

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2006 ～ 2008

課題番号：18681023

研究課題名(和文) 3次元フォトリソグラフィによる高機能 MEMS デバイス

研究課題名(英文) High-performance MEMS devices realized by three-dimensional photolithography

研究代表者

佐々木 実 (SASAKI MINORU)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号：70282100

研究成果の概要：

3次元フォトリソグラフィの応用可能性をニーズのあるデバイスの形で示す試みは、ニーズを持つ外部研究グループと一緒に行った。関西大学の青柳教授らとの、自立カンチレバーと組み合わされた MOSFET 容量センサ、香川大学の大平教授らとの、IC パッケージ側壁への配線パターン形成である。露光技術などの推敲と、成膜の基礎研究(評価法、気流解析)も平行して進めた。応用展開と、プロセス技術全般の推敲、学術的基礎の蓄積が進展した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2007年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2008年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
年度			
年度			
総計	19,700,000	5,910,000	25,610,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ・ マイクロ・ナノデバイス

キーワード：マイクロファブリケーション、マイクロマシン、デバイス設計・製造プロセス、3次元フォトリソグラフィ、3次元デバイス、垂直壁、3次元実装、流体解析

1. 研究開始当初の背景

100 μm を越える段差など、レジスト膜厚よりも厚い立体形状をもつサンプルにもリソグラフィ加工を可能とする、3次元フォトリソグラフィの技術シーズが認知されはじめていた。期待されていた応用展開のためにも代表者は質的な向上を進めていた。

技術レベルを具体例で述べると、シリコンの異方性ウェットエッチングで製作した3次元マイクロオプティカルベンチ上に、薄膜構造を組み合わせて製作した光スキャナを2002年に示した。新規性の高いデバイス構造ができることを示したデモンストレーションであった。計5回のスプレーコーティン

グによるレジスト成膜と通常のアライナによるパターニングを行った。但し、完成度は十分ではなく、レジスト成膜を何回もやり直すことや、レジスト膜のピンホールが取れないために生じる欠陥が残った。スプレーコーティングに関するメカニズムの解析を進め、条件と装置上の改良を進めた。図1は2004年の結果で、段差200 μm のキャビティに幅100 μm の直線パターンを転写した。壁面は角度55°の斜面である。ネガ型レジストを利用した。

研究開始当初、ウシオ電機の協力もあり、3次元フォトリソグラフィ加工による高機能 MEMS デバイスの研究を進める下地があ

った。MEMS デバイス、自由空間型の光デバイス、実装構造において、サンプルは立体形状になることが多く、その上にリソグラフィ加工を可能とすることは、出口として確実であり、発展が期待された。

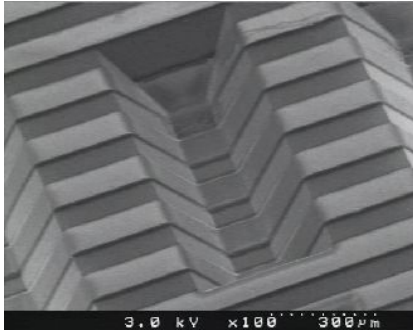


図 1: 55°の斜面を持つキャビティに転写したライン・アンド・スペース (2004 年の結果)。

2. 研究の目的

代表者らは、フォトリソ溶液を噴霧して成膜するスプレーコーティング技術を独自に開発してきた。立体サンプルに均一な成膜ができると、適用が平面に限られるフォトリソグラフィ加工が立体でも可能になる。この発展が見込まれる 3 次元フォトリソグラフィ技術を先駆けて活用し、高機能 MEMS デバイスに応用することを目指す。

3. 研究の方法

技術の更なる質的向上を進めるが、出口イメージを明確にすることを旨とした。この一貫として、外部研究グループからのニーズを重要視した。レジスト材料は、より広く利用されているポジ型レジストに変更した。ポジ型では、膜厚分布があってもパターン状にレジストを取り除く必要があるため、露光条件がより厳しくなる。外部研究グループでは、ネガ型はあまり使われていない。別の専門をもつ研究者との協力による、新しい MEMS デバイスを志向したアプリケーション研究が芽生える形となった。

