

令和 2 年 5 月 9 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18802

研究課題名（和文）紫外線硬化材料の屈折率変化を利用した3次元MEMSフォトリソグラフィ

研究課題名（英文）3D MEMS photolithography using difference in refractive index of UV curable material

研究代表者

高橋 英俊（Takahashi, Hidetoshi）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・講師

研究者番号：90625485

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではMicroElectroMechanical Systems (MEMS)の基本プロセスの1つであるフォトリソグラフィにおいて、紫外線硬化材料の硬化前後の屈折率の変化を利用した3次元微細構造を製作する方法論の確立を目指した。作製においては、紫外線硬化材料で生体適合性のあるPolyethylene Glycol Diacrylate (PEGDA)を用いた。屈折率の変化によって、照射される紫外線は材料の中を直進せず屈折し、3次元的な構造が製作される。マイクロニードルやマイクロ吸盤などの機能的な3次元微細構造の設計・製作を理論及び実験の両面から研究を遂行した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、マイクロ吸盤やマイクロニードルなど、有用な機能を持つ微細構造デバイスの研究開発が盛んである。こういった構造を作製するためには、微細構造をアレイ状に多数並べる必要があり、MEMSのフォトリソグラフィが作製に最も適した方法の1つであると考えられる。これらは形状によって機能・性能が大きく向上することが知られており、より3次元的で複雑な形状により、高機能・高性能である可能性がある。本研究で提案したフォトリソグラフィを利用することで、これらのような3次元的な構造の実現に貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a fabrication method of a three-dimensional (3D) microstructure via photolithography, which is one of the basic Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) processes. We realized such 3D photolithography based on refractive-indices changes of UV curable material during photo-polymerization. When such material is used, UV light ray receives refraction effect during exposure, thus changes the light path and forms 3D photo-polymerized structure. Polyethylene Glycol Diacrylate (PEGDA), which is one of the common UV curable and biocompatible materials, was used in the fabrication process. We demonstrated the 3D lithography by fabricating PEGDA microneedle array, micro suction cup array, and so on.

研究分野：機械工学

キーワード：MEMS フォトリソグラフィ 3次元構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)において最も基礎となるプロセスはフォトリソグラフィである。フォトマスクを通して紫外線がフォトリソグランドに照射され、微細パターンが形成される。形成される微細パターンはフォトマスクの転写であるため、一般的なフォトリソグラフィはあくまでも 2 次元的なパターンを形成する。フォトリソグランドの厚さ方向にもパターンをつける「グレースケール露光」や紫外線の照射方向をコントロールする「傾斜露光」などの方法も存在するが、立体的に曲面を持つ構造を製作することは困難であった。

一方、近年研究が活発である分野であるバイオミメティクスの方法論の 1 つが、生物の持つ微細な構造を規範とすることで新たな機能を持つデバイスを実現する、というものである。ただし、皮膚構造など規範とすべき構造は 3 次元的に複雑な構造であり、曲面的である場合が多い。そのため、模倣によって機能を十分に発揮するために、曲面的 3 次元微細構造を実現できる、これまでにない方法が求められてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は MEMS の基本プロセスの 1 つであるフォトリソグラフィにおいて、リソグラフィに用いる紫外線硬化材料の硬化前後の屈折率の変化を利用した曲面的 3 次元微細構造の製作方法を創成することである。MEMS のフォトリソグラフィに使われる一般的な紫外線硬化材料は、フォトマスクの微細パターンを正確に転写するために、硬化前後の屈折率が変わらないよう製作されている。そのため、従来のプロセスは、フォトマスクを通じて紫外線硬化材料に入射する紫外線は直進するという仮定の下、設計されてきた。本研究では、あえて硬化前後の屈折率が変わる材料特性を用い、材料の中を直進せず屈折する紫外線の光路を利用することで 3 次元な構造を製作するプロセスを確立する。

