

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820132

研究課題名(和文) 生体内内視鏡のための低電圧静電駆動型マイクロ三次元光スキャナ

研究課題名(英文) Low-voltage electrostatic micro three-dimensional scanner for endoscope

研究代表者

佐々木 敬 (SASAKI, Takashi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60633394

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：生体内内視鏡のための低電圧静電駆動型のマイクロ三次元スキャナのためのプロセス開発、焦点可変ミラーの低電圧化技術の開発、画像構築システムの開発を行った。共振駆動型の焦点可変ミラーを研究し、従来駆動方式の約150倍の振動振幅が得られるデバイスを開発した。また、SOIウエハの接合技術を用いた設計自由度の高いレーザー光軸方向走査および横方向走査が可能な静電駆動型光スキャナの製作に成功し、デバイスの駆動を確認した。高精度な生体計測用デバイス実現へ向けた基礎技術開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a fabrication process of low-voltage micro three-dimensional scanner for endoscope, and low-voltage actuation technology for varifocal mirror, and image construction system. We have studied a resonant varifocal mirror. We successfully obtained 150-times displacement amplification of varifocal mirror. Furthermore, by using the silicon-on-insulator wafer bonding technology, we successfully developed and conformed the actuation of the device with lateral and axial laser scanning function. The important technology was developed for obtaining the high precision living body measurement system.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMS 焦点可変ミラー スキャナ

1. 研究開始当初の背景

マイクロ光スキャナは小型かつ高機能な光学系を構成できるため、生体内内視鏡への応用が近年数多く報告されている。現在、より狭い部位の観察機器やカプセル内視鏡のようなポータブル機器への応用も期待され、光学系の更なる小型化、低駆動電圧化、低消費電力化が強く望まれている。しかし、これらを実現するためにはレーザービームの三次元走査のためのスキャナと焦点可変ミラーの集積技術の開発や低駆動電圧化のための研究が必須である。

2. 研究の目的

本研究では、デバイス集積のための高度なデバイス製作技術や低電圧化のための駆動原理を新規に開発し、生体内内視鏡に利用できる低電圧静電駆動型のマイクロ三次元光スキャナを実現すること目的としている。

3. 研究の方法

(1) 低電圧型の焦点可変ミラーの研究

静電駆動型焦点可変ミラーの構造は比較的単純であり、集積に適した構造である。また、静電駆動型のアクチュエータは駆動時の電流消費が少なく低消費電力化にも有望な方式である。しかし、静電駆動型の焦点可変ミラーを大きく変位させるためには高電圧の印加が必要であり問題となっていた。これを解決するため、焦点可変ミラーのミラー面を共振振動させる方式の、共振駆動型焦点可変ミラーを提案し、低電圧化を試みる。共振振動時にはミラーに作用する減衰力が小さいほど大変位が得られる。減衰力はミラー周囲に存在する気体によって主に発生すると考えられるため、焦点可変ミラーを真空チャンバー内で駆動し、真空中での特性を評価する。次に、焦点可変ミラーにはレーザービームを1点に集光する変形形状が求められたため、ミラーが共振状態で集光に適した変形形状となるよう、ミラーの振動モード形状を設計する。外周の支持条件等を検討し振動形状の最適設計を行う。また、焦点可変ミラーより反射したレーザースポットの直径を測定することにより、集光特性を評価する。低電圧静電駆動型の焦点可変ミラーの実現を目指す。

(2) レーザー走査型共焦点計測システムの開発

製作した共振型焦点可変ミラーにより共焦点計測が可能であるかを検証する。共焦点計測システムを構築し光軸方向計測を行う。また、レーザー走査型の小型光学系の構築およびソフトウエア開発を行い、レーザー走査型共焦点計測システムの開発を行う。

(3) 焦点可変ミラーのスキャナへの集積プロセスの開発

マイクロ三次元スキャナのための焦点可

変ミラーのスキャナへの集積プロセスの開発を行う。機能が集積されているため、構造が複雑となる。複雑な構造のデバイスを製作するため、ウエハ張り合わせプロセスを導入し製作を行う。基板には特性が安定しているSOIウエハを使用する。低電圧静電駆動型のマイクロ三次元光スキャナのための集積プロセス開発を目指す。