複数のグループと協力したが、研究テーマとしての共通ファクタは、垂直壁を手がけたことである。MEMS デバイスに限らず、多くの工業製品は垂直壁を持つ。垂直壁加工のニーズは大きい。

4. 研究成果

以下、年を追って述べる。

(1) 関西大学の青柳教授らと、カンチレバー構造が組み合わせられた MOSFET 容量センサを製作した。Deep RIE で製作された Si カンチレバーの下に MOSFET を製作する。カンチレバーがフローティングゲートの役割を

果たし、FET のチャネルを流れる電流を変調する原理である。カンチレバー垂直壁も含めて、均一性良くレジスト成膜することが要求された。スプレーコーティング時の走査速度を増加させることが、膜の均一性を向上させた。デバイス表面にレジストを成膜した様子を図 2 に示す。レジストの凸部コーナでの段切れや、凹部コーナへの溜まりを最小限に抑えることができた。成膜した後、通常のアライナを用いてパターニングできることも示した。

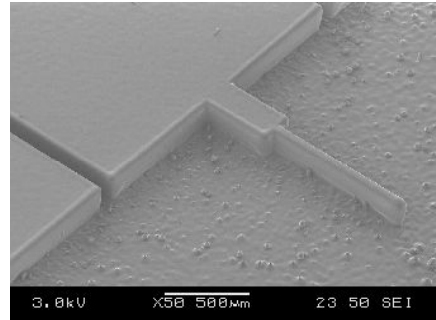


図 2: 垂直壁をもつ高さ 100µm のカンチレバーにレジストを成膜した結果。下地の荒れは、Si エッチング加工のときの影響である。

成膜後の、立体へのパターニング技術の向上を進めた。パターンの微細化が必然的に求められるため、位相シフトマスクによる高解像度化を検証した。厚みが異なるガラス領域を用意し、互いに隣り合う領域を通った光では位相が 180°変化するように調整する。回折で重なった領域で光は打ち消しあい、暗部を形成する。この干渉条件は、立体サンプルにおいてマスクから離れた部分にまで光が伝搬しても保存される。図 3 に示すように 200µm のキャビティ底部に 5µm の細線パターンが得られた。実装分野の細線パターンが 10µm 程度であることを比べると、高密度実装応用に検討できる値になっている。

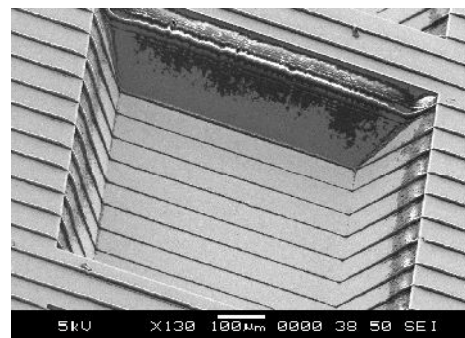


図 3: 位相シフトマスクによってキャビティ上に製作した細線パターン。ポジレジストを利用している。

斜め露光によるユニフォミティ向上を検

討した。通常の垂直光照射を利用した場合と比べて、斜面に入射する光は $\cos\theta$ のファクタだけ光強度密度が目減りする上に、レジスト膜内部への光透過率が減少する。斜面へのパターン転写に問題が生じることが多い。55°の斜面に対して 35°の斜め露光を行うと、上面と底面の入射角は 35°、斜面の一つは 20°となる。関係が逆転し、斜面でよりエネルギー伝達が高くなる。3次元構造全体ではオーバー露光を防ぐことになる。図4が結果の一例である。凸部コーナ上部の比較的厚いレジスト部分に対してもパターンを抜き易く、斜め露光を2回行った方が少ない露光量で済むことも分かった。パターンサイズがデザイン通りに得られ易いことも分かった。

