ソフト・マニファクチャリング —マイクロコンタクト・プリンティングの展開—

水谷 亘^{*}・塚越清美^{*,**}

^{*}産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 ☎ 305-8562 茨城県つくば市東 1-1-1 産総研つくば中央第 4
^{**}科学技術振興事業団 ☎ 332-0012 埼玉県川口本町 4-1-8

(2004 年 2 月 6 日受理)

Soft-Manufacturing Recent Topics of Microcontact Printing

Wataru MIZUTANI^{*} and Kiyomi TSUKAGOSHI^{*,**}

^{*}Nanotechnology Research Institute-National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
AIST Tsukuba Central 4, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8562

^{**}Japan Science and Technology Corporation, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi, Saitama 332-0012

(Received February 6, 2004)

Microcontact printing (μ CP) is the first soft-lithographic technique developed by Kumar and Whitesides in 1993. At first, it was mainly used to pattern thiol self-assembled monolayers on metal surfaces, but later on, has been applied to various materials, including biological molecules. Because of its wide application, the μ CP is considered to be not only a patterning technique, but also used as a convenient soft-manufacturing method. In this article, basics and recent topics of the μ CP are overviewed. Main technical developments are targeting on the biological applications and the fabrication of organic transistors. We introduce up-to-date technical achievements of the both fields. In addition, efforts to scale down the pattern resolution and unique applications utilizing the properties of the stamp material are mentioned.

1. はじめに—新しい微細構造作製法

有機半導体を使った電界効果三端子素子 (Field Effect Transistor, FET) や有機エレクトロルミネッセンス (electroluminescence, EL) ディスプレイに代表される分子を用いた電子デバイスの作製には、分子薄膜の微細なパターンニングが必要とされる。従来の無機半導体デバイスの作製では、光リソグラフィー、真空蒸着、エッチング、リフトオフという手順で金属や絶縁膜がパターンニングされている。しかし、有機薄膜のパターンニングには、分子の性質をよく考慮した手法が必要である。基板全面にレジストを塗布し、光 (あるいは電子ビーム) リソグラフィーでマスクを作製し、基板全面に有機薄膜を作製した後、リフトオフする過程を検討すると、レジストの塗布、

剥離するための溶媒を用いた処理が作製したい有機薄膜に対してもダメージを与える可能性がある^{注1)}。そこで、溶液として供給できる有機分子をパターンニングする方法としてインクジェット法やマイクロコンタクト・プリント (micro Contact Printing, μ CP) 法のような精密印刷技術が注目されている。

これらの技術開発では有機分子を含む溶液をインクとして基板に印刷することで電子回路に必要なパターンを作り出す「プリンタブル回路」が目標の1つとなっている^{2, 3)}。有機材料はプラスチックのようなフレキシブル基板にもなじみがよく、各種チケット、電子ペーパー、Radio Frequency IDentification (RFID) タグなどへの応用

注1) Chrisey らは、DNA のパターンニングに光リソグラフィーを用いたが、リフトオフのプロセスで先につけた DNA が 30% 減少したと報告している¹⁾。印刷法では2種類の分子を重ねた時のダメージを避けるために有機溶媒に溶ける分子と水溶性の分子を組み合わせる。

Fig. 1. Atomic Force Microscopy (AFM) images of PDMS stamp surfaces. The masters were resist pattern on silicon surfaces prepared by photolithography. The height of the pattern is determined by resist thickness (about 2 μm).

が期待されている。Xerox 社の Ong らは、インクジェット法を用いて有機回路を作製し、実用的な特性（移動度 $0.12 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ）を得ている^{注2)}。また、印刷によるパターンニング技術には、環境保護、省資源という利点もある。例えばリフトオフ・プロセスでは、1本のラインを作るため基板全面に成膜した後、必要な線の部分以外はすべて剥ぎ取って捨ててしまうのに対して、基板上に直接パターンを描く印刷技術ならば、レジストとその溶剤、真空蒸着が不要になり、廃液や有機機能分子の使用量を減らすことができる。インクジェットは多品種少量生産・オンデマンド作製に適しており、 μCP はスタンプを繰り返し使えることから大量生産に適していると考えられる。

2. ソフト・マニファクチャリングの出現

μCP は、1993年 Kumar, Whitesides らにより開発された微細構造作製法のひとつである^{4, 5)}。 μCP で使われるスタンプは、浴槽の漏れ止めにも使われるシリコンゴム (Poly(dimethylsiloxane), PDMS) で、2種類の溶液を混合して固化させると適度な柔軟性を持つ。光リソグラフィや電子線リソグラフィによって作製したマイクロメートルの表面構造（マスター）の上に PDMS 溶液を流し込み、固化した後に剥がし取ると、PDMS にはマスターの形状が忠実に転写される (Fig. 1)。PDMS を応用した微細構造作製技術は従来のリソグラフィ技術と区別してソフト・リソグラフィと名付けられた。その後も Whitesides 教授の研究室で精力的に研究され、モールドリング法など多彩な技術が派生した^{6, 7)}。最近で

Fig. 2. Fabrication process of patterned molecular films by μCP .

