

# ナノファブリケーション技術によるX線光学素子開発 —フレネルゾーンプレート系X線集光素子について—

竹中 久貴\*・小山 貴久\*\*・高野 秀和\*\*\*・籠島 靖\*\*\*

## Current Status and Future Challenges for Fresnel Zone Plate Type X-Ray Focusing Devices

Hisataka TAKENAKA\*, Takahisa KOYAMA\*\*, Hidekazu TAKANO\*\*\* and Yasushi KAGOSHIMA\*\*\*

The development of Fresnel zone plate (FZP) type X-ray focusing devices with several-nm spatial resolution are strongly required for X-ray microscopy and other nano-analytical methods. This paper overviews current FZP fabrication techniques based on electron beam (EB) lithography and introduces new approaches for the fabrication of a multilayer FZP and multilayer Laue lens, which can overcome the limitations due to EB lithography of dense and high aspect ratio line patterns in FZP fabrication.

**Key words:** Fresnel zone plate, multilayer, Laue lens, X-ray, focusing

最小線幅が10 nm台に入ってきた最先端LSI素子に代表されるような微細素子や微小材料などの開発の進展に伴って、より微小な領域を観察したいという要望がますます強くなっている。このため、X線顕微鏡などのX線利用技術の進展も期待されている。X線顕微鏡の高分解能化に必要な微小サイズのX線を得るため、反射型、回折型、屈折型の集光素子が使用されている。現状で10 nm水準の集光が報告されている素子はカークパトリック・バエズ(Kirkpatrick-Baez; K-B)ミラーとフレネルゾーンプレートである。K-Bミラーでは、本特集の山内氏の解説でも述べられるように、大阪大学とSPring-8などのグループが高度の基板研磨技術や調整機構を用いて精密なK-Bミラーシステムを開発し、20 keVの硬X線を7 nm×8 nmに集光させるなど、集光性能は著しく進歩している<sup>1)</sup>。本稿では、もう一方の代表的な集光素子である、フレネルゾーンプレート系素子について紹介する。

### 1. フレネルゾーンプレートの構造

フレネルゾーンプレート(Fresnel zone plate, 以下

FZP)は、下記の式に従って配置した同心円状の輪帯による回折で集光して微小サイズの光(X線)を生成する集光素子である<sup>2)</sup>。光軸調整などの取り扱いが容易で、光軸上に集光され、数10 nmの集光ビームも得られるため、広く用いられている。

FZPは、図1に示すように、X線を吸収する領域と透過する領域が交互に同心円状に配置され、これら同心円(輪帯)の幅は外周に近いほど細くなる構造をしている。平行なX線がFZPに入射すると各輪帯の境界でこのX線が散乱されるが、X線の光軸上にある点(実は焦点)を決め、この点と各輪帯の境界との間の距離でX線の光路差が半波長の整数倍になるように輪帯の境界位置を決めると、この点でFZPの輪帯の各透過領域を通ってきたX線は強め合う。つまり、この点で集光されることになる。

一般に、FZPの輪帯の $n$ 番目の境界の半径は、次の式で表される。

$$r_n^2 = nf\lambda + n^2\lambda^2/4 \quad (1)$$

$\lambda$ は波長、 $f$ は焦点距離、 $r_n$ は $n$ 番目の境界の半径である。ここで、もし $f$ が $n\lambda/2$ よりはるかに大きい場合、右辺第

\* (株)トヤマ (〒252-0003 座間市ひばりが丘4-13-16) E-mail: takenaka@toyama-jp.com

\*\* 公益財団法人高輝度光科学研究センター (〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1)

\*\*\* 兵庫県立大学大学院物質理学研究科 (〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町光都3-2-1)

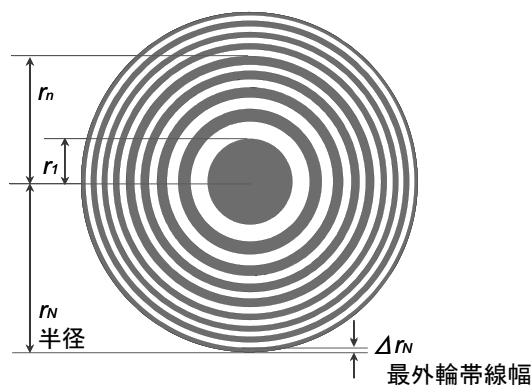


図1 フレネルゾーンプレートの構造.

