

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 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22760039

研究課題名（和文）ZnO 結晶を用いた EUV 光イメージングデバイスの開発

研究課題名（英文）Development of EUV imaging device using ZnO crystal

研究代表者

中里 智治（NAKAZATO TOMOHARU）

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員

研究者番号：10467508

研究成果の概要（和文）：

軟 X 線レーザーをフレネルゾーンプレートで約 1 μm に集光し、発光パターンをシュバルツシルト対物レンズ、カメラ用レンズ、EB-CCD カメラに 2 枚の凸レンズで構成されるテレスコープを組み込んだ拡大光学系で撮影した。発光パターン径は水平方向が 5.0 μm 、垂直方向が 4.7 μm であった。見積もられるスポット径との差は拡大光学系の空間分解能で制限されており、テレスコープ用レンズの組み合わせでサブミクロンの空間分解能を実現できることを実証した。

研究成果の概要（英文）：

Ni-like Ag ion plasma laser was focused to 1 μm on ZnO crystal. Emission pattern were successfully recorded by a magnifier which consists of Schwarzschild objective lens, camera lens EB-CCD and two lenses for telescope. The waist radii of emission pattern were 5.0 μm and 4.7 μm in the horizontal and vertical axis, respectively. Spatial resolution is limited by the magnifier. These results show that spatial resolution of this system could reach to sub-micron with selecting two lenses for telescope.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総 計	2,800,000	840,000	3,640,000

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：光学素子・装置・材料・EUV イメージング

1. 研究開始当初の背景

EUV 光は次世代リソグラフィ用光源として注目されている光源である。次世代リソグラフィ応用進展のためには、診断技術として十分な大きさで高効率・高速な EUV 光イメージングデバイスが必要不可欠である。イメージ

ングデバイスを含め光学素子の開発には素子材料の光学特性を知ることが重要であるが、近年になり効率的な EUV 光源の整備が進み[1, 2]、EUV 領域における素子材料の光学特性研究が可能となった。そこで、我々の研究グループでは、ZnO 結晶の EUV 光シンチレーター応用を目指し、ZnO の EUV 光シンチレー

ター特性を調べるために、13.9 nm の EUV レーザーを励起源に用いてストリーク画像を撮影した[3, 4]。なお、EUV レーザーのパルスエネルギーは 0.5 μJ 程度、パルス長 7 ps である。図 1 に得られたストリーク像および発光寿命を示す。また、Nd ガラスレーザーの 3 次高調波 351 nm (パルス長 100 ps) の紫外光 (UV 光) を励起源とするストリーク像と発光寿命も図 1 に併せて示す。EUV 光・UV 光励起の両方の場合で、波長 380 nm 付近にエキシトン由来による発光が観察された。さらに、両者ともに発光寿命が 1 ns と 3 ns の 2 成分の寄与があることを明らかにした。励起光源によらず発光特性が同じで短寿命であることは興味深い結果であり、シンチレーターとして重要な特性である。レーザープラズマ EUV 光源は、リソグラフィ応用上でナノ秒の放射時間をもつことから、発光寿命はその検出に十分なほどに短い。つまり、この研究により ZnO が EUV シンチレーター素子として有力であり、将来的なリソグラフィ・イメージング応用上で極めて有望であることが明らかにされた。また、この長寿命成分でも 3 ns という発光寿命の短さ、単結晶であることは、ZnO 結晶が高い空間分解能を持つ EUV 受光素子となりうることを示している。

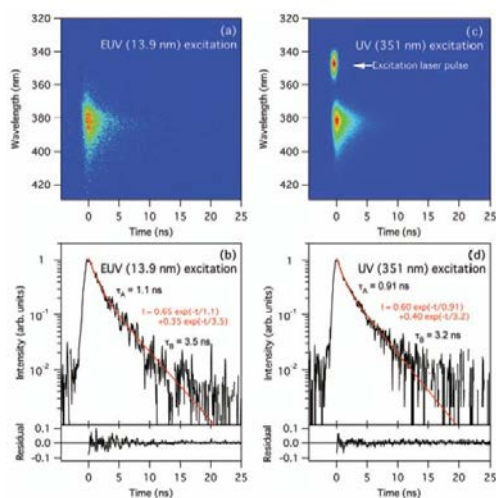


図 1 EUV 光・UV 光励起による ZnO のストリーク像と発光寿命。(a)、(b)はそれぞれ EUV 光励起によるストリーク像と解析の結果得られた発光寿命、(c)、(d)はそれぞれ 351 nm 励起によるストリーク像と解析の結果得られた発光寿命である。

2. 研究の目的

我々のグループが明らかにした高い空間分解能を持つ EUV 受光素子となりうること、大型で純度の高い結晶が作成可能であることは、ZnO 結晶を利用することで高空間分解

能・低コストの EUV イメージングデバイスを実現しうることを示している。そこで、本研究では ZnO 結晶を受光素子に用いた EUV 光イメージングデバイスの開発を行った。具体的には、本研究期間では ZnO 結晶を用いた EUV 光イメージングデバイスの実証テスト、さらには既存の EUV 光イメージングデバイスである X 線 CCD カメラと同程度の空間分解能(数 μm –10 μm)までの性能向上を目指した。

