

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289067

研究課題名(和文) 異種材料を組み合わせた新構成2軸MEMSミラーの開発

研究課題名(英文) Development of a novel 2D MEMS mirror combining different materials

研究代表者

鈴木 孝明 (Suzuki, Takaaki)

群馬大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10378797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：様々な分野への応用が期待されるラスタスキャン方式MEMSミラーの大偏向角駆動、小型化、低消費電力、高耐衝撃性を目指し、シリコン/ポリマーの異種材料をヒンジに組み合わせた新しいミラー構成を提案、検討した。具体的には、異種材料を組み合わせたハイブリッド構成の新構造ローレンツ駆動型MEMSミラー、磁気誘導起電力型のセンサコイルを集積化したMEMSミラーについて、試作・評価した。

研究成果の概要(英文)：Raster scan type MEMS mirrors are expected to be applied to various fields. For the purpose of large deflection angle drive, miniaturization, low power consumption, and high impact resistance of the MEMS mirror, we proposed a novel MEMS mirror configuration combining heterogeneous materials of silicon / polymer on hinges. Specifically, we fabricated and evaluated two types of MEMS mirrors; 1) a Lorentz driven MEMS mirror with a hybrid configuration combining different materials, and 2) a MEMS mirror integrated with a magnetically induced electromotive force type sensor coil.

研究分野：ナノマイクロメカトロニクス

キーワード：ナノマイクロメカトロニクス MEMS ミラー 異種材料

1. 研究開始当初の背景

半導体プロセスで作製される MEMS ミラーは、光スイッチ、プロジェクタなど様々な分野に適用されている。一方、レーザーダヤ形状計測用の光偏向デバイス用途には、アレイ状ミラーでなく 1 枚でかつ数 mm 以上の大型ミラーが必要となる。これまでに、国内外の研究機関や複数の企業から様々な方式の光偏向 MEMS ミラーが提案されており、現在も開発が続いている。

MEMS ミラーに対して求められる仕様として、リフレッシュレート 60Hz の 2 次元ラスタ走査においては、リフレッシュレートと同等の駆動速度（低速軸）と、その垂直方向に数 kHz ~ 数十 kHz での駆動速度（高速軸）が必要となる。従来、研究されてきたデバイスの多くは、ミラーを支持するヒンジ部は高剛性のシリコンで作製されているが、非共振では大きな偏向角が得られない等の課題があり、高速軸に比べて低速軸をかなり細長いヒンジにするなどの対策が取られているが、デバイスの大型化、耐衝撃性の問題などで、この大きな速度差の解決に向けた新構造の MEMS ミラーが望まれている。

一方で、ヒンジにシリコン以外の材料として、低剛性なポリマーを用いる研究があり、宮島ら や、藤田ら、また近年は、提案者らがその可能性について検討してきた。これらの研究から、ポリマー製ヒンジを用いることで ± 30 度以上の大偏向角非共振駆動が可能となり、2500G の耐衝撃性や、外乱にロバストな低 Q 値が得られた一方で、低共振周波数・クリープ・温度依存性・再現性などに問題があることが分かった。

そこで本研究では、低速軸に低剛性延性材料のポリマーヒンジを用い、高速軸に高剛性脆性材料のシリコンヒンジを用いた、異種材料を組み合わせた新たな 2 軸 MEMS ミラーを提案し、大偏向角駆動・小型・低消費電力・高耐破断/衝撃性が可能な 2 軸 MEMS ミラーの実現を検討した。

2. 研究の目的

本研究では、小型レーザーダ、ヘッドアップディスプレイやマイクロプロジェクタへの適用を可能とする光偏向用小型ミラーとして、感光性ポリマーヒンジと単結晶シリコンヒンジを組み合わせた新構成の MEMS (Micro Electro-mechanical Systems) ミラーを提案し、作製プロセスや材料特性を研究し、従来にない大偏向角駆動が可能な MEMS ミラーの実現を目的とする。

低剛性延性材料であるポリマーと高剛性脆性材料のシリコンをそれぞれ大偏向低速軸と共振高速軸のヒンジ材料として組み合わせることで、単一材料では実現困難な大偏向・低消費電力・小型・高耐衝撃性の 2 次元ラスタスキャン方式レーザ走査を可能とする MEMS ミラーを実現する。

3. 研究の方法

今後様々な分野への応用が期待されるラスタスキャン方式 MEMS ミラーの大偏向角駆動、小型化、低消費電力、高耐衝撃性を目指し、シリコン/ポリマーの異種材料をヒンジに組み合わせた新しいミラー構成を提案し、その実現を図る。具体的には、以下の 2 種類のミラーを試作・評価した。

- ・異種材料を組み合わせたハイブリッド構成の新構造ローレンツ駆動型 MEMS ミラー
 - ・磁気誘導起電力型のセンサコイルを集積化した MEMS ミラー
- 以下に各ミラーの詳細を示す。

