

量子インターネットに向けた量子ドットを使った 光子—スピン量子インターフェース



研究ノート

大 岩 顕*

Photon-spin quantum interface using quantum dots towards quantum internet

Key Words : Quantum dot, Photon-spin quantum interface, Quantum internet

はじめに

近年、量子力学の原理に基づいて演算や通信を行う量子情報処理が、学术界だけでなく産業界や社会から大きな注目を集めている。特に量子コンピュータは、この数年で、計算を実行できる実機が登場し、ある特定に処理ではスーパーコンピュータを超える性能も報告されている¹⁾。しかしまだ、ごく初期段階で、世界各国で大規模量子コンピュータ開発のための大型の研究プロジェクトが立ち上がり、大学や研究機関そして世界的企業が参画して開発が進んでいる。

量子コンピュータと並びもう一つ重要な技術が量子暗号通信である。これは、量子情報は複製できないという量子力学の原理に基づいて絶対に安全な通信を可能にするもので、すでに短距離では実用に近いところまで開発が進んでいる²⁾。将来は、量子コンピュータや量子センサなど量子情報機器がネットワークに接続され、量子情報を利活用できる量子インターネットが期待される³⁾。この量子情報ネットワーク構築において、既設光ファイバー網では、100km程度の通信距離制限を受ける。従来の光通信では減衰した光を増幅することで中継を行うが、量子情報通信では、量子もつれという量子力学の性質を利用して遠隔地点へ情報の伝達を行う量子中継という技術が必要となる。この量子中継の開発に関

しても、様々なプロトコルの提案や様々な物理系で実験がおこなわれている⁴⁾。我々は、半導体量子ドットを使ってこの量子中継器の実現を目指し、その基礎研究を行っている^{5,6)}。

半導体量子ドットは、半導体の微小な箱で、量子閉じ込め効果により離散化したエネルギー状態を持つ。我々が扱う量子ドットは表面に取り付けたゲート電極による電圧で誘起される量子ドットで高い電気制御性を有する。特に電子数を0個から1つずつ精密に制御することができる⁷⁾。量子ドットに閉じ込めた1個の電子スピンを量子ビットとして使い、単一電子スピンの検出やマイクロ波による操作などが確立しつつあり⁸⁾、量子コンピュータを実現しようとする研究が精力的に行われている。

本稿では、この量子ビットとして有望な半導体電子スピン量子ビットを使って、光子から電子スピンへ量子状態の変換を行う量子インターフェースや、量子中継器の開発を目指した私たちの研究を紹介する。

量子ドットを使った光子—電子スピン変換

我々が使う量子ドットは、GaAs/AlGaAs量子井戸構造に形成される2次元電子に対して、上述のように表面に作製したゲート電極に電圧を印加し、電子を微小領域に閉じ込めて形成される(図1左)。重要な構造は、量子ドットの横に設けた電荷計である(図1左)。これは単一電子を検出することができる高感度電荷計で、1次元素子である量子ポイントコンタクトや量子ドットが用いられ、それらの構造の伝導度が電荷信号を与える。

量子情報の長距離情報担体は光子であり、例えばその偏光が量子ビットになる。したがって本研究の基盤技術の一つは、光子偏光の量子状態を電子スピンの量子状態へ変換する技術である。半導体の伝導



* Akira OIWA

1971年5月生まれ
東京大学大学院 理学系研究科 物理学
専攻博士課程 (1999年)
現在、大阪大学 産業科学研究所 第一
研究部門 量子システム創成研究分野
教授 博士(理学)
専門/半導体量子物性
TEL : 06-6879-8405
FAX : 06-6879-8405
E-mail : oiwa@sanken.osaka-u.ac.jp

帯と価電子帯のバンド間遷移では角運動量保存により、円偏光の持つ角運動量で決まる特定方向の電子スピンと正孔スピンを生成できる。これを利用して、量子井戸において、光の入射方向と直交する磁場下でゼーマン分裂した軽い正孔状態から電子スピン状態への遷移により、正孔には光子の情報を残さず電子スピンのみに転写することができる^{5,6,9)}。

