

「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。この目的に向け、光子から電子への量子的な重ね合わせ状態の転写条件を実現し、コヒーレントなスピン状態転写として観測に成功した。また、状態転写された電子スピンのコヒーレンスを直接的に観察する電子スピントモグラフィの技術を新たに開発し、転写の忠実度を評価した。さらに、転写条件を満たし単一電子スピンのゲート操作やスピン相関検出が可能な単一量子ドット素子を作製し、単一光子により生成された単一電子の捕獲・非破壊検出・初期化など量子メディア変換素子に必要な基本動作の実証を行った。上記一連の取り組みを通じ、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“ナノスピンフォトニクス量子情報”と呼ぶ新領域を開拓した。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

現在までのところ概ね提案時に提示した計画(表1)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、光から電子へのスピンコヒーレンス転写の実証、単一電子スピン操作、電子スピン量子相関検出の実証をほぼ終了した。最終年度となる H21 年度までに予定している量子中継器の基本機能素子の個別機能を原理的には全て確認したことになる。

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。昨年度(H19 年度)、光から電子スピンへのコヒーレンス転写に初めて成功した[文献1]。しかしながら、通常のスピン歳差運動を利用したスピンコヒーレンス推定法では、理想的な量子状態条件である電子g因子がゼロの量子構造には適用できず、また完全に任意の量子状態転写を証明することが不可能であった。この問題を解決すべく、今年度(H20 年度)、光から状態転写された任意の電子スピンのコヒーレンスを直接的に読み出す電子スピントモグラフィ測定に初めて成功し、任意状態転写の実証を行った[文献9]。これにより、電子g因子がゼロで磁場中でも歳差運動しない転写の理想条件下においても転写が成功することを実証し、

実用化を目指して個々の機能に改良を施すとともに、包括的な機能実証を行う。

二光子相関の二電子相関への転写実証については、実験を試みてはいるものの、今年度報告に値する成果は得られなかった。

大野グループでは、二重量子井戸を狭窄して作製される従来型の縦型量子ドットから、自己形成 InAs ドットを内包する縦型素子に研究対象をシフトし光伝導研究を進めた。当初計画した自己形成 InAs 量子ドットを2つ直列に内包する InAs₂ 重ドット素子はその結晶成長に起因する歩留まりが低く、よく定義された2重ドットを得ることが困難であったため、単一の InAs ドットを内包する素子について研究を行った。この素子に於いてもドットの励起エネルギーが GsAs 電極部分のそれから大きく異なるため間接励起子に頼らずともドットのみを選択的に励起することが可能である。実際我々は GsAs 電極部分の励起波長 850nm から十分離れた波長 1025nm において、光励起正孔捕獲による大きな光応答を電氣的に検出することに成功した。単一正孔捕獲によるドットの静電エネルギー変化は、5meV 以上もあり、その吸収帯幅は光学系でリミットされる 2nm であった。これは単一 InAs ドットに光生成された正孔がドット自体、もしくは InAs ドット・GaAs 界面に存在する単一のサイトに捕獲されていることを示唆している。CdSe ナノコロイド量子ドット構造においては 1.5K における電気伝導測定を行い、100meV を超える大きなクーロン帯電エネルギーを安定して観測した。現在半導体グリーンレーザーの照射による光応答実験を続けているが、再現性のある光応答の観測には至っていない。

量子ドットのナノ秒高速電圧制御と光生成電子の捕獲については、昨年度までに行った 1.5K での電圧制御パルスに加え、あらたに He3 冷凍機へ高速制御ラインの導入を行い、0.3K の温度で最大 100mV のソースドレイン変調を 1ns 以下時間でスイッチすることに成功した。同時に光ファイバにより様々な波長の単色光照射を行い、高速電圧スイッチングによる間接励起子の生成・光生成電子捕獲を目指したが、今のところ再現性のある照射波長依存性を得るには至っていない。

昨年度作製に成功した異なるg因子をもつ2重量子ドットにおいて明瞭なスピンプロケードを観測し、そのリーク電流の磁場依存性を調べることで異種g因子系における核スピン効果の研究を行った。従来の同種g因子系のリーク電流においてもみられた低磁場(<1T)でのヒステリシス現象に加え、新たに2T以上においてもヒステリシスが観測された。どちらのヒステリシスもrf交流磁場に対する応答が観測され、核スピンに起因する効果であることが確認された。現在これが異種g因子系に特有な効果であるか見定めるため詳細な解析を行っている。