(1) 異種材料を組み合わせたハイブリッド MEMS ミラー

新たに提案した技術の原理確認を中心に、以下の 4 点を重点的に取り組んだ。

異種材料の組み合わせ設計のための有限要素モデルの提案と解析：各材料の機械的特性を最大限活かすためには、仕様に基づいた設計解析が重要であり、これまでに得られている材料特性を用いて、有限要素法解析により最適な形状・寸法について、検討した。

微小材料特性の精密評価とヒンジへの適用：本研究で用いる厚膜レジストに関する機械的な基礎物性は過去の研究ですでに得ているが、ポリマー材料を構造材、変形材として用いる場合の問題点である疲労・クリープ・衝撃特性の評価は十分でない。微小引張試験片を作製しその特性を評価した。

繰り返し駆動試験によるデバイス疲労評価：ハイブリッド MEMS ミラーの製作工程に基づいて多数のデバイスを作製し、繰り返し駆動による疲労試験を行った。各試験においては、シリコン・ポリマーの材料毎の評価と、複数のヒンジ形状について比較試験を行い、ハイブリッド MEMS ミラーの有効・実用性について検討した。

形状最適化によるヒンジ小型化と低消費電力化：印加電流によるジュール発熱を低減するため、電流値を極力小さくすることとし、配線金属の厚さと幅について、応力の低減と配線抵抗の低減を検討した。

(2) 磁気誘導起電力型速度センサを集積した MEMS ミラー

集積化する磁気誘導起電力型速度センサの加工方法、センシング性能評価を中心に、以下の 4 点を重点的に取り組んだ。

樹脂上での配線パターンニング精度の向上：厚膜レジスト SU-8 等の下地レジスト上に金属配線をする場合、金属膜のスパッタ時、および、リソグラフィのためのパターンニング用レジストのベイク時に、真空処理・加熱処理による下地レジスト中の欠陥の増大により、パターンニング形状の劣化が発生する。特にセンサ集積時には、多層・多重巻きの微細コイル形状が必要となるため、下地レジストの前処理によるパターンニング精度の向上に

について検討した。

センシング方式の実証：駆動コイルとの整合性から、磁気誘導起電力型速度センサを集積するため、速度信号から偏向角をロックイン検出する方法を検討した。また、高速軸と低速軸の間で検出速度が大きく異なるため、集積化するセンサの検出範囲を評価し、センシングコイル形状の最適化を検討した。

作製デバイスによる駆動特性の評価：実際にセンサ集積化 MEMS ミラーを作製し、駆動とセンシングを同時に行った場合のクロストークなどの検証を行い、集積化 MEMS ミラーの基本的特性として、駆動角と速度信号の関係を評価した。

角速度信号を用いた角度制御法の検討：センサ信号を用いたフィードバック制御を行い、精密な駆動と角度制御を検討した。最終的には、センサ集積型ハイブリッド MEMS ミラーについて、耐環境性、長期信頼性を評価し、本デバイスによる車載用レーザレダなど広範囲な応用展開を目指す今後の課題について検討した。

4. 研究成果

(1) 異種材料を組み合わせたハイブリッド MEMS ミラー

異種材料の組み合わせ設計のための有限要素モデルの提案と解析と 微小材料特性の精密評価とヒンジへの適用：各材料の機械的特性を最大限活かすためには、仕様に基づいた設計解析が重要であり、引張試験用ドッグボーン型試験片をフォトリソグラフィで製作し材料評価実験で得られた材料特性を用いて、有限要素法解析により最適な形状・寸法について検討した。その結果、ヒンジに異種材料を用いた場合の固有振動数の変化を予測可能なモデルを構築し、試作ミラーによる実験結果と良い一致が見られた。

繰り返し駆動試験によるデバイス疲労評価：疲労試験によるデバイス評価に取り組み、繰り返し駆動による疲労評価を行った。ポリマーヒンジにおいては、繰り返し駆動中に若干の振幅減少が起こることを確認した。

形状最適化によるヒンジ小型化と低消費電力化：低速軸ヒンジを従来のシリコンデバイスに対して、同じ太さで、長さを5分の1程度に小型化することで、結果として、外部設置の磁石間距離を縮めて強磁場化し、より小さな印加電流で大駆動力・大偏向角を得ることができることが分かった。

(2) 磁気誘導起電力型速度センサを集積した MEMS ミラー

樹脂上での配線パターンニング精度の向上：駆動用コイルとセンシング用コイルを集積化するために、パターンニング精度の向上が重要となる。下地レジストの前処理（真空 UV キュア処理）によって、パターンニング精度が向上し、より微細なパターンを安定して作製できるようになった。

センシング方式の実証：把握した最適条件に基づき、センサ集積化 MEMS ミラーの作製を行い、駆動とセンシングを同時に行った場合のクロストークなどの検証を行い、集積化 MEMS ミラーの基本的特性として、駆動角と速度信号の関係の評価を行う。

