



## 5.11 フレネルゾーンプレートを用いた X 線ナノビームの生成 Generation of X-ray Nano Beam with a Fresnel Zoneplate

川染 勇人、錦野 将元、永島 圭介、田中 桃子、岸本 牧、助川 鋼太

日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター

〒619-0215 京都府相楽郡木津町梅美台 8-1

Hayato KAWAZOME, Masaharu NISHIKINO, Keisuke NAGASIMA,

Momoko TANAKA, Maki KISHIMOTO, Kouta SUKEGAWA

Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment,

Japan Atomic Energy Research Institute

8-1 Umemidai Kizu-cho, Souraku-gun, Kyoto 619-0215 Japan

The soft x-ray laser, 13.9 nm in wavelength, with full spatial coherence has been focused with a fresnel zoneplate (FZP). The soft x-ray laser is generated with two gain media. The energy of the soft x-ray laser is about 2  $\mu$ J and the beam divergences at vertical and horizontal direction are 0.4 mrad and 2.3 mrad, respectively. We calculate numerically a far field image of the diffraction at about 480 mm after the FZP. A good agreement is obtained in the comparison between measured and calculated images. From the calculation, the intensity and diameter of the focused beam are estimated to be  $3 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> and 140 nm, respectively.

**Keywords : X-ray laser, Nano beam, Fresnel zoneplate , full spatial coherence**

### 1. はじめに

光量子科学研究センターでは、世界で初めてプラズマを増幅媒体とする空間フルコヒーレント軟 X 線レーザーの発振に成功した。軟 X 線レーザーは、ダブルターゲットにより発振され、波長 13.9 nm, 時間幅 8 ps, ビーム発散角 0.2 mrad という性質を有している[1, 2]. この軟 X 線レーザーは、X 線光学素子を用いて回折限界近傍までの集光が可能である。フレネルゾーンプレートを集光素子と用いた場合の数値計算の結果として、集光強度  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>, 集光径 150 nm を得ている(エネルギー:10  $\mu$ J, 発散角:0.2 mrad)[3]. このナノスケールの集光径を有する軟 X 線ビームは、物質の微細領域に対する局所照射、高空間分解能を有する X 線回折法による物質の構造研究、高強度軟 X 線レーザーにおける非線形光学過程等での利用、応用が期待できる。本研究では、フレネルゾーンプレートを用いた軟 X 線ナノビームの生成および利用ビームラインの構築を行った。

### 2. フレネルゾーンプレート及びナノビーム利用ビームライン

フレネルゾーンプレート(FZP:Fresnel Zoneplate)は、X線を透過させる間隙輪帯とX線を遮光する物質輪帯とを交互に同心円状に配置しており、回折現象を利用した X 線結像素子である。図1に用いた FZP

の顕微鏡拡大写真を示す。FZP のゾーン部は直径 275  $\mu\text{m}$  であり、一辺 500  $\mu\text{m}$  の正方形の SiN membrane 上に PMMA で形成されている。SiN membrane 及び PMMA の厚さは、それぞれ 100 nm, 170 nm である。波長 13.9 nm に対する焦点距離は 1.98 mm であり、ゾーン総数は 686、最外殻ゾーンの幅は 100 nm である。さらに、FZP 基盤は直径1インチのアルミニウム製サポートリングに固定されている。軟 X 線レーザーは、ゾーン部 (PMMA) を透過することができて、透過率は 0.33 である。また、透過する際に変化する位相は 1.97 rad である。通常、ゾーン部で入射光を完全に遮光するゾーンプレートを振幅型と呼んでおり、ゾーン部で透過する光に  $\pi$  の位相差をつけるものを位相型と呼んでいる。理想的な位相型ゾーンプレートは、理想的な振幅型ゾーンプレートに比べて、焦点位置において4倍の強度を得ることができる。PMMA をゾーン材質に用いた場合、ゾーン透過後に  $\pi$  の位相差を得るためには、267nm のゾーン厚さが必要であるが、このような厚さのゾーンを形成することは技術的に困難である。結果として、本研究で用いた FZP は位相型と振幅型の間接的な性質を持つものとなった。集光効率は、理想的な振幅型ゾーンプレートの2倍程度である。図2にナノビーム利用ビームラインの概略図を示す。ダブルターゲットにより発振された軟 X 線レーザーは多層膜ミラーにより反射されてナノビーム生成真空容器に入射される。第2ターゲットから多層膜ミラーまでの距離は 1950 mm であり、多層膜ミラーから FZP までの距離は 850 mm である。FZP に入射した軟 X 線レーザーは回折して、その遠視野像が、軟 X 線 CCD カメラにより測定される。FZP と軟 X 線 CCD カメラ間の距離は約 480 mm となる。尚、軟 X 線 CCD カメラは絶対感度の較正がなされており、軟 X 線のエネルギーを評価することが可能である。

