

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 12 日現在

機関番号：33924

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21656105

研究課題名（和文） 非線形効果を用いた振動型高感度赤外線センサ

研究課題名（英文） Highly sensitive infra-red sensor using non-linear vibration

研究代表者

佐々木 実 (SASAKI MINORU)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号：70282100

研究成果の概要（和文）：

張力を持つ薄膜 MEMS ねじり振動子に熱変形が重なると、顕著にバネが硬くなる非線形性を示す性質を利用し、新しい赤外線センサを提案した。設計・製作し、基本特性を確認した。昇温により膜厚程度のたわみが発生すること、共振周波数が増加することが確認された。共振周波数の変化を利用した熱型赤外線センサとなる。製作したデバイス例では、真空条件での共振ピークのシフトから、少なくとも 0.04℃ の温度変化が測定できると見積もられ、有望である。

研究成果の概要（英文）：

A new infra-red sensor is proposed using the non-linear vibration, which can be observed in the tense thin film MEMS twisting resonator under the influence of the thermal stress generating the bending. The basic performance is confirmed by designing and fabricating the devices. The shift of the resonant frequency indicates the detection of the infra-red. From the results operated under the vacuum condition, 0.04℃ change of the resonator temperature is estimated to be resolved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	0	1,100,000
2010 年度	800,000	0	800,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	180,000	2,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測工学、マイクロ・ナノデバイス、赤外線センサ、振動型、非線形効果

1. 研究開始当初の背景

Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 技術によって、機械的な動きが可能となる微小な振動子を製作することが可能である。振動子はセンサに応用でき、例えば、ジャイロセンサは振動子が受けるコリオリ力によって生じる変位を計測する原理に基づく。

従来の赤外線センサには、HgCdTe などを

材料とする量子型がある。ナローバンドギャップ半導体の熱ノイズを抑えるために、冷却が必要となる。液体窒素冷却やペルチェ冷却の消費電力は携帯型センサには適さない。イメージセンサのようなアレイ型素子も難しい。対して非冷却動作する、微小領域の温度上昇を測定する熱型センサ（サーモグラフィなど）の性能が向上している。これはサスペンション等を利用して浮かせた機械構造に

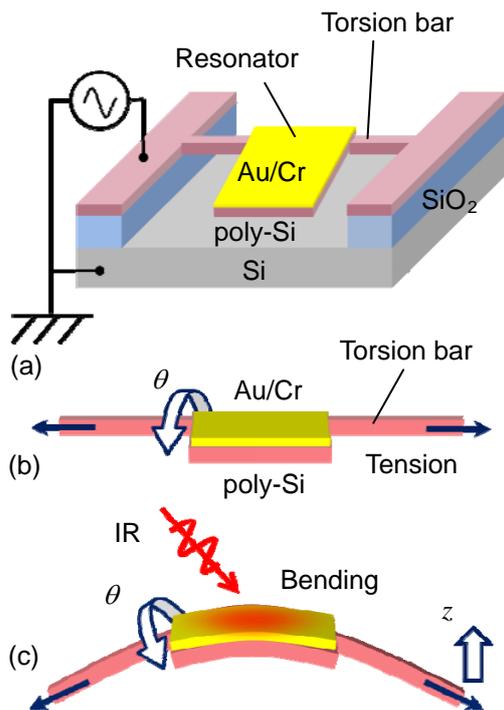


図 1: (a)振動型センサの模式図。(b)室温状態の振動子。(c)昇温状態の振動子。

よって熱伝導によるエネルギー散逸を抑える技術が進化してきたことが背景にある。従来は静的に浮いた構造を利用していた。

代表者らは、2003年頃から約5Vの低電圧で4°以上の回転角を実現する静電駆動型マイクロミラーを研究してきた。張力を持つ薄膜トーシオンバーを提案した。意図しなかったが、バネが顕著な非線形性を持つことが分かった。バネの非線形性は共振周波数の変化をもたらす。従来の線形バネを利用したセンサでは、振動子に何がしかの物質が付着することで共振周波数が減少する現象を利用してきた。非線形バネを利用するセンサの原理は、センサに物質が付着しなくても発生するクリーンで可逆的なものとなる。デバイスを保護するパッケージングも含めて、センサ応用に有望な原理と言える。

