

機関番号：92704

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20246064

研究課題名（和文）ナノ機械パラメトロン素子の研究

研究課題名（英文） Nanomechanical parametron devices

研究代表者

山口 浩司（YAMAGUCHI HIROSHI）

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所 量子電子物性研究部・部長

研究者番号：60374071

研究成果の概要（和文）：

化合物半導体ヘテロ構造を用いて微小機械共振器を作製し、その特徴的な電気機械振動特性を応用した新しい機能の探究を進めた。この結果、以下の成果が得られた。(1) パラメトリック周波数変換を実現し、一個の機械共振器により複数の論理ゲートと等価な演算を実現する新しい論理情報処理手法の提案と実証を行った。(2) 化合物半導体の光半導体素子としての機能を活用し、キャリア励起による新しい光・機械結合を実現した。(3) 二つの機械共振器を結合し、その周波数をチューニングする手法を開拓した。(4) これらの微小機械構造を高精度で作製するために必要なナノ加工技術の高度化に成功した。

研究成果の概要（英文）：

The electromechanical properties of Micro/Nanomechanical resonators based on compound semiconductor heterostructures were studied and its possible applications were proposed. (1) Parametric frequency conversion was demonstrated and a novel method to construct logic operations was proposed, where multiple logic operations can be executed in parallel only with a single mechanical resonator. (2) A novel optomechanical coupling scheme using carrier excitation in GaAs was demonstrated. (3) The method to tune the resonance frequency was developed for coupled mechanical resonators. (4) Novel nanofabrication technique was developed for fabricating the micro/nanomechanical structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	24,200,000	7,260,000	31,460,000
2009 年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2010 年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	36,300,000	10,890,000	47,190,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学／電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス、集積回路、新規デバイス、マイクロマシン、ナノマシン

1. 研究開始当初の背景

これまでエレクトロニクスの屋台骨を支えてきた CMOS 技術は、今後 20 年で微細化の限界に到達することが指摘されている。この困難を克服すべく、ナノワイヤや化合物半

導体、ナノチューブ、グラフェンなど、新しい材料系のロジック素子への応用が世界中で模索されている。ロジック素子に対するもうひとつの大きな課題は素子の省電力化である。LSI により消費されている電力は年と

ともに急増し、抜本的な解決策の出現が期待されている。一方、同じく半導体の微細加工技術を基盤として MEMS が昨今急激に発展している。MEMS は固体の機械的・弾性的な性質を人工的に制御する技術を応用したもので、その応用研究は急速に加速している。しかし、これまでの MEMS あるいはその微細化を推し進めた NEMS では、その多くの応用はセンサーやアクチュエーター、スイッチ素子であり、直接的に論理情報を操作するロジック素子としては扱われてこなかった。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの MEMS, NEMS とは異なる応用として、機械的構造の双安定性に起因するビット動作機能を微小機械構造に与え、消費電力の著しく小さく集積化が可能なナノ機械ロジック素子の実現に向けた基盤技術の確立を目指す。具体的な項目としては、1. パラメトリック励振・振動検出機構の高効率化、2. エネルギー散逸のメカニズムの解明と制御、3. 素子の結合動作の実現、4. 素子の微細化と高速化および均一化、の4項目に関して研究を進めた。

3. 研究の方法

本研究では、化合物半導体ヘテロ構造をベースとした伝導チャンネルを有する構造（変調ドープ構造ならびに伝導層・絶縁層からなら2層構造）を用いて作製したパラメトリック機械共振器を、その中心的な役割を果たす素子として用いた。この構造では、非常にコンパクトなパラメトリック機械共振器が作製でき、その励振と振動検出、ならびに周波数変調（パラメトリック制御）がオンチップ・シングルデバイスで可能となる。さらに、従来から進めてきた高精度ナノ加工技術や高品質結晶成長技術を、特徴的な3次元構造の作製に応用した点も独自性が高い。

4. 研究成果

本研究で得られた代表的な結果に関し、以下概要を説明する。

(1) パラメトリック周波数変換を用いた複合ロジック素子の提案と実証

前述のとおり、Moore の法則が限界に近づき省エネルギー素子の重要性が高まる昨今、ナノスケールの機械を用いたコンピュータの提案が、いくつかの主要研究機関で行われている。しかし、さまざまな試みにもかかわらず、任意のブール代数を表現できる汎用的な論理素子は未だ実現されていないのが現状である。我々は、電気機械共振器における非縮退パラメトリック増幅を用い、このような演算を実現できる素子を新たに提案した。

