

「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 ・ 准教授

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

本研究の目的は、通信に強い光子キュービットから演算に強い電子スピンキュービットへの量子メディア変換の実現である。本目的に向け、ナノテクノロジー、スピントロニクス、量子光学を融合した“ナノスピノフォニクス量子情報”新領域を開拓した。その結果、光の偏光重ね合わせ状態から電子のスピン重ね合わせ状態へのコヒーレントなスピン状態転写に成功した。また、転写条件を満たす単一量子ドットを作製し光子により生成された単一電子検出に成功し、量子メディア変換の原理実証を行った。

2. 研究実施内容

現在までのところ概ね提案時に提示した計画通りに進捗している。これまでに基礎となる電子・スピン物性の評価、素子作製技術の確立、スピンコヒーレンスの実証を既に終了し、これからは単一スピン操作とそれに続くエンタングルメントの実証を通して光子-電子スピン間の量子相関検出を行い、量子中継器の基本機能素子を完成させる計画である。

小坂グループの使命は、本研究の課題である“光子から電子スピンへの量子メディア変換”の原理実証である。量子メディア変換は以下の4段階の過程を通じて実現される。第一段階は量子状態転写である。本段階では正孔が電子と共存するが、光子の量子状態は電子のみが受け継ぐ必要があり、電子の横磁場によるゼーマン分裂(g因子)はゼロでなければならない。第二段階は正孔の引き抜きである。このとき正孔は確定した一つの量子状態に留まる必要があり、横磁場分裂が可能な軽い正孔の一つの固有状態を選択的に励起しなければならない。第三段階は電子の検出である。このとき電子のスピン量子状態を破壊せず電荷数のみを正確に読み出す必要があり、

単一電荷計を内蔵していなければならない。最終段階は電子スピンのもつれ合い検出である。偏光相関を持つ光子対が電子スピンの変換されたとき、そのスピン相関を検出することで実効的に量子メディア変換を検証できる。g因子がゼロの一電子スピン状態を検出することはかえって難しく、実際の量子情報処理においても不要である。もつれ合い検出はパウリの排他律に基づくスピントロケードの応用で可能となり、量子中継などの応用につながる。上記4段階の中間目標設定のうち第三段階までを既に終了し、現在は最終段階である第四段階を遂行中である。第一段階の量子状態転写の基礎実証では、入射する光子の偏光位相と生成される電子のスピン位相を一致させるコヒーレントな状態転写の実験に世界で初めて成功した(PRL, 100, 096602 (2008))。また、g因子がゼロでスピン歳差運動からは位相が推定できない場合でも転写が成功していることを、スピン状態トモグラフィと呼ぶ新たな測定手法を開発して証明した。この手法は電子スピンのコヒーレンスを直接測定する初めての手法であり、電子スピンの密度行列を再構成し、入射光子の偏光状態との比較により転写の忠実度を見積もることができる。第二段階の正孔引き抜きと第三段階の単一電子検出は、電界閉じ込め型の単一量子ドットとその近傍に形成した量子ポイントコンタクトを用いて実証した。g因子がゼロとなる6nmの量子井戸(カー回転測定で検証済み)に直径300nmのゲート開口を有する電子ドットを形成し、その両脇に単一電荷計となる量子ポイントコンタクト(QPC)を形成した。本素子に1秒間に数光子レベルの光を照射すると、励起子吸収に対応する波長でのみ、QPC電流の急峻な減少を確認し、光子により生成された電子の検出に成功した。最終段階のスピンもつれ合い検出には3つの準備が必要である。一つ目は電子ドット中の一重項・三重項スピン状態の分裂(S-T分裂)とS-T交差を観測すること、二つ目はスピントロケードによりS-T選択機能を観測することであり、既にこれらの観測に成功している。三つ目は光生成電子の検出(エネルギー)分解能を一重項と三重項のエネルギー差以下とすることである。電界閉じ込め型量子ドット中の荷電励起子の解明によりこの実現を目指している。

