高輝度放射光 X 線用多層膜フレネルゾーンプレートの開発*

田村 繁治^{*1,*4}・安本 正人^{*2}・上條 長生^{*3,*4}
鈴木 芳生^{*4}・淡路 晃弘^{*4}・竹内 晃久^{*4}
高野 秀和^{*4}・香村 芳樹^{*5}・半田 克己^{*6}

(受理2001年2月5日, 掲載決定2001年7月7日)

Fabrication of Multilayer Fresnel Zone Plate for High Brilliance Synchrotron Radiation X-rays

Shigeharu TAMURA^{*1,*4}, Masato YASUMOTO^{*2}, Nagao KAMIJO^{*3,*4},
Yoshio SUZUKI^{*4}, Mitsuhiro AWAJI^{*4}, Akihisa TAKEUCHI^{*4},
Hidekazu TAKANO^{*4}, Yoshiki KOHMURA^{*5} and Katsumi HANDA^{*6}

^{*1}AIST Kansai, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Ikeda, Osaka 563-8577

^{*2}AIST Tsukuba, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
AIST Tsukuba Central 2, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

^{*3}Kansai Medical University, Uyama-Higashi, Hirakata, Osaka 573-1136

^{*4}Japan Synchrotron Radiation Research Institute (SPring-8), Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

^{*5}RIKEN Harima Institute, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

^{*6}Ritsumeikan University, Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577

(Received February 5, 2001, Accepted July 7, 2001)

1. はじめに

薄膜を積層することにより, 単層膜には無い新しい機能を創り出すことができる. レーザー用誘電体反射防止膜や誘電体高反射膜, ビーム・スプリッター, X線用金属多層膜ミラーなどの光学多層膜が代表的な例である. これらの多層膜は主として平面基板上に成膜され, 表面に入射した光は多層膜の界面で透過・反射を繰り返すことにより, 設計された光学特性を実現する. 一方,

細線基板上に同心円多層膜を成膜した後, 薄く輪切りにすると, 光の回折を利用する集光素子(レンズ)であるフレネルゾーンプレート(FZP)が得られる. 上記の光学多層膜とは異なり, FZPでは光は多層膜の断面に入射する.

多層膜FZPはX線(特に波長が短い硬X線)領域の光に対する高性能レンズとして期待されており, 高輝度放射光を利用した微小領域分析用の光学素子への応用を目指して研究開発が活発に行われている. 筆者らは多層膜FZPの開発を行っており, 1994年からの高エネルギー加速器研究機構^{1,2)}, 引き続いて(財)高輝度光科学研究センター(SPring-8)での性能評価で高輝度サブミクロンX線マイクロビームの生成に成功した. 本報告では多層膜FZPの作製および高エネルギーX線領域での集光実験に関する最近の成果, 関連分野の世界の研究動向を中心に紹介する.

* 平成12年9月22日 日本真空協会関西支部第3回研究例会で講演

^{*1} 産業技術総合研究所関西センター(〒563-8577 大阪府池田市緑丘1-8-31)

^{*2} 産業技術総合研究所つくばセンター(〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2)

^{*3} 関西医科大学(〒573-1136 大阪府枚方市山田東町18-89)

^{*4} (財)高輝度光科学研究センター(SPring-8)(〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1)

^{*5} 理化学研究所 播磨研究所(〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1)

^{*6} 立命館大学理工学部(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

2. X線マイクロビームとフレネルゾーンプレート

W. C. Röntgen によって X 線が発見されてから 1 世紀が経過した。X 線は、波長が短く、透過力が強い光であり、物質の構造解析などの物理学や、レントゲン撮影などの医学を中心に利用されてきた。1970 年代以降、シンクロトロン放射 (SR) 光施設が世界各国で盛んに建設され、真空紫外から硬 X 線領域までの幅広い波長領域の輝度の高い光を利用することが可能となった。現在では、ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, フランス, 6 GeV), APS (Advanced Photon Source, アメリカ, 7 GeV), SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV, 日本, 8 GeV) に代表される大型放射光施設 (いわゆる第 3 世代と呼ばれる) が稼働を始め、より輝度の高い、波長の短い X 線を利用することが可能となった。そして、これらの高輝度放射光 X 線を利用した物質科学、生命科学、医学の分野で多くの先進的な研究 (分析・評価・材料創製など) が精力的に行われている。

