

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13397

研究課題名(和文) 準結晶パターンによるX線集光素子に関する基礎研究

研究課題名(英文) Research on X-Ray optics by quasi-crystal pattern

研究代表者

伊藤 雅英 (ITO, Masahide)

筑波大学・数理解物質系・教授

研究者番号：30150874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：ウォルターミラーやゾーンプレートなどの軟X線域の集光光学素子は光の利用効率が低く開口数も小さいため、顕微システムなどにおいて明るい像が得られず、また解像度を上げることが困難となっている。本研究の目的は、準結晶パターンからの回折光が波長以下のスポットを作成できることに着目し、X線を原子オーダーのスポットに集光することができる新しい光学素子を開発することである。本報告では、準結晶集光素子のシミュレーションによる波長オーダーの集光確認、作成した集光素子による軟X線の集光の実験的な確認の二つを目標とした。準結晶の集光原理を明らかにすると同時に、原理的に波長レベルでの集光が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：As optical components in soft X-ray region, such as Wolter-type mirror and/or Fresnel zone-plate lens, have a small numerical aperture, it is difficult to get a bright and high resolution images in microscope system. The purpose of this research is to develop the new focusing optical element to get X-ray spot of an atomic order using a quasicrystal pattern. In this research we simulate the focusing effect of quasicrystal optical element with computer. We also made quasicrystal pattern by using a focused ion beam equipment and performed an irradiation experiment using a synchrotron facility. We clarified the principle of focusing effect of quasicrystal optical elements and showed the possibility to confine the X-ray upto the wavelength level in principle.

研究分野：応用光学

キーワード：電磁場解析 準結晶 X線集光素子 回折限界

1. 研究開始当初の背景

誘電体はX線領域で屈折率がほぼ1であるため可視光のように多くのレンズを組み合わせた高度な屈折光学性を設計することができない。現在は、全反射を用いたウォルターミラーやフレネルゾーンプレートが用いられているが、その集光特性は回折限界に遠く及ばない。ウォルターミラーに代表される大きな入射角における全反射を用いた光学素子は、作成の面精度、光利用効率の低さ、開口数 (NA) の低さなどで微小なスポットを作ることは困難である。また、フレネルゾーンプレートはNAも小さく、0次光、-1次光などのバックグラウンドが大きく、コントラストが低い。一方可視光や赤外域では準結晶パターンの開口による回折光学素子を用いると、波長以下の大きさの集光スポットを得ることができることが確認されている。同様の素子をX線領域に適用することで、従来にない小さなX線スポットを作成できる可能性があった。

2. 研究の目的

軟X線光源の品質の向上により、比較的大きなパワーで高い空間的なコヒーレンスを持つものを容易に使うことができるようになってきた。一方、ウォルターミラーやゾーンプレートなどの軟X線域の集光光学素子は光の利用効率の低く開口数も小さいため、顕微システムなどにおいて明るい像が得られず、また解像度を上げることが困難となっている。本研究の目的は、準結晶パターンからの回折光が波長以下のスポットを作ることができることに着目し、X線を小さなスポットに集光することができる新しい光学素子を開発することである。

3. 研究の方法

計算方法: 解析幾何光学、フラウンホーファー近似、フレネル・キルヒホッフ近似など、近似レベルの異なる計算手法を使い分けることで、現実的な計算時間で結果を出した。集光径を波長レベルにするためには、穴の径・間隔も数波長レベルに小さく、焦点距離は数百波長以下とする。この条件では、時間はかかるが、計算精度の高いフレネル・キルヒホッフ回折積分を用いた。

試料 (準結晶集光素子): 窒化ケイ素 100nm、クロム 5nm、白金 100nm で構成される3層膜に、FIBで301個穴をあけた (図1ab)。直径 $1.56 \mu\text{m}$ 、準結晶の格子定数 lca は $6.16 \mu\text{m}$ である。格子定数に $(2/5)^{1/2}$ を掛けると中心の穴と周りの穴の間隔になる (図1c)。

計測方法: 高エネルギー加速器研究機構の放射光の真空ラインで、集光素子の散乱光を CCD カメラで計測した。光源、ピンホール1 (1mm)、準結晶集光素子、ピンホール2 (100 μm)、CCDの順で配置し、ピンホール2を3軸方向に動かした。

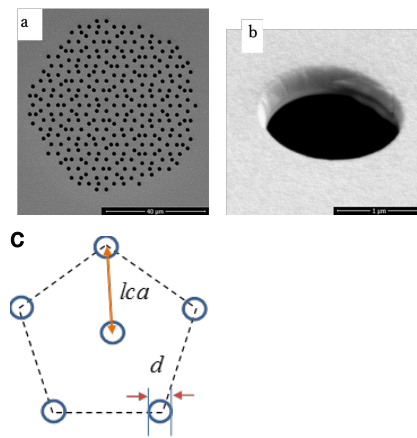


図1 準結晶パターンと穴の形状。a)全体像 b)穴の拡大像 c) 準結晶の格子定数 lca と穴の径 d 。

4. 研究成果

(1) 放射光を用い、波長 10nm の入射光について集光の様子を、CCD カメラを用いて観察した。シミュレーションと実験結果はよく一致し、実験および計算の信頼性を確認できた。

