

平成 22 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19201026
 研究課題名（和文）
 シリコンの結晶異方性エッチングモデルと溶液組成イオン効果の研究
 研究課題名（英文）
 Modeling of orientation-dependent etching of silicon and effects of ions in the solution
 研究代表者
 佐藤 一雄（SATO KAZUO）
 名古屋大学・工学研究科・教授
 研究者番号：30262851

研究成果の概要（和文）： アルカリ水溶液を用いたシリコンの結晶異方性エッチングにおいて、水溶液中の成分によってエッチレートの異方性が激変する現象を解明した。エッチング液中の不純物としての Cu イオンはエッチング速度を低下させ、エッチング面を荒らす効果があることを、理論的・実験的に明らかにした。一方、エッチング液中に微量の界面活性剤を加えると、これが特定の結晶方位に選択的に吸着し、エッチレートの異方性を激変させることを、エッチング液とシリコンの固液界面での FTIR その場観察によってはじめて見出した。この現象を利用して異なる特性を持つエッチング液を使い分けることにより、MEMS デバイスに必要とされる複雑な形状の微細 3 次元構造を安価に実現するプロセスを発明し、特許出願した。

研究成果の概要（英文）： We investigated wet anisotropic etching of single crystal silicon using alkaline solutions. We clarified the mechanisms of easily changeable anisotropy in the etch rate by a small change in the etching solution contents. It was clarified both theoretically and experimentally that a copper ion as an impurity in etching solution significantly suppresses etch rate and deteriorates etched surface roughness. Also, we clarified a mechanism of dramatic anisotropy change occurring by a small amount of surfactant added to etching solution. This was first found by our in-situ FTIR observation of liquid-solid interface between etching solution and silicon. By utilizing the variable anisotropy in etch rate, we invented new fabrication processes for 3D microstructures for MEMS applications with a minimal process cost.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	16,500,000	4,950,000	21,450,000
2008 年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
2009 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
年度			
総計	34,000,000	10,200,000	44,200,000

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：シリコン、結晶、異方性エッチング、不純物イオン、界面活性剤、固液界面、FTIR

1. 研究開始当初の背景

シリコン・水晶などの単結晶材料は、MEMS デバイスの基本的な素材として欠かせない。結晶の性質を利用した化学的結晶異方性エッチングは、それらの基板にダイヤフラム・梁・溝などの3次元微細構造を形成するのに使われてきた。しかし、MEMS デバイスには、さらに複雑な3次元構造の実現、さらに高精度な形状制御が必要になっており、これらを実現するには、エッチング液の種類、温度、濃度、添加物、不純物などを個々の目的にしたがって選択し制御する必要がある。

本分野の在来研究では、エッチングの異方性を結晶表面原子のダングリングボンド数の違いで説明する、すなわち、結晶構造だけで一義的に異方性を評価するにとどまっておられ、エッチング液の条件によって多様に変化する異方性や表面性状を説明することが出来なかった。

2. 研究の目的

本研究の目的はエッチング液の種類、温度、濃度、添加物、不純物によって多様に変化する異方性や表面性状を物理化学的に解明するとともに、湿式エッチングによるMEMS デバイス加工の可能性を拡大することである。

3. 研究の方法

(1) これまで無視されてきたエッチング液中の陽イオンの効果を明らかにするために、シリコン表面と陽イオンの相互作用を、第1原理計算により解析する。

(2) 界面活性剤添加による異方性変化の原因を明らかにするために、シリコンとエッチング液との界面に存在する物質を in-situ FTIR 法を使って分析する。一方、界面活性剤の付着量についてはエリプソメトリで評価する。

(3) エッチング特性がきわめて異なるエッチングシステム（TMAH水溶液に界面活性剤添加の有無の違いがあるもの）を組み合わせ、加工プロセスを構成し、従来のMEMS マイクロマシニングでは達成不可能であった3次元微細構造製作法を実現する。

4. 研究成果

(1) 液中の陽イオンの効果

エッチング液中の銅イオンが、シリコンのエッチレートを低減し、同時に、面粗さを増大する現象について、その物理化学的なメカニズムを研究した。

研究協力者であるヘルシンキ工科大（現アールト大学に改称）グループによる第1原理計算の結果、シリコン結晶表面に存在するステップ・テラス構造の特定位置で銅イオンが高い親和性をもつこと、また、これによってエッチングが妨げられることが判った。さらに、銅イオンがシリコン表面にある凹凸の稜線と強い親和性があることから、ごく微量の銅イオンの存在が Si(110)の表面に発生するテーパ状のヒロックの発生の原因の一つになることが判った。

