

Title	MEMSによるナノカーボン歪印加素子開発と連続可変電子状態制御
Sub Title	Development of CNT-strain device with MEMS technique and electronic state control
Author	牧, 英之(Maki, Hideyuki)
Publisher	
Publication year	2016
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2015. )
JaLC DOI	
Abstract	<p>通常の半導体材料では、バンドエンジニアリングは組成制御やドーピングにより行われるため、外部から変調することは難しい。本研究では、次世代バンドエンジニアリングとしてナノカーボンに注目し、MEMS技術を用いた歪印加素子を開発し、歪によるバンドギャップ変調技術の構築を行った。その結果、カーボンナノチューブへ歪印加可能なデバイス作製に成功し歪印加によるPL波長シフトの観測に成功した。</p> <p>For conventional semiconducting materials, band-gap engineering is realized by the composition control and doping. In this study, we focused on carbon nanotubes as a new material for band-gap engineering. We developed a strain device with MEMS technology, and we established the band-gap modulation technique with strain. We fabricated the CNT-strain devices, and we observed the emission wavelength shift under strain.</p>
Notes	研究種目：挑戦的萌芽研究 研究期間：2014～2015 課題番号：26630300 研究分野：半導体工学
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_26630300seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_26630300seika</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630300

研究課題名(和文) MEMSによるナノカーボン歪印可素子開発と連続可変電子状態制御

研究課題名(英文) Development of CNT-strain device with MEMS technique and electronic state control

研究代表者

牧 英之(Maki, Hideyuki)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：10339715

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：通常の半導体材料では、バンドエンジニアリングは組成制御やドーピングにより行われるため、外部から変調することは難しい。本研究では、次世代バンドエンジニアリングとしてナノカーボンに注目し、MEMS技術を用いた歪印可素子を開発し、歪によるバンドギャップ変調技術の構築を行った。その結果、カーボンナノチューブへ歪印加可能なデバイス作製に成功し歪印加によるPL波長シフトの観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：For conventional semiconducting materials, band-gap engineering is realized by the composition control and doping. In this study, we focused on carbon nanotubes as a new material for band-gap engineering. We developed a strain device with MEMS technology, and we established the band-gap modulation technique with strain. We fabricated the CNT-strain devices, and we observed the emission wavelength shift under strain.

研究分野：半導体工学

キーワード：カーボンナノチューブ 半導体物性 光物性

## 1. 研究開始当初の背景

現在の半導体技術は、バンドギャップをエネルギー的・空間的に制御する“バンドエンジニアリング”により様々な機能素子を実現してきたが、既存のバンドエンジニアリングは、組成制御やドーピングなどのプロセス時で導入されるため、一旦デバイスを作製すると、外部から変調することは難しい。本研究では、次世代のバンドエンジニアリング材料として、カーボンナノチューブに注目し、MEMS 技術を用いて一本のカーボンナノチューブへの歪印加素子を開発し、歪印加に同期したバンドギャップの高速変調という新たなバンドエンジニアリングの構築を行うことを目的とする。また本素子を用いて、電気的なバンドギャップ変調観測、バンドギャップ変調による波長可変発光素子、超小型分光器の開発を行うことを目指す。

CNT は、その高い一次元性・結晶性・電気伝導特性を利用した量子細線/ドット・電界効果トランジスタなどの電子デバイスをはじめ、半導体 CNT による 0.9~1.6 $\mu\text{m}$  程度の近赤外光通信波長帯における光デバイス材料としても注目され、CNT を用いた光デバイス、光・電子デバイスも次々と報告されている。さらに CNT は、 $\text{sp}^2$  結合による強固な結合と高い弾性を持つ極めて機械的特性に優れた材料であり、従来の固体半導体では難しい大きな歪印加が可能である。本研究では、これらの CNT 特有な性質に着目して、外部入力として応力を印加して CNT に連続的な歪を印加することにより、バンドギャップを連続可変的に制御する、歪印加バンドギャップチューニングの実現を試みる。研究代表者は、これまでに圧電素子を用いた一本の CNT への歪印加素子の試作に着手し、歪印加によりバンドギャップの連続変調が可能であることを世界に先駆けて明らかにした。しかし、現在の圧電素子を用いた歪印加素子は、素子サイズが大きい (7mm)、高速変調が困難、CNT への電極形成が困難などの問題があることから、理論的に予想される高速バンド変調や金属-絶縁体転移といった新規物性およびその光・電子デバイスへの実用化は難しい。そこで、本研究では、圧電素子に代わる新たな歪印加素子として、MEMS 技術に基づく新規歪印加素子を開発し、バンドギャップ変調の観測を試み、波長可変発光素子・超小型分光器等への応用の可能性を示す。

## 2. 研究の目的

CNT の電子物性・輸送特性・光物性は、これまでの世界中の研究者による実験でほとんど明らかになりつつある。しかし、その中には、理論的には予測されつつも、実験的な困難さで実証されていない物性もあり、その一つが歪印加による物性制御である。このような未解明物性に対して、本研究では MEMS 技術を取り入れて実験的に実証しようとする取り組みであり、これによってバンドギャ