4. 研究成果

(1) 低電圧型の焦点可変ミラーの研究

マイクロ三次元光スキャナの光軸方向への光走査素子となる低電圧型の焦点可変ミラーの研究に取り組んだ。低電圧化のため共振駆動型焦点可変ミラーを提案し、その機械特性および光学特性を評価した。

共振型焦点可変ミラーの振動振幅

直径1 mm、厚さ2 μm の静電駆動型の焦点可変ミラーを単結晶シリコンを用いて製作した。ミラーの基本モード付近の周波数の電圧を印加し加振した。真空度が数 Paの環境下で従来の直流駆動方式の150倍程度、150 Paで約100倍、200 Paで約50倍振幅が増大した。直流駆動方式よりも低い電圧で大きな変形量が得られた。

集光特性

共振型焦点可変ミラーの集光特性を評価した。振動しているミラーのある瞬間のスポットを評価するため、パルス状に強度変調しレーザー光を焦点可変ミラーに入射し反射光を測定した。ミラーの振動振幅の増大に伴い集光スポットの理論直径からのずれが大きくなったが、集光動作は可能であることがわかった。

振動形状最適化

高い集光性能もつ焦点可変ミラーを実現するため、振動モード形状の最適化を行った。平行光を一点に集光できる回転放物面形状の振動形状を目指した。振動モード形状はミラーの板厚分布やミラー周囲の支持条件によって変化する。ミラーの支持構造の設計はMEMSプロセスにおいては容易であるのでミラー支持条件に着眼した。振動学の理論より、ミラーの支持条件と回転放物面からのずれを計算した。固定支持よりも単純支持の方が回転放物面からのずれが小さくなり、約4分の1となると計算された。ミラー外周の支持構造が全周固定と一部固定の2種類のデバイスを製作し評価した。実験的にも一部固定構造の焦点可変ミラーの方が回転放物面に近い形状となった。ミラー直径1 mm、評価直径0.8 mmの条件で、焦点距離20 mmのとき約 $\lambda/8$ の面精度が得られた。また、振動形状の計算値と実験値が良く合い、用いた解析モデルは共振型焦点可変ミラーの設計に有用であることがわかった。

大気圧下での大振幅化

共振型焦点可変ミラーの振動振幅増大効果は大気中より真空中の方が大きかった。デバイスを真空環境下で使用するため、真空パ

ッテージを用いる方法も考えられる。しかし、プロセスが複雑化し、また、窓から発生する反射光が高精度な光計測の妨げとなる。製作や光学特性の面から、大気中で大きな振動振幅が得られることが望ましい。大気中で大きな振動振幅を得るために、大気中へのエネルギー散逸要因の一つである音響放射に着眼し研究を行った。大気中へ放射される音波エネルギーを低減するため、音響空洞を備えた共振型焦点可変ミラーを試作し評価した。振動振幅は音響空洞の長さにより約4倍変化し、音響を考慮した設計が大気中での共振型焦点可変ミラーの大振幅化に有用であることが分かった。さらに、振動振幅の最適設計のため、音響空洞の解析モデルを提案し、従来結果との比較を行った。提案した解析モデルが実験結果とよく一致することを確認し、振動振幅最適化のための設計指針を立てるのに有用な結果を得た。

(2) レーザー走査型共焦点計測システムの開発

共振型焦点可変ミラーを用いた共焦点光計測

共振駆動型焦点可変ミラーが実際の光学計測システムに使用可能であるかを実験的に検証した。共振型焦点可変ミラーとレーザー、光ファイバカプラ、光電子増倍管等を用いて共焦点光学系を構成し深さ方向測定を行った。サンプル位置を移動に伴い、信号ピークも移動する結果が得られた。深さ方向測定が可能であることが実証された。

