



## X線ナノ集光素子作製技術の現状と将来展望 —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 NTT-AT ナノファブリケーション株式会社 〒243-0124 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

**要旨** 物質の微小部や微細素子などの表面および内部の構造や元素分布を非破壊で解明するX線顕微鏡などのX線分析法においては、高分解能化のため、10 nm を切る（1 nm を目標とした）集光X線ビームサイズの実現が期待されている。ここでは数10 nm サイズのX線集光が可能で取り扱いの容易さから広く使用されているフレネルゾーンプレートの作製技術と集光特性、数 nm 以下のX線集光サイズが得られると期待されている多層膜フレネルゾーンプレートや多層膜ラウエレンズの作製技術、これまでのX線集光サイズの微小化の進展状況について紹介する。

### 1. はじめに

最小線幅が20 nm 台に入りつつある最先端のLSI素子に代表されるように、近年、100 nm 以下の大きさの素子が多数実用化されてきており、また、研究・開発用では10 nm 水準の様々な素子も試作されている。このような微細素子、微小材料、極薄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、原子レベルやナノレベルの分解能を持つ透過型電子顕微鏡、走査型電子顕微鏡、走査プローブ顕微鏡などが有用な観察手段として利用され、また、開発も活発に進められている。

ただ、透過型電子顕微鏡では観察試料の薄片化が必要で試料を破壊してしまう、また、走査型顕微鏡や走査型プローブ顕微鏡では主として表面構造評価になってしまうなどの問題がある。これを補完する意味もあり、非破壊で表面および内部の構造や元素分布などを解明するX線顕微鏡などのX線利用技術の進展が期待されている。このような状況の下、X線顕微鏡に加え、マイクロ/ナノX線光電子顕微鏡、マイクロ/ナノ蛍光X線分析・イメージング装置、マイクロ/ナノX線回折装置、X線コンピュータ断層撮影装置（CT）、放射光アシスト顕微鏡など様々な微小領域観察・分析用のX線光学装置の開発が進んでいる。

これらの手法では高分解能化の基盤となる微小サイズのX線ビームを発生させるためにK-B（Kirkpatrick-Baez）ミラー、ウォルターミラー、モンテルミラー、回転楕円面ミラー、回転放物面ミラー、シュバルツシルトミラーなどのミラー光学系、キャピラリー型集光素子、フレネルゾーンプレート、屈折型レンズ、導波路型集光素子など多くのX線素子で、高強度、高集光、高平行などそれぞれの特徴を活かすべく、開発が進められている。「X線ナノ集光

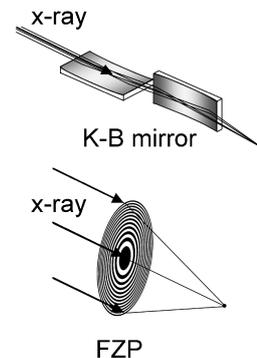


Fig. 1 K-B mirror and FZP.

を実現する」という点からは、現状ではFig. 1に示すようなK-Bミラーとフレネルゾーンプレートが代表的素子となっている。

X線集光素子開発では加工技術と加工精度をいかに高めるかが課題となっている。最近、大阪大学の山内らとSPring-8の石川ら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、これで20 keVの硬X線を7 nmに集光（1次元集光）させるなど、K-Bミラーの集光性能は著しく進歩してきた<sup>1)</sup>。なお、K-Bミラーの2次元集光では、例えばSPring-8の鈴木・竹内らのグループが8-12 keVのX線を110 nmに集光した例<sup>2)</sup>が知られている。

ここではもう一方の代表的集光素子であるフレネルゾーンプレート系素子の作製技術について紹介する。

### 2. FZPの構造

フレネルゾーンプレート（FZP: Fresnel zone plate）は、

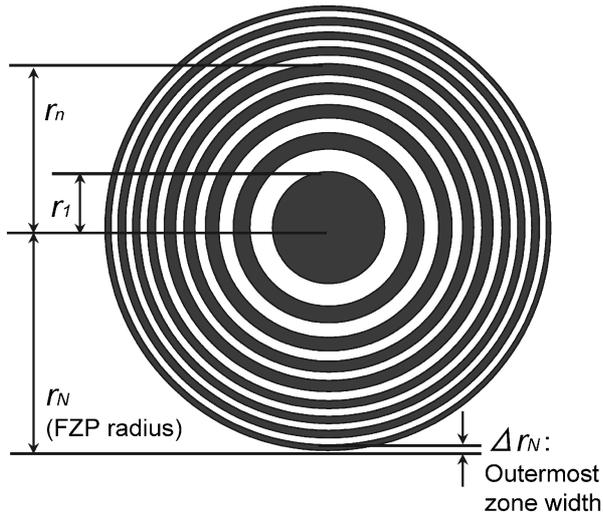


Fig. 2 A schematic drawing of the FZP structure.