3. 研究の方法

初年度はイメージングデバイスとして最も重要な指標の一つは空間分解能であり、本研究でも実用化に耐えうる空間分解能の実現を目指す。しかし、ZnO を用いたイメージングという手法は従来にない手法であり、当然画像の取得すら今だなされていないのが現状である。そこで、まずフィジビリティテストとして、EUV 光イメージングデバイスのプロトタイプを作成し、画像取得が可能であることの証明を目指した。

図 2 にイメージングデバイスの模式図を示す。EUV 光を ZnO 結晶に照射すると、ZnO 結晶の一部が励起され、励起された個所が発光する。この発光を CCD カメラで撮像することにより EUV 光のビームパターン画像の取得を目指す。ただし、平成 22 年度はビームパターン取得を最優先とするため、EUV 光集光用にはゾーンプレートに代わり多層膜反射鏡を用いた。実験は、日本原子力開発機構関西光科学研究所が所有する EUV レーザーシステムを利用した。図 3 に装置概略図を示す。

原理実証の後、平成 23 年度は空間分解能の向上を目指した。空間分解能を調べるためには、照射する EUV 光をよりタイトに絞る必要がある。そこで、平成 23 年度は、図 2 の通りに EUV 光集光用にゾーンプレートをを用い

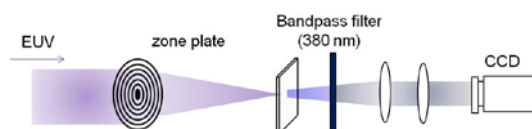


図 2 ZnO を用いた EUV 光イメージングデバイスの模式図

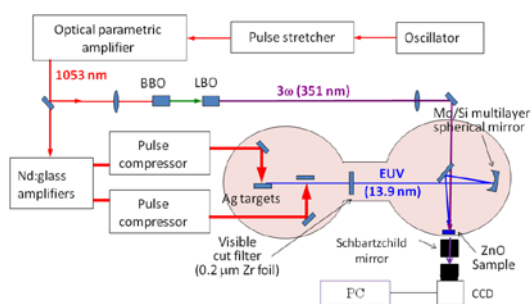


図 3 装置概略図

る。図3中で、Mo/Si multilayer spherical mirror の代わりにゾーンプレートを利用し、よりタイトにEUV光を集光した。軟X線レーザー集光用光学素子(平成22年度の場合は多層膜球面鏡、23年度の場合はゾーンプレート)を軟X線レーザーの光軸に沿って動かし、ZnO表面上のスポット径を変えながら発光パターンを撮影し、ビームプロファイルの評価を行った。

4. 研究成果

平成22年度はフィジビリティテストとして、EUV光イメージングデバイスのプロトタイプを作成し、画像取得が可能であることの証明を目指した。実験は、Ni様Agイオンプラズマからの波長13.9 nmの軟X線レーザーを所有する日本原子力研究開発機構関西光科学研究所で行った。実験には、厚さは1 mm、縦横は10 mm四方で両面研磨したZnO結晶を用いた。

励起光である軟X線レーザーはMo/Si多層膜球面鏡でZnO表面に集光される。その結果生じる励起子の発光パターンをシュバルツシルトミラー(Ealing社製25-0514、N.A.: 0.40、焦点距離: 8.0 mm、ワーキングディスタンス: 14.5 mm、倍率: 25)、カメラ用レンズ(UV NIKKOR、F値: 4.5、焦点距離: 105 mm)、CCDカメラ(TAKEX NC300AIR、画素数: 768 (H) x 494 (V) pixels、ピクセルサイズ: 8.4 (H) x 9.8 (V) mm/pixel)で構成される拡大光学系で撮影した。その結果、発光パターンのシングルショット撮影に成功した。発光パターン径は水平方向が42 μm 、垂直方向が23 μm であった。水平方向と垂直方向でパターン径が異なる原因として、X線レーザーの発散角が水平・垂直で異なることが考えられる。

また、励起子拡散を抑えて空間分解能の向上を図るため、ZnOシンチレーターに不純物を添加し高速化を図った。SCSS試験加速器から自由電子レーザーとTi:Sapphireレーザーの相互ジッターが3 ps程度の精度で測定できるほどに高速化に成功した。

続いて23年度は空間分解能評価を目指して、軟X線レーザーをより1ミクロン程度に集光しその発光パターンを撮影した。実験は、Ni様Agイオンプラズマからの波長13.9 nmの軟X線レーザーを所有する日本原子力研究開発機構関西光科学研究所で行った。実験には、厚さは1 mm、縦横は10 mm四方で両面研磨したZnO結晶を用いた。

励起光である軟X線レーザーはフレネルゾーンプレートでZnO表面に集光される。その結果生じる励起子の発光パターンをシュバルツシルトミラー(Ealing社製25-0514、N.A.: 0.40、焦点距離: 8.0 mm、ワーキン

