単一光子伝送による高速量子暗号通信システム

富田 章久¹, 田島 章雄²

¹NEC ナノエレクトロニクス研究所 (〒305-8501 茨城県つくば市御幸が丘34)

²NEC システムプラットフォーム研究所 (〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部1753番地)

Fast Quantum Cryptography System Using Single Photon Communication

Akihisa TOMITA¹ and Akio TAJIMA²

¹Nano Electronics Research Laboratories, NEC Corporation, 34 Miyukigaoka, Tsukuba, Ibaraki 305-8501

²System Platforms Research Laboratories, NEC Corporation,
1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, Kanagawa 211-8666

(Received March 24, 2008)

Quantum Key Distribution (QKD) systems based on single photon transmission can generate unconditionally secure common key between remote users. Improvement of QKD performance, particularly on key generation rate, has been required to meet current network traffic. High key generation rate is realized by increasing photon detection rate and by reducing error rate. Therefore, a high-speed QKD system should be equipped with low loss receivers with high visibility, highly efficient photon detectors with small dark count probability, and a stable clock synchronization system with low stray light to the quantum signals. A solution for these issues are given by employing planar lightwave circuit interferometers, single photon detection circuits and modules, and clock synchronization based on Wavelength Division Multiplexing (WDM) technique.

Key Words: Quantum, Cryptography, Single, Photon, Communication

1. はじめに

インターネットをはじめとする情報通信技術の普及によってますます多くの情報が電子的に伝送されるようになっていく。この中には、外交・防衛など国家の安全に関わる情報や巨額の資金に関わる経済活動の情報など重要度の高いものが含まれる。これらの情報を守るため、安全性が証明可能で将来も陳腐化しない暗号法の実現が望まれている。従来から最高度に機密性の高い情報はワンタイムパッドといわれる方法で送られてきた。しかし、この方法は暗号化にメッセージと同じ長さの暗号鍵を必要とし、しかも暗号鍵は1度しか使えないため、暗号鍵の補充が問題になる。量子暗号鍵配送(QKD)は通信回線によって安全な暗号鍵を共有するための技術の一つである。QKDは他の方式と異なって、物理的に妥当な少数の仮定を満たせば情報理論的に安全な鍵共有ができ、さらに安全性の根拠が物理法則にあるため、盗聴技術の進歩による安全性の低下がないことが特徴である。QKDの実現に向けた研究が盛んに行われ、既に原理実証を過ぎて実用性検証に入っている。しかし、伝送可能距離や暗号鍵の生成速度の点で未だ性能の改善が必要であると考えられている。QKDの原理や基本的なプロトコルについてはレビュー¹⁾や解説記事^{2,3)}があるため、本稿では高速化

技術を詳しく述べることにしたい。

鍵共有に要求される速度はアプリケーションによって異なる。例えば256ビットの乱数パスワードを1分ごとに更新するといった用途では4.27 bpsで鍵生成ができればよい。一方、10 Gbpsのビットストリームを丸ごとワンタイムパッドで暗号化しようとすればそれだけの鍵生成速度が必要である。しかし、常識的には機密性の高い情報はそれほど大量でない。一時的に大量の伝送が必要な場合には事前に暗号鍵を貯めておくことでも対応できる。ここでは一応の目安として128 kbps程度を考える。波長多重を用いれば圧縮された動画に対応する1 Mbps程度への拡張は容易である。また、1時間鍵生成を行えば58 MBのデータを暗号化できる。

高速化といっても、QKDでは鍵の安全性が保たれてはならない。QKDの安全性の根拠は、1光子を状態に関する事前の知識なしに測定(盗聴)すると、必然的に誤りが生じることにある。逆に、誤り率から盗聴された情報量を推定して、安全な鍵を蒸留することができる。つまり、QKDを行うためには1光子が干渉性を保ったまま伝送される量子通信と、誤り訂正・秘匿性増強²⁾といったデジタル処理の2種類のプロセスが必要である。パイプライン処理ができるので鍵生成に要する時間はどちらか長い方で制限される。現状では量子通信が律速しているが、今

後の伝送技術の進歩で量子通信の時間が短くなるとデジタル処理の高速化も必要になる。本稿では高速化の話題のうち、BB84プロトコルを実装したファイバ系システムに関し、我々の研究成果を中心に鍵伝送の高速化技術を解説する。高速化への試みとしては他にDPS⁴⁾ (Differential Phase Shift)などの新しいQKDプロトコルが検討されている。DPSを用いるとBB84プロトコルに比べ同クロック周波数での伝送レートが2倍になる。ただし、BB84プロトコルは実用的なシステムで盗聴者の能力に制限をおかずに情報理論的な安全性が証明されている今のところ唯一のプロトコルであるため、安全性を重視する立場ではBB84プロトコルを選択することになる。

