

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23241046

研究課題名(和文)半導体非線形ナノメカニカル素子の研究

研究課題名(英文)Semiconductor nonlinear nanomechanical 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・上席特別研究員

研究者番号：60374071

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,700,000円

研究成果の概要(和文)：梁やカンチレバーなどに代表される機械共振器が持つ非線形性を制御・活用し、このような微小機械素子における新しい物理現象の探索とデバイス応用を目指した基礎研究を行った。その結果、極めて狭い線幅で発振するフォノンレージング動作や、振動モード間のパラメトリック周波数変換による振動振幅の高速制御、音波の伝達を電気的に制御する動的フォノンニック結晶素子などの原理実証に成功した。また、これらの手法を活用し、フォノンの量子物理に将来応用可能な、2モードスクイーミング手法の実証にも成功した。これらは、これまで受動的な動作が中心であった機械共振器を、能動素子として応用できる可能性を示したものである。

研究成果の概要(英文)：We studied the nonlinear dynamics of mechanical resonators to find new physical phenomena and to develop novel-concept mechanical devices. We demonstrated new phonon dynamics, such like phonon lasing, parametric frequency conversion, and dynamic phononic crystal waveguide. The phonon lasing operation generates very clean mechanical oscillation using the similar principle as optical lasers. The parametric frequency conversion enables rapid transfer of mechanical oscillation between different mechanical modes, allowing the fast annihilation of mechanical vibrations. The dynamic phononic crystal waveguide makes it possible to switch the propagation of sound waves with electrical signals. We also demonstrated 2-mode squeezing, which can be applied to study quantum mechanical behavior of phonons in future. These results provide the possibility to use the mechanical resonators, which was so far used only as passive devices, as more important active devices in future.

研究分野：ナノメカニクス

キーワード：ナノメカニクス マイクロメカニクス ナノマシン 非線形素子 化合物半導体

1. 研究開始当初の背景

研究を開始した当時、ナノ機械共振器に関連する研究は世界の著名研究機関において著しい勢いで進展しはじめていた。関連する論文は研究開始直近の5年間で Nature 誌に10件以上採択されており、近年最も大きく発展している基礎研究分野の一つであった。ナノ機械共振器がこのように注目を集めている原因のひとつは、その線形共振器としての素性の良さである。共振器の振動数は微細化によりすでに1GHzを超え、また共振のQ値は様々な試みにより室温で100万を突破していた。このような高速・低損失共振器を用い、超高感度の物理量センサーや低消費電力ロジック応用、さらには巨視的物系における量子効果の研究などが進展している状況であった。しかし、それまでの研究の殆どは共振器の振幅が極めて小さく、弾性的な応答が線形領域での研究が主体であった。ダフニング共振器としての非線形性など、ナノ機械共振器における非線形現象は初期の段階から認知されていたが、それを積極的に応用しようとする試みは殆ど行われてこなかった。その理由は、このような非線形性が材料や構造固有の性質であり、それを精密に制御することが困難であったためである。

2. 研究の目的

上記の背景の中、本研究では研究チームが有する独自技術を用いてナノ機械共振器の非線形性を高度に制御し、従来の線形領域の応答では実現できない新しいナノ機械の素子応用を開拓することを目的とした。本研究における4年間の具体的な目的は下記の4点とした。

(1) ナノ機械ロジックシステムの高機能化

CMOS技術とは相補的で、消費電力が著しく小さく耐環境性の高い演算システムとして、素子の非線形性を用いた新しい概念のナノ機械ロジックシステムの研究を進める。素子の持つ高次の振動モードを有効に活用し、これまでナノ機械ロジックの問題であった速度ならびに集積度を解決するロジックシステムの基盤技術の確立を目的とした。

(2) 単電荷検出

これまでナノ機械素子は多くの高感度センサーとして用いられてきた。非線形性に起因する双安定状態を用いると、シングルショットで物理量を検出することが可能である。本研究ではナノ機械共振器の非線形性を用いて単電子レベルの電荷検出を実現することも目的とした。