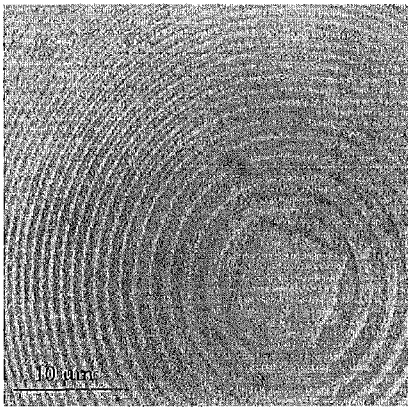


図1. フレネルゾーンプレート拡大写真。

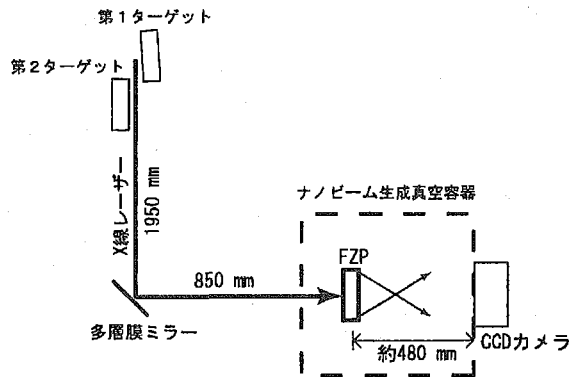


図2. ナノビーム利用ビームライン概略図。

### 3. 遠視野像と数値計算との比較

図3に軟 X 線 CCD カメラにより測定された FZP による回折の遠視野像を示す。測定において、軟 X 線レーザーのエネルギーは 2  $\mu\text{J}$  であり、発散角は垂直方向 0.4 mrad, 水平方向 1.9 mrad である。CCD カメラの1画素の大きさは 13  $\mu\text{m}$  であり、受光面領域は 13.3  $\times$  13.3 mm (1024  $\times$  1024 pixel) である。図において、FZP 中心部では CCD 素子のカウント数を越える光量が入射してしまったために信号が飽和してしまっているが、同心円状の回折パターンが鮮明に見て取れる。十文字のパターンは、SiN membrane が正方形であるために生じた回折パターンである。本研究では、測定された FZP による回折パターンの解析を行うための数値計算コードの作成を行った。数値計算では、FZP から球面波を発生させて、スクリーン上で、FZP の各位置からやって来る球面波の位相差を合計して、その振幅強度を求めた。FZP 上での球

面波発生位置の刻み幅は 10 nm で、スクリーン上での刻み幅は 50 nm である。実験結果との比較を行う場合は、スクリーンは CCD カメラに対応するので、スクリーン上での CCD カメラの 1 素子分 (13  $\mu\text{m}$ ) の範囲内で積算した振幅強度を計算した。また、球面波発生の際には、ゾーン (PMMA) 部での透過率及び位相変化量も考慮にいれている。図 4 に、数値計算の結果と図 3 において測定された回折パターンとの比較を示す。数値計算は、図において垂直方向のみの 1 次元で行った。また、FZP に入射するのは平面波であるという設定で計算を行っているので、実際の軟 X 線レーザーの発散角は考慮されていない。図 4 において、計算結果と測定結果は良い一致を示している。数値計算では完全な平面波が FZP に入射しているとしているが、この仮定において計算結果は、実験結果を良く再現している。これは、空間コヒーレンスの高い軟 X 線レーザーが実際に FZP に入射していることを示している。FZP 中心部における計算結果と測定結果の不一致は、Si membrane をそのまま透過してくる 0 次光の影響によるものと考えられる。図 3 の測定条件で FZP の焦点位置での集光強度及び集光径を評価した。強度の絶対値は、0 次光のエネルギーから算出した係数を基に評価した。数値計算から得られた集光ビーム径は 140 nm であり、強度は  $3 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  であった。強度は予測されたものよりも小さいものとなった。これは、軟 X 線レーザーのエネルギー自体が一桁ほど低いこと、発散角が大きいこと (特に水平方向) により FZP に有効的に入射する領域が減少したことに起因する。後者に対する改善策としては、第 2 ターゲットと FZP との距離を縮めることが挙げられ、FZP を 1000 mm 程度の位置に設置することで、強度は 100 倍程度大きくなる。

#### 4. まとめ

ダブルターゲットにより発振された空間フルコヒーレント軟 X 線レーザーをフレネルゾーンプレートにより集光し、ナノスケール軟 X 線ビームを生成した。発散各 0.4 mrad、エネルギー 2  $\mu\text{J}$  の軟 X 線レーザーを FZP に入射した時の遠視野像と数値計算による結果との比較を行い、両者の間により一致を得た。数値計算により見積もられた集光ビーム径は 140 nm であり、強度は  $3 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  であった。今後は、集光径の直接的な測定を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] M. Tanaka, M. Nishikino, et al., Opt. Lett. 28 (2003) 1680.
- [2] M. Nishikino, M. Tanaka, et al., Phys Rev. A 68 (2003) 061802(R).
- [3] K. Nagashima, et al., JAERI-R 2003-035.

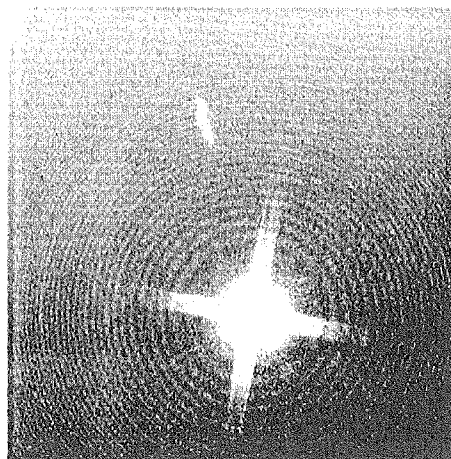


図 3. FZP による回折の遠視野像。

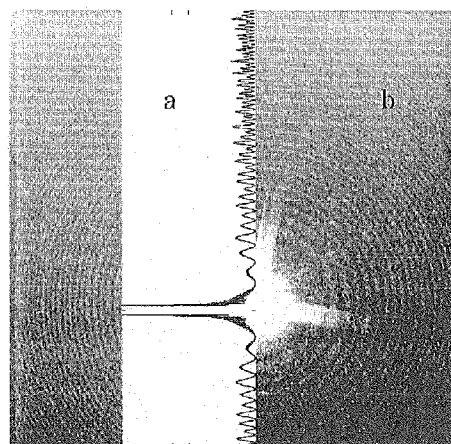


図 4. 数値計算と測定結果との比較。  
a) 1 次元計算による強度分布. b) 測定された CCD イメージ.