Fabrication of X-Ray Lithography Masks Utilizing MEMS Technology

Harutaka Mekaru Non-member (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
h-mekaru@aist.go.jp)

Takayuki Takano Non-member (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
t-takano@aist.go.jp)

Koichi Awazu Non-member (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
k.awazu@aist.go.jp)

Ryutaro Maeda Member (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
maeda-ryutaro@aist.go.jp)

Keywords : MEMS, X-ray lithography, X-ray mask, Si dry etching, deep RIE

We fabricated silicon X-ray masks only in a dry etching without electroplating and chemical etching, and demonstrated the X-ray lithography in TERAS that was the synchrotron radiation (SR) facility of AIST.

The combination of an X-ray absorber and a membrane in the normal LIGA process may be used Au and polyimide. However, these materials' coefficient of thermal expansion is 14.3×10^{-6} /K and 25×10^{-6} /K, respectively. In case that the X-ray exposure time becomes long in order to expose a resist of the thickness 100 μm or more, there is a possibility that the transcribed pattern on resist transforms according to heat because that the width of the expansion of an X-ray absorber is different from that of a membrane. Then, we decided an X-ray mask made only with Si. Photographs of X-ray masks made only with Si is shown in fig. 1. Fig. 1(a) is a stencil X-ray mask without a membrane, and fig. 1(b) is an X-ray mask with a membrane.

Verticality and smoothness are requested from the sidewall of an X-ray absorber. In a general dry etching machine, it is difficult to process a vertical sidewall. We solved this problem by optimizing the etching condition of the Bosch process. This process uses SF_6 as an etching gas, and uses C_4F_8 as a passivation gas. We examined the relation between the pressures of these

gases in the reactive chamber and the shape changes in the Si structure's sidewall. The MUC-21 (Sumitomo Precision Products Co.,Ltd.) etching system can reduce a notch that occurs to Si on SiO_2 layer by generating the plasma at the low frequency of 380 kHz. Fig. 2 shows a cross-sectional SEM image of the Si X-ray absorber before backside etching. The pattern of this SEM image is line and space, and the minimum line width is 2 μm . As the mask undercuts are seen in the upper part of structures, and notches are seen in the bottom part of line width 2 μm patterns. However, a mask undercut is not confirmed in line width 5 μm , and a notch hardly exists. Therefore, if the line width is 5 μm or more, it possible to use ICP etching technique to fabricate an absorber for the X-ray mask.

Finally, the X-ray lithography was actually demonstrated using the Si stencil X-ray mask. X-rays were irradiated in the beam line BL-4 in TERAS of AIST. The operation energy was 750 MeV, and the maximum storage ring current was 270 mA. The exposure stage was on 70 mm downstream side from a Be window of 50 μm , and the He gas of 1 atm is flowing to replace from air and cool the X-ray mask during X-ray irradiation. A PMMA sheet of the thickness 1 mm and the Si stencil X-ray mask were piled and fixed on the exposure stage. X-rays irradiated for about 3 h, and total dose energy was 591 mA·h. Development was performed at room temperature for 18 h using a GG developer. The transcript of all patterns of line width 5, 10, 20, and 50, 100, 200 μm was succeeded as shown in fig. 3. The height of the PMMA structure was 104 μm . Moreover, the pattern of the line width of 2 μm was able to be transcribed. However, the depth of the pattern was about 500 μm for insufficient development. The edge part of the pattern was sharp, and X-ray absorbers fabricated by dry etching were achieved an enough contrast. Thus, we succeeded in fabrication of a Si stencil mask that can be used practically to an X-ray lithography using dry etching technique.

Fig. 1. Photographs of a Si X-ray mask fabricated by RIE; (a) without a Si membrane and (b) with a Si membrane

Fig. 2. Cross-sectional SEM image of the X-ray mask before backside etching

Fig. 3. Cross-sectional SEM image of PMMA microstructures after the X-ray lithography

MEMS 技術による X 線リソグラフィーマスクの試作

非会員 銘苅 春隆*

非会員 高野 貴之*

非会員 栗津 浩一**

正員 前田龍太郎*

Fabrication of X-Ray Lithography Masks Utilizing MEMS Technology

Harutaka Mekaru*, Non-member, Takayuki Takano*, Non-member, Koichi Awazu**, Non-member, Ryutaro Maeda*, Member

