であり、これは SPring-8 のアンジュレータビームラインの標準的なビームサイズに合わせた。最も外側（最も鋭角）のプリズムの頂角は 22.2 度に設計した。これは現状の加工技術の限界に対応する。傾斜角を 80.5 度とすれば実効的な頂角は 3.6 度となり、傾斜配置によって頂角の鋭角化が図れる。プリズム材には 300 μm 厚の亚克力板を用いた。X線のエネルギーが 10 keV のとき、傾斜角を 80.5 度とすれば焦点距離は 12 m となり、緩やかな集光が可能となる。

②製作：図 2 に製作したプロトタイプの PA の電子顕微鏡写真を示す。比較的精密に製作されていることがわかる。

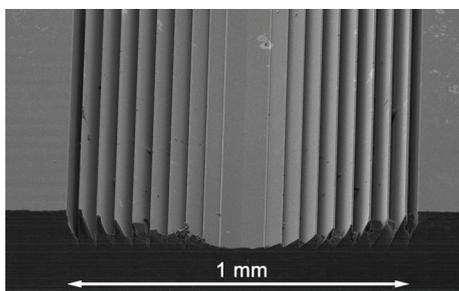


図 2. PA の電子顕微鏡写真

③性能評価：1 つによる一次元集光と 2 つの直交配置による 2 次元集光についての集光特性評価実験を行った。その結果を図 3 に示す。プリズムアレイ 1 個による縦方向のみの 1 次元集光で 136 μm (図 3 (c))、プリズムアレイ 2 個をタンデム直交配置 (KB 配置) にした 2 次元集光で縦 133 μm 、横 365 μm (図 3 (d)) のビームサイズを得た。光子密度の利得は 3.1 であった。光線追跡によって期待できる集光性能には及ばないものの、良好な集光特性が得られた。以上より、ビームライン粗集光素子としての原理検証に成功した。

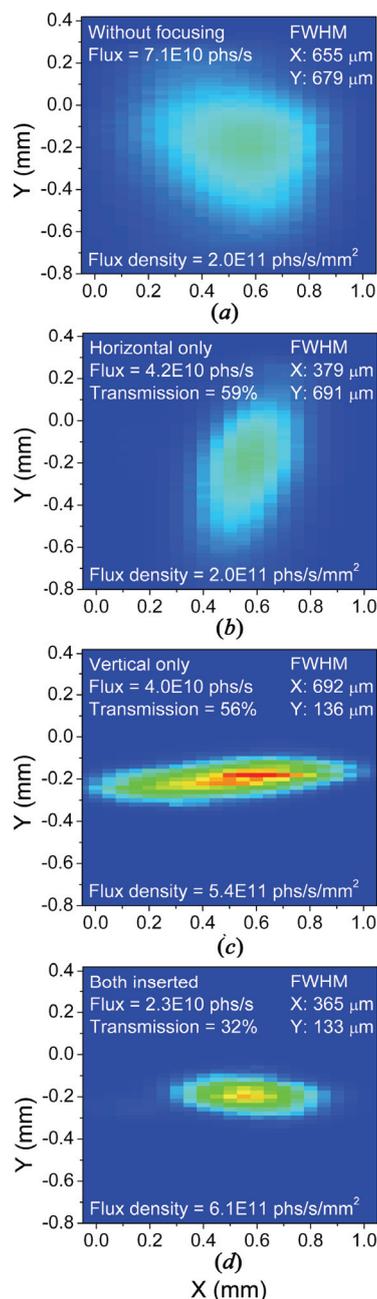


図 3. PA による集光ビームプロファイル (a) PA 無し, (b) 横方向のみ集光, (c) 縦方向のみ集光, (d) 縦横両方向集光

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 0 件) ただし査読中 1 件

〔学会発表〕 (計 2 件)

① 籙島 靖, 高野秀和, 竹田晋吾
「傾斜式微小プリズムアレイ X線粗集光素子の開発」

第 11 回 X線結像光学シンポジウム, 2011 年 11 月 4 日, 東北大学 (宮城県)

②籠島 靖, 高野秀和, 竹田晋吾
「放射光 X 線ビームライン用粗集光素子の開発」

第 25 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2012 年 1 月 9 日, 鳥栖市民文化会館・中央公民館 (佐賀県)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: X 線屈折方法

発明者: 籠島 靖

権利者: 兵庫県

種類: 特許

番号: 特願 2011-034166

出願年月日: 2011 年 2 月 21 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等: 無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

籠島 靖 (KAGOSHIMA YASUSHI)

兵庫県立大学・大学院物質理学研究科・教授

研究者番号: 10224370

(2) 研究分担者: なし

(3) 連携研究者

高野 秀和 (TAKANO HIDEKAZU)

兵庫県立大学・大学院物質理学研究科・助教

研究者番号: 50366548