(3) 周波数変換によるフォノンレーズング

上記2つに比較して難易度がさらに高い目標として、全機械的フォノンレーズングを目指す。パラメトリック結合光共振器を用いたフォノンレーズングについては既に報告例があるが、本研究ではオンチップの全機械的フォノンレーズング動作を、パラメトリック結合機械共振器を用いて実現する。パラ

メトリック周波数変換によって放出されるフォノンを共振器内に閉じ込め、フォノンの誘導放出さらにはレーズングを目指す。

(4) 新しい非線形ナノ機械共振器の応用

研究の進捗とともに見出される知見を元に、機械共振器の非線形性を用いた新しい素子応用を開拓することも目的の一つとした。

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・絶縁層からなる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、機械共振器の非線形性を生み出す中心的な役割を果たす素子として用いた。この構造では、非常に安定性の高い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)がオンチップで可能となる。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に高い独自性を有す。

4. 研究成果

パラメトリック周波数変換を用いたナノ機械ロジックの手法における課題点として、機械構造の応答速度の問題があった。この点を改善する上で、まず、異なる振動モードを用いることによるバンド幅の改善に臨んだ。これまでの同一モード内における周波数変換のみならず、異なる振動モード間における周波数変換を実現し、周波数分解に要する時間を大幅に改善するための基盤技術を得た。この手法を用い、異なるモードを異なるビットとして扱うことによるシフトレジスター動作に成功した。

この周波数変換効率の大幅な改善に向けて、異なる振動モード間の強結合を実現することに成功した。この手法により、ナノ機械ロジックのみならず他の様々なナノ機械構造の応用において重要視されている機械構造間の結合動作を、複数の構造を作り込むことなしに実現できる。本成果は量子光学分野における電磁誘導透明化(EIT)を機械構造で実現したことに相当する。

具体的な構造としては、単一梁構造において異なる高次モードを用いる手法と、連結梁構造における対称・反対称モードを用いる手法の二つの場合を試みた。前者では結合効率はやや劣るものの、たった一つの梁構造においても、複数のモードを用いることができるという点において、集積化を行う上で大きなメリットとなる。一方において、後者では大きな結合効率を得られ、量子計算に用いられているパルス制御と同様の手法を用いることにより、機械構造の振動状態を高速にスイッチングすることに成功した。従来、高Q機械共振器の問題点として、振動減衰が遅い点が指摘されていたが、本手法を用いることにより、高速に振動振幅を減衰させることが

可能となった。

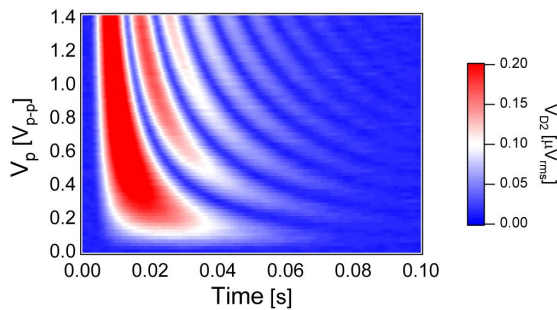


図1：連結梁構造における振動制御実験の結果。二つの振動モードの間で周期的な振動エネルギーの移動が起きる。(論文 No. 12)

このようなパラメトリック周波数変換の手法は、主にフォノンの誘導放出を応用したパラメトリック増幅の手法を用いているが、強く励起した場合には自然放出したフォノンを増幅することによる、フォノンレージングの実現が期待される。このような視点により、単一梁構造においてエネルギー整合した3つの振動モードを活用することにより、全機械的フォノンレージング動作に成功した。具体的には、2.52 MHzのノイズ振動を入力させると、ある閾値以上の励振において、174 kHzと2.35 MHzの二つの機械振動の発振が確認された。特にこの174 kHzの振動は、100 mHz以下の極めて狭い線幅を示し、レージングとしての特性が確認された。

