

研究課題別中間評価結果

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. 研究代表者名: 平山 祥郎(東北大学 大学院理学研究科 教授、平成 18 年 7 月に NTT 物性基礎研究所より異動)

3. 研究概要:

本研究の目的は電荷、電子スピン、励起子、核スピンの半導体構造中でのコヒーレント制御を追究し、半導体における量子ビット動作を複数の量子ビットが相互作用する多量子ビット動作、さらには半導体量子コンピュータの実現につなげることにある。プロジェクトの前半では特に半導体中での核スピン制御に大きな進展があり、量子ナノ構造中で量子 4 準位系のコヒーレント制御(2 量子ビット動作に相当)が実現された。また、核スピンを例に取ったパルス列制御の実験では、デコヒーレンス(量子ビットに重要な量子的コヒーレント状態が失われること)の影響がパルス列の打ち方により小さくなる可能性が示唆された。量子ドット中の電子スピン制御に関してもゲート電圧や傾斜磁場を用いたスピン操作、さらにはパルス操作によるスピン制御に関して進展があり、電子スピン緩和時間がミリ秒に近づくなど、電子スピンの量子ビット応用を勇気付ける結果が得られた。電荷、励起子を用いた 2 量子ビットに向けた研究も進捗し、電荷読み出しでは、単電子の移動方向も含む超高感度読み出しに成功した。一方で、半導体量子コンピュータ実現をサポートする基礎研究として、半導体ナノ構造/ヘテロ構造の構造作製、キャリア相関を含む物性研究、ナノプローブ技術、量子情報処理に関する研究を継続した。特に、半導体ナノ構造でのキャリア相関、電子スピン状態の核スピンによる検出、ナノプローブによる電子の局所状態密度測定では世界をリードする成果が得られた。今後は半導体量子コンピュータの実現に向けて、半導体中での電荷、電子スピン、核スピン、励起子のコヒーレント操作の理解を深めるとともに、半導体デバイスでの多量子ビット動作を目指す。また、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を継続する。

4. 中間評価結果

4-1 研究の進捗状況と今後の見込み

二重量子ドット間の共鳴トンネル現象を観測し、キャリア相関としての静電結合を確認し、電荷量子ビットを組み合わせた二量子ビット動作の可能性を示したこと、ポイントコンタクトや量子ドットを使った核スピン制御による量子 4 準位系のコヒーレント制御を実現したこと、単電子双方向カウント測定法を開発したこと、並列細線の負ドラッグ効果を実測確認したことなど、極めて大きな成果が上がっている。これらの成果がインパクトファクターの高い国際学術誌の論文として多数発表されていることから、半導体量子構造の基礎研究の部分でトップランナーとして世界をリードしていると言える。ただし、当初の研究計画書には実に多くの研究計画が盛り込まれており、これを基準にして逐一見た場合、進捗は必ずしも予定通りといえない部分がある。特に、量子ビットに関しては、研究

期間内に「半導体で5-7量子ビットの実現を目指す」という目標を文字通りにとれば、その実現の本命となる技術が絞られていないし、その基礎となる、デコヒーレンスの機構の解明もまだであることから、やや遅れ気味と言わざるを得ない。しかし、核スピン制御ナノデバイスによる革新的 NMR 実現の可能性、単電子双方向カウント測定など、研究の広がり、応用の方向性に関して新たな展開も生じており、絶対評価を行うとするなら極めて大きな成果が上がっていると結論出来る。すなわち、半導体量子コンピュータの可能性に向けて極めて精力的に取り組み、多様なテーマ展開を図っている。これらのテーマに関して、世界のトップランナーとして国際的な牽引力になっている。

4-2 研究成果の現状と今後の見込み

これまでの成果により、今後の成果も大いに期待出来る。電荷量子ビット、スピン量子ビットの研究をさらに進めるとともに、核スピン・電子スピン相関についての研究を加えるのが好ましい。傾斜磁場と交流電界を用いたスピン制御、縦型2量子ビット系などで成果が出るものと期待する。少数核スピンの制御に関しては、異種の量子ドット核スピン間の量子コヒーレント制御の実現が期待されるが、新たな NMR 技術として展開も期待出来る。ただし、核スピンのコヒーレンス制御については、量子計算の観点から、応答速度、集積化の問題に本質的なブレークスルーが必要である。ナノプローブについては、デュアルプローブ SNOM、高速ナノプローブなどで進展があるようであり、今後の成果を期待したい。

4-3 総合的評価

総じて半導体ナノ構造の物性及び量子ビットの研究分野で派生的な成果も含めて世界をリードする研究成果を多数あげており、非常に高く評価出来る。研究成果と研究費を比べると、コストパフォーマンスの高い研究と判断出来る。

研究代表者は、研究リーダーおよびプレーヤーとしてプロジェクトはもちろん、半導体量子ビットの研究分野で世界を索引している。SORST後半期において、多様な研究テーマをいかようにまとめるかにリーダーとしての手腕がかかっている。これまで大きな成果を上げており、その意味で研究チーム体制とその遂行は妥当である。ただし、チームを構成する多様な研究グループ間の連携、情報交換、研究推進の方向付けがどのように図られているのかについては必ずしも明確でなく、間口を広げ過ぎている感がなくはない。NTT、東北大、東大、新潟大学との連携は比較的良好といえるが、阪大、産総研グループとの連携がどのように結びつくか、良く見えていない。特に代表者がNTTから東北大学へと地理的に離れることになるので、共同研究を担保する仕組みを考える必要がある。量子コンピュータ実現という困難な課題に対して現実的な方向性を示すために、研究後半ではある種の統合、目標の立て直しも必要となろう。量子コンピュータの実現に関して明確な展望を持っているグループはおそらくないので、本研究のようなグループが長く研究を続ける事が重要である。