

「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

本研究のねらいは、ナノテクノロジー、スピントロニクス、量子光学を総合した“ナノスピノフォニクス量子情報”という新分野を開拓し、通信に強い光子キュービットと演算に強い電子スピンキュービットを結ぶ量子インターフェースを実現することである。これにより、量子通信と量子計算を融合した学際領域を創出し、相乗効果をもたらす。その実現には、半導体中の励起子を操るバンドエンジニアリング、電子スピンを操るg因子エンジニアリング、量子位相を操るコヒーレンスエンジニアリングなどの要素技術が必要である。昨年度までに培ったこれら要素技術を総合し、今年度は光子から電子スピンへの量子状態転写の原理実証に成功した。g因子を制御した量子構造中に光生成した励起子のうち、電子のみに量子状態が転写できるよう半導体バンド構造を制御し、電子スピンの量子位相が観察できるよう工夫した。従来の古典的なスピノポピュレーションの転写に留まらず、位相まで含めた量子的なスピノコヒーレンスの転写を世界で初めて実証した。今後は、最終目標である“単一”の光子から“単一”の電子スピンへの転写へ向け、実験・理論両面から展開を図る。この目的に向け、今年度は転写の具体的な必要条件を理論的に明らかにした。また、予備実験として単一光子により生成した量子ドット内の単一電子を効率良く非破壊的に検出することに成功した。一方、設計自由度を増やすために縦型二重量子ドットを用いた光応答実験も行い、その有効性を示した。さらに、転写後の量子状態の長時間保持へ向けた理論検討も合わせて行った。

2. 研究実施内容

本プロジェクトの目的は、通信に適した光子キュービットから演算に適した半導体中の電子スピンキュービットへの変換である。この二種類のキュービットは異なる性質を持ちながらも、エネルギー・スピン・軌道という共通の自由度を持つ。光の偏光はスピンに相当し、これを電子のスピンに転写するのが本研究の課題である。我々の提案は、光学的スピノ選択則とスピノ軌道相互作用を利用し、電子系の軌道自由度を介してスピノ量子状態を受け渡すものである。このために必要な第一条件は、光子のエネルギー幅に対する電子と正孔の磁場分裂幅の大小関係である。特に電子の横磁場g因子を十分小さくする必要がある。昨年度はこのg因子を0.02以下と、通常より二桁以上小さくした。本年度の優先課題は、提案する機構による量子状態転写の可能性を示すことであ

る。今回、スピンのポピュレーションのみならず位相まで含めた量子コヒーレンスが、光から電子へと転写できることを示す実験に成功した。

実験に用いた素子は GaAs/AlGaAs 量子井戸を有し、電子および正孔のg因子を制御してある。小坂グループでは、この素子を用い、まずは光学的スピン選択則の確認のための“負の偏極”の観測に成功した。次に、入射光子のバンド幅に対して電子スピン状態は見分けがつかず、正孔スピン状態は見分けがつく条件で量子状態転写の実証実験を行った。本条件により、位相緩和の早い正孔を横磁場中で一つの固有状態に定め、位相緩和の長い電子のスピン状態だけを光子から転写することが可能となる。測定手法は時間分解カー回転測定であるが、通常は量子井戸に垂直なスピン成分しか測定できない。そこで、電子スピンの縮退度を落とさない範囲でg因子を意図的にゼロからずらし、電子スピンのブロッホ球内でのコヒーレントな回転(歳差運動)がスピン緩和時間内で観測できるようにした。このスピン回転の初期位相と励起光の偏光のポアンカレ球内での位相との相関を測定することで、量子状態転写の検証を行った。測定の結果、軽い正孔励起子を用いた時にのみ光子と電子の位相に一对一の線形相関のあることがわかった。一方、横磁場下ではゼーマン分裂しない重い正孔励起子を用いた場合には相関が見られず、我々の想定したメカニズムが機能していることを確認した。転写の確率は励起子の生成効率と同程度と考えられ、共振器構造の導入で増大できる。転写の忠実度は見かけ上1に近く見えるが、今後の詳細な検討が必要である。この実験において、軽い正孔のg因子が電子のg因子に対して十分大きいことが重要であるが、今年度はこの正孔g因子を励起スペクトルの磁場依存性から見積もり、理論グループの行った理論計算との良い一致を得た。また、今後この転写を単一光子から単一電子への転写に展開するための準備として、量子ドットの単一光子応答を観測した。毎秒100光子程度まで微弱にした光を0.3 K以下に冷却した電界閉じ込め型量子ドットに照射し、生成された量子ドット中の単一電子を数100nmの近傍に形成した量子ポイントコンタクトにより電荷検出した。これにより、単一光子で生成された電子・正孔対のうち、電子のみが量子ドットに捕獲される確率を光子エネルギーの関数として測定した。この結果、正孔の解離速度は数psと早く、その後に電子が捕獲される確率は0.3程度と見積もられた。磁場依存性および偏光依存性についても実験を試みたが、未だ不十分であり継続的な研究が必要である。今年度の計画書ではg因子のさらなる低減を掲げたが、現時点では本質的な課題ではないと考え延期した。動的核スピン偏極については、今年度は後述の理論的検討に留めた。