放射光を利用する分析・評価における一つの重要な技術に、「X 線のマイクロビーム化」があり、このマイクロビームを利用して、材料やデバイスの μm^2 、あるいはそれ以下の微小領域の物性の評価、構造、応力、歪みなどの情報を得ることが重要になってきた。それは、半導体の微小回路素子の分析・評価、微小な結晶でしか得られない新物質の分析・評価など微小領域の測定が必須となり³⁾、また、生物学の分野でも μm 以下の微細構造の観察・分析が必須となったからである。測定対象領域は今後ますます微小化し、マイクロビームの生成技術の高度化 (微小化) が必要不可欠になることが予想される。

5~0.5 nm の波長の軟 X 線領域では、FZP を利用して 20 年以上前からすでに $1\mu\text{m}$ 以下の集光ビーム径あるいは分解能が得られており、 $0.024\mu\text{m}$ の高分解能も報告されている⁴⁾。一方、波長が短い 0.5~0.01 nm の硬 X 線領域では、光学素子の作製には非常に高精度な精密加工技術が要求される。そのため、サブミクロンの集光ビーム径、分解能が得られる各種の光学素子が開発されるようになったのはここ数年の間である。Fig. 1 に示すブラッグ・フレネルレンズ (BFL)⁵⁾、FZP^{1,2,6-8)}、Kirkpatrick-Baez (K-B) ミラー^{9,10)}、屈折レンズ^{11,12)} が代表的なものである。BFL はフレネル回折を利用した反射型の素子、FZP は透過型の素子である。K-B ミラー光学系では斜め入射反射鏡を 2 枚交差させて垂直・水平方向を独立に、かつ、同一位置に集光させる。屈折レンズは X 線領域では凸レンズと凹レンズの作用が逆になることを利用し^{13,14)}、凹レンズ構造を繰り返した構造を有

Fig. 1 Focusing optics for hard X-rays: (a) Bragg-Fresnel Lens, (b) Fresnel zone plate, (c) Kirkpatrick-Baez (K-B) mirror and (d) parabolic compound refractive lens.

している。これらの中でも FZP は最も高い空間分解能が期待されており、集光実験においても最も良い結果を示している。他の素子に比べて光軸調整が容易であることも FZP の特徴である。

FZP は X 線を通す物質と遮断する物質とを交互に同心円状に繰り返した透過型回折格子で、光の回折と干渉効果によりレンズとして機能する (Fig. 1-(b))。FZP では各ゾーンの面積は等しく、そのため外周部ほどゾーン幅は狭くなる。中心に半径 r_0 の芯線がある場合、使用する X 線の波長を λ 、焦点距離を f とすると、 n 番目の境界の半径 r_n は (1) 次式で表される。

$$r_n^2 = r_0^2 + n\lambda f \quad (1)$$

$$(n=1, 2, 3, \dots, N)$$

FZP の最小線幅 (最外輪帯幅) を δr としたとき、空間分解能 Δ 、焦点面におけるビーム径 $2r_h$ (FWHM) は

$$\Delta = 1.22 \cdot \delta r \quad (2)$$

$$2r_h = 1.03 \cdot \delta r \quad (3)$$

で、波長とは無関係である^{15,16)}。このことから、高い分解能を得るためには、層数を増やして最小線幅を狭くする必要がある。また、入射した X 線が焦点に集まる割合 (集光効率) は通常 FZP で理論上 10% である。不透明ゾーンを X 線から見て半透明になるように、かつ、透明ゾーンを通過する X 線との位相差が π ラジアン (あるいはその整数倍) になるように厚さ (Fig. 1-(b) で t

Fig. 2 Fabrication process of multilayer Fresnel zone plate.

Fig. 3 Schematic diagram of sputtering apparatus: (a) plan view, (b) side view.

で示される)を制御すれば最高40%の集光効率が可能となる。

FZPの作製手法は、半導体の微細加工技術を応用する方式と、多層薄膜成膜技術を応用する方式とに分類される。前者は軟X線領域用のFZP、すなわち厚みの薄い(0.1 μm 以下が多い)FZPの作製に利用されている。これに対して硬X線は透過力が高いため、この波長域で使用するFZPには数~数十 μm の厚みが必要となり、作製には、まず、後者の手法が利用された。多層膜FZPの作製方式はRudolphらにより考案され¹⁷⁾、その後、Saitoら^{18,19)}、Bionta, Yunら^{20,21)}によって実際に作製・性能評価(集光テスト)が行われた。その結果、数 μm 程度の集光ビーム径・分解能が得られたが、サブミクロンレベルに集光することは困難であった。その後、微細加工技術を応用する方式でも硬X線領域用のFZPが作製可能となり、0.15 μm のビームサイズ(8keV: $\lambda=0.15\text{nm}$)も報告されるようになった⁷⁾。この方式では材料はAu, Niなどが多く利用されており、レジスト