今村グループでは、主に小坂グループで行われている電子スピントモグラフィ測定への理論的なサポート、および2重量子ドット内に閉じ込められた2電子スピン状態のコヒーレンスを電氣的に測定する手法の概念設計を行った。力武グループと協力し、昨年度までに構築したカー回転の理論を発展させ、光から状態転写された任意の電子スピンのコヒーレンスを直接的に読み出す電子スピン状態トモグラフィの理論モデルの構築を行った。構築した理論モデルを用いて実証実験手法の提案、および結果の解析を行い、電子g因子がゼロで磁場中でも歳差運動しない転写の理想条件下においても、1に近い忠実度で状態転写ができることを明らかにした。さらに、スピン状態トモグラフィの理論モデルを量子ドット系に発展させ、量子ドットにおけるより精密なスピン状態トモグラフィの理論を構築した[文献9]。

また、2 重量子ドット内に閉じ込められた 2 電子スピン状態のコヒーレンスを電氣的に測定する手法の概念設計では、量子ドットのエネルギー準位と量子ドット間の飛び移り確率をゲート電圧で操作することにより、シングレットとトリプレットの重ね合わせで表現される 2 電子スピン状態のコヒーレンス(量子力学的な位相)を量子ドット内の電子数を測定することにより観測することが可能であることを示した。現在は限定された条件下で解析的な表式を得た段階であるが、今後より詳細な解析を行い、2 電子スピン状態のコヒーレンス測定の実験を行うための条件を明らかにし、実験グループに実証実験の提案を行いたい。

異なる g 因子を持つ 2 重量子ドットを用いた量子情報処理デバイスの提案および理論解析については、ESR とスピンブロッケードを用いたベル状態測定器の提案に向けた理論解析が現在進行中である。

力武グループでは今村グループと密接な協力体制の下、電子スピントモグラフィをカー回転測定により行う手法を提案し、その理論構築を行った。スピンの任意方向軸に対する射影成分を直接検出することで、従来不可能であった g 因子が 0、すなわちラーモア歳差運動をしない電子スピンに対しトモグラフィ測定をすることが可能となった[文献9]。

また、量子状態転写の新しい転写手法として、従来考えてきた偏光状態ではなく、実際の量子情報通信に用いられるタイムビン(Time-bin)に量子情報がコーディングされた光子から電子スピンへ転写を行う手法を考案し、解析を行った。この手法は偏光状態からの転写で用いたような、特別な状態にある軽い正孔状態を用意する必要がなく、単純な光学遷移のみを用いるため、GaAs 系のみならず他の固体素子に対しても適応が可能である。簡単なモデルを用いた理論解析により、この転写手法が原理的にはうまく働くことを示した。今後はより詳細な解析を行い、高い転写フィデリティを得るためのデバイス条件を明らかにしていくとともに、他の固体系への応用を検討し提案を行いたい。

単一光子から単一正孔スピンへの量子状態転写の理論検討については今年度大きな進展はなかった。

高河原グループでは、量子中継器を実現する上で不可欠な要素技術、即ち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の核スピンメモリ等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理論的検討を進めてきた。昨年度、単一量子ドットに存在する 2 電子の一重項と三重項の計 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。今年度は、空間的に離れた場所に作られた 2 電子のスピン相関状態を測定するトモグラフィの方式を考案した。

核スピンメモリに関しては、1 個又は 2 個の電子スピンから 1 個の原子核スピンへの量子状態転写のアルゴリズムを考案した。2 電子の場合は、磁場による一重項—三重項交差を利用し、超微細相互作用の制御(on/off)を行うものである。具体的には IV 族元素半導体、II-VI 族半導体の局在電子系やナノ構造を考え、材料系に固有のメリット/デメリットを明らかにした。

電子スピンを超高速に回転させるために、荷電励起子を中間状態とする誘導ラマン(STIRAP)過程が提案され、実験も報告されている。ここでは電子スピンの回転を精密に制御す

るための条件を考察し、荷電励起子状態に励起を残さないためには励起光の detuning を大きくすることが必要だが、そうすると回転角が小さくなること、大角度の回転のためには単一パルスより多パルスの方がよいこと、などを見出した。また、2電子スピンの部分空間(一重項—三重項)内でのスピン回転も STIRAP 過程により実行可能であることを見出した。

