ナノインプリント技術

松 井 真 二

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 ☎ 678-1201 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3 丁目 1 番 2 号

(2004 年 3 月 8 日受理)

Nanoimprint Technology

Shinji MATSUI

Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo
3-1-2 Koto, Kamigori, Ako, Hyogo 678-1201

(Received March 8, 2004)

Nanoimprint lithography (NIL), by which resist patterns are fabricated by deforming the physical shape of the resist by embossing with a mold, is a very useful lithography technique. This has been demonstrated for making nanostructure devices such as a quantized magnetic disk. This technique has excellent features, such as being able to create lithographic printing that is sub-10 nm in size over a large area. NIL has increasingly been recognized as a key nanomanufacturing technology that will play a critical role in commercialization of nanostructures. NIL is opening up many opportunities, because of sub-10 nm resolution in both feature size and critical dimension control, low-cost, high-throughput, large area, high fidelity, and excellent repeatability. This article overviews a recent development of NIL and related technologies such as soft lithography.

1. ナノインプリント総論

ナノインプリントは、光ディスク製作では良く知られているエンボス技術を発展させ、その解像性を高めた技術であり、凹凸のパターンを形成したモールドを、基板上の液状ポリマー等へ押し付けパターンを転写するものである。この技術を半導体素子や光素子あるいは、ナノ構造材料形成等新たな応用へ展開しようとする試みであり、10 nm レベルのナノ構造体を、安価に大量生産でき、かつ高精度化が可能となりうる技術として近年注目を浴びている。1995 年にプリンストン大学の Chou 教授が、ポリマーのガラス転移温度付近で昇温、冷却過程により 10 nm パターン転写が可能であるナノインプリント技術を発表した¹⁾。その後、米国のテキサス大学、ドイツのアーヘン大学が 1996 年に紫外光硬化樹脂を用いた、光ナノインプリント技術を発表した²⁻⁴⁾。ナノインプリント技術が発表される 2 年前の 1993 年に、ハーバード大学の Whitesides 教授がマイクロコンタクトプリント技術

を発表している^{5, 6)}。これは、ソフトリソグラフィと呼ばれる技術で、レジストパターン等の原版を PDMS (ポリジメチルシロキサン) に型取りし、マスクとするものである。現状技術としてはこの 3 つの技術が実用上、重要である。それぞれの技術の特徴を Table 1 に示す。ナノ構造転写技術として見たときには、装置コストはかなり廉価になるものと期待され、マスクに対応するモールドも 1 対 1 であるが、バルクのマスクであることから、比較的容易に製作できるものと考えられる。

2. ナノインプリント

2.1 熱サイクルナノインプリント

Chou らによるナノインプリントプロセスを Fig. 1 に示す。熱可塑性樹脂の PMMA (ポリメタクリル酸メチル: ガラス転移温度 (T_g) 105 °C, 購入先: 東京応化工業 (株), OEER-1000) を基板に塗布し、PMMA ポリマー層のガラス転移温度以上に昇温し、ポリマーを液状とする。その後、モールド (Si 基板、または SiO₂/Si 基板の SiO₂ 層にパターン形成) をプレスし、ガラス転移温度以下に冷却後、モールドと基板の引き離しを行う。こ

E-mail: matsui@lasti.u-hyogo.ac.jp

Table 1. Features of various imprint methods.

	Resolution	Process temperature	Alignment accuracy	Mold
Soft lithography	50 nm	25 °C	—	PDMS
Nanoimprint	10 nm	100–200 °C	0.5 μm	Si, SiO ₂ /Si
UV imprint	10 nm	25 °C	0.1 μm	Quartz

Fig. 1. Nanoimprint process.

のプロセスは、レジストを変形させるときに熱を加えて、型押しして固めるときに冷却しているため、熱サイクルナノインプリントと呼ばれている。熱サイクルナノインプリントを用いて、シリコン、GaAs デバイス、磁気デバイス、光デバイスなどの各種デバイスを作製しており、多層レジスト構造を用いることにより段差のあるところにもナノインプリントを行うことができる⁷⁻¹⁶⁾。

ナノインプリントリソグラフィの創始者である Chou らが行った実験では、シリコン上のパターン転写層には、PMMA が用いられている。また、モールドにはシリコン熱酸化膜上にレジストを塗布し、そのレジストを電子ビーム直接描画でパターンニングし、それをマスクとしてドライエッチで加工したものを用いている。Chou らの実験により、10 nm 以下の転写が可能なが示され、本技術自体には解像度限界がなく、解像度はモールドの作製精度によって決まることが実証された。現状のフォトマスクと同様に、モールドさえ入手できれば、従来のフォトリソグラフィより簡便に、遥かに安価な装置により、極微細構造が形成できることから、大きなインパクトを与えた。Si 基板上の SiO₂/Si モールドを用いて、インプリントされた 10 nm の PMMA 転写パターンが実証されている⁹⁾。