We fabricated two kinds of Si X-ray masks only in a dry etching without electroplating and chemical etching. The first mask is a stencil X-ray mask without a membrane. An X-ray absorber of thickness 30 μm with vertical sidewalls was able to be fabricated. The second mask is an X-ray mask with a Si membrane. The thickness of the X-ray absorber and the membrane is 30 μm and 5 μm , respectively. In addition, we succeeded in demonstration of the X-ray lithography in the beam line BL-4 of the synchrotron radiation facility Teras of AIST using the Si stencil X-ray mask. Line and space patterns with the line width 2 - 200 μm were transcribed plainly on the surface of a PMMA sheet. It was confirmed that the edge of PMMA microstructures was sharp by SEM observation.

キーワード: MEMS, X 線リソグラフィ, X 線マスク, ディープ RIE, PMMA レジスト

Keywords: MEMS, X-ray lithography, X-ray mask, deep RIE, PMMA resist

1. はじめに

LIGA プロセス (リソグラフィ: Lithographie, 電鍍: Galvanformung, 成形: Abformung を表す独度の頭文字)⁽¹⁾の最初の工程である X 線リソグラフィでは, X 線の光源としてシンクロトロン放射光を利用している。放射光は発生原理の特徴からレーザーに匹敵する高い指向性を持つ。さらに 1 keV 以上の光エネルギーを持つ X 線を選別することで, レジストに対する感光深度を飛躍的に深くすることができる。ところで X 線リソグラフィにおける X 線マスクの開発は, 高感度レジストの開発や三次元 X 線照射技術の研究と同様に重要な技術的課題である。一般的な X 線マスクの作製は, 1. パターニング, 2. X 線吸収体の作製, 3. 支持膜の作製, 4. 基板のバックエッチングの 4 段階に分けることができる。LIGA プロセスで良く用いられている組み合わせは, 電気鍍金された Au の X 線吸収体とスピンコーティングされたポリイミドのメンブレンである。この組み合わ

せは複数の研究グループで採用されており, 既に商業化もされている。しかし, レジストの厚みが 1 mm を超えるディープ X 線リソグラフィ(DXL)では, 通常の X 線リソグラフィに比べてかなり長い時間, 光エネルギーの領域が 5 keV 以上の X 線を照射し続けなければならない, 熱による X 線マスクの変形が生じる。これにより十分なコントラストを維持することが困難となり, DXL に対応した X 線マスクの開発が急務となっている。20 $^{\circ}\text{C}$ での Au とポリイミドの熱膨張係数はそれぞれ $14.2 \times 10^{-6} / \text{K}$ と $25 \times 10^{-6} / \text{K}$ である。X 線を照射する時間が短い場合には, この差はそれほど問題にならない。しかし, 厚み 100 μm 以上のレジストを感光させる場合には, X 線の照射時間が長くなるため, 熱による X 線吸収体とメンブレンの膨張長さの違いがパターンの転写精度に悪影響を及ぼす可能性がある。また, 高エネルギーの X 線を完全に吸収するためには, 十分な厚みを持つ高アスペクト比の X 線吸収体が必要である。作製工程でポジ型レジストを使用した場合では, 光リソグラフィや電子ビーム描画によるパターニングによって高アスペクト比を実現するために高さが 10 μm を越える構造体を作製することは非常に難しい。一方, ネガ型レジストをそのままメンブレンとして使用すれば, 厚膜塗布可能な SU-8 等を利用する方法が考えられる。しかし, レジストの感度が非常に高いために構造体側面の垂直性を制御することは困難で, 工程上剥離せざるを得ない場合にも非常に苦勞する場合が多い。そこで我々は, Si のみで X 線マスクを試作すること

* 独立行政法人 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門

〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1
Advanced Manufacturing Research Institute, National Institute of
Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
1-1-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564

** 独立行政法人 産業技術総合研究所 近接場光応用工学研究センター

〒305-8562 茨城県つくば市東 1-1-1
Center for Applied Near Field Optics Research, National Institute
of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8562

を考えた。今回は製作プロセスの確認を最優先にして、メンブレン構造を持たないステンシルマスクとメンブレン構造を持つマスクの2種類のX線マスクを全てSiのみで試作した。これらのSi製X線マスクは電気鍍金や化学エッチングなどを行わずにドライエッチングプロセスのみで作製した。完成したX線マスクを用いて、産業技術総合研究所のシンクロtron電子蓄積リング TERA⁽²⁾に設置されたビームライン BL-4⁽³⁾でポリメタクリル酸メチル (PMMA) シートの露光実験を行い、X線マスクとして十分に機能することを確認した。

