

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2008

課題番号：19016003

研究課題名（和文） 温度補償した高速応答可能な低電圧静電駆動型マイクロミラー

研究課題名（英文） Stabilized Temperature Characteristics, High-Speed Response, and Low-Voltage Driving of Micromirror

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：

薄膜トーションバーにより、静電駆動型マイクロミラーの低電圧駆動を実現していたが、温度特性安定化と高速化が課題であった。これらに対し、以下の成果を得た。

- (1) SiN に代わり、引張応力の大きい多結晶 Si を得た。
- (2) 太鼓の革のような薄膜ミラーを作製し、平坦さと温度安定性を確認した。
- (3) 多結晶 Si トーションバーを持つマイクロミラーが製作できた。
- (4) 低電圧駆動特性が温度に対し安定した。
- (5) 微弱な磁場を用いた無線駆動の展開を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4,200,000	0	4,200,000
2008 年度	4,300,000	0	4,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	8,500,000	0	8,500,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ・ マイクロ・ナノデバイス

キーワード：マイクロマシン、マイクロ・ナノデバイス、MEMS アクチュエータ、マイクロミラー、静電駆動、温度補償、低電圧駆動

1. 研究開始当初の背景

前段階の研究結果として、縦型櫛歯静電アクチュエータを、厚さ 300nm の窒化シリコン (SiN) 薄膜トーションバーと組み合わせたマイクロミラーを発表していた。トーションバーの薄膜化により、ねじりバネ定数を格段に小さくできる。更に、張力を加えることで上下左右方向の剛性を高めて、ミラー回転にだけ柔らかいバネを実現できることが分かっていた。5V で 7.3° のミラー回転角を実現した。5V 駆動で世界最大級の回転角であ

る。但し、Si 基板と熱膨張係数が異なる SiN 膜を利用した上に、電気的接続のために金属膜を表面に付けたため、温度特性が不安定であった (17 から 60°C に温度上昇すると、回転角が 4.3 から 1.3° まで減少した)。加えて、トーションバーが柔らかい分、共振周波数が 360Hz 程度と低めであった。多くの応用を考えると、対策が必要であった。

2. 研究の目的

トーションバー材料として、アモルファス

Si (a-Si) から創製した多結晶 Si (poly-Si) を用いることを、新しく導入した。アモルファス状態からの結晶化反応によって 700–1000 MPa の高い引張応力が発生することが知られている。この薄膜は、トーションバーだけの用途ではなく、大きな張力を持ったミラー面を用意し軽量化する用途にも利用である。また、poly-Si にはドーピングによって導電性を付与できるため、金属層を使うことなく、静電アクチュエータが形成できる。基板 Si と熱膨張係数がほぼ同じになるため温度特性の安定化、加えて、低電圧で大きなミラー回転角、高速応答の実現が期待できる。これらを実現することが研究目的である。研究のポイントとなるのは、大きな引張応力を持つ Si 薄膜の創製であり、材料特性を明らかにすることも目的とした。

3. 研究の方法

目的とするデバイス性能が複数ある。最終的には全てを兼ね備えたデバイスを目指す。目的に応じて製作する構造を切り分け（ミラー部だけの構造と、薄膜トーションバーをもつアクチュエータ）、本質的議論を進め易くする方針を取った。

ポイントとなる高い引張応力をもつ Si 薄膜に関しては、パイオニアである三浦教授（東北大学）に共同・連携研究者として入って頂き、円滑な研究実施を図った。

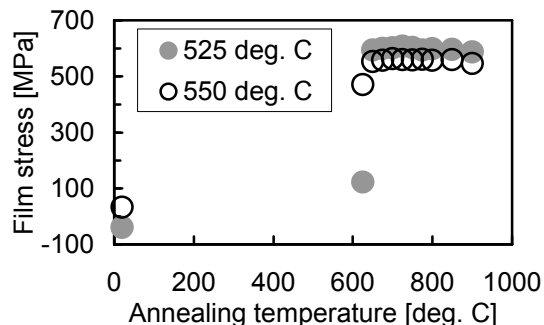


図 1：アニール温度と膜応力の関係。凡例は a-Si 成膜温度。

4. 研究成果

以下、切り分けた議論ごとに成果を述べる。

(1) 大きな引張応力を持つ多結晶 Si

a-Si を結晶化して創製する poly-Si から得られる引張応力を確認した。代表者らが使用する LPCVD 装置において、大きな引張応力を得る成膜条件を求めた。石英ガラス基板を利用して評価した。He 希釈 10% SiH₄ ガスを利用した。図 1 は、温度 550 と 525°C で成膜した膜のアニール温度と膜応力との関係である。成膜後（室温のデータ点）は圧縮応力を示しているが、650°C 付近で変化し引張応力を生じていることが分かる。~600MPa は大

