

量子中継のための光子-電子スピン量子メディア変換技術に関する研究 (041402001)

Research on photon-to-electron spin quantum media conversion technology
for quantum repeaters

研究代表者

小坂英男 東北大学電気通信研究所

Hideo Kosaka, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

研究分担者

高河原俊秀[†]

Toshihide Takagahara[†]

[†]京都工芸繊維大学 工芸学部

[†]Department of Electronics and Information Science, Kyoto Institute of Technology

研究期間 平成 16 年度～平成 20 年度

概要

本研究では、量子通信の距離を飛躍的に向上するための量子中継器の実現に向け、伝送を得意とする光子から処理を得意とする電子スピンへの量子メディア変換を可能とする半導体ナノデバイスについての研究を行った。本研究のポイントは、電子のスピン磁場中での振舞いを表す指標である g 因子を自在に制御し、光子の偏光量子状態から電子のスピン偏極量子状態への一対一写像を可能とした点である。本研究により、現状で 100km 程度に留まる量子通信の壁を打破し、1000km 超の量子通信ネットワークを可能とするための要素技術を確認した。

Abstract

In this project, we have researched on a semiconductor nano-device that enables quantum media conversion from a photon, which is suited for communication, to an electron spin, which is suited for processing for the development of a quantum repeater which will largely extend the distance of quantum communications. The important points of this project are engineering of g -factor, which indicates the behavior of electrons under a magnetic field, and one-to-one mapping of a photon polarization state to an electron spin state. Through the project, we have established the elemental technologies needed for the development of quantum communication networks over 1000 km, which is much longer than the conventional distance limit of around 100 km.

1. まえがき

スピンは電子の基本的な性質であり、量子情報の処理・保存において重要な役割を果たす。一方、量子情報の伝達に不可欠な光子の偏光も、スピンと同様の性質を持ち擬似スピンと呼ばれる。光子と電子の量子情報は、このスピンという共通の自由度を介して交換できる。このような異なる形態の量子媒体間の量子情報交換（量子メディア変換）は、量子がエネルギーのみならず情報の最小単位であることに基づく量子情報技術に不可欠である。本発表では、光の偏光状態の重ね合わせを電子スピンの状態転写[1]、逆に電子のスピン状態の重ね合わせを光の偏光状態に写し取り復元するスピン状態トモグラフィ[2]の実験結果について報告する。

2. 研究内容及び成果

2.1 光から電子へのスピン状態転写[1]

スピン状態転写とは、図 1 (a)に示すように光子の偏光擬似スピン状態を示すポアンカレ球から電子スピンの偏極状態を示すブロッホ球への一対一写像である。ここでは実験試料として GaAs/AlGaAs を用い、図 1 (b)に示すように量子井戸の面内方向に磁場 B_x を印加し、軽い正孔の横磁場ゼーマン分裂が入射光子のエネルギー幅より十分大きくなるようにした。このとき、ゼーマン分裂した軽い正孔の片方のみを光学励起すれことにより、二重に縮退した電子スピンとの間に V 型の遷移が可能である。これにより、任意の電子スピン状態が光子の偏光を選ぶことにより生成できる。つまり任意の状態転写が可能となる。

図 2 に実験結果を示す。スピン状態の測定には、通常の

時間分解カー回転測定を用いた。本測定法では電子スピンの井戸に垂直方向の射影成分が得られる。ここでは電子の g 因子は完全にゼロとはしていないため、生成された電子スピンは磁場により x 軸周りに歳差運動する。この結果得られる振動信号の振幅と初期位相から、生成された電子スピンの初期状態を推定した。通常の重い正孔励起を励起した場合と異なり、円偏光励起、直線偏光励起に対する測定結果が共にほぼ同じ振幅の振動構造を示す。右回り (σ^+) 左回り (σ^-) 円偏光励起では最大値あるいは最小値か

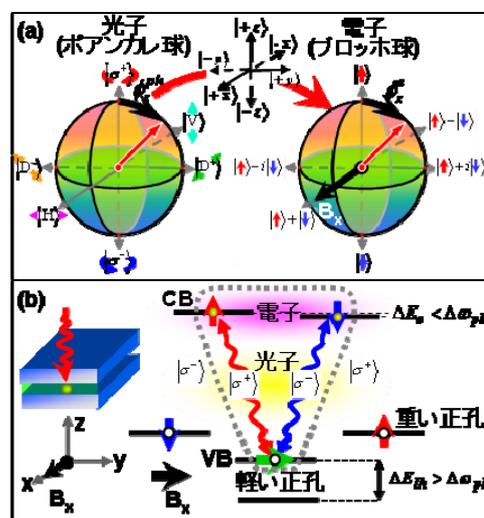


図 1. 光子から電子へのスピン状態転写の原理説明図

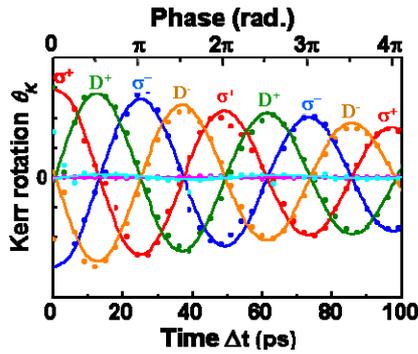


図 2. 時間分解カー回転測定による光子から電子スピンへの状態転写後のスピン状態変化。入射光の偏光に対応して電子スピンの位相が変化することがわかる

ら始まる周期振動を示し、生成された電子スピンの向き (+z) あるいは下向き (-z) であることが分かる。一方、ポアンカレ球上で $\pm y$ 方向の直線偏光 (D^+/D^-) 励起では、右/左回り円偏光励起の場合より $\pi/2$ だけ位相シフトしており、生成された電子スピンの方向がブロッホ球上で $\pm y$ 方向を向いていたことを示唆する。