2. X線マスク作製のためのプロセス設計

TERASの偏向磁石から出力された放射光のピークエネルギー値は1.9 keVである。Siの透過特性を計算すると10 μm の厚みで十分にX線を遮蔽できるが、X線吸収体自体に機械的強度を持たせるために厚み30 μm で設計した。Fig. 1にプロセス工程図を示す。最初に、厚み1 μm のSiO₂層が、厚み30 μm の活性Si層と525 μm のSi基板に挟まれたSOIウェハを用いる。次に、活性Si層表面にポジ型フォトリソレジスト ((MICROPOSITTM S1830, ROHM and HAAS electronic materials)を厚み3 μm でスピニングコーティングした。恒温槽内で加熱し、室温まで自然冷却した後、コンタクトアライナー (PEM-800, ユニオン光学 (株)) でUVを照射して、専用の現像液で現像した。ディープ反応性イオンエッチング (D-RIE)工程では住友精密工業 (株) 製のMUC-21を用いた。この装置はプラズマ発生方式として誘導結合プラズマ(ICP)を採用している。Siは圧力3 ~ 8 PaのSF₆とC₄F₈ガスに

よるサイクルエッチング(Bosch プロセス⁽⁴⁾)によって活性Si層を貫通エッチングした。次にウェハの裏面となる厚さ525 μm のSi基板にもUVリソグラフィーを用いてパターンニングを行い、D-RIE装置 (Alcatel 601E System, Alcatel Vacuum Technology Corp.)を用いてバックエッチングを行い、窓部を作製した。ここからメンブレン構造がある場合と無い場合で工程が分かれる。メンブレン構造は背面の窓部をSiO₂層まで完全にエッチングせずに、僅かにSi層を残すことで作製した。メンブレン構造を持たないステンシルマスクの場合はSiO₂層までバックサイドエッチングを行い、SiO₂層はウェハの裏側(窓側)からエッチングにて除去した。一方、メンブレン構造を持つマスクの場合には、ステンシルマスクに比べて約5分間短めにバックサイドエッチングを行い、約5 μm のSi層を残した。SiO₂層はウェハの表側(パターン側)からエッチングした。いずれのX線マスクの作製工程でも、SiO₂層のエッチングにはRIE装置(RIE-10NRS, (株) サムコ)を用い、エッチングガスとしてCHF₃ガスを選択した。SiO₂層を除去した理由は、SiO₂膜の内部応力によってX線吸収体構造が変形するのを防ぐためである。最後にレジストをSiO₂層除去と同じRIE装置にてO₂アッシングして除去した。

3. Bosch プロセスによるX線吸収体の作製

DXL対応のX線マスクではX線吸収体に数十マイクロメートル以上の厚みが必要となり、垂直性の良く、滑らかな加工面を持つシリコン深堀技術が必須である。1992年に、Bosch社のF. Laemer, A. Schilpにより「Bosch プロセス」⁽⁴⁾

Fig. 1. Process flows to fabricate a stencil Si X-ray mask without a membrane and a Si mask with a membrane.

と呼ばれる異方性 Si エッチングの方法が提案された。このプロセスはエッチングガスとして SF_6 を用い、パシベーションガスとして C_4F_8 を用いる。これらのガスを交互に切り替えて Si をエッチングする。これら 2 種類のガスは真空チャンバー内に送り出され、高周波電源を用いてプラズマ化される。 SF_6 分子は高いエネルギーを持った電子によって励起され、イオンやラジカルになる。これらの粒子が Si 基板と反応することによりエッチングされるのだが、その反応過程はスパッタリング(イオン反応)や化学反応(ラジカル反応)、およびイオンアシストメカニズム(イオンとラジカルの複合反応)が複雑に絡み合っている。

〈3・1〉 マスクアンダーカットとボーイング形状の低減

X 線吸収体の構造に求められる特徴は、パターン側の側面が垂直であり、且つ、その表面が滑らかなことである。Si のエッチングガスには F 原子が含まれているものを使用する必要がある。例えば SF_6 , CF_4 , NF_3 , XeF_2 , F_2 等がこれに当たる。これらのガスはプラズマ中で $\text{F}\cdot$ となり Si と結合して SiF_4 となる。しかしこれらのガスを単独で利用すると等方性エッチング反応が起きてしまい、マスク直下を大

