

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02555

研究課題名（和文）単一光子エンタングルメントを介したスピン間制御

研究課題名（英文）spin manipulation via single-photon entanglement

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） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：量子ネットワーク形成を念頭に外乱に強い量子チャネルを構築するために、現行の光通信網との整合性が高い量子ドット内蔵型光ファイバーデバイスの開発を実施した。偏波面を直交させた単一モード偏波ファイバーに2層構造のワイヤーグリッドを半導体量子ドット成長膜へ2層構造のワイヤーグリッドを作製し、接合面での偏光乱れを抑制した。数値シミュレーションによる構造の最適化を行い、4桁の消光比を達成した。また、位相安定化を施した単一光子と真空場のエンタングルメントを用いたシングルモードテレポテーション実験系を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子ネットワークの形成には、環境擾乱に対して強固な量子チャネルの開発が必要不可欠である。本研究ではこの課題に対し、クロスニコル型量子ドット結合光ファイバーデバイスの開発を実施し、光子数状態生成源の量子性を高め、シングルモードテレポテーションの原理を基に、真空場と単一光子による量子もつれ状態を形成させ、環境擾乱への耐性を精査した。本研究を通して、現行の光ファイバー通信網を利用した量子チャネルの実装に向けた、ローコスト且つ高耐久な光ファイバーデバイスの実現の可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：The research aim is to develop foundational technology for the formation of quantum networks. With the aim of forming a quantum network and constructing a quantum channel resistant to disturbances, we developed a quantum dot-embedded optical fiber device that is highly compatible with existing optical communication networks. By fabricating a two-layer wire grid on the growth film of the semiconductor quantum dots and attaching it to single-mode polarization fibers with orthogonal polarization planes, we suppressed polarization disturbance at the interface. Structural optimization through numerical simulations achieved an extinction ratio of four orders of magnitude. Additionally, we constructed an experimental system for single-mode teleportation using the entanglement between a phase-stabilized single photon and the vacuum field.

研究分野：半導体スピン物性

キーワード：量子情報 スピントロニクス 量子光学 半導体量子ドット

### 1. 研究開始当初の背景

多様な情報サービスが出現しているネットワーク社会において、電子化された情報のセキュリティ確保・処理能力向上の重要性が一層高まっており、デジタル情報の枠組みを超えた量子情報通信技術に関する研究が盛んである。盗聴者による観測に伴う波束の収縮によりなりすましを防ぐ量子暗号(QKD)、状態の重ね合わせに基づく超並列処理が可能な量子情報処理(QIP)は共に量子力学に根拠を成している。{これらは共に無相関な量子系の間で新たな相関を創出し、制御するという枠組みで捉えることができ、質の高いエンタングルメントの生成・制御が重要な役割を果たす。

BB84 プロトコルなど単一光子(SP)を用いる QKD は、光子源、光検出器、通信路といったシステムの不完全性に対して非常に敏感であり、運用上の安全性低下への指摘がある。これに対し量子もつれ光子対 (EPP)を用いることにより光検出器、通信路装置に対する制約を緩和し、現行の光通信網への実装に適した Device-independent(DI)-QKD、あるいは Measurement-device-independent(MDI)-QKD が提案されている。この場合、EPP の統計的揺らぎが最終的な鍵生成レートに大きく影響する。プロトコルの改良でレート向上を図るアプローチもあるが、本質的に統計的揺らぎのない EPP が強く望まれる。

スピントロニクスを基礎とした QIP において、スピン量子ビット間制御に関する提案の多くは、クーロン力を駆動力としている。これは実空間上で遠く離れたスピン間の直接制御が困難で、補助ビットを介した近接スピン間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・物理的リソースが大きく、実効的な処理能力の低下が課題として挙げられる。この課題に対して、実空間の制限を受けない EPP を介した遠隔量子系間の直接制御の提案がある。この場合、EPP と量子系を十分もつれあわせるためには、EPP と量子系間の相互作用に応じたコヒーレンスが必要となる。このため EPP には統計的揺らぎに加えて、エネルギー揺らぎの抑制も必須である

QKD, QIP の実現に向けて、様々なプラットフォームで研究が進んでおり、個々の強みを生かしながら、これらを統合し、情報ネットワークの量子化へ導くためには、現行の光通信網の不安定性に耐えうるエンタングルメントの形態の精査・探求が重要であると考えている..

