

機関番号：34315

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21710141

研究課題名（和文）高感度機械量検出を目指したナノ構造のpiezo効果に関する研究

研究課題名（英文）Study on Piezo-effects in Nanostructures For High Sensitive Mechanical Sensing

研究代表者

DAO Viet Dzung (DAO Viet Dzung)

立命館大学・総合理工学研究機構・チェアプロフェッサー

研究者番号：50388138

研究成果の概要（和文）：

本研究は、シリコンナノワイヤ(SNW)のpiezo抵抗効果及びシリコンフォトニック結晶(PhC)ナノキャビティのpiezo光学効果における理論及び実験研究を行った。応力又は歪みの印加によって SNW の電気抵抗及びキャビティの共振波長が変化され、これらのpiezo効果の寸法・結晶方位の依存性を解明した。本研究で得られた成果により、高感度・高分解能機械量センサへの応用が大いに期待できる。

研究成果の概要（英文）：

This study focused on theoretical and experimental studies in piezo-effects of nano structures, such as the piezoresistive effect in single crystal Si nanowire, and the piezo-optical effect in photonic crystal nanocavity. The theoretical and experimental results show big piezo-effects and corresponding orientations of SNW and PhC nanocavity. The research achievements are promising for highly-sensitive mechanical sensing applications.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）

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：piezo抵抗効果、シリコンナノワイヤ、piezo光学効果、フォトニック結晶

1. 研究開始当初の背景

MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサは世界的に研究開発が加速され、情報通信、医療・バイオ、精密機器等の分野でその応用が拡大しつつある。しかしながら、半導体や光に基づいた機械量センサデバイスは近年の微細化に伴って、従来材料の物理的・性能的限界が見え始めている。これをブレイクスルーするために、ナノスケールの超微細構造体特有の物性及び効果を利用した革新的な材料とデバイスの創製が不可欠である。

本研究は、Si ナノスケール構造体の物理特性を明らかにして、新しいセンシング原理の発現と高機能センシングデバイスへの応用研究を推進することを目的とする。MEMS デバイスにおいて、今後、センサの複合多機能化、通信機能の搭載などの高集積・モノリシック化を進めていくためには、処理回路の一体化や実装技術とともに MEMS センサ自体の小型化が強く求められる。たとえば 1mm サイズ以下の MEMS センサ集積チップを実現するためには、個々の検出素子の代表寸法を現在のそ

れの 1/100 以下、すなわち数百 nm 以下に形成することが必要である。このように素子を小型に加工したとき、従来にない特異な物理現象や未知の特性が発現する可能性が期待されるため、理論と実験により新しいセンシング原理の探索を行う必要である。

2. 研究の目的

本研究では Si 半導体材料のナノスケール加工技術を構築するとともに、得られたナノスケール構造体の物理特性を明らかにして、新しいセンシング原理の発現と高機能センシングデバイスへの応用研究を推進することを目的とする。具体的には、Si ナノワイヤ (SNW) の piezo 抵抗効果及びフォトニック結晶 (PhC) ナノ構造の piezo 光学効果のようなナノ構造のセンシング機能における理論および実験的研究に焦点を置く。機械的応力またはひずみの印加によって SNW の電気抵抗変化及びフォトニック結晶ナノ構造 (PhC 導波路やキャビティ等) の光通過強度または共振波長等の変化という piezo 効果を解明し、これらの piezo 効果の寸法・結晶方位・形状等の依存性を理論と実験で評価する。本研究で得られたこれらの研究開発の成果は今後の MEMS センサ技術開発の展開においてきわめて重要かつ有望なものである。

3. 研究の方法

研究の方法としては、理論計算のあと実験で検証することを行う。

(1) SNW の piezo 抵抗効果: 単結晶シリコンのナノ構造について、piezo 抵抗効果を理論的に解析する。理論シミュレーションでは $\langle 001 \rangle$ および $\langle 110 \rangle$ 方位をもつ SNW モデルを導入し、第一原理計算によって得られた電子状態 (バンド構造) から p 型半導体状態のシリコンナノ構造について piezo 抵抗物性を予測する。