2項は無視できる. また, 輪帯数および焦点距離は,

$$f = 4N(\Delta r_N)^2 / \lambda \quad (2)$$

で与えられる.  $N$ は総輪帯数,  $\Delta r_N$ は最外輪帯の線幅である. FZPの空間分解能  $R$ はレイリーの解像限界の式とFZPの開口数の式から

$$R = 1.22 \Delta r_N \quad (3)$$

と求められる. この式から, 空間分解能 (平行光を入射したときの集光サイズ) は, 最外輪帯の線幅 (形成された最も細い輪帯の線幅) の1.22倍となることがわかる. つまり, FZPによるX線の集光サイズは, FZPの最外輪帯線幅と同程度となる. また, 上記の式から使用する波長, 所望の焦点距離, 所望の空間分解能 (集光サイズ) が決まれば, 必要なFZPの構造が求まることになる.

## 2. 電子ビーム露光によるフレネルゾーンプレートの作製技術

FZPの分解能は上記のように最外輪帯の線幅程度になるため, FZPの高分解能化にはこの線幅を小さくする必要がある. また, 硬X線に適用するためには, 吸収体のパターンを硬X線が透過しすぎないように, ある程度の厚みが必要になる. 現状では, 膜厚100~200 nm程度, 最外輪帯線幅が数10 nmで形成されることが多い. FZP作製には, 通常, 電子ビーム露光 (EB露光: electron beam lithography) が利用されている. これは, EB露光法が微細加工に非常に適しているからである.

EB露光法を用いたFZPの基本的な作製方法をNTT-ATの例で紹介する<sup>3-5)</sup>. 図2に示すように, まず, Siウェハの上下両面にFZPのX線吸収体を支える支持膜 (メンブレン) となるSiC膜 (あるいはSiN膜) を形成し, その片側の膜面にX線吸収体となるTa膜を形成する. このTa膜の上にSiO<sub>2</sub>膜を形成し, さらに, このSiO<sub>2</sub>膜上にレジストを塗布する. このレジストに, EB露光でFZPの輪帯パ

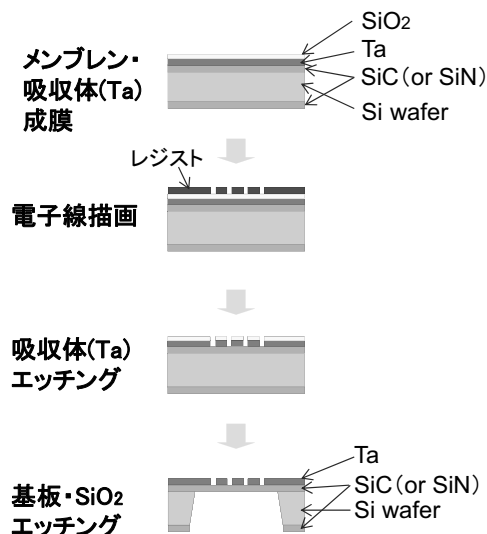


図2 電子ビーム描画法を用いたフレネルゾーンプレート作製工程.

ターンを描画する. EB露光されたレジストを現像して, レジストにFZPの輪帯パターンを形成する. その後, この輪帯パターンが形成されたレジストパターンを利用し, 反応性イオンエッチングでSiO<sub>2</sub>パターンを形成する. 次に, このSiO<sub>2</sub>パターンをエッチングマスクにして, イオン流エッチングによってFZP構造のTa輪帯パターンを形成する. この後, Ta上に残存するSiO<sub>2</sub>と輪帯パターンの下にあるSiをエッチングで除去してFZPが完成する. なお, 以前は支持膜としてSiNが使用されていたが, 放射光施設で使用するX線の輝度が高くなってFZPの耐久性に問題が生じるようになったため, NTT-ATでは支持膜にSiNに代えて, 高X線耐性をもつSiCをX線吸収体の支持膜として使用することで, 耐久性を大幅に向上させている.

X線の集光効率を高めるには, X線吸収体に適切な厚みをもたせる必要がある. 通常, X線のエネルギーが高いほど, この吸収体の厚みを大きくしてX線を吸収させることが必要になる. しかし, 線幅が細くなるほど, また厚みが増すほど, アスペクト比とよばれるパターンの高さ (厚み) と線幅の比 (高さ/幅) が大きくなって加工が難しくなる. これは, 幅が極端に狭くて高いパターンは加工中に倒れやすいこと, また, FZPでは輪帯間の溝幅が中心部から外周部にかけて徐々に狭くなる構造をしているが, 溝幅が狭いところは, イオンで削って深い溝を形成していくときにイオンが溝の壁にぶつかり, 溝の底部に届きにくくなって, あまりエッチングされずに浅い溝となってしまう, FZP全面でのエッチングが不均一になりやすいこと, エッチング時のエッチングマスクと下地膜との選択比が十分にはとれないこと (マスクのエッチング量が少ないほ

