

## 1550nm 帯量子もつれ合い状態の効率的な生成・検出及びその利用に関する研究（継続-15）

Efficient generation and detection of 1550 nm photon pairs,  
and demonstration of entanglement-based quantum cryptography

土田 英実 産業技術総合研究所 光技術研究部門

Hidemi Tsuchida, Photonics Research Institute

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

吉澤 明男

Akio Yoshizawa

産業技術総合研究所 光技術研究部門

Photonics Research Institute

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

研究期間 平成 13 年度～平成 17 年度

## 概要

本研究の目的は量子暗号通信等の次世代量子情報通信・量子情報処理技術を開発する上で重要となる光ファイバ通信波長帯（1550nm 帯）において、量子もつれ合い状態を効率良く発生・検出する技術の開発及び量子もつれ合い状態を利用した光ファイバ量子暗号通信技術の開発である。インジウム・ガリウム・ヒ素系アバランシェフォトダイオードを受光素子とする単一光子検出器の低雑音化と高速動作時のアフターパルス雑音評価法の開発、ニオブ酸リチウム擬位相整合光導波路を非線形媒質とした偏光に基づく量子もつれ合い状態の発生・検出技術、量子トモグラフィーによる量子もつれ評価技術、光ファイバを介した量子もつれ合い状態の遠距離間共有技術、量子もつれ合い状態を利用した光ファイバ伝送による量子暗号鍵配布技術を開発した。

## Abstract

Efficient two-photon generation and detection in a 1550 nm band is important to realize the entanglement-based fiber-optic quantum cryptography. In this research project, high-speed and low-noise single-photon detectors operating at 1550 nm were developed for entanglement detection, and after-pulses were evaluated by time-interval analyses of detection events. Polarization-entangled photon pairs were generated using a fiber-optic two-photon interferometer with two periodically poled Lithium Niobate waveguides. Fiber-optic long-distance entanglement sharing and quantum key distribution were demonstrated.

## 1. まえがき

量子暗号通信等の次世代情報通信・処理技術を開発する上で重要となる光ファイバ通信波長帯（1550nm 帯）において、量子もつれ合い状態を効率良く発生・検出する技術及び量子もつれ合い状態を利用した光ファイバ量子鍵配布技術を開発した。H13 年度は、インジウム・ガリウム・ヒ素系アバランシェフォトダイオードを用いた単一光子検出器の高速動作時に問題となるアフターパルス雑音の発生率を評価し、除去技術を開発した。続いて、2本のニオブ酸リチウム擬位相整合光導波路を用いて偏光に基づく量子もつれ合い状態の効率的な発生技術（H14）、量子トモグラフィーと呼ばれる手法を用いることにより、偏光に基づく量子もつれ合い状態の時間変化を精度よくモニタする技術、揺らぎを抑圧した発生安定化技術を開発した（H15）。更に、10.5km 程度の長さを持つ光ファイバを介した量子もつれ合い状態の遠距離間共有技術の開発（H16）、量子もつれ合い状態を利用した量子暗号鍵配布技術の開発（H17）を実施し、最終的に、20.6km の光ファイバ伝送による量子もつれ量子暗号鍵配布の実験を行った。

## 2. 研究内容及び成果

## 2.1. アフターパルス評価技術

ゲート動作型単一光子検出器は量子暗号・情報通信分野において重要であるが、動作周波数の増加とともにアフターパルスの発生が顕著となる。従来技術ではアフター

パルスの発生が無視できる低い動作周波数で量子効率を測定し、アフターパルスの発生確率を測定するためにダブルパルスを受光素子であるアバランシェフォトダイオードに印加した。我々は、検出間隔の発生頻度確率分布から量子効率とアフターパルス発生率を同時に測定する新しい技術を開発し、インジウム・ガリウム・ヒ素系アバランシェフォトダイオードを受光素子とする 1550nm 帯単一光子検出器を評価した。

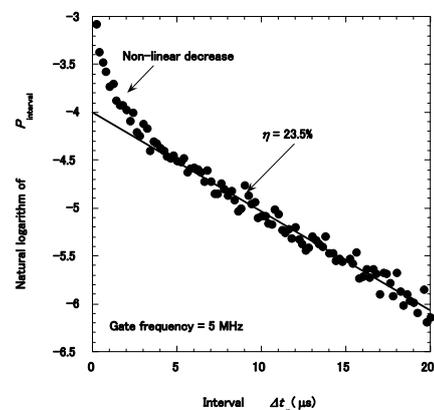


図1 検出間隔の発生頻度確率分布

図1に発生確率（黒丸）を示すが、アバランシェフォトダイオードの影響が無視できる間隔 10μs 以上の測定値は直線で近似できる。量子効率は直線の傾きから、ア

フターパルスの発生確率は直線と測定値との差から求めることができる。図2は動作周波数5MHz時に観測されたアフターパルスの発生確率である。アフターパルスの発生は時間の経過とともに減少する。