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>3-8</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は透過型FZPと反射型FZPに大別される。透過型FZPはFig. 2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、これらの輪帯の幅は外周に近いほど細くなっている（これは外側に入射したX線ほど大きな角度で曲がる2次元の不等間隔回折格子として働くためである）。

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<sup>7,8</sup>。

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

この式を満足するとき、この素子は集光機能を発揮する。ここで、 $\lambda$ は波長、 $f$ は焦点距離、 $N$ は総輪帯数、 $r_n$ は $n$ 番目の境界の半径である。また、輪帯数及び焦点距離は、

$$N = (r_1/\Delta r_n)^2/4 \quad (2)$$

$$f = r_1^2/\lambda \quad (3)$$

で与えられる。 $\Delta r_n$ は最外輪帯の線幅である。FZPの空間分解能 $R$ は、レーリーの解像限界から

$$R = 1.22\Delta r_n \quad (4)$$

となる。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（すなわち、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。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。

ただし、FZPのX線吸収体でもX線のエネルギーが高くなるとX線が透過し始める。このため、FZPのX線吸収体部としての輪帯とX線透過部としての輪帯との位相差により集光効率に変化するので、最大効率がだせる吸収体の厚みとしたいが、通常は最外輪帯の線幅の加工ができる厚みになってしまうことが多い。（FZPの隣り合う輪帯間で透過X線の位相差が $\pi$ となる条件で使用すると回折効率を最も向上させることができる<sup>9</sup>）。このように吸収体の厚みを調整して位相差を変えて集光効率を向上させたFZPは位相型FZP、位相変調型FZPなどと呼ばれている。）

反射型FZPは、単結晶や多層膜の表面上に形成した輪帯でX線をブラッグ回折させて集光するブラッグフレネルゾーンプレート<sup>10</sup>や、平坦な基板上に平滑なメタル層を形成し、これをFZP構造（不等間隔回折格子構造）に溝加工した全反射フレネルゾーンプレート<sup>11</sup>などがある。これらはブラッグ回折や全反射を利用する点を除き、基本的な集光の原理は上記の透過型FZPと同じであり、作製技術の基本的な部分もほぼ同じである。

### 3. 電子ビーム露光によるFZP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。このため、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。微細化に関してはLBNL（Lawrence Berkeley National Laboratory）のW. ChaoらがEB露光のダブルパターンニング法で、FZPの吸収体である金属層厚が薄いものの、10 nm前後（材質Au、厚み30 nm、直径20  $\mu$ m程度）の最外輪帯線幅を達成している<sup>12,13</sup>。また、KTH（スウェーデンのRoyal Institute of Technology、スウェーデン語でKungliga Tekniska Hogskolan）のHolmbergらはEB露光で25 nm（材質Ni、厚み130 nm、直径54  $\mu$ m）の最外輪帯線幅を達成し、最外輪帯線幅20 nmの開発も行っている<sup>14</sup>。

NTT-AT ナノファブリケーション株式会社（NTT-ATN）では、輪帯断面が矩形で、かつ、アスペクト比が比較的高い構造を有する実用的なFZPを製造している。この製造の主な工程（プロセス）はEB露光によるレジストパターンの形成とそのパターンをマスクにした2つのドライエッチングからなるTa製FZPパターンの形成である<sup>15,16</sup>。

この製造プロセスをFig. 3に示す。まず、Siウエハ上に

FZPのX線吸収体を支える支持膜（メンブレン）としてのSiC膜を形成し、その上にX線吸収体としてのTa膜を形成する。このTa膜の上にSiO<sub>2</sub>膜を形成し、更に、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FZP構造のSiO<sub>2</sub>パターンを形成する。次いで、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、従来はFZPのX線吸収体（Ta製輪帯部分）の支持膜としてSiNを使用していたが、放射光施設で使用されるX線の輝度が大幅に向上したことにより、FZPに照射されるX線光量が非常に多くなって、このSiN支持膜が劣化し、これに伴ってFZPが破損するという問題が生じるようになってきた。そこで、最近では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<sup>17)</sup>。また、SiCはSiNに比べて剛性が高くFZPの大口径化にも適している。