きく削るマスクアンダーカットが生じる。

一般的に Si ウエハはプロセスチャンバー内でエッチングされるが、チャンバー内圧力によりエッチング形状が大きく異なる。先に述べたように、Bosch プロセスには原則 SF_6 と C_4F_8 のガスが用いられる。一般的には C_4F_8 に比べて SF_6 の流量が多く、エッチング時間も長い。エッチング条件にもよるが、流量で 1.5 ～ 3 倍程度、サイクル時間で 2 ～ 3 倍程度が標準である。チャンバー内の圧力が高いとガス種はチャンバー内に長く滞在する。長く留まったガス種はそれだけ多数回にわたり Si と反応する。また、プロセスチャンバー内の圧力を上げると、エッチングよりパシベーションの要素が強く表れてくる。この効果が垂直形状に対して悪影響を及ぼすため、トレンチ形状の悪化(ボーイング形状)に繋がる。Table 1 はプロセスチャンバー内圧力を 3 Pa から 8 Pa まで変化させて、10 分間エッチングした場合の Si 構造体の断面 SEM 写真である。パターン形状はライン&スペースで、左端から線幅が 2 μm , 5 μm , 10 μm のパターンの断面 SEM 写真である。プロセスチャンバー内圧力が増加すると、全体的にエッチング加工深さが深くなっているこ

Table 1. Cross-sectional SEM images of Si microstructures when the pressure in the process chamber was changed.

	Line width = 2 μm	Line width = 5 μm	Line width = 10 μm
Chamber pressure = 3 Pa
Chamber pressure = 4 Pa
Chamber pressure = 5 Pa
Chamber pressure = 6 Pa
Chamber pressure = 8 Pa

とが分かる。Fig.2はSi構造体幅の設計値が(a) 2 μm ; (b) 5 μm ; (c) 10 μm のそれぞれの場合で、プロセスチャンバー内圧力と実際に形成されたSiマイクロ構造体の幅の関係を数値化したものである。図中で”top”はSi構造体の最上部の幅を、”center”はSi構造体の中央部分の幅、”bottom”は最下部の幅を示している。Table 1より、いずれの線幅でもプロセスチャンバー内圧力が大きい場合には SF_6 ガスのエッチング効果が顕著となり、マスクアンダーカットが観察できる。一方、チャンバー内圧力を 8 Pa にすると、 C_4F_8 ガスによるデポジッション効果が支配的になる。その結果、 SF_6 ガスによるエッチングが妨げられ、トレンチの先端が先細りのボ

(a) Line width = 2 μm

(b) Line width = 5 μm

(c) Line width = 10 μm

Fig. 2. Relationship between the width of Si microstructures and the pressure of the process chamber.

ーイング形状になり、Si構造体の最下部は幅広がっている。線幅 2 μm ではチャンバー内圧力が 6 Pa の時に、最上部と最下部の幅の差が 0.27 μm まで低減し、最も垂直性の良い側面が得られた。一方、線幅 5 μm と 10 μm ではチャンバー内圧力が 5 Pa 時にマスクアンダーカットが最も低減でき、最上部と最下部の幅の差は、線幅 5 μm で 0.31 μm 、線幅 10 μm では 0.01 μm となった。従って、本実験で用いたプロセス条件では、線幅が大きいパターンほど垂直性の良いSi構造体が容易に作製できることが分かった。なお、チャンバー内圧力が 4 Pa の場合において、最もSiサイドエッチング量が大きくなり、Si構造体の幅が狭くなっている。また、圧力が 3 Pa の場合では、Table 1 でも確認できるように、エッチング深さが最も浅くなっている。これらの結果を踏まえて、実際にX線マスクを作製した際には、チャンバー内圧力を約 5 Pa に調整した。