TMAH と KOH 水溶液の異方性の違いについても、当然、TMA イオン、K イオンとシリコン単結晶表面との相互作用の結果と考えられる。しかし、現時点ではその差異を証明することができていない。

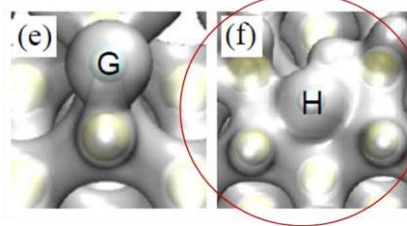


図1 Si(111)表面でCuイオンが強く吸着したHサイトでのCu原子周辺の電子密度分布計算結果

(2) 界面活性剤による異方性変化のメカニズム

界面活性剤(Triton X100)がシリコン単結晶のエッチング異方性を変化させるメカニズムの一部を東北大学との協力のもとで解明した。エッチング中のシリコンとエッチング液界面を in-situ FTIR (Fourier Transform Infra-Red) Spectroscopy で観測したところ、界面活性剤はシリコンの特定の結晶方位に選択的に吸着することを世界で初めて発見した。さらに、エッチング液に代えて界面活性剤水溶液で、シリコン表面に吸着する活性剤分子層の厚さを評価した結果も、同様に、選択的吸着を裏付けた。このような界面活性剤の吸着は、反応物質であるOHイオンと水、反応生成物であるシリコンの水酸化物の拡散を妨げる結果となるので、エッチング速度をその方位だけ選択的に低下させる効果を持つ。

添加量の効果は、25%TMAH水溶液に界面活性剤を10ppm加えるだけで十分に現われ、過剰な添加では、表面粗さの劣化を生じた。

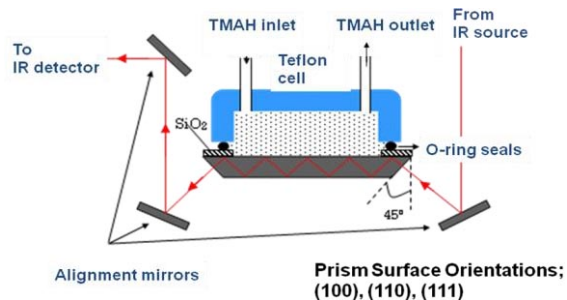


図2 固液界面を分析する in-situ FTIR の実験系

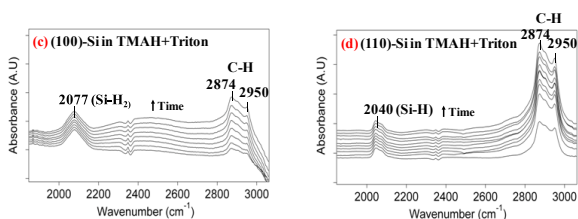


図3 Si(110)への分子の選択的吸着を示す結果

(3) 3次元構造製作プロセスの開発

界面活性剤を添加したエッチング液では異方性が大きく変わることを利用して、MEMS 微細構造加工の可能性を広げることができた。従来、シリコンの結晶異方性エッチングでは、Si(100)ウェハ上にはマスク開口パターン形状によらず、長方形の開口をもつ穴しかできないとされてきたが、TMAH 水溶液に微量の界面活性剤を添加することで、任意の曲線パターンを有する溝・キャビティ構造を Si(100)ウェハ上に形成することができた、さらに LOCOS (Local oxidization of silicon) プロセス、シリコン窒化膜を介したウェハ貼り合わせプロセス、などを導入することにより、ウェットエッチングプロセスで (1) 曲線溝パターンを隙間なく Si(100)ウェハ上に形成する (図4)、(2) 曲線的な微細構造を空間に懸架した構造を形成する (図5)、などが実現することを実証した。その基本となる加工プロセス発明を特許出願した。