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持たせる必要がある。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が、厚みが増すほどアスペクト比と呼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。これは電子ビームのサイズ、揺らぎによる描画の問題、幅の広い溝は早くエッチングされるのに幅の狭い溝はエッチング速度が遅くなるというエッチングの不均一性の問題（マイクロローディング効果と呼ばれている）、エッチング時のエッチングマスクと下地膜との選択比の問題、レジストの問題などで、アスペクト比を大きくすることが難しくなるためである。現状では、高分解能である最外輪帯線幅の細かいFZPの場合、膜厚100-200 nm程度、最外輪帯線幅が数10 nm（アスペクト比5-6程度）で形成されることが多い。作製したFZPの構造例をFig. 4に示す。これはTa厚125 nm、最外輪帯線幅25 nm、直径280 μmのFZPである。

上記のように微細パターンほど吸収体を厚く（高く）することが困難となるが、逆に言うと最外輪帯線幅が大きくなるとそれだけ吸収体の厚いパターン形成ができ、より硬X線に適した（集光効率の良い）FZPを形成することが可能となる。例えば、最外輪帯線幅250 nmではTa膜厚2.5

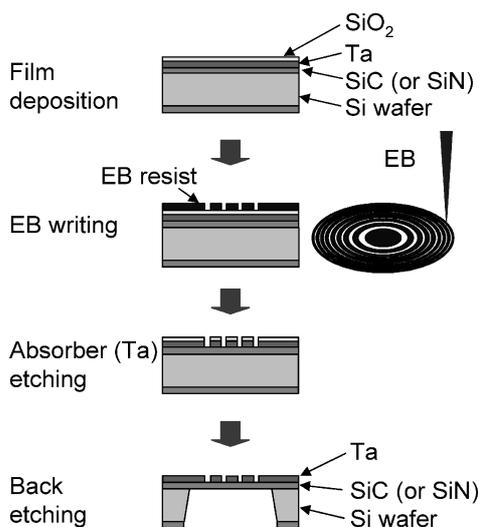


Fig. 3 Processing steps for manufacturing FZPs.

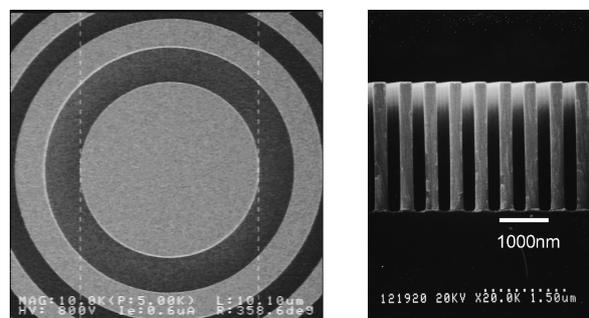


Fig. 5 SEM micrographs of a Ta FZP with a thickness of 2500 nm. The outermost zone width is 250 nm.

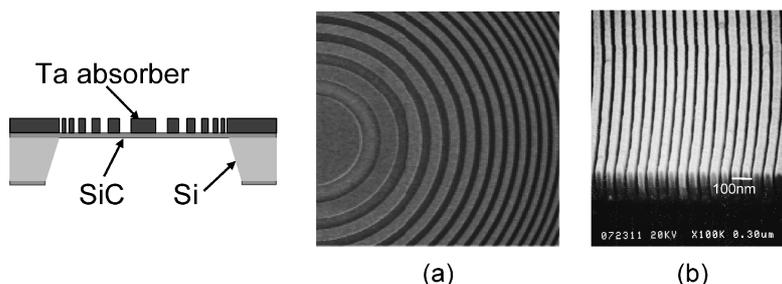


Fig. 4 Schematic drawing of the FZP structure and SEM micrographs of a Ta FZP showing (a) the inner zones and (b) the outermost zone with minimum linewidth of 25 nm.

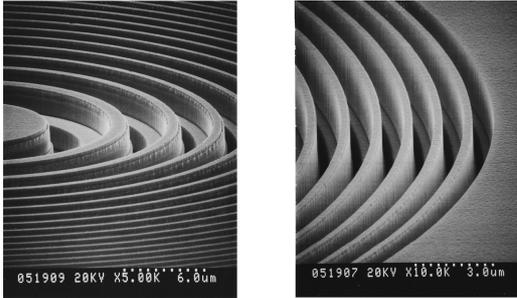


Fig. 6 Ta FZP consisting of two steps. The outermost period is 500 nm.