はパターンニングだけでなく構造作製技術という意味を含めて“ソフト・マニファクチャリング”と称されることもある。一例として Yang らは、PDMS を使って発光色素（ローダミン 6G）を含むブロックコポリマーをライン状にモールドした光導波路を作製し、レーザー発振を報告している⁸⁾。

μCP 法では、このスタンプ凸部表面に分子を塗布し基板に密着（コンタクト）することで、パターン化した分子膜を基板上に作製する (Fig. 2)^{注3)}。初期の実験では、インクとして主にチオール分子のエタノール溶液を使い、金基板の上にセルフアセンブル単分子膜 (Self-Assembled Monolayer, SAM) のパターンを形成した。それまで SAM は基板を溶液に浸漬して作製するのが一般的であったが、 μCP で作製した SAM も溶液で作られた膜と同様の構造をもつことが確かめられている^{10) 注4)}。最近ではマイクロコンタクト・プリンターという専用の

注2) データは、WEB サイト <http://www.xerotechnology.com/> から “Printed Organic Electronics” と検索して見ることができる。この結果は 2002 年 Materials Research Society の Spring Meeting で発表された。

注3) 平坦な PDMS 表面にインクをパターンニングして付着させ、転写する方法も提案されている⁹⁾。

注4) 分子を蒸着して作製する方法もある。Larsen らが使った基板はマイカ上に蒸着した金で (111) 面上の構造を STM 観察しているが、 μCP ではシリコン上に蒸着したアモルファス状態の金表面が使われることが多い。

Fig. 3. AFM images of DNA adsorbed selectively on μ CP aminosilane.

装置も市販されている^{注5)}。

本稿で紹介する μ CP 研究の現状であるが、大きく分けて2つの方向が見てとれる。1つはバイオ研究への応用であり、試薬、DNA、酵素、細胞のパターニングに使われている。バイオ応用に関してはいくつかのベンチャー企業が立ち上がっていて、ビジネスとして展開が期待される^{注6)}。

もう1つの流れは有機電子デバイスへの応用である。この方面では、パターニングした分子薄膜をレジストとしたエッチングやパターニングした触媒を元にして電極などを成長させる方法、アクティブな有機半導体層の作製、スタンプ材料のポリマーにFET構造を組み込んだ試みなど、幅広く研究開発が展開している。この他、パターンの微細化や金以外の基板上への吸着など新しい試みがなされている。初期の μ CP の研究は、金基板上にチオール分子を吸着させた系が中心であった。チオール分子を使う場合、金以外の基板としては銀¹¹⁾、銅¹²⁾などがあり、最近になってパラジウム (Pd) を利用した発表が増えてきている^{13, 14)}。Pd 上にもオーダーした分子薄膜が形成されることが示されているが、金に比べてPd表面は酸化されやすいようだ。

チオール以外でSAMを形成する例として、シラン系の分子を酸化物、ガラス表面に吸着させ化学修飾する研究が行われている^{15~17)}。シラン系分子は大気中の水分と反応するのでグローブボックス内で作業する必要があるが、 μ CP法を適用するのが難しいといわれていた^{注7)}。

Fig. 4. Selective growth of molecular films on active layers by surface reaction.

