

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03817

研究課題名(和文)量子ドット内蔵光ファイバーを用いた光子を介する遠隔電子スピン間制御

研究課題名(英文)Remote spin-to-spin control based on quantum dot in fiber system

研究代表者

笹倉 弘理 (Sasakura, Hiroataka)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90374595

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：本申請研究の目的として掲げた光子を中継媒体とした遠隔スピンネットワークの創成に向け、離散化した内部エネルギーを取っている半導体量子ドット(QD)成長膜をナノピラーアレイ化し、単一モード光ファイバー(SMF)に直接接合させたデバイス(Quantum Dot in Fiber: QDinF)を作製し、量子通信の実現に必要な不可欠な単一光子状態の高純度発生及び、長時間耐久性・安定性を実証した。更にQD中の局在電子スピンを量子ビットに見立てたネットワーク形成に向けて、12芯SMFアレイモジュールを用いた並列化に着手し、二次の光子相関信号の取得により、単一光子状態の並列動作を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本申請研究において開発した半導体量子ドット内蔵型光ファイバーデバイス(QDinF)は、双方向光アクセス可能、長時間耐久性、優れた再現性(光学アライメントフリー)、極めて優れた偶発的複数光子同時発生抑制効果、作製工程の簡便さといった特筆すべき利点を持っており、次世代の情報通信技術として期待されている量子ネットワークの実用化に向けた基盤技術である。

研究成果の概要(英文)：We have carried out development of an optical fiber device (Quantum Dot in Fiber: QDinF) equipped with a single quantum dot as a purpose of remote spin-to-spin control via a single photon state. A highly pure and stable single-photon source is prepared that comprises a well-designed pillar array, in which each pillar contains only a few InAs quantum dots. A nano-pillar in this array is in direct contact with a fiber end surface and cooled in a liquid-He bath. This photon source and fiber coupling are quite rigid against external disturbances such as cooling-heating cycles and vibration, with long-term stability. For the network formation that likened localized electron spins in a single QD to qubits, the parallel use of 12-core SMF array modules started making it possible, and by the acquisition of the second photon correlation signal, we demonstrated the parallel operation of the single photon state.

研究分野：半導体スピン物性、量子光学

キーワード：量子通信 量子情報 量子ドット スピン物性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

インターネットの社会基盤化が進み、ビッグデータの効率的な活用・堅固なサイバーセキュリティの構築が求められている。情報処理デバイスの微細化により発現する量子現象の積極的な活用によりデジタル情報処理の枠組みを超えた新規機能の探索が盛んである。状態の重ね合わせに基づく超並列処理を可能とする量子情報処理の分野では、スピンで他のスピンを制御するミクロなホッピングプロセスが必須であり、半導体量子ドット中の局在電子スピン間の制御に関する提案の多くは、クーロン力を起源とする交換相互作用を駆動力として用いている。しかしながら空間的な3次元閉じ込め効果により、局在電子スピン間相互作用が働く実空間での有効範囲は狭く、空間的に遠く離れたスピン間の直接制御は困難である。このため任意の2量子ビット間の制御には、補助ビットを介した近接スピン間での制御を繰り返すカスケード過程が必要であり、1回の操作で消費する時間や物理的なリソースが多く、実効的な処理能力の低下が課題として挙げられる。

2. 研究の目的

膨大な情報量が日々産み出されている今日の状況において、蓄積される様々な情報の効率的な利用には、情報処理デバイスの高効率化、高機能化が必要不可欠である。本申請研究は、量子力学的自由度であるスピンの集団を用いたデジタル処理の枠組みを超えた新たな情報処理プロトコルの創生を目指し、実空間の制限を受けない光子を介した遠隔スピン間の制御技術を開発する。光子と量子ドットの局在電子スピン間の結合効率・遠隔電子スピン間のエネルギー整合度を独立に制御可能とし、遠隔スピン間の相互作用の大きさを任意に変えられるスピンネットワークを構築し、組み合わせ爆発を引き起こす問題を量子的にシミュレートする。