$\mu\text{m}$ も形成可能である。このFZPの最外輪帯線幅領域をFig. 5に示す。

なお、一般的なFZPは吸収体でX線が遮蔽されることと一次以外の高次のX線が発生するため光量が大きく減少している。しかし、FZP断面を三角形に近い形状（鋸歯形状）にすると吸収体の厚みを調整した位相型FZP以上にX線集光効率が高まる。この形状のFZPはkinofom型FZP（あるいはプレズ型FZP）と呼ばれる<sup>8)</sup>。理想的なkinofom形状では、吸収による損失を考えなければ理論上100%の効率を得られる<sup>18)</sup>。しかし、このFZPの形成は非常に難しいので、kinofom型に近似させた多段型FZP（階段状FZP）の開発が進められている<sup>19-21)</sup>。Fig. 6にNTT-ATNで作製した2段構造（X線透過層を含めると3段構造）のFZPを示す。このFZPの線幅は400 nmで高さは4  $\mu\text{m}$ である。

#### 4. 多層膜利用のFZP作製技術

EB露光法では線幅の細いパターンを形成する場合、ビーム径を非常に小さくして描画するため、ある一定の面積を描画するには小さなビームになるほど長時間を要することになる。また、細線描画のため高分解能のレジストを使用すると感度が悪くなり、これも長時間化に向かってしまう。更に、前節で述べたように、線幅が細ければ細いほどレジスト描画後のエッチングが困難になる等の問題がある。このため、線幅が細くて厚い、即ち、アスペクト比の大きなFZPほど製作が難しくなるので、現状では高分解能FZPの吸収体の輪帯は厚みが非常に薄くなっている。吸収体の輪帯厚みが薄いために、使用するX線のエネルギーが高くなってくると吸収体層を透過するX線量がほとんどになってしまっており、この影響で集光効率が非常に低くなる。そこで、ゲッチンゲン（Gottingen）大学のSchmahlらのグループによって、最外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>22)</sup>。作製方法をFig. 7に示す。芯線上にスパッタリング（Sputtering）法で多層膜を形成し、適切な厚みに切断、研磨して作製する。こ

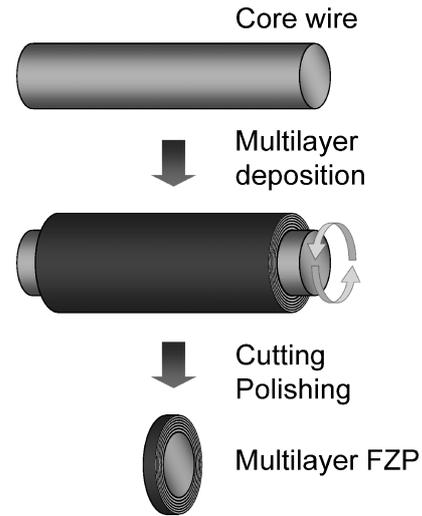


Fig. 7 Outline of the multilayer FZP fabrication process.

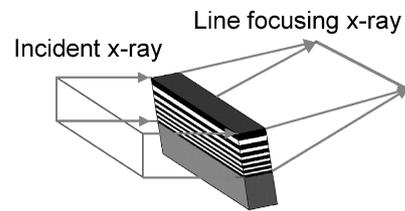


Fig. 8 Schematic drawing of a one-dimensional MLL structure.

の方法は彼らによってSputtered-Sliced FZP (SSFZP)と名付けられた。この方法の利点は、薄膜では一層の厚みをnm水準で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。なお、このSSFZPはMultilayer zone plate (MZP)とも呼ばれている。

日本では株式会社アルバック（ULVAC, Inc.）とPF（Photon Factory）のグループによって手がけられ<sup>23)</sup>、産総研の上條、田村ら、およびSPring-8の鈴木、竹内らのグループで高度化が進められた<sup>24,25)</sup>。産総研-SPring-8グループで作製したSSFZP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）の層の間に、これらの材料の混合割合を段階的に変化した層を形成することで近似的にkinofom型の濃度分布をもたせた多層膜ゾーンプレートも開発し、70 keVのX線では50%を超える高い集光効率（一次回折光）を得ている<sup>26)</sup>。

多層構造の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APS（Advanced Photon Source）のMacranderらのグループにより提案・開発された<sup>27,28)</sup>。彼らは1次元の多層膜FZPを形