モールドと基板は、光学顕微鏡により位置合わせを行い、専用のカセットにより固定するという方法で、ゲートやホールパターンなどの 4 層をインプリント形成、MOS トランジスタを作製しているが、位置合わせ精度

Fig. 2. PMMA patterns with a high aspect replicated by NIL (Ref. 17).

は、0.5 μm 程度である。このように、熱サイクルインプリントは、簡便な装置で、大面積に 10 nm オーダの構造を形成できる量産技術としての可能性を有している。

Fig. 2 は、高アスペクトパターンの PMMA へのパターン転写例を示している。線幅が、200 nm、高さが 1.2 μm の高アスペクト比パターンを一括して作製することができる¹⁷⁾。さらに、ナノインプリントの転写均一性を測定した例で、4 インチウエハー上で、30 nm の精度が確認されている¹⁸⁾。また、熱サイクルナノインプリントの計算機シミュレーションも報告されている¹⁹⁾。

熱サイクルナノインプリントは、高精度位置合わせが困難、熱膨張によるパターン位置精度の劣化、昇温、冷却サイクルに時間がかかるなどの問題があるが、モールドと基板間の位置合わせがそれほど厳しくなく、単層インプリントのみで済む、高密度メモリーディスクや回折格子などの作製に適している。

Fig. 3 は、熱サイクルナノインプリントにより形成した PMMA 転写パターンを用いて、Ni メッキにより作製した磁気ディスク構造を示している¹²⁾。

転写される材料の機能性を保ったまま、熱サイクルナノインプリントすることにより、機能性デバイスを作製することができる。有機発光材料を直接インプリントすることによって、1 回のプロセスで有機発光素子の構造体作製が報告されている²⁰⁾。このように、熱サイクルナ

Fig. 3. 18 Gbit/inch² large area perpendicular quantum magnetic disk (QMD) fabricated by NIL (Ref. 12).

ノインプリントされる材料に機能性材料を用いることにより、プロセスの簡略化とともに、新機能性の創出が期待できる。さらに、1回の熱サイクルナノインプリント転写で、周期 190 nm のブロードバンド用光導波路偏光素子等の作製が報告されている²¹⁾。このように、熱サイクルナノインプリント技術は、光デバイス開発に応用展開されている。

バイオデバイスへのナノインプリント応用例として、バイオセンサー電極作製に熱サイクルナノインプリントを適用した例が報告されている。大きな電極パターンは通常の光リソグラフィで作製し、微細なバイオセンサー電極部を熱サイクルナノインプリントで作製している²²⁾。

熱サイクルインプリントの変形として、ローラナノインプリントが報告されている²³⁾。基板をガラス転移点温度以下、ローラをそれ以上の温度に昇温しておき、ローラ上の凹凸パターンあるいは平面基板上の凹凸を回転させながら転写する。ローラの周りにモールドを作っておくと、転写される側はシート状の長いものができ、長さに制限のないナノインプリントを可能にする。

ナノインプリントモールド側の PMMA レジストを塗布し、インプリント温度等のプロセス条件を最適化することにより、モールド側の PMMA パターンを基板側に

Fig. 4. 3 D structure fabrication by nanotransfer process (Ref. 24).

Imprinted 3-layer Polymer Structure

Fig. 5. PMMA 3-layer structures by nanotransfer process (Ref. 24).

移動させることが可能であり、ナノトランスファー技術として報告されている²⁴⁾。**Fig. 4**は、ナノインプリント技術によるナノトランスファーを、3回行うプロセスを示している。**Fig. 5**は、このナノトランスファー技術を用いて形成された3層のPMMA 3次元構造を示している。このように、ナノトランスファープロセスにより、3次元フォトニックデバイス作製への応用が行われている。

2.2 室温ナノインプリント

熱サイクルナノインプリントは、熱膨張によるパターン位置精度の劣化、昇温、冷却のプロセス時間が長い等の問題点がある。これらの問題点を解決するために、ゾルゲル系材料を用いた室温ナノインプリントが提案さ

