放射光リソグラフィーによるプロトタイピング技術とその応用 (1)：波長可変型大面積リソグラフィー

内海 裕一*

Prototyping Using Synchrotron Radiation Lithography and Its Application Large Area Lithography with Variable Wavelength

Yuichi UTSUMI*

*兵庫県立大学高度産業科学技術研究所（〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都3-1-2）

*Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo (3-1-2 Koto, Kamigori, Ako-gun, Hyogo 678-1205)

1. はじめに

自動車をはじめとする精密機械産業や医療、携帯端末、エンターテインメントなどの各種産業分野において、MEMSの応用が急速に進んでいる。MEMSはPCや携帯電話のような情報機器、家電製品、自動車、電池、および医療システムといった高機能機器に搭載され、それらの機能の鍵を握っている。これらの高機能機器の中心機能をなすモジュールは電子回路による信号処理に加え、光学的、機械的および化学的な機能を集約した3次元構造をとる場合が多い。これまでMEMSは半導体微細加工を基本に、一部に研磨や、放電加工などの機械加工工程による立体加工技術によって作製されてきた。しかし最近、より微細で高アスペクト比（高さ／幅）の構造体の作製が重要となっている。これは構造体の寸法が微細化すればするほど比表面積（面積／体積）が大きくなり、静電力や表面張力、表面化学反応収率などのマイクロ構造体の機能発現に有利な自然現象の効果が顕著となり、部品としての性能が増すためである。特にマイクロシステムの医療やバイオ応用を展開する上で、生体組織の形状や細胞、DNAの形態に適合した3次元構造は、システム性能向上のブレークスルーとなり、多彩な機能の実現が期待できる。

このような高アスペクト比の構造体を形成する有力技術としてMEMS製造プロセスへの適用を検討されているものに、放射光を用いたLIGA（独語の略称：Lithographie, Galvanoformung, Abformung）プロセスがある¹⁾。このプロセスは、最初にDeepX線リソグラフィによる感光性樹脂の高アスペクト比微細構造体によるマスターを作製し、これを型に電鋳による金属金型を作製し、この金型をそのまま構造体部品として用いるか、もしくはこれを型として成型を行う一連の量産技術である。成型技術を用いる場合には、最終的に得られる構造体の材質は、金属以外に樹脂、ガラス、セラミックと選択肢が広い。露光には、エネルギー領域（3～20 KeV）の高い放射光を用いることにより、レジストへ

のX線侵入を深くし、高アスペクト比微細構造体を得ている。近年では露光に用いるX線のエネルギーは高エネルギー化しており、ドイツの放射光施設ANKAでは20 KeV程度高エネルギー放射光を利用して、高さ3 mmの高アスペクト比構造体を実現している。しかしながら、利用X線エネルギーの増大によって、露光に用いるX線マスクの吸収体は厚くなっている。例えば10 keV程度の高エネルギー露光時には10～20 μm の厚さの金吸収体が必要となり、実現できる線幅の下限は5 μm 程度と、微細化の限界が生じている。また、基本的に形成できるマイクロ構造体は2次元面内に展開する構造であり、3次元形状の作製があまり試みられていない。さらに一括可能な露光面積は70×70 mm²程度に留まっている。

一方、MEMSのさらなる集積化や機能集約のためには、高精度な微細構造体を大面積で実現できる次世代の加工技術の確立が重要である。このような要求は、各種センサのみならず、液晶ライティングパネルや光スイッチなどの光学部品や、DNAチップなどのバイオ部品、パワーマイクロ部品を中心に高まっている。しかし、大面積にわたって高アスペクト比の3次元加工を実現したX線リソグラフィシステムはこれまで実現されていなかった。

新たな試みとして、放射光が有するKeV領域の高輝度なX線の光子エネルギーを所望の構造体のサイズに応じて選択し、高アスペクト比加工とサブミクロン加工の両者を、大面積（A4サイズ）にわたって実現する次世代の波長可変型のX線リソグラフィ法を適用した兵庫県立大学の放射光施設「ニュースバル」を紹介する。さらに次回には、高輝度かつ高効率な液晶バックラットユニット導光板に応用した例を紹介する。