2. 研究の目的

赤外線センサの高感度化を主たる目的に据えて、動的な振動型デバイスを提案する。非線形性が強いねじりバネと組み合わされた振動子を利用する。共振周波数を測定する原理となるが、周波数は僅かな変化でも高精度に計測できる量である。熱型であるため、原理的に広い赤外線波長に対して有効であり、非冷却動作が可能で、アレイ化やICとの集積化に適するセンサが期待できる。

マイクロミラーにおける実験現象を既に観察していたが、理論的に(定量的に)現象を明らかにすると同時に、デザインも含めてセンサとしての検証、性能を共に明らかにする。従来型センサよりも高い感度を得ることを目指す。市販サーモグラフィの温度分解能が $\sim 0.01^{\circ}\text{C}$ 、非冷却ボロメータが $\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ 、研究レベルで $\sim 0.01^{\circ}\text{C}$ である。いずれもICによる補正を入れた後の値である。

3. 研究の方法

佐々木(代表者)はアクチュエータ研究で培った、薄膜トーシオンバーの技術をセンサに展開する。成膜技術と合わせて、張力を持つ薄膜トーシオンバーを安定に製作することが重要となるが、アモルファスSiをアニール処理して得る結晶化誘起応力(300・1000MPa)を利用する。熊谷(研究分担者)はナノプロセスも含めたデバイス製作を担当する。張力をより大きくするナノプロセス(より低温で結晶粒を大きくする技術)を加味する。設備類の立ち上げや、条件出しを合わせて進めた。

赤外線センサの研究を主とするが、並行して、基本原理であるバネの非線形性の理論的な解析、張力を持つ多結晶Si薄膜の応用展開の研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 原理とデザイン

図1(a)に提案する振動子の立体的な構造を示す。ねじり振動子は細長いトーシオンバーが、金属(実例は金)と多結晶Siからなる2層構造の振動体(中央部)を支える構造を持つ。この振動子と、下地の基板間に電圧を印加すると、静電引力がトーシオンバー回りの回転トルクを発生する。交流印加電圧の周波数を変化させた際に、振動子の応答が大きくなる様子から共振周波数を求めることができる。非線形バネを利用した赤外線検出の原理を説明する。振動子を形成する薄膜には引張応力を発生させることができ、トーシオンバーに沿った張力を印加しておく。図1(b)の初期状態では、トーシオンバーは支持点を結ぶ直線沿いの配置となる。トーシオンバーの回転運動と張力は、ベクトルの方向がほぼ直交するため、力学的作用は僅かである。図1(c)に示すように振動子が赤外線を吸収して温度が上がると(トーシオンバーは細く薄いため、熱伝導が低く抑えられる)、上層の金属が下層の多結晶Siよりも熱膨張率が大きいため、振動子は全体として上に凸の形状となる。この熱変形のため、トーシオンバーは初期状態に対して斜め配置となる。この状態でねじり振動を発生させるには、トーシ

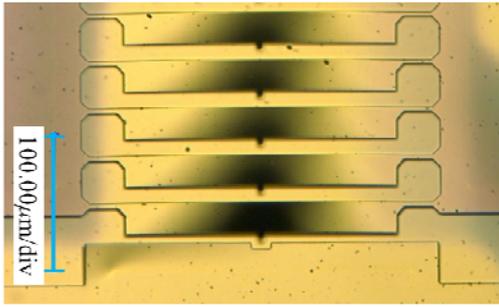


図 2: 製作した振動型センサの例。

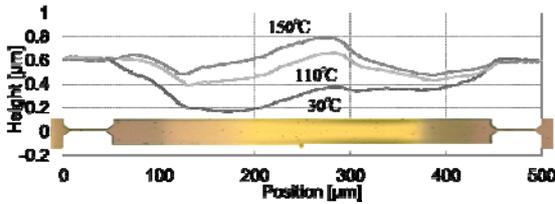


図 3: 振動子の熱変形の例。

ンバーの変形に、より多くのエネルギーが必要となり、バネが室温状態から硬くなることと等価となる。これが共振周波数の増加を引き起こす。振動子が吸収した熱量に応じて上に凸の変形量が多くなり、共振周波数が増加するセンサとなる。両持ち梁構造を持つ、膜厚方向に変位する振動子においては、その厚み分程度の変位量が、バネの非線形効果を生む目安であることが知られている。センサとしては、薄膜構造の方がバネの非線形効果を得やすいと言える。加えて、温度変化を得るには、熱容量が小さいことも有利となり、薄膜振動子が適する。

