

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

平成 16 年度採択研究代表者

小坂 英男

(東北大学電気通信研究所 助教授)

「単一光子から単一電子スピンへの量子メディア変換」

1. 研究実施の概要

量子情報通信の長距離化に不可欠な量子中継器や並列量子コンピュータの量子インターフェースを実現するための光子から電子スピンへの量子状態転写素子作製を目指して研究している。電子スピンの g 因子をゼロとしてスピン縮退させた量子構造を作製し、横磁場下での軽い正孔励起子の光学的スピン選択則を利用することで、この量子状態転写を可能とする提案をしている。本年度、時間分解磁気光学スピン測定系、単一光子/電子量子輸送測定系、デバイスプロセス設備・技術、 g 因子解析プログラム、光子/スピン転写ダイナミクス解析プログラム、電子スピンドコヒーレンス解析プログラムなどの要素技術を立ち上げ、上記提案の実証に向けた準備を行った。初期的成果として、電子スピン縮退量子構造の実現、同構造における軽い正孔励起子の光学的スピン選択生成後の電子スピン検出の実証、電子スピン縮退結合量子ドットにおけるスピントロッキング現象の実現、量子状態転写における転写効率、忠実度確保のための条件把握、正孔引き抜き法とその最適条件の把握、GaAs系における量子状態転写素子の提案などを行った。今後は上記基本技術を発展させて光子から電子スピンへの量子状態転写のデモンストレーションを行う予定である。

2. 研究実施内容

本年度は光子から電子スピンへの量子メディア変換の準備として、電子スピン g 因子がゼロとなるよう設計した量子井戸の電子スピン g 因子、電子スピン位相緩和時間（コヒーレンス時間）、光学的スピン選択則などの評価を行い、また量子輸送素子を用いた単一光子応答、電子スピントロッキング実証および長波長系材料のプロセス技術向上などを行った。理論面では実験をサポートする g 因子解析、電子スピンドコヒーレンス解析、量子状態転写ダイナミクス解析、電子スピン—核スピン相互作用解析などを行った。

電子スピン g 因子、電子スピン位相緩和時間、光学的スピン選択則などの評価は、昨年度購入の広帯域波長可変パルスレーザシステムを用いた時間分解磁気光学スピン評価システムを構築して小坂グループが行った。 g 因子をゼロに制御した GaAs/AlGaAs 半導体量子井戸構造を用い、電子 g 因子が設計通り 0.02 以下と極めてゼロに近いことを実証した。

これにより、量子状態変換に必要な電子スピンについての条件（正孔 g 因子より 2 桁以上小さいこと）を満足する構造を得た。光子のバンド幅は正孔と電子の g 因子で決まるゼーマン分裂エネルギーの中間値をとる必要があるが、50ps 程度のコヒーレンス時間を有する半導体レーザでこの条件を満たすことができる。この試料を用いて時間分解カー回転測定を実施し、光学的スピン選択則の評価を行った。その結果、軽い正孔励起子を共鳴励起した場合にのみ、電子スピンの偏極が通常の重い正孔励起子に対して反対に偏極する現象を得た。これは軽い正孔励起子を量子状態転写過程の初段階とする我々の提案を、重い正孔と軽い正孔の逆転することなしに実現する可能性を示唆するものである。本現象の確認には発光の円偏光度を含めた励起波長依存性、磁場依存性などの詳細な評価が必要であり、来年度以降引き続き実験を行う。一方、量子輸送測定に関しては、GaAs/AlGaAs 系量子輸送デバイスを用いた単一光子応答の観測実験に成功した。AlGaAs バリア層に自然形成された負に帯電したドナー起因量子ドット (DX 中心) への単一正孔捕獲を量子ポイントコンタクトおよび量子ドットを用いた単一電荷検出器により観測したものである。さらに、GaAs/AlGaAs ヘテロ接合界面付近に自然形成された単一電子捕獲量子ドットへの電子の捕獲/放出に起因した単一電子ゆらぎを上記と同様の単一電荷検出器により観測し（ランダムテレグラムシグナル）、その頻度分布の磁場-ゲート電圧依存性から量子輸送による電子 g 因子測定を行った。これにより、単一量子ドットの g 因子を極低温下で測定する手段を得た。

通信波長帯である長波長での動作が可能な InP/InGaAs 系量子構造についてはプロセス技術向上と輸送光学特性評価を大野グループが行った。本年度、電子捕獲層となる g 因子制御量子井戸の輸送特性の評価を行った。ホール測定による移動度、電子濃度等の基礎データの測定を行い、ほぼ設計通りの特性を得た。一般的な GaAs 系素子では十分に確立している表面ショットキー電極の手法を InP 系の素子において確立するため、電極材料や製膜条件の最適化を行いリーク電流が少なく光照射下においても安定な構造を実現した。上記技術を用い、微細な表面ショットキー電極を設けて 2 次元電子を空間的に変調することで量子ポイントコンタクト構造、量子ドット構造を作成し、照射光波長に依存したピンチオフ特性、クーロン振動特性を得た。また、量子ポイントコンタクト近傍に自然形成された面型結合量子ドットにおいて電子スピンのパウリ排除律に起因するスピントロニクス現象を観測した。これは量子中継の基本要素の一つである 2 スピン相関測定（ベル測定）の基礎となるものである。本年度計画した抵抗検出 ESR による g 値評価については電子移動度改善の必要性を明らかにし、来年度以降継続して評価を行う。