〈3・2〉 ノッチの低減 ドライエッチング工程のもう一つの課題はノッチの低減である。Bosch プロセスではパターン幅が小さくなるとトレンチ内に入り込むイオンやラジカル数が減少する。従って、線幅の大きいパターンに比べて、線幅の小さいパターンの方がよりエッチング時間が長くなる傾向にある。このため、線幅の大きいトレンチでは、線幅の小さいトレンチが SiO_2 層に到達する間に過度にエッチングされる。本来であれば、SOI 基板の SiO_2 層はエッチング停止層として働くので、過度にSiはエッチングされないはずである。しかし実際には、Siのエッチングが進行し SiO_2 層の表面が露出すると、マイクロローディング現象によって SiO_2 層に沿って横方向にエッチングが進行するようになる。Table 2 にて白丸で示したように、このようにして発生した局所的な形状異常をノッチと呼んでいる。ノッチは酸化膜表面がチャージアップし、エッチャントとなるイオンが散乱されてしまうことから発生するものと考えられている⁽⁵⁾。この問題を解決する方法として、RF電源をパルス制御してチャージアップを抑制し、ノッチの形成を低減する手法が提案されている⁽⁶⁾。負の電位を掛けた下部電極はイオンやラジカルをプラズマ種よりSiウエハー側に引き付ける役割を持つ。さらに、この下部電極の出力を制

Fig. 3. Relationship between the length of notches and RF frequency.

Table 2. Cross-sectional SEM images of Si microstructures when the RF frequency impressed to the bottom electrode was changed.

	Line width = 2 μm	Line width = 5 μm	Line width = 10 μm
High frequency (13.56 MHz)
Low frequency (380 kHz)

Fig. 4. Photographs of Si X-ray masks fabricated by RIE; (a) without a Si membrane and (b) with a Si membrane.

御することで過度エッチングの際に酸化膜表面からイオンを脱離させる事ができる。今回使用した RIE 装置は、従来の装置では標準仕様となっている 13.56 MHz の高周波の他に 380 kHz の低周波を下部電極に印加することができる⁽⁶⁾。Fig. 3 にそれぞれの周波数を下部電極に印加した場合のノッチ形状の長さの変化を示した。13.56 MHz の高周波を印加した場合には、全ての線幅で 0.8 μm 以上のノッチが観察された。特に線幅 5 μm では、1.56 μm の長さに達している。線幅によっては、これらのノッチ形状は Si 構造体の倒壊や破損の原因になりかねない。Table 2 には高周波と低周波を下部電極に印加した場合について、Si 構造体の断面 SEM 写真をまとめてある。線幅 2 μm で一部の Si 構造体が倒壊や脱離している様子が観察できる。一方、380 kHz の低周波を印加した場合には、最大でも線幅 2 μm で 0.33 μm の長さまでしかノッチは成長せず、Si 構造体の倒壊も見られなかった。このように下部電極に低周波を印加した場合には、高周波を印加した場合に比べて酸化膜からのイオンの脱離を促し、劇的にノッチを低減できることが分かった。

〈3・3〉 X 線マスクの作製と X 線吸収体の側面観察

上述のような Si エッチングの条件の最適化を行い、Fig. 4 に示した X 線マスクを試作した。Fig. 4(a)はメンブレン構造を持たないステンシル X 線マスクであり、4(b)はメンブレン構造を持つ全て Si 製の X 線マスクである。

X 線マスクの窓の大きさは 30 mm $\times$ 20 mm であった。Fig. 5 は完成したステンシル X 線マスクの光学顕微鏡写真と最適条件で作製したバックエッチングする前の X 線吸収体構

Fig. 5. (a) Photograph of the X-ray mask by an optical microscope and (b) cross-sectional SEM image of the X-ray mask in the square frame of fig. 5 (a) before backside etching.

造の断面 SEM 写真である。この SEM 写真は光学顕微鏡写真の白枠の部分の断面部分である。断面 SEM 写真のパターン形状はライン&スペースで、最小線幅は 2 μm であり、X 線吸収体の厚みは 30 μm である。線幅 2 μm では Si 構造体上部にマスクアンダーカットが観察でき、下部にはノッチも確認できる。しかし、線幅 5 μm ではマスクアンダーカットは確認されず、下部のノッチも一部を除き、ほとんど観察されない。従って今回の試作結果から、線幅 5 μm 以上であれば X 線マスクの X 線吸収体構造の作製に RIE 技術が利用できることが分かった。また Bosch プロセスでは、マクロ的には非常に垂直性が良いが、微視的には側壁にスキヤロップと呼ばれるエッチング痕が形成される点が特徴である。エッチングレートに重きを置く場合は SF₆ ガスを多く、また長い時間チャンバー内に導入して反応させる。ただしエッチング反応が過多に起きるためにスキヤロップが大きくなり、表面粗度も大きくなってしまふ。逆に流量とエッチング時間を小さくした場合、表面は滑らかになるがエッチングレートは遅くなる。今回の X 線マスクの作製では、エッチングレートよりも滑らかな側面を優先して、エッチングステップ時間を短めに設定した。断面 SEM 観察の結果、