我々は量子光学で用いられているパラメトリック周波数（波長）変換の概念を微小な

機械共振器（図1）に対して適用し、機械的な論理演算を実現した。まず、入力情報に対応する複数の2値情報を異なる周波数のナノメートルスケールのポンプ振動として共振器に印加する。次に、これとは独立にシグナル振動を印加すると様々な周波数のアイドラーが機械共振器の有する非線形性により生成される。これらはそれぞれ異なる論理演算の出力に対応するが、重要な点は、これらが単純に2入力1出力の基本論理ゲートだけでなく、それらの複合演算も表現できることである。さらには、それらの複数の演算を一個の素子で並列に処理することが可能である（図2）。これらの結果はナノ機械コンピュータによる論理演算が高い並列処理性を有することを示しており、従来の技術とは全く異なる特徴を持った新しい演算システムとして期待される。

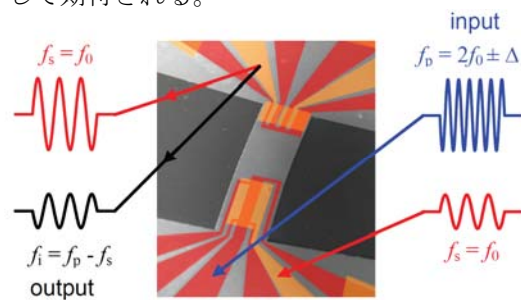


図1：実験に用いた電気機械パラメトリック増幅器。交流電圧を電極に印加すると、圧電効果により面直方向の振動が引き起こされる。シグナル（周波数： f_s ）とポンプ（ f_p ）を加えることにより、その差周波振動がアイドラー（ $f_i = f_p - f_s$ ）として生成される。

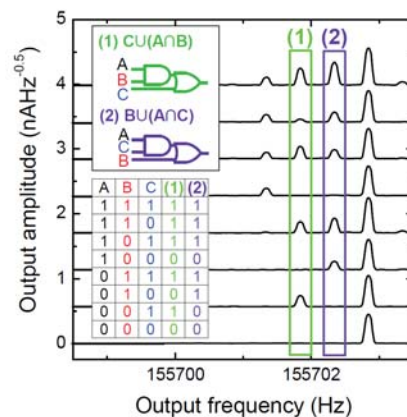


図2：3つのポンプ振動（A、BおよびC）を異なる周波数として加えたときの出力スペクトル。CU（ $A \cap B$ ）およびBU（ $A \cap C$ ）の2つの出力が同時に得られており、並列複合論理演算が実現されている。

(2) GaAs カンチレバーにおけるキャリアを介した光-機械結合

近年、マイクロメカニカル素子における光

一機械結合が注目されている。光キャビティにより生み出される放射圧や光熱応力により素子は反作用を受け、振動の増幅や自励発振、また減衰や振動モードの冷却が実現する。これに対し、我々は光キャビティを必要としない新しい光一機械結合を見出した。バンドギャップ波長近傍のレーザ照射により GaAs カンチレバー[図3]の振動振幅を著しく変化させることに成功した[図4]。

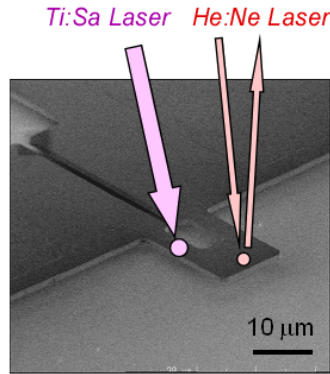


図3：カンチレバーのSEM像。

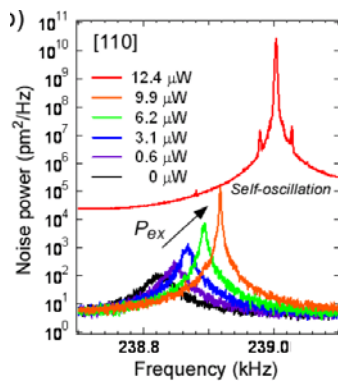


図4：変位ノイズパワースペクトルのレーザ強度依存性。

この新しい光一機械結合は、光励起キャリアにより生み出される圧電効果に起因している。この光圧電応力がカンチレバーに反作用を与え、カンチレバーの熱振動は影響を受ける。レーザ強度が閾値を超える ($P_{ex} > 10 \mu W$) とダンピングが消え、カンチレバーは自励振動する。この光圧電効果によるフィードバックは歪による光吸収変化に大きく依存しており、歪に敏感な吸収端近傍のレーザ波長 ($\lambda_{ex} = 840 \text{ nm}$) において反作用は増強される。