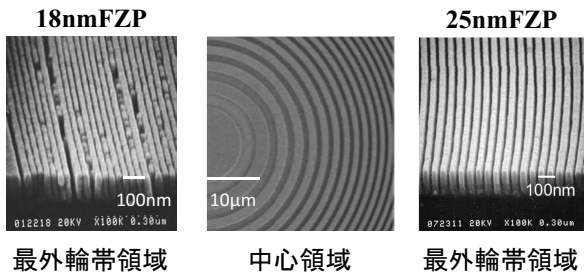


図3 最外輪帯線幅 18 nm および 25 nm のフレネルゾーンプレート  
の中心領域と最外輪帯領域。18 nm フレネルゾーンプレートでは、SEM 観察のためパターン上に Au を蒸着している。

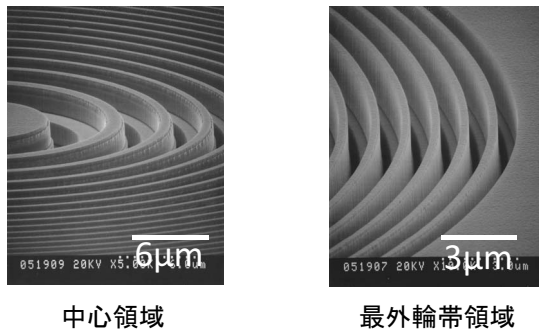


図4 2 段階構造フレネルゾーンプレートの中心領域と最外輪帯領域 (線幅 400 nm)。

ど、かつ、下地がエッチングされるほど、選択比が大きいのといわれる) などによる。NTT-AT では、現状、膜厚 100~200 nm 程度で最外輪帯線幅 18 nm (アスペクト比 3~6 程度) の細かいパターンが作製できている。作製された Ta 厚 125 nm, 最外輪帯線幅 25 nm, 直径 280 μm の FZP と最外輪帯線幅 18 nm の FZP の構造例を図 3 に示す。

一般的な FZP は吸収体が X 線が遮蔽されるため、また、正負の高次の回折光が発生するため、集光できる光量が少ない。しかし、FZP の吸収体の厚みを調整し、吸収体を透過する X 線が本来の透過部を通ってきた X 線に比べ 1/2 波長分位相変化させると、これらの X 線が強め合って集光効率が上がる。この FZP は位相型 FZP とよばれる。FZP 断面を直角三角形に近い鋸歯形状にすると、この位相型 FZP 以上に X 線集光効率が上がる。この形状の FZP はキノフォーム型 FZP (あるいは blazed FZP) とよばれている<sup>6)</sup>。しかし、この形状を形成することが難しいので、キノフォーム型に近似させた多段型 FZP (階段状 FZP) の開発も行われている。NTT-AT の 2 段階構造の FZP 例を図 4 に示す。この FZP の最外輪帯線幅は 400 nm で、高さは 4 μm である。

EB 露光法を用いた FZP パターンの微細化に関して、例えば、KTH (Kungliga Tekniska Högskolan, Royal Institute of Technology) の H. M. Hertz, J. Reinspach らは、13 nm



図5 ダブルパターニング法の模式図 (W. Chao ら)。

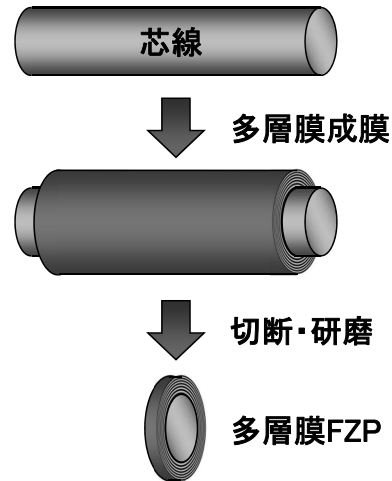


図6 多層膜フレネルゾーンプレートの作製法。

の最外輪帯線幅の FZP (材質 Ni (35 nm) / Ge (45 nm), 全厚 80 nm, 直径 19 μm) や 12 nm の最外輪帯線幅をもつ FZP (材質 W, 厚み 90 nm) を作製している<sup>7,8)</sup>。また、Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) の W. Chao らが、図 5 に示すようなダブルパターニング方法で微細化を進めている。これは、中心とそこから 1 つ置きに存在する吸収体輪帯パターン群と、その間に形成する吸収体輪帯パターン群を重ねて形成するという方法で、FZP の吸収体である金属層厚が薄いものの、10 nm 程度の最外輪帯線幅をもつ FZP (材質 Au, 厚み 30 nm, 直径 20 μm 程度) を実現している<sup>9,10)</sup>。