理論面では g 因子、電子スピンドコヒーレンス、量子状態転写ダイナミクス、電子スピン-核スピン相互作用など実験をサポートする基礎的解析を行った。高河原グループでは、光子から電子スピンへの量子状態転写に際して、その有効性を妨げる要因の一つである電子正孔交換相互作用について、長距離相互作用を含めたシミュレーション解析を行い、転写の純粋度、忠実度を 1 に近くするための条件を考察した。その結果、正孔の引き抜き時

間を電子正孔交換相互作用の逆数よりも短くすることが主要要件であることがわかった。また、量子ドットにおける単一電子スピンの緩和について研究した。最低エネルギー準位のゼーマンダブレット間の縦緩和について、1フォノン過程と2フォノン過程の競合の様相を明らかにした。Kroutvar らの実験に則した解析により、実験データのない低磁場側での縦緩和時間を定量的に予言した。電子スピンのデコヒーレンス時間については、double-time Green 関数を用いた理論を定式化した。これを用いて、最低エネルギー準位のゼーマンダブレット間のデコヒーレンス時間を評価した。Steel らの実験値は不均一ひろがりを含む T_2^* になっているため、理論値より数桁短いことがわかった。さらに Petta らの実験に則して結合量子ドットにおける電子スピンと核スピンの相互作用を考察した。ゲート電圧を掃引して電子対のスピン状態を繰り返し測定する場合、核スピン状態に付与される位相因子が累積する結果として、電子対のスピン状態の観測結果(singlet か triplet か)に bunching が起こりうることを予言した。本結果については来年度引き続き解析を行う。

今村グループでは、光子・電子スピン量子メディア変換に必要な半導体量子井戸のデザインを行った。これまでに小坂等やYablonovitch等によって提案されていたInP系量子井戸の他にAlInAs/GaAs/AlInAs量子井戸のバンド構造を有限要素法を用いて計算し、歪みの効果と閉じこめの効果の競合をうまく利用することで電子のg因子をゼロにし、かつ軽い正孔の価電子帯から伝導帯への励起エネルギーが、重い正孔の価電子帯から伝導帯への励起エネルギーよりも小さくすることが可能であることを明らかにした。さらに外部磁場を印加した場合の価電子帯と伝導体の波動関数を計算するための有限要素法プログラムの開発を進めた。また、光子・電子スピン量子メディア変換を量子力学的モデルで記述し、単一光子の偏光状態から単一電子のスピン状態へ量子情報が転写される過程のダイナミクスを解析した。特に光子-量子ドット間の結合強度、量子ドットからの正孔のトンネルレート、正孔と電子の交換相互作用の強さ、入射光のスペクトル幅などのパラメーターに量子情報転写の効率と忠実度がどのように依存するのかについて数値計算を用いて詳細な解析を行った。その結果、高い転写確率を得るためには、光子-量子ドット結合強度と量子ドットからの正孔のトンネルレートの両方を入射光子のスペクトル幅よりも大きくとり、かつ、マッチング条件を満たす必要があることを示した。

3. 研究実施体制

「小坂」グループ

①研究分担グループ長：小坂 英男（東北大学、助教授）

②研究項目：

- ・光子-電子スピン量子状態転写を実現する具体的素子構造の提案とその基本特性デモンストレーション
- ・スピン縮退した量子井戸の時間分解磁気光学測定を用いた電子スピン g 因子およびコヒーレンス時間の評価

- ・ GaAs/AlGaAs 系量子輸送素子の単一光子応答特性評価と量子輸送測定による g 因子評価

「大野」グループ

①研究分担グループ長：大野 圭司（理化学研究所、研究員）

②研究項目：

- ・ InP/InGaAs/InP 系量子輸送素子の微細ショットキー電極構造の最適化
- ・ InP/InGaAs/InP 系量子輸送素子の 2 次元電子輸送特性とその光応答特性評価
- ・ InP/InGaAs/InP 系量子輸送素子の電子スピン輸送特性評価

「高河原」グループ

①研究分担グループ長：高河原 俊秀（京都工芸繊維大学、教授）

②研究項目：

- ・ 光子—電子スピン量子状態転写の素過程の解明
- ・ 電子スピンのデコヒーレンス解析
- ・ 電子スピン—核スピン相互作用解析

「今村」グループ

①研究分担グループ長：今村裕志（東北大学大学院工学研究科、助教授）

②研究項目：

- ・ 共鳴トンネルによる正孔引き抜きのダイナミクス解析
- ・ 量子構造素子の g 因子解析
- ・ 光子—電子スピン量子状態転写過程の量子効率および忠実度解析