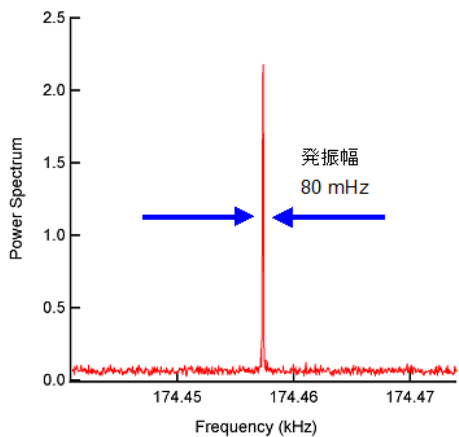


図2：フォノンレージングによって生成された振動スペクトル。入力ノイズの線幅(70 Hz)に比較して、約1000分の1の極めて狭い線幅の発振が確認された。(論文 No. 15)

ここで示されたパラメトリック周波数変換の手法は、機械振動の量子力学的ふるまいを研究する上でも重要な基盤技術を与える。非線形光学においては、パラメトリック増幅は光の量子状態のスケーリングを実現する上で重要な手法として知られており、その手法を機械振動に対して行うことは、フォノンの量子ノイズに対するスケーリングが可能であることを意味する。このような視点より、その第一段階として機械振動の熱雑音

の2モードスケーリングを試みた。結合機械共振器の二つの振動モードに対し、それらの和周波のポンプ振動を与えることにより、二つの振動モードの直交成分(すなわちSin成分とCos成分)が相関を持つ結果、45度に傾いた成分をスケーリングすることに成功した。この時の圧縮度は4.76 dB、相関係数は95%であった。この結果は機械共振器の量子物理への応用上極めて重要であり、H26年度は量子物理への応用に向けた理論研究を推進し、フォノンレージングマシンの提案などを行った。

これらの研究の進捗とともに、結合機械共振器の重要性が明らかとなった。そのデモンストレーションのひとつとして、動的フォノン結晶の実現に取り組んだ。フォノン結晶は、従来光の伝搬制御に用いられてきたフォトニック結晶の概念をフォノン系に対して適用したものであり、これまで容易ではなかったフォノン流の制御が可能となる。しかし、それまで報告されていた素子は殆どが受動素子であり、動的に伝導特性を制御できる能動素子に関する報告は殆ど見られなかった。本研究では化合物半導体を用いた機械共振器における高度な電気制御機能を応用し、フォノン流の制御を可能とする動的フォノン結晶導波路の実現に成功した。

これらの実験には主に二次元電子系を組み込んだ機械共振器を用いているが、この機械共振器を使って二次元電子系の物性を調べる研究についても進展を見た。機械共振のQ値の変化より、二次元電子系におけるエネルギー散逸を評価することに成功した。

その他、半導体構造とのハイブリッド化による新しい機能の創出に関しても、優れた成果が得られた。ひとつは低次元量子デバイスとの融合であり、ポイントコンタクトと機械共振器の結合により、128 fm/Hz^{0.5}の変位検出感度を実現した。もうひとつは光半導体構造との融合であり、変調ドープ構造を機械共振器に組み込むことにより、励起子による吸収を機械的に高感度検出することに成功した。これらの成果は、半導体量子構造との融合により、機械共振器の新しい応用分野が広がる可能性を示唆している。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計32件)

1. I. Mahboob, N. Perrissin, K. Nishiguchi, D. Hatanaka, Y. Okazaki, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Dispersive and Dissipative Coupling in a Micromechanical Resonator Embedded with a Nanomechanical Resonator", *Nano Lett.* 15, 2312-2317 (2015), 査読有, DOI:10.1021/nl5044264
2. D. Hatanaka, I. Mahboob, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "Mechanical random access memory in a phonon circuit",