きめの膜応力値である。525°C で成膜したものが、より高い応力値を示している。より低温・高圧で結晶を含まないアモルファス状態にする程、応力を大きくできた。これらは、文献と一致している。

以後、利用した膜は、525°C、800Pa（全圧）で成膜した。アクチュエータ製作など導電性が必要な場合は、in situ ドープではなく、成膜後に P のイオン注入により与えた。引張応力の目減りは生じたが 300-400 MPa の引張応力を得た。

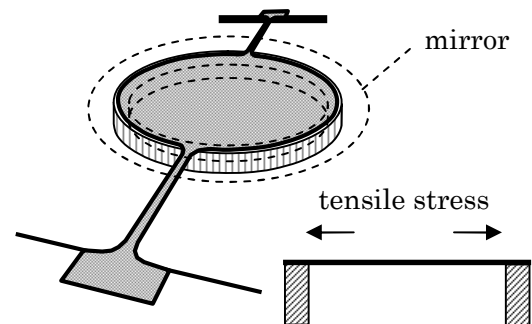


図 2：太鼓の革のように張った薄膜により、軽量で平坦なミラーを用意する模式図。

(2) 太鼓の革のような薄膜ミラー

図 2 のような、太鼓の革のような構造によりミラーを製作すれば、軽量化ができる。但し、ミラーに利用するのであれば、ミラー面が平坦であることが条件となる。このアイデアは国際会議 MEMS2000 で UC Berkeley のグループから発表された。彼らの成膜温度は 590°C と高温で、少なくとも poly-Si が混ざった膜を利用していたと考えられる。すなわち、結晶化のアニールを行っても引張応力は小さな値に留まる。実際、彼らのミラーは十分に平坦とは言えなかった。

a-Si の成膜条件を得た上で、太鼓の革のように張った薄膜ミラー構造を製作し、ミラーが平坦にできるかを確認した。薄膜部分が φ 380μm、結晶 Si リング外径が φ 500μm の構造とした。プレート構造に対して、慣性モーメントは 62% に低減でき、共振周波数は 27% 増加できる設計となる。製作プロセスに関連して、a-Si のアニーリングのタイミングが重要であることが分かった。a-Si 状態でダイアフラムに加工すると、酸化膜等の膜応力が直接加わり、a-Si 膜がたわむ。このたわみは poly-Si 化した後も完全に取り除くことは出来なかった。クラックが入り歩留まりを落とすことも観察された。むしろ、poly-Si 化によって強い引張応力が加わった膜は、厚い酸化膜などとの 2 層構造の際にはたわむが、それらがエッチングによって除去されると、平面となった。成膜後の早い段階で結晶化した方

が、プロセス中での物理・化学的耐性と歩留まりが改善することが分かった。

図3は実際に製作したミラープロファイルの白色干渉測定結果である。たわみ量は最大-最小値で $\sim 20\text{nm}$ の値となり、複数のミラーで再現性良く得た。これは可視光に対して $\lambda/10$ を満たし、光学レベルで平坦である。デバイスを製作したウェハを、薄膜側から光学顕微鏡で観察しても、どこにミラー構造が作られているのか分からないほど平坦であった。反射率を上げるAl金属を蒸着し、 110°C の高温状態にしても平坦さは維持された(最大-最小値で $\sim 2\text{nm}$ の変化)。金属膜が無ければ、poly-Si薄膜と基板Siとの熱膨張係数がほぼ同じになるため、温度特性の安定化が説明できる。熱膨張係数が異なる金属を蒸着しても平坦さが維持されるのは、張力が働いている効果と考えられる。マイクロミラーを高速スキャンした場合には、慣性力によるミラー面のたわみが評価項目となるが、これに対しても本手法が有効であることが期待できる。