この研究期間内に公表した学術雑誌論文は 26 件、国内外学会講演は 24 件、図書分担執筆は 9 件、特許出願は 2 件である。

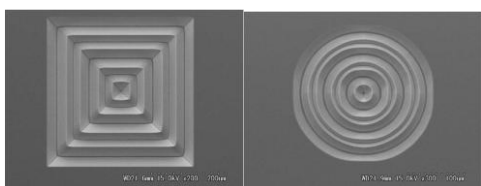


図4 Si(100)上に形成した近接V溝の加工

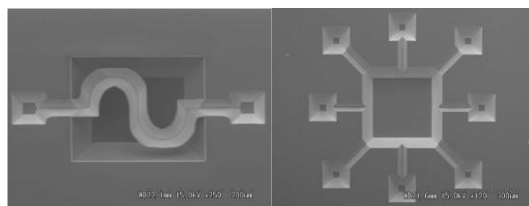


図5 ウェットエッチングで製作した曲線V溝梁の懸架構造、アンダカットのない放射状V溝加工例

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 26 件)

1. M.A. Gosalvez, Prem. Pal, B. Tang and K. Sato, Atomistic mechanism for the macroscopic effects induced by small additions of surfactants to alkaline etching solutions, Sensors and Actuators A, Physical 157, 査読有, 2010, 91-95.
2. Y. Xing, M.A. Gosalvez, K. Sato and H. Yi, Orientation-dependent surface morphology of crystalline silicon during anisotropic etching using a continuous cellular automaton, J. Micromechanics and Microengineering 20, 査読有, 2010, #015019 (11p).
3. Prem Pal and K. Sato, Fabrication methods based on wet etching process for the realization of silicon MEMS structures with new shapes, Microsystem Technologies in press, 査読有, DOI 10.1007/s00542-009-0956-5, 2010
4. M.A. Gosalvez, Y. Xing, K. Sato and R.M. Nieminen, Octree-Search Kinetic Monte Carlo, Sensors and Actuators A, Physical in press, 査読有, accepted Feb. 2010.
5. Prem Pal and K. Sato, Extension of 3D Shapes of MEMS Structures Realized by Wet Etching (Study of micromachining of single crystal silicon), 日本機械学会論文集 C2 編「マイクロ・ナノ工学シンポジウム小特集」 in press, 査読有, accepted Feb. 2010.
6. Prem Pal, M.A. Gosalvez and K. Sato, Silicon micromachining based on surfactant-added tetramethyl ammonium hydroxide: Etching mechanism and advanced application, Japanese Journal of Applied Physics in press, 査読有, accepted Feb. 2010.
7. Prem Pal, K. Sato, M. Shikida and M.A. Gosalvez, Study of corner compensating structures and fabrication of various shapes of MEMS structures in pure and surfactant added TMAH, Sensors and Actuators A, Physical 154-2, 査読有, 2009, 192-203.
8. Prem Pal and K. Sato, Suspended Si microstructures over controlled depth micromachined cavities for MEMS based sensing devices, Sensor Letters 7-1,