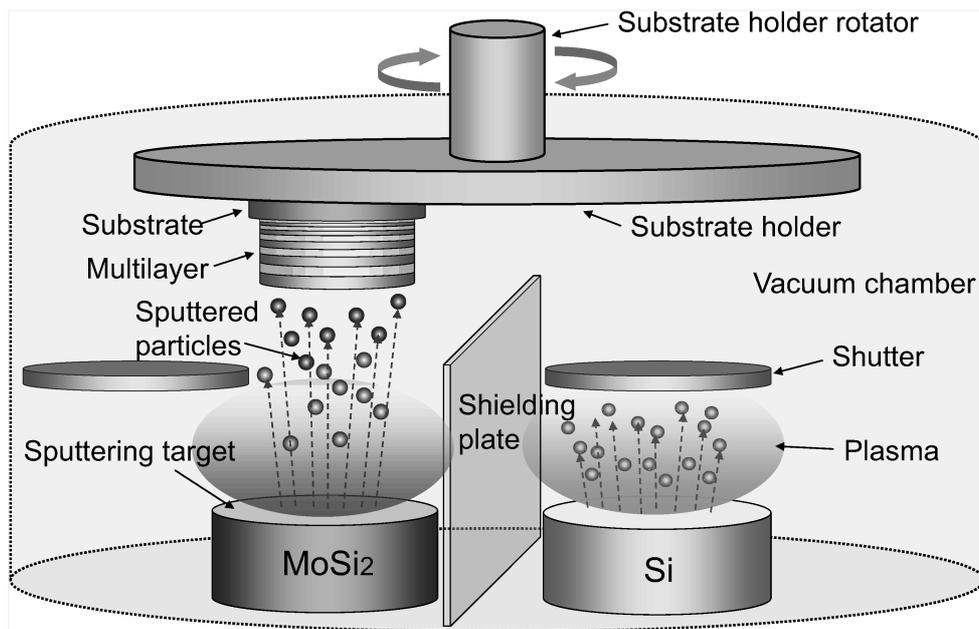


Fig. 9 Schematic of the sputtering system.

成後、X線の進行方向に対して、この多層膜FZPを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。この模式図をFig. 8に示す。彼らは最外線幅5 nmの多層膜ラウエレンズを用いて、19.5 keVのX線を1次元集光させ、サイズ16 nmを得ている。このように多層膜ラウエレンズを使用することで、硬X線の10 nm集光も視野に入ってきた。

兵庫県立大学の籠島、高野、小山、辻と私たちのグループも多層膜FZPや多層膜ラウエレンズの開発を進めている<sup>29)</sup>。1次元の傾斜型多層膜ラウエレンズ（1次元傾斜型MLL）は、平坦な基板の上に層厚をFZP構造とした多層膜を形成した後、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。

1次元多層膜の作製はFig. 9に示すマグネトロンスパッタリング法を適用している。マグネトロンスパッタリング装置の成膜室（真空槽）内に2種類の板状の原料（スパッタリングターゲット）を取り付け、成膜室内にArガスを入れて放電を起こして、Arイオンを発生させ、これをスパッタリングターゲットに衝突させて、この衝突のエネルギーで、ターゲット材料の原子を空間に飛び出させ、これら飛び出した原子を基板上に堆積させて膜を形成する。一方の材料の層が、設定した層厚になると、もう一方の材料の層を形成する。これを繰り返すことでFZP構造の多層膜が形成できる。ここではX線を吸収する層の材料としてMoSi<sub>2</sub>を、また、X線を透過する層の材料としてSiを使用した。これらの材料の組み合わせを選択したのは、層の界面の平滑性が高く、耐熱性、安定性に優れること<sup>30)</sup>、回折効率が低いという理由からである。

このスパッタリング法でSiウエハなどの基板の上に、

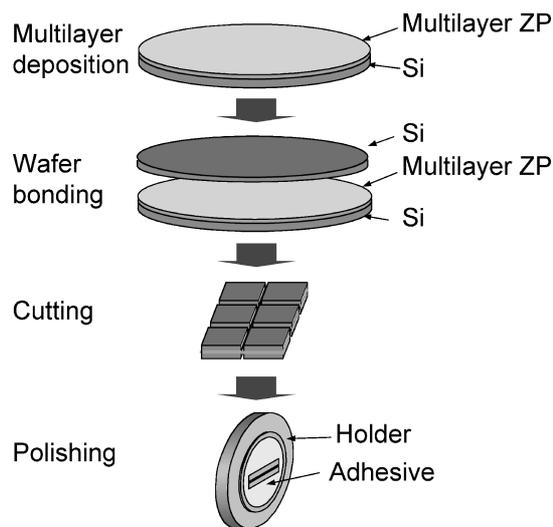


Fig. 10 Processing steps for manufacturing a one-dimensional MLL.

各層がFZP構造（連続的に線幅が変化している）の厚みになるように層を形成していく。所望の層数（FZPの輪帯数）とした多層膜を形成後、成膜装置から取り出し、このSi基板上で厚み方向にFZP構造になっている多層膜を短冊状の小片に切断する。この小片を保持具に取り付け、多層膜断面を研磨してX線が透過する方向（光軸方向）を設定した厚みにすると、1次元傾斜型MLLができあがる。この作製工程をFig. 10に示す。

Fig. 11に作製した1次元傾斜型MLLの断面SEM写真の例を示す。このラウエレンズの設計値は最小線幅10 nm、最大線幅100 nm、全総数248、全膜厚4.6 μmとして

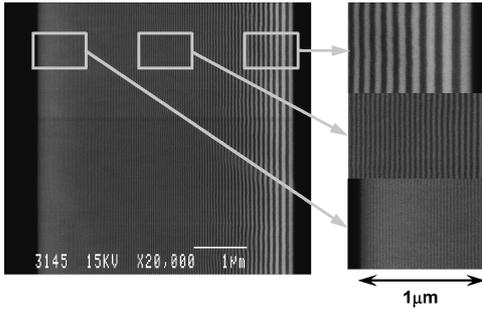


Fig. 11 Cross-sectional SEM images of a MoSi<sub>2</sub>/Si multilayer.