このキャリアを介した光一機械結合は、従来の光一機械結合に比べ半導体光デバイスとの融合性において大きな利点がある。また、キャリアの動的過程や歪効果、キャリアに関連したエネルギー散逸などの半導体特性を研究するツールとしても期待される。

(3) 結合機械振動子の完全周波数チューニン

グと電荷検出への応用

ナノ機械パラメトロン素子を集積化するためには、異なる機械振動子間を結合し、それらの間のバイナリー情報の転送を行わなければならない。このような応用を念頭に、最も基本的な構造となる二つの機械共振器を結合させた素子を実現した。図5は、その素子の電子顕微鏡写真である。

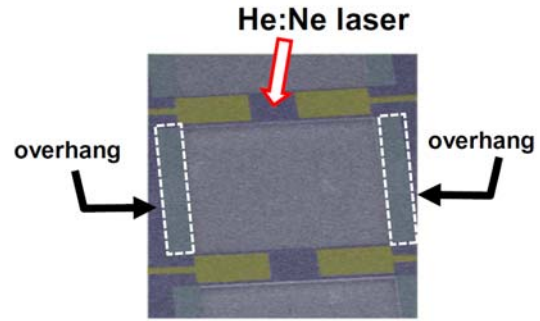


図5：作製した結合機械振動子構造。共振周波数の高い梁にレーザ光を照射し、熱膨張によって発生した応力により、二つの共振周波数を一致させる。梁の長さは $40 \mu m$ である。

二つの梁は、図中に示した二つの overhang 部を介して機械的に結合している。微細加工におけるばらつきにより、二つの梁の共振周波数は1%程度異なっているが、共振周波数の高い梁にレーザ光を照射することにより梁の熱膨張を引き起こし、それにより発生する応力を用いて二つの梁の共振周波数を一致させることができる。結合振動子においては、対称振動モード、反対称振動モードの二つの振動モードが存在するが、共振周波数を完全に一致させた状態では、反対称振動モードにおいては重心運動を伴わないため、試料全体を圧電素子により面直方向に振動させた場合、振動は励起されない。しかし、二つの振動子の周波数がほんの少しずれただけで、反対称モードは励振されるため、このモードは高感度の周波数シフトの検出器として動作する。このような新しい手法を提案し、実際に電極に加えられた約150電子による周波数のシフトを室温で検出することに成功した。

(4) 微小機械構造を高精度で作製するために必要なナノ加工技術の高度化

このような微小機械振動子の作製には、高精度のナノ加工技術と結晶成長技術が必要となる。これらの基本技術の高度化に関する研究も進め、新しい3次元レジスト塗布技術の確立や、ブロックコポリマーの高速配向技術などにおいて進展が見られた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計22件)