ゲート制御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に関しては、今年度大きな進展はなかった。

3. 研究実施体制

(1) 小坂グループ

① 研究分担グループ長： 小坂 英男 (東北大学、准教授)

②研究項目

- ・光子から電子スピンへの状態転写の忠実度向上
- ・スピン状態トモグラフィの全射影基底への拡張
- ・転写のプロセストモグラフィによる転写に関わる量子操作の同定
- ・二光子相関の二電子相関への転写の実証

(2) 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、専任研究員)

②研究項目

- ・自己形成 InAs₂ 重量子ドット、および半導体ナノコロイド量子ドットにおける電子輸送特性の単一光子応答
- ・2重量子ドットにおける高速動作と単一光生成電子の捕獲
- ・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研究分担グループ長： 今村 裕志 (産業技術総合研究所、主任研究員)

②研究項目

- ・スピンプロッケードを用いたエンタングルメント検出の理論解析
- ・異なる g 因子を持つ 2重量子ドットを用いた量子情報処理デバイスの提案および理論解析

(4) 力武グループ

①研究分担グループ長： 力武 克彰 (仙台電波工業高等専門学校、助教)

②研究項目

- ・単一光子から単一正孔スピンへの量子状態転写の理論検討
- ・光学応答による電子スピン状態トモグラフィについての理論解析

(5) 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

- ・カー(ファラデー)回転に基づく量子ドット中の2電子の量子相関測定に関する理論検討
- ・少数電子・少数原子核スピン結合系からなる量子メモリの理論検討
- ・誘導ラマン過程による単一電子のスピン状態操作の理論検討
- ・ゲート制御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

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表（原著論文）

1. 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", *Physical Review Letters*, 100, 096602 (2008).
2. Ryosuke Shimizu, Takashi Yamaguchi, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, and Keiichi Edamatsu, "Generation of polarization entanglement from spatially correlated photons in spontaneous parametric down-conversion", *Phys. Rev. A* 77, 032338 (2008).
3. S. M. Huang, H. Akimoto, K. Kono, J. J. Lin, S. Tarucha, and K. Ono, The study of spin transport from doublet to triplet states in Quantum Dots, *Jpn. J. Appl. Phys.* 47, No. 4, 3257 (2008).
4. S. Amaha, C. Payette, J. A. Gupta, T. Hatano, K. Ono, T. Koderu, Y. Tokura, D. G. Austing, and S. Tarucha, 'Two level mixing effects probed by resonant tunnelling through vertically coupled quantum dots', *physica status solidi (c)* 5, 174 (2008).
5. 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 (5), 1139(2008).
6. K. Zaitu, Y. Kitamura, K. Ono, and S. Tarucha, Vertical quantum dot with a vertically coupled charge detector, *Appl. Phys. Lett.* 92, 033101 (2008).
7. J. Baugh, Y. Kitamura, K. Ono, S. Tarucha, Dynamic nuclear polarization in a double quantum dot device: electrical induction and detection, *Phys. Stat. Sol. (c)* 5, No.1, 302 (2008)
8. 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).
9. Hideo Kosaka, Takahiro Inagaki, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Yasuyoshi Mitsumori and Keiichi Edamatsu, "Spin coherence tomography of optically imprinted electrons in a semiconductor", *Nature*, 457, 702 (2009).
10. Nobuyuki Matsuda, Ryosuke Shimizu, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, and Keiichi Edamatsu, "Observation of optical-fiber Kerr nonlinearity at the single-photon level", *Nature*

- Photonics, 3, 95-98 (2009).
11. H. Kosaka, H. Shigyou, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, K. Edamatsu, “Coherent spin state transfer from light to electrons in a semiconductor”, Proc. of International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2008), in press (2009).
 12. N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, “Measurement of cross-Kerr nonlinearity induced by a single-photon-level coherent pulse in a photonic crystal fiber”, Proc. of International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2008), in press (2009).
 13. Y. Mitsumori, N. Kato, H. Kosaka, K. Edamatsu, N. Yamamoto, K. Akahane, “Time-resolved photoinduced Kerr rotation in semiconductor microcavity”, Phys. Stat. Sol. (c), vol. 6/1/2009, pp. 292-295, in press.
 14. 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, accepted to Appl. Phys. Exp.

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 1 件 (CREST 研究期間累積件数 : 1 件)