

令和元年6月11日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13732

研究課題名(和文)ヘリウムイオン顕微鏡による単電子トランジスタの作製

研究課題名(英文)Fabrication of single-electron transistor by helium ion microscope

研究代表者

小林 峰(Kobayashi, Takane)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・特別嘱託研究員

研究者番号：20360547

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)：本研究の目的はヘリウムイオン顕微鏡とガスインジェクションシステム(イオンビーム支援堆積法)を組み合わせることによって、単電子トランジスタを所望の場所に作製することであった。通常、単電子トランジスタはSiO₂基板上に作製されるが、ソース・ドレン細線の2カ所をヘリウムイオンビームで切断し、クーロン島を作製する時点で、ヘリウムイオンがSiO₂中にヘリウムバブルを形成し切断が良好に行えないことがわかった。その対策として、基板を窒化シリコン薄膜(メンブレン)を用いること考案した。その結果、窒化シリコン薄膜上の所望の位置に単電子構造を形成できることがわかった。特性に関しては、今後の研究が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヘリウムイオン顕微鏡で単電子トランジスタ構造を所望の場所に形成できることを実証したことによって、単電子トランジスタを用いたインバーター、ロジック等の回路、更には量子コンピュータを作り出せる可能性が示されたと考える。本研究を発展させれば、日本における当該領域の国際的な競争力の増大が見込め、産業界への大きなインパクトを与えるものと考えられる。更には、次世代エレクトロニクスの発展に大きく寄与するものと確信する。また、本研究によりイオンビーム支援堆積法の可能性も広がったと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to fabricate a single electron transistor at a desired position by combining helium ion microscope and gas injection system (ion beam induced deposition). Normally, single electron transistors are fabricated on silicon dioxide (SiO₂), but when source and drain wire is cut at two places with a helium ion beam to produce a Coulomb island, helium ions will be generated helium bubbles in SiO₂. It was found that it is hard to fabricate single electron transistor structure. As a countermeasure, we devised to use a silicon nitride thin film (membrane) as the substrate. As a result, it was found that a single electron transistor structure can be formed at a desired position on a silicon nitride thin film. Regarding the characteristics, further research is required.

研究分野：応用物理

キーワード：単電子トランジスタ クーロン島 イオンビーム支援堆積法 タングステンナノワイヤ 窒化シリコンメンブレン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

単電子トランジスタ(Single-Electron Transistor)は、量子効果を利用した次世代のトランジスタ候補の 1 つとして盛んに研究されている。単電子トランジスタでは、クーロン島と呼ばれる量子ドットにソース、ドレイン、ゲート電極が配置された簡素な構造である。このトランジスタは、電界効果トランジスタと異なり、クーロン島を介してソース電極からドレイン電極へ電子を 1 つずつ輸送するため、超低消費電力トランジスタとして期待される。しかし、単電子トランジスタは数百 nm 以下の大きさのクーロン島を作製しなければならず、作製プロセスに困難を伴うことから、所望の場所に再現性良く単電子トランジスタを作製するプロセス技術の開発が渴望されている。

そのような中、本課題の研究者らはヘリウムイオン顕微鏡を用いた(イオン刺激脱離現象を活用した)リチウム分布分析顕微鏡の開発を行った(T. Kobayashi, et al., Appl. Phys. Express, 7 (2014) 06601)。その開発中に、ヘリウムイオン顕微鏡の加工性に基づく、所望の位置に単電子トランジスタを作製する構想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヘリウムイオン顕微鏡を用い所望の場所へ単電子トランジスタの作製の可能を示すことにある。

ヘリウムイオン顕微鏡のもつ照射位置制御性、ビームスポット径、照射量制御性、及びヘリウムイオン顕微鏡に付帯するガスインジェクションシステム(イオンビーム支援堆積法)を活用することにより、所望の位置に単電子トランジスタを作製する技術を確立する。

3. 研究の方法

ヘリウムイオン顕微鏡は、(1)ヘリウムイオンビームをサブナノメートル以下に収束可能な特性、(2)その収束されたヘリウムイオンビームを材料に照射すると、照射された材料が甚だしく照射損傷(スパッタリング)を受ける特性、(3)照射位置の制御性がサブナノメートル以下である特性、(4)照射量制御性が 1×10^{15} [ions/cm²] 以下である特性、(5)ヘリウムイオン顕微鏡に付帯するガスインジェクションシステム(イオンビーム支援堆積法)を活用することにより 5 μm 以上の長さの細線を 10nm 以下の位置精度で所望の位置に設けることができる特性を持つ。この特性を活用して、所望の位置に単電子トランジスタ構造体の作製を試みた。また、ヘリウムイオン顕微鏡での加工の場合、加工性が基板に依存することから、加工性の基板依存性を調べ、その依存性を、ヘリウムイオン顕微鏡を用いた単電子トランジスタ構造体の製作に展開した。