伝送速度を上げるにはクロック周波数を上げることが考えられるが、現状では光子検出器のデッドタイムで制限されている。広く用いられているInGaAsアバランシェフォトダイオード(APD)光子検出器では光子検出後約1 μ s程度は、アフターパルスという現象のため誤検出確率が大きく、次の光子を受信できない。このため、光子検出器の低アフターパルス化が必要である。Si-APDはInGaAs-APDよりもアフターパルスが小さい。また、超伝導光子検出器⁵⁾ (SSPD)にはアフターパルスが殆どなく、高速性に優れている。InGaAs-APDに関しても光子検出回路の工夫によって光子検出を高速化する試みがなされている^{6,7)}。Si-APD光子検出器を用いた実験としては、800 nm帯の光による1.25 Gbpsの空間伝送QKD⁸⁾、1.55 μ m光を波長変換検出した1 GHzクロックDPS-QKD⁹⁾が報告されている。さらに、SSPDを用いた10 GHzクロックによるDPS-QKD¹⁰⁾も実験されている。しかし、量子通信の場合、時間同期の安定性や、信号処理の速度を考慮するとシステムのクロック周波数は通常の光通信よりも低く抑える必要がある。現状では1-2 GHz程度以下が実用的であると考えられる。

高速化に有効な方策としてはこの他に、光子検出率の改善や伝送された鍵から安全な鍵を生成する効率である鍵生成率の改善も重要である。量子通信では、伝送路での損失や検出器の効率のために送信された光子の大半が失われ、たまたま検出された光子で暗号鍵の共有を行っているため、パルスあたりの光子検出率の向上で鍵の伝送レートは増大する。

現在行われているデコイ法によるBB84の実装では平均光子数0, $\mu_1 < \mu_2 < \dots < \mu_n$ の弱いコヒーレント光パルスを送信し、受信者が検出したパルスのうち送受信基底が一致するものを残し(基底照合)、さらに最大平均光子数 μ_n のパルスのデータから暗号鍵を生成する³⁾。送信されるパルスのうち μ_n のパルスの割合を κ_n とすると、鍵生成に使われるパルスが得られる確率は1パルスあたり

$$P_{\text{sig}} = \frac{1}{2} \kappa_n \left[1 - \exp\left(-\mu_n 10^{-(\alpha l + \beta + \gamma)/10}\right) \eta + 1 - \left(1 - 10^{-\beta/10}\right)^{N_{\text{ext}}} + P_d \right] \approx \frac{1}{2} \kappa_n \left[\mu_n 10^{-(\alpha l + \beta + \gamma)/10} \eta + N_{\text{ext}} 10^{-\beta/10} \eta + P_d \right] \quad (1)$$

で与えられる。係数(1/2)は基底照合によるものである。ここで、 α [dB/km]は距離 l [km]の伝送路の損失係数、 β [dB]は受信器の損失、 γ [dB]は伝送路での距離に依存しな

い損失を表す。第1項は平均光子数 μ_n のコヒーレント光(信号光)が損失のある伝送路を通った後、効率 η の光子検出器で光子が検出される確率である。第2項は外部からパルスあたり N_{ext} 個の光子(ストレー光)が信号光に混じって受信器に入射して検出される確率、第3項は光子検出器のダークカウントの寄与を表している。具体的な数値として、 $\alpha = 0.2$ dB/km, $\beta = 5$ dB, $\gamma = 0$, $l = 50$ km, $\eta = 0.1$, $\mu_n = 0.4$ とすると信号光が検出される確率は 1.3×10^{-3} であり、ほぼ1000回に1回しか検出されないことになる。光子検出率を上げるには受信器の損失 β を低減し、光子検出器の効率 η を向上させることが必要である。もちろん、単一光子光源ができれば $\kappa_n = 1$, $\mu_n = 1$ としたことになるので光子検出率の向上が期待できるが、クロックごとに必ず1個光子が伝送路に送られる理想的な状況が実現できるためには相当の研究開発が必要となる。今のところデコイ法による方が高い光子検出率が得られ、現実的である。