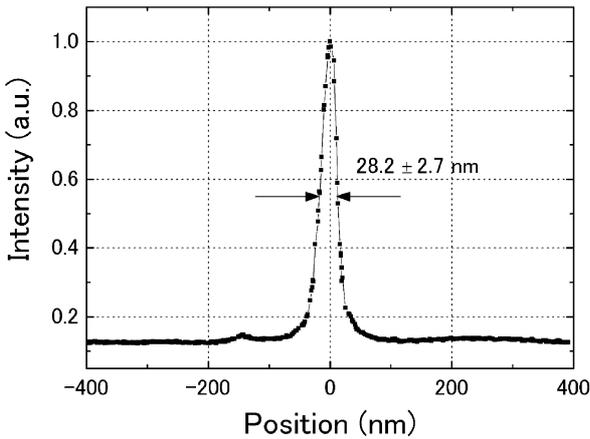


Fig. 12 Results of beam size measurement of a one-dimensional MLL at 20 keV.

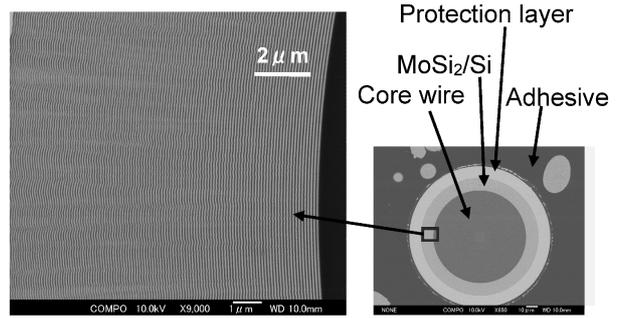


Fig. 13 Cross-sectional SEM images of a MoSi<sub>2</sub>/Si multilayer on a wire core.

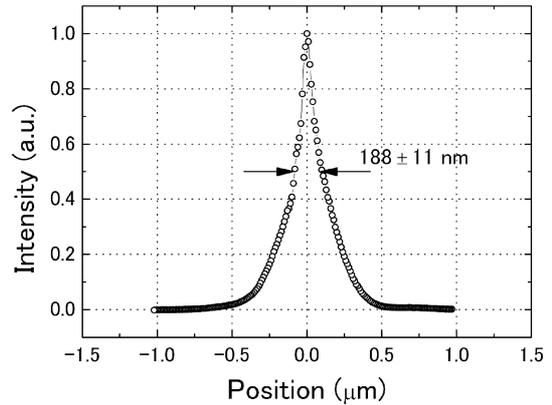


Fig. 14 Focused beam profile of first-order diffraction measured by a knife edge scan.

いる。観察した SEM 像から各層の膜厚を実測し、設計値と比較したところ、実測値と設計値との差は  $\pm 4.0\%$  (rms) と比較的良く一致していた。

SPring-8 の BL24XU (兵庫県ビームライン) でこのラウエレンズの集光特性を評価した。集光サイズの測定には白金ワイヤを使用したナイフエッジスキャン法<sup>31)</sup>を使用した。この測定で、20 keV の X 線が 28.2 nm に集光されていることが確認された。なお、焦点距離は 1.6 mm である。Fig. 12 にその集光特性を示す。なお、計算上、この 1 次元傾斜型多層膜ラウエレンズの回折限界は 22.5 nm である。

更に微細な集光サイズを得るため、上記のラウエレンズより最外線幅の細い 1 次元傾斜型多層膜ラウエレンズを作製した。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  $\mu\text{m}$  である。このラウエレンズの集光特性を上記と同様の手法で測定し、20 keV の X 線、焦点距離 1.6 mm で、15.4 nm の集光サイズを得ている。

これらは 1 次元集光用のラウエレンズであるが、2 次元集光用ラウエレンズの開発をめざして、まず、芯線上に多層膜を形成する円形多層膜 FZP の開発を進めている。作製法は基本的には Shmahl ら先人達と同じで、芯線を回転

