

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：33924

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656066

研究課題名(和文) 新しいフォトリソグラフィーでマイクロ流路の側壁にデバイス機能を付加する

研究課題名(英文) Making device functions on microtrench sidewall through three-dimensional photolithography

研究代表者

熊谷 慎也 (KUMAGAI, Shinya)

豊田工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70333888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円、(間接経費) 510,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フォトリソグラフィーのスプレーコーティングと斜め露光技術を基盤とする3次元リソグラフィー技術を適用して、これまで利用されていなかったマイクロ流路側壁部分にデバイスとしての機能を付加し、新しい3次元MEMSデバイスを作り上げることを目指した。ここで検討したマイクロ流路デバイスは、静電相互作用と流体の流れを利用して、液体中に含まれたパーティクルを分離するデバイスである。シミュレーションを通じてマイクロ流路の設計を行い、ガラス基板上にマイクロ流路デバイスを試作した。

研究成果の概要(英文)：A novel micro-electro-mechanical systems (MEMS) device was fabricated through three-dimensional (3D) photolithography. The MEMS device in the present study was a particle sorter. The sorter uses electrostatic force and fluid flow for separating particles in a liquid. To enhance the electrostatic force, the working electrodes were designed on the microtrench sidewall. Since the sidewalls have not been used to exhibit device functions, the approach here would be a great step to expand the possibility of MEMS devices. The 3D photolithography consists of photoresist spray-coating for uniform photoresist deposition on the microtrench and angled exposure for patterning the trench sidewall. Through the numerical simulation, the uniformity of spray-coated photoresist film was improved. The numerical simulation was also applied to designing the microfluidics channels. With the careful device design and the 3D photolithography, the particle sorter devices were fabricated on a glass substrate.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物理学一般

キーワード：マイクロマシン マイクロ流路デバイス

1. 研究開始当初の背景

マイクロ流路デバイスではナノバイオの研究分野で広く利用されている。溶液中に分散しているパーティクルの中から特定のものを取り出して、それを分析する、あるいはそれをデバイスに利用するといったことが求められる。パーティクルの分離法としては、1. 流路の大きさで被対象物の大きさごとにふるいをかけて分離する、2. 超音波のような音響効果を利用して分離する [Anal. Chem. **79** (2007) 5117]、3. 静電相互作用で分類する [化学とマイクロ・ナノシステム **9** (2010) 13]、といった手法がある。3 の手法は、印加電圧の大小で、作用の大きさを変えられる可変制御性、また電池などでエネルギーを供給できる点はデバイスの携帯性の点からも期待される点である。実際のデバイス構造を考えると、マイクロ流路と電極構造の位置関係が重要である。しかしながら、通常のリソグラフィ技術では、その制約上から、電極構造は流路構造の上部面または下部面に作られており、マイクロ流路の側壁部分は使用されていない。翻って電子デバイス分野では、トランジスタの微細化が進み、リーク電流を減少させるために、フィン型 FET、サラウンディングゲート型 FET 等の 3 次元構造が考案されている。これらの構造では、3 次元的な電界閉じ込め効果で電子の流れが止められている。これら 3 次元構造電子デバイスとのアナロジーを考えれば、これまで利用されていないマイクロ流路側壁に電極構造を作り込むことができれば、3 次元的に電氣的相互作用を一層増大させることができる。静電相互作用を利用したパーティクル分離デバイスの一層の特性向上を期待することができる。

2. 研究の目的

本研究では、分離用電極による静電相互作用に加えて、マイクロ流体の流れを利用し、パーティクル分離性の一層の向上を試みる (図 1)。マイクロ流路中のパーティクルは基本的に流れに沿うが、流れが大きく変化すると慣性の大きなパーティクルは追従できないと考えられる。したがって、流れの構造を設計し、静電相互作用と組み合わせることで、パーティクル分離性の一層の向上を狙っている。

分離用電極の作製には、フォトレジストのスプレーコーティングプロセス (図 2) と斜め露光技術を基盤とする 3 次元リソグラフィ技術を適用する。これまで使われていなかったマイクロ流路の側壁に電極等のデバイス構造を作製する。このデバイス実証を通じて、3 次元構造への機能付加による、MEMS デバイス性能向上への可能性を示す。