3. 研究の方法

紫外線硬化材料の硬化・未硬化で屈折率が異なると、材料に対して紫外線を照射したとき、すでに硬化した場所と硬化していない場所の界面で紫外線が自発的に屈折する。屈折は架橋結合に伴って連続的に起こっていくため、紫外線の光路は時間とともに変わっていく。この光路は、フォトマスクの微細パターン、材料の屈折率、紫外線の初期の傾斜角度などによって決まると考えられる。本研究では、マイクロ吸盤、細胞培養用ウェル、マイクロニードルの 3 点を機能的な曲面的 3 次元微細構造のアレイ構造として設計論を確立する (図 1(a))。これらは、近年研究開発が盛んな分野であり、構造の違いによって機能・性能が大きく向上することが知られている。図 1(b)は試作したマイクロニードルである。円形状のマスクパターンに真上から紫外線を照射するだけで、レンズが集光するように紫外線が屈折しニードル形状が製作できる。このような槍のような構造は、既存のフォトリソグラフィでは実現不可能な構造であり、屈折率変化を利用することで初めて製作可能になる。

研究方法としては、材料の探索、理論の構築、デバイスの製作・評価の 3 つを軸として推進する。硬化及び未硬化の屈折率の異なる材料を化学的な裏付けに沿って探索し、光路のシミュレーションを行うことで設計理論を構築する。またデバイスの製作は、通常のリソグラフィで用いられる垂直方向の紫外線照射だけでなく、回転傾斜露光法なども用いる。

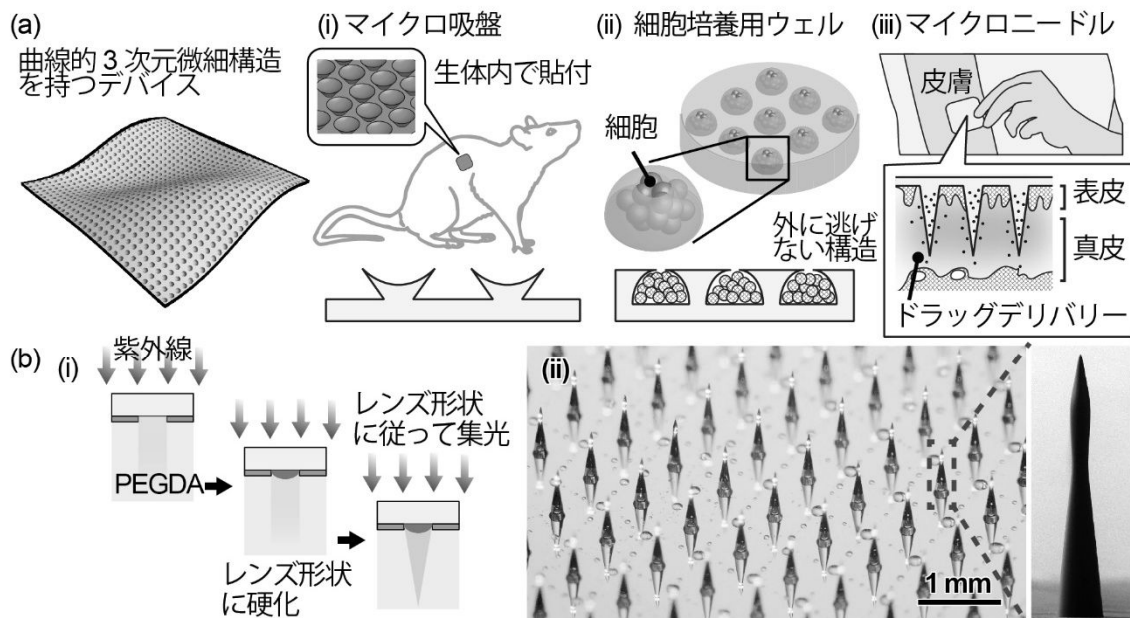


図 1(a) 提案する光の屈折率変化を利用した曲線的 3 次元微細構造を持つデバイス。(i, ii, iii) マイクロ吸盤、細胞培養用ウェル、マイクロニードルの概念図。(b) PEGDA で試作したニードル構造の製作概念図と写真。

4. 研究成果

当初の計画にあるマイクロ構造であるマイクロニードル、ウェル構造、マイクロ吸盤の製作を進め、また屈折率の変化による紫外線の光路変化のシミュレーションを行った。シミュレーションを行うため、屈折率の定量的な変化量を得るため、屈折率を計測するためのセットアップを構築し、材料の硬化前・硬化後の屈折率を求めた。セットアップはレーザー、フォトダイオード、距離センサ、紫外線硬化材料を密封するセルを光学治具で組み立てている。レーザーとフォトダイオードの間にセルを配置し、セルの角度を変えることで、レーザーの光路を変える。フォトダイオードが最も反応する位置を距離センサで計測することで、屈折率を計算する。Polyethylene Glycol Diacrylate (PEGDA)の硬化前及び硬化後の屈折率は 1.47 及び 1.51 と計測され、硬化前後で屈折率が変わることを定量的に示した。

