

令和 4 年 10 月 19 日現在

機関番号：82670

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18430

研究課題名（和文）フォトリソナノジェットの集光位置制御法に関する基礎的検討

研究課題名（英文）Microlens for controlling the focus of photonic nanojets

研究代表者

宮下 惟人（Miyashita, Yuito）

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・開発本部開発第一部電気電子技術グループ・副主任研究員

研究者番号：50780988

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：マイクロレンズはセンサ等に多く用いられる他、フォトリソナノジェット等への応用でも近年注目されている。我々はマイクロレンズを形成するための新たなプロセスを開発した。複数のレンズモデルをFDTD法で解析し、材料の屈折率による焦点距離の変化量が大きい構造を選択した。本研究では解析で得られたマイクロレンズ構造を作製するために、以下のプロセスを開拓した。（1）ナノインプリントで直径数 μm の窪みをPDMSの基材に成形し、（2）PMMA溶液をコーティングし、（3）加熱乾燥する。7.5 から10.0wt%のPMMA溶液を用いた条件において、球形のレンズが成形されることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロレンズはセンサ等に多く用いられる他、フォトリソナノジェット等への応用でも近年注目されている。我々はマイクロレンズを形成するための新たなプロセスを開発した。本研究では、数マイクロメートル～数十マイクロメートルの直径のレンズをフレキシブル基板上に一括に成形する手法を開発した。本手法で成形されたレンズは球体に近く、集光したビームを直径数が約800nmのスポットに絞り込める性能を有していることなどから、微笑領域の検査、細胞分析デバイスへの組み込みなど、新規の光センサへの応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, microlens models were analyzed by Finite Difference-Time Domain (FDTD) simulation in order to select optimal structure. The process to fabricate microlenses, which obtained by the simulation is as follows. First, hemispheric recesses with diameterscales. of 3-15 micrometer were formed by a nanoimprint method on a polydimethylsiloxane(PDMS) substrate. Then, a polymethyl methacrylate(PMMA) resin solution was coated on the PDMS substrate and dried by heating. Finally, spherical PMMA lens was formed at where hemispheric recesses located by the surface tension in drying process. As a results, optimal lens structure was obtained under the conditions using 7.5 to 10.0 wt% of the PMMA solution. The optical measurements of the lens revealed that focused beam has the diameter of approximately 800 nm and the focal depth of 3 to 4 micrometer. Moreover, this process was possible also with PMMA solutions containing 100~250nm of other functional organic mole

研究分野：MEMS加工技術

キーワード：マイクロレンズ 微細加工 リソグラフィ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

1．研究開始当初の背景

フォトリソグラフィナノジェット（以下、PNJ）とは、ミクロン球等のマイクロレンズにより波長以下の径に絞られた集光ビームである[1]。PNJ の特徴として波長以下の径のビームが数 μm にわたり伝搬することがあげられる。近年では、光学観察系にミクロン球等を組み込むことで、PNJ の効果により顕微鏡の開口数が向上し、 $\lambda/8$ 程度の分解能を誇る超解像イメージング法も報告されている[2]。PNJ の集光位置はマイクロレンズの径や屈折率に依存するため、汎用性の向上といった観点から単一デバイスでの PNJ 集光位置の制御法が求められている。これらのニーズに対し、液晶やアクチュエータを利用し集光位置を変化させる手法が検討されている。一方、本研究では実際のデバイス作製プロセスを考慮し、微細加工が容易な電気光学ポリマーを用いた PNJ の集光位置制御法を提案する。

2．研究の目的

PNJ をイメージングやセンサへ応用するため、集光位置を動的に制御する手法が求められている。本研究では、Micro Electro Mechanical Systems（MEMS（技術や電気光学材料を利用したマイクロレンズの新奇作成手法を提案する。最終的に、試作および光学計測による集光特性の評価を行うことで、電気光学材料を用いたマイクロレンズによる PNJ 効果の基礎的知見の獲得を目的とする。

3．研究の方法

（1）FDTD シミュレーション

樹脂系の光学材料の屈折率を適用した PNJ デバイスのモデルを設計し、Finite Difference Time Domain 法（以下、FDTD 法）による電磁界シミュレーションを行った。従来の球体のレンズ形状に加えて、球体レンズの PNJ デバイス等複数のモデルを用いて解析を行った。解析結果から、屈折率の変化量に対して PNJ 集光位置の変化量が最大となるデバイス形状、屈折率、波長等の条件を選定した。