### 2. 研究の目的

本研究は現行の光通信網に適した統計的揺らぎ、エネルギー揺らぎを抑制した SP デバイスを開発し、単一光子と真空場のエンタングルメント(SPVE)を中継媒体として、実空間で離れたスピン間を制御し、上述した課題の克服を目指すものである。エンタングルメントを介した量子系間の制御に関する提案の多くは実体のある光子 2 つによる EPP を用いており、光子 1 つが伝送中に擾乱を受ける確率が P であるとは P<sup>2</sup>で擾乱を受ける。本研究で扱う SPVE は実体のある光子が一つであるため、擾乱への高耐性が期待できる。これは光通信網への制限を劇的に緩和することに繋がり、量子情報通信の実用化に向けて革新的な波及効果が期待できる。

### 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、偏光選択機能を有する二重ワイヤグリッド構造を作製し、統計的揺らぎ・エネルギー揺らぎを抑制した単一光子発生ヒカリファイバードバイスの開発する。この光子源を用いて、シングルモードテレポーテーションの実験を通して、伝送路の不完全性に対する SP と真空場のエンタングルメントの高耐久性の検討及び単一光子エンタングルメントを介した遠隔スピン間のエンタングルメントの形成を実施する。

### 4. 研究成果

(1) クロスニコル型半導体量子ドット内蔵型光ファイバードバイス (QDinF) の開発

本申請研究の目的として掲げた SPVE による量子チャネルの創成に向け、単一モード光ファイバードバイスと単一光子源としての半導体量子ドット間の結合デバイスの開発に着手した。これまで申請者が開発してきた QDinF は高耐久且つ安定な光子数状態を供給できるものであったが、エネルギー揺らぎに

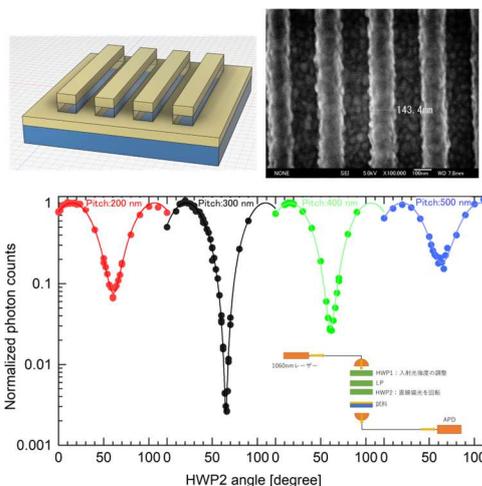


図 1: 作製した二重ワイヤグリッドの模式図及び SEM 像(上段), 及び消光比の実測結果(下段)。

起因するコヒーレンス時間の伸長が課題であった。主要な原因である QD を取り巻く環境揺動による擾乱を抑制するため、偏光選択性を高める必要があった。そこで、ワイヤーグリッド偏光子として知られている、金属の細線を周期的に並べた構造を QD 成長膜自体に作製した。本研究では金属として、成膜が容易かつ、本研究で扱う InAs/GaAs 量子ドットの発光波長である  $\sim 1000$  nm の領域で良好な消光係数をもつ金(Au)を用いた。QD 成長膜とネガ型レジストとして用いた HSQ の密着性を高めるため、プラズマ CVD 装置を用いて SiO<sub>2</sub> を 50 nm 成膜した後、スピコートにより HSQ を 500 nm 堆積させた。その後で電子線描画により、グリッドパターンを形成させ、現像後にヘリコンスパッタにより Au を成膜した。その後保護層及び誘電体としてプラズマ CVD を用いて 500 nm の SiO<sub>2</sub> を成膜した。

