

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 22 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760053

研究課題名（和文）化合物半導体光子検出器による高忠実度偏光量子もつれ交換技術に関する研究

研究課題名（英文）High fidelity entanglement swapping at telecommunication wavelength using single-photon detectors based on compound semiconductors

研究代表者

行方 直人 (NAMEKATA NAOTO)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：20453912

研究成果の概要（和文）：光ファイバにおける最小光損失波長帯である 1550 nm 帯で量子もつれ交換実験を実施した。光子検出には正弦電圧ゲートさせた InGaAs/InP のなだれフォトダイオードを用いた。本光子検出器の高繰り返し周波数、低雑音特性により量子もつれ交換の忠実度～0.9 を得た。その高い忠実度は量子鍵配送への応用が可能な水準であり、長距離量子暗号通信へ向けた重要な前進である。

研究成果の概要（英文）：Entanglement swapping experiment was carried out using spatially separated, polarization entangled photon sources at 1550 nm. In this experiment, we employed sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiodes which achieve high repetition frequencies and low dark counts. The high-performance single-photon detectors enable us to obtain ~ 0.9 of a fidelity of the entanglement swapping. The high-fidelity entanglement swapping will be able to be applied to the quantum key distribution over an optical fiber network.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、 応用光学・量子光工学

キーワード：量子もつれ交換，単一光子検出，通信波長帯

1. 研究開始当初の背景

物理的に安全性を保障する(無条件に安全な)ネットワークを実現する技術として量子暗号が注目を集めている。量子暗号では、先ず共有(秘密)鍵を量子鍵配送(以下 QKD)によって通信をする正当な 2 者間で共有し、その秘密鍵を共有鍵暗号の鍵として使用する。

現在、光ファイバ伝送を基本とした QKD システムは数十 km の近距離において安全鍵を比較的高速に生成可能なレベルにあり、また最近では、既存の情報通信システムへの応用を目指した実用化研究も精力的に行われている。一方で、最大通信距離は現状で 100～200 km 程度と、都市圏ネットワークをよう

やくカバーできる程度に留まっている。長距離 QKD を実現するための解決策として、量子もつれ状態を用いた QKD プロトコルの利用と量子中継技術が注目されている。量子もつれ状態 QKD に実装されるべき量子中継技術において最も重要な基盤技術は「量子もつれ交換」である。量子もつれ状態にある光子対を 2 組用意し、2 組の光子対の片方ずつを干渉させ、ベル測定を行うと本来もつれていなかった 2 光子が量子もつれ状態となる。このように、より離れた 2 光子を量子もつれ状態とすることを「量子もつれ交換」と呼ぶ。量子もつれ交換を行うノード数を増やすことでさらに遠くの 2 光子を量子もつれ状態と

することが可能となり、その光子間の持つ相関を利用して長距離量子鍵配送を行う。量子もつれ交換の原理検証実験は 98 年に J. W. Pan らによって行われたが、光通信波長帯における実験は最近報告された。しかしながら、交換された後の量子もつれ状態の純度は低く、古典力学限界を辛うじて超えたことを示したに過ぎない。つまり、その様な低純度の量子もつれ状態を使用して量子鍵配送は成立しない。量子もつれ状態の高純度化方法も報告されてはいるものの、時間と位置関係に相関をもった(時間位置)量子もつれ状態へは応用できない。一方で、偏光状態の相関を持つ(偏光)量子もつれ状態へは、その高純度化方法が応用でき、また電子系(半導体中の核スピン)への媒体変換が可能である。よって、通信波長帯偏光量子もつれ光子対による量子もつれ交換技術の開発が急務となる。

2. 研究の目的

高忠実度量子もつれ交換を実現するためには、高速、高効率かつ高安定な単一光子検出器が必須である。これまでに、我々は正弦電圧ゲート動作をさせた化合物半導体素子(InGaAs/InP など)フォトダイオード、以下 APD)を用いて通信波長帯用高速単一光子検出を開発してきた。本研究では検出効率の向上、低雑音化を図ることで量子もつれ交換実験に適した光子検出器を実現する。

Type-II 型疑似位相整合素子とフェムト秒パルスレーザーを用いて時間的、空間的、スペクトル的に強い識別不可能を持つ量子もつれ光子対源を開発し、前述の高性能化された単一光子検出器と合わせて高忠実な通信波長帯量子もつれ交換を実現することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

