

平成23年4月8日



単一光子が作る単一電荷とスピンの検出に成功 — 量子情報のネットワーク化へ道 —

最先端研究開発支援プログラム (FIRST) *1) 「量子情報処理プロジェクト」 (研究支援担当機関：国立情報学研究所[所長：坂内 正夫]、代表研究者：山本喜久 国立情報学研究所/スタンフォード大学教授) における共同提案者 樽茶 清悟 (東京大学[総長：濱田 純一]大学院工学系研究科教授) とそのグループは、単一光子が生成した単一電子を電氣的に制御された量子ドット中に捕捉し、かつ自在に外部へ取り出す技術を開発しました。さらに捕捉された単一電子のスピンを、その状態が失われる前に検出できることを確認することに初めて成功しました。この成果は、スピン量子素子において、単一光子と単一電子スピン間で量子状態の変換とその検出が可能であることを示しており、この手法によって単一光子-単一電子スピン間の量子状態転写を実現し、量子インターフェースの開発へ展開する重要な成果と位置づけられます。

量子情報処理は、次世代の高度情報化社会を支える基盤技術の一つで、超並列処理を可能にする量子コンピュータや、絶対に安全な暗号通信、それらを結ぶ量子ネットワーク技術など、情報通信にとって革新的なパラダイムを切り開く研究分野です。

この成果は、平成23年4月8日(金) (米国時間) 発刊の「Physical Review Letters」誌 (電子版) に掲載されます。*2)

樽茶教授をリーダーとする研究グループは、FIRSTプログラムの支援を受け、半導体量子ドット中の電子スピンを量子ビットとする量子情報処理の実用化を図るための周辺技術として、長距離通信を担う光子との間で情報の受け渡しを行う技術、即ち、「量子情報処理の基本単位である単一光子と単一電子スピン間の量子インターフェース」の開発を目標の一つとしています。

*1) 最先端研究開発支援プログラム (FIRSTプログラム) は、世界のトップを目指した先端的研究を推進することにより、産業、安全保障等の分野における我が国の中長期的な国際競争力、底力の強化を図るとともに、研究開発成果の国民及び社会への確かな還元を図ることを目的として平成21年度補正予算において国が創設した「研究者最優先」の研究支援制度。

*2) 掲載論文名："Single-shot detection of electrons generated by individual photons in a tunable lateral quantum dot" (A. Pioda¹, E. Totoki¹, H. Kiyama¹, T. Fujita¹, G. Allison^{1,2}, T. Asayama^{1,3}, A. Oiwa¹, and S. Tarucha¹) ¹ Department of Applied Physics, The University of Tokyo, Japan, ² Department of Physics, Princeton University, USA, ³ Advanced Materials Laboratories, SONY Corporation, Japan

<研究の背景>

量子情報処理技術とは、次世代の高度情報化社会を支える基盤技術として期待されている量子力学に立脚した技術です。重ね合わせ原理により超並列処理が可能な量子コンピュータや絶対に安全な暗号通信など、情報通信の新しいパラダイムが開かれようとしています。こうした量子情報処理で扱う情報の単位が量子ビットであり、たとえば光子は長距離の量子情報伝達を担い、操作性の良い電子スピンなど固体中の量子ビットは演算処理やメモリーとして研究が進められています。さらにこれらを組み合わせた量子情報通信の形態として、量子コンピュータなどで構成

される小規模量子システムを光回路で結んだ量子ネットワークを構築しようとする研究も進んでいます。このためには、光子と量子コンピュータを構成する固体量子ビットの間で量子情報を転送する量子インターフェースの開発が重要となります。この技術は、固体量子素子に量子情報を保持する量子メモリーや、100kmを超える量子情報の正確な伝達を可能にする量子中継器の技術につながります。これまで、光子の偏光状態から半導体中の電子スピン状態への量子状態転写の理論的提案及び量子井戸中の「スピン集合系」を用いた実験が報告されています。しかし、肝心の「単一ビット」間での量子状態転写は、量子ネットワークの構築に必要な不可欠な技術であるにもかかわらず、実現されていませんでした。