(2) 製作

酸化膜 (3μm) 付き Si ウェハに、低圧化学気相堆積 (LPCVD) によってアモルファス Si を 400nm 堆積した。アニール処理し、結晶化誘起による引張応力を薄膜内に加えた。フォトリソグラフィによるパターンニングと RIE によって多結晶 Si 層に振動子構造を転写した。犠牲層である酸化膜層をフッ酸ウェットエッチングで除去し、超臨界乾燥によって振動子をリリースした。その後、ステンシルマスクを用いた蒸着によって、Au/Cr (200nm/20nm) を蒸着した。

上記の安定な製作プロセスを見出すには時間を要した。従来の表面マイクロマシニングの構造と比べて、本研究はより大面積で薄い膜を利用している。構造の安定なリリースのためにはデリケートな処理が必要になった。まず、導電性の多結晶 Si 薄膜に金を蒸着した構造を、フッ酸による犠牲層エッチングによってリリースしようとする、Si と金がフッ酸を介して電気化学エッチングを引き起こし、薄膜がダメージを受けやすい。気

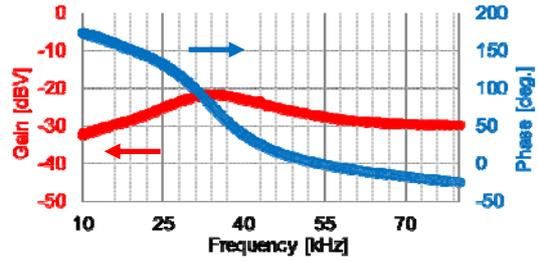


図 4: 大気圧条件での振動子の特性。

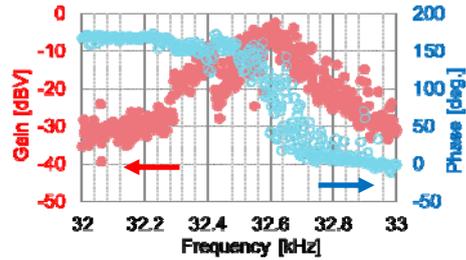


図 5: 真空条件での振動子の特性。

相フッ酸でのエッチングにおいても防止が難しかったため、多結晶 Si のみのリリースされた構造を先に用意し、後に部分的に Cr および Au 蒸着を行うこととした。更に、犠牲層エッチングの後に、完成された技術である CO₂ 超臨界乾燥を利用した。更に歩留まりを高くするため、トーションバー幅を太くするなど、デバイスデザインを修正した。以上 3 つの対策により、ほぼ 100% の歩留まりを得た。

図 2 は完成したデバイスの例である。ステンシルマスクを利用しているため、Cr/Au のパターンは若干左にずれているが、トーションバーへの金蒸着量は僅かである。従って、温度上昇に伴う上に凸の変形が生じやすい。振動子は全長が数 100μm の細長いリボン状であり、アレイ状に製作した。

(3) 実験および結果

温度に対するたわみ特性が重要であるため、デバイスを基板側から加熱し、変形を白色干渉計 (Zygo New View 7200) により測定した。赤外線が入射する場合と比べて、厳密には温度分布が異なると考えられるが、変位量の目安が得られる。図 3 は幅 40μm、長さ 400μm の振動子のトーションバー沿いの断面プロファイルを示す。温度はサンプルステージ面の熱電対によって測定した。挿入図は振動子構造との位置関係を示す。室温の初期形状には、リリース時に入ったと考えられるたわみが見られる。両端から 50μm はトーションバー部である。室温から 150°C に昇温したところ、振動子の中心部は、約 400nm 上に変位した。変位量は薄膜の膜厚程度に達しており、バネの非線形効果が顕著になると期待される。