大野グループでは、昨年度行った0.25Kにおける縦型2重量子ドットを用いた光伝導研究を進め、微弱光の元での単一光子吸収を電氣的に検出することに成功した。光生成された正孔がドット・ゲート界面に捕捉され、ドットの静電ポテンシャルが変化する様子を電氣的に検出した。光が十分微弱な場合、単一の光生成正孔の捕獲による離散的なドットポテンシャルの変化が観測され、単一光子吸収イベントをとらえることに成功した。統計的解析により、捕獲された単一正孔がドットへおよぼす平均の静電結合エネルギー変化は約0.1meVであり、これはドット・ゲート界面が捕獲サイトになっている予想と一致する。また素子の量子効率も励起波長に依存し約0.2%から1.5%であることが分かった。さらに同様の研究を、InAs自己形成ドットを内包する縦型構造に対して応用し、同様な単一光子吸収を観測することに成功した。この系は通常量子井戸から形成される縦型ドット系と異なり、ドットの励起エネルギーを電極部のそれから分離することが容易であり、間接励起子を用いずともドットのみを選択的に光励起できる利点がある。さらに、昨年までに得られたInGaAs量子ドットにおけるg因子制御技術をさらに発展させ、異なるg因子をもつ2重量子ドットの作製に成功した。この素子の高磁場における共鳴トンネル伝導において、2つのドットのゼーマン分裂の大きさが互いに異なることに起因する新しい伝導抑制現象(ゼーマンボトルネック効果)を

初めて観測した。

今村グループでは主に量子井戸構造における電子と正孔の g 因子解析、励起子と共振器の強結合領域における量子状態転写ダイナミクスの解析、および時間分解カー回転測定 of 理論構築を行った。電子と正孔の g 因子解析においては数値シミュレーションを用いて小坂グループの実験で用いられる GaAs/AlGaAs 量子井戸の g 因子を決定し、観測された g 因子が k, p 理論で説明可能であることを示しシミュレーションの有効性を明らかにした。量子状態転写ダイナミクスの解析では、光子の量子状態が電子スピンの量子状態に転写される過程を直接シミュレートすることにより、高い転写確率・フィデリティ（忠実度）を実現するためのデバイス作製条件を求めることに成功した。時間分解カー回転測定 of 理論構築では、小坂グループで行われている時間分解カー回転を用いた光子からスピンへのコヒーレンス転写の実験を表すハミルトニアンに対して線形応答理論に基づいたカー回転の理論を構築し、コヒーレンス転写の実験の解析を行った。また、スピン状態トモグラフィの理論モデルも構築し、実験で観測されたカー回転の情報から密度行列を再構成できることを示した。

高河原グループでは、量子中継器を実現するのに不可欠な光子から電子スピンへの量子状態転写、異なる光子から量子状態転写を受けた電子間の相関測定、また量子中継器を実現する上では本質的ではないが、装備できることが強く望まれるものとして核スピンメモリの三つの要素について物理的素過程を考察し、実験を行う上で最適な材料、配置条件等についての提言を行うために理論的検討を進めてきた。量子状態転写については、最も簡単なモデルに基づく解析は既に終了し、実験で用いられるゲート制御量子ドットについての解析を進めている。電子スピンの縦緩和、デコヒーレンスについての研究は、1フォノン過程と2フォノン過程の競合に関する解析は終了し、スピン軌道相互作用におけるラッシュバ項とドレッセルハウス項の競合、原子核スピンの超微細相互作用による機構の解析を進めている。ファラデー回転に基づく2電子の量子相関測定については、基本的な素過程を解明し、一重項と3つの三重項状態の計4つの状態を、ファラデー回転角の大きさとその向きにより原理的には区別できることを見出した。現在は、3電子+1正孔などの荷電励起子状態のエネルギー準位、波動関数を計算し、より定量的な解析を進めている。電子・核スピン結合系の量子ダイナミクスについては、バンチングやリバイバルなどの新しい現象を予言した。更にこれらの現象が2重量子ドットにおける2電子のみならず、単一量子ドット中の1個または2個の電子についても起こることを見出した。現在は、核スピン量子メモリについての考察を進めている。

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）
- 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
- ・量子状態トモグラフィによる量子状態転写の忠実度評価
- ・電界形成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（(独)理化学研究所河野低温物理研究室）

②研究項目

- ・縦型 2 重量子ドットにおける単一光子応答の電氣的検出
- ・自己形成量子ドットにおける量子輸送と光応答
- ・電子 g 因子の異なる縦型 2 重量子ドットにおける高磁場スピン依存電子輸送特性

(3) 今村グループ

①研究者名：今村裕志（産業技術総合研究所）

②研究項目

- ・カー回転測定を用いた量子情報転写実験における光学応答特性に関する理論解析
- ・電界形成量子ドットを用いた量子状態転写実験における転写ダイナミクスの理論解析
- ・量子細線および量子ドットにおける電子及び正孔 g 因子の解析