（2）マイクロレンズ成形手法の開発

半導体微細加工技術を利用して PNJ デバイスの試作を行う。デバイスのレンズ部分には電圧による屈折率の制御が可能な電気光学効果を有する材料を用いて作製プロセスを確立する。古くから知られているニオブ酸リチウム等の無機系材料と比較して、レンズ形状の成形が容易な。非線形光学分子や電気光学ポリマーといった材料を本研究では採用した。最終的に、基板上のレンズ周囲にリソグラフィ、リフトオフプロセスを用いて電圧印加機構を作製する。

（3）マイクロレンズの評価

簡易分光法による PNJ のスペクトル特性の解析および、光軸に沿った（焦点方向に平行な）空間的な PNJ の強度分布の解析を行う。具体的には、 1nm の理論分解能を有するピエゾアクチュエーター上に光学系およびフォトディテクターを組み込んだ評価系を構築する。平面方向に対物レンズを走査して観察像を得る手法により PNJ の光電場強度分布を把握する[3]。最終的に光電場分布の強度がピーク値の $1/e$ 以上の範囲を PNJ スポットと定義して、集光位置を指標化する。最終的に、電気光学ポリマーによる PNJ デバイスに電圧を印加した際の集光位置、および光強度の変化量を比較することで、作製した PNJ デバイスの性能を定量化する。

4．研究成果

（1）FDTD 法の結果

FDTD シミュレーションの結果から解析した焦点距離とレンズ屈折率の比較結果から、レンズ項目として、スポット幅、PNJ 集光位置の変化量を評価した。最終的に微細加工プロセスを用いて作成可能な形状を考慮した球体レンズの PNJ デバイスモデルを採用した（図 1 参照）。

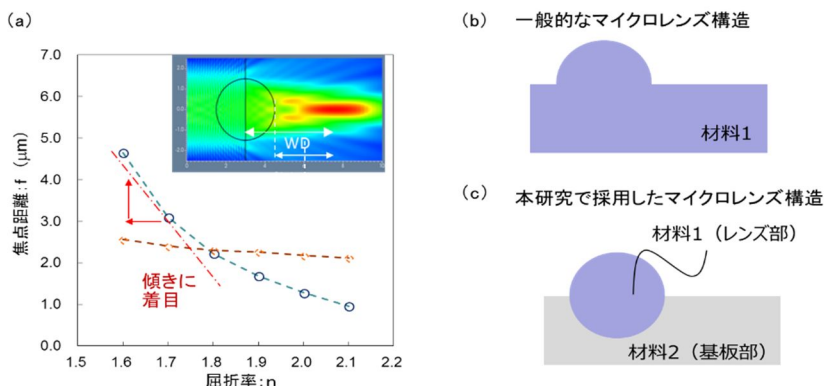


図 1. FDTD シミュレーションによるマイクロレンズ形状の選定。(a)材料屈折率と焦点距離との関係、(b)従来形状のマイクロレンズモデル、(c)複数の材料で高屈折率化された球体構造を有するマイクロレンズモデル。

(2) マイクロレンズの試作

数値解析の結果から設計した直径数 μm ～ 十数 μm のマイクロレンズを作製するため、以下のプロセスを開発した(図2参照)。UV硬化性ポリジメチルシロキサン(以下、PDMS)樹脂を使用し、ナノインプリント法で直径3～15 μm の半球状の凹構造が成形されたPDMS基板上を作製。アニソール溶媒に溶かしたポリメチルメタクリレート(分子量: 約800,000)(以下、PMMA)を上記のPDMS基板にコーティングした後、加熱して急速乾燥させた。半球状のくぼみが乾燥過程で表面張力によって位置する場所に、球状のPMMAレンズが形成されました。PMMA樹脂溶液の濃度を5.0 wt%から15.0wt%まで変化させた結果、7.5～10.0wt%のPMMA溶液を使用した条件下において、PDMS基板上に成形された凹構造部分に球面を有するマイクロレンズ構造体が得られた。PDMS基板上に残留したPMMAの残渣をエアブロー(0.2～0.4MPa程度)にて除去することにより、図2cに示すようなマイクロレンズ構造体の製造方法を確立した。この成形プロセスでは、PMMA溶液中に50～250mMの電気光学材料(非線形光学分子2-Aminofluorene, 5-Nitrouacil等)を分散させた材料でも同様に成形可能であることを確認した。

