ナノインプリント技術の配線応用に向けたプロセスとモールド設計

尹 成圓*, 鈴木 健太*, 廣島 洋*

Mold Design and Process for Application of Nanoimprint Lithography to Interconnections

Sung-Won YOUNG*, Kenta SUZUKI*, and Hiroshi HIROSHIMA*

* 集積マイクロシステム研究センター (〒 305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1 産業技術総合研究所 産総研つくば東)

* Ubiquitous MEMS and Micro Engineering Research Center (UMEMSME) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) (AIST Tsukuba East 1-2-1, Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564)

1. はじめに

近年、集積回路チップの大容量・多接続化や、MEMS などの異種デバイスとの集積化に対応するため、インターポザーを用いた3次元積層実装技術が検討されている。さらなる大容量・多接続化のために3次元実装用の配線層への要求は、2018年ベースで1 μ m以下、2020年には500nm以下の線幅の配線形成技術が必要となる展望である。しかしながら、実装配線は低コストでなくてはならず、先端LSI製造に使用される半導体露光装置(数十億円規模)を導入することは困難となっているため、2020年以降のパターン形成技術が空白となっている。

ナノインプリントリソグラフィ(NIL)技術[†]は微細なパターンが刻まれたモールドを樹脂に押しつけ、反転形状を刻む方式の低コストのナノ加工技術である。高生産性、高解像性能を有する技術として期待され、2013年版国際半導体技術ロードマップ(ITRS)の中で次世代リソグラフィ技術の候補に挙げられている。これまでは、ある程度の欠陥が許容される繰り返しパターンで構成された部材(反射防止フィルム、細胞培養シート、HDDパターンドメディア、LED用の微細加工など)への応用が広がっており、モールドの面積化が進むことで、その用途はさらに拡大している。実装配線構造を大面積でナノインプリントリソグラフィすることにより、低コストでのサブミクロンスケール配線を伴う3次元積層実装技術が実現できる。著書らはこの利点に着目し、ナノインプリント技術の配線形成などの実装技術への適用について調査検討を進めてきた。本稿では、ナノインプリント技術の配線応用に向けたモールド設計とプロセスに関する研究への著書らの取り組みについて紹介する。特にNILにおいて課題となっている気泡欠陥を防止する特殊ガス雰囲気下でのナノインプリント技術と、NIL用のモールド設計ソフトウェアの開発について述べる。

2. 特殊ガス雰囲気下でのナノインプリント技術

NIL技術は熱ナノインプリントリソグラフィ(T-NIL)と光ナノインプリントリソグラフィ(UV-NIL)に大別される。その中、UV-NILは常温・低圧インプリントプロセスであり、高位置合わせ精度、低熱残留応力、高生産性など、実装配線応用に適した特性を有する。しかし、プロセスメリットである低成形圧は、大気中インプリント成形において残留気泡発生の原因にもなる。真空プロセスが一般的な解決法であるが、その場合、真空専用のプロセス関連デバイスおよび治具をすべて真空チャンバー内に設置する必要があるため、装置の大きさと値段が大幅に増加する問題がある。UV-NILにおける気泡欠陥対策として、ポリジメチルシロキサン(PDMS)、ポーラス金属など、酸素透過性に優れた素材で作製したモールドが用いられている。しかし、ポーラス金属モールドはマイクロレベルパターンへの適用は可能であるが、ナノパターンへの適用は困難である。また、PDMSは柔らかく、紫外線露光による劣化問題があるため、ナノパターンの大量作製には適していない。

そこで、著書らは石英モールドを用いたUV-NILにおける気泡欠陥を防ぐ方法として、1,1,1,3,3-Pentafluoropropane (HFC-245fa, PFP)ガス[†]などの凝縮性ガスを用いたUV-NIL技術(廣島法)の開発を行っている¹⁾。この手法は、凝縮性ガスを導入することにより、大気濃度が低い雰囲気下でナノインプリントを行う。モールドキャビティ内に捕獲された凝縮性ガスは、インプリントの加圧により凝縮・液化し、UV硬化性樹脂樹液中へ溶解することにより気泡欠陥を生じさせない。PFPガスは室温での飽和蒸気圧が0.15MPaであり、インプリントのプロセス圧力と微細パターンにおいては毛細管力が生じるため、一般的なUV-NILの圧力条件下で十分な凝縮効果が得られる。PFPガスは毒劇物ではなく、特定化学物質にも該当しない。気泡欠陥の防止以外の特徴として、UV硬化性樹脂樹液のモールドキャビティ内への高速充填性やモールドの離型性向上が利点とし