(4) 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）

②研究項目

- ・電界形成量子ドットを用いた量子状態転写実験における励起子生成、正孔解離のダイナミクスに関する理論検討
- ・カー（ファラデー）回転測定による量子ドット中の 2 電子の量子相関検出手法の理論検討
- ・ g 因子スイッチングによる電子スピンから核スピンへの量子状態転写の理論検討

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- [1] 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).
- [2] H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, and

- K. Edamatsu, "A quantum device interfacing photons and spins for quantum repeaters", Proceedings of 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006), pp.1099-1100, 2007.
- [3] 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) , pp.1103-1104 (2007).
- [4] 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), pp.1333-1334 (2007).
- [5] 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), pp.1107-1108 (2007).
- [6] 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), J. Phys.: Conf. Ser. 61, pp.175-179 (2007).
- [7] H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, and 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), pp. 575-578 (2007).
- [8] 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), pp. 583-586 (2007).
- [9] 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), pp.43-46 (2007).
- [10] Hideo Kosaka, Hideki Shigyou, Yasuyoshi Mitsumori, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Takeshi Kutsuwa, Koichiro Arai and Keiichi Edamatsu, "Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor" , Quantum-Physics, arXiv:0710.3847 (2007).
- [11] J. Baugh, Y. Kitamura, K. Ono, and S. Tarucha, "Large nuclear Overhauser fields detected in vertically-coupled double quantum dots", Phys. Rev. Lett. 99, 096804 (2007).
- [12] Yoshiaki Rikitake Hiroshi Imamura and Hideo Kosaka, "Theoretical Analysis of the Optimal Conditions for Photon-Spin Quantum State Transfer", Journal of the Physical Society of Japan, 76, 114004 (2007).
- [13] 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), *Physica E* 40, pp. 379-382 (2007).

- [14] T. Takagahara and O. Cakir, “Theoretical aspects of quantum state transfer, correlation measurement and electron-nuclei coupled dynamics in quantum dots”, *J. Nanophoton.* 1, 011593 (2007).
- [15] T. Koderu, K. Ono, S. Amaha, Y. Tokura, Y. Arakawa, and S. Tarucha, “Singlet-triplet transition induced by Zeeman energy in weakly coupled vertical double quantum dots”, *Physica E*, 40 pp. 1139-1141 (2008).
- [16] O. Cakir and T. Takagahara, “Quantum dynamics in electron-nuclei coupled spin system in quantum dots: Bunching, revival, and quantum correlation in electron-spin measurements”, *Phys. Rev. B* 77, 115304 (2008).
- [17] Hideo Kosaka, Hideki Shigyou, Yasuyoshi Mitsumori, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Takeshi Kutsuwa, Koichiro Arai and Keiichi Edamatsu, “Coherent spin quantum state transfer from photons to electrons in a semiconductor”, *Physical Review Letters*, 100, 096602 (2008).
- [18] K. Zaitsev, Y. Kitamura, K. Ono, and S. Tarucha, “Vertical quantum dot with a vertically coupled charge detector”, *Appl. Phys. Lett.* 92, 033101 (2008).

Accepted:

- [19] S. M. Huang, H. Akimoto, K. Kono, J. J. Lin, S. Tarucha, and K. Ono, “The Reduction of g factor at different quantum states”, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 Special Issue*, .Accepted.

Submitted:

- [20] T. Koderu, K. Ono, S. Amaha, Y. Tokura, Y. Arakawa, and S. Tarucha, “Assignment of influence of Phonons and nuclei on resonant tunneling in vertical double quantum dots”, *Phys. Stat. Sol. B*, Submitted.
- [21] S. Amaha, C. Payette, J. A. Gupta, T. Hatano, K. Ono, T. Koderu, Y. Tokura, D. G. Austing, and S. Tarucha, “Two level mixing effect proved by resonant tunneling through vertically coupled quantum dots”, *Phys. Stat. Sol. B*, Submitted.
- [22] S. Amaha, T. Koderu, T. Hatano, K. Ono, Y. Tokura, S. Tarucha, J. A. Gupta and D.G. Austing, “Pauli spin blockade and singlet-triplet mixing effects in many-electron weakly coupled quantum dots”, *Appl. Phys. Exp*, submitted.