3. 研究の方法

分子線エピタキシー装置を用いて半導体量子ドットを成膜した後、偶発的複数光子の同時発生過程を抑制するため、微細加工を施した後、単一モード光ファイバーに接続し、半導体量子ドット内蔵型光ファイバーデバイス(Quantum Dot in Fiber: QDinF)を作製し、フォトンカウンティング法による光子統計性の評価を通して、動作確認を行う。

4. 研究成果

(1) 高純度単一光子発生源の開発

本申請研究の目的として掲げた光子を中継媒体とした遠隔スピンネットワークの創成に向け、単一モード光ファイバーとスピン源としての半導体量子ドット(QD)間の結合デバイスの開発に着手した。偶発的複数光子同時発生を抑制するためナノピラーアレイ化を施した後、単一モード光ファイバーコアへの転写を試みたが、構造的な不安定性により歩留まりが低下した。このためナノピラーアレイ加工後にHSQレジストをスピコートし、ナノピラーの周囲を固め、機械的な安定性を高めた。このデバイスを高NA単一モード光ファイバーに装着した。余剰キャリア生成のため単一光子の純度が劣化しやすい非共鳴励起条件下においても、高純度の単一光子状態の発生を確認し、5%以下の発生光子数揺らぎで4日間にわたる連続動作が可能である長時間安定性を実証した(図1)。

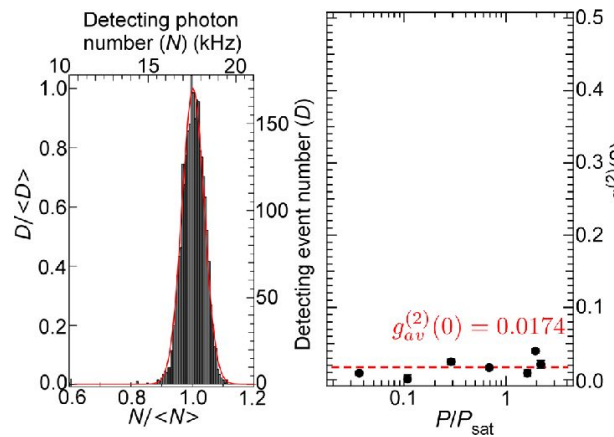


図1: 5%以下の光子数揺らぎで4日間の連続動作が可能であり(左)、偶発的複数光子同時発生過程が抑制されている様子(右)。

高純度の単一光子状態の発生を確認し、5%以下の発生光子数揺らぎで4日間にわたる連続動作が可能である長時間安定性を実証した(図1)。

(2) 相互相関信号による励起子複合体の同定手法の確立

項目(1)で作製したQDinFデバイスを用いて単一モード光ファイバーに結合するQDの平均数が1個となることを相互相関信号により確認した。しかしながらこの過程においてQDから発生した光子の偏光が単一モード光ファイバー通過時に、屈折率の不均一性により乱されやすく、従来用いられている偏光マッピングによるQD中に形成される励起子複合体の同定が困難であることが課題として見えてきた。このため相互相関信号による励起子複合体の同定手法の確立に着手した。±1の荷電状態までを考慮し、84状態(4準位、4電子、4正孔)まで拡張した励起子複合体間遷移のレート方程式を用いて、相互相関信号をシミュレートした。光子が排他的に発生する単一QDに形成される励起子複合体間の相

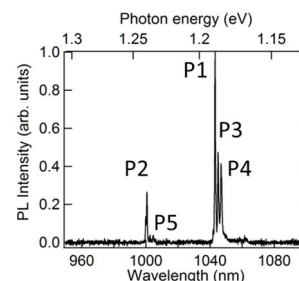


図2(a): 励起子複合体起源の複数ピーク(P1-P5)。

互相関信号はディップ構造やカスケード過程であることを示すディップ構造とパンチング構造の組み合わせだけでなく、測定系の時間分解能、上準位からの高速な緩和過程等によって、複雑な形状をとることを明らかとした(図2)。

(3) 並列動作に向けた 12 芯ファイバーアレイを用いた QDinF デバイスの開発

QDinF デバイスを用いたネットワーク形成への展開を念頭に、12 芯 SMF アレイを用いた単一光子の並列発生に着手した。分子線エピタキシー結晶成長装置を用いて作製した InAs/GaAs QDs を電子線リソグラフィ