スキヤロップの最大粗度は約 100 nm であった。パターンの線幅が細い場合にはスキヤロップが X 線リソグラフィーの転写精度に悪影響を与える可能性がある。しかし、今回の X 線マスクのパターニングではコンタクトアライナーを使用しており、使用した装置の転写可能な最小線幅が 1 μm であったので、スキヤロップが X 線リソグラフィーに与える影響はフォトリソグラフィーでの精度に埋没してしまい、個別に評価することは困難であると考えた。従って今回の実験では、スキヤロップによる X 線吸収体の側面粗度の悪化が X 線リソグラフィーに与える影響は評価できなかった。

4. TERAS を用いた X 線リソグラフィーの実験

最後に、今回試作した Si 製ステンシル X 線マスクを用いて、X 線リソグラフィーの実験を行った。X 線露光は産業技術総合研究所 (AIST) の電子蓄積リング TERAS に設置されている X 線リソグラフィー用ビームライン BL-4 を用いて行った。TERAS は 1981 年から稼働しており、日本での商業用加速器技術の確立に大きく貢献した第二世代の電子蓄積リングである。通常の運転エネルギーは 750 MeV で、最大蓄積電流値は 270 mA である。BL-4 の光学的配置図を Fig. 6 に示す。BL-4 は曲率半径が 2.0 m の偏向磁石からの出力光を、光源点から 10 m 下流に配置された厚み 50 μm の Be 窓を通して露光ステージに導入している。露光ステージは Be 窓から 70 mm 下流側にあり、その間は 1 atm の He ガスをフローすることでガス置換と X 線マスクの冷却を行っている。露光ステージはパルスモーターによって傾斜されることができる。露光ステージ上でのビームサイズは 8 mm $\times$ 13 mm である。

厚み 1 mm の PMMA シートと Si 製ステンシル X 線マスクを重ねて露光ステージに固定した。露光エリアは 8 mm $\times$ 13 mm である。今回の実験では PMMA シートと X 線マスクのギャップをなくすために、X 線マスクの表側 (パターン側) が PMMA シートの表面に接するように配置した。つまり、X 線はバックエッチングしたマスクの裏側 (窓側) から入射する。この手法により、X 線マスクと PMMA シートの間のギャップから生じる X 線回折効果を極力抑え、パターンのエッジ部が丸くなるのを防ぐことができる。この理由から、PMMA シートには X 線マスクのパターンが左右反転して転写された。X 線露光は約 3 時間行い、総照射エネルギーは 591 mA $\cdot$ h であった。感光した PMMA シートは GG 現像液 (diethyleneglycol monobutylether: 60 vol. %, morpholin: 20 vol. %, ethanolamine: 5 vol. %, distilled water: 15 vol. %) にて、室温で 18 時間漬込んで現像した。現像工程の間、超音波振動や攪拌などの外力は一切加えていない。その後、リンス液 (diethyleneglycol monobutylether: 80 vol. %, distilled water: 20 vol. %) に室温で 30 分間浸した後、純水にて洗浄し、Ni ブローにて乾燥させた。

PMMA シートに転写されたライン&スペースパターンの光学顕微鏡写真を Fig. 7(a) に示す。線幅 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 μm の全てのパターンの転写に成功している。Fig.

Fig. 6. Optical configuration of the beam line BL-4 in TERAS.

Fig. 7. (a) Photograph of the PMMA sheet after the X-ray lithography by an optical microscope and (b) cross-sectional SEM image of the PMMA sheet in the square frame of fig. 7(a) after the X-ray lithography.

