

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22310084

研究課題名（和文）半導体ナノワイヤ3分岐接合デバイスの非線形メカニズムの解明と制御

研究課題名（英文）Study on the nonlinear characteristics in semiconductor nanowire three branch junction and its control

研究代表者

葛西 誠也 (KASAI SEIYA)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：30312383

研究成果の概要（和文）：化合物半導体ナノワイヤ3分岐接合構造（TBJ）が示す特異な非線形電気特性のメカニズム解明のため、レーザー光誘起局所コンダクタンス変調による新規評価法を開発し、構造内部の伝導率不均一性が非線形特性の要因であることを明らかにした。また TBJ の応用として、論理回路である NAND ゲートやフリップフロップ回路を TBJ にて設計し、回路の試作と動作に成功した。さらに、グラフェンや ZnO など他材料への素子展開を図った。

研究成果の概要（英文）：In order to understand the mechanism of the nonlinear electric characteristics in the semiconductor-based three-branch nanowire junction (TBJ) device, we have developed a light-induced local conductance modulation system and characterized the device. We clarified that the non-uniform distribution of conductance inside the TBJ resulted in the nonlinear characteristics. For application of the TBJ, we designed and fabricated NAND gates and flip-flop circuits integrating the TBJ devices, and succeeded in their correct operation. We have extended the TBJ technology to other materials, such as graphene and ZnO.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2011年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2012年度	1,700,000	510,000	2,210,000
- 年度			
- 年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：複合新領域

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：半導体ナノワイヤ、3分岐接合、ナノデバイス、非線形、ゲート制御

1. 研究開始当初の背景

次世代エレクトロニクス基盤材料である半導体ナノワイヤをもちいて Y や T 字型の 3 分岐接合（TBJ）を形成すると、信号処理に有用な非線形電気的特性が室温にて得られ

る。たとえば TBJ が単体で AND ゲートとして機能する。しかし、非線形特性の物理的メカニズムは未だ明らかではなく、故に特性制御の方法も確立されていない。TBJ ナノデバイスを工学的に応用するためには、非線形特

性のメカニズムを解明し制御方法を確立することが重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、半導体ナノワイヤ3分岐接合 (TBJ) デバイスの非線形電気的特性のメカニズムを解明することである。さらに応用に向けたデバイス動作の理解、制御、新規材料への展開を図る。

3. 研究の方法

① 非線形電気的特性のメカニズム解明のため、III-V 族化合物半導体を用いて TBJ デバイスを試作し、非線形電気的特性を評価する。TBJ は、2つの入力と1つの電圧出力端子をもつ。2つの入力にプッシュプル方式で電圧を印加すると図1下のように逆 V 字型の伝達特性を示す。本デバイスについて、独自のレーザー光誘起局所コンダクタンス変調評価システムを構築し、TBJ のキャリア伝導特性の評価やポテンシャル状態の評価と解析を行う。また、特性の構造サイズや表面状態依存性の検討も行い、結果を統合しメカニズムの解明につなげる。

② TBJ の回路応用にむけて、ゲート制御機構を理解するとともに、回路設計に適したデバイスモデルを構築する。TBJ 素子を用いたユニバーサル論理ゲートやこれを集積した機能回路の設計・試作・評価を行う。

③ TBJ の非線形メカニズムの理解に基づき、グラフェンなど他材料への展開を図る。

4. 研究成果

① レーザー光誘起局所コンダクタンス変調測定系を構築した (図1)。数 μm スポットのレーザー光を 50 nm の位置精度で照射し、ナノワイヤのコンダクタンス (伝導率) を測定可能なものである。

本測定系を用い電子をキャリアとする GaAs TBJ デバイスの評価を行い、入力となる2つのナノワイヤのうち正バイアスしたナノワイヤに低伝導率部位が存在すること、低伝導率の位置に局所的にレーザー光照射することにより非線形特性が緩和することを見出した。これより、構造中の伝導率の不均一性が非線形性に関与していることがわかった。さらに、伝導率低下位置を詳細に調べ正バイアスしたナノワイヤ端と同定した。

伝導率の不均一性の原因解明のため、GaAs 系 TBJ の非線形特性のナノワイヤ表面依存性を調べた。ナノワイヤ表面に SiN 膜を堆積し表面空乏を促した。結果、ナノワイヤの伝導率の非対称性が助長され、同時に TBJ の非線形性が強まることがわかった。ナノワイヤ中のキャリア量はナノワイヤ表面電位と印加電圧の差によって与えられるため、印加電圧の極性が異なる2つの入力ナノワイヤでは