作製デバイスによる駆動特性の評価：ポリマーヒンジ構造を組み込むことで、製作したミラーは、DC ± 6mA で ± 30deg. の偏向角が得られ、大偏向・低消費電力向けの MEMS ミラーとして有効であることが分かった。

角速度信号を用いた角度制御法の検討：磁気誘導起電力型速度センサを集積した MEMS ミラーについては、角速度信号を用いた角度制御法の検討として、センサ信号を用いたフィードバック制御を行い、精密な駆動と角度制御を実現する。特に実用上重要となる、長期間の駆動特性評価を行う。ロックイン信号処理を組み合わせることで、集積化したセンサによりミラーの角速度に相当する電気信号を取得でき、フィードバック制御に利用できることが分かった。

さらに、当該ポリマーマイクロ構造の派生技術として、磁気粒子を懸濁したポリマーコンジット材料の開発、マイクロ流体デバイス向けの送液・攪拌デバイス、バイオマイクロデバイス向けのポリマーチップなどの応用例を構築し、成果発表を行った。

<引用文献>

H. Miyajima, K. Murakami, and M. Katashiro, MEMS optical scanners for microscopes, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.10, 2004, pp.514-527.

T. Fujita, K. Maenaka, and Y. Takayama, Dual-axis MEMS mirror for large deflection-angle using SU-8 soft torsion beam, Sensors and Actuators A: Physical, Vol.121 2005, pp.16-21.

中野哲郎, 寺尾京平, 鈴木孝明, 大平文和, 橋口 原, 磁性粒子を含む SU-8 を用いたフォトリソグラフィとウエットエッチングによるポリマー-MEMS ミラーの製作, 第 26 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, pp.239-242, 2009/10/15-16, タワーホール船堀 (東京都江戸川区), 最優秀ポスター賞 2009 年.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

J. Suzuki, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, F. Oohira, H. Miyagawa and T. Suzuki, Development of Magnetically Driven Microvalve Using Photosensitive SU-8/Fe Composite, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol.52, 2016, pp.1585-1590

DOI: 10.3233/JAE-162186

H. Ueno, S. Komai, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, H. Kotera, and T. Suzuki, Development of a local light stimulation device integrated with micro electrode array, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol.3, 2016

DOI: 10.1299/mej.15-00570

J. Suzuki, Y. Onishi, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, F. Oohira, H. Miyagawa, T. Namazu, and T. Suzuki, Development of a two-dimensional scanning micro-mirror utilizing magnetic polymer composite, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.55, 06GP01 (7 pages), 2016

DOI: 10.7567/JJAP.55.06GP01

鈴木淳也, 寺尾京平, 高尾英邦, 下川房男, 大平文和, 鈴木孝明, SU-8/Fe コンポジットを用いた磁気駆動型マイクロバルブの開発, 日本 AEM 学会誌, 査読有, Vol.23, pp.407-413, 2015

DOI: 10.14243/jsaem.23.407

H. Tamai, K. Maruo, H. Ueno, K. Terao, H. Kotera, and T. Suzuki, Development of low-fluorescence thick photoresist for high-aspect-ratio microstructure in bio-application, Biomicrofluidics, 査読有, Vol.9, 022405 (9 pages), 2015

DOI: 10.1063/1.4917511

植田勇作, 中原佐, 寺尾京平, 高尾英邦, 下川房男, 大平文和, 小寺秀俊, 鈴木孝明, 感光性磁気ナノ複合材料を用いた電磁マイクロポンプの開発, 日本 AEM 学会誌, 査読有, Vol.22, pp.202-207, 2014

DOI: 10.14243/jsaem.22.202

鈴木孝明, 大平文和, 感光性磁気ナノコンポジットを用いた磁気駆動 MEMS デバイス, まぐね (日本磁気学会), 査読無, Vol.9, pp.217-222, 2014

〔学会発表〕(計 32 件)

T. Suzuki, Simple Process Design for Polymer MEMS, International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016 (招待講演), 2016/12/16-18, Univ. of Tokyo (Tokyo, Japan).

鈴木孝明, ポリマーMEMSのプロセス設計, 電気学会第 33 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム (招待講演), 2016/10/24, 平戸文化センター (長崎県平戸市).

T. Suzuki, Three-Dimensional UV Photolithography Using Thick Photoresist for Microsystems, The 11th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (招待講演), 2016/4/18, Matsushima bay (Sendai, Japan).

上記リストのほか、2016 年度: 7 件、2015 年度: 16 件、2014 年度: 9 件、合計 32 件の学

会発表を行った。

〔その他〕

ホームページ等

群馬大学 鈴木孝明研究室

<http://mems.mst.st.gunma-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 孝明 (SUZUKI, Takaaki)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号: 10378797

(2)連携研究者

大平 文和 (OOHIRA, Fumikazu)

香川大学・社会連携・知的財産センター・教授

研究者番号: 80325315

下川 房男 (SHIMOKAWA, Fusao)

香川大学・工学部・教授

研究者番号: 90580598

生津 資大 (NAMAZU, Takahiro)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号: 90347526