実験では、SIMOX (Separation by Implanted Oxygen) を利用して、その基板の上に $\langle 100 \rangle$ と $\langle 110 \rangle$ 方位の SNW を電子描画やプラズマエッチング等の MEMS 製造手法によって製作技術を確立する。

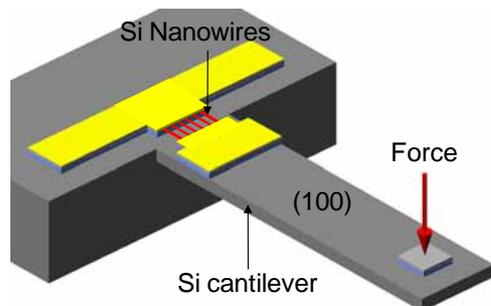


図 1: SNW へひずみを印加するためのカンチレバー構造。

カンチレバー構造 (図 1) を用いて SNW へ応力・ひずみを加えながら、四探針抵抗測定手法で SNW の抵抗値測定を行うことによって、piezo 抵抗効果を定量的に解析する。

(2) PhC ナノ構造の piezo 光学効果:

Si 製 PhC ナノキャビティ (共振器) の piezo 光学効果については、まず数値解析手法 (有限要素法と FDTD 法) を利用して、PhC 共振器の設計と piezo 光学効果の解析を行う。解析結果によって、PhC の piezo 光学効果の材料・寸法・形状・結晶方位の依存性を理論的に解明する。

実験では、Si 製 PhC ナノキャビティのテストデバイス (光導波路やキャビティ) を電子描画・プラズマエッチングなどの MEMS 製造手法によって製作する。カンチレバーを用いて PhC ナノ構造へ応力・ひずみを加え、通過光強度または共振周波数の変化測定によって、PhC ナノキャビティの piezo 光学効果を定量的に測定する。

4. 研究成果

(1) SNW の piezo 抵抗効果:

第一原理計算の結果では、 $\langle 100 \rangle$ 方位に沿って p 型 SNW の長手方向 piezo 抵抗計数はバルクシリコンより 100 倍も大きくなっている結果を始めて得られた。また、 $\langle 110 \rangle$ 方位に沿って p 型 SNW の長手方向 piezo 抵抗係数はバルクシリコンより 60% 程度大きくなった。

実験では、寸法の依存性を調べるため、SIMOX 基板の上に幅 35nm から 500nm の $\langle 100 \rangle$ と $\langle 110 \rangle$ 方位の SNW を電子描画やプラズマエッチング等によって製作した (図 2)。SNW の幅に対する piezo 抵抗係数の依存性を調べた (図 3)。ワイヤ幅を小さくすることによって $\langle 110 \rangle$ 方位では 1.6 倍、 $\langle 100 \rangle$ 方位では 2.4 倍の大きさの縦方向 piezo 抵抗係数が得られるなど、小型化による著しい縦方向 piezo 抵抗係数の増大が見られ、第一原理計算に基づく解析結果に近づく傾向を示すことが明らかになった。また、温度の依存性については、温度が高くなればなるほど、piezo 抵抗計数が下がることを定量的に解明した。

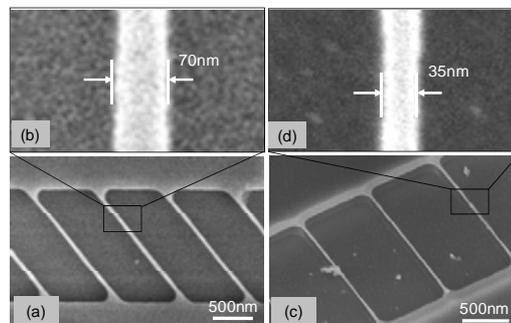


図 2: (a) は $\langle 100 \rangle$ 方向の SNW、(b) は (a) の拡大図、(c) は $\langle 110 \rangle$ 方向の SNW、(d) は (c) の拡大図。