これまでに我々は正弦電圧ゲート動作型 InGaAs/InP-APD を用いて 1550nm 帯における高効率 (~10%) かつ低雑音(暗計数 ~ 10^{-7})、さらに GHz を超える高繰り返し動作が可能単一光子検出器を開発してきた。今回、検出不可能時間をやや長めにとることで、高繰り返し時に問題となるアフターパルス雑音を抑制し、光子検出効率のさらなる向上を試みた(結果は次章で述べる)。光子検出効率の改善は、後の量子もつれ交換実験(4 同時計測が必要)の成功確率の大幅な上昇に貢献した。

量子もつれ交換実験では、独立した 2 つの量子もつれ光源からの光子同士を干渉させなければならない。よって、それぞれの量子もつれ光源から出力される光子対はお互いに空間的、周波数的、時間的に識別不可能でなければならない。特に時間的な識別不可能

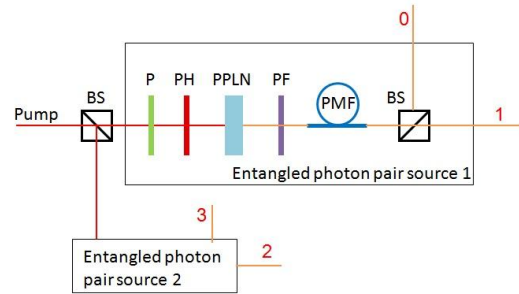


図 1. 直交偏光量子もつれ光源。

BS;無偏波ビームスプリッタ, P;偏光子, PH;ピンホール, PPLN; Type-II 型周期分極反転ニオブ酸リチウム, PF;励起光抑圧フィルタ, PMF;偏波保持ファイバ。

性を持たせることが重要となる。これを実現するために波長 775 nm のモードロック・フェムト秒パルスレーザー(パルス幅 100 fsec)を励起光とした自然パラメトリック下方変換過程(SPDC)を利用して偏光量子もつれ光子対を発生させる。図 1 に今回構築した量子もつれ光源の概略を示す。SPDC 用の 2 次非線形光学結晶には Type-II 型周期分極反転ニオブ酸リチウム(Type-II PPLN)を用いる。群速度不整合によるパルス幅拡大を防ぐため結晶長は 6 mm とした。ここで、励起光の偏光は偏光子(P)によって位相整合条件である H 偏光とされ、また、ピンホール(PH)を用いて空間モードフィルタリングが施された。Type-II PPLN 中の SPDC によって発生した直交偏光を持つ光子対(中心波長 1550nm)は偏波保持ファイバによる偏波分散補正を受けた後、無偏波ビームスプリッタ(BS)で 2 分岐される。0、1 モードへ光子がそれぞれ分岐されたとき、分岐された光子対間の偏波状態は直交偏光量子もつれ状態、 $|\psi\rangle = 1/\sqrt{2}(|H\rangle|V\rangle + e^{i\phi}|V\rangle|H\rangle)$ となる。以上のように構築された量子もつれ光源は 2 光子干渉実験を通して識別不可能性、量子もつれ純度が評価された(結果は次章を参照)。

前述の量子もつれ光源を合わせて 2 台用いた系により量子もつれ交換実験を実施し、量子もつれ交換後の量子もつれ純度の評価を行った。図 2 に実験系の概略を示す。量子もつれ光源 1、2 それぞれからの光子 1、2 は無偏波ビームスプリッタ(BS)で干渉し、単一光子検出器 1、2 (SPD1、2)で検出される。SPD1 および SPD2 両方で光子が検出された場合に光子 0 と 3 の状態は直交量子もつれ状態となる(量子もつれ交換される)。ここで、量子もつれ光源 1、2 それぞれにおける $|H\rangle|V\rangle$ 、 $|H\rangle|V\rangle$ 間の相対位相は、Babinet-Soleil 補正板を用いて、状態が $|\psi\rangle = 1/\sqrt{2}(|H\rangle|V\rangle - |V\rangle|H\rangle)$ となる

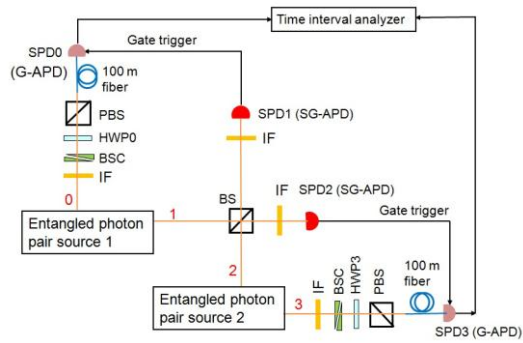


図 2. 量子もつれ交換実験系.
BS;偏波無依存ビームスプリッタ、F;干渉フィル、BSC; Babinet-Soleil 補正板、HWP;半波長板、PBS; 偏波ビームスプリッタ、SPD;単一光子検出器、SG-APD: 制限電圧ゲート動作型 InGaAs/InP-APD、G-APD; ゲート動作型 InGaAs/InP-APD.