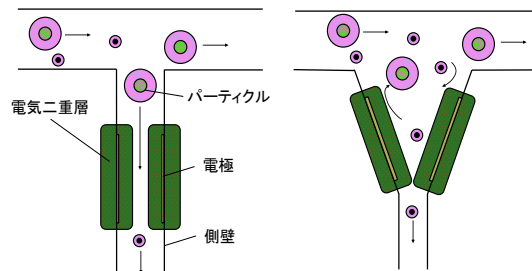


図 1 マイクロ流路における流れと静電相互作用を利用したパーティクル分離の概念図。渦の流れを利用し、流れに追従するパーティクルと追従しないものとを分離する。

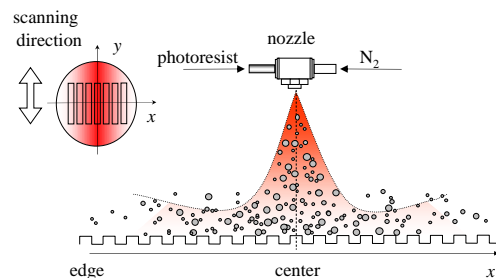


図 2 スプレーコーティングの概略。フォトレジストを N_2 ガスによって微粒子化して被加工サンプルに堆積させる。

3. 研究の方法

パーティクルの分離は、マイクロ流路内における「流れ」に大きく左右される。小さなパーティクルは「流れ」に沿って輸送されるが、大きなパーティクルは慣性も大きいため、流れに急激な変化があると、追従できない。一方、立体形状を作製するのに不可欠なフォトレジストのスプレーコーティングにおいても、微粒子化されたレジストの輸送は、スプレーの気流に大きく依存して、輸送される。

マイクロ流路によるパーティクルの分離、そしてそのデバイスの 3 次元構造を作るためのスプレーコーティング技術ともに詳細な実験を行っていくことが必要であるが、膨大なパラメータについて検討をしていかなければならない。効率よく研究を進めるため、流れのシミュレーションを通じてマイクロ流路構造とスプレーコーティングの条件を検討し、実際のデバイス作製に適用することとした。従って、研究の項目としては、レジストスプレーコーティングプロセスにおける気流解析およびマイクロ流路における流れ解析、そして、実際のデバイス作製である。

4. 研究成果

4.1 スプレーコーティングの流れ解析

マイクロ流路のような凹凸形状をもった基板へのレジスト均一成膜を実現するため、スプレーコーティングにおける気流解析を行った。これまでの検討で、スプレー流は基板に衝突した後に基板水平方向に流れの向きを変えて、それによって輸送される微粒子が基板上へのレジスト膜厚の不均一分布を生じさせることが分かっている。従って、この横方向の流れを抑えて、レジスト微粒子の直線性が良い部分を選択的に利用することができれば、均一分布を実現できると考えられる。そこで、開口部を持つ遮蔽板を利用して、スプレーコーティングを行うことを検討した (図3)。

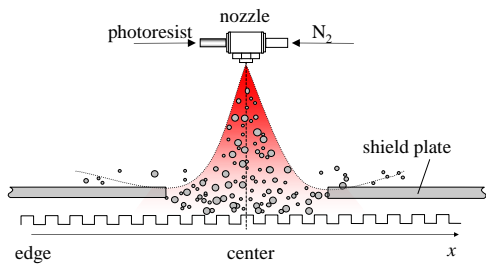


図3 開口付き遮蔽板を用いたスプレーコーティングの概略。慣性に従って直線的に輸送されるレジスト微粒子を利用する。

実験条件では、レジスト流量 ($0.2\text{--}2.4\text{cm}^3/\text{min.}$) と N_2 ガス流量 ($3.7\text{--}4.2\times 10^3\text{cm}^3/\text{min.}$) は大きく異なる。そこでスプレー流を1流体で近似した。トレンチ構造を持つ基板上に遮蔽板を配置した構造に対して、Navier-Stokes 方程式をMAC法で解き、流れの時間発展を評価した。流入側の境界条件として、軸対称円形噴流を仮定した。流出側にはノイマン条件を仮定した。

初期状態 $t=0$ から $t=4000$ の計算ステップまでは、ノズルから噴出された N_2 ガスの流れが基板に向かって成長を続けた。遮蔽版あり／なしの流れで大きな差異は認められない。 $t=6000$ の計算ステップでは、 N_2 ガス流れの一部が遮蔽版によってブロックされ始めた。 $t=12000$ の計算ステップでは、遮蔽版なしの流れでは、 N_2 ガスの流れが基板と衝突し、水平方向に流れの向きを大きく変えた。遮蔽版がある場合、 N_2 ガスの流れの一部が遮蔽版によって後方に反射されていることが分かる (図4)。

