

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13677

研究課題名（和文）ナノカーボンテンプレートによる低次元・高品質結晶成長技術構築と光素子応用

研究課題名（英文）Low-dimensional and high quality crystal growth by nanocarbon templates and application for optical devices

研究代表者

牧 英之（MAKI, Hideyuki）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：10339715

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ナノカーボン材料をテンプレートとした新しい微細加工技術・結晶成長技術を新たに提案し、材料系を問わず、10nm級の一次元構造を実現する新しい手法を構築した。窒化ニオブによる超伝導ナノワイヤーの作製した結果、量子位相スリップ、熱位相スリップの観測やそのメカニズムを明らかにした。また、カーボンナノチューブへのアルミナの成長も行い、アルミナ成長による発光特性制御に成功した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we established novel microfabrication technique and low dimensional crystal growth technique by using templates of nanocarbon materials, and we fabricated one-dimensional nanowires with ~ 10-nm thickness. We fabricated NbN superconducting nanowires. We observed size effects of superconductors, such as quantum phase slip and thermal phase slip, and we found their mechanisms by using very thin nanowires. We also grew aluminum-oxide nanowires on carbon nanotube templates, and observed the change of photoluminescence spectra by their growth.

研究分野：半導体工学、ナノサイエンス、ナノカーボン材料、デバイス開発

キーワード：光デバイス・光回路 ナノカーボン

1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブやグラフェンといったナノカーボン材料は、理想的な低次元構造を有しており、その低次元性を利用した量子デバイスや光デバイスは、現在もトップジャーナルを賑わすなど注目されており、世界中で精力的に研究が進められている。しかし、現在のナノカーボン研究は、カーボン系材料自身の物性に起因した機能探索に留まっているが、カーボン材料のみに着目した新規物性探索や機能発現を目指すアプローチでは、カーボン系材料の持つ物性の枠を超えることはできず、新規物性・機能探索はいずれ限界を迎えることとなる。一方、多彩な物性を示す金属・半導体・誘電体・磁性体・超伝導体・有機材料などの一般的な材料系においては、材料を問わずに低次元構造を作製する技術として、電子線や光を用いたリソグラフィによる微細加工技術が用いられている。しかし、現在用いられている通常のリソグラフィ技術では、数十 nm 程度最小線幅が限界であり、低次元性による量子効果を発現するには、必ずしも十分な加工精度とは言えない。量子効果などを十分に発現させる 10nm オーダーの線幅を容易に実現するには、現在のリソグラフィ技術とは異なる全く新しい微細加工技術を確立する必要がある。本研究では、ナノカーボン材料をテンプレートとした、全く新しい微細加工法を提案し、10nm 以下の加工線幅を容易に実現できる微細加工法を提案する。

2. 研究の目的

本研究では、架橋カーボンナノチューブやグラフェンをテンプレートとした新しい微細加工技術・結晶成長技術を新たに提案し、材料系を問わず、10nm 級の低次元構造を実現することを目指した。これまでの研究で、カーボンナノチューブ上に異種材料を成長させることによって、量子ドットやナノワイヤーの形成やその電気測定に成功してきた。本研究では、従来のリソグラフィ・エッチング技術に替わる新たな微細加工技術として、カーボンナノチューブをテンプレートとして様々な材料系における一次元微細加工技術の構築を行い、ナノカーボンを基板材料とすることによる独自の結晶成長技術やワイヤー・量子ドットなどの低次元構造の形成に関する研究を進めた。さらにそれらを用い

た機能発現を目指して、電気伝導測定や光物性への応用に関する研究を進めた。

3. 研究の方法

本研究では、ナノカーボン材料を用いた新規の微細加工技術・結晶成長技術構築を目的として、カーボンナノチューブをテンプレートとした一次元微細加工技術構築やナノカーボン上への結晶成長技術と高品質低次元材料メカニズム構築、および本技術の光物性や電気伝導制御への応用に関する研究を進めた。

4. 研究成果

カーボンナノチューブをテンプレートとした一次元微細加工技術構築では、一次元のカーボンナノチューブをテンプレートとして異種材料の結晶成長を行い、従来のリソグラフィでは微細加工が難しかった材料など、様々な材料系において、架橋カーボンナノチューブ上への薄膜成長によって、10nm 級の一次元ナノワイヤー作製技術の開発を進めた。ここでは、申請者がこれまで光物性や電子デバイス研究に用いてきた架橋カーボンナノチューブを 1nm 幅の基板(テンプレート)として用いる。架橋 CNT 上に金属・半導体・超伝導体・有機材料などの異種材料を薄膜成長することにより、従来の通常のリソグラフィ技術では極めて困難な 10nm 級の線幅のナノワイヤーを材料系によらず容易に作製することが可能となる。

本研究では、まず、架橋カーボンナノチューブ上に成長可能で、新たな低次元物性が発現して観測できる材料系として、超伝導ナノワイヤーに注目した。これまでの研究で、架橋したカーボンナノチューブ上に、第二種超伝導体である窒化ニオブ(NbN)を成長することに成功するとともに、そのナノワイヤーの電気測定にも成功して、磁束が超伝導ナノワイヤーをトンネルすることに相当する量子位相スリップや熱位相スリップと呼ばれる低次元超伝導特性の観測に成功してきた。本研究では、この窒化ニオブ系超伝導ナノワイヤーにおける様々なナノワイヤー成長法の確立と、それによる低次元超伝導特性の観測について調べた。その結果、10nm 以下の極めて細い超伝導ナノワイヤーでは、全く超伝導転移が起こらない現象が観測された。これは、超極細の超伝導ナノワイヤーで発現する