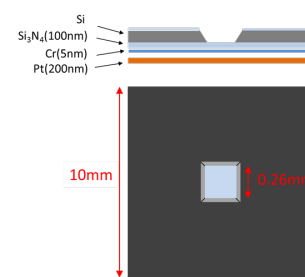
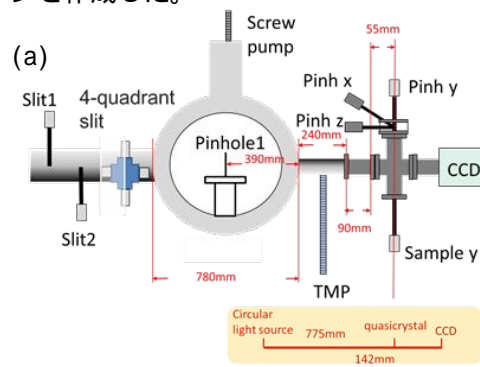


図2 準結晶光学素子に用いた基板。中心の膜厚は 305nm で、そこに図1の準結晶パターンを作成した。



TMP (ターボ分子ポンプ)

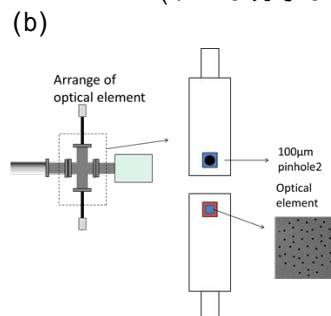


図3 軟X線計測用光学システム (a) 全体の概要 (b) 十字管と光学素子の駆動系

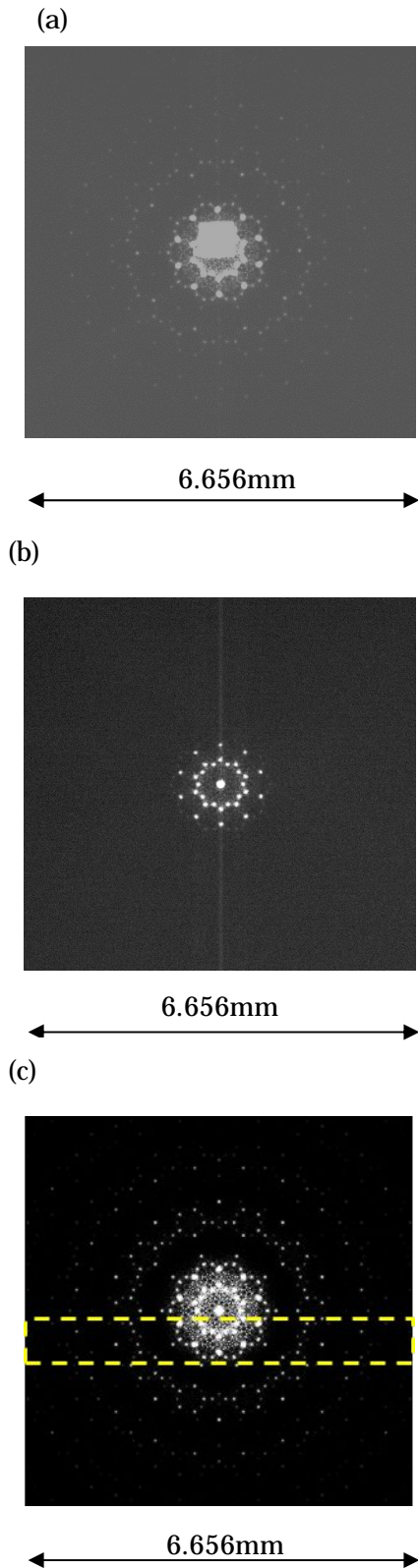


図4 . CCD から 142mm の距離における散乱パターン。(a) Pinhole 2 なし。(b) 100 μm の pinhole 2 を準結晶の後ろに挿入。(c) (a) に対応するピンホールなしのシミュレーションパターン。黄色い点線は後述の図 5 の投影プロフィールの領域に対応する。

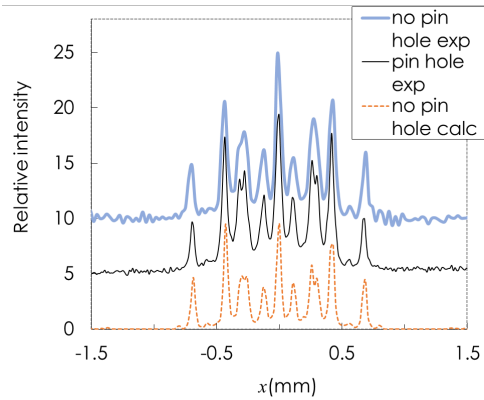


図5 図4に記載の領域の散乱パターンの投影プロフィール。

図1 ~ 3 に試料と装置を記載した。図4 ab が実験結果、図4 c が計算結果である。散乱パターンの計算はフラウンホーファー近似で行った。フラウンホーファー近似では、電場の位相と試料から CCD までの距離を考慮する。