て挙げられる一方で、ナノインプリントした樹脂パターン
のパターン高さの減少や、表面粗さの増大などの副作用な
どが実験的にわかっている²⁾。そこで、パターン高さの減
少や、表面粗さの増大を改善する一つの手法として、本稿
では凝縮性ガスとヘリウム (He) ガスを混合させる手法に
関して紹介する。

He ガスは、動的分子径が小さく、モールドの部材となる
石英の細孔を通り抜けることができるために、He ガス雰
囲気中で NIL を行う手法は、気泡欠陥防止する別の方法
として報告されている³⁾。今回われわれは、凝縮性ガスに
He を混合させることにより、樹脂の充填性やパターンの
表面粗さに関してどのような影響が生じるかに関して調
査を行った⁴⁾。

キャビティ深さ 94 nm、幅 100 μm のチェッカーパ
ターンが全表面に形成された石英モールドを用い、大気、
He、PFP ガスの異なる雰囲気中で作製した UV-NIL サ
ンプルを図 1 に示す。成形素材としては約 Si ウェハ上
に回転塗布された 65 nm 膜厚の PAK-01 を用いた。イン
プリント圧力は 0.1 MPa、露光時間は 1 秒 (100 mW/cm²)
であった。モールド表面は fluoroalkylmethylsiloxane
(Gelest AquaphobeTM CF) を用いて離型処理を行った。
大気中では、600 秒以上長くプレスしても気泡欠陥が
無くならないことが観察される (図 1(a))。一方、He
と PFP ガス雰囲気中において観察領域内

図 1. 異なる雰囲気ガス中での UV-NIL サンプル (PAK-01/Si)

(a) PFP/He 混合ガス雰囲気における充填時間

の気泡が消えるのにかった時間はそれぞれ 16.86 秒と 0.13
秒であり、PFP の方の充填速度が顕著に速いことが分かる
(図 1(b), (c))。大気、He、PFP 中での収縮率はそれぞれ 1%、
1%、25% であった。

図 2 は PFP/He 混合ガスを用いる UV-NIL 工程において、
ガス混合比がスループットと表面品質に及ぼす影響を示
す。PFP 雰囲気 (2,000 sccm) 中での UV-NIL は、He 雰
囲気 (2,000 sccm) 中の UV-NIL に比べて気泡の除去時間が短いこ
とが分かる (PFP: 0.132 s, He: 16.86 s)。また、He/PFP 混合
ガス (2,000 sccm) 中の He 比率の上昇に伴い、① 気泡除去
時間は 2 次関数的に上昇、② 収縮率は減少、離型力は上昇
(線形に近い形)、③ 表面粗さは減少した。例えば、He :
PFP = 1 : 3 の場合、He 環境に比べて 2 倍速い充填速度で高
品質のサンプルが得られることが観察された。

3. NIL 用のモールド設計ソフトウェアの開発

インプリントパターンは下部基板へのエッチトランス
ファー用のレジストパターンとして用いられる。そのた
め、NIL によりモールドの反転形状を高い忠実度で基板に
転写作製するだけでなく、インプリント残膜[†]を薄く、均
一にする必要がある^{5)~13)}。残膜厚がモールド面内の凹パ
ターンの密度に強く依存することに着目し、いくつかの解
決策が報告されている。一つはインクジェットシステムを
用い、基板に供給する樹脂液滴の体積をパターン密度に合
わせて調整する方式である⁹⁾。この方式の有効性は既に確
認されているが、成形材料である樹脂が低粘度に限られる
ことや、高価のインクジェットシステム、モールドおよび
インクジェットのマップ情報の管理、プロセス中の複数回
のアライメントなどが必要であり、利用は容易ではなく、
最先端半導体製造などの特殊な装置にのみ採用されてい
る。一方、汎用性が高い回転塗布膜を用いる NIL では、残
膜厚の均一化のために、パターンの再配置またはデバイス
パターンの周辺にダミーパターンを追加することにより、

