

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

平成 17 年度採択研究代表者

井上 恭

(大阪大学大学院工学研究科 教授)

「通信波長帯量子もつれ光子とその応用システム」

1. 研究実施の概要

量子もつれ光子対は、特異な相関を持つ量子力学的状態として、世界的に研究が進められている。本プロジェクトは、量子もつれ光子のファイバ通信への応用技術を開拓することを目的としている。具体的には、新しい応用システムの提案及び性能評価、ファイバ通信波長(1.5 μm)帯量子もつれ光子発生技術の確立及びそれを用いたシステム実験、光子検出など周辺技術の開発、などを進めている。

量子もつれ光子のシステム応用として一番手近なのは量子暗号通信である。これは、暗号通信のための秘密鍵を量子力学的に安全性が保証された方法で離れた2者に供給するシステム(量子鍵配送)で、量子もつれを適用することによりシステム長の長距離化が期待できる。これまで、従来より簡便で実用向きであることを特徴とする差動位相シフト(DPS)量子もつれ鍵配送システム及び量子リレーシステムを提案した。そして、その実現に向け、通信波長帯における量子もつれ光子発生、特にファイバ伝送に適した時間位置もつれ光子発生技術を開発した。さらには、量子もつれを用いた鍵配送システムの実証実験、量子リレーに利用する量子干渉現象の初期実験を行なった。

量子もつれ応用としては、偏波もつれ光子を用いた量子ネットワークも考えられる。これに関し、分極反転 LiNbO₃ 内の自然パラメトリック下方変換による偏光もつれ光子発生を行ない、干渉計構成の工夫により安定なもつれ光子発生を実現している。

また、これらのシステム実験に必須な光子検出技術に関し、連続動作可能な周波数変換型光子検出器、簡便な構成で高繰り返し動作が可能な放電パルス計数法、などの開発も行なってきた。

今後は、以上の技術開発をさらに推し進め、完成度の高いシステム実現を目指す予定である。

2. 研究実施内容

◆量子雑音を利用した DPS 量子鍵配送システムの提案

新しい量鍵配送システムとして、2つの巨視的なコヒーレント状態を用いる方式を提案した。量子雑音により2状態の一部が重なり合う状態の DPS 信号光を送信し、受信側ではしきい値処理によりそれを復調する。2状態が重なり合わせることで安全性を確保する。巨視的な光であるため通常の光受信器が使えることを特徴としている。

◆DPS 量子鍵配送における光源線幅条件の明確化

DPS 方式に用いる光源の線幅に対する要求条件について実験・理論面から検討し、受信側で用いる干渉計FSRの 0.07%以下である必要があることを明らかにした。

◆分極反転 LiNbO₃ による時間位置もつれ光子発生

分極反転 LiNbO₃ のパラメトリックダウンコンバージョンを利用すると、低雑音な量子もつれ光子発生が可能である。2連続パルス励起により時間位置もつれ光子を発生させ、導波路干渉計を用いた二光子干渉実験を行い、低雑音かつ安定な量子もつれ光子発生を確認した。

◆量子もつれ鍵配送実験

光ファイバ内の自然放出四光波混合により発生させた時間位置もつれ光子を用いて、量子鍵配送実験を行なった。ラマン散乱による雑音光子抑圧のため、ファイバは液体窒素温度まで冷却した。ファイバからのシグナル/アイドラー光子列を光フィルタにより分離し、それぞれに{0, $\pi/2$ }の位相変調を加えた後に1ビット遅延干渉計を透過させる。干渉計出力段での光子検出には変調位相に応じた相関があり、これより鍵ビットを生成する。{ビット誤り率 8.6%、生成レート 0.3bps}のシフト鍵生成実験に成功し、量子もつれ光子による秘密鍵配送を実証した。

◆Hong-Ou-Mandel 実験

鍵配送長距離化のための量子リレーシステム実現には、中継ノードにおけるベル測定が必須であり、このためには異なる光源から発生した光子が可干渉であることが必要である。これに向けて、2つの光ファイバもつれ光源から発生したアイドラー光子同士を2×2光カップラにより干渉させる Hong-Ou-Mandel 実験を行なった。シグナル光子は光子発生確認用に用いる。光経路の遅延を変えながら4つの光子の同時検出を測定したところ、明瞭度 $53 \pm 5\%$ の二光子干渉が観測された。これにより、量子リレー実現への足掛かりを得た。

◆低ジッタ周波数変換型光子検出器の開発

通信波長帯用の InGaAs-APD 光子検出器は高いアフターパルス率のため動作速度が制限される一方、短波長用 Si-APD はそのようなことがなく、CW動作による光子検出レートの高速度化が可能である。長波長帯光子を分極反転 LiNbO₃ 内のパラメトリック相互作用により短波長に周波数変換し、それを Si-APD で受信する光子検出系を開発した。低ジッタの小さい(FWHM30ps) Si-APD を用いることにより、実効的な暗計数の低減化も実現した。本検出器を用いた量子鍵配送実験を行ない、ファイバ長 100km において、一般的個別攻撃に対する安全鍵生成レート 166bpsを達成した。これは、これまでの最高記録である。