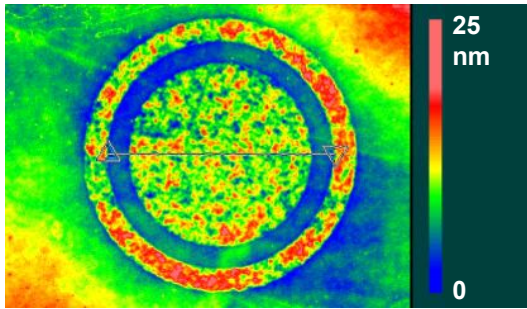


図3：引っ張り応力の加わった薄膜で用意された円形ミラーの表面形状。△▽で示したリング外径は $500\mu\text{m}$ 。

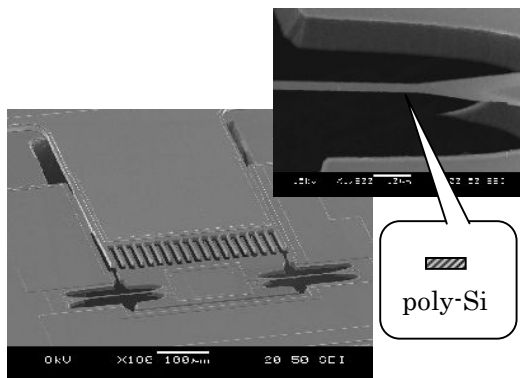


図4：張力の加わった poly-Si 薄膜トーシオンバーを持つマイクロミラー。拡大図はトーシオンバーの根元部分である。

(3) マイクロミラー製作との整合性

薄膜トーシオンバー製作と整合性を取りつつ縦型櫛歯アクチュエータ製作を実証した。a-Siの結晶化をプロセス中で出来るだけ

早くする知見を生かした。SiO₂膜ディレイドマスク、プラズマエッチングの等方・異方性の切り替えは、SiN膜を利用した場合の蓄積が利用できた。poly-Si薄膜のトーシオンバーを製作した後に、結晶Siのミラー部を製作するのであるが、poly-Si薄膜構造を保護する方法がポイントとなった。これは、poly-Siと結晶Siのプラズマエッチングに対する性質がほぼ同じになるため、片方のみを選択的にエッチングすることが難しいからである。UVキュアしたレジスト膜を利用したSi薄膜の側壁保護の工夫により、poly-Siトーシオンバーを持つマイクロミラーが製作できることを見出した。レジストをUVキュアすれば、パターン崩れを起こすことなく上層に更にパターンを重ねることができる。

図4が製作したマイクロミラーである。奥には、櫛歯を先端にもつ上に反ったカンチレバーである。これにより縦型櫛歯が形成されており、ミラーとカンチレバー間に電圧が加わると、静電引力によってミラー側の櫛歯が面外上方向に引き付けられて、ミラーが回転する。拡大図はトーシオンバー根元部である。透けている様子からも薄い構造であることが分かる。SiN薄膜を利用したもの比べ、表面粗さは $0.006\text{-}0.055\mu\text{m Ra}$ でありSiNを用いた以前のデバイス($0.10\text{-}0.58\mu\text{m Ra}$)よりも平坦になった。poly-Si材料がミラーのリリース時に利用するHF蒸気に対して、より安定になったからである。

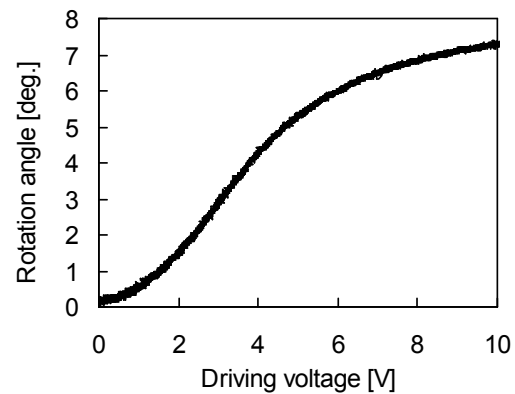


図5：マイクロミラーの直流回転角特性。

(4) 低電圧駆動特性かつ温度安定化実現

図5はミラー回転角特性の一例である(縦型櫛歯電極間距離 $12\mu\text{m}$)。直流条件である。10Vで 7.2° の回転角を示している。SiN薄膜を利用したデバイスと比べて、トーシオンバーをダメージ無く残せたことと、プロセスの安定化のために硬めのバネ設計を行ったた