- 査読有, 2009, 11-16.
9. Prem Pal and K. Sato, Various shapes of silicon freestanding microfluidic channels and microstructures in one step lithography, *J. Micromechanics and Microengineering* 19-5, 査読有, 2009, #055003 (11p).
 10. Prem Pal and K. Sato, Complex three-dimensional structures in $\text{Si}\{1\ 0\ 0\}$ using wet bulk micromachining, *J. Micromechanics and Microengineering* 19-10, 査読有, 2009, #105008 (9p).
 11. M.A. Gosálvez, Y. Xing, K. Sato and R.M. Nieminen, Discrete and continuous cellular automata for the simulation of propagating surfaces, *Sensors and Actuators A, Physical* 155, 査読有, 2009, 98-112.
 12. B. Tang, Prem Pal, M.A. Gosálvez, M. Shikida, K. Sato, et al., Ellipsometry study of the adsorbed surfactant thickness on $\text{Si}\{110\}$ and $\text{Si}\{100\}$ and the effect of pre-adsorbed surfactant layer on etching characteristics in TMAH, *Sensors and Actuators A, Physical* 156-2, 査読有, 2009, 334-341.
 13. M.A. Gosálvez, B. Tang, Prem Pal, K. Sato, Y. Kimura and K. Ishibashi, Orientation and concentration dependent surfactant adsorption on silicon in aqueous alkaline solutions: Explaining the changes in the etch rate, roughness and undercutting for MEMS applications, *J. Micromechanics and Microengineering* 19-12, 査読有, 2009, #125011 (18p).
 14. Prem Pal, K. Sato, M.A. Gosálvez, Y. Kimura, K. Ishibashi, et al., Surfactant adsorption on single crystal silicon surfaces in TMAH solution: Orientation-dependent adsorption detected by in-situ infra-red spectroscopy, *J. Microelectromechanical Systems* 18-6, 査読有, 2009, 1345-1356.
 15. T. Hynninen, M.A. Gosálvez, A.S. Foster, H. Tanaka, and K. Sato, Effect of Cu impurities on wet etching of $\text{Si}\ (110)$: formation of trapezoidal hillocks, *New Journal of Physics* 10, 査読有, 2008, #13033 (19p).
 16. M.A. Gosálvez, Y. Xing, and K. Sato, Analytical solution of the Continuous Cellular Automaton for anisotropic etching, *J. Microelectromechanical Systems* 17-2, 査読有, 2008, 410-431.
 17. M.A. Gosálvez, Y. Xing, K. Sato and R.M. Nieminen, Atomistic methods for the simulation of evolving surface, *J. Micromechanics and Microengineering* 18-5, 査読有, 2008, #055029 (17p).
 18. Prem Pal, K. Sato and M. Shikida, Suspended Si microstructures with rounded concave and sharp convex corners using wafer bonding and wet anisotropic etching, *ECS Transactions* 16-8, 査読有, 2008, 133-140.
 19. H. Hida, M. Shikida, K. Fukuzawa, S. Murakami, Ke. Sato, K. Asaumi, Y. Iriye and Ka. Sato, Fabrication of a Quartz Tuning-Fork Probe with a Sharp Tip for AFM Systems, *Sensors and Actuators A, Physical* 148-1, 査読有, 2008, 311-318.
 20. T. Hynninen, A.S. Foster, M.A. Gosálvez, K. Sato et al., Adsorption of metal impurities on H-terminated Si surfaces and their influence on the wet chemical etching of Si, *J. Physics: Condensed Matter* 20, 査読有, 2008, #485005 (9p).
 21. M.A. Gosálvez, K. Sato, A. Foster, et.al, An atomistic introduction to anisotropic etching, *J. Micromechanics and Microengineering* 17-4, 査読有, 2007, S21-S26.
 22. M.A. Gosálvez, Y. Xing, T. Hynninen, M. Uwaha, A. Foster, R. Nieminen and K. Sato, Faster simulations of step bunching during anisotropic etching: formation of zigzag structures on $\text{Si}\ (110)$, *J. Micromechanics and Microengineering* 17-4, 査読有, 2007, S27-S37.
 23. Prem Pal, K. Sato and Sudhir Chandra, Fabrication techniques of convex corners in a (100) -silicon wafer using bulk micromachining: a review, *J. Micromechanics and Microengineering* 17-10, 査読有, 2007, R111-R133.
 24. Prem Pal, K. Sato, M.A. Gosálvez and M. Shikida, Study of rounded concave and sharp edge convex corners undercutting in CMOS compatible anisotropic etchants, *J. Micromechanics and Microengineering* 17-11, 査読有, 2007, 2299-2307.
 25. A.S. Foster, M.A. Gosálvez, T. Hynninen, R.M. Nieminen, and K. Sato, First-principles calculations of Cu adsorption on an H-terminated Si surface, *Physical Review B* 76-7, 査読有, 2007, #075315 (8p).
 26. Y. Xing, M.A. Gosálvez and K. Sato, Step flow-based cellular automaton for the simulation of anisotropic etching of complex MEMS structures, *New Journal of Physics* 9, 査読有, 2007, #436 (18p).
- [学会発表] (計 24 件)
1. Prem Pal, K. Sato, M.A. Gosálvez, B. Tang and H. Hida, Advanced MEMS applications using orientation dependent adsorption of surfactant molecules in TMAH solution, 5th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT), accepted Feb.'10, 2010.6.9 (確定), Perth, Australia.
 2. Prem Pal and K. Sato, Fabrication Methods Based on Wet Bulk Micromachining for the Realization of Advanced MEMS Structures, 15th Intl. Workshop on the Physics of Semiconductor Devices, 2009.12.15, New Delhi, India.
 3. Prem Pal and K. Sato, Advanced wet etch bulk micromachining in $\{100\}$ silicon wafers, 2009 MRS Fall Meeting, 2009.11.30, Boston, USA.
 4. Prem Pal and K. Sato, Wet etched complex three