鍵の生成レートを上げるための鍵生成率の改善の方策は誤り率を低減することである。誤り訂正で失われるビット数が減るだけでなく、秘匿性増強のために捨てるビットを少なくできるからである。これは、量子暗号では誤りは盗聴行為に起因するとみなすため、誤りが多いとそれだけ盗聴者が乱数に関して情報を得たと考えるためである。上のモデル(1)での誤り率(QBER)は以下のよう

$$QBER = \frac{\frac{1}{2}(1-\nu)\mu_n 10^{-(\alpha l + \beta + \gamma)/10} \eta + \frac{1}{2} N_{\text{ext}} 10^{-\beta/10} \eta + \frac{1}{2} P_d}{\mu_n 10^{-(\alpha l + \beta + \gamma)/10} \eta + N_{\text{ext}} 10^{-\beta/10} \eta + P_d} \quad (2)$$

ここで、 ν は受信器(干渉計)の明瞭度である。上の式から、誤り率を小さくするには明瞭度を高め、ストレー光を低減し、ダークカウント確率を小さくすればよいことが分かる。

まとめるとQKDの高速化のためには、① 損失が小さく、干渉の明瞭度が高い受信器、② ダークカウント確率が小さく、光子検出効率の高い光子検出器が望まれる。さらに光子検出器は高いクロック周波数にも対応できることが必要である。また、③ ストレー光の大きな要因は量子レベルの信号光と同時に送信される古典的強度の同期信号光であり、この漏れこみの低減も課題となる。我々はこれらの問題を(i)PLC(Planar Lightwave Circuit)を用いた干渉計、(ii)APD用の信号検出回路の開発とモジュール化、(iii)WDMクロック同期技術の開発によって解決した。以下ではそれらの技術の詳細を述べる。

2. PLCを用いた干渉計

2.1 一方向型量子暗号技術

長時間安定動作が多数報告されてきた往復型方式¹¹⁾による量子暗号技術は、その光学系構成に起因する速度の制限があった。一方、一方向型方式は、干渉計の送受信者で独立に非対称干渉計を持つ必要があり両者の遅延量同期制御が必須となるものの、QKDの長距離・高速化を達成できる。特に、PLCを用いた干渉計は、光ファイバによって構成される干渉計に対して、精度良く同一の光回

路を量産可能で、温調のみにより安定な動作を実現可能という特徴を有している¹²⁾。

一方向型方式においてBB84を実装する際の2つの有力な方法として、4値位相(XY基底)コーディング(以下、方式A)と、2値位相+時間(XZ or YZ)コーディング(方式B)が報告されている。後者は受信側に変調器が不要となる為、その損失分だけ伝送速度の高速化が図れる。前者でも受信信号をビームスプリッタによりそれぞれ位相差の異なる干渉計へ入力することにより変調器を不要とすることも可能だが、過剰損失があることや制御対象である干渉計が増えるという問題がある。上記AB両方式に対応できる汎用性の高い量子暗号送信器は2×2干渉計と2電極MZ変調器を使用することで実現することができる¹³⁾。

2.2 量子暗号送信器構成

Fig. 1に2×2干渉計と2電極MZ変調器を使用した量子暗号送信器構成を示す。LDによって生成した光パルスを、2×2干渉計を通すことで2連パルスへと時間分離する。2電極MZ変調器を使用して、この2連パルスの相対位相及び相対強度を変調する。2電極MZ変調器の入出力はMZ各経路における位相シフト ϕ_1 及び ϕ_2 を用いて次式で表すことができる。

$$E_{out} = E_{in} \cos((\phi_1 - \phi_2)/2) \cdot \exp(i(\phi_1 + \phi_2)/2) \quad (3)$$

方式AではFig. 2左上に示す様に、同強度で90°ずつ位相の異なる4状態が必要となる。MZ変調器の片経路を0°と180°の変調位相で、他方を90°と270°の変調位相で駆動することで、式(3)の強度項である $\cos((\phi_1 - \phi_2)/2)$ は常に一定となり、位相項である $\exp(i(\phi_1 + \phi_2)/2)$ に従ってa~dの4状態を準備できる。前段の干渉計で時間分離された2連パルスに対して、a→aの駆動条件により位相差0°(X0)，a→cで位相差180°(X1)，a→bで位相差90°(Y0)，a→dで位相差270°(Y1)の4状態を生成できる。方式Bでは、Y基底に対応する強度1/2、位相差90°の2状態と、Z基底に対応する強度0、1の2状態が必要となる(Fig. 2左下)。MZ変調器片経路を90°、他方を0°と180°の変調位相で駆動することで、強度1/2、位相差90°のe, f、片経路を0°、他方を0°と180°で駆動することで、強度0、1のg, hを準備できる。2連パルスに対して、e→fの変調で位相差90°(Y0)，