め、駆動電圧は高くなっているが、ICの駆動電圧 5, 12, 24V 程度で動作することを示しており、低電圧駆動を実現した。

図 6 に温度を変えながら、回転角特性を測定した結果を示す。図 5 と回転角が異なるのは、マイクロミラーのデザインが異なるためである（縦型櫛歯電極間距離が $6\mu\text{m}$ のデバイス）。 120°C まで昇温したが、回転角-電圧のカーブがほぼ重なり、安定している。薄膜と基板 Si の熱膨張係数がほぼ同じになったからである。回転角の温度依存性は $1.7 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ であった。回転角はわずかに増加する（バネ定数がわずかに低くなる）変化は、値も含めて結晶 Si で製作されたミラーと傾向が同じである。

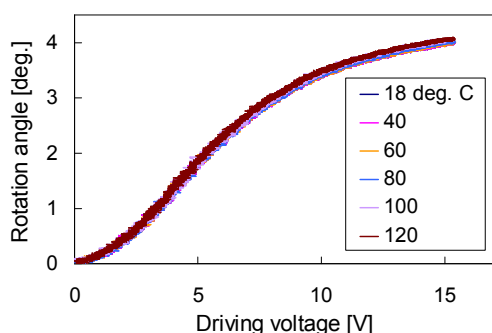


図 6：動作温度を変えた際の、ミラー回転角-駆動電圧特性。

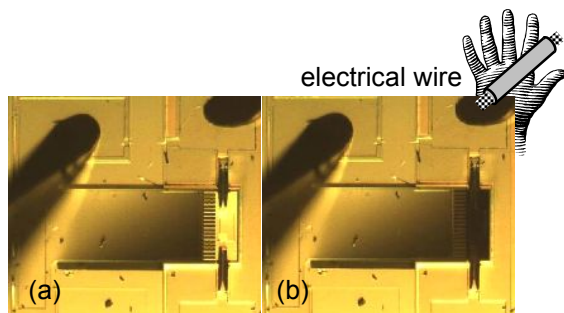


図 7：マイクロミラーの駆動が微弱なエネルギーで可能であることを示す一例。

(5) 無線駆動

展開研究を示すことができた。図 7 は微弱な電圧とエネルギーでマイクロミラーが駆動できる一例である。電源は用いていない。ミラーと接触した電線に手をかざすと（接触はしていない）、帯電による電圧が伝わり、ミラーが回転する。この性質を利用し、電磁誘導による非接触エネルギー伝送によるミラー駆動実験を行った。電磁石部で 19mT の小さな磁場（健康用の磁気ネックレスで 110mT ）で励起し 16mm 離れた場所で（磁場 $\sim 2\text{mT}$ ）、 1° 以上のミラー回転を得た。上記実験は、

マイクロミラーを大気中で動作させた。共振点での Q 値は ~ 3 である。真空パッケージを施せば、Q 値 100 は十分可能な値であるため、大きな回転角も期待できる。磁場は生体内に少ないロスで伝播するため、生体内部で利用する、内視鏡用光走査ミラーの無線駆動が原理的に可能となる。低電圧駆動は安全上も有利であり、温度特性の安定化は制御性を向上する。

(6) その他

マイクロミラーが回転する際に、薄膜トーションバーが大きな非線形性を示すことも分かった。従来、観察されていない現象である。このメカニズムは解明できた。トーションバーに加わる張力の条件が、ミラーの面外方向へのたわみが生じることで、ミラー回転に対して垂直な関係から外れるために、ねじりバネの硬化として影響を及ぼす。静電アクチュエータの安定動作範囲と関係する。

本補助金は、前回の公募研究（回転角センサー一体型 MEMS 光スキャナ、課題番号 17040003）から続けて受けており、前回の成果の一部も本期間中に論文発表等を行った。

以上、張力の加わった薄膜を構造材料に利用し、マイクロミラーの可能性を引き上げる研究を中心として、マイクロアクチュエータの研究を行った。製作プロセスの整合性と共に、軽量化や温度特性安定化が可能であること示した。大きな引張応力の入った poly-Si 膜は LSI で実績のある材料である。薄膜トーションバーという新しい要素を確立する上でも有用と考えられる。