### 3. 多層膜利用のフレネルゾーンプレート作製技術

EB 露光法では、線幅が小さかつ高アスペクト比の FZP ほど製作が難しくなるので、高分解能 FZP (つまり最外輪帯線幅が小さい FZP) の吸収体の輪帯は厚みが非常に薄くなっている。そのために、使用する X 線のエネルギーが高くなると吸収体層を X 線がほとんど透過してしまう状態になり、X 線の集光効率が低くなる。そこで、Göttingen 大学の Schmahl らのグループによって、輪帯線幅が小さい場合でも吸収体を厚くする方法として、積層薄膜の断面構造を利用する方法が提案され、作製された<sup>11)</sup>。この方法は、図 6 に示すように、芯線上にスパッタリング法で



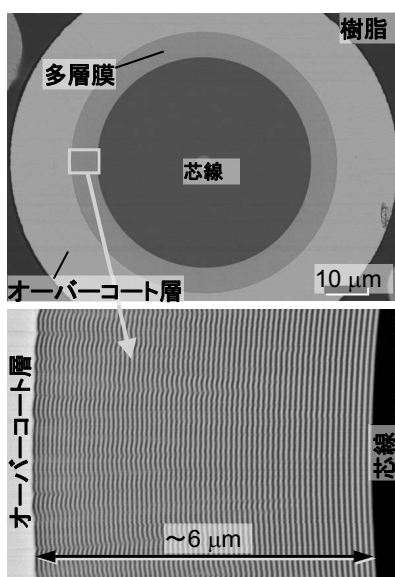


図7 多層膜フレネルゾーンプレートの断面構造例。

バームクーヘン状に多層膜を形成し、適切な厚みに切断、研磨して作製する。この方法の利点は、薄膜では一層の厚みを1 nm以下の膜厚でも形成することが可能なので、空間分解能を決める最外輪帯線幅を小さくできること、積層膜を光軸方向のどこで切断するかが自由なため、吸収体の厚みを希望の大きさにできることである。この方法で作製されるFZPは、sputtered-sliced FZP (SSFZP) や円形多層膜FZPなどとよばれている。日本ではアルバック (ULVAC, Inc.) とPhoton Factory等のグループによって手がけられ<sup>12)</sup>、産業技術総合研究所 (産総研) とSPRING-8などのグループで高度化が進められた<sup>13)</sup>。産総研やSPRING-8などのグループで作製された円形多層膜FZPでは100~200 keVの高エネルギーX線においても集光が確認され、100 keVで500 nmの集光特性が得られている。また、彼らは、2種類の材料 (AlとCu) の層間にこれらの材料の混合割合を段階的に変化させた層を形成することで、近似的にキノフォーム型の濃度分布をもたせた多層膜FZPも開発し、70 keVで50%を超える高い集光効率 (一次回折光) を得ている。

図7に兵庫県立大学とNTT-ATのチームにおいて作製された円形多層膜FZPのSEM観察像を示す。芯線側第一層である最大輪帯線幅 (層厚) が50.0 nmで外周に向かって設計値に沿って徐々に線幅を小さくし、最外輪帯線幅を40.4 nmとしている。なお、光軸方向の厚みの設計値は32 μmである。このFZPでの20 keVのX線による一次回折光の集光サイズは、ナイフエッジスキュン法による測定で110 nm (半値全幅: FWHM) であった。この値は線像分布関数のFWHMである。作製した円形多層膜FZPは輪帯

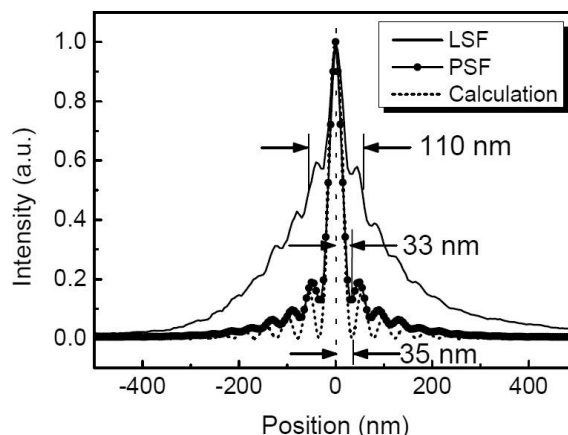


図8 多層膜フレネルゾーンプレートの集光特性。

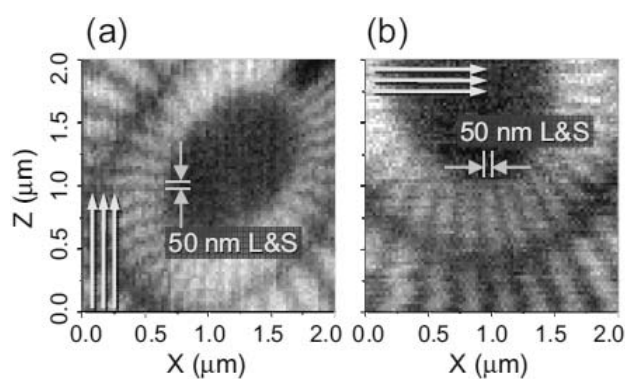


図9 ジーメンススターパターンの二次元スキャン像。50 nm L&Sは測定部パターンが50 nmの線幅と溝幅であることを意味する。3本の矢印はイメージングのための試料の走査方向を示している。