大野グループでは、量子輸送測定において実績を持つ縦型二重量子ドット素子を用いた量子状態転写の可能性を検討した。昨年度まで行った1.5Kでの光伝導評価をより低温で行うため、今年度は0.25Kまで冷却可能なヘリウム3冷凍機を用い、照射波長と強度を共に制御可能な光電気伝導評価システムを構築した。異種g因子の複合と間接励起子の生成が可能なGaAs系縦型二重量子ドット素子を用い、単色光照射下で量子輸送特性を評価した。ソースドレイン電圧を高くすることにより、二つのドットのうち一方に電子が、他方に正孔が束縛される間接励起子を、直接励起子より低エネルギーで励起し、量子ドット部にのみ励起子が生成されることを実験的に示した。電圧による吸収波長変化も確認した。これにより、従来のInP系素子において問題であった光電子

生成箇所の不確定性を回避でき、計画していた InP 系素子の表面ゲート構造、メサ構造の最適化は不要となった。また、縦型素子において確立している電氣的励起スペクトロスコピーの手法により、量子ドットのg因子(絶対値)を決定した。GaAs ドットで0.23、 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$ ドットで0.36であったが、組成と厚さの最適化で片方のg因子を0とすることができる。以上より、異種g因子複合量子井戸間の間接励起子が生成可能な縦型二重量子ドットは、量子状態転写へ向けた設計自由度向上に有効であることを示した。

今村グループでは、量子状態転写のために必要となる量子構造の詳細設計を行っている。今年度、その鍵となる量子構造における電子及び正孔のg因子解析、また高いQ値を有する共振器内での量子状態転写のダイナミクス解析を行った。g因子については、有限要素法によって半導体量子構造でのバンド構造およびg因子を求めるプログラムを作成した。今年度は GaAs/AlGaAs 量子井戸構造でのg因子を計算し、実験との良い一致を得た。今後、量子細線および量子ドットへの適用を行う。転写ダイナミクスについては、素子のモデルとして光共振器と結合した量子ドットを考え、転写の効率と忠実度を解析した。高効率な転写には、共振器効果により増強されたドット内励起子の自然放出レートと、ドットからの正孔の引き抜きレートとの整合が必要であり、そのレートを電子-正孔交換相互作用で生じる位相緩和レートより早くすることで高い忠実度が得られることを明らかにした。今年度の計画書に挙げた量子情報転写の成否確認手法の検討については、小坂グループにおいて行われたカー回転を用いた転写実証の実験を、理論的側面から支援した。

高河原グループでは、より長期的視野に立った理論検討を行っている。今年度、電界閉じ込め型量子ドットにおける量子状態転写、電子スピンコヒーレンス、電子スピン-核スピン間相互作用の三つについて素過程の解析を行った。電子正孔ともに束縛される光学ドットに対し、電気ドットと呼ぶ電界閉じ込め型量子ドットでは、電子は3次元的に束縛されているが、正孔は面内方向に解放されており連続スペクトルを持つ。この電気ドットにつき、光子から量子状態を転写された電子のコヒーレンスが劣化する様子を密度行列を用い解析した。量子状態転写に関して正孔の連続準位は致命的ではなく、むしろ電子準位間の緩和がコヒーレンスを劣化させることを明らかにした。電子スピンコヒーレンスの寿命は、量子中継応用では秒オーダーであることが望ましいが、最近GaAs電気ドットで報告された1秒のポピュレーション寿命とはほど遠い μs オーダーに留まる。低温でのコヒーレンス劣化の主要因であるフォノン放出と核スピンとの結合について考察した。フォノン放出は通常2フォノン過程として解析されるが、現実的なサイズの量子ドットでは数T以下の磁場下で2フォノン過程が主要となることを明らかにした。核スピンの影響は超微細相互作用によるが、素過程解析の結果、電子のスピン状態の観測が核スピン集団の状態分布に影響を及ぼし、それが次の電子スピン観測に影響するという、反作用の連鎖を発見した。特に、結合量子ドットにおいて二電子の一重項、三重項状態を区別する観測において、観測結果のバンチング(例えば、一重項状態を続けて観測する確率が高くなること)が起こることを見出した。電子スピンからさらに長寿命の核スピンへと量子状態を転写(書き込み)し、一時的にバッファした後に逆転写(読み出し)する可能性を示すものである。

以上のように目標達成に向けてチームが一丸となり、大筋では計画通り、かつ将来予測される間

題に柔軟に対応しながら、世界をリードする成果を上げることができた。

3. 研究実施体制

(1)「小坂」グループ

①研究者名

小坂 英男 (東北大学 助教授)

②研究項目

- ・光子から電子スピンへの量子状態転写を実現する具体的素子構造の提案とその原理実証
- ・電界閉じ込め型量子ドットによる単一光子から単一電子への変換実証

(2)「大野」グループ

①研究者名

大野 圭司 (理化学研究所 研究員)

