

## 論文の内容の要旨

論文題目      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)

氏名      :      ジョン ミンキョン

### 1. 研究の背景

自己組織化 InAs 量子ドットは、ナノリソグラフィ技術により形成された量子ドットよりもサイズが小さく、より強い閉じ込めポテンシャルを有するため、従来とは異なる量子閉じ込め領域の物性研究を可能にしつつある。特に、結晶成長条件を適当に選択することにより、自己組織化 InAs 量子ドットは簡単に作製することができ、さらにその光学的な特性が優れているため、既に単一 InAs 量子ドットの光学的性質に関する多くの研究がなされている。一方、単一 InAs 量子ドットの電気特性の研究は端緒に就いたばかりであるが、今後期待される様々なデバイス応用のためには、単一 InAs 量子ドットの電子伝導に関する深い理解が必要不可欠である。さらに、デバイス応用には、機械的な安定性や他のデバイスとの整合性の高い素子構造が望ましい。以上のような状況に鑑み、本研究では、ナノギャップ電極を用いた横型電界効果トランジスタ構造という非常に汎用性の高い試料構造を用いて、単一自己組織化 InAs 量子ドットの電子状態と電子輸送に関する研究を行った。

### 2. InAs 量子ドットの成長と極微ギャップを有する金属電極の作製

本研究で用いた自己組織化 InAs 量子ドットの成長について、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の最適化を行った。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フォロジーの変化についても調べた。次に、本研究で用いた 5-30 nm の幅のナノギャップを有する金属電極の形成するための電子ビームリソグラフィを用いた超微細加工プロセスの詳細について述べた。

### 3. 単一自己組織化 InAs 量子ドットを介した電子輸送

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の説明を行った。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見出した。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た。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、逆にクーロンブロケード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た。

#### 4．単一 InAs 量子ドット内の殻構造

単一 InAs 量子ドットをナノギャップ内に有する試料について電気伝導測定を行い、その伝導度スペクトルに量子ドットの殻構造を明確に観測することに成功した。クーロン振動とクーロンダイヤモンドから、電子を量子ドット内に注入するときの付加エネルギースペクトルを得るとともに、その情報から殻の閉じ込めエネルギーとドットの帯電エネルギーを求めた。特に、付加エネルギースペクトルが軌道量子化エネルギーによって増大すること、さらに  $p - d$  軌道間の量子閉じ込めエネルギーの差が  $s - p$  軌道間のその半分以下であり、量子ドット内の閉じ込めポテンシャルの形状が放物線型ではないことを見出した。さらに、量子ドットが持つ異方性による付加エネルギーの増大も観測した。また、上位の殻になるに従い、電子波動関数が空間的に広がるため、トンネルコンダクタンスと量子ドットの帯電エネルギーが、量子ドットの殻に強く依存することを明らかにした。

#### 5．巨大 InAs アイランドを介した電子輸送

最後に、90 nm の巨大 InAs アイランドの電子輸送に関して検討を行った。その線形伝導度スペクトルには殻構造を示す明らかなクーロン振動が観察されたが、そのクーロンダイヤモンドは複雑な構造を示した。さらに、電流 - 電圧特性に強い負性コンダクタンスが観測され、巨大 InAs アイランドが、複数の量子ドットで形成されていることがわかった。さらに、観測された複雑なクーロンダイヤモンドは、結晶粒界の透明なトンネル障壁を介して、複数の量子ドット内の軌道が混成化していることを示しており、いわゆる“量子ドット分子”状態が形成されていることを明らかにした。

#### 6．まとめ

本研究では、GaAs 基板上に成長した単一自己組織化 InAs 量子ドット中の電子状態と電子輸送特性を明らかにするため、極微細ギャップ電極構造を用いて InAs 量子ドットを介した伝導特性を詳細に調べた。その結果、InAs 量子ドット内の電子状態が量子ドットのサイズや異方性、格子ひずみにより大きく変調されること、単一 InAs 量子ドット内には明瞭な殻構造が形成され、上位の殻になるに従い電子の波動関数が広がるため、トンネルコンダクタンスやドットの帯電エネルギーが大きく変化すること、さらに巨大 InAs アイランドでは複数の小さい量子ドットが結晶粒界を介して接し、量子ドット分子状態を形成すること等を明らかにした。