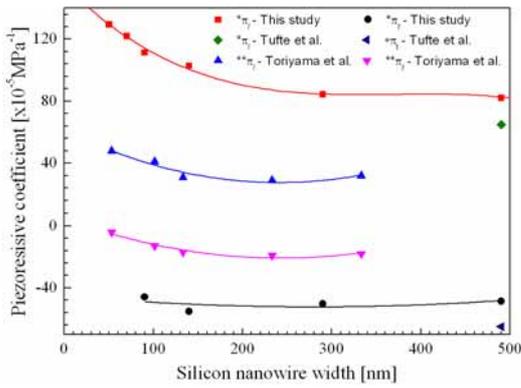


図 3: <110>方向の SNW の幅によって piezo 抵抗係数。(*) 不純濃度: $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, (**) 不純濃度: $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

(2) PhC ナノキャビティの piezo 光学効果: 本研究は三角格子構造の PhC を利用し、一つの穴を減らしたうえ隣りの二つの穴の位置を両側に移動することによって、高い Q-値をもつ PhC ナノキャビティを設計した (図 4)。有限要素法と FDTD 法によって、このキャビティに歪みを印加して、光共振波長の変化を解析した (図 5)。ナノキャビティの共振波長の変化と印加している歪みは線形関係を示し、長手方向及び横方向の歪みに対する共振波長の変化量は 0.1% あたり、それぞれ 1.9nm、0.25 nm であった (図 5)。

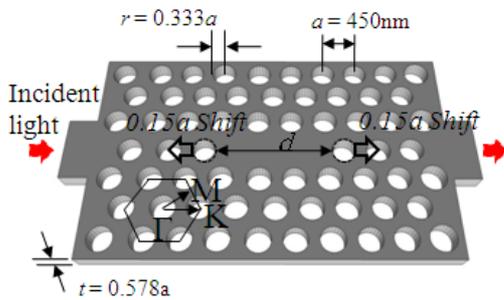


図 4: PhC ナノキャビティの設計図。

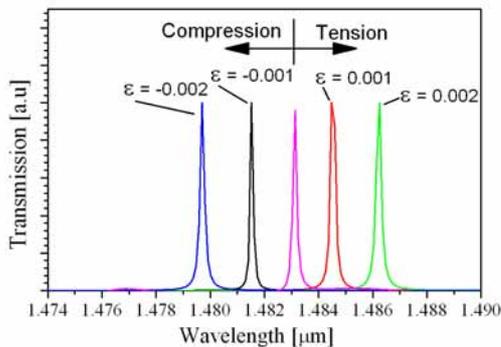


図 5: ひずみの印加によって共振波長の変化 (解析値)。

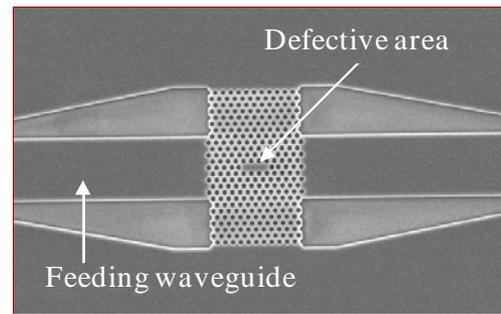


図 6: 製作した Si 製 PhC ナノキャビティ。

実験では、Si 製 PhC ナノキャビティを製作し (図 6)、波長可変レーザー測定システム (図 7) を用いて PhC ナノキャビティの光学特性と piezo 光学特性を測定した (図 8、図 9)。