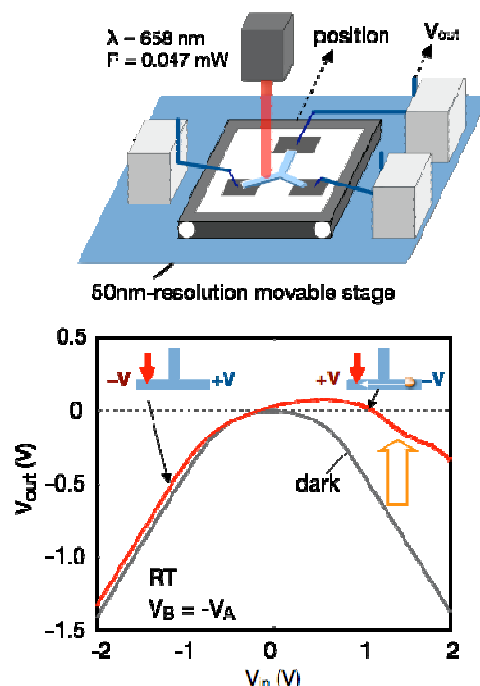


図1 レーザー光誘起局所コンダクタンス変調測定系と得られた非線形特性。

キャリア量に差が生じ、伝導率に差が生じていることを見出した。

以上の結果とこれまでに得られているナノワイヤのゲート変調による非線形特性変調や非線形性のナノワイヤサイズ依存性の知見を総合し、室温における非線形特性メカニズムとして、ナノワイヤ表面電位がもたらす構造中の伝導率の不均一性が要因であると結論した。

② ゲート制御型 TBJ を FET 直列接続による等価回路モデルで表現し、実験で得られる非線形特性をよく説明できることを示した。これにより汎用回路シミュレータを用いた回路設計が可能になった。

GaAs TBJ 単体で AND ゲートとして動作することを確認した。次いで、ゲート制御型 GaAs 系ナノワイヤ3分岐接合デバイスを集積し、ユニバーサルゲート (全ての論理回路を構成可能な論理ゲート) である2入力 NAND ゲートを設計試作した。室温にて正しい動作を確認した。適切なゲート制御により伝達利得 2.2 を得た。これらにより「TBJ ロジック」が構築された。

GaAs TBJ NAND ゲートを組み合わせて Set-Rest フリップフロップ回路を構成した。オンチップで集積した回路を試作し、室温にて回路の動作に成功した (図2)。ナノワイヤ FET による従来構成のフリップフロップ回路よりも動作成功率が高い。得られた電圧

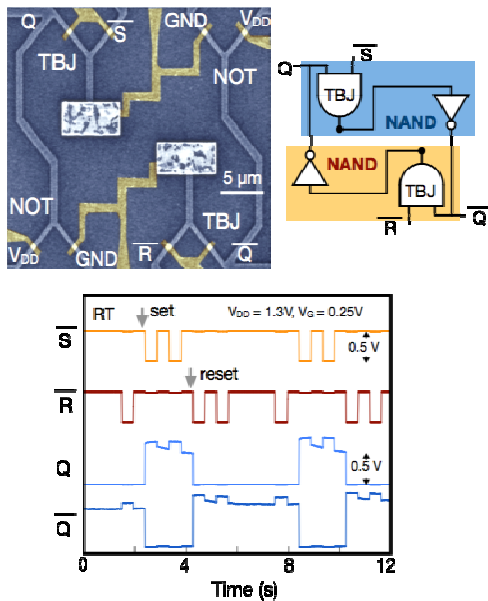


図2 GaAs-TBJ 集積フリップフロップ回路の電子顕微鏡写真と動作波形.

伝達利得は1以上であり、本回路を多重接続集積してより高度な順序回路を実現可能であることを示した。さらに、ナノワイヤネットワークのサイズ縮小とレイアウト最適化により回路面積を縮小した。

③ 高移動度をもつグラフェン TBJ の作製のため、SiO₂上貼付けグラフェンにおいて加熱処理と化学ドーピングの組み合わせたプロセスを構築し、キャリア移動度 15,000 cm²/Vs と高い移動度を実現した。

開発プロセスにより TBJ デバイスを試作し、室温での非線形特性の観測、および、電界効果ゲートによる曲率と極性の制御を実現した (図3)。本結果は、電界効果ゲートによって AND と OR 論理ゲート機能を切替える可能であることを示すものである。

グラフェン TBJ の動作理論解析を行い、新たに入力電極キャパシタモデルを提唱し、得られた動作を定量的に説明した (図3下)。

グラフェン TBJ 単体によるインバータの提案と動作に成功した。しかしながら電圧伝達利得は 0.013 と低い。利得の向上にはインバータの入力となるバックゲートのゲート制御性の改善が必要であることがわかった。

電子の平均自由行程が長い InAs 系ナノワイヤによる3分岐接合デバイスを試作し、77 Kでの非線形伝達特性の観測、得意な2段キックを観測した。バリスティック伝導、高電界ドメイン形成、インパクトイオン化の3つのステップが印加電圧に応じて順次寄与しているモデルで説明した。

