

## 研究課題別事後評価結果

### 1. 研究課題名

量子相関機能のダイナミクス制御

### 2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者：青柳 克信 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 教授

主たる共同研究者：

石橋幸治 理化学研究所 極微デバイス工学研究室 主任研究員

筒井一生 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 助教授

雨宮好仁 北海道大学 工学部電子工学科 教授

天明二郎 静岡大学 教授

鎌田英彦 NTT 物性科学基礎研究所 主任研究員

松本和彦 産業技術総合研究所 総括研究員

### 3. 研究内容及び成果

本研究は、固体デバイスにおいて量子相関機能を用いた新しいナノエレクトロニクスを、機能性とそれに適した材料プロセスの開発という観点から、探索することを目的とした。量子相関機能の最も具体的な応用として量子コンピューティングデバイスを念頭に置き、そこで重要となる新機能としての量子状態のコヒーレントな操作を量子ドットを用いて行うことに研究の焦点を絞った。従って、最も基本的な機能として、何らかの単一2準位系を形成し量子ビットとしての2準位系の操作を行うことが研究の主課題である。また、量子コンピューティングシステムを考えた場合には、読み出しの機構が重要である。電荷の検出のみならずスピンも含めて、多くの場合で単電子トランジスタが用いられることが考えられるので、大きな帯電エネルギーを持つ単電子トランジスタの開発も研究の目的とした。これら量子相関機能の量子コンピューティングへの応用に加え、量子相関機能を用いた新しいナノエレクトロニクスの展開を理論的に探索することを並行して進めた。

量子相関機能を用いる基本デバイスの一つである量子ビットとしては、1) 2重結合量子ドットにおける電荷量子ビット、2) 単一量子ドット中の単一電子スピン、3) 半導体量子ドット中の励起子そして4) 電子波回路を検討した。また、これらを実現する材料系として、伝統的な半導体材料およびヘテロ接合系にとらわれず、カーボンナノチューブ、ガリウムナイトライド、Si/SiO<sub>2</sub>系、フッ化物系なども含め、広く材料を検討した。これらの新材料系を検討することにより、たとえば、カーボンナノチューブは微細な直径を有する1次元材料であることから、単に大きな帯電エネルギーやゼロ次元離散準位を期待できるだけでなく、コヒーレンスの向上も期待できる。GaN、Si/SiO<sub>2</sub>、そしてフッ化物系材料は、大きな閉じこめエネルギー（バンド不連続量）を実現できるので、高い周波数（テラヘルツ領域から遠赤外領域）までの適用が期待できる。以下に、主な研究成果を示す。

(1) カーボンナノチューブ2重量子ドットの形成

1本のカーボンナノチューブに必要な電極をつけデバイス化する技術を確認し、単一電子トランジスタ（単一量子ドット）作製技術を開発した。さらに、単一量子ドットをトンネル障壁で結合した2重結合量子ドットに分けることに成功した。2重結合量子ドットの形成は、負の微分コンダクタンスと2重ドットに特有のストカスティッククーロンブロッケード現象の観測により確認できた。この成果により、カーボンナノチューブ電荷量子ビットへの道を開くとともに、このデバイスの持つ大きな非線形電流電圧特性はテラヘルツ領域までの高い電磁波に対して高感度検波器としての可能性も示した。

(2) カーボンナノチューブ単一量子ドットにおけるスピン2準位系の形成

カーボンナノチューブは直径が小さいために磁場を印加した場合に、軌道量子化の効果が無視できゼーマン効果だけが重要になることを実験により示した。また、カーボンナノチューブ単一量子ドットでは電子数が奇数の時に、電子スピン  $1/2$  が実現できることを示し、ゼーマン効果と組み合わせることによりスピン2準位系の形成に成功した。

(3) 室温動作カーボンナノチューブ単電子トランジスタの作製

微細な直径を有する単層カーボンナノチューブをCVD法により成長する手法を確認し、電界印加により位置を制御して成長する技術の確認に道を開いた。このようにして成長したナノチューブチャンネルに欠陥を導入し、超微細な量子ドットの形成を行い、室温においてクーロンブロッケード動作を観測することに成功した。