7(b)は線幅 5, 10, 20, 50 μm のライン&スペースパターンの断面 SEM 写真である。この SEM 写真は光学顕微鏡写真の白枠の部分の断面部分である。これらの写真より、パターンのエッジ部分が明瞭であることが観察できることから、ドライエッチングで作製した X 線吸収体が十分なコントラストを実現しており、X 線マスクとして充分実用可能であることが確認できた。光学顕微鏡の焦点深度の差から、線幅 5 μm 以上の PMMA パターンの加工深さは 104 μm と測定された。なお、線幅 2 μm のパターンも転写しているが、現像不足のために加工深さは半分の 50 μm 程度であった。

5. まとめ

我々は MEMS デバイス作製技術であるフォトリソグラフィーやドライエッチング技術を用いて、Si 製ステンシル X 線マスクとメンブレン構造を持つ Si 製の X 線マスクの試作に成功した。さらに試作した Si 製ステンシル X 線マスクを用いて、産業技術総合研究所電子蓄積リング TERAS にて X 線リソグラフィーの実験を行い、X 線マスクとして十分な特性を持つことを確認した。ディープ X 線リソグラフィーに対応した X 線マスクの作製は、垂直性が良く、長時間の X 線照射でも十分なコントラストを維持できるように X 線吸収体を高精度に厚く作製することが必須である。今回の実験で、我々は MEMS デバイス作製技術として研究開発が

進められている Si のドライエッチング技術を応用し、厚み 30 μm の Si 製 X 線マスクの試作に成功した。今後は試作した X 線マスクをディープ X 線リソグラフィに本格的に導入し、アスペクト比 50 を超える PMMA レジストのパターニングを目指す予定である。

謝 辞

この研究は、産業技術総合研究所の放射光施設 TERAS を利用して実施しました。産業技術総合研究所計測フロンティア研究部門光・量子イメージング技術研究グループに感謝申し上げます。

(平成 18 年 5 月 25 日受付)

文 献

- (1) E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Manerm, and D. Mu'nchmeyer: "Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming, and plastic moulding (LIGA process)", *Microelectron. Eng.*, Vol.4, pp.35-42 (1986)
- (2) S. Goko, H. Toyokawa, M. Koike, K. Watanabe, T. Zama, H. Ikeura, N. Saito, Y. Morishita, K. Awazu, A. Uritani, I. Suzuki, T. Saito, M. Ohkubo, T. Mikado, and K. Yamada: "Present Status of AIST Electron Storage Ring TERAS", *Proc. the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan*, pp.203-205, Funabashi, Japan (2004-8)
- (3) K. Awazu, X. Wang, M. Fujimaki, T. Kuriyama, A. Sai, Y. Ohki, and H. Imai: "Fabrication of two- and three-dimensional photonic crystals of titania with submicrometer resolution by deep x-ray lithography", *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol.B23, No.3 pp.934-939 (2005)
- (4) F. Lärmer and A. Schilp: German patent DE4241045 (1992)
- (5) N. Fujiwara, T. Maruyama, and M. Yoneda: "Profile Control of poly-Si Etching in Electron Cyclotron Resonance Plasma", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.34, pp.2095-2100 (1995)
- (6) S. A. McAuley, H. Ashraf, L. Atabo, A. Chambers, S. Hall, J. Hopkins, and G. Nicholls: "Silicon micromachining using a high-density plasma source", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.34, pp.2769-2774 (2001)

銘 苺 春 隆

理学博士。

(非会員) 1969 年生。1993 年宇都宮大学卒業。1996 年北陸先端科学技術大学院大博士前期課程修了。1999 年総合研究大学院大博士後期課程修了。1999 年(財)豊田理化学研究所奨励研究員, 分子科学研究所非常勤研究員, 2000 年から 2005 年姫路工業大学(現兵庫県立大学)高度産業科学技術研究所助手を経て, 現在, 産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門研究員。

高 野 貴 之

(非会員) 1974 年生。2001 年東京電機大学理工学研究科機械工学専攻卒業。同年アベックス(株)入社, ALCATEL 社 D-RIE 担当。2004 年産業技術総合研究所に移籍。現在, 主に MEMS 加工, 設計に関する研究に従事。

栗 津 浩 一

博士。

(非会員) 1962 年生。1986 年慶應義塾大学卒業。1988 年東京工業大学理工学研究科修士課程修了。1991 年同大学理工学科博士後期課程修了。同年工業技術院電子技術総合研究所入所。2001 年から 2002 年新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)電子・情報技術開発室主任研究員を経て, 現在, 産業技術総合研究所近接場光応用工学研究センターチーム長。工学

前 田 龍太郎

(正員) 1952 年生。東京大学大学院修士課程修了。マイクロファブリケーション, ハイアスペクト比加工。圧電材料の成膜技術などの研究に従事。現在, 産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門主幹研究員, ネットワーク MEMS 研究グループ長。工学博士。