開口であるので、副極大の影響が大きく、線像分布関数のFWHMは点像分布関数のそれよりかなり大きくなる。そこで、コンピュータトモグラフィーの原理を応用して、線像分布関数 (line spread function: LSF) から点像分布関数 (point spread function: PSF) を求めた結果、点像分布関数の広がり (主極大と第一極小間の距離: 円形開口のエアリーデスク半径に相当) は33 nmであった<sup>14)</sup>。この結果を図8に示す。この円形多層膜FZPでジーメンススターパターンを観察した結果を図9に示す。このパターンの最小線幅である50 nmパターンが観察されている。

多層膜構造による高空間分解能に加え、ブラッグ回折効果により、通常のFZPよりも格段に高い回折効率をもつ多層膜ラウエレンズ (MLL: multilayer Laue lens) がAdvanced Photon Source (APS) のA. T. MacranderやJ. Maserらのグループにより開発された<sup>15)</sup>。彼らは一次元の多層膜FZPを形成後、この多層膜FZPをX線光軸上で、光軸に対し適切な角度に傾斜させることで、ブラッグ反射を生じさせ、多層膜ラウエレンズとしている。最外輪帯線幅

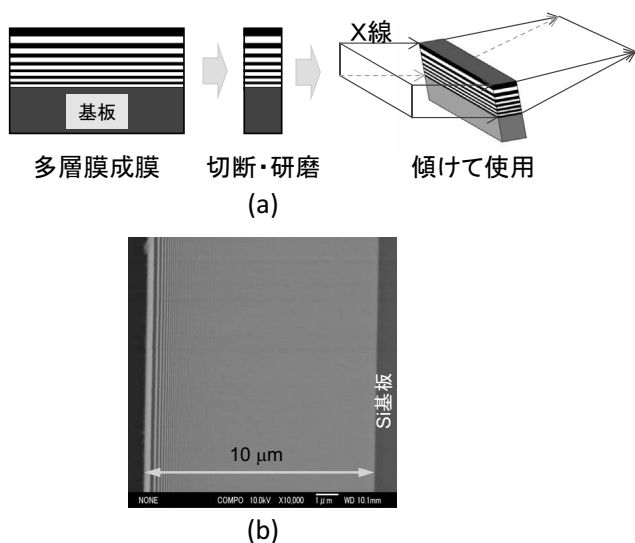


図10 多層膜ラウエレンズの作製法と構造.

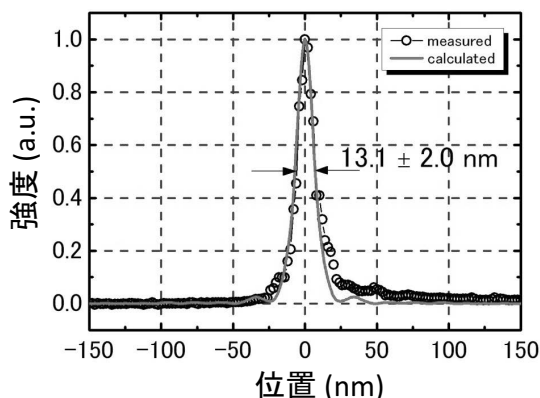


図11 一次元多層膜ラウエレンズの構造と集光ビームプロファイル例.

5 nm の一次元多層膜ラウエレンズを用いて、19.5 keV の X 線を一次元集光させ、サイズ 16 nm を得ている。さらに、このような一次元多層膜ラウエレンズを縦横に配置して X 線を集光することで、25 nm × 27 nm の集光サイズを実現した<sup>16)</sup>。

この MLL の作製法を兵庫県立大学と NTT-AT のチームの例で説明する。一次元傾斜型 MLL は、図 10 (a) に示すように、平坦な基板の上に層厚を FZP 構造とした多層膜をマグネトロン・スパッター法で形成した後、この多層膜を適切な幅 (光軸方向の厚み) に切断・研磨することで作製する。作製した一次元傾斜型 MLL の断面 SEM 写真の例を図 10 (b) に示す。このラウエレンズの構造は、最小層厚 5 nm、最大層厚 316 nm、全総数 1000、総膜厚約 10 μm である。この素子の集光サイズは、図 11 に示すように、20 keV の X 線において焦点距離 1.6 mm で、13.1 nm であった<sup>17)</sup>。最近、Göttingen 大学の H.-U. Krebs, T. Salditt らの