②研究項目

- ・0.3 K以下の低温下で照射波長と強度を制御可能な光電気伝導評価システムの構築
- ・縦型二重量子ドット素子のg因子評価および光応答特性の評価

(3)「高河原」グループ

①研究者名

高河原 俊秀 (京都工芸繊維大学 教授)

②研究項目

- ・電界閉じ込め型量子ドットにおける量子状態転写の素過程解析
- ・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

(4)「今村」グループ

①研究者名

今村 裕志 ((独)産業技術総合研究所ナノテクノロジー研 主任研究員)

②研究項目

- ・量子構造における電子および正孔のg因子解析
- ・高いQ値を持つ共振器内での量子情報転写ダイナミクスの解析
- ・量子情報転写の成否確認手法の検討

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- A. Takamizawa, G. Yonezawa, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Littrow-type external-cavity diode laser with a triangular prism for suppression of the lateral shift of output beam", *Rev. Sci. Instr.* 77, 046102/1-4 (2006)
- H. Kosaka, Y. Rikitake, H. Imamura, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, "Negative Polarization through Photon to Electron Spin Polarization Transfer in GaAs Quantum Wells", *quant-ph/0609152* (2006).
- T. Kutsuwa, K. Arai, H. Shigyo, H. Kinjo, K. Ono, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, "Single photon response in GaAs quantum transport devices for photon-spin quantum state transfer", *Phys. Stat. Sol. (c)* 3, pp. 4326-4329 (2006).
- K. Arai, T. Kutsuwa, H. Kinjo, K. Ono, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Evaluation of g-factor by quantum transport measurement for photon-spin quantum state transfer", *Phys. Stat. Sol. (c)* 3, pp. 4334-4337 (2006).
- Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Hideo Kosaka, "Fidelity analysis of the photon-spin quantum state transfer", *Phys. Stat. Sol. (c)* 3, pp. 4350-4353 (2006).
- O. Cakir and T. Takagahara, "Electron spin dynamics and hyperfine interaction in coupled quantum dots", *Phys. Stat. Sol. (c)* 3, pp. 4392-4395 (2006).
- A. Tackeuchi, T. Kuroda, K. Yamaguchi, Y. Nakata, N. Yokoyama and T. Takagahara, "Spin relaxation and antiferromagnetic coupling in semiconductor quantum dots", *Physica E* 32, pp. 354-358 (2006).
- Y. Mitsumori, A. Hasegawa, M. Sasaki, and F. Minami, "Anomalous photon echoes and Rabi oscillations of quantum dot excitons", *Proc. SPIE* 6115, 61151J/1-6 (2006).
- Yoshiaki Rikitake and Hiroshi Imamura, "Effect of exchange interaction on the fidelity of quantum state transfer from a photon qubit to an electron-spin qubit", *Phys. Rev. B*, 74, 081307(R) (2006).
- S. Tarucha, Y. Kitamura, T. Koder, K. Ono, "Lifting of spin blockade by hyperfine interaction in vertically coupled double quantum dots", *Phys. Stat. Sol. B* 243, 3673 (2006).
- H. Kosaka, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, and H. Imamura, "Polarization Transfer from Photon to Electron Spin in g-factor Engineered Quantum Wells", *Appl. Phys. Lett.* 90, 113511 (2007).
- O. Cakir and T. Takagahara, "Quantum Dynamics of Electron-Nuclei Coupled System in Quantum Dots", *cond-mat/0611314* (2006).
- H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, "A quantum device interfacing photons and spins for quantum repeaters", *Proceedings of 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006)*, in press.
- Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, and Hideo Kosaka, "Effect of the electron-hole exchange interaction on the photon-spin quantum state transfer", *Proceedings of 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006)*, in press.
- T. Takagahara, "Non-Markoffian Theory of Electron Spin Decoherence in a Single Quantum Dot",

- Proceedings of 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006), in press.
- O. Cakir and T. Takagahara, "Spin Dynamics of Electron-Nuclei Coupled System in a Double Quantum Dot", Proceedings of 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006), in press.
 - O. Cakir and T. Takagahara, "Estimation of Nuclear Spin State in a Double Quantum Dot via Hyperfine Interaction", Proceedings of International Conference on Nanoscience and Technology (ICN&T 2006), in press.
 - O. Cakir and T. Takagahara, "Quantum Dynamics of Electron-Nuclei Coupled System in Quantum Dots", Proceedings of Second International Conference on Nanometer-Scale Quantum Physics (NanoPhys, Tokyo Institute of Technology COE21), in press.
 - H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, "Quantum state transfer from a photon to an electron spin for building a quantum repeater", Proceedings of 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC-8), in press.
 - Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura and Hideo Kosaka, "Fidelity of the photon-spin quantum state transfer", Proceedings of 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC-8), in press.
 - R. Shimizu, T. Yamaguchi, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, "Generation of polarization entangled photons using a spatial correlation in spontaneous parametric down-conversion", Proceedings of 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC-8), in press.