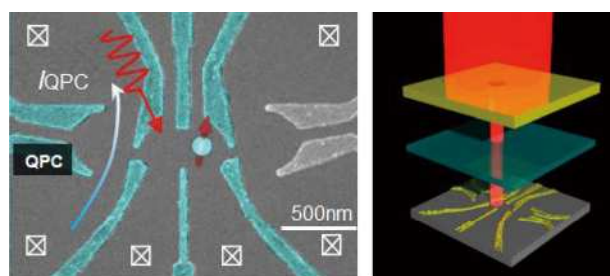


図1 (左) 量子ポイントコンタクト (QPC) 電荷計を備えた2重量子ドットの電子顕微鏡写真。微弱パルス光照射により左側のドットへ単一電子を生成する。(右) 量子ドットへの光子照射の概念図。絶縁体を隔てて量子ドット上に金属マスクが設けられており、中央の開口を光子が透過する。

単一光生成電子スピン検出と量子状態変換

まず始めに、単一光子が生成する単一電子スピン検出について述べる。電荷計を備えた量子ドットを希釈冷凍機中に置き、パルスチタンサファイアレーザから出射された光を単パルス化し、さらに強度を十分に減衰させ、光学窓を通じて低温部に置かれた量子ドットに照射する。GaAs/AlGaAsでは不純物や欠陥などに起因する光伝導効果がよく知られており、量子ドットの精密な電圧調整に影響を及ぼすため、量子ドット上には金属遮光マスクを設けており、量子ドットの直上の開口を通過した光子が量子ドットへ吸収される(図1右)。そして単一光子が生成した単一電子スピンを電荷計で検出する。

単一光生成電子スピン検出には、二重量子ドットのパウリ排除律に基づくパウリスピン閉塞効果が強力な方法である。図2(a)に示すように光照射前に右側の量子ドットに電子を一つ入れておく。単一光子によって左側のドットに励起された単一電子が右側電子と反平行のスピンを持つ場合、光生成電子は右側の量子ドットへ遷移できるが、平行スピンの場合はドット間遷移が禁止される。したがって、スピンの平行/反平行の情報が、光生成電子が左に留まるか右に遷移するかという電荷信号に変換される。

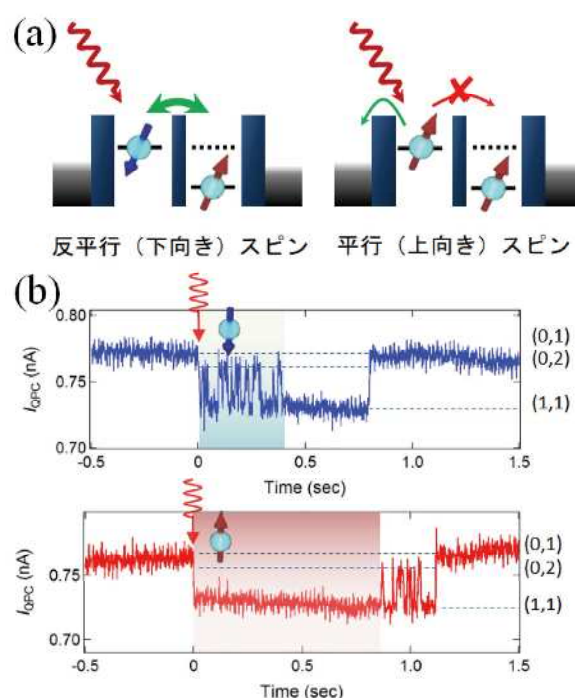


図2 (a) 二重量子ドットにおける光生成単一電子スピン検出の概念図。反平行スピンの場合はドット間遷移が起こり、平行スピンの場合はドット間遷移が起こらない。(b) 単一光生成電子スピンの電荷計による検出結果。上では反平行スピンの生成され、ドット間遷移が起こり、電荷計に振動様の信号が現れる。下では平行スピンの生成されドット間遷移が起こらないため電荷計は反応がない¹⁰⁾。

これを用いて、実際に単一光生成電子スピンを検出し(図2(b))、単一光子偏光から単一電子スピンへの角運動量変換を実証した¹⁰⁾。さらに最近、量子状態転写を満たす実験条件で同様の実験を行い、円偏光の重ね合わせである直線偏光から、電子スピンの重ね合わせ状態が生成できることを確認した¹¹⁾。このように、光子から電子スピンへの量子状態変換は単一量子のレベルでほぼ実証できている。