よう調節された。本実験では SPD1、2 として正弦電圧ゲート動作された InGaAs/InP-APD (SG-APD) を用いた。本検出器はゲート繰り返し周波数が 1 GHz 程度のとき最良の S/N(信号・雑音比)を実現する。よって、モードロック・フェムト秒パルスレーザー(もつれ光源の励起光)の繰り返し ~ 80 MHz をシンセサイザーで 16 進倍した ~ 1.28 GHz を正弦電圧ゲートの繰り返し周波数とした。SPD0、3 および半波長版(HWP)と偏波ビームスプリッタ(PBS)を用いた偏光測定系を用いて交換後の光子 0、3 が持つ偏光状態間の相関を測定し、量子もつれ純度を評価した(実験結果は次章に示す)。ここで、SPD0、3 はゲート動作型 InGaAs/InP-APD であり、ゲート電圧パルスは SPD1、2 それぞれからの光子検出信号と同期された。

4. 研究成果

正弦電圧ゲート動作型 InGaAs/InP-APD からの光子検出信号をロジック化する際に、単安定バイブレータ回路による Hold-Off 機能(パルス幅拡大)を付加することにより検出不可能時間の拡大を行った。図 3 に正弦電圧ゲート動作型 InGaAs/InP-APD を繰り返し 1 GHz で動作させた時の Hold-Off 時間に対するアフターパルス確率を示す。光子検出効率を 20%(波長 1550nm)まで上昇させたとしても、Hold-Off 時間を 200ns ほどまで拡大することでアフターパルス確率を 4%以下まで抑圧が可能であることが明らかとなった。アフターパルス雑音を抑制したまま光子検出効率はこれまでのそれとの比較でおよそ 2 倍改善された。4 同時計数を必要とする量子もつれ交換実験へ応用した場合、16 倍の効率向上を意味する。

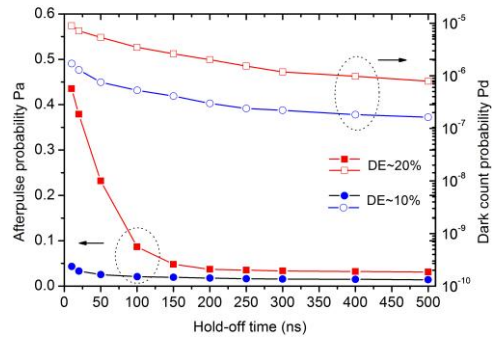


図 3. Hold-Off 時間とアフターパルス確率の関係

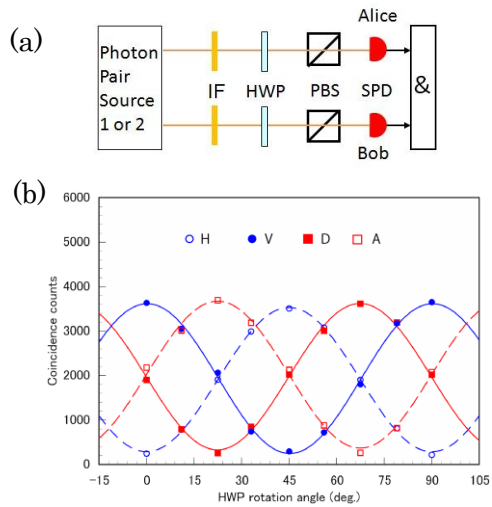


図 4. 量子もつれ光子対の(a)偏光相関測定系と(b)偏光相関測定結果. HWP;1/2 波長板, IF;バンドパスフィルタ, PBS;偏波ビームスプリッタ, SPD;単一光子検出器.