消光比の測定には図 1 下段挿入図に示す実験系を用い、入射光には 1060 nm のレーザーを用い、試料に照射し透過光強度をアバランシェフォトダイオード (APD) で観測した。試料照射前に半波長板 (HWP1) 直線偏光子 (LP) 半波長板 (HWP2) を挿入し、HWP2 を回すことで入射光側の直線偏光を回転させ、透過光強度の入射偏光依存性から消光比を求めた。周期 200, 300, 400, 500 nm の二重ワイヤーグリッドについて評価した。厳密結合波解析法による数値シミュレーション結果と概ね一致した、グリッドの周期 300 nm の二重ワイヤーグリッド構造において、最も高い 2 桁以上の消光比を確認した。

## (2) シングルモードテレポーテーション

半導体量子ドット内蔵型光ファイバーデバイスを SP 源として用い、無相関な SPVE 間に対して、ベル測定により量子相関を形成するシングルモードテレポーテーションを実施した。光ファイバー通信網への実装の観点から、図 2 上段に示す光ファイバーベースの光学系を構築した。光学系に混入する位相揺らぎを抑制するため、参照光を用いたアクティブなフィードバック機構を付加している。

まず無相関な単一光子を基にモード 1, 2、モード 3, 4 に真空場と単一光子の SPVE を形成する。次にモード 2 と 3 の干渉と C ポートでのベル測定により、モード 1, 2 の位相情報をモード 1, 4 の位相へ移る。この結果本来無相関なモード 1, 4 間で 1 光子の干渉効果が生じる。

この効果は A-C 間の同時計数と B-C 間の同時計数の間にモード 1 の経路に導入した位相シフタに対する反相関として現れる。図 2 下段に典型例を示す。用いた検出系の時間分解能が 20 ps であるが、SP 源のコヒーレンスが不足しているため、定量的な解析が困難であるが、図中赤線で示したフィッティングによる解析から、0.6 の干渉度が推定された。この結果は SP 源自体のコヒーレンスや、光学系の位相安定化が不足していることが原因として挙げられる。一方で、本来無相関な単一光子間に対して、真空状態を介して量子もつれを形成できることを示しており、単一光子と半導体量子ドット内の励起子間の結合を高めることにより、遠隔スピン間の制御の可能性を示唆する結果である。

## (3) SP 源の不完全性に対する外部補償回路の検討

SPVE に関する定量的な評価が困難であった要因の一つである光子源自体の不完全性に対して、外部補償機構の開発に着手した。従来 SP 源自体が光子数揺らぎを持っている場合、線形な光学素子では保障する術はなく、SP 源自体の改善に注力されてきた。これに対して非線形 Mach-Zehnder 干渉系を用いることで、1 光子状態と 2 光子状態の重ね合わせ状態から、2 光子状態をブロックし、1 光子状態が抽出可能となることが理論的に示唆されている。これは、各時刻での光子数に応じた非線形屈折率を感じるため、位相の識別情報が付加され、もう一方の経路の線形位相シフタを適切に調節することによって任意の光子数状態のみを抽出することが可能となるためである。しかしながら、単一光子レベルの非常に弱い光強度領域において、現実的な伝搬長で優位な位相ラベルを付加するためには、従来の光学非線形材料に比べ桁違いに大きな非線形光学効果を必要とする点が技術的な課題である。

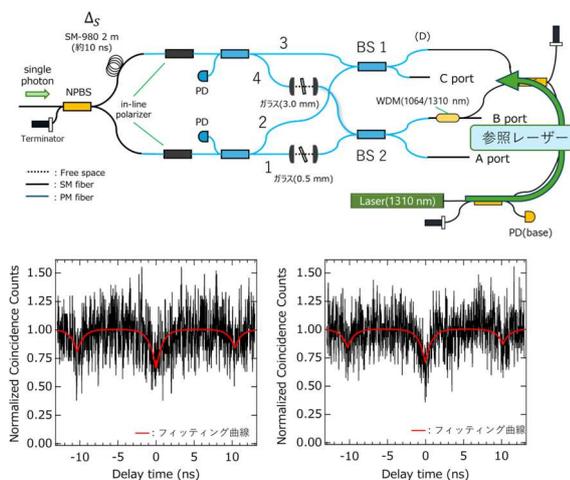


図 2 : SPVE を介した位相の転送を実施した結果. 上段 : 構築した光ファイバーベースの実験系の模式図. 下段 : A-C 間(左), B-C 間(右)の同時計数.