- Appl. Phys. Exp. 7, 125201-1-4 (2014), 査読有, DOI:10.7567/APEX.7.125201
3. I. Mahboob, H. Okamoto, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "Two-Mode Thermal-Noise Squeezing in an Electromechanical Resonator", Phys. Rev. Lett. 113, 167203-1-5 (2014), 査読有, DOI:10.1103/PhysRevLett.113.167203
 4. H. Okamoto, I. Mahboob, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "Rapid switching in high-Q mechanical resonators", Appl. Phys. Lett. 105, 083114-1-4 (2014), 査読有, DOI:10.1063/1.4894417
 5. D. Hatanaka, I. Mahboob, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "Phonon waveguides for electromechanical circuits", Nature Nanotechnology 9, 520-524 (2014), 査読有, DOI:10.1038/nnano.2014.107
 6. H. Okamoto, W. Izumida, Y. Hirayama, H. Yamaguchi, A. Riedel, and K.-J. Friedland, "Mechanical resonance characteristics of a cylindrical semiconductor heterostructure containing a high-mobility 2DEG", Phys. Rev. B 89, 245304-1-8 (2014), 査読有, DOI:10.1103/PhysRevB.89.245304
 7. I. Mahboob, M. Mounaix, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "A multimode electromechanical parametric resonator array", Sci. Rep. 4, 4448-1-8 (2014), 査読有 DOI:10.1038/srep04448
 8. K. Yamazaki, and H. Yamaguchi, "Universal three-dimensional nanofabrication for hard materials", J. Vac. Sci. Technol. B 31, 051802-1-7 (2013), 査読有 DOI:10.1116/1.4817177
 9. K. Onomitsu, M. Mitsuhashi, H. Yamamoto, and H. Yamaguchi, "Ultrahigh-Q Micromechanical Resonators by Using Epitaxially Induced Tensile Strain in GaNAs", Appl. Phys. Express 6, 111201-1-3 (2013), 査読有 DOI:10.7567/apex.6.111201
 10. Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, and H. Yamaguchi "Quantum point contact displacement transducer for a mechanical resonator at sub-Kelvin temperatures", Appl. Phys. Lett. 103, 192105-1-4 (2013), 査読有 DOI:10.1063/1.4828890
 11. I. Mahboob, V. Nier, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Multi-mode parametric coupling in an electromechanical resonator", Appl. Phys. Lett. 103, 153105-1-4 (2013), 査読有 DOI:10.1063/1.4824925
 12. H. Okamoto, A. Gourgout, C-Y Chang, K. Onomitsu, I. Mahboob, E. Y. Chang, and H. Yamaguchi, "Coherent phonon manipulation in coupled mechanical resonators", Nature Physics 9, 480-484 (2013), 査読有 DOI:10.1038/nphys2665
 13. S. Etaki, F. Konschelle, Ya. M. Blanter, H. Yamaguchi, and H. S. J. van der Zant, "Self-sustained oscillations of a torsional SQUID resonator induced by Lorentz-force back-action", Nature Commun. 4, 1803-1-5 (2013), 査読有 DOI:10.1038/ncomms2827
 14. D. Hatanaka, I. Mahboob, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "A phonon transistor in an electromechanical resonator array", Appl. Phys. Lett. 102, 213102-1-3 (2013), 査読有 DOI:/10.1063/1.4807838
 15. I. Mahboob, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Phonon Lasing in an Electromechanical Resonator", Phys. Rev. Lett. 110,127202-1-5 (2013),査読有 DOI:10.1103/PhysRevLett.110.127202
 16. K. Onomitsu, I. Mahboob, H. Okamoto, Y. Krockenberger, and H. Yamaguchi, "Ferromagnetic-induced component in piezoresistance of GaMnAs", Phys. Rev. B 87, 060410(R) (2013), 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.87.060410
 17. H. Yamaguchi and I. Mahboob, "Parametric mode mixing in asymmetric doubly clamped beam resonators", New J. Phys. 15, 015023-1-16 (2013), 査読有 DOI:10.1088/1367-2630/15/1/015023
 18. H. Yamaguchi, H. Okamoto, S. Ishihara, and Y. Hirayama, "Motion detection of a micromechanical cantilever through magneto-piezovoltage in two-dimensional electron systems", Appl. Phys. Lett. 100, 012106-1-3 (2012), 査読有 DOI:10.1063/1.3674288
 19. H. Yamaguchi, H. Okamoto, and I. Mahboob, "Coherent Control of Micro/Nanomechanical Oscillation Using Parametric Mode Mixing", Appl. Phys. Express 5, 014001-1-3 (2012), 査読有 DOI:10.1143/APEX.5.014001
 20. W. Izumida, Y. Hirayama, H. Okamoto, H. Yamaguchi, and K.-J. Friedland, "Mechanical vibration of a cylindrically rolled-up cantilever shell in microelectromechanical and nanoelectromechanical systems", Phys. Rev. B 85, 075313-1-10 (2012), 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.85.075313
 21. I. Mahboob, Q. Wilmart, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Tuneable electromechanical comb generation", Appl. Phys. Lett. 100, 113109-1-4 (2012), 査読有 DOI:

