

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 秋山 芳広

先端的な電子素子や光素子の実現に、10ナノメートル(nm)程の寸法の半導体細線（量子細線）や微粒子（量子ドット）を活かす試みが進んでいる。量子細線やドットでは、電子の流れの方向や位置を固定できるだけでなく、運動の自由度が1次元や零次元に低下するため、電子の状態密度の尖鋭化や電子間の相互作用の増大が生じ、新機能の実現に繋がる可能性もある。本論文は、「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」と題し、主軸から傾いた基板上に生じる準周期的な凹凸の上に InGaAs 薄膜を堆積することによって多数の結合した量子細線や量子ドット列を自然に形成させるための系統的研究について述べるとともに、これらの結合量子細線やドット列を介する電子伝導特性に関する実験的な研究を記しており、6章よりなる。

第1章は「序論」であり、本研究の背景と目的を記している。

第2章は、「微傾斜(111)B GaAs 基板上の結晶成長による InGaAs ナノ細線と関連構造形成」に関する研究を記している。(111)B 面から約8度傾いた GaAs 基板上では、原子ステップが集合し、平均周期が 20-30nm で深さが 2 nm ほどの波状の凹凸構造が自発的に形成される。この表面に厚さ 3nm 程の InGaAs 薄膜を堆積すると、In 組成 x が 10%程の場合には、InGaAs が溝を埋める形で成長が進み、膜厚が準周期的に変調された構造となることを見出した。この InGaAs 構造を GaAs 障壁で埋め込むと、電子の存在確率が膜の厚い溝部分で高まるため、結合した量子細線構造となることが予測される。また、In 組成を 30%とした試料では、溝に沿ってドットが整列した構造が得られることを見出した。さらに、ドットの形状を観測し、前述の溝1本毎にドットが並ぶこともあるが、多くの場合には溝2本毎にドット列が形成されることなども見出している。

第3章は「微傾斜(111)B 面上での InGaAs 量子ドット構造の形成機構」と題し、第2章で述べた整列ドットがどのような仕組みで形成されるかを探るための一連の実験について述べ、一つのモデルを提示している。特に、In 組成 20%で 2nm の InGaAs を堆積した場合、(100)面上ではドットが形成されないが、微傾斜(111)B 面の上では、面内寸法が 20nm 程のドットが溝に沿って整列することを見出した。また、In 組成を 50%まで高めた場合、(111)B 面上では、ドットは形成されずにステップに沿った細線的構造となることを見出している。これらの観測から、準周期的なステップの存在は、堆積された InGaAs 層の歪みの緩和過程に影響を与え、ドットの形成を誘発しているとのモデルを提言している。

第4章では、「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」に関する研究を記している。まず、前に述べた手法で結合量子細線や整列したドット構造を作り、これらを n-AlGaAs/GaAs ヘテロ接合のチャンネル部分に埋め込んだ電界効果トランジスタ (FET) を作り、その伝導特性を種々の温度で磁界やゲート電圧の関数として詳細に調べている。まず、In 組成 10%の結合細線を埋め込んだ試料では、ステップに平行か垂直かによって移動度が明瞭な異方性を示すこと、電子密度の低い状況では、局在効果に伴う絶縁体的な状態が出現すること、磁場の印加によって局在効果が解消され、金属的な状態と絶縁体的な状態の間を転移することなどを見出した。また、In 組成 30%の試料で、ドット列を埋め込んだ試料では、ステップに平行か垂直かで 10 倍以上の伝導度の異方性が生じることや、電子密度の低い状況では、ドットによって電子が捕縛されて、伝導度が激減するなど、特異な伝導特性を見出し、その機構を考察している。

第5章では、「波状凹凸界面を持つ量子細線 FET における局所的な伝導特性」の研究を記している。まず、In 組成 10%の InGaAs 結合量子細線を埋め込んだチャンネルを持つウェーファに電子ビームリソグラフィによる微細加工を施し、伝導チャンネルの実効幅が 100nm 以下で、長さが 2 μ m 程のユニークな FET を作成している。この素子では、ゲート電圧によって、電子は 1 本から数本の InGaAs 細線内を流れるが、そのコンダクタンス G を極低温域で温度 T やゲート電圧の関数として調べた。この結果、ゲート電圧の増加に伴って G は振動的に増加すること、また温度を下げると、 G がある範囲で T のべき乗で減ることなどを見出した。こうした伝導特性を考察し、1次元電子系における多体効果と散乱効果を同時に考慮した朝永-ラティンジャー液体に対する伝導理論の予測に近い部分が多いことを指摘している。

第6章では、本研究で得られた主要な知見をまとめ、結論を述べている。

以上述べたように、本論文は、微傾斜 GaAs (111)B 面上で準周期的な凹凸構造を作り、その上に堆積した InGaAs 結晶の成長を系統的に調べ、凹凸に沿って 20-50nm 程の寸法の結合量子細線構造や量子ドット列構造が自己形成されることを見出すとともに、それらのナノ構造を介して流れる電子が一連の特異な伝導特性を示すことを明らかにしたものであり、電子工学に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。