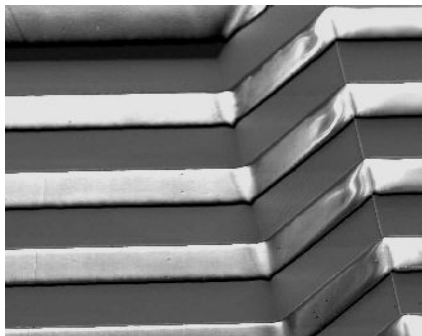


図4: 35°斜め露光によって斜面へのパターンニングを行った結果。

(2) 香川大学の太平教授らと、立体配線への応用研究を進めた。Chip on glass と呼ばれる光電子デバイスの実装において、立体配線を先駆けて利用する試みである。試作品の写真を図5に示す。この応用では、必要となる電極数の密度が大きくないため、パターン幅が数 100 μm となる。黒い部分が樹脂、写真下部がガラスである。パッケージに利用される樹脂材料にリソグラフィ加工を適用するには、Si材料とは異なる技術的取り組みが必要となることも分かった。

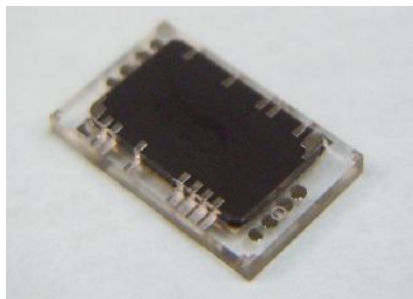


図5: 光電子デバイスのパッケージ壁面を利用した立体配線。

基礎研究として、成膜評価を短時間で定量的に行うための方法を検討した。サンプル断面の、斜め SEM 観察に頼ると、均一性が完

全ではないため、観察場所により測定者の主観が入る恐れがある。成膜条件の変更で生じる僅かな変化を定量的に評価することは難しかった。サンプル上に堆積したレジスト質量が評価に利用できないかを検討した。図6に一連の成膜による質量増加の結果を示す。ノズル-サンプル間距離 h はサンプル入射時の気流速度を変化させる。 h によって微粒子の付着確率が変化することが明確になった。このことは、スプレーから供給されるレジスト微粒子が必ずしもサンプルに付着しないことが明らかとなった。気流の性質が重要であることを示した。加えて、サンプルの走査速度 v とレジスト付着量は基本的には反比例の関係があること、その上で立体サンプルには僅かな付着量変化を生じることが分かった。この関係から、未知の実験条件に対して、ある程度の予測を立てることも可能である。

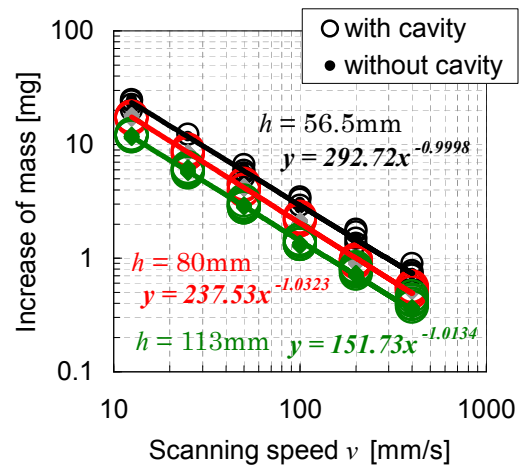


図6: 平面ウエハにおいてノズル-サンプル間距離 h 、走査速度 v を変化させたときのレジスト付着質量。

(3) 香川大学の太平教授らとの応用研究もあり、斜面ではなく、垂直壁へのパターンニング技術に取り組んだ。液浸と偏光制御を組み合わせた斜め露光による界面反射抑制である。垂直壁へのパターンニングでは斜め露光が必須であるが、マスクとサンプル表面が互いに離れた領域が生じるがために、反射の影響が大きくなる。UV光の反射は別領域にパターンを投影し欠陥を作ってしまう。サンプル-マスク間に純水を導入し、レジストと媒体間の屈折率差を小さくすることで、広い角度範囲で反射率を低くした。加えてUV光をp偏光に制御した。45°入射角で空気-レジスト界面の場合の 1/60 まで反射率を減少することが予測される。界面反射の影響が現れ易い斜め線のパターンを図7(a)に示す。スプレー成膜の性質として、トレンチ凹部のレジスト膜厚が薄くなる。これはポジレジストを利用し