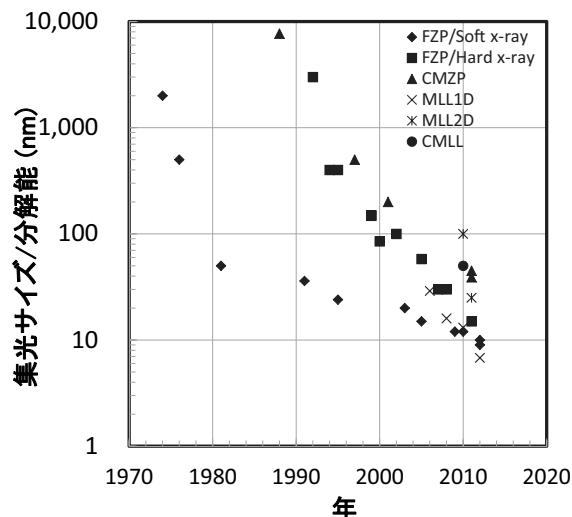


図12 集光サイズ・分解能の推移.

グループでは、13.8 keV の X 線を K-B ミラーで 320 nm × 200 nm に絞って一次元のラウエレンズに照射して集光することで、半値全幅 6.8 nm の集光サイズを実現している<sup>18)</sup>。

円形多層膜ラウエレンズについても、兵庫県立大学と NTT-AT のチームが開発を進めており、円錐状に 1.1 mrad 傾斜をつけた芯線の上に多層膜を平均層厚で 14.0~13.2 nm まで変化させた円形多層膜ラウエレンズを作製し、最小で 50 nm 線幅をもつ二次元ジューメンスタースターパターンを解像している<sup>19)</sup>。

#### 4. フレネルゾーンプレート作製技術の将来展望

これまでの X 線顕微鏡に使用された場合の空間分解能および集光された X 線ビームサイズと時期 (年) との関係を図 12 に示す。軟 X 線としては 2 keV 未満とし、硬 X 線を 2 keV 以上と仮定して分類した (ただし、硬 X 線集光サイズのデータのほとんどは 8 keV 以上である)。

この図 12 中の FZP/Soft x-ray, FZP/Hard x-ray は、それぞれ軟 X 線および硬 X 線を通常の (ほとんど電子ビーム露光等で作製した吸収体厚みの薄い) FZP で集光したときのデータであることを意味し、CMZP は円形多層膜ゾーンプレートを、MLL1D, MLL2D, CMLL はそれぞれ一次元、二次元、円形多層膜ラウエレンズで硬 X 線を集光した場合のデータであることを意味している。

EB 露光法で作製する FZP での集光では、W. Chao らが軟 X 線で 10 nm 程度の集光サイズを実現している。また、H. M. Hertz, J. Reinspach らが 12 nm (高さ 90 nm) や 13 nm (高さ 80 nm) の最外輪帯線幅をもつ FZP を形成し、まもなく 10 nm より小さな集光サイズが得られる FZP が実現すると推測されている。

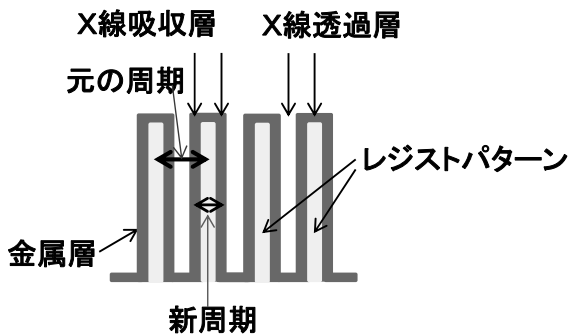


図13 レジストパターン上へ金属成膜して形成するフレネルゾーンプレートパターン (C. David ら).

