

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18902

研究課題名（和文）単一光子の決定論的スイッチングを可能にする光ファイバー内群速度「不整合」カー効果

研究課題名（英文）Group-velocity-mismatched optical Kerr effect in optical fiber toward deterministic single-photon switching

研究代表者

金田 文寛 (Kaneda, Fumihito)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：80822478

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：光ファイバーの光励起特性を評価した結果、1550 nmゲートパルスによる1300 nmのノイズ光子発生確率が1パルスあたり $10^{-7}$ 乗程度であることを観測した。また、偏光依存性も補償可能なものであった。したがって、波長差を持ったゲート光とシグナル光子の低損失な群速度不整合カー効果の実証は有効であると考えられる。今後ファイバーアンプ等を用いたゲート光パルスの増幅により、偏光回転角を増大させることで、単一光子の低損失偏光回転の実証が期待される。その他、1300 nm帯での高純粋度単一光子発生手法や、偏光状態に依存しない、世界で最も低損失な電気光学単一光子スイッチング手法の実証にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、将来の量子情報技術の大規模化、多チャンネル化において重要技術となる、高速、高精度、低損失な単一光子のスイッチングの実現を目標として光ファイバーによる群速度不整合カー効果に基づく単一光子スイッチングの研究を実施した。光ファイバーの古典光学的な評価により、十分なゲートパルスエネルギーによって群速度不整合カー効果の観測は可能であることが明らかになった。また、電気光学スイッチにおいて、新たな干渉計や電気光学素子の構成、配置を考案し、任意偏光を維持する単一光子スイッチの実現に成功した。以上の成果は光子やその偏光を量子情報担体として利用する通信システムの大規模化に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：We first performed the characterization of a standard optical fiber cable at the wavelengths of 1550 nm and 1300 nm. We observed that a generation probability of a noise photon per gate pulse (at 1550 nm) is  $10^{-7}$  and polarization rotation in the fiber is correctable by additional polarization optics. This indicates that the our proposed group-velocity-mismatched Kerr effect in a optical fiber is a promising method for demonstrating low-noise and low-loss polarization switching of single photons. We expect that single-photon polarization switching will be demonstrated in our laboratory after amplifying the gate optical pulses from our laser source. In the project, we have also demonstrated the design method of the generation of high-purity single photons at 1300 nm and low-loss polarization-maintaining electro-optic router compatible with single photons. Those will be a fundamental components for future photonic quantum information applications.

研究分野：量子光学

キーワード：光子 光スイッチ 量子光学

### 1. 研究開始当初の背景

単一光子は量子情報処理における量子ビット媒体の有力候補であり、その操作、スイッチングには極限の低損失化、高速化、高精度化が要求されている。しかし、ほぼ全ての既存スイッチング素子は、その物理的大きさに起因して低損失性、高速性の一方しか獲得できていない。例えば、量子通信や従来型光通信で広く利用されている電気光学スイッチでは、バルク型では低損失(< 0.01 dB)、低速 (> 1 ns)な一方、導波路型では、高速(< 0.1 ns)、高損失(> 3 dB)、といった具合である。そこで本研究では、光導波路素子の1つである単一モード光ファイバーにおいて、低損失閉じ込め(0.2 dB/km)と、その内部で起こる非線形光学効果である光カー効果の高速性(< 1ps)が、例外的に両立している点に着目した。すでに通信路として活用されている光ファイバーが有用な単一光子スイッチング媒質であることが実証された場合、量子ネットワーク技術の多チャンネル化や大規模化へ向けた研究開発を加速できる可能性をもち、将来の情報通信技術の高度化に大きく貢献する潜在性をもつ。