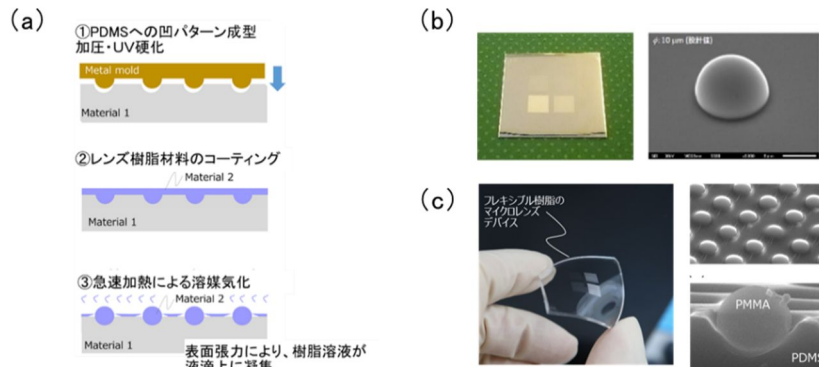


図2. 複数の材料で構成された球体形状のマイクロレンズ製造方法。(a)製造プロセス、(b)凹構造の作成用いたナノインプリント用Niモールド、(c)PDMS基板上に成形されたマイクロレンズ。

(3) 光学特性の評価

z軸ピエゾステージを組み合わせた光学顕微鏡による測定結果を行った。焦点(z軸)を0.5 μm 刻みで移動させつつ、集光されたビームの顕微鏡スライス画像を取得し、それらを繋ぎあわせることでビーム集光特性を三次元画像再構成した。可視化された集光ビームの解析結果から本研究で作製したマイクロレンズの集光ビームの直径は約800 nmであり、有効焦点深度は3～4 μm と数 μm と長く、PNJ効果に近い光学特性を有することが確認できた(図3参照)。また、リフトオフプロセスを応用して電極用金属膜を成膜した基板上に、非線形光学分子が溶解したPMMAによる直径20 μm のマイクロレンズを配置し電圧の印加基板を作製した。

今後の課題として、レンズの成形時における非線形光学分子の分子配向制御法の条件確立やマイクロレンズアレイとしての大面積基板上での製造プロセス応用を検討し、改善を進める予定である。

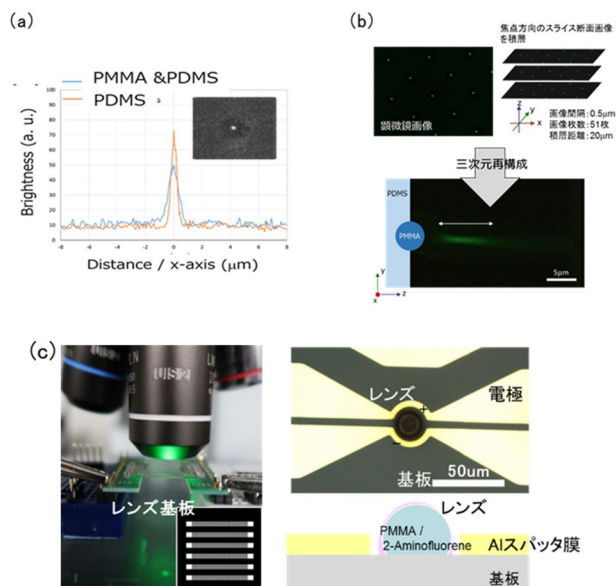


図3. 複数の材料で構成された球体形状のマイクロレンズ製造方法。(a)集光ビームスポット径、(b)三次元画像再構成により可視化した集光ビームの特性、(c)電極基盤に配置されたマイクロ

レンズ。

<引用文献>

- [1] Z. Chen, *et. al.*, *Opt. Express*, **12**, 1214, 2004
- [2] Zengbo Wang, *et. al.*, *Nat. Commun.*, **2**, 218, 2011
- [3] P. Ferrand, *et. al.*, *Optics Express*, **16**, 6930, 2008

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1 . 発表者名 Yuito Miyashita, Koki Nagata, Hidehiko Yamaoka
2 . 発表標題 Process for micro-fabrication of spherical microlens array by utilizing the effect of surface tensions
3 . 学会等名 10th International Conference on Molecular Electronics & BioElectronics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 微小光学構造体の製造方法	発明者 宮下惟人、永田晃基、山岡英彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2020-187332	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7 . 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------