EB 露光法で FZP を形成する場合、描画技術のみならず、成膜技術やエッチング技術の高度化や安定性・再現性が重要になる。これらの技術は、多数の極微細素子開発者たちの長年にわたる技術蓄積の上に FZP 開発者たちの努力もあって、徐々に向上してきているが、硬 X 線に対応できる FZP の開発を考えた場合、最外輪帯線幅を 10 nm 以下にすることは、微細線幅で高アスペクト比が求められるので、EB 描画後のエッチング等加工技術にまだ課題が残されている。

この微細加工の問題を解決しようと、以下のような方法などによる硬 X 線用 FZP の開発が進められている。例えば、図 13 に示すように、レジストで FZP パターンを形成後、このパターン上に金属（ここでは Ir）を成膜し、レジストの FZP パターンの両側壁面に形成された高さ方向の金属膜を X 線吸収体とすることにより、当初のパターン線幅の半分の大きさの FZP 構造を作製するという Paul Scherrer Institute (PSI) の C. David らのグループが行っている方法<sup>20)</sup>、Berlin Electron Storage Ring Society for Synchrotron Radiation (BESSY) の S. Werner らが行っている EB 露光で FZP 構造を形成後、表面を平坦化し、その上にさらに EB 露光で重ねて FZP を形成することを繰り返す、吸収体の高さを厚く積み上げていく方法<sup>21)</sup> などである。また、兵庫県立大学の高野らによって進められている反射型 FZP では、一次元方向に関して硬 X 線を容易に集光することが可能で、彼らは 10 keV の X 線で 14 nm の集光サイズ (FWHM) を得ている<sup>22)</sup>。この反射型 FZP を縦横に配置 (K-B 配置) することで、微小な二次元集光スポットサイズが得られそうである。さらに、導波路型の微小硬 X 線を得る素子の開発も進んでおり、Göttingen 大学の T. Salditt のグループでは、15 keV の X 線を K-B ミラーで数 100 nm サイズに集光し、そこにスリット型の導波路素子を 2 枚交差させて配置することで、10 nm 程度の集光サイズを得ている<sup>23)</sup>。

一方、線幅の微小化、高アスペクト比化が容易な多層膜 FZP や高効率集光可能な多層膜ラウエレンズの開発が急速に進んでいる。一次元集光ではあるが 7 nm を切る集光サイズが得られていることから、この素子を K-B 配置で集光することで、数 nm の集光スポットが間もなく実現するものと予想される。

このような状況から、FZP 系集光素子を用いて、10 nm より小さい分解性能をもち、短時間観察が可能で、容易に利用できる X 線顕微鏡が、近い将来に実現することを期待している。

FZP に関する写真や図を提供していただいた NTT-AT 社および同社の小澤章氏、市丸智氏、大知渉之氏、最新情報を提供いただいた LBNL の W. Chao 氏、SLS の C. David 氏、APS の A. T. Macrander 氏、J. Maser 氏、Göttingen 大学の H.-U. Krebs 氏、産業技術総合研究所の田村繁治氏、SPring-8 の鈴木芳生氏、竹内晃久氏に感謝する。兵庫県立大学と NTT-AT 社のチームによる多層膜ラウエレンズ開発は、独立行政法人科学技術振興機構 (JST) 先端計測分析技術・機器開発事業の支援により実施させていただいた。

## 文 献

- 1) K. Yamauchi, H. Mimura, T. Kimura, H. Yumoto, S. Handa, S. Matsuyama, K. Arima, Y. Sano, K. Yamamura, K. Inagaki, H. Nakamori, J. Kim, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi and T. Ishikawa: "Single-nanometer focusing of hard x-rays by Kirkpatrick-Baez mirrors," *J. Phys. Condens. Matter.*, **23** (2011) 394206.
- 2) D. Attwood: *Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications* (Cambridge University Press, Cambridge, 1999) pp. 337-394.
- 3) M. Kakuchi, H. Yoshihara, T. Tamamura, H. Maezawa, Y. Kagoshima and M. Ando: "Characteristics of optical components for soft x-ray microscopy and x-ray holography using an undulator radiation optical system," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **6** (1988) 2167-2169.
- 4) A. Ozawa, T. Tamamura, T. Ishii, H. Yoshihara and Y. Kagoshima: "Application of X-ray mask fabrication technologies to high resolution, large diameter Ta Fresnel zone plates," *Microelectron. Eng.*, **35** (1997) 525-529.
- 5) Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takenaka and I. Okada: "Fabrication and performance test of Fresnel zone plate with 35 nm outermost zone width in hard x-ray region," *X-ray Opt. Instrum.*, **2010** (2010) 824387.
- 6) Y. Vladimirovsky: "Zone plates," *Vacuum Ultraviolet Spectroscopy I (Experimental Methods in the Physical Sciences, vol. 31)*, eds. J. A. R. Samson and D. L. Ederer (Academic press, San Diego, 1998) pp. 289-303.
- 7) J. Reinspach, M. Lindblom, M. Bertilson, O. von Hofsten, H. M. Hertz and A. Holmberg: "13 nm high-efficiency nickel-germanium soft x-ray zone plates," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **29** (2011) 011012.
- 8) J. Reinspach, F. Uhlen, H. M. Hertz and A. Holmberg: "Twelve nanometer half-pitch W-Cr-HSg trilayer process for soft x-ray

