

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名: 半導体スピンエンジニアリング

2. 研究代表者名: 新田 淳作 (東北大学大学院工学研究科 教授)

3. 研究概要

電子スピンは、最小の磁気要素でありこれまで磁場により制御されてきた。ゲート電界によるスピン制御は空間的および時間的な制御性と省電力性などで優れており、次世代スピン機能デバイスの実現を図る上で重要技術である。これまでに、2つの量子ドット中の局在スピンの RKKY 相互作用により強磁性的に結合することを実証するとともに、電子スピンの回転角度をゲート電圧で電氣的に制御することなどに成功した。これらの成果は次世代スピントロニクスや将来のスピンをベースとした量子情報処理に向けて重要な役割を果たしていくと考える。

4. 中間評価結果

4 - 1. 研究の進捗状況と今後の見込み

スピン伝導特性の研究においてはスピン注入に関する部分はやや進捗が鈍いが、電界制御スピン干渉実験、ドット列の前段階であるドット・細線・ドット系を用いた非局所的なスピン相関と科学的にレベルの高い成果が得られている。スピンの関与した光物性の研究でも、量子ドット列や低キャリア密度系の光物性評価が順調に進展している。特に、ポテンシャルの横方向変調を加えた横型ナノ構造に対して、アクセプタ準位と伝導電子の関与したスピン依存型の発光現象を明らかにしたことは興味深い。論文、国際会議発表も順調であり、海外特許を含む特許出願も非常に活発である。

4 - 2. 研究成果の現状と今後の見込み

(1) InGaAs/InAs/InGaAs ヘテロ構造を用いて、g-因子のゲート制御に成功した。

(2) Rashba スピン軌道相互作用に対するヘテロ界面の重要性を指摘するとともに、この効果を利用したスピン干渉ループデバイスを試作し、スピン干渉のゲート制御に成功した。さらに、Rashba スピン軌道相互作用が産み出す有効磁場の空間変調を原理とする Stern-Gerlach 型スピンフィルターを提案した。

(3) 量子細線に 2 個の量子ドットがトンネル結合した構造をゲート制御し、両方のドットが奇数個の電子を含む状態では、RKKY 相互作用によってドット内スピンの強磁性的に揃うことを見出した。

これらの成果から、これまでの研究の良好な進捗が示されている。今後、これらの結果をデバイスの実現に向けて進展していくことが望まれる。

4 - 3 . 今後の研究に向けて

ゲートによるスピン制御という観点は、電子デバイスとして極めて魅力的であり、新しい物理現象の存在の実証や解明、物理的パラメーターの決定などの観点から順調に成果を達成している。今後の研究では本プロジェクトが主題とする、「超高速・省電力デバイスの探索」に向けてこれまでの結果を活用することが必要である。そのためには得られた知見をゲート制御の電子デバイスの観点から再検討し、入出力・機能・性能、動作温度の関係を明らかにするとともに、ゲート制御型の超高速・省電力情報処理スピndeバスの実現につながる方向に的を絞って研究を進めることが望ましい。ことに、達成された成果は、量子通信や量子コンピューティングの基本構成要素となる量子ゲートの実現に展開できる可能性があり、この方向に的を絞ることも考えられる。当初の計画ではカゴメ格子によるゲート制御強磁性の実現が主目標のひとつであったが、進捗はさほど大きくない。しかし、強磁性実現の可否について、実験的な立場から明確な結論を出すことを期待する。

4 - 4 . 戦略目標に向けての展望

本プロジェクトは、サイエンスよりの研究が主体となっているが、量子ナノ構造のスピン相関の解明と制御は戦略目標に良く合致している。量子ドットにおけるスピン相関の制御やその光学的計測に関する研究が着実に進展しており、今後も科学的にインパクトのある成果とそのデバイス展開が見込まれる。さらに、量子ドット列での強磁性の実現とそのゲート制御が実現できれば、スピントロニクスに変革をもたらす大きな成果になると思われる。

4 - 5 . 総合的評価

最近、半導体にスピンの自由度を導入する材料が世界的に活発化しているが、半導体に磁性元素を導入し希薄強磁性化する手法、または半導体に磁性金属を接触させてスピン分極した電子を注入するなどのアプローチが主体である。これに対し、本研究は非磁性半導体材料のヘテロ界面やナノ構造においてゲート電圧によりスピンを制御するアプローチであり、極めて独創的であり、基礎科学上の高度な成果が得られている。このスピン制御技術は、将来の量子コンピュータや量子通信用の素子などへの発展も期待される。現在は極低温環境下でのデバイスアイデアの創出と原理検証が中心であるが、室温動作実現に向けた努力や技術的課題の解明を期待したい。また高速性、低消費電力性、機能性などの観点から、デバイスとしての優位性を示す効果的な情報発信にも注力願いたい。