とされる超伝導-絶縁体転移であることから、極細の超伝導ナノワイヤーにおいて理想的な低次元超伝導特性が現れることが明らかとなった。また、超伝導転移は発現する十数 nm の太さの超伝導ナノワイヤーでは、位相スリップが観測されたが、熱位相スリップと量子位相スリップのクロスオーバーが観測された。詳細な解析の結果、電極の超伝導性の有無に依存して、量子位相スリップと熱位相スリップの発現が制御可能であることが明らかとなった。実験では、超伝導ナノワイヤーを測定する電極として超伝導電極を用いていたが、この超伝導電極の伝導性に影響を受けて、超伝導ナノワイヤーが熱位相スリップ状態が発現するか、量子位相スリップ状態が発現するかが制御されていることが明らかとなった。また、この結果を踏まえて、様々な長さの超伝導ナノワイヤーを作製する技術の構築も進めた。ここでは、デバイス構造を検討することにより、様々な長さを有する架橋カーボンナノチューブの成長技術を構築し、この架橋カーボンナノチューブに窒化ニオブを成長することによって、様々な長さの超伝導ナノワイヤーの作製を行った。その結果、長さ 300nm から 3 μ m といった様々な長さの超伝導ナノワイヤーの作製に成功した。また、このような様々な長さの超伝導ナノワイヤーに対して電気測定を行い、超伝導特性と調べたところ、長さの短い超伝導ナノワイヤーにおいて、明瞭な量子位相スリップ-熱位相スリップのクロスオーバーだけではなく、量子位相スリップに伴う抵抗増加による特異的な抵抗変化が明瞭に観測された。このように、本研究手法が様々な長さや幅のナノワイヤーを形成可能で、それによって量子現象が制御可能であることを示した。

また、本研究では、架橋カーボンナノチューブ上に、絶縁体となるアルミナの成長を試みた。これまでの研究において、架橋カーボンナノチューブ上にアルミナが成長可能であることを示した。本研究においてアルミナ成長後にカーボンナノチューブの発光を測定したところ、アルミナ堆積による発光波長のシフトが観測され、発光波長制御が可能であることを示した。得られた波長変化は、堆積するアルミナの量にも依存して変化していた。また、発光波長変化の挙動は、厚みに対して複雑に変化していた。今後、さらなる発光波長制御性やそのメカニズムを詳細に

解析する。

以上の成果から、本手法は、量子物性の発現が可能な低次元構造作製に有効であることが示され、従来のリソグラフィーでは微細加工が難しかった材料系でのナノワイヤー作製を実証するとともに、量子効果が発現可能なナノメートルオーダーでの新たな微細加工法となることを示した。本研究で開発した微細加工技術・結晶成長技術は、ナノカーボン特有の低次元性や機械的特性に着目して低次元構造や高品質薄膜を得る手法であり、従来のリソグラフィー・結晶成長の概念を覆す原理に加えて、あらゆる材料系に適用可能な全く新しいナノ構造作成法となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 9 件)

牧英之，ナノカーボンを用いた光電子デバイス開発，電子情報通信学会 2018 年総合大会，2018 年

牧英之，ナノカーボンによるチップ上量子デバイス・光電子デバイス開発，第 65 回応用物理学会春季学術講演会，2018 年

高木宏，遠藤匠，早瀬潤子，牧英之，量子暗号通信に向けたカーボンナノチューブ室温・通信波長帯単一光子源開発，「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク」シンポジウム，2018 年

Hideyuki Maki，Nanocarbon-Based Quantum and Optoelectronic Devices，KEIO International Symposium on 2D Materials 2018，2018.

Hideyuki Maki，Nanocarbon Based Light Sources and Detectors for Integrated Optoelectronics，The 24th International Display Workshop，2017.

永合祐輔，田中悠，高木将，谷川俊太郎，大里啓孝，津谷大樹，牧英之，村川智，白濱圭也，超流動流れ場検出のための架橋ナノワイヤー共振器の開発，日本物理学会 2017 年秋季大会，2017 年

Yusuke Nago, Yu Tanaka, Tasuku Takaki, Shuntaro Tanigawa, Hiroataka Osato, Daiju Tsuya, Hideyuki Maki, Satoshi Murakawa, Keiya Shirahama, Nanomechanical Wire

Resonator based on Carbon Nanotube for Study of Quantum Fluids, ULT 2017: Frontiers of Low Temperature Physics, 2017.

牧英之, ナノカーボンを用いた量子デバイスおよび光・電子デバイス開発, ナノ茶論(ナノサロン), 2017年

Naoya Hirota, Wataru Yoshiki, Atsuhiko Hori, Koki Namiki, Katsuya Sato, Hideyuki Maki and Takasumi Tanabe, Growing carbon nanotubes on a silica toroid microcavity to observe saturable absorption, The 6th Advanced Lasers and Photon Sources, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

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