



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on a graphene three-branch nano-junction device and its application to Boolean logic gates [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	殷, 翔
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12402号
Issue Date	2016-09-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/63331
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Xiang_Yin_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 殷 翔

学 位 論 文 題 名

Study on a graphene three-branch nano-junction device and its application to Boolean logic gates
(グラフェン 3 分岐ナノ接合デバイスとそのブール論理ゲート応用に関する研究)

情報処理システムを支えるシリコン相補型 MOS(CMOS) 技術は 50 年以上ムーア法則に従い微細化を深化させ、半導体集積回路の基本素子である MOS 型電界効果トランジスタ (MOSFET) の速度向上、低消費電力化、集積数の増加を図ってきた。国際半導体ロードマップによると今後原子十数個分のサイズまで微細化が進む。しかしリーク電流の増大による消費電力の増加、原子レベルの違いによる特性ばらつき、製造技術の限界など多くの本質的問題に直面する。一方、情報処理システム要求される能力は絶え間なく高まっており、シリコン CMOS 技術の限界を超える新規の材料や原理に基づく新たな電子デバイスの実現が期待されている。

グラフェン 3 分岐ナノ接合 (TBJ) デバイスは、3 つのグラフェンナノワイヤが T 字型に接続された素子で、シンプルな構造にもかかわらず古典的な等価回路では説明できない非線形電圧伝達特性を示す。さらにゼロギャップ半導体であるグラフェン特有の両極性伝導特性によってゲート電圧による非線形伝達特性の曲率と極性の制御が可能になる。この特異な非線形性を巧みに利用することで単体のグラフェン TBJ が AND ゲート、OR ゲートおよび NOT ゲートとして機能し、グラフェン TBJ のみでブール論理完全系をなすことが示唆されている。しかし 2010 年に初めてグラフェン TBJ の試作が報告されて以来、未だ理想的な非線形特性を実験観測するには至っておらず、論理ゲート動作も実証されていない。

本論文は以上の背景のもとグラフェン TBJ の理想的な非線形動作の実現と基本論理ゲート動作の実証を目的とし、非線形特性を説明する新たなモデルの構築と特性解析、動作理解に基づくデバイス作製プロセス改善とこれによる理想的非線形動作の実現、および基本論理ゲート動作実証を行ったものである。さらに得られた結果から論理ゲートの動作特性の改善策について検討している。非常にシンプルなナノ構造で論理演算機能を実現できることを明らかにし、優れた物性を有するグラフェンの情報処理システム応用可能性を示した。

本論文は 8 章で構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第 1 章では、本研究の背景を紹介し、研究目的と論文構成を示した。

第 2 章では、本研究の基本となる半導体 TBJ の動作とその解析について述べた。

第 3 章では、本研究で用いた材料であるグラフェンの物性を概説している。

第 4 章では、グラフェン TBJ の非線形特性を説明する解析モデルの導入と動作解析について述べた。単純なキャパシタモデルは非線形特性の起源を簡潔かつ明瞭に説明する。本モデルを用いて左右枝の形状、接触抵抗、電荷中性点の 3 つ非対称性が非線形特性に与える影響を解析した。さらにより正確な動作記述のため電界効果トランジスタで用いられているグラジュアルチャネル近似に基づいたモデルを導入して定量的な動作解析を行った。ゲートキャパシタンスとグラフェン最小キャリア密度が非線形特性に寄与する重要なパラメータであることを明らかにした。これらの解析を通して試作デバイスの問題特定と改善の指針を得ることが可能になった。また、グラフェン TBJ

の非線形特性を用いることで基本ブール代数演算が可能であることを説明した。

第 5 章では、グラフェン TBJ デバイスの作製方法について説明している。グラファイト剥離法によるグラフェンの形成、光学顕微鏡を用いた位置と層数の同定方法、入出力端子となる金属-グラフェン接合の接触抵抗低減のための電極形成プロセス最適化、T 字接合構造形成のための電子ビーム描画と酸素プラズマエッチング、およびグラフェンの電荷中性点を制御するための化学ドーピングを主に述べている。

第 6 章では、上記プロセスを用いて試作したグラフェン TBJ デバイスの非線形特性および論理ゲート動作の評価結果と得られた特性について考察している。表面未処理では表面不純物により 40 V 以上シフトしていたグラフェンの電荷中性点を、化学ドーピングによって 0 V 付近に戻すことに成功した。測定された非線形特性は理想的な左右対称な 2 次の放物線特性を示し、ゲート電圧により曲率と極性ともに制御可能であった。論理ゲート動作として、まずグラフェン TBJ を NOT ゲートとして動作させた。左右枝電圧を一定電圧にし、バックゲートを入力とし中央枝を出力とすることで、信号反転動作が得られた。次に TBJ の左右枝を 2 つの入力端子とし中央枝を出力とすることで、AND と OR ゲートの動作を得た。ゲート電圧でチャネルの伝導型を切り替えることで AND と OR 論理の切り替えが可能であることを示した。また上述のモデルを用いて試作デバイス特性を解析し、実験的に得られる論理ゲートの出力振幅がグラフェンの残留キャリア密度によって制限されることを明らかにした。

第 7 章は、グラフェン TBJ デバイスの非線形性とゲート制御性の向上策について検討した結果について述べている。前章の考察を踏まえ、バンドギャップ導入することで残留キャリアの減少を図る方針を打ち出し、バンドギャップを有するグラフェン TBJ の非線形特性をモデルによって解析しバンドギャップ幅、動作電圧条件と TBJ の最大出力の関係を明らかにした。次いでバンドギャップを導入する実験のアプローチとして、円筒状のカーボンナノチューブを切り開くことで形成される極細のグラフェンナノリボンのクロスバー構造を用いた TBJ を提案し、素子試作に必要なプロセスを構築した。

第 8 章では、本論文の結論を述べている。