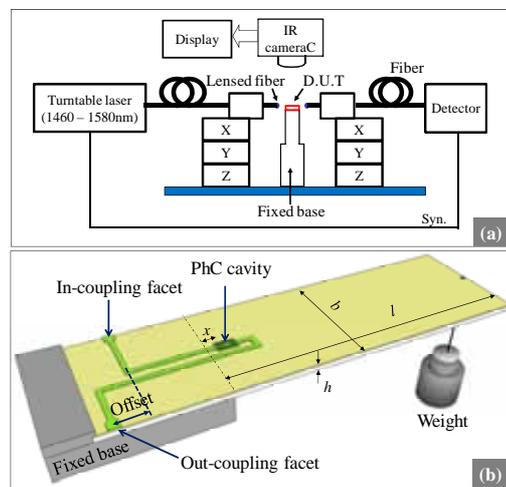


図 7: PhC の piezo 光学特性の測定システム。

測定結果は理論計算とほぼ同じ結果になった。最近のスペクトロメータを利用すれば 8.5×10^{-9} の微細な歪みを検出できることが見込まれる。

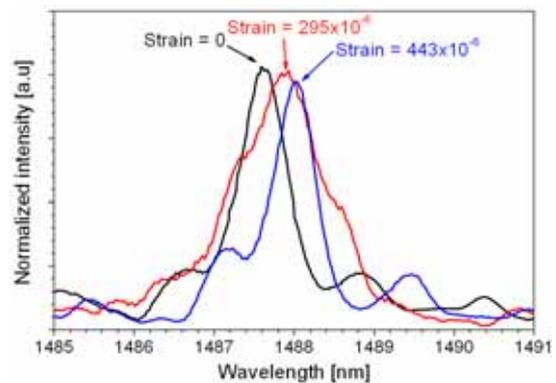


図 8: ひずみの印加によって共振波長の変化 (測定値)。

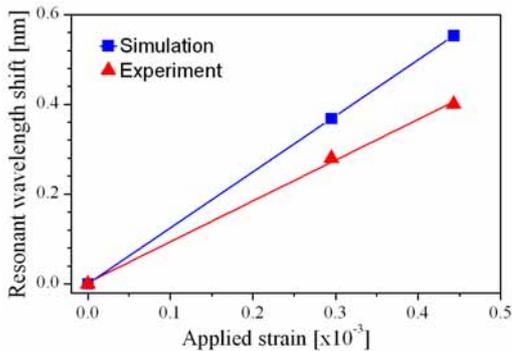


図 9：ひずみの変化によって共振周波数の変化（理論と実験）。

本研究成果には対して立命館大学が有する piezo 抵抗素子や MEMS 機械量センサ設計に関する独自技術を適用することで、シリコンナノワイヤ piezo 抵抗素子や PhC ナノキャビティの piezo 光学素子を応用した世界最小クラス MEMS 機械量センサの製作プロセス・構造設計の指針が確立できた。今後の MEMS センサ技術開発において世界的なリードを保つ上で、きわめて重要かつ有望な研究成果であると考えている。

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 11 件)

著者名: Bui T. Tung, Hoang M. Nguyen, Dzung Viet Dao, S. Rogge, H. W. M. Salemink and S. Sugiyama、論文標題: Strain sensitive effect in a triangular lattice photonic crystal hole-modified nanocavity、雑誌名: IEEE Sensors Journal、査読: 有、発行年: 2011、ページ: 印刷中

著者名: Bui T. Tung, Dzung Viet Dao, S. Sugiyama、論文標題: Nanostrain Sensing Based on Piezo-Optic Property of a Photonic Crystal Cavity、雑誌名: IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines、査読: 有、巻: 131、号: 7、発行年: 2011、ページ: 印刷中

著者名: Bui T. Tung, Dzung Viet Dao, Taro Ikeda, Y. Kanamori, K. Hane and S. Sugiyama、論文標題: Investigation of strain sensing effect in modified single-defect photonic crystal nanocavity、雑誌名: Optics Express、査読: 有、巻: 19、号: 9、発行年: 2011、ページ: 8821-8829

著者名: Dzung Viet Dao, Tung T. Bui, K. Nakamura, Van T. Dau, T. Yamada, K. Hata and S. Sugiyama、論文標題: Towards highly

sensitive strain sensing based on nanostructured materials、雑誌名: Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology、査読: 有、巻: 1、号: 045012、発行年: 2010、ページ: 8pp

著者名: R. Amarasinghe, Dzung Viet Dao, S. Sugiyama、論文標題: Novel Three-Axis Solid-state Micro Accelerometer with Surrounding Beam Structure、雑誌名: IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines、査読: 有、巻: 130、号: 6、発行年: 2010、ページ: 242-246

著者名: Van T. Dau, Takeo Yamada, Dzung Viet Dao, Bui Thanh Tung, Kenji Hata and Susumu Sugiyama、論文標題: Integrated CNTs thin film for MEMS mechanical sensors、雑誌名: Journal of Microelectronics、査読: 有、巻: 41、発行年: 2010、ページ: 860-864