グディスタンス: 14.5 mm、倍率: 25)、カメラ用レンズ(UV NIKKOR、F値: 4.5、焦点距離: 105 mm)、EB-CCDカメラ(浜松ホトニクス製C7190、画素数: 512 (H) x 512 (V) pixels、ピクセルサイズ: 24 (H) x 24 (V) mm/pixel)で構成される拡大光学系で撮影した。その結果、発光パターンのシングルショット撮影に成功した。軟X線レーザーの光軸に沿って集光鏡を動かした時の発光パターン形状の変化を図4に示す。ZnO結晶表面上に集光点が存在している場合ではビームが絞れているが、そこからずれるに従ってビームが広がっている様子が観測されている。集光点から外れた位置において発光パターン形状が非対称な原因は集光に用いた球面鏡

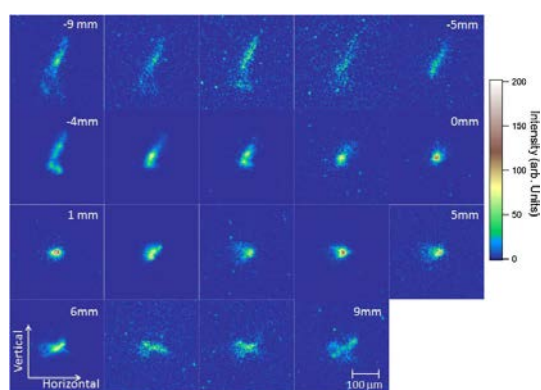


図4 多層膜球面鏡の位置を変えながら撮影したZnOの発光パターン。

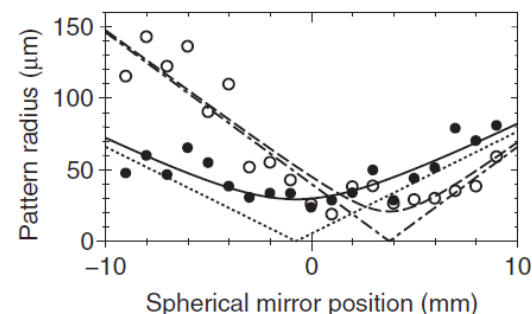


図5 多層膜球面鏡の位置を変えたときの発光パターン径。黒点が水平方向、白点が垂直方向である。

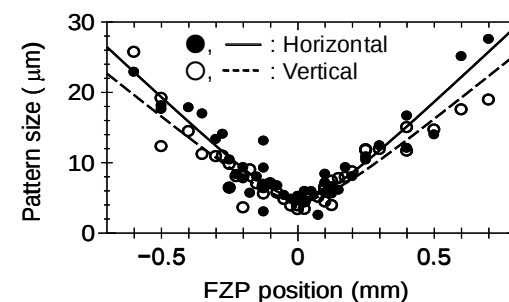


図6 ゾーンプレート集光における発光パターン径。

の収差の影響と考えられる。図4の発光パターンのパターン径を解析し、集光鏡の位置の関数としてプロットしたものが図5である。水平方向、垂直方向それぞれの場合で、集光点の位置におけるビーム径が9 μm と21 μm 、発散角が7.2と11 mrad、M2が47と50であった。これらの結果は光源の仕様と良く一致しており、軟X線領域におけるZnO結晶のin-situイメージングデバイスとしてビームプロファイル評価に使用可能であることを実証した。

さらに、この拡大光学系に2枚のレンズ(焦点距離30 cmと10 cm)で構成されるテレスコープを組み込み像を拡大した。図6に札幌いした発光パターンを解析し、パターン径を集光用ゾーンプレート(Zone Plate)の位置の関数としてプロットしたものを示す。その結果、発光パターン径は水平方向が5.0 μm 、垂直方向が4.7 μm であった。見積もられるスポット径との差は拡大光学系の空間分解能で制限されており、テレスコープとして組み込むレンズの組み合わせを変えることでサブミクロン程度の空間分解能は実現できることを明らかにした。

【References】

- [1] Y. Shimada et al., Appl. Phys. Lett. 86 (2005) 051501
- [2] S. Fujioka et al., Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 235004
- [3] Y. Furukawa et al., J. Opt. Soc. Am. B 25 (2008) B118-B121
- [4] M. Tanaka et al., Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 231117

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3件)

- ① T. Nakazato et al., Jpn. J. Appl. Phys. **50** (2010) 122202 査読有
- ② K. Yamanoi et al., Opt. Mater. **32** (2010) 1305 査読有
- ③ T. Shimizu et al., Rev. Sci. Instrum. **81** (2010) 03102. 査読有

〔学会発表〕(計5件)

- ① T. Nakazato et al. "Potential high-spatial resolution in-situ imaging of soft X-ray laser pulses with ZnO crystal," 11th International Conference on Inorganic Scintillators and their Applications, Sep. 2011 in Germany.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中里 智治 (NAKAZATO TOMOHARU)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員

研究者番号：10467508