Table 1 Sputtering conditions of Cu/Al multilayers

D.C. power	Cu : 6 W/cm ² Al : 10 W/cm ²
Deposition rate	1 nm/s
Substrate rotating speed	15 rpm
Substrate temperature	RT
Total gas pressure	0.20 Pa
Target-to-substrate distance	50 mm

Table 2 Parameters of Fresnel zone plate

	FZP 1	FZP 2
Innermost zone width (μm)	0.38	0.21
Outermost zone width (μm)	0.25	0.16
Focal length (mm) ($\lambda=0.1\text{nm}$)	190	105
Number of zones	50	50
Diameter of FZP (μm)	80	70

上に電子ビームやX線の露光によりゾーンプレートのパターンを形成後、電解メッキにより作製される。しかしながら、この方式では3 μm 以上の厚みのあるFZPの作製は技術的に困難であるため、波長が0.1nm以下のX線の集光にはほとんど利用されていない。また、各種の集光素子の開発では短波長化も目指しているが、波長が0.025nm(50keV)以下のX線を2次元で集光できるものは現時点では報告されていない。

3. Cu/Al 多層膜 FZP の作製

筆者らは多層膜FZPの開発を行っており、硬X線領域全般で極微小マイクロビームの生成を目指している。多層膜の材料としてAg/C²²⁾、Cu/Alを用いている。以下ではCu/Al多層膜FZPに関する最近の成果について述べる。

3.1 多層膜の成膜

多層膜FZPはFig. 2に示すように、『成膜』、『切断』、『研磨による薄片化』の手順で作製した。FZP用の多層膜の材料には、X線遮断物質としてCuを、X線透過物質としてAlを用い、Fig. 3に示す2元DCスパッタリング装置により細線基板上(Au, 直径50 μm , 長さ4cm)に多層膜を成膜した。成膜条件の例をTable 1に、FZPの設計値の例をTable 2に示す。最終層の外側に多層膜の強度を保持するためCuのオーバーコート層(3 μm t)を蒸着した。同心円多層膜の成膜では斜め蒸着粒子による斜影効果の影響で膜の表面に凹凸が生

Fig. 4 Schematic diagram of optical system with multilayer Fresnel zone plate at BL47XU.

じ、これが多層膜の界面（ゾーン）の平滑性を乱す原因となると考えている。これまで、多層膜界面の平滑性を改善するために成膜条件の実験的検討を行った。その結果、文献²³⁾で報告されている平面多層膜の場合と同様に、同心円多層膜についても Ar 圧力が最も影響し、低い圧力の方が平滑性が良くなることがわかった^{24,25)}。

3.2 多層膜フレネルゾーンプレートの作製

作製した細線状の多層膜試料を低融点合金（Sn-Pb：融点 180°C ）に埋め込んだ。この試料を回転軸に対して垂直に 1 mm 程度の厚さに切断後、片面の研磨を行った。次に、この研磨面をグラファイト基板（ $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ t）上に接着し、裏面を研磨して所望の厚さ（ $10\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ ）に薄片化加工して FZP を作製した。研磨工程では粒径 $1\text{ }\mu\text{m}$ のアルミナ懸濁液で表面仕上げを行った。低融点合金は、加工工程で多層膜 FZP の保持具の役割を有するのみならず、X 線光学系で FZP を使用する場合に X 線のストッパーとして機能する。FZP の集光効率は厚さに依存し、かつ、その関係は X 線の波長によっても異なるので、高い集光効率を得るためには薄片化工程における厚さ制御が重要である。Cu/Al 多層膜 FZP の厚さと集光効率の関係の数値例は文献²⁶⁾などに紹介されている。