(b) PFP/He 混合ガス雰囲気とラフネスの関係

図 2. PFP/He 混合ガスを用いた UV-NIL

面内パターン密度を一定にする方法がとられていた^{5),13)}。ただし、この方法はパターンデザインの変更が許容される場合のみ適用できる。著者らは、回転塗布膜を用いるUV-NILでの対策として、パターン密度に応じてモールドの溝の深さを変調することで単位面積あたりの容積をモールドの領域によらず均一化する容積均一化手法を提案した^{14)~18)}。本手法は、モールドの溝部分において2段階の深さの割合をパターン密度に合わせて調整してモールドを作り込むことにより、モールドの溝の容積を一定にする方式であり、パターン密度の種類に関わらず、2段の深さを適当な比率で混在させることによって容積の均一化が行える。この手法の有効性は2段の深さを実現するための補助パターンの作成が容易な、パターン密度が異なる単純なライン形状からなるテストパターンにおいて予備的に実証した。しかし、実際のデバイスパターンなどではパターンが複雑であり、手入力で補助パターンを作成することはできず。方法論的には可能であるが、実際には手法を適用することができなかった。

本稿では、容積均一化モールドの概念に基づいた簡便で柔軟な設計手法の構築を目的に、元モールドパターンから容積均一化用の加工パターンデータを自動生成するためのプログラム(Stamp Topography Automated Modification Program, STAMP)の開発やチップスケール補正への適用、またシミュレーションツールを用いた基礎検証について述べる¹⁹⁾。

3.1 モールドパターン補正の基本原則

容積均一化の基本原則を図3に示す。図3(a)は密度が異なる3つの領域(領域I, II, およびIII)で構成されている補正前のモールドデザイン例を示す。図1(b)に示すように、深さが一定で長さが異なる2段目の補正パターンを混在させることにより、単位面積あたりの容積を均一化させる。補正パターンのエッチング深さ(d_{2e})は、次の関係から決められる。

$$d_{2e} = d_1 \times R \quad (1)$$

$$R = \frac{A_{\max} - 1}{A_{\min}} \quad (2)$$

と表せる。ここで、 d_1 は元パターンの深さで、 R は最大パターン密度($A_{\max}$)と最小パターン密度($A_{\min}$)の比である。

図3. パターン補正による容積均一化の原理

図4は開発中のモールドパターン補正プログラムを用いた図面の変換例を示す。第1ステップとして、モールドパターン図面をユーザ指定の基本セルグループに分割し、各セルにおけるパターンの面積比(A_{ij})を計算する。ここで、補正のための単位セルの長さ(または面積)は粒度(G)と呼ばれ、インプリント中の補正パターンのエッチング深さおよび変形特性(例えば、キャビティ充填時間)に大きい影響を及ぼす重要な因子の1つである。式(1)と(2)で示すように、補正パターンのエッチング深さ d_{2e} は R に比例するため、得られた R がユーザ定義の加工限界範囲($R_{\lim}$)内に入るまで異なる粒度にて再分割を行う。次いで、既存パターン上に重量パターンを生成させるため、補助パターンのサイズを増減しながら、式(3)の関係が満たされるまでブーリアン演算を繰り返す。

$$A_{\max} - E < A_{ij} + R \times B_{ij} < A_{\max} + E \quad (3)$$

ここで、 B_{ij} はセル内の重畳パターンの密度で、 E は容積均一化演算後のパターン密度におけるユーザ定義の許容誤差である。生成された相補パターンレイアウトは、GDSIIフォーマットのファイルとして出力される。

3.2 粒度の影響

所望の任意モールドデザインに対して複数の容積均一化デザインが存在する。複数の候補の中から適切な設計を選択するにあたって重要な指標の一つは粒度(G)である。粒度はインプリント中の補正パターンのエッチング深さおよび変形特性に強く影響を与える重要なパラメータの一つであり、成形素材の粘度および補正パターン深さなどを考慮して決定する。