させながら 2 種類の材料の層を交互に形成し、各層の厚みが FZP の構造と同じになるように形成している。作製した円形多層膜 FZP の SEM 観察像を Fig. 13 に示す。芯線側第一層である最大線幅 (層厚) が 50 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、最外線幅を 39.6 nm とした。SEM 観察から、これらの線幅がほとんど設計値通りに形成できていることが確認された。なお、光軸方向の厚みは 27  $\mu\text{m}$  である。ただし、現状では芯線に近い側ほど平滑な円形の層構造となっているが、外周に向かうにつれて、徐々に層構造の乱れが大きくなっている。これは平面基板の場合、基板表面が平滑なのに比べ、芯線では、芯線表面の平滑性が良くない(粗さが大きい)こと、また、曲率の小さな(急な曲面をもった)芯線に成膜する場合、芯線上では平面基板より均一成膜が困難なことが主な原因である。

作製した円形多層膜 FZP に対して 1 次元傾斜型多層膜ラウエレンズと同様の評価を実施した。20 keV の X 線による 1 次回折光の集光サイズは、ナイフエッジスキャン法による測定では 188 nm (半値幅) であった。この結果を Fig. 14 に示す。



- 12) W. Chao, B. D. Harteneck, J. A. Liddle, E. H. Anderson and D. Attwood: *Nature* **435**, 1210 (2005).
- 13) W. Chao, J. Kim, E. H. Anderson and D. T. Attwood: *Book of abstract, 9th Internat. Conf. on X-ray Microscopy P77* (2008).
- 14) A. Holmberg, M. Lindblom, J. Reinspach, M. Bertilsson and M. Hertz: *J. Phys.: Conf. Ser.* **186**, 012065 (2009).
- 15) M. Kakuchi, H. Yoshihara, T. Tamamura, H. Maezawa, Y. Kagoshima and M. Ando: *J. Vac. Sci. Technol.* **B 6**, 2167 (1988).
- 16) A. Ozawa, T. Tamamura, T. Ishii, H. Yoshihara and Y. Kagoshima: *Microelectron. Eng.* **35**, 525 (1997).
- 17) Y. Suzuki and A. Takeuchi: private communication.
- 18) V. Moreno, J. F. Roman and J. R. Salgueiro: *Am. J. Phys.* **65**, 556 (1997).
- 19) Y. Vladimisky: *X-ray microscopy*, edited by w. Meyer-Ilse, T. Warnick and D. Attwood, *AIP Conf. Proc.* **507**, 615 (2000).
- 20) E. Di Fabrizio, F. Romanat and M. Gentili: *X-ray microscopy*, edited by w. Meyer-Ilse, T. Warnick and D. Attwood, *AIP Conf. Proc.* **507**, 635, (2000).
- 21) J. Maser, B. Lai, Z. Kai, W. Rodrigues, D. Legnini, P. Iliniski, W. Yun, Z. Chen, A. A. Krasnoperova, Y. Vladimisky, F. Cerrina, E. Di Fabrizio and M. Gentili: *X-ray microscopy*, edited by W. Meyer-Ilse, T. Warnick and D. Attwood, *AIP Conf. Proc.* **507**, 708, (2000).
- 22) D. Rudolph, B. Niemann and G. Schmahl: *Proc. SPIE* **316**, 103 (1981).
- 23) K. Saitoh, K. Inagawa, K. Kohra, C. Hayashi, A. Iida and N. Kato: *Jpn. J. Appl. Phys.* **27**, L2131 (1988).
- 24) N. Kamijo, S. Tamura, Y. Suzuki and H. Kihara: *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2132 (1995).
- 25) S. Tamura, M. Yasumoto, N. Kamijo, A. Takeuchi and Y. Suzuki: *J. Vac. Soc. Jpn.* **52**, 212 (2009).
- 26) S. Tamura, M. Yasumoto, N. Kamijo, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Terada and Y. Suzuki: *J. Phys.: Conf. Ser.*, **186**, 012075 (2009).
- 27) J. Maser, G. B. Stephenson, S. Vogt, W. Yun, A. T. Macrander, H. C. Kang, C. Liu and R. Conley: *Proc. SPIE* **5539**, 185 (2004).
- 28) H. C. Kang, J. Maser, G. B. Stephenson, C. Liu, R. Conley, A. T. Macrander and S. Vogt: *Phys. Rev. Lett.* **96** 127401 (2006).
- 29) T. Koyama, S. Ichimaru, T. Tsuji, H. Takano, Y. Kagoshima, T. Ohchi and H. Takenaka: *Appl. Phys. Express*, **1**, 117003 (2008).
- 30) H. Takenaka, T. Kawamura, Y. Ishii and S. Asagiri: *J. Appl. Phys.* **78**, 5227 (1995).
- 31) Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takano and H. Takenaka: *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 1994 (2005).
- 32) 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: *J. Phys.: Conf. Ser.* **186**, 012078 (2009).