- 10.1063/1.3694041
22. I. Mahboob, K. Nishiguchi, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, "Phonon-cavity electromechanics", *Nature Physics* 8. 387-392 (2012), 査読有 DOI:10.1038/NPHYS2277
 23. K. Yamazaki and H. Yamaguchi, "Electron beam lithography on vertical side faces of micrometer-order Si block", *J. Vac. Sci. Technol. B* 30, 041601 (2012), 査読有 DOI: 10.1116/1.4719561
 24. T. Watanabe, H. Okamoto, K. Onomitsu, H. Gotoh, T. Sogawa and H. Yamaguchi, "Optomechanical photoabsorption spectroscopy of exciton states in GaAs", *Appl. Phys. Lett.* 101, 082107-1-3 (2012), 査読有 DOI: 10.1063/1.4747328
 25. D. Hatanaka, I. Mahboob, H. Okamoto, K. Onomitsu and H. Yamaguchi, "An electromechanical membrane resonators", *Appl. Phys. Lett.* 101, 063102-1-5 (2012), 査読有 DOI: 10.1063/1.4742868
 26. I. Mahboob, Q. Wilmar, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Wide-band idler generation in a GaAs electromechanical resonator", *Phys.Rev.B*.84.113411-1-4 (2011), 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.84.113411
 27. D. Hatanaka, I. Mahboob, and H. Yamaguchi, "Remote actuation of a mechanical resonator", *Appl. Phys. Lett.* 99, 103105 (2011), 査読有 DOI: 10.1063/1.3635781

[学会発表](計 81 件)

1. H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, D. Hatanaka, "Nonlinear phonon dynamics in electromechanical resonators", ICTS Discussion Meeting on Frontiers in Light-Matter Interactions (招待) Kolkata (India) 2014.12.20
2. H. Yamaguchi, D. Hatanaka, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Opto/electromechanical resonators based on GaAs/AlGaAs heterostructures", International Electron Devices and Materials Symposium (IEDMS 2014) (招待), Hualien (Taiwan) 2014.11.20.
3. 山口 浩司 「メカニカル共振器と量子計測」 H26 年度秋季応用物理学会シンポジウム「量子計測技術の新展開」(招待), 北海道大学(北海道・札幌市) 2014.9.19
4. I. Mahboob, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Phonon-lasing (and mode cooling) in an electromechanical resonator", 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2014) (招待), ヒルトン 福岡シーホークホテル(福岡県・福岡市) 2014.11.5.
5. H. Yamaguchi, D. Hatanaka, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Nonlinear electromechanical resonators - From Phonon Lasing Operation to Nanomechanical Processors -" 6th IEEE International Nanoelectronics Conference (IEEE-INEC2014)(招待), 北海道大学(北海道・札幌市) 2014.7.29
6. I. Mahboob, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, "A correlated electro-mechanical system", International Seminar on Nanomechanical Systems (招待), Paris (France) 2014.7.2
7. H. Yamaguchi, D. Hatanaka, H. Okamoto, and I. Mahboob, "Nonlinear phonon dynamics in electromechanical resonators" ICC-IMR/20th REIMEI International Workshop Spin Mechanics 2 (招待)東北大学(宮城県・仙台市) 2014.6.21
8. H. Yamaguchi, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Nonlinear Dynamics and All Mechanical Phonon Lasing in Electromechanical Resonators", IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS 2014) (招待) Taipei (Taiwan) 2014.5.22.
9. H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and Y. Okazaki "Coherent manipulation and lasing operation in micro-mechanical phonon cavities", The 2013 International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2013) (招待) Kauai (USA), 2013.12.10
10. H. Yamaguchi, H. Okamoto, T. Watanabe, Y. Okazaki, "Mechanical systems coupled to semiconductor quantum structures", CeNS Workshop -Nanosciences: Great Adventures on Small Scales- (招待), San Servolo (Italy) 2013.9.18
11. H. Yamaguchi, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Coherent manipulation and phonon lasing in electromechanical resonators" ICTP Workshop on "Frontiers of Nanomechanics" (招待) Trieste (Italy), 2013.9.12
12. H. Yamaguchi, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Nonlinear phonon dynamics in GaAs/AlGaAs electromechanical resonators", 10th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2013) (招待) 函館国際ホテル(北海道・函館市), 2013.9.3
13. H. Yamaguchi, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Strong modal-coupling and parametric control in electro-mechanical resonators", focused