UV-NILシミュレーションにより10 mm角の石英モールドを用いたPAK-01(粘度:100 mPa・s)/SiサンプルのUV-NILにおいて、容積均一化効果の粒度依存性を調べた。UV-NIL解析にはSimprint Nanotechnologies Ltd社のSimprint Core(ver 4.1)ソフトウェアを用いた。解析に用いた補正前のモールド表面(厚み3 mm, サイズ:1 cm角)には50 μ m幅の凹ラインパターンが0.267, 0.500, 0.677, 0.754の密度分布で配置されている。STAMPソフトウェアを用い、異な

図4. 容積均一化補正例:(a)元図面,(b)補正用の補助図面例

る粒度において ($G = 48, 96, 240, 320, 480, 960, 1,920, 2,400, 4,800 \mu\text{m}$) R が一定になるように容積均一化補正用の GDSII 形式の図面を生成し、GDS extractor を用いて解析用ファイル形式に変換した。モールド図面を設定粒度に分割し、各粒度の面積比 (A_{ij}) を算出した。 $A_{\max}$ と $A_{\min}$ はそれぞれ 0.267 と 0.754 であり、式 (2) により計算された R は 1.823 であった。元パターン深さ (d_1) が 90 nm の場合、式 (1) により、補正パターンのエッチング深さ (d_{2e}) は 147 nm になるため、補正された領域のパターン深さ (d_2) は 237 nm に設定した。補正前のパターン密度 0.267–0.754 は、補正により 3D パターン密度 0.754 ± 0.01 に揃えられた。初期層厚は 120 nm、メッシュサイズは $50 \mu\text{m}$ とした。UV-NIL シミュレーションで計算した G とキャビティ充填時間の関係を図 3 に示す。容積均一化の原理を考慮し、完全充填直後 ($P = 1$) において膜厚分布の比較を行った。ここで、 $P = 1$ は全ての領域において充填率が 95% 以上になった時点を示す。充填時間は粒度のサイズに比例する傾向を示した。また、パターンの最小寸法 ($50 \mu\text{m}$) より粒度が一定以上大きくないと残膜均一化効果が十分に得られないことが分かった。小さな粒度はインプリント時間を短縮するのには有効であるが、モールドパターンレイアウトによって下限があることが明らかであった。容積均一化モールドは補正前のモールドに比べてパターン容量が高いため、より長いインプリント時間が必要とされたが、モールドが同じ初期層厚で完全に充填された場合、より薄い残留層が得られた。容積均一化による残膜均一化効果は顕著であり、残膜厚ばらつきの標準偏差は 1/5 に減少し、原型の残膜 (RLT) の標準偏差は 12.7

nm であったのに対し、CE 型の RLT の標準偏差は 2.47 nm であった。一方、キャビティ充填時間は粒度と R のトレードオフであることから、 R 値が不均一な場合には別途検討が必要となる。

3.3 チップスケール補正と UV-NIL シミュレーション

図 5 のようにパターンの密度分布や配置が規則的な場合、粒度分割後のパターン密度範囲が予測し易いため、補正パターンの加工深さの許容範囲と容積均一化を同時に考慮することが比較的容易である。一方、図 6 のようにパターンの密度分布範囲が広く、その配置が複雑なデバイスパターンの場合には、粒度分割後の密度範囲は予測し難く、粒度の減少に伴い R が増加するケースが多い。反面、粒度が大きすぎると場合、樹脂の粘度によっては横方向での流動が十分行われないため、キャビティ内の完全な充填が得られない場合もあることを考慮し、粒度の上限を決める必要がある。

STAMP ソフトウェアを用いたチップスケール容積均一化補正例を図 7 に示す。図 7(a) は補正前の元モールドパターンを示す。図 7(b) は $G = 1,400 \mu\text{m}$ の補正パターンを示し、図 7(c) は元のパターンと補正パターンを重ね合わせた図面を示す。補正パターン生成のための演算において、補正後の 3 次元密度の許容誤差を 0.02 と設定したため、容積均一化後の密度範囲は 0.94 ± 0.02 であった。 $A_{\max}$, $A_{\min}$, R はそれぞれ 0.36, 0.94, 1.63 であった。元パターン深さ (d_1) が 90 nm であったため、補正パターンのエッチング深さ (d_{2e}) と補正された領域のパターン深さ (d_2) はそれぞれ 147 nm と 237 nm であった。Intel(R) Core(TM) i7-4770K プロセッサお

