

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 ジョン ミンキョン

近年、格子定数の異なる半導体材料系の結晶成長で現れる Stranski-Krastanow 成長モードを利用した自己組織化成長により、数十ナノメートル級の立体結晶（量子ドット）の作製が可能となってきた。量子ドット中では、波動関数の軌道量子化に加えて、電子間相互作用の効果が極めて大きくなり、それらを応用した単一光子発生源など、単一量子ドットのデバイス応用の研究が近年注目を集めている。本論文は、“Electronic Structures and Transport Properties of Single Self-Assembled InAs Quantum Dots Probed by Nanogap Electrodes”（「ナノギャップ電極を用いた単一自己組織化 InAs 量子ドットの電子状態と電子輸送の評価に関する研究」）と題し、単一 InAs 量子ドットの電子状態を電気伝導測定により論じたものである。論文は 6 章より構成されており、英文で記されている。

第 1 章は序論であり、電子が 3 次元的に閉じ込められることから“人工原子”とも呼ばれる量子ドットについて、様々な手法で作製された大きさの異なる量子ドットの中で期待される軌道量子化や帯電エネルギーなどについて比較を行うとともに、自己組織的に作製された量子ドットがデバイス応用に適している理由について述べている。さらに、本論文で対象とする単一の自己組織化 InAs 量子ドットを介した電気伝導測定に関して、従来行われてきた研究を紹介するとともに、本研究の目的について述べている。また最後に本論文の構成を示して、各章の概略を説明している。

第 2 章では、まず、本研究で用いられた自己組織化 InAs 量子ドットの成長機構について説明を行った後、均一なピラミッド形状を持った量子ドットの成長を行うための条件、種々のサイズの InAs 量子ドット / アイランドの混合相を成長するための条件について説明している。さらに、InAs 量子ドット上に GaAs キャップ層を成長したときの表面モーフロジーの変化についても説明している。次に、本研究で用いたナノギャップを有する金属電極の形成技術について、超微細加工プロセスの詳細について説明を行っている。

第 3 章では、まず単一電子トランジスタ (single electron transistor; SET) の基礎について概説し、SET の微分コンダクタンスが示すクーロンダイヤモンドから、量子ドット内の帯電エネルギーや軌道量子化エネルギーに関する情報を得ることができることを説明している。次に、GaAs 表面に形成された単一自己組織化 InAs 量子ドットに極微細電極を形成することにより、横方向伝導型電界効果トランジスタ構造にすると、予想に反して、試料が SET として機能することを示している。さらに量子ドット / アイランドのサイズが大きくなるに従って、その中に電子が蓄積しやすくなり、アイランドサイズが 100 nm を越えると、as-grown の状態でも電子がアイランド内に存在することを明らかにしている。一方、InAs 量子ドットに GaAs キャップ層を形成すると、GaAs 中への In の拡散効果により、逆にクーロンブロック効果が弱まることを、またキャップ層の形成による InAs ドットの形状変化、および格子ひずみ効果により、量子ドット内の基底準位のエネルギーが大きく上昇することを明らかにしている。

第 4 章以降では、明瞭なクーロンブロック効果が観測される GaAs キャップ層を持たない InAs 量子ドットの伝導特性について、さらに議論を展開している。

第 4 章では、直径が 80 nm 以下の InAs 量子ドットのクーロン振動およびクーロンダイヤモンドの測定より、InAs 量子ドット内に明瞭な殻構造が存在すること、また軌道量子化エネルギーの殻

依存性より、量子ドット内の閉じ込めポテンシャルが放物線形状ではないことを明らかにしている。さらに帯電エネルギーや SET の示すコンダクタンスが強い殻依存性を示すことより、上位の殻になるに従って波動関数の空間的広がりが大きくなることを明らかにしている。

第 5 章では、さらに大きな量子ドット / アイランドの電子状態について議論を行っている。直径が 90 nm 程度の大きな InAs 量子ドットでは、線形コンダクタンススペクトルは殻構造を示すものの、クーロンダイヤモンドの境界が直線的にならないこと、さらに電流 - 電圧特性が微分負性抵抗を示すことより、内部に結晶粒界が存在し、それが比較的透明なトンネル障壁として機能するため、2 つの結晶粒界内の状態が混成した量子ドット分子状態を形成していることを見出している。さらに大きな InAs アイランドでは、クーロンダイヤモンドが閉じず、多重量子ドットが直列に接続された状態になっていることを示している。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた主要な成果をまとめている。

以上のように本論文は、極微細ギャップを有する金属電極を用いた試料構造を用いて、単一自己組織化 InAs 量子ドットを介した単電子伝導特性を測定することにより、量子ドット内の殻構造や帯電エネルギーなどに関する重要な知見を得るとともに、横型電界効果トランジスタ構造という汎用性の高い素子構造を用いて単電子トランジスタが実現できることを実証しており、電子工学に貢献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。