我々のグループでは、表面が化学的に活性となるアミノシランを μ CP によってパターニングし、選択的な吸着・表面反応に成功した。例えば、Fujita らは μ CP で作製したアミノシランのパターンに沿ってDNAが吸着することをAFM測定によって確認した (Fig. 3)¹⁸⁾。アミノシラン膜表面の正電荷が負電荷を持つDNAを静電的に吸着していると考えられる。

アミノシラン膜の表面には化学的に活性なアミノ基がある。Tsukagoshi らは、アミノ基と反応する低分子を供給しアミノシラン表面で化学反応させることで、アミノシランのパターン上に高分子を合成した (Fig. 4)¹⁷⁾。これ以前にYan らは、カルボキシル基を末端に持つチオール分子でSAMを作製した金表面に μ CP でアルキルアミンをスタンプして選択的表面化学反応を行った¹⁹⁾。シラン系の分子で同様の反応を行うためには、先にアミノシランを基板に結合させる必要がある (カルボキシル基がシランと反応するため)。

Lackowski ら、Jiang らは逆に、活性な基板の一部を不活性な分子をスタンプして、分子で覆われていない部分にポリマーを成長させた^{20, 21)}。Huang らも μ CP で転写した分子膜に覆われていない部分に触媒を載せることで、選択的にカーボンナノチューブを成長させた²²⁾。

チオール、シランに関してはそれぞれ金属、酸化物の

注5) IPROS 社 <http://www.ipros.jp/contents/product/063627001.html> ナノテック社 <http://www.nanotech-inc.co.jp/PA400.html> など。

注6) 例えば、Scientific American のWEBサイト <http://www.sciam.com/nanotech/> から、“Soft Manufacturing”を選択すると、Whitesides 教授が立ち上げた会社 (Surface Logix, EM Logix, Fluidigm) の紹介記事がある。

注7) 文献⁶⁾に、“ μ CP of SAMs of siloxanes on Si/SiO₂ is substantially less tractable than μ CP of SAMs of alkanethiolates on Au or Ag”と書かれている。

表面に SAM を形成することが知られているが、基板との強い結合がない系、例えば生体分子の直接スタンプにも μ CP は使われるようになっていく。また、プラスチック基板へ表面反応する分子をスタンプする手法 (Polymer on polymer stamping) も開発されている^{23, 24)}。

3. バイオ応用

生体試料のスクリーニングには、異なった試薬などへの反応を一度にチェックするマイクロアレイが使われている^{25, 26)}。DNA、タンパク質分子、細胞などをパターンニングしたバイオ・チップ (マイクロアレイ) は、これからの医療検査に広く使われる製品であり、その製造のために有機分子を簡単に高精度パターンニングできる μ CP 法を応用する研究開発が行われている。

μ CP で使う PDMS の表面は、疎水性である。エタノールなどの有機溶媒を用いてチオール分子をスタンプするには適しているが、水溶性分子ははじかれてしまうので有機溶液よりも扱いが難しい。したがって、先にあげた DNA のパターンニングの例のように、別の分子で基板をパターンニングして親和性を変えた上にタンパク質分子や細胞を選択的に吸着させていた^{18, 27-29)}。そこで、水溶性分子を直接スタンプするため PDMS の表面を親水化する方法が研究されている。親水化にはいくつかの方法が試みられているが、PDMS 表面を短時間 (30 秒程度) 酸素プラズマ中でアッシングする手法がよく使われている³⁰⁻³²⁾。Fig. 5 に我々のグループで親水化したスタンプを用いて直接 μ CP したフェリチン分子の AFM 像を示す。アッシングした PDMS 表面は数時間で親水性を失ってしまうが、Delamarche らは、アッシングした PDMS 上に親水性のポリマー Poly(ethylene oxide) をグラフト重合することで 1 週間以上親水性を保つことに成功した³³⁾。

一方、Graber らは、特に親水化処理を施していないス

タンプを使って直接抗体をパターンニングしている³⁴⁾。PDMS をはじめとするシリコンポリマーはタンパク質との親和性があり、バイオ分野で研究、応用されているが³⁵⁾、特に免疫性分子とは相互作用する性質があるようだ³⁶⁾。Tan らも、SAM を使って親水性を変えた基板の上に PDMS を使って直接タンパク質分子 (蛍光色素のついた immunoglobulinG) をスタンプし、基板表面とスタンプの親水性の差がタンパク分子の転写に影響を与えることを示した³⁷⁾。この報告では、スタンプをタンパク質分子を含む水溶液に 1 時間浸漬することで、撥水性 (接触角 112°) の PDMS による転写を実現している。

PDMS スタンプの 1 つの応用として、マイクロ流路がある。Fig. 1 左に見られるような溝形状を自由にデザインでき、密着性が良いのでガラス表面などに張り付いて溝内の溶液をシールできる。ガラスに貼り付けた PDMS 表面のへこんだ部分に溶液を通すとマイクロ流路ができあがる。Takayama らは、PDMS で作製した 2 本のマイクロ流路で 1 個の細胞の右側と左側に別の物質を接触させ、細胞内での拡散を観察した例を報告している^{38, 39)}。