図 5. 充填速度の粒度依存性

図 6. 複雑パターンにおいて R 値の粒度依存性

図 7. チップスケール補正の例: (a) 元パターン, (b) 補正用補助パターン, (c) 容積均一化パターン

図 8. (a) 元モールドパターンと (b) 容積均一化モールドによる UV-NIL 後のサンプルの表面プロファイル。(c)–(e) はサンプル面内のラインプロファイルの比較例

よび 32 GB RAM を備えたパーソナルコンピュータを使用して、約 40 Mb サイズの GDSII ファイルを 16,384 粒度 (128×128 粒度) に分割し、容積均一化補正をするのにかかった時間は約 10 分であった。図 7 の図面を用いて行った UV-NIL シミュレーション結果を図 8 に示す。初期層厚とメッシュサイズはそれぞれ 100 nm と 50 μm に設定した。前述のように、残膜厚分布の比較には完全充填直後のシミュレーションデータを使用した。図 8(a) と図 8(b) は補正前後のモールドを用いてインプリントを行った場合の充填終了時の成形領域全域の表面を示す。図 8(a) と (b) の A, B, C 線上でのラインプロファイルの比較を図 8(c)–(e) に示す。容積均一化による残膜均一化効果は顕著であり、残膜厚ばらつきの標準偏差は 1/3 まで低減できていることが分かる。

4. 結 論

本稿では、配線応用に向けたナノインプリントプロセスとモールド設計技術について紹介した。

- ・気泡欠陥フリーの高速パターン形成プロセスの開発を目的に、He/PFP 混合ガスを用いる UV-NIL 工程を提案し、ガス混合比がスループットと表面品質に及ぼす影響を明らかにした。
- ・容積均一化モールドの概念に基づいた簡便で柔軟な設計手法の構築を目的に、元モールドパターンから容積均一化用の加工パターンデータを自動生成するためのプログラム (STAMP) を開発中である。STAMP ソフトウェアにより生成したテストパターンに対して、ナノインプリント成形シミュレーションや実験検証を行い、残膜厚分布の標準偏差を 1/3–1/5 低減できることを明らかにした。信頼性を高めるためには、容積均一化による残膜均一化効果はパターンの密度範囲や分布配置に依存するため、

幅広いパターンデザインに対する追加検証が必要である。

今後、上記技術を、MEMS などのマイクロメカトロニクス実装分野に限らず、微細配線製造技術として幅広く活用していきたい。

謝 辞

本研究の成果の一部は JSPS 科研費 16K06035 の助成を受けたものです。

(2018.12.21-受理)

文 献

- 1) H. Hiroshima, H. Atobe, Q. Wang, and S. W. Yoon: "UV nanoimprint in pentafluoropropane at a minimal imprint pressure," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **49**, 06GL01, 2010
- 2) S. Kaneko, K. Kobayashi, Y. Tsukidate, H. Hiroshima, S. Matsui, and M. Nakagawa: "Morphological changes in ultraviolet-nanoimprinted resin patterns caused by ultraviolet-curable resins absorbing pentafluoropropane," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **51**, 06FJ05, 2012
- 3) C. Peroz, S. Dhuey, M. Volger, Y. Wu, D. Olynick, and S. Cabrini: "Bubble-free patterning with low line edge roughness by ultraviolet nanoimprinting using trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene condensable gas," Nanotechnology, Vol. **21**, 445301, 2010
- 4) S. W. Yoon, K. Suzuki, Q. Wang, and H. Hiroshima: "Control of resin filling and pattern quality of ultraviolet nanoimprint lithography in pentafluoropropane and helium ambient," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **52**, 06GJ07, 2013
- 5) H. Taylor, K. Smistrup, and D. Boning: "Modeling and simulation of stamp deflections in nanoimprint lithography: Exploiting backside grooves to enhance residual layer thickness uniformity," Microelectron. Eng., Vol. **88**, pp. 2154–2157, 2011
- 6) H. Taylor: "Simulation and mitigation of pattern and process dependencies in nanoimprint lithography," J. Photopolym. Sci. Tec., Vol. **24**, pp. 47–55, 2011
- 7) V. Sirotkin, A. Svintsov, S. Zaitsev, and H. Schiff: "Viscous flow simulation in nanoimprint using coarse-grain method," Microelectron. Eng., Vol. **83**, pp. 880–883, 2006
- 8) V. Sirotkin, A. Svintsov, S. Zaitsev, and H. Schiff: "Coarse-grain simulation of viscous flow and stamp deformation in nanoimprint," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. **28**, pp. 2379–2383, 2007
- 9) S. Merino, A. Retolaza, H. Schiff, and V. Trabadello: "Stamp deformation and its influence on residual layer homogeneity in thermal nanoimprint lithography," Microelectron. Eng., Vol. **85**, pp. 877–880, 2008
- 10) A. Tanabe, T. Uehara, K. Nagase, H. Ikeda, N. Hiroshiba, T. Nakamura, and M. Nakagawa: "Discharge of viscous UV-curable resin droplets by screen printing for UV nanoimprint lithography," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **55**, 06GM01, 2016