た一括露光の条件に対して、オーバーになり易いことを意味する。それでも、凹部のパターンが崩れず、正しく転写された。図 7(b)では、斜めパターンを含むライン幅 $30\mu\text{m}$ からなる任意パターン（アルファベットや記号など）が転写できた。

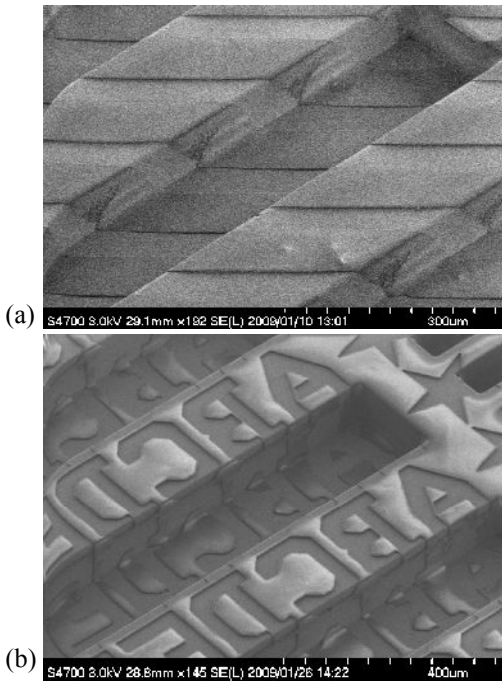


図 7: (a)液浸と偏光制御により界面反射を抑制することで実現した、垂直壁をもつトレンチへの斜め線パターン。(b)任意パターン転写のためのデモンストレーション。

基礎研究に関しては、スプレー気流の数値解析を行った。噴流の入射速度分布とノイマン条件を境界条件に与え、2次元ではあるがナビエ-ストークス方程式に従い立体サンプル近傍の速度分布を求めた。図 8(a)にレイノルズ数 300 で計算した、広域の結果を示す。上部からスプレー気流が入り、真下のサンプルに照射される。ノズル直下のトレンチ内部では流速が激減する。更に、図 8(b)に示すように、トレンチ内部に渦が生じている。定常条件では、気流に乗って真下のトレンチ底部に運ばれるレジスト微粒子は、僅かであると予測できる。慣性が大きい微粒子が気流から分離したり、非定常的な攪拌効果が入ったりすることが重要である。図 8(a)から真下ではなく、僅かに左右に離れた領域で、高速気流がサンプル表面に肉薄することから、成膜に大きな影響を与えていることが示唆された。