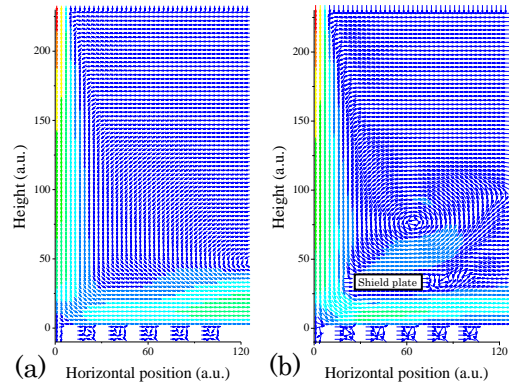


図4 スプレーコーティングにおける N_2 ガスの流れ。レイノルズ数は1000。(a) 遮蔽版なし。(b) 遮蔽版あり。

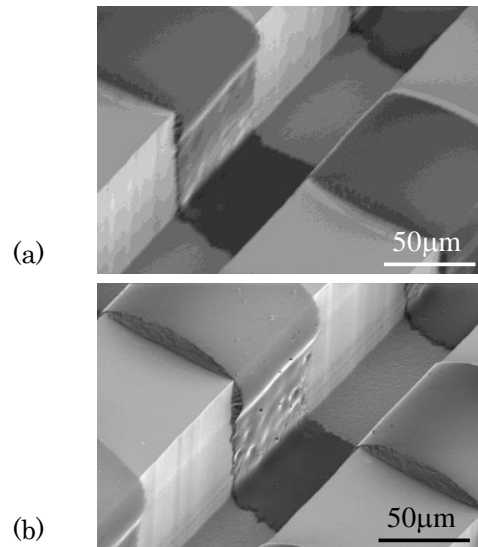


図5 スプレーコーティングによるトレンチ構造へのレジスト成膜。(a) 遮蔽版なし。(b) 遮蔽版あり。

この開口付き遮蔽板の導入によって、レジストの直進性がよいスプレー流を選択的に利用できると予想される。開口付き遮蔽板をスプレーコーティング装置内に設置し成膜試験を行ったところ、遮蔽版を導入することでトレンチ構造側壁部への均一レジスト成膜が促進された (図5)。

4.2 マイクロ流路の流れ解析

マイクロ流路における流れ解析では、主流部から分岐する副流部の形状を変えて、流れの状態の評価を行った。流路形状の概略を図6に示すが、1. $\theta=0^\circ$ 、2. $\theta=30^\circ$ 、3. $\theta=45^\circ$ 、4. $\theta=60^\circ$ の4形状を検討した。流入側の境界条件として、速度一定とし、圧力に対してはノイ

マン条件を課した。流出側境界条件として、主流部については速度に対してはノイマン条件を課し、圧力 p については $p=0$ とした副流部については、速度、圧力の両方に対して、ノイマン条件を課した。

図 6 マイクロ流路構造の概略。主流部に対する分岐部壁面の角度 θ をパラメータとしている。

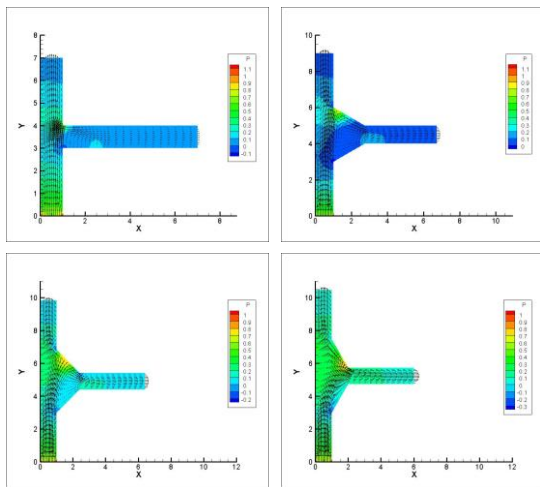
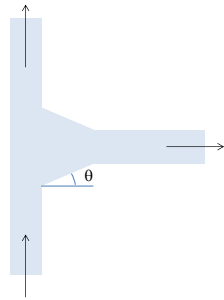


図 7 レイノルズ数 $Re=100$ に対するマイクロ流路における流れ解析の結果。(a) $\theta=0^\circ$ 。(b) $\theta=30^\circ$ 。(c) $\theta=45^\circ$ 。(d) $\theta=60^\circ$ 。