- 11) H. Schmitt, B. Amon, S. Beuer, S. Petersen, M. Rommel, A. J. Bauer, and H. Ryssel: "UV nanoimprint lithography process optimization for electron device manufacturing on nanosized scale," *Microelectron. Eng.*, Vol. **86**, pp. 636–638, 2009
- 12) K. Fukuhara, M. Suzuki, M. Mitsuyasu, T. Komukai, M. Hatano, T. Kono, T. Nakasugi, Y. Lim, W. Jung, and K. Nakamae: "Overlay improvement in nanoimprint lithography for 1x-nm patterning," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. **34**, 06K405, 2016
- 13) F. Lazzarino, C. Gourgon, P. Schiavone, and C. Perret: "Mold deformation in nanoimprint lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. **22**, pp. 3318–3322, 2004
- 14) H. Hiroshima: "Fabrication of capacity-equalized mold for homogenizing residual layer thickness in imprint lithography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **47**, pp. 8098–8100, 2008
- 15) K. Suzuki, S. W. Youn, Q. Wang, H. Hiroshima, and Y. Nishioka: "Fabrication processes for capacity-equalized mold with fine patterns," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **50**, 06GK04-1, 2011
- 16) Q. Wang, H. Hiroshima, S. W. Youn, and K. Suzuki: "Effects of granularity of complementary patterns in a capacity-equalized mold used for UV nanoimprint lithography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **50**, 06GK08, 2011
- 17) Q. Wang, H. Hiroshima, H. Atobe, and S. W. Youn: "Residual layer uniformity using complementary patterns to compensate for pattern density variation in UV nanoimprint lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. **28**, C6M125, 2010
- 18) H. Hiroshima: "Nanoimprint with thin and uniform residual layer for various pattern densities," *Microelectron. Eng.*, Vol. **86**, pp. 611–614, 2009
- 19) S. W. Youn, K. Suzuki, and H. Hiroshima: "Chip-scale pattern modification method for equalizing residual layer thickness in nanoimprint lithography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **57**, 06HG03, 2018

† 用語解説

ナノインプリント技術：微細な凹凸パターンを表面を持つモールドを樹脂表面に押し込むことによって、ナノ

オーダーの微細パターンを転写する低コスト・高生産性・高精度なパターン転写技術。光硬化性樹脂を室温で石英モールドで押し込み、紫外線露光により硬化させた後に離型することによりパターンを作製する方法を光ナノインプリントという。

残膜：ナノインプリントによりパターンを形成した場合、他のリソグラフィではパターン凹部ではレジストが完全に除去されているのに対し、ナノインプリントでは原理的にパターン凹部にも樹脂が残ってしまう。この膜を残膜と呼ぶ。

Pentafluoropropane, PFP (ペンタフルオロプロパン)

ガス：室温での飽和蒸気圧が 0.15 MPa である凝縮性ガス。飽和蒸気圧以上の加圧で体積が 200 分の 1 に減少し、液化する特徴を有する。

著者紹介

尹 成圓 (ゆん そんわん)
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター 主任研究員
光・熱ナノインプリント、MEMS 実装技術の研究開発に従事

鈴木 健太 (すずき けんた)
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター 主任研究員
光・熱ナノインプリント、MEMS 実装技術の研究開発に従事

廣島 洋 (ひろしま ひろし)
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター 研究センター長
イオンビームリソグラフィ、光ナノインプリント技術の研究開発に従事