以上、具体的な応用展開、プロセス技術全般の推敲、基礎技術の蓄積が進んだ。また、研究内容を、論文以外の図書で紹介する機会に恵まれた。

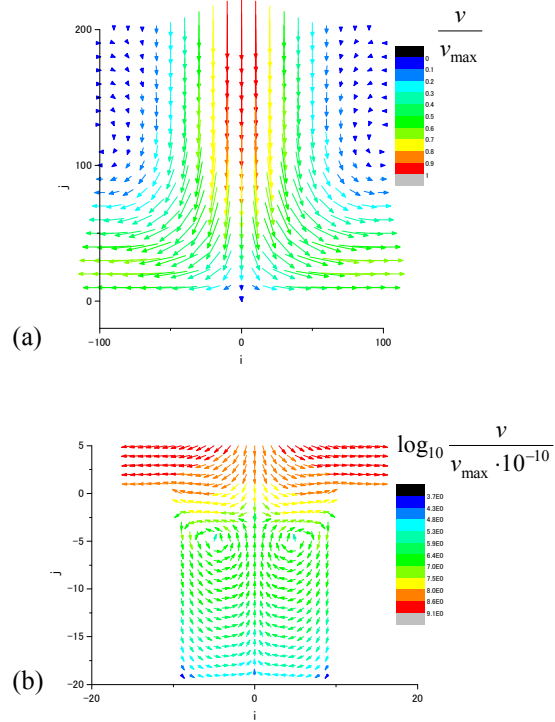


図 8: スプレー気流の流体解析例。レイノルズ数 300。(a) 広域の様子。(b) ノズル直下にあるアスペクト比 1 のトレンチ内部の気流。

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)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Hayato Izumi, Yohei Matsumoto, Seiji Aoyagi, Yusaku Harada, Shoso Shingubara, Minoru Sasaki, Kazuhiro Hane, Hiroshi Tokunaga, “Development of MEMS Capacitive Sensor Using a MOSFET Structure”, 電気学会論文誌 E, Vol. 128-E, No. 3 (2008) pp.102-107. 査読有
- ② Vijay Kumar SINGH, Minoru SASAKI, and Kazuhiro HANE, “Angled Exposure Method for Patterning on Three-Dimensional Structures”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 9B (2007) pp.6449-6453. 査読有
- ③ Seiji Aoyagi, Yuichi Matsui, Kenji Makihira, Hiroshi Tokunaga, Minoru Sasaki, Kazuhiro Hane, “Fabrication of MOSFET Capacitive Sensor using Spray Coating Method”, 電気学会論文誌 E, Vol. 127-E, No. 3 (2007) pp. 153-159. 査読有
- ④ 佐々木実, 陳俊中エドウィン, 羽根一博, 「位相シフトマスクを利用した立体サン

ブルの露光法」, 電気学会論文誌 E, Vol. 126-E, No. 6 (2006) pp.241-242. 査読有

[学会発表] (計 13 件)

- ① 岩本拓也, 佐々木実, 熊谷慎也, 「MEMS 用アッシング装置の開発」日本機械学会東海学生会、第 40 回学生員卒業研究発表講演会 講演前刷集, 116, (2009.3.16 岐阜大学) pp.29-30. 査読無
- ② TAKAFUMI HOSONO, SHINYA KUMAGAI, MINORU SASAKI, “Liquid immersion angled exposure technique for 3D photolithography”, First International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications (ISPlasma2009) Mo-20 (2009.3.9, Nagoya) p.142. 査読無
- ③ 森井裕貴, 大平文和, 佐々木実, 「スプレーコート技術と斜め露光技術による垂直側面への配線形成技術」中部地区ナノテク総合支援: ナノ材料創製加工と先端機器分析、平成 20 年度成果報告会 T20 (2009.3.5 名古屋) pp.37-38. 査読無
- ④ Hiroki Morii, Fumikazu Oohira, Minoru Sasaki, Toshihiko Ochi, Asumi Yuzuriha, Katsuhito Wani, “Conductive pattern forming method on vertical wall using spray coating and angled exposure technologies”, Proceedings of The 25th Sensor Symposium on Sensors, Micromachines, and Applied Systems, A1-6 (2008.10.23, Okinawa) pp.29-32. 査読有
- ⑤ Hisayoshi Tajima, Minoru Sasaki, “A Monitoring Method for Spray Coated Resist Film” Proceedings of The 25th Sensor Symposium on Sensors, Micromachines, and Applied Systems, P-1-10 (2008.10.23, Okinawa) pp.250-253. 査読有
- ⑥ H. Morii, F. Oohira, M. Sasaki, T. Ochi, A. Yuzuriha, “Conductive Pattern Forming Method on Vertical Wall using Spray Coating and Angled Exposure Technologies”, Final Program of 2008 IEEE/LEOS Int. Conf. Optical MEMS and Nanophotonics, P30 (2008.8.13, Freiburg, Germany) pp.156-157. 査読有
- ⑦ 佐々木実「レジストの Spray Coating と MEMS 応用」Converttech JAPAN/新機能性材料展テクニカルフォーラム, ナノコーティングセッション予稿集 (2008.2.13, 13:10-13:55, 東京国際展示場) 査読無
- ⑧ Hayato Izumi, Yohei Matsumoto, Seiji Aoyagi, Yusaku Harada, Shoso

Shingubara, Minoru Sasaki, Kazuhiro Hane, Hiroshi Tokunaga, “Development of MEMS Capacitive Sensor Using a MOSFET Structure”, Proceedings of the 24th Sensor Symposium (2007.10.16, Funabori) pp.254-258. 査読有