また、光子の偏光のスイッチング自体は量子情報技術において重要である一方、それ自体が自然な量子ビット状態としても利用可能であり、量子暗号通信等での応用が期待されている。したがって、偏光をスイッチするだけでなく、偏光を維持しながら単一光子の光路を高速にスイッチする技術の実現も重要である。しかし、これまでの研究では特定の偏光状態を維持して利用できるスイッチング素子は存在するものの、任意偏光に対して偏光を維持しながら他の光の自由度をスイッチするような技術は提案者の知る限り、実現されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では量子情報科学の最重要課題の一つであり、一般的な光ネットワーク技術も大きく発展させる潜在性、挑戦性を持つ課題として、光ファイバーを用いた群速度不整合カー効果を用いて、単一光子の低損失、高速、高精度スイッチング技術の実現に挑戦した。光ファイバー内の低損失性やカー効果の高速性、光パルスの低損失ファイバー結合に加え、単一光子と光カー効果誘起用ゲート光パルス間の群速度「不整合」を導入することで、安定かつ高精度なスイッチングの実現も目指す。群速度不整合は材料分散によって自然に起こる現象である一方、一般的な非線形光学では効率低下を招く欠点とされている。本研究ではその「欠点」が、低損失、高速、かつ高精度な偏光スイッチ実現における「利点」となる可能性についても検証する狙いをもっている。提案手法は広範な波長域、そして単一光子以上の強度の光状態にも適用可能な汎用性をもち、量子メモリや光量子回路等の量子デバイスのみならず、従来型光通信網や光ニューラルネットワークの発展にも大きく貢献する潜在性を有する。

さらに、当初の目標にはなかった研究の展開として、自由空間電気光学素子を用いた任意偏光状態を維持しながら光路をスイッチングする手法を発見した。期待されるスイッチング速度は光ファイバーには劣るものの、低損失かつ偏光維持可能なスイッチング技術は偏光量子ビットを利用する多くの量子情報システムにおいて重要技術になる可能性があることを考慮して、本研究にてその実現に挑戦した。

### 3. 研究の方法

本研究は、光カーシャッターの光学配置を基本とする。ゲート光の波長をとゲート光は偏光状態が互いに 45°異なる形で共に非線形光学媒質(光ファイバー)へ入射される。そして光カー効果により、単一光子パルスは時間的に重なりをもつゲート光強度の大きさに比例して複屈折を受け、偏光回転(理想的には複屈折位相差による 90°回転)が起こる。従来方式のような群速度「整合」、つまり2つのパルスが常時重なる場合、偏光の回転角やパルス内での偏光均一性は、媒質の分散関係とゲートパルス時間形状と遅延に非常に敏感となり、これらの高度な最適化が要求され、利用状況も限定される。そこで本研究では敢えて群速度不整合を積極的に用いて、ファイバー内で速い群速度をもつパルス(本研究では単一光子)が遅延されてファイバーへ入力され、ファイバー内で遅く伝播するパルス(本研究ではゲート光)を追い越す。この追い越しにより、ゲートパルス時間形状に依存せず、単一光子がパルス全体に渡って均一な偏光回転を受ける高精度スイッチングが実現される。群速度不整合はゲート光と単一光子の波長差(分散)によって容易に発生可能であり、ゲートパルス時間形状は整形不要なため、実装も容易となる。群速度不整合を実現するため、単一光子およびゲート光の波長はそれぞれ 1300 nm、1550 nm を選択した。これら2波長はそれぞれ光通信波長帯の 0 バンドおよび C バンドであり、古典光学的な光デバイスも多く利用できる利点をもつ。2つのパルスの波長差における群遅延は  $D = 2$  ps/m である。

本研究では、まずこれら2波長の光を合波し、ファイバー結合させ、そして分離する光学系を構築した。そして、古典的な光パルスを用いて、光ファイバーをスイッチング媒質として用いる場合の光ファイバー内部での偏光回転、ノイズ光子発生、そして古典的なカー効果について検証を実施した。

また、波長 1300 nm 付近での単一光子源の設計と開発を実施した。光通信 0 バンドでは、C バンドや L バンドと比較して、量子力学的に高い純粋度をもつ単一光子発生源が実現されていない

い。新たな通信波長帯での高純粋度の単一光子の実現は、本研究の遂行だけでなく、量子通信の帯域拡大においても重要である。そこで、本研究では自発パラメトリック下方変換 (SPDC) を用いた伝令付き単一光子発生における、2 次の非線形光学媒質 (KTiOPO<sub>4</sub> 結晶) での群速度整合条件の探索と、分極構造の最適化を実施した。