フォトニックナノ構造との融合

今後、量子中継など量子通信のインターフェースとして用いる際、通信のスループットを決める変換効率が重要な要因である。我々の量子インターフェースでのその主な原因は、10nm程度の薄い量子井戸での吸収率(1%程度)と、量子ドットに集光したビーム径と開口径のミスマッチである。その結果、単一光子が量子ドットで単一電子を生成する確率は 10^{-4} 程度となる。これを改善するために我々は、2次元フォトニック結晶中に量子ドットを形成する方

法と、表面プラズモンアンテナに取り組んでいる。

我々は、空孔を2次元周期的に並べた2次元スラブ型フォトニック結晶中に、ダブルヘテロ構造型共振器を導入し、ゲート電極を設置して量子ドットを形成する (図3 (a))。シミュレーション結果は共鳴波長で50倍以上の吸収増大が可能であることを示した。実際に作製したゲート電極を有するフォトニック結晶ナノ共振器試料の発光特性と吸収測定から共振器モードを確認し、金属電極が大きな劣化を引き起こさず、共振モードが形成されることを確認した¹²⁾。さらに低温電気伝導測定で量子ドット動作も確認している。

表面プラズモンアンテナを利用した別の方法では、前述の遮光マスクにブルズアイ構造と言われる周期的に同心円の溝を形成することで (図3 (b))、垂直方向に入射した光が、表面を伝搬するモードを励起し、中心の開口へ集光し、直下の量子ドットへの透過率を高める。電磁場シミュレーションにより、量子状態変換の波長で共鳴的に透過率が増大できることを示し、偏光保持も可能であることを示した¹³⁾。最近、光電流の測定で設計通りの透過率増大を確認できている。

いずれも基本コンセプトの実証はできており、量子ドットと電荷検出を使って、単一光子から単一電子スピン変換の効率増大の実証が待たれる。このようにフォトニックナノ構造を組み合わせることで効率増大が設計できることも半導体素子を使っている大きな利点である。

おわりに

本稿では、半導体量子ドットと高感度電荷計を使った単一光生成電子スピンの検出と量子状態変換、その効率増大に関する最近の我々の研究成果を紹介した。量子中継器実現に向けた次のステップは、遠隔2地点のスピントラップ生成の実現である。難しい実験ではあるが固体中の非局所もつれ生成とその制御という大変興味深く重要な研究である。さらに量子ドットを使った完全ベル測定の実現などを経て、量子中継器の動作原理の実証を目指している。さらに将来、我々の研究が量子コンピュータを接続した量子インターネットの構築へ貢献することを期待する。

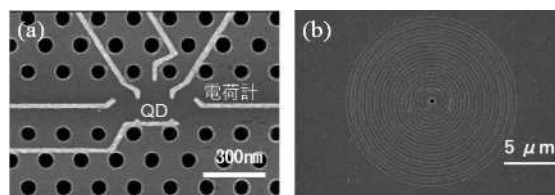


図3 (a) ダブルヘテロ型フォトニックナノ共振器中に形成した量子ドットの電子顕微鏡写真。
(b) ブルズアイ型の表面プラズモンアンテナの電子顕微鏡写真。

参考文献

- 1) F. Arute et al., Nature Vol.547, No.7779, pp.505-510 (2019)
- 2) V. Scarani et al., Rev. Mod. Phys. Vol.81, Issue 3, pp.1301-1350 (2009).
- 3) S. Wehner et al., Science, Vol.362, Issue 6412, eaam9288 (2018)
- 4) H. J. Briegel et al., Phys. Rev. Lett. Vol.81, Issue 21, pp.5932-5935 (1998)
- 5) A. Oiwa et al., J. Phys. Soc. Jpn. Vol.86, Issue 1, 011008 (2016)
- 6) L. Gaudreau et al., Semicond. Sci. Technol. Vol.32, Issue 9, 093001 (2017)
- 7) R. Hanson et al., Rev. Mod. Phys. Vol.79, Issue 4, pp.1217-1265 (2007)
- 8) J. Yoneda et al., Phys. Rev. Lett. Vol.113, Issue 26, 267601 (2014)
- 9) R. Vrijen and E. Yablonovitch, Phys. E Vol.10, Issue 4, pp.569-575 (2010)
- 10) T. Fujita et al., Nat. Commun. Vol.10, Issue 1 2991 (2019)
- 11) K. Kuroyama et al., Phys. Rev. B Vol.99, Issue 8, 085203 (2019)
- 12) T. Tajiri et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol.59, No.SG, SGG105 (2019)
- 13) R. Fukai et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol.56, No.4S, 04CK04 (2017)