(4) 半導体単一量子ドットにおける励起子のコヒーレント制御（ラビ振動の観測）

MOCVD法における自己組織化を用いて高品質 InGaAs を位置を制御して作製する技術を確認した。この方法を用いて作製した多数の量子ドットのうち1個の量子ドットに対して光学的応答を測定し、エネルギー領域で鋭い励起子発光を観測した。このコヒーレンスの良さを反映してエネルギー領域で発光スペクトルのラビ分裂を観測し、分裂の大きさが励起光強度とともに大きくなることを示した。エネルギー領域でのラビ分裂の示すコヒーレンスを時間領域で観測するために、ピコ秒程度の2個の短光パルス照射する実験を行い、パルスの遅延時間に対して発光強度が振動するラビ振動を観測することに初めて成功した（励起子のコヒーレント制御）。これは量子ドット励起子の量子ビットへの展開へむけた大きな成果である。

また、半導体量子井戸中に自然形成される量子ドットアンサンブルに対しても、フォトンエコー法を用いてラビ振動の観測に成功した。

(5) 量子ドットの反応拡散現象システムへの応用

単電子デバイスはトンネル効果にもとづく非線形振動を簡単な構成で発生することを利用して、化学振動子のかわりにこの単電子トンネル振動子を二次元配列して電子的な反応拡散系をつくることを検討した。近接する振動子の間には、トンネル待ち時間を利用して拡散現象に似た相互作用を発生させる。この反応拡散系のダイナミクスをシミュレーション解析し、化学的な反応拡散系に類似した散逸構造が生じることを示した。このことは、量子ドットを用いた反応拡散 LSI とも呼べる新しいシステムの可能性を示している。

(6) その他の重要な成果

電子波導波路を量子ビットへ応用することを検討した。単一電子を用いた場合、標準

的な電流量では位相の変化を生じさせるのに十分でないことを明らかにし、パーマロイを利用することにより電子波干渉のための有効磁束を増強できることを、GaAs/AlGaAs 2次元電子ガス電子波干渉系を用いて実証した。また、将来の閉じこめエネルギーの大きな量子ドットの形成を目指して、まず2次元系であるSi/SiO<sub>2</sub>系、フッ化物系へテロ接合での共鳴トンネル効果の観測に成功した。GaN系では量子ドットの形成にまで成功した。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

論文発表は英文142件、和文8件、口頭発表(ポスター発表含む)は国際会議202件、国内会議306件、そのうち招待されたものが夫々26件、25件、特許出願は国内2件など国際的評価の高い学会誌や国際会議に多くの優れた研究成果が発表されており、下記は其中でも特筆すべきもので、いずれも世界で始めて報告された独創的な成果である。

- ① 励起子型量子ビットの形成とコヒーレントな量子操作の第一歩として時間領域でのラビ振動の観測に成功。
- ② カーボンナノチューブ、窒化ガリウムを用いて世界で始めて2重結合電荷型量子ビットの形成に成功。
- ③ カーボンナノチューブ量子ビットを用いて単スピンの磁場によるゼーマン分裂2準位系の形成に成功。
- ④ カーボンナノチューブ成長の位置制御技術、化学気相堆積技術、イオンビーム技術を用いて明瞭な単電子トランジスタ動作を室温で実現。
- ⑤ 単電子デバイスの配列により形成される電子的な反応拡散系のシミュレーションを行い擬似生命体の創出などエレクトロニクス of 全く新しい方向性を見出せたこと。

##### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

本研究チーム成果の戦略目標「量子相関機能のダイナミクス制御」及び科学技術への貢献は下記の2点に要約することができる。

- ① 世界で始めて単一励起子のコヒーレント制御に成功し量子情報処理デバイスの新しい可能性を示し、量子ドットを用いた励起子量子光学なる新学問分野を開拓したこと。
- ② カーボンナノチューブにより量子ドットを形成し量子ビット実現に展開し、量子相関機能の観点のみならず一般的なナノデバイス作成技術も含めたカーボンナノチューブ・エレクトロニクスとでも称すべき新しい学問分野を開拓したこと。

##### 4-3. その他の特記事項

本研究の開始時において量子ドットはリソグラフィーにより半導体で作成されることが实际的であり、主流になるのではないかとの印象があったが、本研究によりカーボンナノチューブの利用が優れた性能を発揮することが確認されたこと、半導体量子ドットの場合にも電子スピンの利用が有効であることを見出したこと、単電子デバイスを用いて反応拡散系のシミュレーションができ擬似生命体を創出した事等は、当初予期していなかった成果であり、量子ドットに関する研究に対し新しい指針を与える展開であるとともにエレクトロニクス

トロニクスと生命科学の融合を発展させる点から見ても、その意義は大きいと評価される。