著者名: Dzung Viet Dao, K. Nakamura, Tung T. Bui and S. Sugiyama、論文標題: Micro/nano Mechanical Sensors and Actuators Based on SOI-MEMS Technology、雑誌名: Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol. IOP Publishing Ltd, UK、査読: 有、巻: 1、号: 013001、発行年: 2010、ページ: 10pp

〔学会発表〕(計 12 件)

発表者名: Dzung V. Dao, Tung T. Bui, K. Nakamura and S. Sugiyama、発表標題: Towards Highly Sensitive Strain Sensing Based on Nanostructured Materials、学会名: The 5th International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology、発表年月日: 2010年11月10日、発表場所: ハノイ(ベトナム)

発表者名: Dzung V. Dao, Tung T. Bui and S. Sugiyama、発表標題: Theoretical Investigation of Piezo-Optic Effect in Photonic Crystal Nanocavity for Nanostrain Detection、学会名: IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science、発表年月日: 2010年11月9日、発表場所: 名古屋大学(愛知県)

発表者名: Bui T. Tung, Dzung V. Dao, S. Sugiyama, Hoang M. Nguyen, S. Rogge, and Huub W. M. Salemink、発表標題: Strain Sensitivity of a Modified Single-Defect Photonic Crystal Nanocavity for Mechanical Sensing、学会名: 9th IEEE International Conference on Sensors、発表年月日: 2010年11月4日、発表場所: Hawaii (USA)

発表者名: Bui T. Tung, Dzung V. Dao, S. Sugiyama、発表標題: Nanostrain Sensing Based on Piezo-optic Property of a

Photonic Crystal Filter、学会名：The 27th Sensor Symposium, (IEEJ)、発表年月日：2010年10月15日、発表場所：くにびきメッセ(鳥根県)

発表者名：R. Amarasinghe, Dzung Viet Dao, Van T. Dau, and S. Sugiyama、発表標題：Sensitivity Enhancement of Piezoresistive Micro Acceleration Sensors with Nanometer Stress Concentration Regions on Sensing Elements、学会名：15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers09)、発表年月日：2009年6月24日、発表場所：Colorado (USA)

発表者名：Bui T. Tung, Dzung Viet Dao, T. Toriyama, S. Sugiyama、発表標題：Evaluation of the Piezoresistive Effect in Single Crystalline Silicon Nanowires、学会名：8th IEEE International Conference on Sensors (IEEE SENSORS 2009)、発表年月日：2009年10月25-28日、発表場所：Christchurch (New Zealand)

発表者名：Tung T. Bui, Dzung V. Dao, K. Nakamura, T. Toriyama and S. Sugiyama、発表標題：Characterization of the Piezoresistive Effect and Temperature Coefficient of Resistance in Single Crystalline Silicon Nanowires、学会名：IEEE Int'l Symp. on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2009)、発表年月日：2009年11月9-11日、発表場所：名古屋大学 (愛知県)

発表者名：K. Nakamura, Dzung V. Dao, Bui T. Tung, T. Toriyama and S. Sugiyama、発表標題：Piezoresistive Effect in Silicon Nanowires - A Comprehensive Analysis Based on First-Principles Calculations、学会名：IEEE Int'l Symp. on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2009)、発表年月日：2009年11月9-11日、発表場所：名古屋大学 (愛知県)

発表者名：Dzung Viet Dao, K. Nakamura, S. Sugiyama、発表標題：Micro/Nano Mechanical Sensors and Actuator Based on Silicon MEMS Technology、学会名：The 2nd Int'l Workshop on Nanotechnology and Application、発表年月日：2009年11月12日、発表場所：Vungtau(Vietnam)

〔図書〕(計1件)

著者名：中村康一、Dzung Viet Dao、磯野吉正、鳥山寿之、杉山進、出版社名：In-Tech, Vienna、書名："Nanowires", 第15章："Electronic States and Piezoresistivity in Silicon Nanowires"、発行年：2010、ページ数：pp. 297-314

6. 研究組織

(1)研究代表者

DAO Viet Dzung (DAO Viet Dzung)
立命館大学・総合理工学研究機構・チェア
プロフェッサー
研究者番号：50388138

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

ブイ タイン トン (Bui Thanh Tung)
立命館大学・理工学研究科・博士後期課程