下記の論文はすべて査読有

- (1) H. Yamaguchi, K. Kato, Y. Nakai, K. Onomitsu, S. Warisawa, and S. Ishihara, "Improved resonance characteristics of GaAs beam resonators by epitaxially induced strain", *Appl. Phys. Lett.* 92, 251913 (2008)
- (2) H. Okamoto, D. Ito, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "Thermoelastic damping in GaAs micromechanical resonators", *Phys. Stat. Sol.* 5, 2920 (2008)
- (3) S. Etaki, M. Poot, I. Mahboob, K. Onomitsu, H. Yamaguchi, and H. S. J. van der Zant, "Motion detection of a micromechanical resonator embedded in a d.c. SQUID", *Nature Phys.* 4, 785 (2008)
- (4) K. Yamazaki and H. Yamaguchi, "Flexible nanofabrication in three-dimensional electron-beam lithography enhanced by suppression of proximity effect", *Appl. Phys. Express* 1, 09701 (2008)
- (5) M. Nagase, H. Hibino, H. Kageshima and H. Yamaguchi, "In-plane conductance measurement of graphene nanoislands using an integrated nanogap probe", *Nanotechnology* 19, 495701 (2008)
- (6) K. Yamazaki and H. Yamaguchi, "Three-dimensional alignment with 10 nm order accuracy in electron-beam lithography on rotated sample for three-dimensional nanofabrication" *J. Vac. Sci. Technol.* B26, 2529 (2008)
- (7) H. Okamoto, D. Ito, K. Onomitsu, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, "Controlling Quality Factor in Micromechanical Resonators by Carrier Excitation", *Appl. Phys. Express* 2, 035001 (2009)
- (8) I. Mahboob, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Room temperature piezoelectric displacement detection via a silicon field effect transistor" *Appl. Phys. Lett.* 95, 233102 (2009)
- (9) K. Tamaru, K. Nonaka, M. Nagase, H. Yamaguchi, S. Warisawa, and S. Ishihara, "Direct actuation of GaAs membrane with the microprobe of scanning probe microscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 06FG06 (2009)
- (10) K. Nonaka, K. Tamaru, M. Nagase, H. Yamaguchi, S. Warisawa, and S. Ishihara, "evaluation of thermal mechanical vibration amplitude and mechanical properties of carbon nanopillars using scanning electron microscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 06FG07 (2009)
- (11) H. Okamoto, T. Kamada, K. Onomitsu, I. Mahboob, and H. Yamaguchi, "Optical tuning of coupled micromechanical resonators", *Appl. Phys. Express* 2, 062202 (2009)
- (12) V. K. Singh, K. Yamazaki, T. Tawara, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, "Fabrication of nano-mechanical Structures from bulk-GaAs using angled Ion Etching", *Appl. Phys. Express* 2, 065001 (2009)
- (13) H. Okamoto, D. Ito, K. Onomitsu, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, "Controlling quality factor in micromechanical resonators by carrier excitation", *Appl. Phys. Express* 2, 035001 (2009)
- (14) T. Watanabe, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "Feedback cooling of a strained GaAs micromechanical beam resonator", *Appl. Phys. Express* 3, 065201 (2010)
- (15) I. Mahboob, C. Froitier, and H. Yamaguchi, "A symmetry-breaking electromechanical detector", *Appl. Phys. Lett.* 96, 213103 (2010)
- (16) I. Mahboob, E. Flurin, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Enhanced force sensitivity and noise squeezing in an electromechanical resonator", *Appl. Phys. Lett.* 97, 243105 (2010)
- (17) H. Okamoto, T. Kamada, K. Onomitsu, I. Mahboob, H. Yamaguchi, "Tunable coupling of mechanical vibration in GaAs micro-resonators", *Physica E* 42, 2849 (2010)
- (18) K. Yamazaki and H. Yamaguchi, "Resist coating on vertical side faces using conventional spin coating for creating three-dimensional nanostructures in semiconductors", *Appl. Phys. Express* 3, 106501 (2010)
- (19) M. Poot, S. Etaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, H. Yamaguchi, Ya. M. Blanter, and H. S. J. van der Zant, "Tunable backaction of a dc SQUID on an integrated micromechanical resonator", *Phys. Rev. Lett.* 105, 207203 (2010)
- (20) H. Okamoto, N. Kitajima, K. Onomitsu, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, and H. Yamaguchi, "High-sensitivity charge detection using antisymmetric vibration in coupled micromechanical oscillators", *Appl. Phys. Lett.* 98, 014103 (2011)
- (21) H. Okamoto, D. Ito, K. Onomitsu, H. Sanada, H. Gotoh, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, "Vibration amplification, damping, and self-oscillations in micro-mechanical resonators induced by opto-mechanical coupling through carrier excitation", *Phys. Rev. Lett.* 106, 036801 (2011)
- (22) I. Mahboob, E. Flurin, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Inter-connect-free parallel logic cir-

cuits in a single mechanical resonator”,
Nature Communications , 2, 198 (2011)

[学会発表] (計 31 件)

