氏名・（本籍）	Pandey, Reetu Raj（インド）
学位の種類	博　士（工学）
学位記番号	生工博甲第２９５号
学位授与の日付	平成２９年６月３０日
学位授与の条件	学位規則第４条第１項該当
学位論文題目	Study on the electrical properties of single- and multi-layer graphene nanoribbons for next generation nanoelectronics （次世代ナノエレクトロニクスを志向した単層および多層グラフェンナノリボンの電気特性に関する研究）
論文審査委員会	委員長　教　授　森江　隆 〃　田中　啓文 〃　小林　慶裕 准教授　田向　権 〃　パンディ　シャムスディル

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

近年のコンピュータの性能向上は LSI の指数関数的なダウンサイジングによってもたらされた。いわゆる「ムーアの法則」に予想されているところによると，2020 年にはLSI 中のトランジスタのサイズがおおよそ 1 nm のオーダーに達するといわれており，集積回路のダウンサイズの物理限界に達する。一方で配線に着目すると未だダウンサイジングに余地があり，コンピュータの更なる性能向上が見込めると期待される。グラフェンは単原子から数原子層のグラファイトの呼称である。グラフェンは良導体であり，そのキャリア移動度はシリコンの 100 倍程度で，耐電流密度も銅の 1000 倍程度あり，その特異的に優れた電気特性から半導体エレクトロニクス，太陽電池，センサーなどの分野で多くの応用が目指されている。幅が 50 nm 以下になった短冊状のグラフェンをグラフェンナノリボン（GNR）という。GNR は個々の面積が大きいわけではなく上述の応用には不向きな一方で，良導体であることを活かし集積回路の次世代配線材料になると期待されている。その理由は，現状ダウンサイズが進んできたトランジスタはおおよそ 14 nm ノードの水準で作製されているものの，配線厚みは金属といえども極薄膜領域ではバンドの不連続性が現れ伝導度が著しく落ちることから，金属配線を用いている限り 30 nm を切ることができないことにある。一方，金属配線を GNR と置き換え可能であれば単層 GNR なら理論厚み 0.3 nm 程度と現状配線の百分の一を達成することができ，LSI の更なるダウンサイズの余地がある。しかし，配線材料として用いるための GNR のシステマティックな伝導特性評価はいまだ行われておらず，配線実用化の

ためにはさらに広範に渡る課題を逐一解決する段階的な研究が必要とされている。また，そのGNR配線の一部を修飾する事により，半導体的性質を出現させることができるなら，将来的に配線・デバイス一体構造に到達することができ，ここでもダウンサイジングに寄与することができる。

本論文では，上述の課題と問題点を克服するために，主に二層カーボンナノチューブ（DWNT）を出発原料としたアンジップ法を用いた幅 20-50nm の高品質単層 GNR（sGNR）の作製，電導型原子間力顕微鏡法（AFM）を用いたGNRの構造及び伝導特性評価，配線・デバイス一体構造を目指したGNRの電界効果トランジスタ（FET）デバイスの作製と伝導特性の温度特性評価に焦点を当てている。さらに，分子ナノ粒子の吸着前後のsGNRおよび多層GNR（mGNR）の電気的輸送特性を調べ，バンド構造の変化を考察している。また，配線技術で必要になる，GNRのクロス構造や分岐構造のジャンクション部分の電気伝導特性を調べ，考察を行っている。以上より，最終的にはGNRの将来の配線，デバイス同時合成への可能性を模索するとともに，将来のLSI内の配線技術として用いるための道筋を提案している。

本論文の構成は以下のようになっている。

第１章では，グラフェンと GNR の研究の背景，GNR の最近の進歩，これまでに提案されている GNR の作製方法の種類，研究目的と研究範囲について述べている。

第２章では，実験に使用される試料，材料，化学物質の調製，および単層および多層 GNR の作製法について述べている。また，電子ビーム（EB）リソグラフィのプロセスを含む，GNR の電界効果トランジスタ構造の作製およびデバイス製造に用いられるプロセスについても簡単に触れている。また，点接触電流イメージング原子間力顕微鏡法（PCI-AFM），FET 構造伝導特性評価手法，装置，およびその動作原理についても述べている。

第３章では，DWNT をアンジップして得られる幅 20-50 nm の sGNR の作製方法，sGNR への強アクセプター性有機分子 Hexaazatriphenylenehexacarbonitrile (HAT-CN6)ナノ粒子吸着構造の観察，sGNR のナノ粒子吸着有無による電気的特性の変化について述べている。ナノ粒子吸着により金属性 sGNR が半導体性へと変化することを見出し，そのメカニズムについて考察し，さらに配線・デバイス一体構造の実現可能性について言及している。また，既報の弱アクセプター分子である N,N'-bis(n-pentadecyl)-1,4,5,8-naphthalenediimide (C15-NDI)ナノ粒子吸着構造との電気特性の差違の評価とメカニズムの考察，また，作製した sGNR の FET の特徴とそれから得られた室温から約 10 K までの電気特性を HAT-CN6 ナノ粒子吸着前後について測定し，得られた結果，その解析結果について述べ考察を行っている。

第４章では， mGNR の電子的特性評価および解析の結果について述べている。sGNR を種結晶とした mGNR の成長方法と成長様式，mGNR の電気的特性，FET デ

バイスの作製と評価について述べている。また，分子ナノ粒子の吸着後の mGNR の電気的特性の変化についても述べ, バンド構造などの変化のメカニズムについても述べている。特に FET のオンオフ比がナノ粒子吸着後に改善されることが大きな発見となっており，それについて考察を行っている。

第５章では，主に sGNR のクロス構造（X 構造），二層 GNR の剥離途中の分岐構造（Y 構造）の作製方法及びジャンクション周辺の電気特性評価および解析結果について述べている。特に X 構造では金属性の sGNR がクロスすることによって，その交差角度によりジャンクション部分でホッピング伝導が生じることおよび半導体性 sGNR の X 構造ではホッピング伝導が生じないことを発見し, そのメカニズムについて考察している。

第６章において本研究の結論を述べるとともに，将来の LSI 内の配線技術として用いるための道筋を提案している。

学 位 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文に関し，審査委員から GNR の作製方法について，GNR デバイス測定法の妥当性と測定結果の解釈について，グラフェンと GNR とのバンド構造の差違について，GNR と有機分子ナノ粒子吸着時のバンド構造の変化様式について, GNR の交差構造における伝導様式についてなどの質問がなされたが, いずれも著者から満足な回答が得られた。

また，公聴会においても，多数の出席者があり，種々の質問がなされたが，いずれも著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上により，論文審査及び最終試験の結果に基づき，審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。