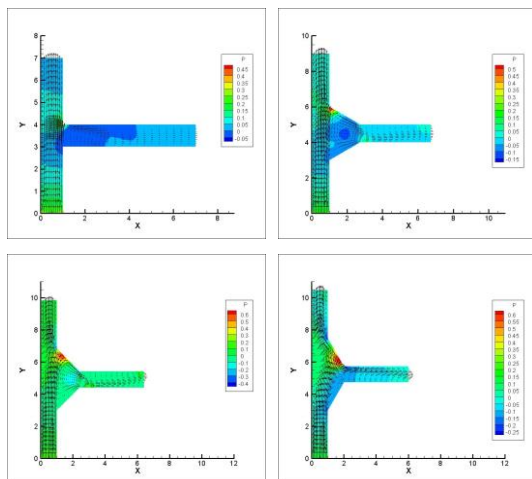


図 8 レイノルズ数 $Re=500$ に対するマイクロ流路における流れ解析の結果。(a) $\theta=0^\circ$ 。(b) $\theta=30^\circ$ 。(c) $\theta=45^\circ$ 。(d) $\theta=60^\circ$ 。

流れの解析結果の一部を図 7,8 に示すが、

主流部に対する分岐部壁面の角度 $\theta=30^\circ$ のとき、流路分岐部で渦が大きく発生する結果となった。さらにレイノルズ数を $Re=800, 1000$ と増大させると、副流部内で周期的な渦の発生が確認された(図 9)。流れが時間的に変化するため、流れを利用したパーティクルの分離への影響が懸念される。

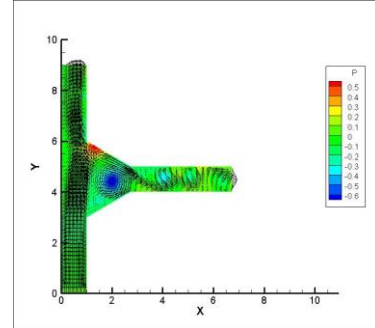


図 9 マイクロ流路における流れ解析の結果。主流部に対する分岐部壁面の角度 $\theta=30^\circ$ のデバイス。レイノルズ数は $Re=1000$ 。

4.3 トレンチ側壁への電極構造の作製

スプレーコーティングにおける気流解析の結果をふまえて、トレンチ側壁への電極構造作製を試みた。トレンチを持つ基板に対して、金属薄膜を蒸着法によって堆積した。その後、スプレーコーティングによって均一成膜を行った。その後、斜め露光技術によってトレンチ側壁に堆積されたレジスト薄膜に電極構造をパターンニングした。このレジストパターンをマスクとして、金属薄膜をエッチングし、金属電極構造を作製した。この応用として、Al と Cr 電極を重なるようにパターンニングし、熱電対構造とした(図 10)。

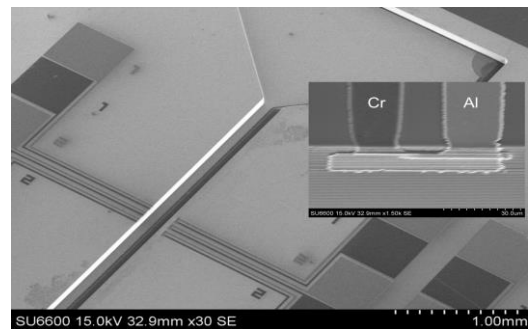


図 10 トレンチ側壁部に電対をもつマイクロ流路デバイス。インセットは熱電部分の拡大図。

試作した熱電対デバイスを加熱したところ、熱起電力の発生を確認した。本試作デバイスでは流路の近傍にも参照用の熱電対を

配置している。流路近傍に配置させた熱電対と流路内に設置された熱電対は、ほぼ同じ温度上昇傾向を示した。その後、シリンジを利用してマイクロ流路に空気を流入させたところ、流路側壁に配置した熱電対のみが、温度の低下を示した（図 11）。マイクロ流体の温度を正確にモニタリングするためには、流路内に温度センサ（熱電対）を配置しなければならないことを示唆している。本成果は、バイオ研究用途のマイクロ流路デバイスにおいて、細胞・タンパク質の精密計測につながる成果といえる。

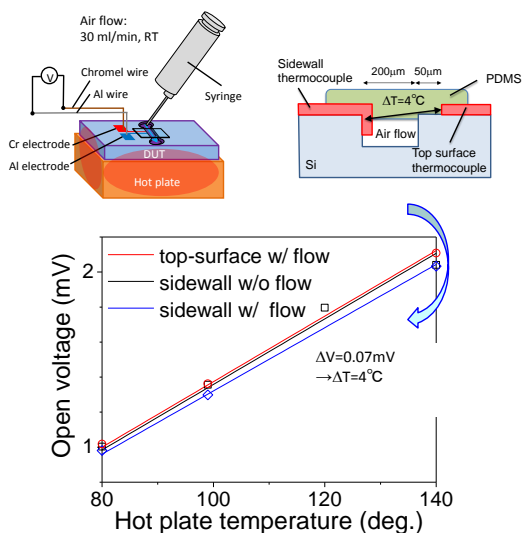


図 11 側壁に温度センサ（熱電対）を配置したマイクロ流路デバイスの温度特性。流体を流しているときにマイクロ流路側壁とトレンチ上部に設置された熱電対で異なる温度を示している。