図 1 に示される量子もつれ光源の評価を行った。図 4(a)に示される偏光相関測定系を用いることにより開発した直交偏光量子もつれ光子対の量子もつれ純度を評価した。ここで、光子対が高度にもつれあうようにするため、中心波長 1550 nm、半値幅 4 nm のバンドパスフィルタ(図 4(a)中 IF)を通した。この BPF の通過により、光子対の波束は ~ 2 ps まで延ばされ、もつれ純度だけでなく強い時間的識別不可能性も得られた。図 4(b)に 1 パルスあたりの平均光子対数 0.03 の時の偏光相関測定結果を示す。同図より 2 光子干渉明瞭度は $87 \pm 2\%$ であり、光子対が直交偏光量子もつれ状態であることを示している。不完全性は多光子発生による偶発的的同时計数によるものが支配的であり、光子対自体の量子もつれ純度は非常に高いことが明らかとなった。

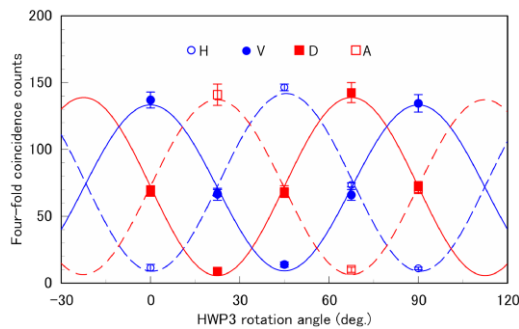


図 5. 量子もつれ交換後の偏光相関測定結果

開発した波長 1550 nm 直交偏光量子もつれ光子対源 2 台と図 2 に示される光学系を用いて量子もつれ交換実験を実施した。図 5 にもつれ交換後の光子 0、3 間の偏光相関測定結果を示す。高い 2 光子干渉明瞭度が得られ、交換後、光子 0、3 は直交偏光量子もつれ状態となったことが解る。2 光子干渉明瞭度より計算される忠実度は $F \sim 0.9$ (研究計画における目標値) を達成した。それは、交換後の量子もつれ状態を用いて量子鍵配送が可能となる水準である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Q. L. Wu, N. Namekata and S. Inoue, “Sinusoidally gated InGaAs Avalanche Photodiode with Direct Hold-Off Function for Efficient and Low-Noise Single-Photon Detection,” to be published in Appl. Phys. Express (2013).[査読あり]

[学会発表] (計 8 件)

① Qing-Lin Wu、行方直人、井上修一郎、“Quantum interference Between Separated Photon Pairs at Telecommunication Wavelength”、第 60 回応用物理学関係連合講演会 (厚木) (2013.3.30).[口頭発表]

② 行方直人、呉青林、栗村直、井上修一郎、“分極反転デバイスを用いた量子鍵配送へ向けた量子もつれ配送と交換”、第 60 回応用物理学関係連合講演会 (厚木) (2013.3.28).[招待講演]

③ 行方直人、呉青林、井上修一郎、“正弦電圧ゲート印加 InGaAs/InP APD の非同期動作” 応用物理学学会学術講演会, 12a-PA1 - 1 (2012.9.11-14).[ポスター]

④ N. Namekata, “Recent progress of near-infrared single-photon detector based on InGaAs/InP avalanche photodiode and its application to quantum technology,” The International Conference on Quantum Foundation and Technology, Dunhuang, China (2012.8.25-30). [招待講演].

⑤ N. Namekata, Q. L. Wu, and S. Inoue, “Free-Running Single-Photon Detection at Telecommunication Wavelength Using a Sinusoidally Gated InGaAs/InP Avalanche Photodiode,” The International Conference on Quantum Foundation and Technology, Dunhuang, China (2012.8.25-30). [ポスター]

⑥ Q. L. Wu, N. Namekata, and S. Inoue, “Hong-Ou-Mandel interference with photon pairs at 1550nm created in spatially separated sources,” The International Conference on Quantum Foundation and Technology, Dunhuang, China (2012.8.25-30). [ポスター]

⑦ 行方直人、河野太一、栗村直、井上修一郎、“高レート偏光量子もつれ光子対発生と偶発的計数の評価”、第 72 回応用物理学学会学術講演会, 山形大学, 30a-ZR-4 (2011.8.29--9.2). [口頭発表]

⑧ Q. L. Wu, N. Namekata, T. Kono, and S. Inoue, “High-Efficiency Single-photon detection using Sinusoidally Gated InGaAs/InP Avalanche Photodiode”, the annual international laser physics workshop 2011, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina (2011.7.11-15).[口頭発表]

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

行方 直人 (NAMEKATA NAOTO)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：20453912