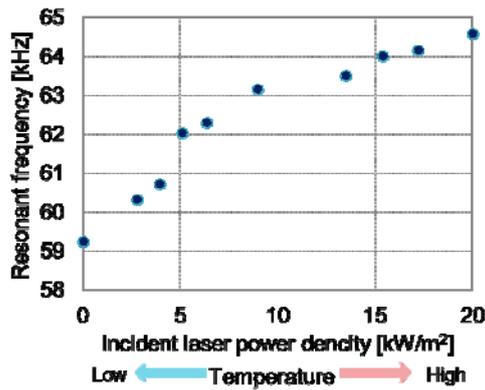


図 6: 青色レーザー光吸収による共振周波数の増加。

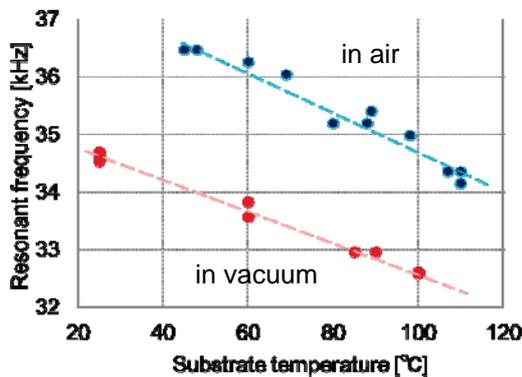


図 7: 基板加熱による温度差減少に伴う共振周波数の減少。

振動子に 0-6V の正弦波を加えて静電駆動し、共振特性を測定した。振動子の変位による容量変化が僅かであることから、電気特性の測定ではなく、レーザー照射し、反射回折光のパターンが変化する様子を、受光面サイズ $\phi 0.1\text{mm}$ の PIN フォトダイオード (浜松フォトニクス, S9055-9) で測定し、その出力信号の応答から、インピーダンス測定器 (NF 回路設計ブロック, FRA5097) によって周波数応答を得た。振動子が微小変位する際の、光学的な干渉パターンの変化によって測定するため SN 比が上がる。但し、位相信号の初期値は 0° に必ずしも一致しない。

図 4 に共振特性の一例を示す。測定用に赤色レーザーを照射した。共振周波数は 32kHz 程度である。この前後で位相が 180° 変化している。大気圧で測定した。Q 値 2.5 の緩やかなピークである。図 5 は振動子を真空環境 (数 Pa) に置いた場合であり、Q 値は 188 に増加した。振動子と基板間のガスによるスキュードフィルムダンピングの影響が大きいと考えられる。

光照射に対する振動子の応答を測定した。赤外線照射の代わりに、金の光吸収率が高い青色レーザー光 (波長 407nm で 60% 程度) を顕微鏡の対物レンズによって集光して照射

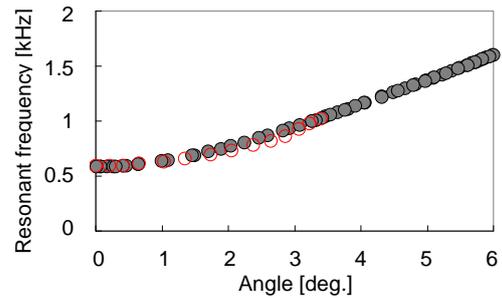


図 8: 非線形バネの理論式より求めた共振周波数 ● と実測値 ○。

した。図 6 は、室温での共振周波数 59.2kHz の振動子の例であり、1.2 倍の 64.6kHz にまで増加した。

温度に対する議論を定量的にするため、青色レーザーで振動子を加熱しつつ、振動子基板を加熱し、基板と振動子間の温度差 ΔT を減らした際の変化を調べた。基板温度を上げるほど、温度差 ΔT は小さくなると考えられ、共振周波数は下がると予想される。図 7 は基板温度を 100°C まで加熱した際の共振周波数の変化である。予想通り、共振周波数の減少が見られ、約 $0.03\text{kHz}/^\circ\text{C}$ の割合で変化した。この値は、大気および真空環境で、同程度であった。

以上、薄膜 MEMS ねじり振動子を利用した赤外線センサの特性を調べた。加熱により少なくとも膜厚程度のたわみが発生し、共振周波数が 1.2 倍に増加する、熱型赤外線センサの基本特性が確認できた。図 7 の例において、真空条件における共振ピークの半値半幅を測定分解能とすると、温度分解能は約 3°C となるが、この値は 2 つのピークが重なったときに分離できるかどうかの目安である。実際のピークは一つであり、Q 値が $1/75$ の大気圧のデータでも同等の感度が読み取れていることから、少なくとも $3/75=0.04^\circ\text{C}$ の温度分解能があると考えられる。現状のデバイスは、製作時の歩留りを高くするために、必ずしも感度を得るために有利な形状になっていない。プロセスも含めて、改良の余地は多い。IC の補正無しで、市販サーモグラフィの温度分解能に迫っており、有望である。本結果を今後まとめて、論文発表していく。