マイクロ流路を用いたパーティクル分離であるが、液体を流すことを考えると、倒立顕微鏡を用いてデバイス下面より観察できる構造が適している。PDMS 材料でマイクロトレンチ構造を作り、それをガラス板に密着させてマイクロチャネルを作った。その内部に蛍光ナノ粒子を含む液体を流入し、その様子を観測できることを確認した（図 12）。

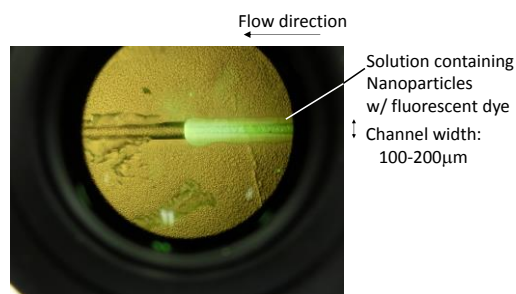


図 12 マイクロ流路内部に流入させた流体の観測。流体に含まれたナノ粒子からの蛍光をモニタリングできている。

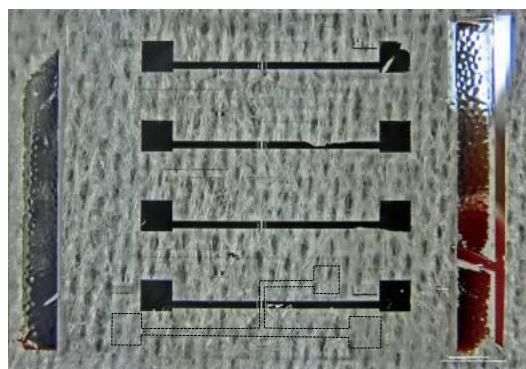


図 13 試作したデバイス。基板サイズは 22mm×32mm。図中の点線部はマイクロ流路の輪郭を表している。

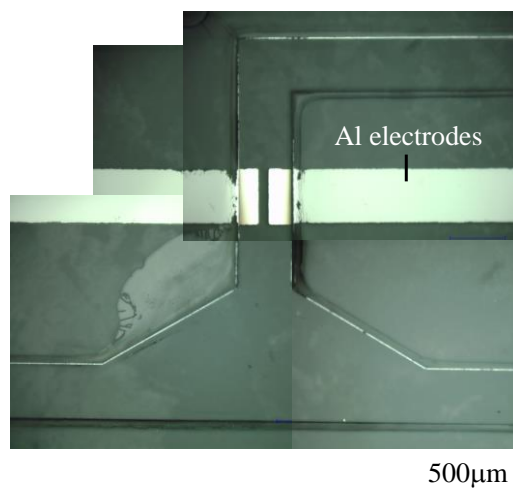


図 14 試作したデバイスの流体分岐部の拡大図。主流部に対する分岐部壁面の角度 $\theta = 60^\circ$ のデバイス。

これまでの技術的な蓄積を元にパーティクル分離マイクロデバイスの試作に取り組んだ。ガラス基板上に永久レジストを用いてマイクロ流路構造を作り、デバイスの下方向より倒立顕微鏡を介して観察することが可能になる。ガラス基板を洗浄処理後、永久レ

ジスト（東京応化工業 TMMR2000）を塗布し、露光と現像を行い、パーティクル分離用の AI 電極を作製した。流れの解析で検討したマイクロ流路形状を用意した（図 13,14）。この試作したデバイスでパーティクル分離能を評価する。得られる結果をデバイス構造にフィードバックして、より発展させていくことが期待される。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計 2 件）

T. Yamaguchi, S. Kumagai, M. Sasaki,

“A Thermocouple Device Fabricated on Trench Sidewall for Measuring Accurate Temperature of Microfluid”, Extended Abstracts of the 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials, Fukuoka, 2013, pp. 372-373.

T. Yamaguchi, S. Kumagai, M. Sasaki,

“A microfluidics device with thermocouples fabricated on sidewall”, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, 18a-M3-5.

〔その他〕

ホームページ等

豊田工業大学研究者一覧

<http://ttiweb.toyota-ti.ac.jp/public/user.php>

豊田工業大学 マイクロメカトロニクス研究室ホームページ

<http://www.toyota-ti.ac.jp/mems/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊谷 慎也 (KUMAGAI, Shinya)

豊田工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70333888

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

佐々木 実 (SASAKI, Minoru)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号：70282100