3.3 放射光を利用した多層膜フレネルゾーンプレートの性能評価

作製した多層膜 FZP を用いて、(財)高輝度光科学研究センター放射光研究所（SPring-8）のアンジュレータビームライン BL47XU で Fig. 4 に示す光学系を構成し、マイクロビーム生成実験（ 8.9 keV : $\lambda=0.14\text{ nm}$, 27.8 keV : $\lambda=0.045\text{ nm}$, 82.7 keV : $\lambda=0.015\text{ nm}$ ）、走査型 X 線顕微鏡実験（ 27.8 keV : $\lambda=0.045\text{ nm}$ ）を行った。また、結像型 X 線顕微鏡実験（ 25 keV : $\lambda=0.050\text{ nm}$ ）も行った。光源の大きさは「約 $40\text{ }\mu\text{m}\times 900\text{ }\mu\text{m}$ 」であり、放射光を Si(111) の 2 結晶分光器で単色化した後、必要に応じてスリット（あるいはピンホール）により光

Fig. 5 SEM micrographs of multilayer Fresnel zone plate: (a) full view, (b) close-up view. Black rings are Al layers and white rings are Cu layers. Center stop is Au wire.

源の大きさを縮小して FZP に照射した。ただし、 82.7 keV の X 線はスリットを透過してしまうため、スリットは使用せず分光器で単色化した X 線をそのまま集光させた。高次光は OSA (Order Sorting Aperture) でカットした。

マイクロビーム生成実験では焦点の位置で Ta のエッジを上下、左右に走査して X 線の強度分布を求め、それを微分する方法（ナイフエッジ法）により集光ビーム径を求めた。走査型 X 線顕微鏡実験では焦点の位置にテストパターン試料を置いた。試料は Si_3N_4 膜上に作製された Ta（厚さ $0.5\text{ }\mu\text{m}$ ）のライン/スペースである。Ta から発生する蛍光 X 線の検出には NaI シンチレーションカウンタを使用した。結像型顕微鏡実験では FZP の上流側に金メッシュ（#1500）などの試料を置いた。

4. 実験結果および考察

4.1 Cu/Al 多層膜

Cu/Al 多層膜（50層：Table 2 の FZP2 の仕様）の走査型電子顕微鏡（SEM）像の 1 例を Fig. 5 に示す²⁷⁾。外周部へ向かうほどゾーン（多層膜の界面）の乱れが大きくなるのが観察される。原因として、柱状構造による膜表面（多層膜界面）の凹凸の発生、膜の応力、成膜中に付着した不純物などが考えられる。特に、細線基板を回転させているので、スパッタされた粒子の斜め入射成分の割合が多く、斜射効果の影響による膜表面の凹凸の形成が避けられず、成膜装置に新たな工夫が必要である^{28,29)}。ゾーン部分の表面粗さを AFM で測定したところ、peak-to-valley の最大高さ R_{MAX} は約 100 nm であった。これらの多層膜試料を $10\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ の厚さに薄片化加工して FZP を作製した。

Fig. 6 Results of X-ray focusing test using multilayer Fresnel zone plate at Spring-8 (BL47XU): (a) Focusing image of 82.7 keV X-ray taken by X-ray camera, (b) X-ray microscopic image of resolution test pattern taken by scanning hard X-ray microscopy and (c) X-ray microscopic image of gold mesh (#1500) taken by imaging hard X-ray microscopy.

4.2 多層膜フレネルゾーンプレートの性能評価

マイクロビーム生成実験では、波長が0.14 nmのX線に対して0.6 μm のマイクロビームが得られた（最近、理論値に近い0.3 μm が得られた。詳細は別の機会に報告予定である）。集光効率は25%で、多層膜FZPとしては最高の値であった。また、波長が0.045 nmのX線に対して0.7 μm のマイクロビームが得られ、ビーム強度は 10^{10} photons/sであった。さらに波長が0.015 nmの極短波長X線に対して4 μm のビームが得られた（Fig. 6-(a)³⁰⁾。走査型X線顕微鏡実験での顕微鏡画像をFig. 6-(b)に示す³⁰⁾。測定した画像から0.2 μm のパターンまで解像されているのがわかり、マイクロビームの大きさは $\sim 0.4 \mu\text{m}$ と推定される。ビーム強度は 1×10^9 photons/sであった。結像型X線顕微鏡実験では線幅が0.5 μm のパターンを解像できた。また、金メッシュの鮮明な像が得られた（Fig. 6-(c)³¹⁾。

X線のエネルギーが30 keV以下の領域では、集光ビーム径は理論値より大きな値であった。ゾーン（多層膜界面）の凹凸、成膜における膜厚誤差、ナイフエッジの精度が主な原因と考えられる。また、エネルギーが80 keV以上の領域では、X線の透過力が非常に高いため