ップの高速変調性・金属-絶縁体転移・ナノ機械共振器の応力制御といった新規物性実証や、発光・分光素子といった歪印加による新しい素子開発の可能性を示すことができる。

## 3. 研究の方法

MEMS 技術を用いて新たな歪印加素子を開発することにより、高速変調性や集積性の向上、ナノチューブへの電極形成を可能にする新たな歪印加素子を開発する。本素子は、リソグラフィ・エッチング技術を利用して、両支持または片支持の梁構造と歪印加用の電極を作製し、これらに電圧を印加することにより、梁と電極間に働く静電的引力により梁構造を引き寄せ、反対側に架橋した CNT に対して引っ張り歪を印加する。この素子は、微細加工を用いているため、これまでの圧電素子を用いた歪印加素子と比べて飛躍的に集積性が向上する (7mm 角 100 $\mu\text{m}$  角)。

MEMS 技術による歪印可素子では、半導体微細加工技術を用いて作製する。梁、電極部分は、Si 基板上的  $\text{SiO}_2$  をドライエッチングにより形成後、 $\text{SiO}_2$  下部の Si をドライエッチングにより取り除くことで作製した。片支持または両支持梁構造では、梁となる  $\text{SiO}_2$  下部の Si をドライエッチングによって完全に除去することにより作製した。本素子に対して、CVD 法により CNT を成長することにより、梁と測定用の  $\text{SiO}_2$  構造を架橋した CNT を成長した。作製した歪印加電極に対して電圧を印加することにより、梁が駆動して歪印加素子となる。このような微細加工による歪印加素子を用いて、一本の CNT に対して歪を印加することが可能であり、顕微フोटルミネッセンスによる発光観測によりバンドギャップ変調に伴う波長可変発光を観測することが出来る。また、電極-架橋 CNT-梁の間に電圧を印加することにより、架橋 CNT に対して通電することが出来る。

## 4. 研究成果

本研究では、MEMS 技術を利用したカーボンナノチューブの歪印加素子の開発を行った。ここでは、微細加工技術により両支持および片支持の梁構造を作製した。梁構造に対向して設けられた電極に電圧を印加することにより、静電的引力により梁構造が駆動し、反対側に設けられた架橋カーボンナノチューブに歪が印加されるという歪印加素子作製を試みた。

両支持構造の歪印可素子の構造を図 1 に示すが、本構造のデバイスにおいて、カーボンナノチューブと逆側にある電極に対して電圧を印加することにより両支持梁が引き付けられて、カーボンナノチューブに対して引っ張り歪が印加される。このような構造の両支持歪印可素子の作製に成功した。さらに、この素子に対して、CVD 法によってカーボンナノチューブの成長を試みた。その結果、カーボンナノチューブの成長には成功したが、

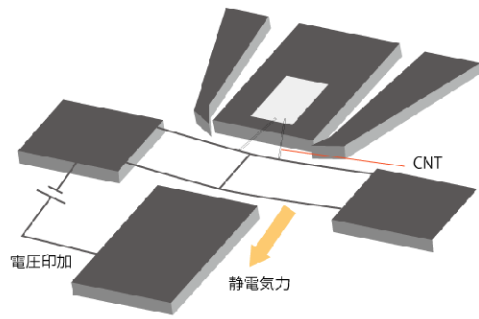


図1 両支持歪印可素子の構造

成長時の昇温によって両支持梁構造へのダメージも観測された。

一方、本研究では、片支持梁構造を有する歪印可素子の開発も行った。微細加工によって、片支持のデバイス作製に成功した。作製したデバイスの駆動を確認するため、駆動電極への電圧印可下での光学顕微鏡観測を行った。その結果、図2に示すように、電圧印加によって梁構造が駆動していることが直接確認された。

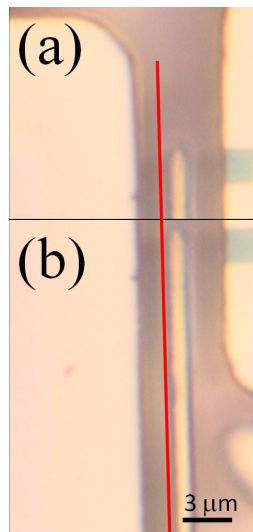


図2 駆動電圧(a)0V、(b)80V 印可時の駆動の様子

さらに、作製した素子に対してカーボンナノチューブのCVD成長を行った結果、図3に示すように、片支持梁構造を維持してカーボンナノチューブを成長させることに成功した。

ただし、図3に示すように、カーボンナノチューブは、所望の電極方向だけではなく、駆動電極方向への成長も確認された。駆動電極へは、駆動時に大きな電圧が印加されるため、この電極に架橋しているカーボンナノチューブは切断して絶縁したほうが良い。そこで、我々は、不要な電極へ架橋しているカーボンナノチューブを通電により除去する手法の構築を試みた。その結果、通電による加