- (1) H. Yamaguchi and I. Mahboob, “On-chip micro-mechanical parametric resonator based on the piezo-electricity in GaAs/AlGaAs modulation-doped hetero-structures”, 66th-Device-Research-Conference, 2008. 6. 23, SantaBarbara, CA, US
- (2) K. Yamazaki and H. Yamaguchi, “3D alignment with 10-nm order accuracy in electron-beam lithography on rotated sample for 3D nanofabrication”, 52nd International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication, 2008. 5. 28, Portland, US
- (3) I. Mahboob and H. Yamaguchi, “The quantum Hall effect probed via a parametrically pumped electromechanical resonator”, Frontiers of Low-Temperature-Physics, 2008. 8. 14, London, UK
- (4) H. Yamaguchi and I. Mahboob, “Micro/Nano-mechanical systems for information Processing”, The 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology, 2008. 8. 27, Saitama, (招待)
- (5) K. Kato, K. Onomitsu, S. Warisawa, S. Ishihara, and H. Yamaguchi, “Drastic improvement in mechanical properties of micromechanical resonators using a strain-engineered hetero-structures”, 2008 International Conference on Molecular Beam Epitaxy”, 2008. 8. 7, Vancouver, Canada
- (6) H. Yamaguchi, “Compound semi-conductor nano-mechanics”, 35th-International Symposium on Compound Semiconductors, 2008. 9. 21, Rust, Germany (招待)
- (7) M. Imran and H. Yamaguchi, “Bit operation in a parametrically pumped electromechanical resonator”, 2008 International Symposium on Novel Nano-electro-mechanical 3D Structures, 2008. 10. 23, Ishikawa, (招待)
- (8) H. Yamaguchi, “Novel-functionalities in semiconductor-based micro/nanomechanical Systems” 21st-International Micro-processes and Nanotechnology Conference, 2008. 10. 29, Fukuoka, (招待)
- (9) I. Mahboob, and H. Yamaguchi, “Electro-mechanical parametric resonators fabricated from semiconductor heterostructures”, Advanced Hetero-structures and Nanostructures Workshop, 2008. 12. 9, Hawaii, US
- (10) H. Yamaguchi, “Micro/Nanomechanical systems based on compound semiconductor heterostructures”, Frontiers of Nano-scale Science and Technologies Symposium (招待), 2009. 5. 29, Boston
- (11) H. Yamaguchi, “Hetero-structure-based Micro/Nano-mechanical Systems”, 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS18) (招待), 2009. 7. 20, Kobe
- (12) I. Mahboob, C. Froitier, and H. Yamaguchi, “Manipulating the dynamical potential well of a parametric resonator”, 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, 2009. 7. 23, Kobe
- (13) H. Okamoto, T. Kamada, K. Onomitsu, I. Mahboob, and H. Yamaguchi, “Tunable coupling of mechanical vibration in GaAs micro-resonators”, 14th-International Conference on Modulated Semiconductor Structures, 2009. 7. 23, Kobe
- (14) H. Yamaguchi, “Compound Semiconductor Micro/Nanomechanical Systems”, Topical Workshop on Hetero-structure Micro-electronics (招待), 2009. 8. 27, 長野
- (15) K. Tamaru, K. Nonaka, M. Nagase, H. Yamaguchi, R. Kometani, S. Warisawa, and S. Ishihara, “Dynamic characterization method of GaAs membrane resonator by direct excitation using scanning probe microscopy”, MNE2009, 2009. 9. 30, Belgium
- (16) I. Mahboob and H. Yamaguchi, “Electromechanical systems for memory and logic”, International Conference on Solid State Devices and Materials (招待), 2009. 10. 8, Sendai
- (17) I. Mahboob, K. Nishiguchi, A. Fujiwara and H. Yamaguchi, “Piezo-electric displacement detection in a micro-electromechanical resonator via a silicon field effect transistor”, International Symposium on Advanced Nano-devices and Nano-technology, 2009. 12. 1, Hawaii, US
- (18) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and K. Onomitsu, “Micro/Nano-electro-mechanical systems for advanced semiconductor devices”, 2010 International RCIQE/CREST Joint Workshop (招待), 2010. 3. 2, Sapporo
- (19) H. Okamoto, C.-Y. Chang, K. Onomitsu, E. Y. Chang, and H. Yamaguchi, “Perfect frequency tuning of coupled nanomechanical resonators by piezoelectric effect”, 2010 Gordon Research Conference, 2010. 3. 22, Galveston, US
- (20) K. Onomitsu, I. Mahboob, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, “Spin dynamics characterized using a micro-mechanical GaMnAs cantilever”, 2010 Gordon Research Conference, 2010. 3. 22, Galveston, US
- (21) I. Mahboob, E. Flurin, K. Nishiguchi,