に測定精度が悪く、実際の集光ビームサイズは測定値よりも小さいものと推測される。このような極短波長域での使用に耐えうる厚いピンホールや、シャープなエッジを作製するための技術開発が急がれる。

一連の集光実験に使用した3種類の多層膜FZPは連続100時間以上の使用（放射光照射）の間、放射線損傷は観察されなかった。

4.3 他の光学素子との比較

2~6 keVのエネルギー領域のX線では、Kaulichらが微細加工技術で作製したAu製のFZPを利用した光学系（ESRF）で0.085 μm の分解能を達成している（4 keV）⁸⁾。

6~10 keVのX線ではYunらが微細加工技術で作製したAu製のFZPを利用した光学系（APS）で0.15 μm のマイクロビームを生成している（8 keV）^{7,32)}。Kagoshimaらは微細加工技術で作製したTa製のFZPを利用した光学系（SPring-8: BL24XU）で $\sim 0.9 \mu\text{m}$ のマイクロビームを生成し³³⁾、また、0.25 μm のパターンを解像した（10 keV）³⁴⁾。SnigirevらはBFLを利用した光学系（ESRF）で0.5 μm の分解能を達成している（9.5 keV）⁵⁾。MacDowellらはALS（Advanced Light Source）で、EngらはAPSでK-Bミラーを利用した光学系（ESRF）で $\sim 0.8 \mu\text{m}$ のマイクロビームを生成している（ ~ 10 keV）^{9,10)}。

10~30 keVのX線では、Lengelerらは金属製の屈折レンズを利用した光学系（ESRF）で0.35 μm の分解能を達成している（25 keV）¹¹⁾。Kohmuraらは細いガラス管中のグリセリンなどの液体にバブルを充填させた「マイクロキャピラリーレンズ」を利用した光学系（SPring-8）で0.4 μm の分解能を達成している（18 keV）¹²⁾。DuevelらはNiCr/SiO₂多層膜FZPを利用した光学系（SPring-8）で $\sim 0.8 \mu\text{m}$ のマイクロビームを生成している（18.6 keV）³⁵⁾。

50 keV前後のX線では、APSのグループが微細加工技術で作製した2枚のAu製のFZPを接近させ、見かけ上の厚みを増して短波長X線の集光を試み、7~9 μm のマイクロビームを生成している（50 keV）^{32,36)}。

これらの集光素子を利用して生成したX線マイクロビームのビーム強度は $10^9 \sim 10^{10}$ photons/sである³⁷⁾。

5. まとめ

X線集光素子の1つである多層膜フレネルゾーンプレート（FZP）の作製方法、開発したFZPを利用した集光実験の成果および関連分野の世界の研究動向を紹介した。大型放射光施設SPring-8における集光実験ではトップレベルのデータが得られ、多層膜FZPは特に高

エネルギー領域 (>25 keV) の集光にも有効であることがわかった。FZP は連続100時間以上の使用の間、放射線損傷は観察されなかった。このことから、高輝度放射光を利用した硬 X 線顕微鏡の実用化に大きく前進したと言える。測定された性能値を理論値に限りなく近づけるためには、成膜工程を中心に一層の工夫が必要である。今後、ゾーン (多層膜界面) の平滑性を改善するために成膜条件の検討、成膜装置の改良を引き続き行うと共に、多層膜 FZP の結像特性の理論的考察^{38,39)}も行いたい。また、マイクロビームを利用して微小領域の元素マッピング、化学状態のイメージングなどを行う予定である。

本報告で紹介した以外にも注目すべき新しい硬 X 線領域用の集光素子が最近相次いで発表され、今後の進展が期待される⁴⁰⁻⁴⁴⁾。

集光テストを行った SPring-8 での利用研究課題の課題番号は、1999A0091-NM-np, 1999B0080-CM-np, 1999B0103-NM-np, 2000A0160-NM-np である。