また並行して進めた、薄膜トーションバーの変形の精密計測と、バネの非線形性に関する理論式導出については、以前に製作したマイクロミラーを利用して実験を進めた。理論的な考察を重ね、共振周波数の変化が大きさも含めて説明できるようになった。最終的な検証データのみを紹介するが、図 8 の灰色 ● 印は測定した振動子の変形量から理論的に求めた共振周波数、赤色 ○ 印は実測した共振

周波数である。互いに良く一致する。本結果については、2012 年度中に論文の雑誌投稿を行う予定である。

更に張力を持つ薄膜多結晶 Si の展開研究として進めた、マイクロミラーの軽量化応用については、製作が比較的容易であったために進行が早く、学会発表、論文掲載（雑誌論文 No. 2, 3）に至った。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

1. Subrata Kumar Kundu, Akiyoshi Hikita, Shinya Kumagai, Minoru Sasaki, “Investigation of Optical Flatness of Stretched Membrane Drum-Type Micromirror”, Journal of Lightwave Technology, 査読有, Vol. 30 (2012) 1377-1385, DOI: 10.1109/JLT.2012.2186432.

2. Shinya Kumagai, Akiyoshi Hikita, Takuya Iwamoto, Takashi Tomikawa, Masaru Hori, Minoru Sasaki, “Multiple-Height Microstructure Fabricated by Deep Reactive Ion Etching and Selective Ashing of Resist Layer Combined with Ultraviolet Curing”, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 51 (2012), 01AB04, DOI: 10.1143/JJAP.51.01AB04.

3. M. Sasaki, M. Fujishima, K. Hane, H. Miura, “Simultaneous Realization of Stabilized Temperature Characteristics and Low-Voltage Driving of Micromirror Using Thin Film Torsion Bar of Tensile Poly-Si”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 査読有, Vol. 15, No. 5 (2009) 1455-1462.

〔学会発表〕（計 14 件）

1. Subrata Kumar Kundu, Shouhei Ogawa, Shinya Kumagai, Masayuki Fujishima, Kazuhiro Hane, Minoru Sasaki, Analysis of Hard Spring Effect of Tense Poly-Si Torsion Bar of Micromirror Proc. 2011 IEEE Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics (2012. 8. 6-9, Banff, Canada in schedule).

2. 小川翔平, 熊谷慎也, 佐々木実, “マイクロミラー用薄膜トーションバーにおけるハ

ードスプリング効果の評価”, 第 59 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 15p-GP3-21, p.22-021 (2012.3.15, 早稲田大).

3. 山崎辰也, 佐々木実, 熊谷慎也, “張力を持つ薄膜MEMS ねじり振動子を利用したセンサ”, 日本機械学会 東海学生会 第 43 回学生員卒業研究発表講演会, 1003, (2012.3.14, 名古屋工業大学).

4. Shinya Kumagai, Gyu Il Shim, Ryoichi Mimoto, Minoru Sasaki, “Nonlinear spring characteristics analyzed by a macro model of an electrostatically driven micromirror device”, Proceedings of the 4th international conference on manufacturing, machine design and tribology, pp.237-238 (2011. 4. 26, 蒲郡).

5. Subrata Kumar Kundu, Akiyoshi Hikita, Shinya Kumagai, Minoru Sasaki, “Dynamic Deformation of Stretched Membrane in Drum-Type Micromirror”, Proceedings of 2011 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science pp.255-260 (2011.11.6-9, 名古屋).

6. 小川翔平, 熊谷慎也, 佐々木実, “マイクロミラー用薄膜トーションバーの精密計測とハードスプリング効果に関する考察”, 日本機械学会東海支部第 60 期総会講演会 講演論文集 609 (2011.3.15, 豊橋技術科学大学).

7. 熊谷慎也, 疋田晃義, 岩本拓也, 佐々木実, “UVキュアによるレジスト硬化を利用した多段階立体構造のエッチング加工”, 第 58 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集, 25a-KU-15,03-039 (2011.3.25 神奈川工科大学, 大震災のため予稿集による発表扱い).