れた^{25, 26)}。室温インプリントプロセスは、まず、シリコン基板に SOG (Spin-on-Glass : 東京応化工業 (株), OCD 5900) か HSQ (Hydrogen Silsequioxane : Dow Corning Co. FOX 16, 購入先 : 東レ・ダウコーニング (株)) を塗布し、温度を上げることなくモールドを 5 MPa 程度の圧力で押さえつける。モールドを基板から離すとモールドパターンが基板材料に転写される。HSQ のプリベーク温度とインプリント深さの関係が測定された。スピンの塗布時は、非常に粘性があるので、薄膜になっていないが、それを 50℃, 100℃, 150℃, 200℃ とプリベークすると薄膜化する。スピン塗布時に 300 nm の初期膜厚では、例えば 4.5 MPa の圧力下で、50℃, 20 分間加熱した場合、250 nm のインプリント深さ、即ち残渣がおおよそ 50 nm 残る。しかし、150℃ を超えると非常に固くなり、プレスできなくなる。そこで、50℃ でプリベークして使用する。シリコン基板上に形成された SiO₂/Si のモールドを用いて HSQ にインプリント転写した結果を Fig. 6 に示している。線幅 50 nm のラインパターン転写が実証された。熱インプリント、室温インプリント

Fig. 6. HSQ line patterns with 50 nm linewidth by room-temperature NIL (Ref. 26).

においても、モールドとレジスト基板との剥離が大変重要である。本実験では、モールド表面にフッ素系剥離材 (オプツール DSX, ダイキン工業 (株)) を用いた。

2.3 光ナノインプリント

光ナノインプリント (UV ナノインプリント) は、室温プロセスで、石英基板表面に凹凸パターンをつけた透明モールドを用いる。低粘性の光硬化樹脂をレジストとして用いているため、石英モールドのレジストへのプレス圧は、熱ナノインプリントが 5–10 MPa であるのに対して、0.1 MPa 以下と極めて小さい。これらの特徴のために、位置合わせ精度および重ね合わせ精度は基本的に現状の光ステッパと同程度であると期待できる。パターン転写には紫外光が用いられるが、その解像度は光の波長に依存せず、石英モールドのパターンサイズにより決まる。

光ナノインプリントは熱で形状が変化する熱可塑性樹脂の代わりに、紫外光で形状が硬化する光硬化樹脂を用いたものである^{2–4)}。このプロセスは、粘度の低い光硬化樹脂をモールドで変形させて、その後に紫外光を照射して樹脂を硬化させ、モールドを離すことによりパターンを得るものである。パターンを得るのに紫外光の照射のみで行えるので、熱サイクルに比べ、スループットが高く、温度による寸法変化等を防ぐことができる。また、モールドには紫外光を透過する石英モールドを使用するので、モールドを透過しての位置合わせが行える利点もある。ステップ&リピートによりウエハー全面へのインプリントも可能となる。上記のような利点を有する光ナノインプリントリソグラフィを行うために、Fig. 7 に示すような装置が報告されている^{4, 36, 37)}。この装置では、比較のために、熱サイクルナノインプリントリソグラフィも行えるようになっている。光硬化樹脂 (東洋合成

Fig. 7. UV nanoimprint apparatus (Ref. 4 and 37).

Fig. 8. Dot patterns with 40 nm diameter replicated by UV NIL (Ref. 37).

(株), PAK-01) を用いる場合は, 上方からサファイア窓を通して紫外光を照射して行う。熱サイクルのインプリントの場合は, 基板ホルダー下のヒーターを加熱することによって行う。モールドはサファイア窓に取り付け, レジストを塗った基板が上方に移動することによって押し付けを行う。モールドと基板の接触時に樹脂内に大気中の泡が取り込まれパターンが劣化する恐れがあるので, インプリント時には真空雰囲気中で行えるようになっている。到達真空度は 10^{-2} Torr である。インプリント時の荷重はロードセルにより測定している。紫外光光源には, 高圧水銀ランプが用いられている。この光源の波長は 300 nm~400 nm で, 光ファイバーのガイドを通じて 1 cm^2 の範囲に照射できる。Fig. 8 に, 直径 40 nm のドットパターンを示す。この転写結果は, 光インプリントの高解像性を示している。