2. 光子エネルギー可変型大面積3次元X線リソグラフィの提案

2.1 露光の大面積化とX線光子エネルギーの制御

従来の代表的な海外のLIGA研究機関では、露光面積は

Fig. 1 LIGA beamline (BL2) equipped in NewSUBARU

70×70 mm²程度である。これは得られる放射光の横方向の幅、すなわち放射光を露光装置に導くビームラインの構造によって決定される。本研究においては、ビームラインの光軸方向を短縮化した設計により、ビームラインの全長を従来の65%程度まで短くした（全長16.5m）。これにより、横方向12 mrad、縦方向0.8 mradの放射光の取り込みが可能となり、ビームライン末端の露光位置で幅方向210 mmの放射光ビームを得た。これは露光位置でA4サイズの露光が可能となる大きさである。単位面積当たりの放射光強度の理論推定値は5.1 W/cm²である。

次に、所望の構造体の寸法に応じた露光波長の制御について述べる。10 KeV以上の高エネルギー放射光を利用した場合には、感光性樹脂の深い位置（2,000 μm以上）までX線が侵入するため、高アスペクト比の露光が可能となる。一方、構造体の最小線幅は、X線マスクの吸収体厚さ（10 KeVでは、金で10~20 μm程度必要）によって決まる。すなわちUVフォトリソプロセスや電子ビーム描画プロセスによって作製される吸収体パターンのアスペクト比は2以内であるため、線幅の下限は5 μm程度に留まり、それ以下の実現は困難となる。一方、2 KeV以下の低エネルギー放射光を利用した場合には吸収が大きく、感光性樹脂の浅い位置（30 μm以内）にX線の照射エネルギーを蓄積することができるため、UVフォトリソプロセスや電子ビーム描画プロセスによって作製した吸収体の厚さの薄い（0.4 μm程度）サブミクロンレベルの線幅のX線マスクが利用できることから線幅がサブミクロン、厚さが数十 μm程度の高アスペクト比の微細構造体の作製ができる。このように、露光X線の光子エネルギーを選択することにより、作製可能な微細構造体の線幅、寸法が、サブミクロンから数千 μmまでの広範囲にわたる加工が可能となる。

2.2 露光システムの作製と評価

本露光システムは、ハードウェア的には、放射光ビーム

ラインと多軸露光装置に分けられる。

最初にビームラインについて述べる。Fig. 1に作製したビームライン(NewSUBARU BL2)の構成を示す。このビームラインは、3~10 KeVの高エネルギービームラインと、100 eV~2 KeVの低エネルギービームラインの2本のビームラインを縦型に積層した平行構造を有する。低エネルギービームラインは入射角可変ミラーにより、EUVL (Extreme ultraviolet Lithography) 領域の100 eVから2 KeVまでエネルギー設定が可能である。差動排気効率を上げるためにビームダクトの形状を矩形形状とし、平行構造によるコンダクタンス損失を抑えるため、可変スリット機構を設けている。さらに、差動排気構造に応じたX線光学系の設計を行うことによりA4サイズの露光時においても、高エネルギービームラインで5桁、低エネルギービームラインは10桁の真空度差が得られ、露光ステーションへの基板冷却用Heガス導入は1気圧まで可能である。なお本ビームラインを設置のニュースバルの電子エネルギーと最大蓄積電流値は1.5 GeV、500 mAである。

Fig. 2に高エネルギービームライン、および低エネルギービームラインの放射光スペクトル（理論値）を示す。電子エネルギー1.5 GeV、蓄積電流値300 mAとして計算した。低エネルギースペクトルはミラーへの斜入射角が4度までのものを示し、斜入射角を1.5度にするとサブミクロンサイズのリソグラフィに適した1~2 KeV領域のスペクトルが得られる。放射光スペクトルを、シリコンドリフト型検出器によって測定した結果、理論値とほぼ一致したピークと半値幅を持つスペクトルが得られた²⁾。