Tan らは PDMS で表面に微細な柱状構造のアレイを作製し、その上で細胞を培養することで生じる柱の傾きから細胞が及ぼす力の解析を行った⁴⁰⁾。

4. 有機 FET

Rogers らは、金表面に μ CP で hexadecanethiol でセルフアセンブル膜を作り、それをレジストとしてエッチングによりソース、ドレイン電極を作製した。半導体材料として発光ダイオードには、Poly(3-hexylthiophene) の溶液を電極上にピペットで滴下し、相補型反転回路 (Complementary Inverter Circuit) には、 α -sexithiophene (p 型) と copper hexadecafluorophthalocyanine (n 型) を真空蒸着した⁴¹⁾。電界移動度として $0.001 \sim 0.01 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を得ている。

Fig. 5. AFM images of ferritin (horse spleen, not filtered) molecules directly patterned with a hydrophilic stamp on a silicon surface. The height of the protrusion is 8–10 nm.

アルカンチオール SAM をレジストとして金の薄膜をエッチングするには、KOH と KCN の混合溶液が使われていたが^{4, 42)}、Geissler らは、eicosanethiol (ECT) をインクとして μ CP した金、銀の薄膜 (100 nm) で ECT-SAM をレジストとしてエッチングするには、pH を調整したチオ尿素と $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ の混合溶液が適していると報告している⁴³⁾。

電極パターンの作製に関して、真空蒸着を必要としない無電解メッキ (Electroless Deposition, ELD) と μ CP の組み合わせが IBM のグループによって精力的に研究されていて⁴³⁻⁴⁵⁾、サブミクロンの線幅が報告されている⁴³⁾。Geissler らはガラス上にリンカー (アミノシラン)、触媒 (Pd/Sn コロイド) などを μ CP でパターンニングし、ELD によって液晶ディスプレイなどの電極に使われる NiB パターンを作製するプロセスを比較した⁴⁵⁾。その結果、ガラス上にリンカーを μ CP するよりも均一なリンカー層の上に触媒をスタンプした方が ELD の選択性が高く良質のパターンが得られている。

μ CP は、有機半導体薄膜パターン作製の作製にも使われる。Kagan らは、 μ CP で作製した分子膜パターン (alkylsilane, fluorinated alkylsilane (on SiO_2), alkylphosphonic acid (on SiO_2 or ZrO_2)) の上に、有機無機ハイブリッド半導体 ($\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_4\text{NH}_3$)₂ SnI_4 の溶液をスピコートした。分子膜の部分にはハイブリッド半導体が付着しないため、半導体のパターンが作製できる⁴⁶⁾。ソース、ドレイン、ゲート電極はあらかじめ基板上に作製しておく。移動度で $0.1 \sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, ON/OFF 比で $10^4 \sim 10^5$ という性能が得られている。

PDMS を使った新しいデバイス構造の試みとして、Loo らは PDMS 表面に金電極をパターンニングし、半導体をパターンニングした基板と張り合わせることで FET 動作を得ている⁴⁷⁾。

5. 微細化の努力

μ CP に関してよく聞かれる質問の 1 つは、どこまで微細な構造ができるかというものである。Delamarche らは μ CP のメカニズムを解析し、拡散を減らしたりスタンプ材料を工夫することで 1998 年に 250 nm の精度を達成した⁴⁸⁾。パターンニングの高精度化の努力も現在も続けられている。そのためにはインクとなる分子溶液の拡散が少ないこと、蒸気圧が低いことが要求される。さらにスタンプ材料である PDMS に変形が小さいものが

望ましく、固いポリマー (h-PDMS) を使ったナノコンタクト・プリンティングが報告されている⁴⁹⁾。パターンとしては三角断面のグレーティングを使い、線幅として 40 nm を達成している (ただし隣り合った線の間隔は 3 μm である)。

6. おわりに

ソフト・マニファクチャリング、特に μ CP の最近の研究動向を中心に紹介した。パターンニング手法から微細構造作成技術の技術的な発展とそれに伴う応用分野の拡大、特にバイオ試料への適用が注目される。電子回路の金属配線作製では、真空蒸着 $\rightarrow \mu$ CP $\rightarrow$ エッチング、というプロセスから μ CP $\rightarrow$ ELD という低コストのプロセスが開発された。技術、応用ともに実用化、企業化が進んでいる有望な分野と思われる。また、 μ CP 技術はマスターとなる型の作製さえ外部に委託すれば^{注8)}、特に大きな機材を用意することなく始めることができる。本稿で紹介した論文等を手がかりに、PDMS という優れた材料を利用した新しい試みを始める方が現れることを望んでいる。