テキサス大学の Willson 教授らは, 通常の紫外線光アライナーを改造した装置を用いて, 光インプリントの実験を行い, 高さが 300 nm, 線幅が 50 nm のパターン形成を実証した²⁷⁾。光硬化樹脂を塗布した基板に石英モールドを押し付け, 紫外線照射により光硬化させる。その後, 現像することにより, パターンが形成される。これは, インプリントであるので, 光の回折に影響されなく, 石英モールドのパターンが高精度に転写できる。Fig. 9 は, 平坦化された凹凸基板上に, 通常の光プロセスと同じプロセスで, 光インプリントにより形成したパターンである。石英モールドのアライメントも通常の光リソグラフィと同様に行うことができる。これらの転写結果は, 光インプリントが半導体を初めとする高解像度, 高精度, 高スループットリソグラフィプロセスとして有望であることを示している。Motorola Inc. の研究グループは, Mo-

Fig. 9. 250 nm features replicated organic patterns on a substrate with a 700 nm tall pre-existing grating structure by UV NIL (Ref. 27).

lecular Imprints 製の光インプリント装置を用いて, 半導体リソグラフィへの適用検討を行っている。フィールドサイズ 25 mm 角で Step&Flash を行い, 200 mm ウエハ全面に 60 nm のコンタクトホールパターンを得ている。25 フィールドを繋ぎ, 10 nm (3σ) の高精度フィールド繋ぎを得ている。

Chou 教授らのグループは, SiO_2 モールドを用いて, 光ナノインプリントにより, 5 nm パターン形成に成功している²⁸⁾。さらに, MBE で作製した GaAlAs/GaAs 超格子構造を有した基板をカットした後, ウエットエッチングして, その断面凹凸構造をモールドとして用い, 光ナノインプリントでピッチ 14 nm パターン転写に成功している。このように, 光ナノインプリントは, パターン転写精度, 解像度を共に満足する技術であり, 半導体デバイス製造への適用が期待される。2003 年の ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors: <http://public.itrs.net/>) のリソグラフィロードマップから, 32 nm ノードのリソグラフィツールとしてナノインプリントが EUV (Extreme Ultra Violet Lithography: 極端紫外線露光), EPL (Electron Projection Lithography: 電子線一括転写露光) と共に掲載されている。

3. ソフトリソグラフィ

PDMS スタンプを使用したコンタクトプリントは, 柔らかい PDMS モールドを用いているために曲面上への転写が可能であり, ソフトリソグラフィと呼ばれており, ハーバード大学の Whitesides 教授によって発表された^{8, 29-31)}。ソフトリソグラフィは, 電気泳動のマイクロ流路作製などに汎用されており, 非常に簡便な実用技術である。

Fig. 10. Soft lithography processes (a) Microcontact printing, (b) Micromolding in capillaries, (c) Microtransfer molding, and (d) Near-field phase-shifting lithography (Ref. 31).

ソフトリソグラフィを行うために、PDMS モールドを作製する。まず、光、電子ビーム露光等で基板上にレジストパターンを形成した後、PDMS (ポリジメチルシロキサン: SYLGARD 184, DOW CORNING Co., 購入先: (株) フジテック) を液滴し、70~120℃、20 分ベーキングする。このベーキングにより、PDMS の薄膜が形成される。その後、室温に戻した後、基板の端から PDMS 薄膜をピンセットで剥離すると、きれいにレジストパターンの PDMS 薄膜型が作製できる。この PDMS モールドは、50 nm の解像度が報告されている。

ソフトリソグラフィプロセスとして、Fig. 10 (a)~(d) に示す 4 種類のプロセスがある³¹⁾。

①マイクロコンタクトプリント (Fig. 10 (a)): PDMS モールドをスタンプに用いたプロセスがマイクロプリントと呼ばれる方法である。チオールを含む有機高分子溶液をスタンプに塗り、金薄膜に接触させると、チオール分子は金表面と結合して分子が綺麗に配列した自己組織化膜を形成する。これを、デバイスプロセスに利用する。

②毛細管マイクロモールド (Fig. 10 (b)): PDMS スタンプを固体表面に置き、そこに液状ポリマーを注ぐ。スタンプのへこんだ部分と固体表面の隙間に毛細管現象で液状ポリマーが流れ込む。流し込んだポリマーが固まると、表面に固化したパターンが作製でき光学素子作製等への応用が可能である。

Rubber Stamps and Plastic Circuits for Electronic Paper

Fig. 11. Plastic circuit for electronic paper fabricated by soft lithography (Ref. 33).