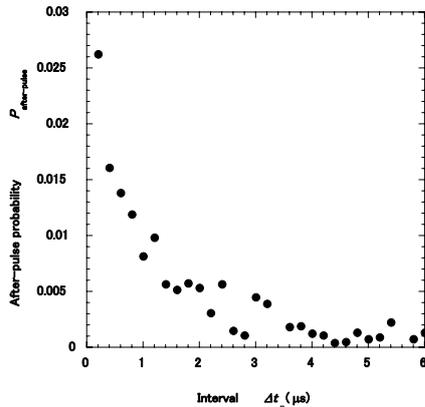


図2 アフターパルスの発生確率

## 2.2. 量子暗号鍵配布技術

図3に偏光に基づく量子もつれ合い状態発生装置を示す。2本のニオブ酸リチウム擬似位相整合(Periodically poled Lithium Niobate: PPLN)光導波路を非線形媒質とした二光子干渉計である。波長772.5nmの励起光をPPLNに入射し、パラメトリック下方変換の発生光を偏光ビームスプリッタで偏波合成する。

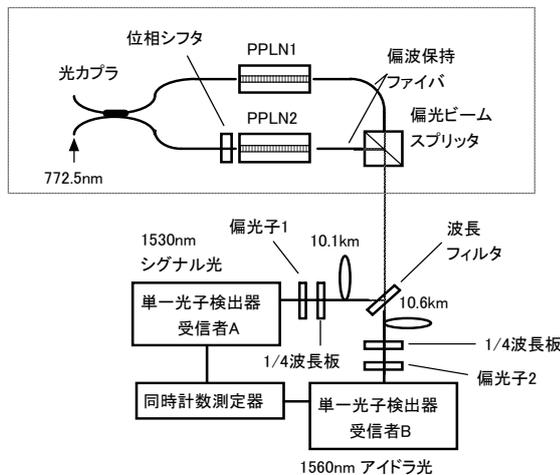


図3 量子もつれ合い状態の発生装置

ここで、

$$|\phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |H_s, H_i\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |V_s, V_i\rangle \quad (1)$$

が量子状態である。但し、 $H$ 、 $V$ はそれぞれ、垂直、水平偏光を示す。また、添字  $s$ 、 $i$  はシグナル光子とアイドラ光子に対応する。シグナル(アイドラ)光子は10.1km (10.5km) 分散シフト単一モード光ファイバを経由する。シグナル波長は1530nm、アイドラ波長は1560nmである。また、量子状態は

$$|\phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |45_s, 45_i\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |-45_s, -45_i\rangle \quad (2)$$

と変換できるから、以下のように鍵配布を実行することができる。

- 受信者AとBは垂直・水平基底もしくは $\pm 45^\circ$ を

独立にランダムに選択し、それぞれが受け取った光子の偏光状態を測定する。

- 受信者AとBは検出時刻と選択基底をそれぞれ公開し、両者で基底が一致し、同時計数したもののみを手元に残す。
- 垂直あるいは $45^\circ$ の場合ビット1を与え、垂直あるいは $-45^\circ$ の場合ビット0を与える。

これはBB84プロトコルの二光子版である。尚、受信者A、Bにある1/4波長版で偏波補償を行う。量子誤り率は8.3%、鍵生成率は25bps程度であった。ウィーン大学A. Zeilingerらの波長810nm帯での実験では、伝送距離が1.45kmであるにもかかわらず量子誤り率は8%程度であった。我々の使用した光ファイバの全長は20.6kmであり、A. Zeilingerらと比較すると量子誤り率が同程度であるにもかかわらず伝送距離で約14倍の改善がみられた。

## 3. むすび

量子暗号通信等の次世代量子情報通信・量子情報処理技術を開発する上で重要となる光ファイバ通信波長帯(1550nm帯)において、量子もつれ合い状態を効率良く発生・検出する技術の開発及び量子もつれ合い状態を利用した光ファイバ量子暗号通信技術の開発を行った。1550nm帯で量子もつれを利用した量子暗号通信を行うことの優位性を実証することができた。単一光子検出器の評価を含めて、計画通りに研究開発を行うことができた。

### 【誌上发表リスト】

- [1] A. Yoshizawa, R. Kaji and H. Tsuchida, "Quantum efficiency evaluation method for gated-mode single-photon detector", Electron. Lett. Vol.38 No.23 pp.1468-1469 (2002年11月)
- [2] A. Yoshizawa, and H. Tsuchida, "Generation of polarization-entangled photon pairs in 1550 nm band by a fiber-optic two-photon interferometer", Appl. Phys. Lett. Vol.85 No.13 pp.2457-2459 (2004年9月)
- [3] A. Yoshizawa, and H. Tsuchida, "Long-distance test of Bell's inequality in a 1550 nm band using polarization entanglement", Electron. Lett. Vol.41 No.9 pp. 540-541 (2005年4月)

### 【申請特許リスト】

- [1] 吉澤明男、鍛冶良作、単一光子検出器評価装置およびアフターパルス除去方法、日本国、2002年3月27日
- [2] 吉澤明男、鍛冶良作、量子相関光子対発生装置、日本国、2003年3月11日
- [3] 吉澤明男、鍛冶良作、受信兼再送信機および送信兼受信用機からなる量子暗号通信システム及びそのタイミング信号作成法、日本国、2003年5月29日

### 【登録特許リスト】

- [1] 吉澤明男、鍛冶良作、単一光子検出器評価装置、そのためのプログラムおよび記録媒体、日本国、2006年3月3日、3774765

### 【ホームページによる情報提供】

<http://staff.aist.go.jp/yoshizawa-akio/>