熱によって、不要なCNTを切断することに成功した。以上の手法によって、我々は、片支持梁構造を有する歪印可素子の開発に成功した。

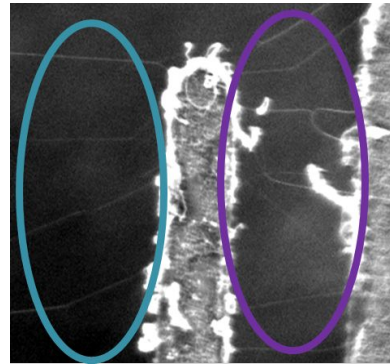


図3 梁構造に成長した架橋カーボンナノチューブ。いろいろな方向へ成長している。

また、電気測定が可能となる歪印可素子の作製を試みた。ここでは、カーボンナノチューブを固定するとともに電気測定での電極となる支持電極、片支持構造を湾曲させて歪を印加するための動作電極に加えて、局所的なゲート電圧が可能な局所ゲート電極を2つ備えた新たなデバイス開発を試みた。その結果、これらの電極を有する片支持歪印可素子の微細加工に成功した。さらに、このデバイスに対して、カーボンナノチューブを成長させることで、歪印可可能なデバイス作製に成功した。ただし、所望の梁支持電極間だけではなく、ゲート電極へもCNTが形成されたが、このような不要なCNTは、前述の通電によって除去可能であることを示した。

さらに、以上で作製した歪印可素子において、カーボンナノチューブへの歪の印加を観測するため、歪印可下でのフォトルミネッセンス測定を試みた。その結果、図4に示すように、バンドギャップの変調による波長可変発光を観測することに成功した。これにより、カーボンナノチューブのバンドギャップが歪印可素子によって制御されていることが明らかとなった。

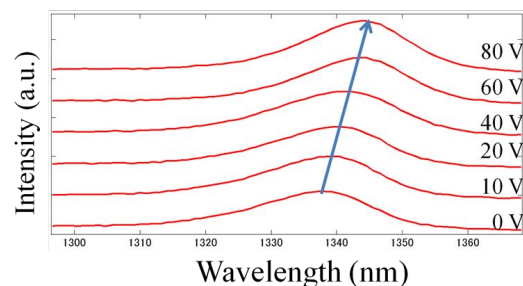


図4 歪印可下でのフォトルミネッセンス測定

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

牧英之, カーボンナノチューブを用いた超小型・シリコンチップ上・高速発光素子, 光アライアンス, 査読無, 9, 2015, 1-5.

牧英之, シリコンチップ上・超小型カーボンナノチューブ発光素子, 化学工業, 査読無, 65, 2014, 32.

牧英之, シリコン上・超小型・超高速のカーボンナノチューブ発光素子, 0 plus E, 査読無, 36, 2014, 981-982.

〔学会発表〕(計9件)

牧英之, 集積光・電子デバイスおよび光通信に向けたナノカーボン光源開発, 第50回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学伊藤国際学術研究センター(東京都文京区), 2016年2月21日(招待講演).

Hideyuki Maki, High-Speed On-Chip Light Emitters Based on Nanocarbon Materials, The 22nd International Display Workshops (IDW '15), 大津プリンスホテル(滋賀県大津市), 2015年12月10日(招待講演).

Hideyuki Maki, Nanocarbon based light emitters for integrated optoelectronics and optical communications, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市), 2015年9月15日(招待講演).

Yuya Amasaka, Tomoya Yokoi, Kazuki Ishida, Hideyuki Maki, Optical communication with graphene light emitting device, The 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2015年7月3日.

Hideyuki Maki, An electrically-driven, Ultra-high-speed, on-chip light emitter based on carbon nanotubes and graphene, 11th International conference on ceramic Materials and Components for Environmental Applications, Vancouver(Canada), 2015年6月19日(招待講演).

石田一樹, 横井智哉, 牧英之, グラフェン高速広波長域光検出器開発と波長依存性, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市), 2015年3月11日.

牧英之, シリコン上・超高速・高集積ナノカーボン発光素子と情報通信・分析技術応用, ナノカーボン実用化推進研究会, 東京大学伊藤国際学術研究センター(東京都文京区), 2015年2月20日(招待講演).

Hideyuki Maki, Tatsuya Mori, Yohei Yamauchi, Satoshi Honda, Ultrahigh-speed Light Emitters Based on Carbon nanotubes, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海

道, 2014年9月17日.

Hideyuki Maki, Tatsuya Mori, Yohei Yamauchi, Satoshi Honda, Electrically Driven Ultra-High-Speed Black Body Emitters Based on Graphene, ICPS 2014, Austin(USA), 2014年8月14日.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

牧英之 (MAKI Hideyuki)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 10339715