(1) マイクロニードルについては、タイムラプスとなる露光時間を変化させた場合の形状を製作し、SEM により側面から観察することで、屈折率の変化による紫外線の光路について実験的な知見を得た。アルミの穴形状がパターンされたガラスウェハを、重合剤を混ぜた PEGDA の満たされたチャンバの上に配置し裏側から紫外線を垂直に照射することで、ニードル形状を製作した。穴形状の寸法は 200 μm であり、ニードル形状は 1 mm 程度となる。ウェハのサイズは 1 インチ角であり、中心にニードルのアレイが製作されるようにパターンされている。露光量が適切な場合、先端が鋭いニードル形状(先端の曲率半径 10 μm 以下)となることが分かった。さらにそれ以上に露光した場合でも、その上面で再度集光し、先端が鋭いニードル形状になることが分かった。

(2) ウェル構造については、ニードル構造とパターンが逆となるウェハを用いて同様のプロセスで製作し、PEGDA が逆テーパ構造になることを、製作した構造の断面を SEM で観察することで確認した。

(3) マイクロ吸盤構造については、製作のためのミラーを用いた回転傾斜露光装置を設計・製作した。回転する筐体の側面にミラーが取り付けられており、筐体の中心に配置し静止しているウェハに傾斜した紫外線を照射する。これは従来の土台が回転する回転傾斜露光装置を用いるとすると、使用する PEGDA が硬化前液体であるため、露光中にこぼれてしまうからである。研究当初はプリズムを用いた回転傾斜露光装置を用いることを想定していたが、プリズムの場合、照射する紫外線の入射角度を大きくすることが難しかったため、ミラーを用いることを着想した。マイクロニードルと同様にアルミの穴形状がパターンされたガラスウェハを PEGDA のチャンバ上に配置し、回転傾斜露光を行うことで吸盤構造を実現した。これらの構造はガラス基板上あるいは PEGDA で製作した薄膜上に製作することができることを示した。

(4) 各タイムラプスで得た構造における屈折率の違いによる光路のシミュレーションを行い、理論的にニードル構造になることを確認した。シミュレーションには COMSOL MultiPhysics の光線解析を利用した。タイムラプスの SEM 画像から PEGDA の構造を抽出し、抽出した構造を硬化後の屈折率、その周囲を硬化前の屈折率として紫外線を底辺から照射した際の光路を計算した。その結果、屈折率の違いによって、集光しニードル構造となることが分かった。ウェル構造についても同様に実験と理論が整合することを確認した。

さらに PEGDA の屈折率に関係があると考えられる粘弾性についても、紫外線を照射していく過程で変化することを明らかにし、PEGDA に Polyethylene Glycol Monomethacrylate (PEGMA) を混合させることで硬化後のヤング率をコントロールできることを実験により示した。これらの材料特性を利用することで今後、製作した構造に有用な機能を持たせることができると考えられる。

本研究を進めた期間中において、同様に屈折率の違いを利用したと考えられるフォトリソグラフィの研究が国際論文誌・国際学会で発表されており、非常に注目されているプロセスであると考えられる。一方で、これら発表された論文では屈折率の違いが 3 次元的な構造を導いていることを示唆しつつも、理論的な考察はされていない。本研究は、これらの研究の基盤となる研究成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Bohan Cheng, Kazuhiko Ishihara and Hirotaka Ejima	4. 巻 11
2. 論文標題 Bio-inspired immobilization of low-fouling phospholipid polymers via a simple dipping process: a comparative study of phenol, catechol and gallol as tethering groups	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymer Chemistry	6. 最初と最後の頁 249-253
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1039/C9PY00625G	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takumi Sugimoto and Hidetoshi Takahashi
2. 発表標題 Direct fabrication of PEGDA micro suction cup array using inclined/rotating mirror exposure system
3. 学会等名 IEEE MEMS2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本匠, 高橋英俊
2. 発表標題 液体材料のための角度可変回転傾斜UV露光装置の開発
3. 学会等名 第10回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	江島 広貴 (Ejima Hirotaka) (00724543)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	