3. X線露光特性と3次元微細加工構造の形成

次に、作製した光子エネルギー可変型3次元X線リソグラフィシステムによる加工特性を評価した結果を述べる。まず露光チェンバ中の蛍光板モニターを用い光線追跡シミュ

Fig. 2 Calculated spectrum of synchrotron radiation at BL2

Fig. 3 Dose dependence of processing depth

○: Result at the case of 1.5 GeV spectrum

■: Result at the case of 1.0 GeV spectrum

レーション結果にはほぼ等しい形状のビームが得られていることを確認した。次に露光実験によりPMMAの加工特性を評価した。Fig. 3に示すように加工深さの露光量依存性は光エネルギーの差を反映して、飽和加工深さが高エネルギーほど大きく、低エネルギーほど小さい特性を示した。加工深さのA4サイズ面内ばらつきは4~7%であった。次に、SUS製のX線ステンシルマスク（厚さ100ミクロン）を用いたパターンニング実験を行い、A4サイズにわたって微細構造が均一に形成されることを確認した。Fig. 4上図にA4サイズのPMMA板に形成した構造体の外観を示す。また、下図に高アスペクト比パターン形成の例を示す。

さて、3次元微細加工が実現できれば微細形状の自由度が広がり、機能適用性の富んだ新たなプロセスが期待できる。3次元加工に関しては、①X線マスクとレジスト基板の両者を入射放射光に対して種々の角度で多重露光を行うことによって3次元構造体を作製する方法と、②X線マスクとレジスト基板の相対位置を露光中に細かくステップア

Fig. 4 (a) Large area patterning up to A4 size
(b) High aspect ratio patterning

ンドリピート的に変化させることにより、露光強度分布を精密に形成して3次元構造体を作製する方法（多重ステップ露光）、さらには、③X線の回折効果を用いて3次元構造体を作製する方法が一般的である。すべての方法を実現するため、多軸移動ステージを用いた長スパンの走査露光装置が作製された。感光性樹脂とX線マスクの相対位置の移動、およびこれらを同時に放射光ビームに対して傾斜させる動作、および面内走査が最大7軸の露光ステージの移動はあらかじめプログラムされた速度、移動範囲、繰り返し回数などに従って自動制御する。放射光照射による基板への熱負荷は、赤外線温度計により測定したが、直接照射によってPMMA基板の温度は130℃まで上昇するが、Heを0.1気圧導入することによって65℃まで低下し、さらに速度10 mm/minのスキャンを加えることによって34℃まで低下する。したがって、He導入とスキャン露光を加えることにより、露光中のPMMAへのX線過熱負荷の影響が無視しうるレベルまで低減された。次に、3次元微細構造体として、②および③の方法を用いて円錐柱構造を形成した。円ドット径は60 μmとし、露光はPMMAシートを用い、照射ドーズはそれぞれ、3,000 mA·sec·mm, 20,000 mA·sec·mmとした。このように、円錐柱の平均のテーパ角度は70度から50度に制御できることを確認し、一定の形状制御性を有する3次元微細構造体がA4サイズの大面

積にわたって形成可能である。

(2008.7.31-受理)

文 献

- 1) E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner and D. Munchmeyer: "Fabrications of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Hights by Synchrotron Radi-

- ation Lithography, Galvanoformung, and Plastic Moulding (LIGA process)", Microelectronic Eng., Vol. **4**, pp. 35-56, 1986
- 2) Y. Utsumi, T. Kishimoto, T. Hattori and H. Hara: "Large Area X-Ray Lithography System for LIGA Process Operating in Wide Energy Range of Synchrotron Radiation", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. **44**, No. 7B, pp. 5500-5504, 2005