- tungsten zone plates,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, **29** (2011) 06FG02.
- 9) W. Chao, J. Kim, S. Rekawa, P. Fischer and E. H. Anderson: “Demonstration of 12 nm resolution Fresnel zone plate lens based soft x-ray microscopy,” *Opt. Exp.*, **17** (2009) 17669–17677.
  - 10) W. Chao, P. Fischer, T. Tyliczszak, S. Rekawa, E. Anderson and P. Naulleau: “Real space soft x-ray imaging at 10 nm spatial resolution,” *Opt. Exp.*, **20** (2012) 9777–9783.
  - 11) D. Rudolph, B. Niemann and G. Schmahl: “Status of the sputtered sliced zone plates for X-ray microscopy,” *Proc. SPIE*, **316** (1981) 103–105.
  - 12) K. Saitoh, K. Inagawa, K. Kohra, C. Hayashi, A. Iida and N. Kato: “Fabrication and characterization of multilayer zone plates for hard x-ray,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27** (1988) L2131–L2133.
  - 13) N. Kamijo, S. Tamura, Y. Suzuki and H. Kihara: “Fabrication and testing of hard x-ray sputtered-sliced zone plate,” *Rev. Sci. Instrum.*, **66** (1995) 2132–2134.
  - 14) T. Koyama, H. Takano, S. Konishi, T. Tsuji, H. Takenaka, S. Ichimaru, T. Ohchi and Y. Kagoshima: “Circular multilayer zone plate for high-energy x-ray nano-imaging,” *Rev. Sci. Instrum.*, **83** (2012) 013705.
  - 15) J. Maser, G. B. Stephenson, S. Vogt, W. Yun, A. T. Macrander, H. C. Kang, C. Liu and R. Conley: “Multilayer Laue lenses as high-resolution x-ray optics,” *Proc. SPIE*, **5539** (2004) 185–194.
  - 16) H. Yan, V. Rose, D. Shu, E. Lima, H.-C. Kang, R. Conley, C. Liu, N. Jahedi, A. T. Macrander, G. B. Stephenson, M. Holt, Y. S. Chu, M. Lu and J. Maser: “Two dimensional hard x-ray nanofocusing with crossed multilayer Laue lenses,” *Opt. Express*, **19** (2011) 15069.
  - 17) T. Koyama, H. Takenaka, S. Ichimaru, T. Ohchi, T. Tsuji, H. Takano and Y. Kagoshima: “Development of multilayer Laue lenses; (1) Linear type,” *AIP Conf. Proc.*, **1365** (2011) 24–27.
  - 18) A. Ruhlandt, T. Liese, V. Radisch, S. P. Kruger, M. Osterhoff, K. Giewekemeyer, H. U. Krebs and T. Salditt: “A combined Kirkpatrick-Baez mirror and multilayer lens for sub-10 nm x-ray focusing,” *AIP Adv.*, **2** (2012) 012175.
  - 19) T. Koyama, T. Tsuji, H. Takano, Y. Kagoshima, S. Ichimaru, T. Ohchi and H. Takenaka: “Development of multilayer Laue lenses; (2) Circular type,” *AIP Conf. Proc.*, **1365** (2011) 100–103.
  - 20) J. Vila-Comamala, K. Jefimovs, T. Pilvi, M. Ritala, S. S. Sarkar, H. H. Solak, V. A. Guzenko, M. Stampanoni, F. Marone, J. Raabe, G. Tzvetkov, R. H. Fink, D. Grolimund, C. N. Borca, B. Kaulich and C. David: “Advanced x-ray diffractive optics,” *J. Phys. Conf. Ser.*, **186** (2009) 012078.
  - 21) S. Werner, S. Rehbein, P. Guttman, S. Heim and G. Schneider: “Towards stacked zone plates,” *J. Phys. Conf. Ser.*, **186** (2009) 012079.
  - 22) H. Takano, T. Tsuji, T. Hashimoto, T. Koyama, Y. Tsusaka and Y. Kagoshima: “Sub-15nm hard x-ray focusing with a new total-reflection zone plate,” *Appl. Phys. Express*, **3** (2010) 076702.
  - 23) S. P. Krueger, H. Neubauer, M. Bartels, S. Kalbfleisch, K. Giewekemeyer, P. J. Wilbrandt, M. Sprungc and T. Salditta: “Sub-10 nm beam confinement by x-ray waveguides: Design, fabrication and characterization of optical properties,” *J. Synchrotron Radiat.*, **19** (2012) 227–236.

(2013年2月22日受理)