により直径 300 nm、2.5 μm 間隔のピラーアレイを 1 mm x 6 mm の領域に加工を施した。加工面積は 12 芯 SMF アレイモジュールヘッドに合わせた。更に項目(1)と同様に HSQ をスピコートし機械的安定性を高めた。項目(1)では市販の光ファイバーアダプタを用いて QD 試料と SMF を密着させていたが、12 芯 SMF アレイモジュールヘッドの形状が特殊なため、QD 試料との接続用にアルミハウジングを作製した。図3に示すようにアルミハウジング内に固定し、12 芯 SMF アレイと接続した。アルミハウジングごと液体ヘリウム中に設置し、ピグテール付き半導体レーザー(Thorlabs: LP785-SF20)を用いて GaAs バリア層を励起した。直径 300 nm、2.5 μm 間隔のピラーアレイを 1 mmx6 mm の領域に微細加工を施した後、12 芯 SMF アレイモジュールヘッドと接続した。液体ヘリウム中へアルミハウジング毎設置し、SNSPD(Single Quantum:

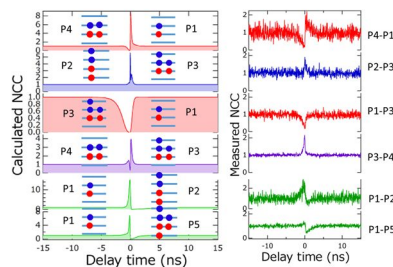


図2(b)：相互相関信号のシミュレーション結果(左)と実測結果(右)

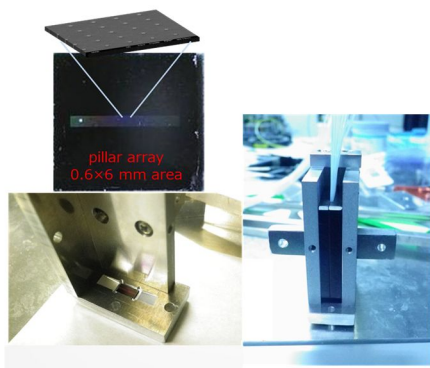


図3：12 芯ファイバーアレイを用いた並列動作を可能とした QDinF デバイス(左)、及び二次の光子統計性による動作確認(右)

custom-made product)と TAC(B&H: TCSPC-130EM)を用いて、光子相関測定を行い、単一光子状態であることを示すアンチパンチング特性を確認した(図3)。

(4) 半導体量子ドット中の核スピン揺らぎの抑制に向けた

核スピン分極による QD の内部エネルギーの制御及び電子スピンコヒーレンスの観測に着手した。QD では偏極した電子スピンを注入し、量子閉じ込め効果により増強される核スピンとの相互反転過程による大きな核スピン分極形成が可能となる。核スピン分極の制御性の向上は量子メモリや量子メディア変換等次世代の情報技術への応用が期待されており、核スピン分極形成

過程において電子スピン反転が核スピンの制御性を大きく左右する要因の一つであることから、光子相関測定による電子スピン反転時間について精査した。分子線エピタキシー結晶成長装置を用いて作製した InAlAs/AlGaAs QDs を電子線リソグラフィにより直径 300 nm のピラー状に加工したものを測定試料として用いた。波長 730 nm のダイオードレーザーを用い、濡れ層を円偏光 (+) 励起した。試料に対して Farady 配置で 4.2 T の外部磁場を印加し、顕微分光法により単一 QD へアクセスしている。図4(a)に正の荷電励起子(X+)の発光スペクトルを示す。発光の円偏光度(DCP)は核スピン分極が高い(HNSP)状態で 0.75, 低い(LNSP)状態で 0.68 であり、高い偏極度で電子スピンを注入できていることを示唆するものである。図4(b)に核スピン分極の双安定性を示す。励起強度に対して大きな双安定性特性を示している。ヒステリシスループ内の励起強度 230 μW に設定し、ゼーマン分裂した発光