偏光維持する電気光学スイッチの研究では、電気光学素子を内部に配置する Mach-Zehnder 型スイッチにおいて、光学軸を直交させた 2 つの電気光学結晶を用いること、そしてミラーやビームスプリッターへの入射角を 5 度以下と小さくすることで、すべての素子が光子の偏光状態を維持できる光学的配置を考案した。この手法の検証のため、まずプロトタイプ型として、結晶が入手しやすい 800 nm 帯で光学系の構築とスイッチング性能の評価を実施した。その後、1550 nm で動作する電気光学素子を作製し、プロトタイプ版と同様に光学系の構築と評価を実施した。

#### 4. 研究成果

本研究では、研究期間内の 2 度の異動のために、光学系の再立ち上げなど、当初の予定以上に時間を要する事項が発生し、目標である光ファイバーでの単一光子スイッチングの実証は達成することはできなかった。しかし、その実現に向けたいくつかの重要な知見と、そこから派生した研究についての成果を得ることができた。

まず、2 波長光学系の構築では、ファイバーカプラ間の空間モード整合をシミュレーションし、単一光子の波長で高いファイバー結合効率を実現することができた (>90%)。続いてゲート波長における光ファイバー励起における偏光特性やノイズ特性の評価を実施した。その結果、1550 nm ゲートパルスによる 1300 nm 帯のノイズ光子発生確率が 1 パルスあたり  $10^{-7}$  乗程度であることを観測した。また、光ファイバーによる偏光回転の波長依存性はあるものの、実験室内で安定であるため、ファイバーから出力される光子が受ける一定のオフセット回転を補償すれば、スイッチとして有効であることも判明した。したがって、波長差をもつゲート光と単一光子の低損失な群速度不整合カースイッチングの実証において、ノイズや不要な偏光回転の問題はないことが明らかになった。しかし、実験では単一モード光ファイバーの非線形性に対し、ゲート光のパルスエネルギーが当初の推定と比較して 6 倍程度 (2nJ) 必要であることが判明し、現在の実験設備で対応することができなかった。しかしながら、今後ファイバーアンプやパルスピッカー等を用いた光増幅により、要求されるパルスエネルギーは十分達成可能であり、単一光子の低損失偏光回転を実証するための展望は開けたと考えられる。光ファイバーが低損失、高速、高精度な単一光子スイッチング媒質であることが実証されれば、量子情報技術の大規模化に大きく貢献する技術となることが期待される。

1300 nm 帯での単一光子源の設計においては、いくつかの群速度整合条件の発見し、さらに分極構造の制御法の比較することにより、純粋度の理論計算を実施した。その結果、波長 710 nm でポンプし、1310 nm と 1550 nm の光子のペア発生による伝令付き単一光子発生において 99.6% の純粋度が達成できることが判明した。また、選択したポンプ波長は既存の超短パルスレーザーで発生可能であり、さらに発生光子も超伝導光子検出器で高感度に検出可能であることから、十分に実現可能な設計であると考えられる。また、分極構造の制御方法の比較により、一般により複雑な分極構造をとる手法が不要な擬似位相整合のために、広いスペクトル領域でノイズ光子を発生させることも明らかにした。研究期間終了時点では光学系を構築中であり、光子のペアや伝令付き単一光子の観測には至らなかったものの、考案した光源が実現されれば光通信 0 バンドにて高精度な光量子情報処理を実現するための重要技術となることが期待される。

