

研究課題別 事後評価結果

1. 研究課題名： キャリア相関を用いた量子コヒーレントシステム

2. 研究代表者： 平山 祥郎（東北大学 大学院理学研究科 教授）

3. 研究内容および成果：

本研究の目的は、電荷、電子スピン、核スピン等を半導体中でコヒーレントに制御し、半導体における量子ビット動作、さらには複数の量子ビットが相互作用する多量子ビット動作を追究することである。主な成果を以下に示す。

1) 半導体量子ビットに関する研究では、結合量子ドットを用いた電荷量子ビット技術の高度化、および結合量子ドットを集積して 2 量子ビットを実現することを目指した。結合量子ドットを横方向に集積化した構造では、結合量子ドット間の静電結合が 2 量子ビット動作を実現するために十分な強さであることを確認した。さらに、高感度単電子読み出し技術に関しては、単純に単電子の有無を読み出すだけでなく、電子が動く方向を検出する技術を確立し、数 aA (アトアンペア、 1×10^{-18} A) という、従来の高感度電流計では測定不可能な微小電流の測定に成功した。

2) 電子スピン量子ビットに関する研究では、集積化に適した局所的な制御として、傾斜磁場中で電子を動かす新しい手法により、10mT の振動磁場という従前より高い振動振幅が実現可能であることを示した。さらに、単一電子スピン共鳴 (ESR; Electron Spin Resonance) を実現した。

少数電子縦型量子ドットにおいて、高磁場下で量子ドット中の電子スピン状態が同定出来ることを示した。横型量子ドットにおいては、量子ドット中の電子スピン状態の同定が可能になることだけでなく、電子スピン状態に依存して負の微分抵抗が観測されることも確認した。また、2つの量子ドットが量子細線をはさんで対向した構造において、量子ドット中の電子スピン状態の非局所的な制御や読み出しが可能になることを示した。

3) 半導体中の核スピンを用いた量子ビットの研究では、半導体ヘテロ構造、ポイントコンタクト構造、量子ドット構造に関して世界をリードする成果を上げた。特に、半導体ポイントコンタクト領域での核スピンの偏極、偏極した核スピンを集積させたアンテナゲートによる核スピンのコヒーレント制御、コヒーレント制御による核スピンの回転の抵抗検出に成功した。量子ドット構造では、2 量子ビット動作に相当する量子 4 準位系のうち任意の二つの状態間で、コヒーレント制御の実現性を示した。また、パルス列の照射による核スピンコヒーレンス時間が大幅に増大する現象を確認する等、半導体中核スピンを用いた量子ビットの可能性を示唆する結果を得た。

4) 半導体量子コンピュータの実現をサポートする基礎研究として、キャリア相関を含む物性研究、半導体ナノ構造/ヘテロ構造の構造作製、ナノプローブ技術、量子情報処理に関する研究を進め、ナノスケールの特性を高感度で検出出来る NMR (Nuclear Magnetic Resonance) の開発、半導体ヘテロ構造における電子スピンの挙動の明確化、複合フェルミオンのスピン偏極の観測、

スピン・軌道相互作用の高感度検出等に成功した。

特に、横型量子ドットおよび縦型二重量子ドットにおける電子スピン緩和時間の、電荷読み出しおよびポンプ&プローブ法による実時間での測定、電子スピンの緩和に対するスピン-軌道相互作用や核スピン揺らぎの影響の確認、量子細線を近接して並べた結合量子細線におけるクーロンドラッグ測定と世界初の一次元ウィグナー結晶の検出等、インパクトの高い物性実験が進展した。

量子情報処理に関する基礎研究も継続して推進し、量子情報処理の基礎的な事項に向けて、光学的な基礎実験と理論的な検討を並列して進めた。

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

期間中の外部発表、特許等の実績を示す。

発表論文:(邦文) 12 件/(英文) 166 件

口頭発表:(国内) 214 件/(海外) 297 件

特許出願:(国内) 3 件/(海外) 0 件

Science、Nature、PRL 等、知名度の高い雑誌に多くの成果が掲載されており、研究成果の水準や重要度は極めて高い。

結合量子ドットを集積して 2 量子ビットの実現性を示したこと、動く方向を含めた高感度単電子検出技術の確立、量子ドット対のスピン状態とスピン依存伝導現象の非局所的制御や読み出し、核スピン量子ビットの実現、核スピンのコヒーレント制御、パルス列の照射による核スピンコヒーレンス時間制御等、世界トップと言える多くの成果を上げた。半導体ナノ物性研究の立場からは、核スピンに関連した研究、シリコン量子構造に関する研究で今後の展開が大いに期待される。

しかしながら、量子ビットに関しては、2 ビット操作の前段階で留まっており、「研究期間内に半導体で 5-7 量子ビットの実現を目指す」という当初の目標に対して隔たりがある。また、電荷量子ビットのデコヒーレンス機構、電子スピンの核スピンへの転写、シングルショット測定においても十分な成果が得られたとは言い難いが、目標に向けた着実な成果が得られており、今後の発展を期待する。

4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

2 荷電量子ビットの実現、高感度単電子読み出し技術、単一電子スピン共鳴の実現等、いずれの成果も科学的・技術的インパクトは極めて大きい。核スピンの全電氣的制御やヘテロ構造の電子状態の研究、シリコンへの展開等、特に半導体ナノ構造の物性研究分野において世界をリードする研究成果を多数あげており、科学技術への貢献度は高い。

4-3. その他特記事項(受賞等)

平成 19 年度 ERATO「平山核スピニエレクトロニクスプロジェクト」に採択された。