Fig. 2 Applied modulations for phase coding (a) and phase-time coding (b).

f→eで位相差270°(Y1)，g→hで前パルス(Z0)，h→gで後パルスのみ(Z1)の4状態を生成できる。

この量子暗号送信器の特性を調べる為の実証実験を行った。LDにより、1.6 ns間隔、100 ps幅の光パルスを生成し、遅延差800 psのPLC MZ干渉計を使用して800 ps間隔の2連パルスへと時間分離した。この2連パルスに対してFig. 2の変調を行い、受信側の2×2干渉計及び2×4干渉計を通して干渉特性を測定した。XとY基底の2連パルスの位相差が90°異なっていること、及び、Z基底で消光した光パルスが十分消光されていることを確認する為、送信側PLCの温度を変化させて出力2連パルス間の位相を変えたときの、受信側PLCの各ポートに出力される光パルス強度の変化を測定した。測定結果をFig. 3に示す。方式Aの場合は、ポート0、1出力共に4つの送信状態に対応する光パルス強度が、位相90°ずつずれた正弦波曲線を描くことが確認できた。各正弦波のピーク高さの違いは、変調器駆動信号の設定値からのずれにより強度項が等しくならなかったことによる。方式Bの信号を受信側PLCのY0、Y1ポートで観測すると、PLC温度に従ってY基底の2パルスの光強度が変化する一方、Z基底の2パルスの光強度はPLC温度によらず一定となることを確認できた。Table 1に、各光パルスの消光比から計算される誤り率をまとめる。誤りは変調器駆動信号のずれや干渉計の精度

Fig. 1 Experimental setups for (a) phase coding and (b) phase-time coding.

Fig. 3 Results for (a) phase coding and (b) phase-time coding.

Table 1 Error rate calculated from pulse intensity.

		Type A				Type B			
Transmission Bits		X0	X1	Y0	Y1	Y0	Y1	Z0	Z1
Error Rate [%]		0.3%	0.5%	1.3%	0.5%	1.1%	0.3%	<0.1%	1.4%

に起因しているが、平均して0.7%以下の良好な誤り率を得た。

3. APD用の信号検出回路の開発とモジュール化

3.1 超小型APD モジュール

単一光子検出には、InGaAs-APDを冷却し、ゲートモード動作を用いる¹⁴⁾。小型低消費電力のペルチェ素子で十分な冷却を行うには、低温部への熱流入を最小限に抑える必要がある。APD素子の信号入出力ボンディングワイヤが支配的な熱流路となる。高周波特性はワイヤの接続数に依存するため、断熱性と広帯域性の要求は相反する。APDモジュールは、これらの要求に対して以下のように最適化した設計を行った。

- ①2組のAPD素子を、1つのペルチェ素子に搭載する事で、モジュールの小型化と冷却効率の改善を両立した。熱シミュレーションの結果、 -70°C までの冷却が期待された。
- ②2組のAPD素子とファイバを1つのレンズで光学結合しファイバ取り出し方向を揃える事で、RF信号の伝送路設計の自由度を確保した。
- ③ゲートパルスの伝送路帯域(ゲート帯域)の広帯域化を実現するために、終端用コプレナラインを設置した。FDTD法によるシミュレーションの結果、ボンディングワイヤ長が5 mm以下で3 GHzの帯域が期待できた。試作したAPDモジュールをFig. 4に示す。モジュール本体のサイズは $23.3 \times 21.7 \times 15 \text{ mm}^3$ である。評価の結果、 -73°C (200 K)の冷却能力と、 $1.02 \sim 1.05 \text{ A/W}$ の受光感度、測定限界以下のクロストーク特性、3 GHzのゲート帯域を確認した。このゲート帯域は、従来例¹⁾と比較し15倍の帯域であり、1 GHzのゲートパルスの繰り返しが可能な帯域である。

3.2 光子検出回路

ゲートモードを用いたSPDでは、信号識別回路でのチャージパルスを補償した識別回路が必要となる。従来のチャージパルス補償回路¹⁵⁾では、APD素子の個体差や

Fig. 4 APD Module.