MEMS スキャナを用いたレーザー走査型共焦点顕微鏡のシステム開発

レーザー走査型共焦点顕微鏡の光学系の構築および画像表示ソフトの開発を行った。レーザー走査型顕微鏡の光学系には MEMS 二軸スキャナとヘリウムネオンレーザー、光ファイバカプラ、光電子増倍管、I/V 変換回路、レンズ等を用いた。画像表示システムには A/D 変換ボード、LabVIEW を用いた。信号処理および画像構築のためのソフトの開発を行った。MEMS 二軸スキャナの高速軸を約 20 kHz、低速軸を約 60 Hz で駆動し、300 μm 幅の金パターンのリアルタイムで観察ができた。光学系およびソフト部分の原理検証ができ、顕微鏡として使用するための基盤ができた。

(3) 焦点可変ミラーのスキャナへの集積プロセスの開発

マイクロ三次元スキャナのためのスキャナと焦点可変ミラーの一体デバイスに関するプロセス開発と製作を行った。これまで報告されている表面マイクロマシニングによる薄膜構造を用いたデバイスでは構造の剛性が低く設計自由度が制限されていた。対象に合わせた、設計自由度の高いデバイスを製作するため、厚膜構造が得られかつ機械特性にも優れた単結晶シリコンを構造材料とし

て用いることが可能な、SOI ウエハの接合を用いた製作プロセスを確立した。焦点可変ミラーを一軸スキャナに搭載したデバイスを製作し、デバイスの駆動に成功した。対象に合わせ、焦点可変ミラーの直径、駆動電圧、焦点可変範囲、共振周波数、及びスキャナの共振周波数の詳細設計を可能とするプロセス開発に成功した。

研究期間全体を通じ、生体内内視鏡に搭載可能な微小で設計自由度の高い低電圧静電駆動型のマイクロ三次元スキャナのためのプロセス開発、および機械共振構造や音響構造を用いた焦点可変ミラーの低電圧化技術の開発、顕微鏡システム構築のための画像表示システム開発を行った。高精度な生体計測用デバイス実現へ向けた基礎技術開発に成功した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

K. Nakazawa, T. Sasaki, H. Furuta, J. Kamiya, H. Sasaki, T. Kamiya, and K. Hane, "Resonant Varifocal Micromirror with Piezoresistive Focus Sensor," *Micromachines*, 査読有, 7, 51, 1-13, 2016

DOI: 10.3390/mi7040057

中澤謙太, 佐々木敬, 羽根一博, "高精度共振型焦点可変ミラー," *電気学会論文誌 E*, 査読有, 135, 165-170, 2015

DOI: 10.1541/ieejsmas.135.165

佐々木敬, 佐藤大紀, 中澤謙太, 羽根一博, "機械共振による変位拡大を利用した焦点可変ミラーの基礎特性," *電気学会論文誌 E*, 査読有, 8, 253-257, 2014

DOI: 10.1541/ieejsmas.134.253

[学会発表](計14件)

中澤謙太, 佐々木敬, 古田裕正, 神谷二郎, 佐々木秀記, 神谷東志一, 羽根一博, "ウエハ接合を用いた焦点可変スキャナの設計と製作及び基礎測定," 平成 28 年電気学会全国大会, 2016 年 03 月 16 日 ~ 2016 年 03 月 18 日, 宮城, 仙台(東北大学)

T. Sasaki, L. Rayas, K. Nakazawa, K. Hane, "Large-amplitude resonant varifocal mirror with an acoustic cavity," *Transducers 2015 (国際学会)* 2015 年 06 月 21 日 ~ 2015 年 06 月 25 日 Anchorage

K. Nakazawa, T. Sasaki, K. Hane, "1/8 Precision parabolic resonant varifocal mirror," *Optical MEMS and Nanophotonics 2014 (国際学会)*, 2014 年 08 月 17 日 ~ 2014 年 08 月 21 日, Glasgow, Schottland

T. Sasaki, D. Sato, K. Hane, "Displacement-amplified dynamic varifocal mirror using mechanical

resonance,” Optical MEMS and Nanophotonics 2013 (国際学会), 2013年08月18日~2013年08月22日, Kanazawa, Ishikawa, Japan

〔図書〕(計1件)

佐々木敬, 羽根一博, ”MEMS ミラーを用いた共焦点センサー,”株式会社オプトロニクス社, OPTRONICS,35(410), (2016), 62-66

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐々木 敬 (SASAKI, Takashi)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60633394