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_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　氏名　殷 翔

審査担当者　主　査　教　授　葛西 誠也
副　査　教　授　橋詰 保
副　査　教　授　浅井 哲也
副　査　特任教授　佐野 栄一

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）

本論文は新規 2 次元材料であるグラフェンを用いた 3 分岐ナノ接合 (TBJ) デバイス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、デバイス作製プロセス改善による理想的非線形動作の実現と基本論理ゲート動作実証を行ったものである。

現在の情報処理システムを支えるシリコン相補型 MOS(CMOS) 技術は微細化の極限を目前に多くの本質的問題に直面しており、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 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。加えてグラフェン特有の両極性伝導特性によりゲート電圧による非線形特性制御が可能になる。この特異な非線形性を利用することで単体グラフェン TBJ が AND、OR 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構成できることが示唆されているが、まだ実証に至っていない。本論文はプロセス改善によるブール代数論理演算機能の実験実証と理論解析に基づく動作特性改善に関する研究成果をまとめている。

本論文は 8 章で構成されている。

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ている。

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ている。

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ている。キャパシタモデルを用い左右枝の形状、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 (FET) 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、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。また、グラフェン TBJ の非線形特性を用いた基本ブール代数演算原理を説明している。

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化学ドーピングについてまとめている。

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の考察について述べている。化学ドーピングによってグラフェンの電荷中性点を 0 V 付近に制御した。得られた非線形特性は理想的な放物線特性を示し、ゲート電圧による非線形伝達特性の曲率と極性の制御に成功した。本デバイスを用い、入出力端子とバイアスの設定により NOT、AND、OR ゲートの動作を得ることにも成功した。ま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ている。さらに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ている。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。

これを要するに、著者は、新規 2 次元半導体材料であるグラフェンの単純 3 端子ナノ構造による論理演算機能の実現に関し新知見を得たものであり、半導体デバイス工学分野に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。