謝 辞

微細加工の一部は文部科学省によるナノテク支援プログラムを利用させていただいています。

文 献

- 1) L. Chrisey, C. O' Ferrall, B. Spargo, C. Dulcey and J. Calvert: *Nucleic Acids Research* **24**, 3040 (1999).
- 2) F. Garnier, R. Hajlaoui, A. Yassar and P. Slivastava: *Science* **265**, 1684 (1994).
- 3) H. Sirringhaus, T. Kawase, R.H. Friend, T. Shimoda, W. W.M. Inbasekaran and E.P. Woo: *Science* **290**, 2123 (2000).
- 4) A. Kumar and G.M. Whitesides: *Appl. Phys. Lett.* **63**, 2002 (1993).
- 5) A. Kumar, H.A. Biebuyck and G.M. Whitesides: *Langmuir* **10**, 1498 (1994).
- 6) Y. Xia and G.M. Whitesides: *Annu. Rev. Mater. Sci.* **28**, 153 (1998).
- 7) G.M. Whitesides and C. Love: *日経サイエンス* **31**, 30 (2001). Original: *Scientific American*, September, 32 (2001).
- 8) P. Yang, G. Wirsberger, H.C. Huang, S.R. Cordero, M. D. McGehee, B. Scott, T. Deng, G.M. Whitesides, B.F. Chmelka, S.K. Buratto and G.D. Stucky: *Science* **287**, 465 (2000).
- 9) M. Geissler, A. Bernard, A. Bietsch, H. Schmid, B. Michel and E. Delamarche: *J. Am. Chem. Soc.* **122**, 6303 (2000).

注8) 研究開発目的でマスターとなる微細構造を試作する場合は、文科省で進めているナノテク支援プロジェクトに依頼することができます。http://www.nanonet.go.jp/japanese/産総研にも窓口がありますので下記の WEB-site をご覧の上ご相談ください。http://www.nanoworld.jp/nppp/