③マイクロトランスファーモールド (Fig. 10 (c)): PDMS スタンプの凹凸にレジスト等のポリマーをモールドし、基板に押し付けることによりモールドされたポリマーを基板上にトランスファーし、加熱することにより、パターン化する方法である。

④近接場リソグラフィ (Fig. 10 (d)): フォトレジストを塗布した基板上に PDMS モールドをコンタクト光露光用マスクとして押し付け、紫外線 (UV) 露光すると、PDMS の凹凸パターンで位相シフトが生じパターン形成が可能となる。さらに、凹凸のサイズが UV 波長よりも小さい場合、近接場光によるパターン転写が可能となる。

マイクロコンタクトプリントでは、PDMS モールド表面に、チオール酸をつけ、Au の薄膜上にコンタクトプリントさせると、チオール酸のパターンが Au の薄膜上に形成される。その後、チオール酸をマスクにしてエッチングを行うと、チオール酸のパターンが Au の薄膜上に形成される^{5, 32)}。Fig. 11 は、マイクロコンタクトプリントにより作製した電子ペーパーのためのプラスチック回路を示す³³⁾。プラスチックレーザ用の回折格子パターンを PDMS モールドを用いたナノインプリントを用いて作製した例が報告されており、ピッチ 200 nm, 線幅 100 nm パターンが転写されている³⁴⁾。さらに、PDMS マスクを用いた、位相シフトリソグラフィにより、球面上にパターン形成した例も報告されている³⁵⁾。

4. ま と め

熱サイクルナノインプリント、光ナノインプリント、ソフトリソグラフィ技術について概説した^{36~38)}。それぞれ特徴のある産業に有用な実用ナノテクノロジー技術である。熱サイクルナノインプリントは、重ね精度を問題としない分野で、300 mm ウエハー一括転写も可能にし、

光ナノインプリントは、重ね精度を満足すると共に、機能性材料のパターン創製、微細デバイスの量産に魅力的な市場を開拓していくと期待される。ソフトリソグラフィは、電子ペーパーの曲面転写、バイオ分野等および大面積転写の分野で利用されていくと考えられる。

ナノインプリントの実用化と共に、ナノインプリントの国際会議 (<http://www.nntconf.org/>) が、Chou 教授により開催された。第1回および第2回 NNT 国際会議 (International Conference on Nanoimprint Nanoprint Technology) が2002年および2003年12月にサンフランシスコおよびボストンで開催された。第3回 NNT 国際会議は、2004年12月1～3日にオーストリアのウィーンで開催予定である。さらに、第4回 NNT 国際会議は2005年10月19～21日に日本 (奈良公会堂) で開催予定である。

これまでは、ナノテクノロジーの必須技術であるナノパターン形成は電子ビーム描画装置を保有する限られた研究機関でしかできなかった。しかし、安価かつ高性能転写を実現するナノインプリント装置を導入することにより、どこの大学、研究機関、企業などにおいても、ナノパターン形成を行うことができるようになる。このように、ナノインプリント技術はナノテクノロジー研究および産業発展に重要かつ不可欠の技術である。