- dimensional MEMS structures, Intl. Symp. on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2009.11.8, 名古屋市.
5. B. Tang, M.A. Gosálvez, Prem Pal, S. Itoh, H. Hida, M. Shikida and K. Sato, Adsorbed surfactant thickness on a Si wafer dominating etching properties of TMAH solution, Intl. Symp. on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2009.11.8, 名古屋市.
 6. M.A. Gosálvez, Y. Xing and K. Sato, Continuous Cellular Automaton for the propagation of advancing fronts featuring surface morphologies: Realistic simulation of wet etching for MEMS applications Intl. Symp. on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2009.11.8, 名古屋市.
 7. Prem Pal and K. Sato, Extension of 3D Shapes of MEMS Structures Realized by Wet Etching, 日本機械学会マイクロ・ナノ工学専門会議第1回シンポジウム, 2009.10.15, 東京.
 8. Prem Pal, K. Sato, M.A. Gosálvez, H. Hida, B. Tang, S. Ito, Y. Kimura, K. Ishibashi and M. Niwano, Experimental verification and theoretical explanation of the effect of surfactant addition to TMAH based etchants for advanced applications in MEMS, 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, 2009.10.15, 東京.
 9. K. Sato, M. Shikida, M.A. Gosálvez, Prem Pal and Y. Kimura, Anisotropic nature of Si surface during wet alkaline etching; Effects of cations and surfactants, The 5th International Colloquium, Micro-Tribology, 2009.9.20, Milowka, Poland.
 10. K. Sato, M. Shikida, M.A. Gosálvez and Prem Pal, Micro/Nano science uncovering the mysteries of silicon wet etching for the fabrication of MEMS structures, Intl. Conf. on Materials for Advanced Technologies, 2009.6.28, Singapore.
 11. Y. Xing, M.A. Gosálvez and K. Sato, Continuous cellular automaton for the simulation of the surface morphology on any silicon orientation Si{HKL} in anisotropic etching, 15th Intl. Conf. on Solid-State Sensors, Actuator and Microsystems (Transducers), 2009.6.21, Denver, USA.
 12. Prem. Pal, K. Sato, H. Hida, M.A. Gosálvez, Y. Kimura, et al., Surfactant in TMAH for new shapes of silicon MEMS components; its orientation dependent adsorption detected by infrared spectroscopy, 15th Intl. Conf. on Solid-State Sensors, Actuator and Microsystems (Transducers), 2009.6.21, Denver, USA.
 13. N. Inagaki, H. Sasaki, M. Shikida and K. Sato, Selective removal of micro-corrugation by anisotropic wet etching, 15th Intl. Conf. on Solid-State Sensors, Actuator and Microsystems (Transducers), 2009.6.21, Denver, USA.
 14. K. Sato, Science in MEMS: A Plenty of room for multidisciplinary research, JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conf. Micromechatronics for Information and Precision Equipment, 2009.6.17, つくば市.
 15. Prem Pal and K. Sato, Silicon microfluidic channels and microstructures by one step photolithography, Symp. on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2009.4.1, Rome.
 16. Prem Pal and K. Sato, Micromachined sealed cavities by silicon wafer bonding for the formation of microstructures of desired thickness using TMAH etching, Intl. Symp. on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2008.11.6, 名古屋市.
 17. Prem Pal and K. Sato, A comparative study of non-ionic surfactants in TMAH for conformal wet anisotropic etching on (100)-Si wafers, 第25回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2008.10.22, 那覇市.
 18. Prem Pal, K. Sato and M. Shikida, Suspended Si microstructures with rounded concave and sharp convex corners using wafer bonding and wet anisotropic etching, PRiME'08 214th ECS Meeting, 2008.10.12, Honolulu.
 19. 佐藤一雄, MEMSのサイエンス--単結晶シリコンのエッチング特性, 機械特性の新知見, 応用物理学会第129回結晶工学分科会研究会, 2008.7.2, 京都市.
 20. 稲垣徳幸, 佐々木光, Prem Pal, 式田光宏, 佐藤一雄, 結晶異方性ウェットエッチングによるスキヤロッピングの選択除去に関する研究, 電気学会センサ・マイクロマシン部門研究会, 2008.6.12, 仙台市.
 21. Prem Pal, K. Sato, M.A. Gosálvez and M. Shikida, Microstructures with rounded concave and sharp-edged convex corners in a single step wet anisotropic etching, SPIE MOEMS-MEMS (Proc. SPIE Vol. 6882), 2008.1.19, San Jose, USA.
 22. Y. Xing, M.A. Gosálvez and K. Sato, Octree-search kinetic Monte Carlo algorithm for the simulation of complex 3D MEMS structures, IEEE Intl. Conf. MEMS08, 2008.1.14, Tucson, USA.
 23. Prem Pal, K. Sato, M.A. Gosálvez and M. Shikida, An improved anisotropic wet etching progress for the fabrication of silicon MEMS structures using a single etching mask, IEEE Intl. Conf. MEMS08, 2008.1.14, Tucson, USA.
 24. Prem Pal, K. Sato, M.A. Gosálvez and M. Shikida, Novel wet anisotropic etching process for the realization of new shapes of silicon MEMS structures, IEEE Intl. Conf. MHS07 & Micro-Nano COE, 2007.11.13, Nagoya.
- [図書] (計9件)
1. M.A. Gosálvez (分担執筆), Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies, Elsevier, 2010, 157-177, 375-407.
 2. 式田光宏 (分担執筆), ドライ・ウェットエッチング技術全集, (株)技術情報協会, 2009, 159-175.
 3. 佐藤一雄 (分担執筆), MEMS/NEMS 工学全集,