◆量子鍵配送の安全性解析

強いコヒーレント光を参照光に用いる B92 プロトコルの無条件安全性を理論的に示した。理論結果は、安全鍵の生成率がチャンネル透過率に比例することを示すものとなった。

また、Plug&Play BB84 方式に対する盗聴法を提案し、安全な鍵配送には 14.6%以下のビット誤り率が必要であることを示した。

さらに、デコイ BB84 方式に双方向エラー訂正プロトコルを適用することを検討し、典型的な実験条件の場合にシステム長が約 40km 長くなることを示した。

◆ファイバーループファイバーループ構成による偏光もつれ光子の発生

ファイバーループ構成と分極反転 LiNbO_3 内の自然パラメトリック下方変換による偏光もつれ光子対の発生に成功した。ループ構成により位相揺らぎが自動的に補償され、安定なもつれ光子発生が行える。二光子干渉測定において、明瞭度85%を得た。

◆InGaAs-APD 光子検出器の低雑音化

ゲート動作 InGaAs-APD 光子検出器において、APD 冷却と放電パルス計数法による低雑音・高ゲート周波数化に成功した。APD 冷却により熱雑音を、放電パルス計数法によりアフターパルス雑音を、それぞれ抑制し、ゲート周波数 20MHz において、量子効率 10%、暗計数率 3×10^{-7} /ゲート、アフターパルス率 8×10^{-5} を得た。

3. 研究実施体制

(1)「阪大」グループ

①研究者名

井上 恭(大阪大学 教授)

②研究項目

・量子通信システムの提案・評価

(2)「NTT」グループ

①研究者名

武居 弘樹(NTT 物性科学基礎研究所 研究主任)

②研究項目

・時間位置もつれ光子対を用いた量子通信実験

(3)「産総研」グループ

①研究者名

吉澤 明男(産業技術総合研究所 主任研究員)

②研究項目

・偏波に基づく多光子間量子もつれ合い技術の開発

4. 研究成果の発表等

(1)論文発表(原著論文)

○H. Takesue, "Long-distance distribution of time-bin entanglement generated in a cooled fiber," Opt. Express, vol.14, p. 3453 (Apr 2006).

○T. Honjo, K. Inoue, A. Sahara, E. Yamazaki, and H. Takahashi, "Quantum key distribution

- experiment through a PLC matrix switch," Opt. Commun., vol. 263, p.120, (Jul 2006).
- H. Takesue and K. Inoue, "Quantum secret sharing based on modulated high-dimension time-bin entanglement," Phys. Rev A, vol. 74, 012315, (Jul 2006).
 - H. Takesue, T. Honjo, and H. Kamada, "Differential phase shift quantum key distribution using 1.3-um up-conversion detectors," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, p. 5757 (Jul 2006).
 - K. Inoue, "Quantum key distribution technologies," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 12, p. 888, (Aug 2006).
 - A. Yoshizawa and H. Tsuchida, "Timing adjustment of incoming photons in the gated-mode single-photon detection at 1550 nm", Jpn. J. Appl. Phys. Pt.2, vol. 45, p.L854 (Aug 2006).
 - X. Ma, C-H. F. Fred, F. Dupuis, K. Chen, K. Tamaki, H-K. Lo, Phys. Rev. A, vol. 74, 032330 (Sep 2006).
 - H. Takesue, E. Diamanti, C. Langrock, M. M. Fejer and Y. Yamamoto, "10-GHz clock differential phase shift quantum key distribution experiment," Opt. Express, vol.14, 9522 (Oct 2006).
 - H. Takesue, E. Diamanti, C. Langrock, M. M. Fejer and Y. Yamamoto, "1.5-um single photon counting using polarization-independent up-conversion detector," Opt. Express, vol.14, 13067 (Dec 2006).
 - E. Diamanti, H. Takesue, C. Langrock, M. M. Fejer and Y. Yamamoto, "100 km differential phase shift quantum key distribution experiment with low jitter up-conversion detectors," Opt. Express, vol.14, 13073 (Dec 2006).
 - A. Yoshizawa, S. Odate and H. Tsuchida, "Discharge pulse counting for low-noise single-photon detection at 1550 nm using an InGaAs avalanche photodiode cooled to 130 K", Jpn. J. Appl. Phys. Pt.1, vol.46, p.220 (Jan 2007)
 - T. Honjo, H. Takesue and K. Inoue, "Generation of energy-time entangled photon pairs in 1.5- μm band with periodically poled lithium niobate waveguide," Opt. Express, vol. 15, 1679 (Feb 2007).

(2) 特許出願

平成 18 年度特許出願: 4 件 (CREST 研究期間累積件数: 6 件)