文 献

- 1) S.Y. Chou, P.R. Krauss and P.J. Renstrom: Appl. Phys. Lett. **67**, 3114 (1995).
- 2) J. Haisma, M. Verheijen and K. Heuvel: J. Vac. Sci. Technol. B **14**, 4124 (1996).
- 3) T. Bailey, B.J. Chooi, M. Colburn, M. Meissi, S. Shaya, J.G. Ekerdt, S.V. Sreenivasan and C.G. Willson: J. Vac. Sci. Technol. B **18**, 3572 (2000).
- 4) M. Komuro, J. Taniguchi, S. Inoue, N. Kimura, Y. Tokano, H. Hiroshima and S. Matsui: Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 7075 (2000).
- 5) A. Kumar and G.M. Whitesides: Appl. Phys. Lett. **63**, 2002 (1993).
- 6) T.K. Whidden, D.F. Ferry, M.N. Kozicki, E. Kim, A. Kumar, J. Witbur and G.M. Whitesides: Nanotechnology **7**, 447 (1996).
- 7) P.R. Krauss and S.Y. Chou: J. Vac. Sci. Technol. B **13**, 2850 (1995).
- 8) N.L. Jeon, J. hu, G.M. Whitesides, M.K. Erhardt and R. G. Nuzzo: Advanced Materials, **10**, 1466 (1988).
- 9) S.Y. Chou, P.R. Krauss, W.L. Guo and L. Zhuang: J. Vac. Sci. Technol. B **15**, 2897 (1997).
- 10) L. Guo, P.R. Krauss and S.Y. Chou: Appl. Phys. Lett. **17**, 1881 (1997).
- 11) X. Sun, L. Zhuang, W. Zhuang, L. Zhuan, L. Kong and S. Y. Chou: J. Vac. Sci. Technol. B **16**, 3922 (1998).
- 12) W. Wu, B. Cui, X. Sun, W. Zhuang, L. Zhuan, L. Kong and S.Y. Chou: J. Vac. Sci. Technol. B **16**, 3825 (1998).
- 13) M. Li, J. Wang, L. Zhuang and S.Y. Chou: Appl. Phys. Lett. **76**, 673 (2000).
- 14) P. Ruchhoeft, M. Colburn, B. Choi, H. Nounu, S. Johnson, T. Bailey, S. Damle, M. Stewart, J.G. Ekerdt, S. V. Sreenivasan, J.C. Wolfe and C.G. Willson: J. Vac. Sci. Technol. B **17**, 2965 (1999).
- 15) Z. Yu, S.J. Schablitsky and S.Y. Chou: Appl. Phys. Lett. **74**, 2381 (1999).
- 16) J. Martini, S. Kuhn, M. Kamp, L. Worschech, A. Forchel, D. Eisert, J. Koeth and R. Sijbesma: J. Vac. Sci. Technol. B **18**, 3561 (2000).
- 17) Y. Hirai, H. Okubo, S. Yoshida and Y. Tanaka: Abstract of the 46th EIPBN Conference (2002) p. 247.
- 18) A. Lebib, Y. Chen, J. Bourneix, F. Carcenac, E. Cambril, L. Couraud and H. Aunois: Microelectronic Engineering, **46**, 319 (1999).
- 19) Y. Hirai, M. Fujiwara, T. Okuno and Y. Tanaka: J. Vac. Sci. Technol. B **19**, 2811 (2001).
- 20) J.W. Xiaoyun, X. Sun, L. Chen and S. Chou: Appl. Phys. Lett. **75**, 2767 (1999).
- 21) J. Wang, S. Schablitsky, Z. Yu, W. Wu and S.Y. Chou: J. Vac. Sci. Technol. B **17**, 2957 (1999).
- 22) L. Montelius, B. Heidari, M. Graczyk, I. Maximov, E-L, Sarwe and T.G.I. Ling: Microelectronic Engineering **53**, 521 (2000).
- 23) H. Tan, A. Gilbertson and S.Y. Chou: J. Vac. Sci. Technol. B **16**, 3926 (1998).
- 24) L.-R. Bao, X. Cheng, X.D. Huang, L.J. Guo, A.F. Yee and S.W. Pang: J. Vac. Sci. Technol. B **20**, 2881 (2002).
- 25) S. Matsui, Y. Igaku, H. Ishigaki, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai, M. Komuro and H. Hiroshima: J. Vac. Sci. Technol. B **19**, 2801 (2001).
- 26) Y. Igaku, S. Matsui, H. Ishigaki, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochai, H. Namatsu, M. Komuro and H. Hiroshima: Jpn. J. Appl. Phys. **41**, 4198 (2002).
- 27) M. Colburn, T. Bailey, B.J. Choi, J.G. Ekerdt, S.V. Sreenivasan and C.G. Willson: Solid State Technol. July, 67 (2001).
- 28) M.D. Austin, H. Ge, W. Wu, D. Wasserman, S. Lyon and S.Y. Chou: Proceeding of 2nd International Conference on Nanoimprint and Nanoprint Technology (NNT 2003), December 3–5, Boston, MA, USA (2003).
- 29) Y. Xia and G.M. Whitesides: Annu. Rev. Mater. Sci. **28**, 153 (1998).
- 30) G.M. Whitesides and J.C. Love (訳者: 水谷 亘): 日経サイエンス, 2001年12月号 (2001) p. 33.
- 31) Y. Xia et al.: Angew. Chem. Int. Ed. **37**, 550 (1998).
- 32) J. Tate et al.: Langmuir **16**, 6054 (2000).
- 33) J.A. Roger et al.: Proc. Nat. Acad. Sci. **98**, 4835 (2001).
- 34) J.A. Roger et al.: Synth. Met. **115**, 5 (2000).
- 35) K.E. Paul, M. Prentiss and G.M. Whitesides: Actv. Funct. Mater (2002) in press.
- 36) 古室昌徳: MATERIAL STAGE **1**, 34 (2002).
- 37) 廣島 洋: 光技術コンタクト **41**, 19 (2003).
- 38) “微細加工技術 (応用編)” (社) 高分子学会編, ポリマーフロンティア 21 シリーズ (18) (2003) p. 147.