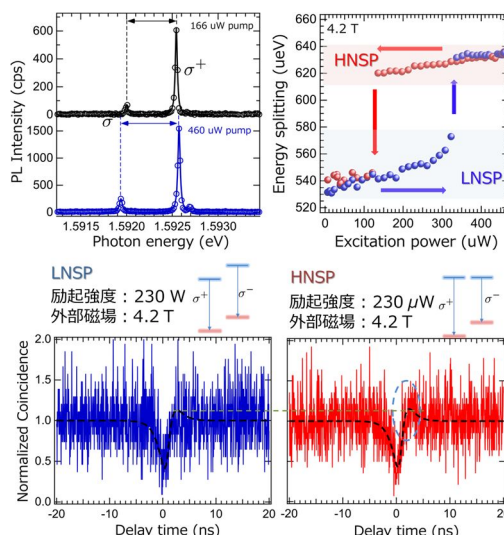


図4：HNSP 状態と LNSP 状態下における正の荷電励起子のゼーマン分裂した発光スペクトル(上段左)、励起強度に対する核スピン分極のヒステリシス(上段右)、ゼーマン分裂間の相関信号(下段)

ピーク間(+ -)の光子統計性を評価した. X+発光の +と -を 0.5 nm のバンドパスフィルターと波長板及び直線偏光子により選別し, 単一光子検出器 (SPCM) へ導き, TAC(B&H: TCSPC-130EM)を用いて, 2 次の相関測定を行った. LNSP 状態下と HNSP 状態下の測定結果を図 4 に示す. 図中の点線は 4 準位のレート方程式によるフィッティング結果により実測データを再現したものである. このときの電子スピン反転時間は 1.4 ns (HNSP), 1.9 ns (LNSP)と見積もられ, 電子スピンの反転時間が, 核スピン分極により変調されている.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ryosuke Matsusaki, Reina Kaji, Sota Yamamoto, Hiroataka Sasakura and Satoru Adachi	4. 巻 11
2. 論文標題 Quadrupolar effect on nuclear spin depolarization in single self-assembled quantum dots	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 085201-1/5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.7567/APEX.11.085201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Odashima S., Sasakura H., Nakajima H., Kumano H.	4. 巻 122
2. 論文標題 Fiber-coupled pillar array as a highly pure and stable single-photon source	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 223104 - 223104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4995225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 S. Odashima, H. Sasakura, H. Kumano, H. Nakajima
2. 発表標題 Semiconductor quantum dot nano-array as a single-photon source directly coupled to a fiber
3. 学会等名 European Advanced Materials Congress (EAMC 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大宮寛太、松崎亮典、藤澤秀樹、鍛冶怜奈、足立智、笹倉弘理
2. 発表標題 半導体単一量子ドットの核スピン分極双安定状態下における光子統計性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshinori Suzuki, Satoru Odashima, Shun Kamono, Kanta Oomiya, Hirotaka Sasakura
2. 発表標題 Fiber array coupled semiconductor quantum dots for single photon emitter
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム(EMS)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笹倉 弘理、小田島 聡、大宮 寛太、熊野 英和
2. 発表標題 ピラー型微細形状を有する QDinF アレイを用いた光子数状態の生成
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirotaka Sasakura, Satoru Odashima, Hidekazu Kumano
2. 発表標題 Discrimination of exciton complexes in quantum-dot-in-fiber
3. 学会等名 International conference on optics of excitons in confined systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 笹倉弘理,小田島 聡、熊野 英和
2. 発表標題 ピラー型微細形状を有するQDinFにおける相互相関信号による励起子複合体の推定
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoru Odashima, Hirotaka Sasakura, Hideaki Nakajima, Hidekazu Kumano
2. 発表標題 Highly pure and stable single photon source directly coupled to a Fiber
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week(CSW2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	近藤 憲治 (Kondo Kenji) (50360946)	北海道大学・電子科学研究所・准教授 (10101)	
研究分担者	熊野 英和 (Kumano Hidekazu) (70292042)	新潟大学・自然科学系・教授 (13101)	