- (株) テクノシステム, 2009, 111-115.
4. 式田光宏 (分担執筆), MEMS/NEMS 工学全集, (株) テクノシステム, 2009, 313-315, 358-359.
 5. 佐藤一雄 (監修・分担執筆), マイクロ・ナノデバイスのエッチング技術, (株)シーエムシー出版, 2009, 3-27.
 6. 式田光宏 (監修・分担執筆), マイクロ・ナノデバイスのエッチング技術, (株)シーエムシー出版, 2009, 28-36, 261-266.
 7. 式田光宏 (分担執筆), 薄膜ハンドブック第 2 版, (株) オーム社, 2008, 1089-1091.
 8. 式田光宏 (分担執筆), ウェットエッチングのメカニズムと処理パラメータの最適化, サイエンス&テクノロジー (株), 2008, 67-91.
 9. K. Sato, M. Shikida (分担執筆), Comprehensive Microsystems Vol.1, Wet etching, Elsevier, 2007, 183-216.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

1. 名称: シリコン微細構造体の製造方法
発明者: 佐藤一雄, Prem Pal
権利者: 名古屋大学
種類: 特許
番号: 特願 2009-172553
出願年月日: 平成 21 年 7 月 23 日
国内外の別: 国内
2. 名称: シリコン微細構造体の製造方法及び微細流路デバイスの製造方法
発明者: 佐藤一雄, Prem Pal
権利者: 名古屋大学
種類: 特許
番号: 特願 2008-312338
出願年月日: 平成 20 年 12 月 8 日
国内外の別: 国内

[その他]

1. 佐藤一雄: MEMS デバイスの技術と応用, (社) 日本技術士会中部支部春季例会, ウィンク愛知 (2010.3.27)
2. 佐藤一雄: MEMS に科学を: シリコン結晶異方性エッチングの物理化学, 第 2 回名古屋大学高等研究院セミナー, 名古屋大学シンポジオンホール, (2010.1.15)
3. 学術雑誌“Nature” 名古屋大学研究紹介に登場. Spotlight on Nagoya, Nature, 461, 8 Oct. 2009.
4. 佐藤一雄: MEMS 入門: 岐阜県立中津高校サマーセミナー, 名古屋大学 (2009.8.5)
5. ホームページ
<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/mems/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 一雄 (SATO Kazuo)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30262851

(2) 研究分担者

- 式田 光宏 (SHIKIDA Mitsuhiro) 2007-2009
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 80273291
- プレム パル (PREM Pal) 2007
名古屋大学・大学院工学研究科・COE 研究員 (当時)
研究者番号: 20444416
- 木村 康男 (KIMURA Yasuo) 2008-2009
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号: 40312673
- ゴサルベス ミゲル (GOSALVEZ Miguel) 2009
名古屋大学・大学院工学研究科・COE 研究員
研究者番号: 10377814

(3) 連携研究者

- ゴサルベス ミゲル (GOSALVEZ Miguel) 2007-2008
ヘルシンキ工科大学・研究員
- ヒュンニネン テーム (HYNNINEN Teemu) 2007-2009
ヘルシンキ工科大学・研究員
- フェルランド ネストル (FERRANDO Nestor) 2009
バレンシア工科大学・研究助手