

論文内容の要旨

論文提出者 伊 東 雅 之

Title: Fabrication of High-quality Quantum Wires by Focused-Ion-Beam Implantation and Their Mesoscopic Transport Characterization

(集束イオンビーム注入法を用いた量子細線形成における高品質化とそのメソスコピック輸送特性評価)

本論文は「Fabrication of High-quality Quantum Wires by Focused-Ion-Beam Implantation and Their Mesoscopic Transport Characterization (集束イオンビーム注入法を用いた量子細線形成における高品質化とそのメソスコピック輸送特性評価)」と題し、デバイス小型化、高集積化のために半導体加工技術のポテンシャルと電子伝導メカニズム解明を目的として、最新の半導体超微細構造加工技術を応用して低次元構造である高品質半導体の形成を試み、とりわけ集束イオンビーム注入法を用いて量子細線構造の高品質な形成法とその問題点を論じ、装置改造を含む解決策を探りながら量子細線構造形成に伴う加工要因的電子移動度低下を極力抑制し、かつ大きなメソスコピック物理現象観測のための条件を検討して新しいメソスコピック構造形成の可能性を実験的に検証した研究成果についてまとめたものであり、全六章より構成され、英文で記されている。尚、本論文における“高品質 (High-quality)”の定義については (1)元ウェハから加工する際の電子移動度劣化が少ないこと、(2)大きな (支配的な) メソスコピック現象が観測できること、以上の二点を満たすこととした。

Chapter 1. Introduction

本研究の導入としてメソスコピック系のスケールと特徴的現象を示し、高機能デバイス作製のためのキーとなる結晶成長、加工技術についての現状を概観している。新しいメソスコピック構造デバイス作製のための高品質低次元構造の形成法と電子輸送特性、メソスコピック物理現象を解析する本研究の意義と目的を明確化し、最も単純な低次元系構造である量子細線を取り上げ、高品質化追求のための検討方針を立案して提示した。

Chapter 2. Quantum Wires Fabricated by Reactive Ion-Beam Etching (RIBE) and the One-Dimensional Carrier Concentration

RIBE を用いた量子細線の形成法と電子輸送特性について議論している。二層レジストを用いた電子ビーム (EB) 露光とシャロウ RIBE を組み合わせた作製法により、従来困難であった細くて長い低ダメージである量子細線の形成に成功し、高い電子移動度を有することを示した。次にこの系で磁場中でのメソスコピック系の電子伝導現象特有な磁氣的ディポピュレーション効果の簡単なフィッティング法から、二つのパラメータ ((1)閉じ込め周波数 ; ω_0 、(2)一次元キャリア濃度 ; $N1$) を直接

同時に導出した。更にこの一次元キャリア濃度 NI のパラメータとしての妥当性について実験的に C-V 測定から検証した結果について示し、RIBE 量子細線の品質性について論じた。

Chapter 3. Low-Landing-Energy Focused-Ion-Beam (FIB) System and its Improvement

超微細構造、新しいメソスコピック構造形成のために不可欠であった新型低エネルギー注入 FIB 装置 (JIBL-104AS) の問題点と改善のための検討、最終的に装置の機械的改良を行って解決を図った経緯を論じている。この装置の Ga-FIB 注入時にみられた二種類の大きなバックグラウンドノイズ ((1)ラフサーフェイス (Rough Surface) , (2)スクラッチネス (Scratchiness)) の徹底的な原因究明とその低減化について努めた。具体的にはノイズビームの拡がりに関する実験、分析より類推した各種ノイズ発生要因を考察し、ノイズの簡単な低減モデルをたてた検討から実際に装置改造後にはこの二種のノイズの大幅な低減化に成功したことを示した。また更に FIB 注入時のビーム状態をリアルタイムに把握する簡単なビームモニタシステムを考案し、装置改造とこのモニタシステムの導入によって超微細構造、メソスコピック構造形成のための FIB 注入環境を飛躍的に整備できたことを説明した。

Chapter 4. Quantum Wires Fabricated by Ga-Focused-Ion-Beam (Ga-FIB) Shallow Implantation

“Ga-FIB 浅留めイオン注入法”による量子細線の形成法と電子輸送特性について議論している。注入エネルギーを従来 (100 keV) に比べ大幅に低下 (69, 30 keV) させ注入ドーズ量も極限值まで減少させる“浅留めイオン注入法”を考案して開発し、量子細線形成における従来の大きな二種の問題点 ((1)高エネルギー (100 keV) 注入による大きな結晶性ダメージ、(2)チャンネル内に侵入する多数の予期せぬ注入イオン) の解決を図り、従来に比べ大きく増強されたバリスティック輸送現象を観測した。従来の Ga-FIB 量子細線や他の形成法による量子細線と電子輸送特性の比較を行った結果、構造線幅 $0.882 \mu\text{m}$ で電子移動度の最高値 ($5.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)、スペキュラリティ係数の最高値 ($P=0.842$) を得て、本技術“Ga-FIB 浅留めイオン注入法”の優位性を明らかにした。また予期せぬ注入イオンと装置固有要因に起因する“バックグラウンド効果”と電子移動度変化から推定する簡単なビーム形状モデルについても考察し、Ga-FIB 浅留めイオン注入量子細線の品質性について論じた。

Chapter 5. New Mesoscopic Structures Fabricated by Combination of Focused-Ion Beam (FIB) Instrument and Molecular Beam Epitaxy (MBE) Instrument

従来の問題点であった成長中断の効果を極力抑制した FIB 装置と MBE 装置の新しい接続システムを構築し、高真空を維持しながら FIB 注入後に MBE 再成長を行って形成した低次元構造の詳細な形成法と電子輸送特性について論じている。新 FIB-MBE 接続システムによる変調ドープ構造形成実験で FIB 注入後に MBE 再成長を行うと、Au⁺- FIB, Au²⁺- FIB では空乏化よりダメージ層形成がメインであるのに対し、Be⁺- FIB では空乏層領域がイオン注入上方向に拡がるのが分かった。この結果を用いて新しい技術である“埋め込みイオン注入法”を開発した。すなわちこの技術をチャンネル狭窄に用いることにより、予期せぬ注入イオンを排除した量子細線の形成、いわば“イオンフリーチャ

ネル狭窄”技術を有する“Be-FIB 埋め込みイオン注入量子細線”の形成に初めて成功した。この量子細線は従来のイオン注入による空乏化の欠点であった注入層と空乏層の分離に初めて成功した量子細線であり、新しいメソスコピック構造デバイス作製の可能性を示した。この Be-FIB 埋め込みイオン注入量子細線の品質性を論じ、更なる量子細線形成高品質化への可能性、残された課題、今後の研究の発展性について述べた。

Chapter 6. Concluding Remarks

デバイス小型化、高集積化を指向し、新しいメソスコピックデバイス作製のための量子細線形成における高品質化の追求について、新規に開発した重要なナノ形成技術の観点から量子細線のメソスコピック輸送特性の結果をもって振り返り、各章の主要な研究成果をまとめて総括し本論文の結論を述べている。

以上