<今回の成果>

今回、東京大学の研究グループは、独自に開発を進めているスピン量子素子を構成するGaAs系半導体量子ドットに、平均的に1個以下の単一光子を含む微弱近赤外パルス光を照射しました(図1)。その単一光子が励起した単一電子を量子ドットで捕捉し、そのスピン緩和時間(=スピン判定の制限時間：典型値は1ミリ秒~1秒)の範囲内(<300マイクロ秒)で、電氣的に制御してドットから取り出す操作を行うことに成功しました(図2)。

さらに、外部磁場をかけると電子が量子ドットを出入りする頻度が電子スピン方向に依存することを利用して、光生成単一電子のスピン判別が可能であることも初めて実証しました。これらの結果は、単一光子検出の実時間測定と位置づけられる同時に、量子ドット中で単一光子から単一電子の電荷へ情報を変換し、その単一電子のスピン状態を検出・操作できることを示すもので、量子インターフェースの開発に大きく貢献する成果です。

<今後の展開>

次の段階では、本成果をスピン量子素子へ実装し、単一光子から単一電子スピン状態への量子状態転写を段階的に実証し、転写された電子スピン状態の量子演算処理という機能性の実現を目指しています(図3と図1挿入図)。こうして光子-スピン量子インターフェース技術基盤が確立すれば、量子ネットワークの構築に必要な、光子の量子情報を電子スピンの量子メモリーや、長距離の量子情報伝達を可能にする量子中継器といった、将来、量子ネットワークの構築に必要な量子素子の開発が期待されます。

<成果の補足説明>

図1は、今回の実験の概念図です。本研究では、GaAs/AlGaAs 2次元電子系上に形成される量子ドットを用いています。量子ドット直上に開口を持つ遮光マスクが取り付けられており、開口を通して、平均1個以下の光子が量子ドットへ飛来するように強度を下げたパルス光(波長780nm)を照射します。光子は主に下地のGaAs半導体層に吸収され、電子・正孔対を生成し、電子のみが量子ドットに捕捉されます。量子ドットの近傍に作成した量子ポイントコンタクトを単一電子の挙動が検出できる高感度電荷計として使い、光生成単一電子のダイナミクスを、この電荷計を使い検出しました。挿入図は、光照射後に生成された単一電子スピンの回転操作を行い、転写された量子情報をスピン量子素子で演算処理を施すという量子インターフェースの基本機能を示しています。

図2は、典型的な光生成単一電子の実時間検出の結果です。縦軸は電荷計電流を表しています。量子ドット中の電子が一つ入ると、電流は急峻に低下し、電子が一つ量子ドットから出てゆくと、電流は急峻に増加します。図2の結果は、パルス光を照射した時刻ゼロで、単一光子が吸収され

て生成された単一電子が、量子ドットに捕捉され、ある時間、滞在した後、近接する電極へトンネルにより出て行く過程を示しています。このように、単一光子が生成した単一電子が、量子ドットで捕捉される過程を実時間測定で検出することに成功しました。本実験で最も速い検出は300マイクロ秒程度で完了でき、典型的なスピン緩和時間とされるミリ秒から秒よりも十分速いので、電子スピンの緩和して情報を失う前に、検出・操作が可能であることを示しています。さらに試料面に垂直に磁場を印加すると、試料の端に沿って運動する電子状態、すなわち端状態が、量子ドットに近接する電極中に形成され、量子ドットから端状態までの空間的な距離が電子スピンに依存し、図の右上に示した量子ドットから電極への電子のトンネル頻度は電子スピンに依存するようになります。この方法を用い、単一光子の偏光に対応した光生成単一電子スピンをひとつずつ検出することが可能であることを示す結果も得られています。

図3に、単一光子と単一電子スピン間の角運動量転写と量子状態転写の概念図を示します。次段階では本成果を使い、単一光子から単一電子スピンへの角運動量の転写を目指します。角運動量転写では、角運動量を持つ右回り・左回り単一円偏光が、対応する方向のスピンの持つ単一電子1対1で変換されます。さらに量子状態転写では、単一光子と任意の状態を表す係数 α と β を、正確に位相情報も含めて量子ドット中の単一電子スピン状態へ転写します。