- A. Fujiwara and H. Yamaguchi, “Electromechanical logic gate”, 2010 Gordon Research Conference, 2010.3.22, Galveston, US
- (22) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and K. Onomitsu, “Micro/Nanoelectromechanical systems for advanced semiconductor devices” 2010 International RCIQE/CREST Joint Workshop, (招待) 2010.3.2 Sapporo
- (23) I. Mahboob, E. Flurin, K. Nishiguchi, A. Fujiwara and H. Yamaguchi, “Displacement noise squeezing in an electromechanical resonator”, 2010 International Symposium on Compound Semiconductors, 2010.6.4, Takamatsu
- (24) H. Okamoto, N. Kitajima, K. Onomitsu, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, and H. Yamaguchi, “Sensitive charge detection using perfectly-tuned coupled nanomechanical oscillators”, Int. Workshop on Nano-mechanical Cantilever Sensors, 2010.5.27, Banff
- (25) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and K. Onomitsu, “Challenge for electro-mechanical logic systems using compound semiconductor heterostructures”, 2010 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, 2010.6.30, Tokyo (招待)
- (26) H. Yamaguchi, H. Okamoto, Y. Maruta, S. Ishihara, and Y. Hirayama, “Mechanical to electrical energy transduction using a micromechanical 2DES cantilever”, 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy 2010.8.24, Berlin (招待)
- (27) H. Okamoto, C.-Y. Chang, K. Onomitsu, E. Y. Chang, and H. Yamaguchi, “Detuning dependence of the nonlinear resonance in coupled nanomechanical oscillators”, Workshop on Nano-Opto-Electromechanical Systems Approaching the Quantum Regime, 2010.9.7, Trieste, Italy
- (28) H. Okamoto, C.-Y. Chang, K. Onomitsu, E. Y. Chang, and H. Yamaguchi, “Piezoelectric coupled nanomechanical oscillators based on GaAs/AlGaAs heterostructures”, 2010 Workshop on Innovative Devices and Systems (WINDS2010), 2010.12.9, Hawaii, US
- (29) H. Yamaguchi, “Quantum effects of motion”, Japanese-American Frontier of Science Symposium(招待)2010.12.5, Chiba
- (30) H. Okamoto, D. Ito, K. Onomitsu, H. Sanada, H. Gotoh, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, “Carrier-mediated optomechanical coupling in GaAs cantilevers”, Frontiers in Nano-scale Science and Technology (招待), 2011.1.6, Saitama

- (31) I. Mahboob, E. Flurin, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, “Displacement noise squeezing in an electromechanical resonator”, Frontiers in Nano-scale Science and Technology, 2011.1.6, Saitama

[その他]

ホームページ：<http://www.brl.ntt.co.jp/>
新聞報道他：

- (1) 子供の科学、100兆分の1メートルの振動をキャッチする板バネ、2008.11
- (2) 日刊工業新聞、微細振動検出に成功、2008.9.1
- (3) 日経新聞、100兆分の1メートルの振動検出、2008.9.1
- (4) 日経産業新聞、100兆分の1メートルの振動検出、2008.9.1
- (5) 日刊工業新聞、板バネの振動で演算、2011.2.16
- (6) 通信興業新聞、ナノマシンコンピュータへ一歩、2011.2.21
- (7) 科学新聞、微妙な板バネの振動利用、2011.2.25

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 浩司 (YAMAGUCHI HIROSHI)
日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部・部長
研究者番号：60374071

(2) 研究分担者

永瀬 雅夫 (NAGASE MASAO)
徳島大学・大学院
ソシオテクノサイエンス研究部・教授
研究者番号：20393762

山崎 謙治 (YAMAZAKI KENJI)
日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部・主任研究員
研究者番号：40393764

山口 徹 (YAMAGUCHI TORU)
日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部・主任研究員
研究者番号：30393763

岡本 創 (OKAMOTO HAJIME)
日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部・研究主任
研究者番号：20350465

小野満 恒二 (ONOMITSU KOJI)
日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部・研究主任
研究者番号：30350466