〔文 献〕

- 1) N. Kamijo, Y. Suzuki, S. Tamura, K. Handa, A. Takeuchi, S. Yamamoto, M. Ando, K. Osumi and H. Kihara: Rev. Sci. Instrum., 68 (1997) 14.
- 2) Y. Suzuki, N. Kamijo, S. Tamura, K. Handa, A. Takeuchi, S. Yamamoto, H. Sugiyama, K. Ohsumi and M. Ando: J. Synchrotron Rad., 4 (1997) 60.
- 3) 菅野 暁, 藤森 淳, 吉田 博: 新しい放射光の科学, (講談社, 2000) 第 1 章, p. 30.
- 4) G. Schneider, T. Schliebe and H. Aschoff: J. Vac. Sci. Technol., B13 (1995) 2809.
- 5) A. Snigirev, I. Snigireva, P. Bosccke, S. Lequien and I. Schelokov: Opt. Commun., 135 (1997) 378.
- 6) B. Lai, W. Yun, J. Maser, Z. Cai, W. Rodrigues, D. Legnini, Z. Chen, A. A. Krasnoperva, Y. Vladimirovsky, F. Cerrina, E. Di Fabrizio and M. Gentili: Proc. SPIE, 3449 (1998) 133.
- 7) W. Yun, B. Lai, Z. Cai, J. Maser, D. Legnini, E. Gluskin, Z. Chen, A. A. Krasnoperva, Y. Vladimirovsky, F. Cerrina, E. Di Fabrizio and M. Gentili: Rev. Sci. Instrum., 70 (1999) 2238.
- 8) B. Kaulich, R. Barrett, M. Salome, S. Oestreich and J. Susini: ESRF Newsletter, 34 (2000) 27.
- 9) A. A. MacDowell, C.-H. Chang, G. M. Lambie, R. S. Celestre, J. R. Patel and H. A. Padmore: Proc. SPIE, 3449 (1998) 137.
- 10) P. J. Eng, M. Newville, M. L. Rivers and S. R. Sutton: Proc. SPIE, 3449 (1998) 145.
- 11) B. Lengeler, C. G. Schroer, M. Richwin, J. Tummler, Drakopoulos, A. Snigirev and I. Snigireva: Appl. Phys. Lett., 74 (1999) 3924.
- 12) Y. Kohmura, K. Okada, A. Takeuchi, Y. Suzuki, T. Ishikawa, T. Ohigashi and H. Yokosuka: Nucl. Instrum. and Meth. A467-468 (2001) 881.
- 13) S. Suehiro, H. Miyaji and H. Hayashi: Nature, 352 (1991) 385.
- 14) A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva and B. Lengeler: Nature, 384 (1996) 49.
- 15) 籠島 靖: レーザー研究, 25 (1997) 377.
- 16) H. Aritome, H. Aoki and S. Namba: J. Vac. Sci. Technol., B3 (1985) 265.
- 17) D. Rudolph, B. Niemann and G. Schmahl: Proc. SPIE, 316 (1981) 103.
- 18) K. Saitoh, K. Inagawa, K. Kohra, C. Hayashi, A. Iida and N. Kato: Jpn. J. Appl. Phys., 27 (1988) L2131.
- 19) K. Saitoh, K. Inagawa, K. Kohra, C. Hayashi, A. Iida and N. Kato: Rev. Sci. Instrum., 60 (1989) 1519.
- 20) R. M. Bionta, E. Ables, O. Clamp, O. D. Edwards, P. C. Gabriele, D. Makowiecki, L. L. Ott, K. M. Skulina and N. Thomas: Proc. SPIE, 1160 (1989) 12.
- 21) R. M. Bionta, E. Ables, O. Clamp, O. D. Edwards, P. C. Gabriele, L. L. Ott, K. M. Skulina and T. Viada: Opt. Eng., 29 (1990) 576.
- 22) S. Tamura, K. Ohtani and N. Kamijo: Appl. Surf. Sci., 79/80 (1994) 514.
- 23) D. G. Stearns, R. S. Rosen and S. P. Vernon: Appl. Opt., 32 (1993) 6952.
- 24) S. Tamura, K. Mori, T. Maruhashi, K. Yoshida, K. Ohtani, N. Kamijo, Y. Suzuki and H. Kihara: Mater. Res. Soc. Proc., Vol. 441 (1997) 779.
- 25) S. Tamura, K. Ohtani, M. Yasumoto, K. Murai, N. Kamijo, H. Kihara, K. Yoshida and Y. Suzuki: Mater. Res. Soc. Proc., Vol. 524 (1998) 31.
- 26) N. Kamijo, Y. Suzuki, S. Tamura, M. Awaji, M. Yasumoto, Y. Kohmura and K. Handa: in "X-Ray Microscopy" edited by W. Meyer-Ilse, T. Warwick and D. Attwood, AIP Conference Proc. 507 (2000) 672.
- 27) 田村繁治, 安本正人, 上條長生, 鈴木芳生, 淡路晃弘, 竹内晃久, 高野秀和, 香村芳樹, 半田克己: SPring-8 利用者情報, 6 (2001) 31.
- 28) M. Yasumoto, S. Tamura, N. Kamijo, Y. Suzuki, M. Awaji, A. Takeuchi, H. Takano, Y. Kohmura and K. Handa: Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 4747.
- 29) 田村繁治, 安本正人, 上條長生, 鈴木芳生, 淡路晃弘, 竹内晃久, 高野秀和: 真空, 44 (2001) 376.
- 30) Y. Suzuki, M. Awaji, Y. Kohmura, A. Takeuchi, H. Takano, N. Kamijo, S. Tamura, M. Yasumoto and K. Handa: Nucl. Instrum. and Meth. A467-468 (2001) 951.
- 31) M. Awaji, Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takano, N. Kamijo, S. Tamura and M. Yasumoto: Nucl. Instrum. and Meth. A467-468 (2001) 845.
- 32) J. Maser, B. Lai, Z. Cai, W. Rodrigues, D. Legnini, P. Ilinski, W. Yun, Z. Chen, A. A. Krasnoperva, Y. Vladimirovsky, F. Cerrina, E. Di Fabrizio and M. Gentili: in "X-Ray Microscopy" edited by W. Meyer-Ilse, T. Warwick and D. Attwood, AIP Conference Proc. 507 (2000) 708.
- 33) Y. Kagoshima, K. Takai, T. Ibuki, K. Yokoyama, S.