<参考図>

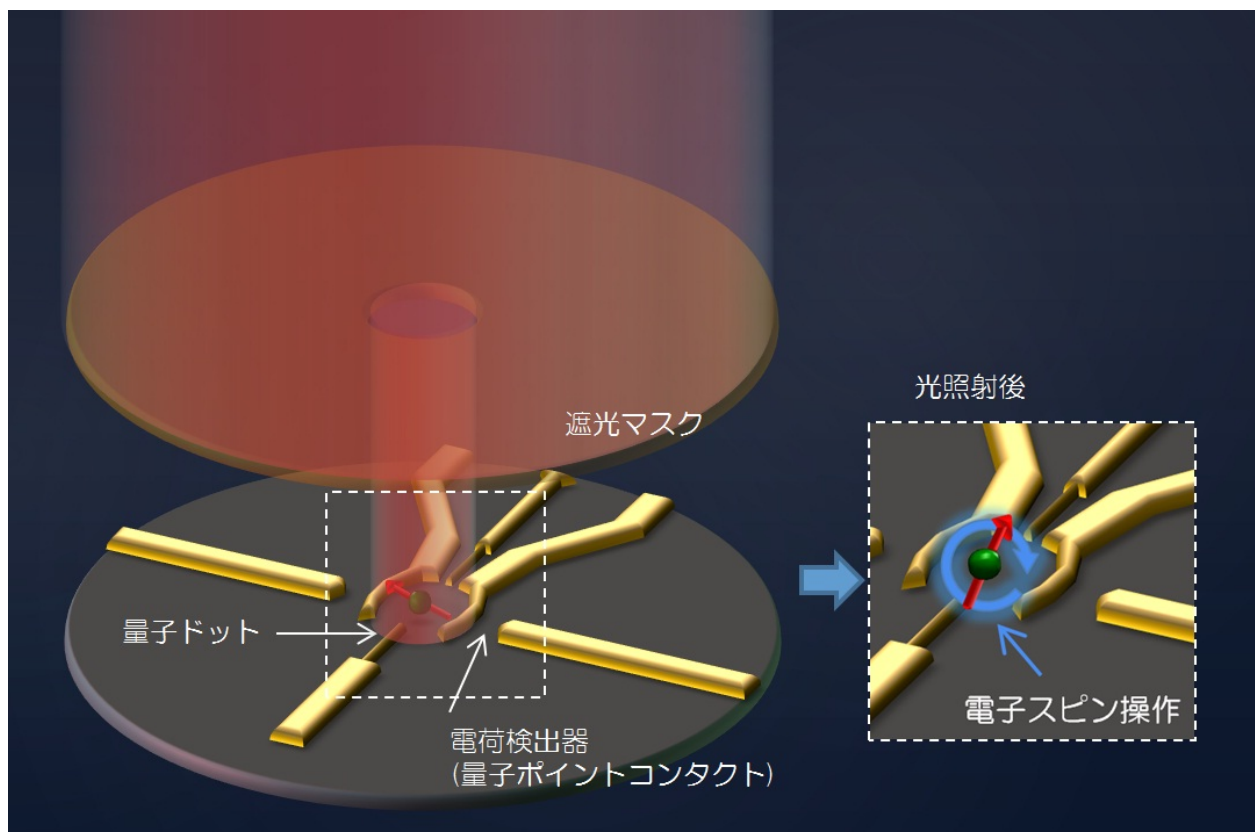


図1 実験の模型図。挿入図は転写後、電子スピン状態を操作する概念図。

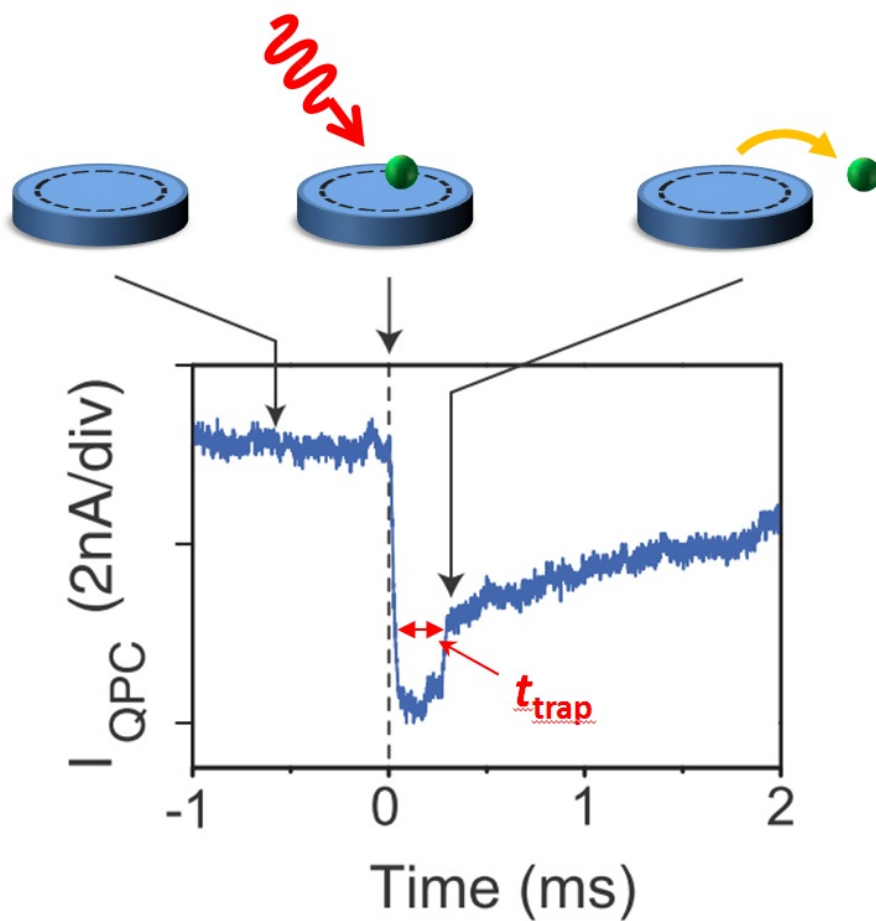
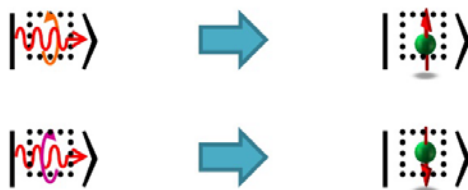


図2 光生成単一電子の実時間検出を示す量子ポイントコンタクト電流。
 上は対応する光生成単一電子の挙動

角運動量転写



量子状態転写

単一光子の量子状態 単一電子スピンの量子状態

$$|\psi_{ph}\rangle = \alpha |\text{photon}\rangle + \beta |\text{photon}\rangle \Rightarrow |\psi_e\rangle = \alpha |\text{spin}\uparrow\rangle + \beta |\text{spin}\downarrow\rangle$$

図3 角運動量転写と量子状態転写

<用語解説>

- 光子：光は波動性と粒子性を持つが、光子はその粒子としての最小の単位をあらわす。
- 電子スピン：電荷の他に、電子の持つ内部自由度で、“上向き”または“下向き”の状態として表現される。物質内の電子の状態がどちらか一方に揃うと磁気が生ずる。
- 量子ドット：電子やホールを、それらの量子効果が現れる程度の空間に閉じ込めることができる構造のこと。半導体や金属あるいは有機物など様々な材料での作製が可能である。
- スピン量子素子：半導体量子ドット中の電子スピンを量子ビットとして演算処理を行うための素子。電子スピンは固体中の量子ビットとしては比較的長い間 (>100マイクロ秒)、量子情報を保持することができる特徴がある。電子スピン回転操作に局所交流磁場を使う方法の他に、スピン軌道相互作用や微小磁石を用いる方法など開発が進んでおり、量子コンピュータに必要な拡張性の点でも優れている。
- 量子インターフェース：量子情報を保持する異なる2つの物理系（量子ビット）の間で量子情報の受け渡し（量子状態転写）を行い、接続する機能を有する。

<お問い合わせ先>

<報道に関して>

国立情報学研究所 総務部研究促進課
最先端研究開発支援室（担当：片山・山本）
〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋2-1-2
Tel：03-4212-2115 Fax：03-4212-2817
E-mail：support_first@nii.ac.jp
HP：http://first-quantum.net/

<研究に関すること>

樽茶 清悟（タルチャ セイゴ）
東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1
Tel：03-5841-6835 Fax：03-5841-6835
E-mail：tarucha@ap.t.u-tokyo.ac.jp（樽茶）