2.2 電子スピン状態トモグラフィ [2]

上記実験では、スピンの位相を振動の初期位相により推定した。しかしながらこの方法では、完全に縮退した歳差運動しないスピンの位相は推定できず、また歳差運動する場合でも磁場に垂直な面内での位相しか推定できない。本課題の克服のため、我々はトモグラフィックカー回転と呼ぶ手法を開発し、電子スピンの位相を直接観測した。本手法は、横磁場中で図 1 と同様の V 型の軽い正孔励起子を仮想励起することにより、従来 \uparrow か \downarrow にしか射影できなかったスピン射影を任意の基底への射影に拡張し、電子スピンのトモグラフィ (断層撮影) 測定を可能とするものである。つまり、スピンがブロッホ球内でどこを向いているかを一意的に決定し、密度行列の再構築が可能である。

励起光の偏光状態をポアンカレ球の $y-z$ 面内で連続的に変化させたときの、生成された電子のスピン状態の応答を図 3 に示す。 ϕ_x^{ph} , ϕ_x^e はそれぞれポアンカレ球、ブロッホ球内の状態ベクトルの z 軸からの傾き角であり、例えば斜め 45° 直線偏光の $|D^+\rangle$ は $\cos(\phi_x^{ph}/2) |+\rangle + i \sin(\phi_x^{ph}/2) |-\rangle$ ($\phi_x^{ph} = \pi/2$) のように表される。入射光の偏光と生成される電子スピンの状態ベクトルの一致が分かる。磁場方向のスピン成分がないことも本測定法により確認した。

さらに、本手法を用い歳差運動を単なる振動ではなく、首振り運動として観察することに初めて成功した (図 4)。g 因子が極めて小さく歳差運動がほぼ観測されない場合でも、スピン方向を確定できることも同様の実験で確認し

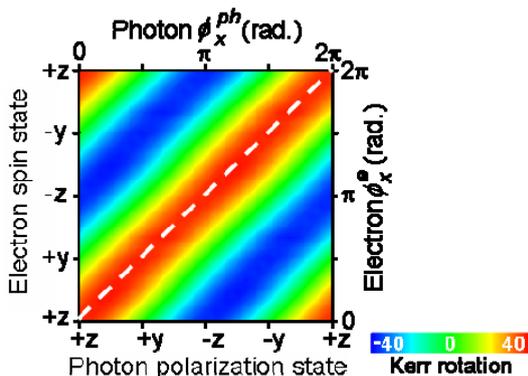


図 3. トモグラフィックカー回転により明らかとなった入射光の偏光と転写された電子スピンの位相相関

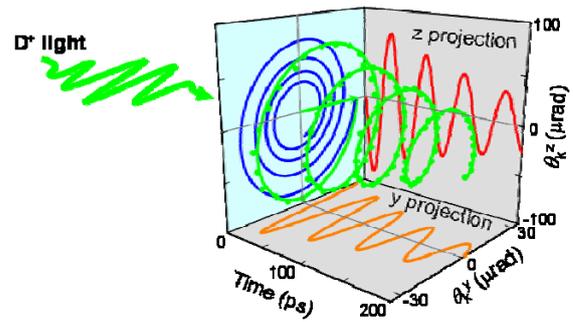


図 4. 電子スピン状態トモグラフィ測定によって捉えた歳差運動する電子スピン。初期状態は書き込み光の偏光 (D^+) と一致していることが分かる

た。このような凍結した電子スピンは、エネルギーと量子位相の両方を完全に保存して光子から転写することが可能であり、高い転写の忠実度が期待される。実際に得られた忠実度は 86%であったが、これはコヒーレンスの経時劣化を含み、変換直後の忠実度はさらに高い。

2.3 量子ドットによる量子メディア変換デバイス

単一量子ドットを用い、単一光子から単一電子への変換、捕獲、検出を行った (図 5)。また、単一電子スピンのマイクロ波共鳴によって制御できることを示した。

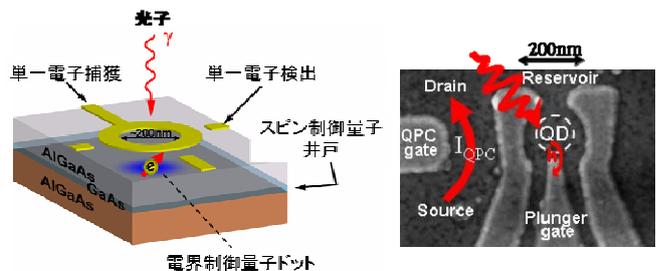


図 5. 量子ドットを用いた量子メディア変換デバイス

3. むすび

量子情報通信の通信距離を根本的に伸ばすために不可欠な量子中継器実現へ向け、光子から電子スピンへの量子メディア変換の基礎技術を開発した。

【誌上発表リスト】

- [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] 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).
- [3] 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).

【報道発表リスト】

- [1] "東北大—量子暗号通信の中継技術 光から電子に変換成功"、日刊工業新聞、2008年2月27日
- [2] "量子の状態 光で測定 — 量子コンピュータへ道"、日刊工業新聞、2009年2月5日
- [3] "光子から電子に伝達 — 東北大、中継器の基礎技術"、日経産業新聞、2009年2月5日