- international workshop on "Spin Mechanics" (招待) 日本原研・東海研究開発センタ(茨城県・水戸市) 2013.2.25
14. I. Mahboob, S. Miyashita, V. Niel, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Phonon-cavity electromechanics in the strong coupling regime", Interdisciplinary Workshop on Quantum Device (招待) 国立情報学研究所(東京都・千代田区) 2013.1.15.
 15. H. Yamaguchi, H. Okamoto, and I. Mahboob, "Strong coupling and time-domain control in electro-mechanical parametric resonators", 10th RIEC International Workshop on Spintronics (招待) 東北大学(宮城県・仙台市) 2013.1.15
 16. H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto and K. Onomitsu, "Semiconductor Heterostructures for Novel Electromechanical Devices", Material Science Week 2012 (招待) 東北大学(宮城県・仙台市) 2012.11.29
 17. H. Yamaguchi, I. Mahboob and H. Okamoto, "Parametric mode-coupling and its application to signal processing in GaAs/AlGaAs electromechanical resonators", 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS31) (招待) Zurich (Switzerland) 2012.7.31
 18. H. Yamaguchi, I. Mahboob and H. Okamoto, "Piezoelectric parametric resonators", NEMS-Barcelona (招待) Barcelona (Spain) 2012.5.29/30
 19. H. Okamoto, D. Ito, T. Watanabe, K. Onomitsu, H. Sanada, H. Gotoh, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, "Carrier-mediated opto-mechanical coupling in GaAs micromechanical resonators", 17th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON17) (招待) Santa Barbara (USA) 2011.8.12

〔その他〕

1. 「固体材料の振動制御 - 電子素子部分冷却で省エネへ-」日経産業新聞 2014.6.17
2. 「NTT、MEMS技術を利用したフォニック結晶を作製 - 弾性振動を電気制御」日刊工業 2014.6.16
3. 「MEMS レーザ実現」通信興業新聞 2013.3.25
4. 「周波数ゆらぎ 100 万分の 1 - 超高精度の振動子-」日刊工業 2013 年 3 月 19 日
5. なお、雑誌論文 No.15 は下記の 2 件に選

出されている。

- (ア) APS Notes from the Editors: Highlights of the Year (Dec.13, 2013)
<http://physics.aps.org/articles/v6/139>
- (イ) WIRED 's Top Science Stories of the Year, (Dec. 30, 2013)
<http://www.wired.com/2013/12/top-stories-of-the-year-2013/>

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・上席特別研究員
研究者番号: 60374071

(2) 研究分担者

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・主任研究員
研究者番号: 20350465

(3) 研究分担者 (2015 年度は連携研究者)

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・主任研究員
研究者番号: 30350466

(4) 研究分担者 (2015 年度は連携研究者)

マブーブ・イムラン (MABOUB, Imran)
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: 80417097

(5) 研究分担者 (2015 年度のみ)

中ノ勇人 (NAKANO, Hayato)
八戸工業高等専門学校電気情報工学科・教授
研究者番号: 60393774

(6) 連携研究者

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

(7) 連携研究者

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