8. Shouhei Ogawa, Shinya Kumagai, Minoru Sasaki, “Nonlinear Spring of Thin Film Torsion Bar with Tension for Micromirror”, Proceedings of the 17th International Display Workshops, MEET2-3, pp.1581-1584. Invited (2010.12.2, 博多).

9. A. HIKITA, T. IWAMOTO, S. KUMAGAI, M. SASAKI, “Multiple-height Microstructure Fabricated by ICP-RIE and Masking Layers Using Only Photoresists”, Proc. 3rd Int. Symp. Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, P2-009A, p.101 (2011. 3. 8, 名古屋).

10. A. Hikita, T. Iwamoto, S. Kumagai, M. Sasaki, “Light-Weighted Micromirror Fabricated Using Stacked Photoresist Masks Realized by UV Curing”, Proceedings of the 4th International Conference on PLASMA-Nano Technology and Science, 0-06 (2011. 3. 11, 高山).

11. M. Sasaki, S. Kumagai, M. Fujishima, K. Hane, H. Miura, “Nonlinear Spring of Thin Film Torsion Bar with Tension for Micromirror”, Extended Abstracts of the 2009 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, pp.1328-1329. (2009.10.9, 仙台).

12. Minoru Sasaki, “Microactuator Using Tensile Thin Film”, International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, pp.608-613 (2009.10.11, 名古屋), Invited.

13. 沈規一, 味元良一, 熊谷慎也, 佐々木実, “張力の加わったトーシオンバーを持つマイクロミラーのマクロモデルによる解析”, 第26回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集, pp.187-190 (2009.10.15 船堀).

14. G. Il Shim, R. Mimoto, S. Kumagai, M. Sasaki, “Extending Rotation Range Confirmed by Macro Model of Gap-closing Type Electrostatic Micromirror Controlling Non-linearity of Torsion Bar”, Proceedings of The 16th International Display Workshops, MEMS5-3, pp.1501-1504 (2009.12.10, 宮崎).

〔図書〕(計3件)

1. 監修: 樋口俊郎, 大岡昌博「アクチュエータ研究開発の最前線」(2011.8.8 初版第一版発行) 株式会社エヌ・ティー・エス、第2編 第2章 第5節 “張力を持つ薄膜を利用した静電駆動型マイクロミラーの高速化と低電圧化”、分担 佐々木実 pp.185-189 (2011). ISBN978-4-86043-386-4 C3050.

2. 監修: 樋口俊郎, 大岡昌博「アクチュエータ研究開発の最前線」(2011.8.8 初版第一版発行) 株式会社エヌ・ティー・エス、第1編 第1章 “静電アクチュエータ”、分担 山本晃生、佐々木実 pp.17-24 (2011). ISBN978-4-86043-386-4 C3050.

3. Minoru Sasaki, “Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs”, Part

III, Micro Actuators, 11. High-Performance Electrostatic Micromirrors (2010) 438 (分担12), Springer, ISBN978-1-84882-990-9.

〔産業財産権〕

○取得状況(計1件)

名称: トーシオンバーを用いた静電駆動型マイクロミラーデバイス

発明者: 佐々木実、羽根一博

権利者: 東北大学

種類: 特許

番号: 第4446038号

取得年月日: 平成22年1月29日

国内外の別: 国内

〔その他〕

研究期間外ではあるが、以下の特許出願を行った。「ねじり振動を利用した赤外線検出方法とこれを実施したねじり振動を利用した赤外線の検出装置」(出願日)平成21年3月31日(出願番号)特願2009-83939.

以下のホームページに、今後の学会投稿時に新規性を失わない範囲で最新の結果を紹介する。

<http://www.toyota-ti.ac.jp/mems/index.htm>

同種の研究テーマとして、以下を受けた。

「高感度ねじり振動型 MEMS 赤外線センサ」平成21年度 独立行政法人科学技術振興機構 JST シーズ発掘試験 2,000 千円(研究代表者: 佐々木実)

振動子のリリースプロセスである超臨界乾燥では(株)レクザムの協力を受けた。非線形バネの解析に利用したマイクロミラーは東北大学マイクロ・ナノマシニング研究教育センターにて、羽根一博 教授の協力を受け製作された。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 実 (SASAKI MINORU)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号: 70282100

(2) 研究分担者

熊谷 慎也 (KUMAGAI SHINYA)

豊田工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 70333888