- 33) S. Werner, S. Rehbein, P. Guttman, S. Heim, G. Schneider, W. Chao, J. Kim, E. H. Anderson and D. T. Attwood: *Book of abstract, 9th Internat. Conf. on X-ray Microscopy P77* (2008).
- 34) B. Niemann, D. Rudolph and G. Schmahl: *Opt. Commun.* **12**, 160 (1974).
- 35) B. Niemann, D. Rudolph and G. Schmahl: *Appl. Opt.* **15**, 1883 (1976).
- 36) G. Schmahl, D. Rudolph and B. Niemann: *Proc. SPIE* **316**, 100 (1981).
- 37) C. Jacobsen, S. Williams, E. Anderson, M. T. Browne, C. J. Buckley, D. Kern, J. Kirz, M. Rivers and X. Zhang: *Opt. Commun.* **86**, 351 (1991).
- 38) G. Schneider, T. Schliebe and H. Ascoff: *J. Vac. Sci. Technol.* **B13**, 2809 (1995).
- 39) W. Chao, E. H. Anderson, G. P. Denbeaux, B. Harteneck, J. A. Liddle, D. L. Olynick, A. L. Pearson, F. Salmassi, C. Y. Song and D. Attwood: *Opt. Lett.* **28**, 2019 (2003).
- 40) B. Lai, W. B. Yun, Y. Xiao, L. Yang, D. Legnini, Z. Cai, A. Krasnoperova, F. Cerrina, E. Di Fabrizio, M. Gentili, L. Grella and M. Baciocchi: *Appl. Phys. Lett.* **61**, 1877 (1992).
- 41) B. Lai, W. B. Yun, D. Legnini, Y. Xiao, J. Chrzazqs, P. J. Viccaro, V. White, S. Bajikar, D. Denton, F. Cerrina, L. Yang, D. Legnini, Z. Cai, A. Krasnoperova, F. Cerrina, E. D. Fabrizio, L. Grella and M. Gentili: *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2287 (1995).
- 42) B. Kaulich, S. Oestreich, M. Salome, R. Barrett, J. Susini, T. Wilhein, E. Di Fabrizio, M. Gentili and P. Charalambous: *Appl. Phys. Lett.* **75**, 4061 (1999).
- 43) C. David, B. Kaulich, R. Barrett, M. Salome and J. Susini: *Appl. Phys. Lett.* **77**, 3851 (2000).
- 44) Y. Feng, M. Feser, A. Lyon, S. Rishton, X. H. Zeng, S. Chen, S. Sassolini and W. B. Yun: *J. Vac. Sci. Technol.* **B 25**, 2004 (2007).
- 45) J. Meser, R. Winarski, M. Holt, B. Stephenson, D. Shu and C. Benson: *Book of abstract, 9th Internat. conf. on X-ray Microscopy P9* (2008).
- 46) Y. Suzuki, N. Kamijo, S. Tamura, K. Handa, A. Takeuchi, M. Yasumoto, H. Sugiyama, K. Ohsumi and M. Ando: *J. Synchrotron Rad.* **4**, 60 (1997).
- 47) Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takano, T. Ohigashi and H. Takenaka: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 1508 (2001).
- 48) Y. Suzuki, M. Awaji, Y. Kohmura, A. Takeuchi, H. Takano, N. Kamijo, S. Tamura, M. Yasumoto and K. Handa: *Nucl. Instrum. Meth.* **467**, 951 (2001).
- 49) H. C. Kang, H. Yan, R. P. Winarski, M. V. Holt, J. Maser, C. Liu, R. Conley, S. Vogt, A. T. Macrander and G. B. Stephenson: *Appl. Phys. Lett.* **92**, 221114 (2008).

## ● 著者紹介 ●



## 竹中久貴

NTT-AT ナノファブリケーション株式会社 第三製造部長

E-mail: hisataka.takenaka@nanofab.ntt-at.co.jp

専門: X線光学素子, 多層膜形成

## 【略歴】

1979年関西学院大学大学院理学研究科博士課程後期課程修了。理学博士。  
1979年-1996年日本電信電話公社/日本電信電話株式会社電気通信研究所。  
1996年-2008年NTTアドバンステクノロジー株式会社。2008年-現在現職。X線光学関連事業, 薄膜関連事業を実施。

---

---

# Techniques for fabricating Fresnel zone plates for x-ray focusing: Current status and future challenges

**Hisataka TAKENAKA** NTT-AT Nanofabrication Corporation  
3-1 Morinosato Wakamiya, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0124, Japan

**Abstract** The development of Fresnel zone plates (FZPs) with resolution below 10 nm is strongly required for x-ray microscopy and other micro/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.

---