- 10) N.B. Larsen, H. Biebuyck, E. Delamarche and B. Michel: *J. Am. Chem. Soc.* **119**, 3017 (1997).
- 11) Y. Xia, N. Venkateswaran, D. Qin, J. Tien and G.M. Whitesides: *Langmuir* **14**, 363 (1998).
- 12) M. Geissler, H. Schmid, A. Bietsch, B. Michel and E. Delamarche: *Langmuir* **18**, 2374 (2002).
- 13) J.C. Love, D.B. Wolfe, M.L. Chabinyc, K.E. Paul and G.M. Whitesides: *J. Am. Chem. Soc.* **124**, 1576 (2002).
- 14) J.C. Love, D.B. Wolfe, R. Haasch, M.L. Chabinyc, K.E. Paul, G.M. Whitesides and R.G. Nuzzo: *J. Am. Chem. Soc.* **125**, 2597 (2003).
- 15) K.R. Finnie, R. Haasch and R.G. Nuzzo: *Langmuir* **16**, 6968 (2000).
- 16) T. Pompe, A. Fery, S. Herminghaus, A. Kriele, H. Lorenz and J. Kotthaus: *Langmuir* **15**, 2398 (1999).
- 17) K. Tsukagoshi, W. Mizutani, H. Tokumoto, T. Miyamae and H. Nozoye: *Surf. Sci.* **514**, 48 (2002).
- 18) M. Fujita, W. Mizutani, M. Gad, H. Shigekawa and H. Tokumoto: *Ultramicroscopy* **91**, 281 (2002).
- 19) L. Yan, X.-M. Zhao and G.M. Whitesides: *J. Am. Chem. Soc.* **120**, 6179 (1998).
- 20) W. Lackowski, P. Ghosh and R. Crooks: *J. Am. Chem. Soc.* **121**, 1419 (1999).
- 21) X. Jiang and P.T. Hammond: *Langmuir* **16**, 8501 (2000).
- 22) S. Huang, A.H. Mau, T.W. Turney, P.A. White and L. Dai: *J. Phys. Chem. B* **104**, 2193 (2000).
- 23) X. Jiang, H. Zheng, S. Gourdin and P.T. Hammond: *Langmuir* **18**, 2607 (2002).
- 24) J.A. Jaber, P.B. Chase and J.B. Schlenoff: *Nano Lett.* **3**, 1505 (2003).
- 25) M. Schena, D. Shalon, R. Davis and P. Brown: *Science* **270**, 467 (1995).
- 26) M. Chee, R. Yang, E. Hubbell, A. Berno, X. Huang, D. Stern, J. Winkler, D. Lockhart, M. Morris and S. Fodor: *Science* **274**, 610 (1996).
- 27) R.S. Kane, S. Takayama, E. Ostuni, D.E. Ingber and G.M. Whitesides: *Biomaterials* **20**, 2363 (1999).
- 28) S. Zhang, L. Yan, M. Altman, M. Lasse, H. Nugent, F. Frankel, D.A. Lauffenburger, G.M. Whitesides and A. Rich: *Biomaterials* **20**, 1213 (1999).
- 29) A. Brock, E. Chang, C.-C. Ho, P. LeDuc, X. Jiang, G.M. Whitesides and D.E. Ingber: *Langmuir* **19**, 1611 (2003).
- 30) C.D. James, R.C. Davis, L. Kam, H.G. Craighead, M. Isaacson, J.N. Turner and W. Shain: *Langmuir* **14**, 741 (1998).
- 31) Q. He, Z. Liu, P. Xiao, R. Liang, N. He and Z. Lu: *Langmuir* **19**, 6982 (2003).
- 32) G.S. Ferguson, M.K. Chaudhury, H.A. Biebuyck and G.M. Whitesides: *Macromolecules* **26**, 5870 (1993).
- 33) E. Delamarche, C. Donzel, F.S. Kamounah, H. Wolf, M. Geissler, R. Stutz, P. Schmidt-Winkel, B. Michel, H.J. Mathieu and K. Schaumburg: *Langmuir* **19**, 8749 (2003).
- 34) D.J. Graber, T.J. Zieziulewicz, D.A. Lawrence, W. Shain and J.N. Turner: *Langmuir* **19**, 5431 (2003).
- 35) F. Abbasi, H. Mirzadeh and A.-A. Katbab: *Polym. Int.* **50**, 1279 (2001).
- 36) V. Bartzoka, M.R. McDermott and M.A. Brook: *Adv. Mater.* **11**, 257 (1999).
- 37) J.L. Tan, J. Tien and C.S. Chen: *Langmuir* **18**, 519 (2002).
- 38) S. Takayama, E. Ostuni, P. LeDuc, K. Naruse, D.E. Ingber and G.M. Whitesides: *Nature* **411**, 1016 (2001).
- 39) S. Takayama, E. Ostuni, X. Qian, J.C. McDonald, X. Jiang, D.E.I.P. LeDuc, M.-H. Wu and G.M. Whitesides: *Adv. Mater.* **13**, 570 (2001).
- 40) J.L. Tan, J. Tien, D.M. Pirone, D.S. Gray, K. Bhadriraju and C.S. Chen: *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)* **100**, 1484 (2003).
- 41) J.A. Rogers, Z. Bao, A. Dodabalapur and A. Makhija: *IEEE Electron Device Lett.* **21**, 100 (2000).
- 42) A. Kumar, H.A. Biebuyck, N.L. Abbott and G.M. Whitesides: *J. Am. Chem. Soc.* **114**, 9188 (1992).
- 43) M. Geissler, H. Wolf, R. Stutz, E. Delamarche, U.-W. Grummt, B. Michel and A. Bietsch: *Langmuir* **19**, 6301 (2003).
- 44) E. Delamarche, J. Vichiconti, S. A. Hall, M. Geissler, W. Graham, B. Michel and R. Nunes: *Langmuir* **19**, 6567 (2003).
- 45) M. Geissler, H. Kind, P. Schmidt-Winkel, B. Michel and E. Delamarche: *Langmuir* **19**, 6283 (2003).
- 46) C.R. Kagan, T.L. Breen and L.L. Kosbar: *Appl. Phys. Lett.* **79**, 3536 (2001).
- 47) Y.-L. Loo, T. Someya, K.W. Baldwin, Z. Bao, P. Ho, A. Dodabalapur, H.E. Katz and J.A. Rogers: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **99**, 10252 (2002).
- 48) E. Delamarche, H. Schmid, A. Bietsch, N.B. Larsen, H. Rothuizen, B. Michel and H. Biebuyck: *J. Phys. Chem. B* **102**, 3324 (1998).
- 49) H.-W. Li, B.V.O. Muir, G. Fichet and W.T.S. Huck: *Langmuir* **19**, 1963 (2003).