ワイドギャップ半導体 ZnO を用いた TBJ

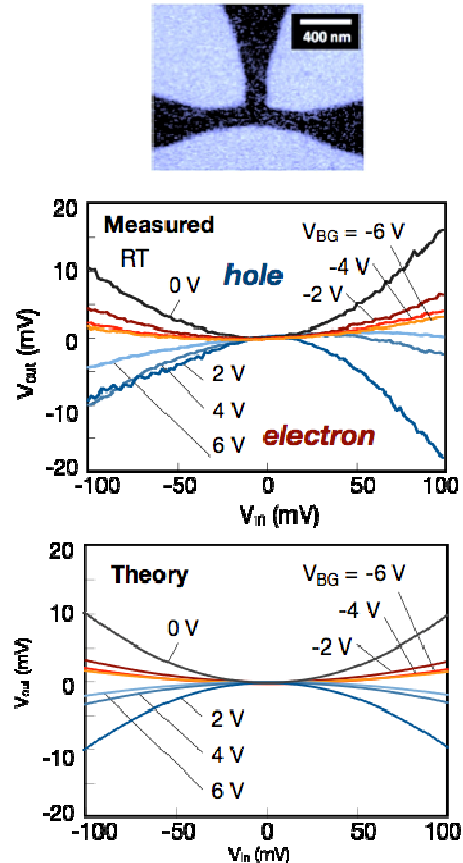


図3 試作したグラフェン TBJ の電子顕微鏡写真と非線形特性. 上が実験結果、下が理論モデル.

デバイスや自己スイッチングダイオード (SSD) 試作プロセスを構築した。SSD においては、素子を試作し動作特性の構造依存性を明らかにするとともに、スイッチングしきい値の制御に成功した。

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21件)

(1) M. Sato and S. Kasai, "Characterization of GaAs-based three-branch nanowire junction devices by light-induced local conductance modulation method", Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 採択済.

(2) S. F. A. Rahman, S. Kasai, and A. M. Hashim, "Room temperature nonlinear operation of a graphene-based three-branch nanojunction device with chemical doping", Appl. Phys. Lett. 査読有, 100, p.193116 (2012).

DOI: 10.1063/1.4711035

(3) S. F. A. Rahman, A. M. Hashim, and S. Kasai, "Identification of Graphene Layer Numbers from Color Combination Contrast Image for Wide-Area Characterization", Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 51, p.06FD09 (2012).
DOI: 10.1143/JJAP.51.06FD09

(4) H. Shibata, Y. Shiratori, and S. Kasai, "Novel Nanowire-Based Flip-Flop Circuit Utilizing Gate-Controlled GaAs Three-Branch Nanowire Junctions", Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 50, p.06GF03 (2011).
DOI: 10.1143/JJAP.50.06GF03

(5) D. Nakata, H. Shibata, Y. Shiratori, and S. Kasai, "Voltage Transfer Characteristics in GaAs-Based Three-Branch Nanowire Junctions Controlled by Schottky Wrap Gates", Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 49, p.06GG03 (2010).
DOI: 10.1143/JJAP.49.06GG03

〔学会発表〕 (計 7 2 件)

(1) M. Sato and S. Kasai, "Characterization of GaAs-based three-branch nanowire junction devices by light-induced local resistance modulation method", 25th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2012), Kobe Meriken Park Oriental Hotel, Kobe, Japan, October 30-November 2, 2012.

(2) S. Kasai, M. Sato, T. Tanaka, X. Yin, R. Kuroda, Y. Imai, "Nonlinear Behaviors in III-V Semiconductor Nanowires and Their Application to Information Detection and Processing", The First International Workshop on Information Physics and Computing in Nano-scale Photonics and Materials (IPC�), University of Orléans, France, September 7, 2012 (招待講演).

(3) S. Kasai, S. F. A. Rahman, M. Sato, X. Yin, and T. Maemoto, "Nonlinear Three Branch Nano-Junction Devices and Their Application to Logic Circuits", 2012 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2012), Okinawa Seinen-kaikan, Naha, Japan, June 27 - 29, 2012 (招待講演).

(4) T. Kiso, T. Maemoto, K. Nishisaka, S. Sasa, S. Kasai, and M. Inoue, "Transport Properties in InAs based Ballistic Rectifiers and Self-Switching Diodes", 17th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nano structures (EDISON 17), University of California

Santa Barbara, Santa Barbara, California, USA, August 8-12, 2011.

(5) H. Shibata, Y. Shiratori and S. Kasai, "Fabrication of a Nanowire-based Flip-fop Circuit using Gate-controlled GaAs Three-branch Nanowire Junctions", 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2010), Rihga Royal Hotel Kokura, Fukuoka, Japan, November 9-12, 2010.

〔図書〕 (計 1 件)

(1) S. N. Yanushkevich, S. Kasai, G. Tangim, A. H. Tran, T. Mohamed, V. P. Smerko, Morgan & Claypool Publisher, "Introduction to Noise-Resilient Computing", 2013, 152 pages.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rciqe.hokudai.ac.jp/ied/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

葛西 誠也 (KASAI SEIYA)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：30312383

(2) 研究分担者

前元 利彦 (MAEMOTO TOSHIHIKO)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：80280072