- Takeda, M. Urakawa, Y. Tsusaka and J. Matsui: in "X-Ray Microscopy" edited by W. Meyer-Ilse, T. Warwick and D. Attwood, AIP Conference Proc. 507 (2000) 668.
- 34) Y. Kagoshima, T. Ibuki, K. Takai, Y. Yokoyama, N. Miyamoto, Y. Tsusaka and J. Matsui: Jpn. J. Appl. Phys., 39 (2000) L433.
- 35) N. Kamijo, Y. Suzuki, M. Awaji, A. Takeuchi, K. Uesugi, M. Yasumoto, S. Tamura, Y. Kohmura, A. Duevel, D. Rudolph and G. Schmahl: Nucl. Instrum. and Meth. A467-468 (2001) 868.
- 36) S. D. Shastri, J. M. Maser, B. Lai and J. Tys: <http://www.aps.anl.gov/xfd/communicator/user2000/shastri3.pdf/>
- 37) I. Snigireva and A. Snigirev: in "X-Ray Microscopy" edited by W. Meyer-Ilse, T. Warwick and D. Attwood, AIP Conference Proc. 507 (2000) 76.
- 38) 中島一敏 : 光学, 26 (1997) 685.
- 39) K. Nakajima: Optical review, 7 (2000) 266.
- 40) V. Aristov, M. Chukalina, A. Firsov, T. Ishikawa, S. Kikuta, Y. Kohmura, A. Svintsov and S. Zaitsev: in "X-Ray Microscopy" edited by W. Meyer-Ilse, T. Warwick and D. Attwood, AIP Conference Proc. 507 (2000) 554.
- 41) V. Aristov, A. Firsov, M. Grigoriev, T. Ishikawa, S. Kikuta, Y. Kohmura, S. Kuznetsov, L. Shabelnikov and V. Yunkin: in "X-Ray Microscopy" edited by W. Meyer-Ilse, T. Warwick and D. Attwood, AIP Conference Proc. 507 (2000) 558.
- 42) V. Aristov, A. Firsov, T. Ishikawa, S. Kikuta, Y. Kohmura and A. Svintsov: in "X-Ray Microscopy" edited by W. Meyer-Ilse, T. Warwick and D. Attwood, AIP Conference Proc. 507 (2000) 562.
- 43) Y. Zhang, T. Katoh, Y. Kagoshima, J. Matsui and Y. Tsusaka: Jpn. J. Appl. Phys., 40 (2001) L75.
- 44) V. Aristov, M. Grigoriev, S. Kuznetsov, L. Shabelnikov, V. Yunkin, C. Rau, A. Snigirev, I. Snigireva, T. Weitkamp, M. Hoffmann and E. Voges: Proc. SPIE 4145 (2001) 285.