偏光維持する電気光学スイッチの研究においては、800 nm 帯で動作するプロトタイプ版を構築し、評価した結果、スイッチにおける消光比が 20 dB、平均損失 3%、立ち上がり時間 2.9 ns を観測した。さらに、偏光状態の維持について、量子プロセストモグラフィで評価したところ、理想的な恒等演算に対する忠実度が 99% 以上であることが観測された。したがって、干渉計や電気光学素子の全ての機械的な配置の改善が、単一光子のスイッチングにおいて非常に有効であることが示された。ナノ秒程度の時間分解能をもつ任意偏光を維持する光学スイッチは提案者の知る限り世界初であり、その実現は偏光量子ビットを用いた量子情報技術の大規模化に大きく貢献するものと期待される。波長 1550 nm で動作するスイッチについても古典光パルスにおける評価は完了しており、今後伝令付き単一光子のスイッチングの実験を実施することで、本研究の手法が真に有用であることを検証する予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Wang Pengfei, Baek Soyoung, Edamatsu Keiichi, Kaneda Fumihiro	4. 巻 63
2. 論文標題 Low-loss polarization-maintaining optical router for photonic quantum information processing	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 040901 ~ 040901
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ad3533	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18件（うち招待講演 5件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Soyoung Baek, Fumihiro Kaneda, Yasuyoshi Mitsumori, and Keiichi Edamatsu
2. 発表標題 Engineering Spatial Entanglement of Photon Pairs Generated from Parametric Down-Conversion
3. 学会等名 Optica Quantum 2.0 Conference and Exhibition（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tingrui Dong, Soyoung Baek, Fumihiro Kaneda, and Keiichi Edamatsu
2. 発表標題 Experimental Single-qubit Variable-strength Measurement Using a Quantum Computer
3. 学会等名 Optica Quantum 2.0 Conference and Exhibition（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wu-Hao Cai, Rui-Bo Jin, Keiichi Edamatsu, and Fumihiro Kaneda
2. 発表標題 Spectrally Pure Heralded Single Photons at Telecommunication O-Band from a Custom-Poled KTiP04 Crystal
3. 学会等名 Optica Quantum 2.0 Conference and Exhibition（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fumihiro Kaneda
2. 発表標題 Time Multiplexing for High-Efficiency Generation of Single and Entangled Photons
3. 学会等名 IWSQMD2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Pengfei Wang, Keiichi Edamatsu, Fumihiro Kaneda
2. 発表標題 Electro-optic switch towards polarization-independent single-photon routing II
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 狩野信茂, 枝松圭一, 金田文寛
2. 発表標題 変調された分極反転KTiOP04結晶による高不可識別性光子対の発生
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 蔡吾豪, 枝松圭一, 金田文寛
2. 発表標題 Spectrally Pure Heralded Single Photons at Telecommunication O-Band from a Custom-Poled KTiP04 Crystal
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tingrui Dong, Beak Soyoung, 金田文寛, 枝松圭一
2. 発表標題 量子コンピュータにおける一般化非破壊完全ベル測定の実証
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wenrui Li, Soyoung Baek, 枝松圭一
2. 発表標題 パラメトリック下方変換により発生した光子対の位置 - 運動量エンタングルメント制御
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fumihiro Kaneda
2. 発表標題 Multiplexing toward high-efficiency single- and multi-photon generation
3. 学会等名 The 15th Asia Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wu-Hao Cai, Fumihiro Kaneda, Keiichi Edamatsu, and Rui-Bo Jin
2. 発表標題 Optimized Design of the Lithium Niobate for Spectrally-Pure-State Generation at MIR Wavelengths Using Metaheuristic Algorithm
3. 学会等名 The 5th International Forum on Quantum Metrology and Sensing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田 文寛
2. 発表標題 光子を用いた量子の基礎および応用技術の研究
3. 学会等名 東北大学物理教室コロキウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田 文寛
2. 発表標題 時間多重化による高効率量子光源の研究
3. 学会等名 物性物理オンラインセミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田 文寛
2. 発表標題 多重化伝令付き単一光子源の開発
3. 学会等名 量子情報関西Student Chapter (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Pengfei Wang, Keiichi Edamatsu, Fumihiro Kaneda
2. 発表標題 Electro-optic switch toward polarization-independent single-photon routing
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumihiro Kaneda
2. 発表標題 Pure single-photon generation using a domain-engineered nonlinear optical crystal
3. 学会等名 FRIS/TI-FRIS annual meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田文寛
2. 発表標題 時間多重化による量子光源の研究
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田文寛
2. 発表標題 小さな光子の積み重ね：多重化光子源
3. 学会等名 FRIS Hub meeting
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	BAEK SOYOUNG	東北大学・電気通信研究所・助教	
	(BAEK SOYOUNG)		
	(70826172)	(11301)	

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
---------	---------