- ⑨ Vijay Kumar Singh, Minoru Sasaki, Kazuhiro Hane, “Angled exposure method for patterning 3D samples with slant side surfaces”, Proceedings of 2006 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 27A-11-2, (2006.10.27, Kamakura) pp.386-387. 査読有
- ⑩ Vijay Kumar Singh, Minoru Sasaki and Kazuhiro Hane, “Effect of Angled Exposure Light for Three-Dimensional Lithography”, Proceedings of the 23rd Sensor Symposium (2006.10.5-6, Takamatsu) pp.181-184. 査読有
- ⑪ Yuichi Matsui, Seiji Aoyagi, Kenji Makihira, Hiroshi Tokunaga, Minoru Sasaki, Kazuhiro Hane, “Fabrication of MOSFET Capacitive Sensor Using Spray Coating Method”, Proceedings of the 23rd Sensor Symposium (2006.10.5-6, Takamatsu) pp.371-376. 査読有
- ⑫ 佐々木実, 基調講演「ナノ・マイクロ形状と加工技術の現状と動向」Electronic Journal 第 137 回 Technical Symposium, 新・微細加工技術徹底検証 (2006.8.30, 品川, コクヨホール) 株式会社電子ジャーナル. 査読無
- ⑬ 佐々木実, 陳俊中エドウィン, 羽根一博, 「位相シフトマスクを利用した立体サンプルへの微細パターン露光法」, MSS-06-19, 電気学会研究会資料 センサ・マイクロマシン準部門総合研究会 (2006.5.15-16, 東京大学) pp.89-92. 査読無

[図書] (計 6 件)

- ① 分担 佐々木実, 「MEMS/NEMS 工学全集」監修: 桑野博喜、(株)テクノシステム (2009.4.22 発刊), 3. 11. 2 レジスト膜を利用した立体加工 pp.498-508.
- ② 分担 佐々木実, 「微細転写・加工技術全集」(株)技術情報協会(第 1 版第 1 刷 2008 年 8 月 29 日) ISBN978-4-86104-248-5 C3053, 第 4 章 第 3 [3]節 MEMS 用途フォトリソグラフィプロセス pp.381-396.
- ③ 佐々木実, 羽根一博, 「配線やデバイスの立体化に可能性を開く 3 次元フォトリソ

グラフィ(2)露光」, エレクトロニクス実装学会誌(講座ちよつと MEMS 第9回), Vol. 11, No. 4 (2008) pp.307-310.

- ④ 佐々木実, 羽根一博, 青柳誠司, 「配線やデバイスの立体化に可能性を開く3次元フォトリソグラフィ(1)成膜」, エレクトロニクス実装学会誌(講座ちよつと MEMS 第8回), Vol. 11, No. 3 (2008) pp.239-241.
- ⑤ 佐々木実, 羽根一博, 「MEMS デバイス製作とアセンブリをマッチングする試み」, エレクトロニクス実装学会誌(講座ちよつと MEMS 第6回), Vol. 11, No. 1 (2008) pp.100-103.
- ⑥ 分担 佐々木実, 「MEMS マテリアルの最新技術」監修: 江刺正喜、(株)シーエムシー出版(2007年11月30日 第1版発行) ISBN978-4-88231-968-9, 第2章 MEMS の製作, 1. レジスト塗布・露光技術 pp.84-93.

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

- ①(発明者) 佐々木実, 羽根一博「露光方法及び露光装置」(出願日)平成18年10月4日(出願番号)特願2006-273326(出願人)国立大学法人東北大学, ウシオ電機株式会社, 日本

○取得状況(計0件)

[その他]

平成20年度(財)中部科学技術センタープロジェクト形成研究会 F「3次元フォトリソグラフィ加工の高度化技術」オーガナイザーとして活動した。

http://ttiweb.toyota-ti.ac.jp/1432/pub_teacher_show.php?t=166

<http://www.vic-int.co.jp/> 分析・評価装置 → スプレーコーター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 実 (SASAKI MINORU)
豊田工業大学・工学部・教授
研究者番号: 70282100

(2) 研究分担者

該当無し。