量子もつれ QKD システムにおけるアフターパルスの影響についての検討

Studies in effects of afterpulse events on entanglement-based quantum-key-distribution systems

沖電気工業 (株) 研究開発センタ ○荒平 慎、村井 仁

Corporate Research & Development Center, Oki Electric Industry Co., Ltd.

°Shin Arahira and Hitoshi Murai

E-mail: arahira335@oki.com

量子もつれ光子対を用いた量子鍵配送(QKD)システムは、将来の QKD ネットワーク拡張の点から有望である。QKD システムにおいて、単一光子検出器（SPD）の諸特性（検出効率（η)、暗電流検出率（d)、アフターパルス確率（P_a）等）は、システムの伝送距離や誤り率、最終鍵生成レートを支配する重要なパラメータである。特に BB84 系システムにおいては、誤り訂正や秘匿増幅などの鍵蒸留プロセス後に有意な最終鍵を得るためには低い P_a が必要であり、その許容度はせいぜい数%である[1]。

本件では量子もつれベース QKD システムにおける SPD の P_a の影響について、理論的、実験的な検討を行った。その結果、量子もつれベース QKD システムにおいては、P_a が 100%に達するような場合でも低い誤り率を得ることが可能であるという示唆が得られた。

SPD を計 8 個用いる passive modulation 方式[2]を想定して、光子対数分布をポアソン分布と仮定した場合、量子もつれベース QKD システムにおける真の同時カウントレート（R_c)、誤りの起因となる偶発同時カウントレート（R_{acc}）は次式で与えられる。

$$R_c = \frac{1}{2}\mu_0\alpha_s\alpha_i l_s l_i \eta_s \eta_i \qquad (1)$$

$$R_{acc} = 8c_s c_i \qquad (2)$$

ここで μ_0 はパルス当たりの平均光子対数、l_x（x=s, i）はシグナル光、アイドラー光に対する伝搬損失、α_x はその他の過剰損失である。c_x は各 SPD のシングルカウントレートであり、

$$c_x = \frac{1}{4}\mu_0\alpha_x l_x \eta_x (1 + P_{ax}) + d_x \qquad (3)$$

で与えられる。

上式から、伝送距離が比較的短く、SPD の暗電流検出率（d_x）が無視できるとした場合、誤り率は近似的に

$$e = \frac{R_{acc}}{2(R_c + R_{acc})} \cong \frac{\mu_0(1 + P_{as})(1 + P_{ai})}{2\{1 + \mu_0(1 + P_{as})(1 + P_{ai})\}} \qquad (4)$$

で与えられる。この式は、SPD の P_a が高い場合でも、それに応じて μ_0 を下げてやれば誤り率を低く抑えられることを意味している。

従来我々が報告している、PPLN リッジ導波路デバイスを用いた通信波長帯偏光量子もつれ光源[3]を用いて実証実験を行った。SPD としては Princeton Lightwave 社製のベンチトップレシーバ（PGA-600HSU）を用いた（ゲート周波数:40 MHz、η：20%～35%）。SPD の駆動条件を変化させて P_a を変化させ、その時の 2 光子干渉波形の変化を測定した。平均光子対数は、式(4)に従い、誤り率が同程度になるように変化させて実験を行った。

結果を図 1 に示す。図中黒はシグナル光側、アイドラー側 SPD の P_a がともに約 4.5%と低い場合、図中赤はシグナル光側 SPD の P_a を 104%と非常に高くした場合の結果である。明瞭度はともに約 90%と見積もられ、P_a が大きく異なっていても同等な明瞭度が得られていることがわかり、理論検討とよく一致した結果が得られた。その他詳細な結果は当日報告する。

[1] D. Stucki *et al.*, New J. Phys. **4**, 41 (2002).

[2] E. Waks *et al.*, Phys. Rev. **A65**, 052310 (2002).

[3] S. Arahira *et al.*, Opt. Exp. **20**, 15336 (2012).

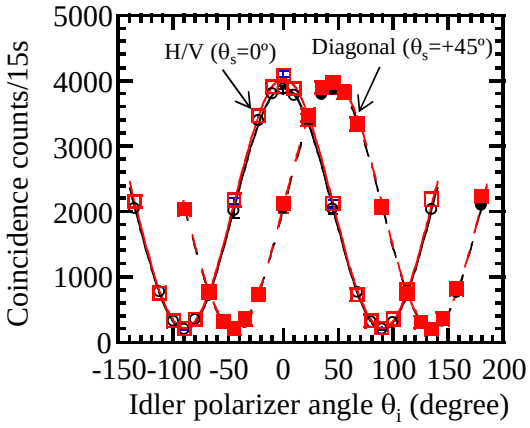

図 1　2 光子干渉波形の測定結果

（○,●: P_{as}=P_{ai}=4.5%　□,■: P_{as}=104%, P_{ai}=10%）

© 2015年 応用物理学会