

論文の内容の要旨

論文題目 「微傾斜 GaAs 基板上への InGaAs 結合量子細線および量子ドット構造の形成とその電子伝導特性の研究」

氏名 秋山 芳広

半導体結晶をナノスケールで設計し、電子の量子力学的な波動性を人工的に制御することができれば、半導体デバイスの性能向上や新しい素子機能の創出が可能となる。既に、エピタキシー技術による 2 次元電子系（量子井戸）の形成手法は確立され、電子物性の調査・解明が十分に進展し、さらに、高電子移動度トランジスタや量子井戸レーザなどの高性能デバイスが今日の社会の中で広く利用されている。他方、1 次元電子系（量子細線）や 0 次元電子系（量子ドット）も、最先端の物理学や次世代のエレクトロニクス技術において重要な役割を果たすものと期待されているが、形成手法や物性理解に課題がある。

本研究では、微傾斜(111)B GaAs 基板上の多段原子ステップを利用した InGaAs 結合量子細線構造の形成手法の改良と電子物性の解明を目的として、一連の研究を開始した。ただし、研究の過程で、微傾斜(111)B GaAs 基板上の多段原子ステップの上に InGaAs 結合「量子ドット」構造が形成される現象を新たに発見したため、研究の範囲が、InGaAs 結合量子細線の形成手法と電子物性にまで拡張された。

本研究の主な成果を、以下にまとめる。

微傾斜(111)B 基板上の結晶成長による InGaAs ナノ構造の形成：

[-1 0 -1]方向に 8.5 度傾斜した微傾斜(111)B GaAs 基板上に、適切な分子線エピタキシー (MBE) の成長条件によって、GaAs 多段原子ステップ構造を形成し、その上に薄い InGaAs 「量子井戸」層を堆積し、InGaAs 結合量子細線構造の形成を行った。In 組成が 0.1 程度の場合には、平均膜厚 3nm の InGaAs 層の上側表面はほぼ平坦になるため、下側の GaAs 多段原子ステップの凹凸によって、InGaAs 層の膜厚が準周期的に変調されることを明らかにした。一方、In 組成が 0.3 程度の場合には、平均膜厚 3nm の InGaAs 層を堆積すると、3 次元島（自己形成量子ドット構造）が形成され、しかも多段原子ステップに沿って高密度に配列されることを発見した。

微傾斜(111)B 面上での InGaAs 量子ドット構造の形成機構：

InGaAs 量子ドット構造が、微傾斜(111)B GaAs 基板上の多段原子ステップに沿って形成されたという報告は、我々が知る限り、他にはなく、材料科学的な観点で興味深い。また、自己形成法による量子細線 - 量子ドット複合系（デバイス）の実現可能性を示したという点でも意義がある。この InGaAs 量子ドット構造の形成条件に関する調査を、堆積する

InGaAs 層の平均膜厚や In 組成を適宜変更し、その表面形態を原子間力顕微鏡 (AFM) で観察することにより行った。その実験結果に基づいて、GaAs 多段原子ステップの存在する微傾斜(111)B 面上に InGaAs 層を堆積させた際の、歪みのエネルギーの蓄積・解放過程を考察し、仮想的な配列ドット形成モデルを提示した。そのモデルでは、隣り合う GaAs 多段原子ステップの上に形成される二本の InGaAs 細線構造がコヒーレントに接続した際に、それぞれのコヒーレントな変形が部分的に抑制され、エネルギー的に 3 次元島の形成が (ミスフィット転位の発生よりも) 好まれる状況が作られることが、重要である。

InGaAs 結合量子細線および量子ドット構造における巨視的な伝導特性：

InGaAs 結合量子細線および量子ドット構造が伝導チャンネルに埋め込まれた変調ドープ構造を用いて作製した、平行配置および垂直配置のホールバー型 FET において、低温で磁気抵抗測定を行った。In_{0.1}Ga_{0.9}As 結合量子細線構造の測定で電子の 2 次元的な運動を反映するホール効果や量子ホール効果が観測された。さらに、ホール移動度の異方性などが明らかにされた。また、磁場によって引き起こされる金属 - 絶縁体転移の特徴が見出された。

In_{0.3}Ga_{0.7}As 結合量子ドット構造の測定では、キャリア面密度が比較的高い状況で、ホール効果や量子ホール効果が観測された。また、磁場によって引き起こされる金属 - 絶縁体転移の特徴も見出された。キャリア面密度を減少させていくと、キャリア面密度が十分に高いにも関わらずコンダクタンスが著しく減少する現象や、キャリア面密度が見かけの上で増加に転じる現象が見出された。キャリア面密度が特に低い領域では、ホール抵抗が消失する磁場領域の出現が見出された。実験結果を基に、古典散乱時間と量子散乱時間を算出し、議論を行った。

波状凹凸界面を持つ量子細線 FET における局所的な伝導測定：

In_{0.1}Ga_{0.9}As 結合量子細線構造が埋め込まれた変調ドープ構造の伝導領域を、電子線リソグラフィで狭窄することによって作製されたユニークな量子細線 FET において、少数の多段原子ステップが関与する電子伝導特性を調べた。低温で測定されたコンダクタンスのゲート電圧依存性 (G-V_g 曲線) には、通常の量子コンダクタンスの値 ($2e^2/h$) の 10% 程度の高さのプラトー的の構造や、局所的な山や谷など、興味深い特徴がいくつか現れた。ゲート電圧を固定した場合のコンダクタンスの温度依存性 (G-T 特性) を抽出すると、ある (臨界) 温度以上では、コンダクタンスが温度のべき乗にほぼ比例して変化するのに対し、その (臨界) 温度以下では温度依存性が消失する様子が明らかになった。このような温度特性が、Ogata と Fukuyama の、不純物散乱と電子間クーロン相互作用のある 1 次元系を記述する「汚れた朝永 - ラッティンジャー液体」の理論において予測されている特徴に類似していることを見出し、両者の関連性について検証を行った。パラメータを適当に選ぶと、測定された臨界温度以上の G-T 特性に一致する、Ogata と Fukuyama の理論式の近似式を描くことができた。ここで特に重要な点は、理論式にプリファクターとして現れる $K\rho$ とベキ

指数に現れる K_{ρ} の二つに対して、同じ値を用いたことである。このような一致は、我々の「乱れているが準弾道的な量子細線」において、クーロン相互作用が後方散乱に与える影響が、「非常に乱れの少ない量子細線」の場合よりも、ずっと顕著に現れることを示唆している。

以上の成果は、微傾斜(111)B GaAs 基板上の多段原子ステップを利用した InGaAs ナノ構造の形成法の改良とその電子物性の解明に資するものである。また、ナノスケールの材料科学、低次元電子系の物理学、半導体デバイス工学と呼ばれる学問分野の進展にも貢献することが期待される。