準結晶集光素子による軟 X 線の集光パターンを初めて得ることができた。また、そのパターンは計算結果とよく一致した。

(2) シミュレーションで準結晶集光素子の集光効率・集光径と設計条件の関係を明らかにし、集光径を回折限界程度まで小さくできることを見出した。設計条件としては、孔径、穴間隔、穴数を検討した。シミュレーション手法にはフレネル・キルヒホッフ回折積分を用いた。フレネル・キルヒホッフ回折積分は、フラウンホーファー近似より計算時間がかかるが、試料から CCD までの距離が 10 ~ 150 波長と短い場合でも、計算できるのが特徴である。

今後、準結晶集光素子の作成技術の向上や 3 次元の原子配置を用いた集光素子の作成により、波長オーダーの集光径を得ることが期待される。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計 2 件 (うち査読あり 2 件 / うち国際共著 0 件 / うちオープンアクセス 1 件)

T. Hoshino, N. Watanabe, S. Aoki, K. Sakurai, and M. Itoh

Cross-sectional particle measurement in the resonance domain on the substrate through scatterometry, Opt. Express, 査読有, Vol.25, 2017, pp. 26329-26348, <https://doi.org/10.1364/OE.25.026329>

T. Hoshino and M. Itoh
Cross-sectional shape evaluation of a
particle by scatterometry
Opt. Commun., Vol. 4, No.359, 2016, pp.
240-244
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.09.063>

[学会発表](計 6 件)

1. 発表者名
渡辺紀生、星野鉄哉、伊賀裕士、李維率、
青木貞雄、伊藤雅英
2. 発表標題
ペンローズパターン・ピンホールアレイから
の軟X線の回折
3. 学会等名
第 14 回 X 線結像光学シンポジウム
4. 発表年
2017 年 11 月 29 日-11 月 30 日
発表場所
筑波大学つくばキャンパス(茨城県つくば
市)

1. 発表者名
伊賀 裕士、李 維率、深水 高明、星野 鉄哉、
渡辺 紀生、青木貞雄、伊藤雅英
2. 発表標題
準結晶構造を用いた軟X線用集光素子の設計
3. 学会等名
Optics & Photonics Japan 2017
4. 発表年
2017 年 10 月 30 日~11 月 2 日
発表場所
筑波大学・東京キャンパス文京校舎

1. 発表者名
李 維率、伊賀 裕士、深水 高明、星野 鉄哉、
渡辺 紀生、青木 貞雄、伊藤 雅英
2. 発表標題
"X 線用準結晶集光素子の設計"
3. 学会等名
第 78 回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年
2017 年 9 月 5 日~9 月 8 日
発表場所
福岡 国際会議場

1. 発表者名
深水 高明、李 維率、星野 鉄哉、杉坂 純一
郎、渡辺 紀生、青木 貞雄、伊藤 雅英
2. 発表標題
"準結晶パターンを用いた集光素子の作製"
3. 学会等名
Optics & Photonics Japan 2016
4. 発表年

2016 年 10 月 30 日 - 11 月 02 日

発表場所
筑波大学(東京都文京区大塚)

1. 発表者名
深水 高明、李 維率、星野 鉄哉、杉坂 純一
郎、渡辺 紀生、青木 貞雄、伊藤 雅英
2. 発表標題
"X 線用準結晶集光素子の設計"
3. 学会等名
第 63 回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年
2016 年 03 月 19 日 - 3 月 22 日
発表場所
東京工業大学 大岡山キャンパス(東京都
目黒区)

1. 発表者名
T. Hoshino, T. Fukamizu, I. Li, J. Sugisaka,
N. Watanabe, S. Aoki and M. Itoh
2. 発表標題
Design of quasicrystal structure for X-ray
focusing
3. 学会等名
第 78 回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年
2016 年 05 月 18 日
発表場所
発表場所パシフィコ横浜(神奈川県横浜市西
区)

[産業財産権]
出願状況(計 1 件)

名称: 光計測システムおよび光計測方法
発明者: 星野鉄哉、渡辺紀生、青木貞雄、桜
井健次、伊藤雅英
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特許願 2016-204385 号
出願年月日 平成 28 年 10 月 18 日
出願年 2016
国内外の別: 国内

取得状況(計 1 件)

名称: 光散乱体の光学的測定方法、光学的測
定装置及び光学的記録媒体
発明者: 伊藤雅英、谷田貝豊彦、星野鉄哉
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特許第 6183826 号
出願年月日: 平成 25 年 3 月 12 日
国内外の別: 国内

6 . 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 雅英 (ITOH, Masahide)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号 : 3 0 1 5 0 8 7 4

(2)研究分担者

青木 貞雄 (AOKI, Sadao)
筑波大学・数理物質系・名誉教授
研究者番号 : 5 0 0 1 6 8 0 4