4. 研究成果

(1)ヘリウムイオン顕微鏡を用いることで、所望の場所・位置に単電子トランジスタ構造体を作製することが可能である知見を得た。(ただし、その単電子トランジスタ構造体で単電子トランジスタ特性を確認できなかった。その理由は(a)SiO₂ 基板上に成長させたナノワイヤをヘリウムイオンビームで加工しようとする、ヘリウムバブルが基板中に形成され制御性良く加工ができなかったため、および(b)その対処法を確立したと考えられる矢先に、ヘリウムイオン顕微鏡に付帯するイオンビーム支援堆積法に用いるプレカーサーガスのガス切れが起こり、更にヘリウムイオン顕微鏡の所有機関がプレカーサーガスのガス補填を行わない決定を行ったことから、試料作製を続行できなかったためである。

(2)ヘリウムイオン顕微鏡で酸化シリコン/シリコン(SiO₂/Si)基板上のナノワイヤを加工する場合、ヘリウムバブルが基板中に形成され加工制御が困難である知見を得た。

(3)ヘリウムイオン顕微鏡によりサファイア(Al₂O₃)基板上にナノワイヤを形成、あるいは加工する場合、基板がヘリウムイオン照射により(ヘリウムイオンの電荷、および二次電子放出により)チャージアップすることから所望の場所・位置にナノワイヤを形成する、あるいは所望の場所・位置を加工することが困難である知見を得た。

(4)200nm の厚さの窒化シリコン(SiN)メンブレン上にヘリウムイオン顕微鏡によりナノワイヤを作製することが可能である知見を得た。図 1 は 200nm の厚さの窒化シリコンメンブレン上にヘリウムイオン顕微鏡で作製したナノワイヤのヘリウムイオン顕微鏡像を示す。

(5)ヘリウムイオン顕微鏡で作製したタンゲステンナノワイヤのアンパシティ(Ampacity: 許容電流)が驚異的に大きいこと(10^8 A/cm²以上であること)の知見を得た。

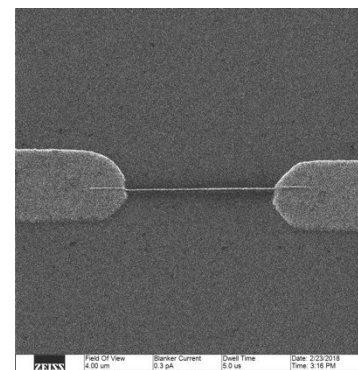


図 1: 200nm の厚さの窒化シリコンメンブレン上に作製したナノワイヤのヘリウムイオン顕微鏡像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 2件)

- (1) T. Kobayashi, H. Wang, Wen-Sen Lu, M. Chhowalla, S. Manichev, T. Gustafsson, and L. C. Feldman, "Fabrication and Characterization of Nanowires using a Helium Ion Microscope", Thirty Annual LSM Symposium, Piscataway, NJ, USA, April 2016.
- (2) 小林 峰, S. Manichev, T. Gustafsson, L. C. Feldman, T. Yamaguchi, K. Ishibashi, "ヘリウムイオン顕微鏡を用いた単電子トランジスタの作製", 第16回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究, 奈良, 12月2015年.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：下条 雅幸

ローマ字氏名：Shimojo Masayuki

研究協力者氏名：須坂 祐輔

ローマ字氏名：Suzaka Yusuke

研究協力者氏名：菅 洋志

ローマ字氏名：Suga Hiroshi

研究協力者氏名：山口 智弘

ローマ字氏名：Yamaguchi Tomohiro

研究協力者氏名：石橋 幸治

ローマ字氏名：Ishibashi Koji
研究協力者氏名：ワン ハオ
ローマ字氏名：Wang Hao
研究協力者氏名：ルー ウエンセン
ローマ字氏名：Lu Wen-Sen
研究協力者氏名：クオワラ マーニッシュ
ローマ字氏名：Chhowalla Manish
研究協力者氏名：マーニシュブ スラバ
ローマ字氏名：Manichev Slava
研究協力者氏名：アメラシングエ ボシャディ
ローマ字氏名：Amarasinghe Voshadhi
研究協力者氏名：グスタフソン トニー
ローマ字氏名：Gustafsson Torgny
研究協力者氏名：フェルドマン レオナルド
ローマ字氏名：Feldman Leonard
研究協力者氏名：キモ キーニユネン
ローマ字氏名：Kimmo Kinnunen

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。