また研究内容を、講演や論文以外の図書で紹介する機会に恵まれた。

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 5 件）

- ① Minoru Sasaki, Masayuki Fujishima, Kazuhiro Hane, Hideo 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, Vol. 15, September/October (2009) accepted. 査読有
- ② Takuro AONUMA, Shinya KUMAGAI, Minoru SASAKI, Motoki TABATA, Kazuhiro HANE, "Characteristics of Improved Piezoresistive Rotation Angle Sensor Integrated in Micromirror Device",

Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 48, No. 4 (2009) pp.04C191-1-6. 査読有

- ③ Minoru SASAKI, Fuminori BONO, Kazuhiro HANE, “Large Displacement Micro XY-Stage with Paired Moving Plates”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 4 (2008) pp. 3226-3231. 査読有
- ④ Minoru Sasaki, Takashi Sasaki, Kazuhiro Hane, Hideo Miura, “An Optically flat micromirror using stretched membrane with crystallization-induced stress”, Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, Vol. 10 (2008) 044004-1-8. 査読有
- ⑤ Minoru Sasaki, Shinya Yuki, Kazuhiro Hane, “Performance of Tense Thin Film Torsion Bar for Large-Rotation and Low-Voltage Driving of Micromirror”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 13, Issue 2 (2007) pp. 290-296. 査読有

[学会発表] (計 17 件)

- ① 味元良一, 佐々木実, 熊谷慎也, 「ギャップクロージング型静電マクロミラーのマクロモデルによる pull-in 現象解析」日本機械学会東海学生会、第 40 回学生会卒業研究発表講演会 講演前刷集, 913 (2009.3.16 岐阜大学) pp.286-287. 査読無
- ② MINORU SASAKI, SHINYA KUMAGAI, KAZUHIRO HANE, “Micromirror realized by combined surface and bulk micromachining using isotropic and anisotropic Si etching”, First International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications (ISPlasma2009) (2009.3.9 名古屋) Poster, Mo.-21, p.143. 査読無
- ③ M. Sasaki, K. Hane, D. Briand, W. Noell, N. de Rooij, “Conditions of Micromirror Lifted by Buckled Bridges Using Film Stress”, Proceedings of The 15th International Display Workshops, MEMS3-4 (2008. 12. 4, Niigata, Japan) pp.1337-1340. 査読有
- ④ M. Sasaki, S. Kumagai, K. Hane, “Nonlinear Rotational Spring with Tension for Stabilizing Electrostatically Driven Micromirror”, 2008 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, Organized Session: SA-2: Actuators (2008. 11. 8, Nagoya, Japan) pp.225-230. 査読有
- ⑤ Takuro Aonuma, Shinya Kumagai,

Minoru Sasaki, Motoki Tabata, Kazuhiro Hane, “Piezoresistive Rotation Angle Sensor Integrated in Micromirror Device”, Extended Abstracts of the 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials, Tsukuba, 2008, D-7-3, (2008.9.26, Tukuba, Japan) pp. 932-933. 査読有

- ⑥ Takuro Aonuma, Minoru Sasaki, Shinya Kumagai, Motoki Tabata, Kazuhiro Hane, “Piezoresistive Rotation Angle Sensor in Micromirror for Feedback Control”, Proceedings of the 7th International Conference on Machine Automation (ICMA2008) (2008. 9. 26, Awaji, Japan) pp. 279-282. 査読無
- ⑦ Minoru Sasaki, Masayuki Fujishima, Kazuhiro Hane, Hideo Miura, “Stabilization of Temperature Characteristics of Micromirror for Low-Voltage Driving Using Thin Film Torsion Bar of Tensile Poly-Si”, Program of 2008 IEEE/LEOS Int. Conf. Optical MEMS and Nanophotonics, P12, (2008.8.13, Freiburg, Germany) pp.120-121. 査読有
- ⑧ Minoru Sasaki, Masayuki Fujishima, Hideo Miura, Kazuhiro Hane, “Micromirror Using Thin Film Torsion Bar with Crystallization-Induced Stress”, The 2nd International Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs (2008.4.17, Makuhari, Japan) pp.149-152. 査読無
- ⑨ Minoru Sasaki, “Micromirror Using Stretched Thin Film for Lower Electrostatic Driving Voltage and Higher Resonant Frequency”, Proceedings of The 14th International Display Workshops, MEMS5-1 Invited (2007.12.6, Sapporo, Japan) pp.1399-1402. 査読有
- ⑩ Minoru Sasaki, Takashi Sasaki, Kazuhiro Hane, and Hideo Miura, “Optically Flat Micromirror Designs Using Stretched Membrane with Crystallization-Induced Stress”, Proceedings of 2007 IEEE/LEOS Annual Meeting Conference, ThC2 (2007.10.25, Florida, USA) pp.709-710. 査読有
- ⑪ Minoru Sasaki, Takashi Sasaki, Kazuhiro Hane, Hideo Miura, “Optically Flat Micromirror Using Stretched Membrane with Crystallization-Induced Stress”, Proceedings of The 4th Public Symposium on Next-Generation