代表的な色素材料の一つであるフルオレセインをドーピングしたホウ酸ガラスを作製し、非線形屈折率を評価した。試料はガラスセルに混入後、220℃で焼成した(図3右挿入図)。図3左に示した光学系を評価し、位相シフト量の入射光強度による変化から非線形屈折率を推定した結果を図3右に示す。

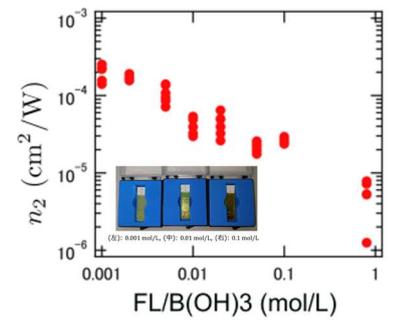
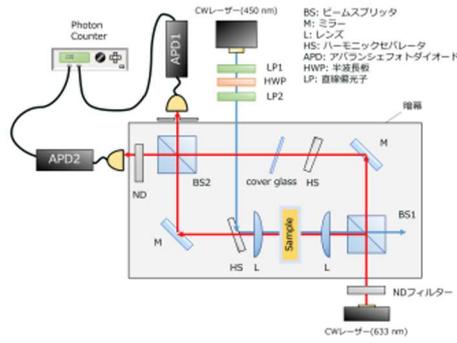


図3：構築した非線形マッハツェンダー干渉計の模式図(左)と非線形屈折率の試料モル濃度依存性(右).

10<sup>-3</sup> mol/L において ~10<sup>-4</sup> (cm<sup>2</sup>/W) の非線形屈折率を確認できた。この値は GaAs 等の従来の材料と比べて、10桁程度大きなものであることが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamamoto S., Kaji R., Sasakura H., Adachi S.	4. 巻 60
2. 論文標題 Double nuclear spin switching in single quantum dots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBH07 ~ SBBH07
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abd709	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 Yamamoto S., Kaji R., Sasakura H., Adachi S.	4. 巻 101
2. 論文標題 Third stable branch and tristability of nuclear spin polarizations in a single quantum dot system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245424-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.101.245424	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 該当する

1. 著者名 Yamamoto S., Kaji R., Sasakura H., Adachi S.	4. 巻 60
2. 論文標題 Double nuclear spin switching in single quantum dots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBH07 ~ SBBH07
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abd709	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 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Satoru Odashima, Hirotaka Sasakura
2. 発表標題 Fabrication of The Metal-Semiconductor Nano-Pillar Structure for The Single Photon Emitter
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference MNC 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五十嵐 一貴 , 笹倉 弘理
2. 発表標題 偏光ノイズを用いた InAlAs 量子ドットの発光基底の識別
3. 学会等名 第56回応用物理学会北海道支部/第17回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加茂野 駿, 笹倉 弘理
2. 発表標題 サニャック型干渉計を用いた光子数揺らぎの抑制
3. 学会等名 第56回応用物理学会北海道支部/第17回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本 壮太, 鍛冶 怜奈, 笹倉 弘理, 足立 智
2. 発表標題 核スピン揺らぎが誘起する半導体量子ドットでの核スピン分極の第3安定状態
3. 学会等名 第56回応用物理学会北海道支部/第17回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本 壮太, 鍛冶 怜奈, 笹倉 弘理, 足立 智
2. 発表標題 半導体量子ドットでの核スピン分極の第3安定状態と3重安定性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021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	足立 智  (Adachi Satoru)  (10221722)	北海道大学・工学研究院・教授   (10101)	
研究分担者	小田島 聡  (Odashima Satoru)  (20518451)	北海道大学・電子科学研究所・特任准教授   (10101)	
研究分担者	鍛冶 怜奈  (Kaji Reina)  (40640751)	北海道大学・工学研究院・助教   (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)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------