Actuators Leading Breakthroughs, (2007.11.19, Okinawa, Japan) pp.49-52. 査読無

- ⑫ Minoru Sasaki, Fuminori Bono, Kazuhiro Hane, "Large Displacement Micro XY-Stage with Paired Moving Plates", Extended Abstracts of the 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials, D-2-2 (2007.9.19, Tsukuba, Japan) pp.88-89. 査読有
- ⑬ Minoru Sasaki, Shinya Yuki, Kazuhiro Hane, "Performance of Tense Thin Film Torsion Bar for Large-Rotation and Low-Voltage Driving of Micromirror", Extended Abstracts of the 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials, D-2-4 (2007.9.19, Tsukuba, Japan) pp.92-93. 査読有
- ⑭ Minoru Sasaki, Motoki Tabata, and Kazuhiro Hane, "Passivated Piezo-resistive Rotation Angle Sensor Integrated in Micromirror", Proceedings of Optical MEMS & Nanophotonics 2007, International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, ThB2 (2007.8.16, Hualien, Taiwan) pp.193-194. 査読有
- ⑮ Minoru Sasaki, Takashi Sasaki, Kazuhiro Hane, and Hideo Miura, "Optically Flat Micromirror Using Stretched Membrane with Crystallization-Induced Stress", Proceedings of Optical MEMS & Nanophotonics 2007, International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, MC3 (2007.8.13, Hualien, Taiwan) pp.27-28. 査読有
- ⑯ Minoru Sasaki, Motoki Tabata, Kazuhiro Hane, "DRIVING OF MICROMIRROR AND SIMULTANEOUS DETECTION OF ROTATION ANGLE USING INTEGRATED PIEZORESISTIVE SENSOR", Digest of Technical Papers of Transducers'07 (The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems), (2007.6.13, Lyon, France) pp.2151-2154. 査読有
- ⑰ 佐々木実, 坊野史典, 羽根一博, 「対になったテーブルを走査する静電駆動型大変位マイクロ XY ステージ」B146, 第 19 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(早稲田大学, 2007.5.16-18) 講演論文集 pp.124-125. 査読無

〔図書〕(計 3 件)

- ① Springer-Verlag London Limited, 国際会議 ICMA2008 のセレクトドペーパーを集めて発刊予定の”Service Robotics and Mechatronics”に掲載予定 (MA50) .
- ② 分担：佐々木実, 第 10 章 アクチュエータ, 10.3 静電アクチュエータ pp.399-407. 「次世代センサハンドブック」監修：藍光郎, (株) 培風館 (2008 年 7 月 8 日 初版発行) ISBN978-4-563-06768-7 C3055.
- ③ Kazuhiro Hane, Minoru Sasaki, 3.01 Optical systems: Micro-mirrors, "Comprehensive Microsystems - Fundamentals, technology and applications-" Volume Three, pp.1-63. Editors-in-Chief, Yogesh Gianchandani, Osamu Tabata, Hans Zappe, Elsevier Science Ltd. (2007.12.24) ISBN-13: 978-0-444-52194-1.

〔その他〕

http://ttiweb.toyota-ti.ac.jp/1432/pub_teacher_show.php?t=166

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

2007 年度まで
三浦 英生 (MIURA HIDEO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90361112

羽根 一博 (HANE KAZUHIRO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：50164893

2008 年度から

熊谷 慎也 (KUMAGAI SHINYA)
豊田工業大学・工学部・准教授
研究者番号：70333888

(3) 連携研究者

2008 年度から
三浦 英生 (MIURA HIDEO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90361112

羽根 一博 (HANE KAZUHIRO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：50164893