実装のばらつきに対する高精度な調整が困難であった。この問題を解決するために、Fig. 5に示すA/Dコンバータ(ADC)とデジタル信号処理による、セルフトレーニング型識別回路を提案した¹⁶⁾。この信号処理回路をFPGAによって実現し1.5 GS/sのADCから出力される光子検出信号の識別を行った。

3.3 特性評価

前記の超小型APDモジュールと組み合わせ、SPDの特性評価を行った。まず、APDへ印加するゲートパルスの振幅と、識別しきい値の評価を行った。ゲートパルスとダークカウント特性の関係をFig. 6に示す。光子検出率一定の条件では、ゲートパルス振幅が6 V以下では、ダークカウント確率が急激に増加し、量子鍵生成レートの劣化につながる。識別しきい値は、識別回路で非光子検出状態でのノイズ分布を解析し、ノイズ振幅の標準偏差の5倍をしきい値とした。これはノイズを正規分布として、ダークカウント確率 2.9×10^{-7} に相当する。以上の結果を用いて測定したバイアス電圧に対する光子検出特性をFig. 7に示す。ダークカウント確率 $P_d = 2 \times 10^{-4}$ に於いて、光子検出効率 $\eta = 30\%$ であり¹⁷⁾、従来⁷⁾と比較して、3倍の鍵生成レート的高速化が可能となる。

4. WDMクロック同期技術

4.1 同期技術

実際に量子暗号技術を活用するためには、長距離・高

Fig. 5 Self-training discriminator circuit.

Fig. 6 Gate pulse amplitude vs. dark count characteristics.

^{†1} PLI Inc., AGD-25-SE-1-B1.

Fig. 7 Photon detection characteristics.

速条件においても安定した量子鍵配送を行わなければならない。特に、長時間にわたって伝送路の遅延変動を補償し、光子bit情報を正確に受信する同期技術は必要不可欠な技術である。量子信号は単一光子伝送であるため、光パワーが非常に小さく、信号自体からはクロック抽出できない。このため、単一光子伝送を補助する同期信号を量子信号と同一伝送路に伝送する必要があるが、実現する方式として大きくTDMとWDMの二つの方式がある。TDM方式は同期古典信号と量子信号を時間多重して伝送する。ファイバ非線形性の影響を受けないという利点もあるが、単一の受信器によって、古典・量子両信号を受信する場合、受信器に60 dB以上のダイナミックレンジが要求される。古典、量子信号それぞれを別の受信器によって受信する場合、高速(<ns)の光スイッチが必要という欠点がある。一方、WDM方式は別波長の同期古典信号と量子信号を多重して伝送する。受信器に大きなダイナミックレンジ不要、高速光スイッチ不要という利点があるが、非線形ノイズを抑圧することが必要になる。ダイナミックレンジや高速かつ低損失の光スイッチの実現性を考えるとWDM方式が有力である。以下では、WDM方式の実現手法について説明する。

あるが、非線形ノイズを抑圧することが必要になる。ダイナミックレンジや高速かつ低損失の光スイッチの実現性を考えるとWDM方式が有力である。以下では、WDM方式の実現手法について説明する。

4.2 WDM同期技術

WDM方式では、同期信号から量子信号への自然ラマン散乱クロストークにより量子信号のSN比が劣化して、鍵生成性能が低下するという問題があった¹⁸⁾。そこで、①量子信号の受信干渉計の前に狭帯域光フィルタを挿入し伝送中に漏れ込んだクロストークを抑圧、②同期信号の出力パワーを受信可能な最低レベルに設定し出力時のクロストークを低減、③受信側で同期信号に光Pre-Ampを挿入して出力パワーをさらに低減、といった光フィルタリングとパワー制御を行い、クロストークの影響を最小限に抑える。

4.3 実験

上記技術を適用し、1方向PLC干渉計およびWDM同期を用いてFig. 8の構成によりフィールド実験を行った¹⁹⁾。ここでは光子検出器としてSSPD⁵⁾を用いた。比較のため同期信号を別芯ファイバで送った場合の特性も測定した。伝送距離65 kmと97 kmにおける量子鍵生成の結果をFig. 9に示す。Fig. 9(a)より、平均光子数 μ を変化させても、同期信号をWDM伝送した場合と別芯で送信した場合とで結果がほぼ一致していることが見て取れる。これよりクロストークが十分抑圧できていることが確認できた。BB84を実装した装置ではこれまでより10倍高速なクロック周波数625 MHzを用いることにより、平均光子数0.4で97 kmファイバ伝送後にシフト鍵生成レート2.4 kbps、誤り率2.8%を得た。平均光子数0, 0.15, 0.4における光子検出率と誤り率から、デコイ法を適用した場合に安全性が保証できる鍵のレート²⁰⁾は漸近的に0.78-0.82 kbpsであると見積もられた。デコイ法による鍵生成を行うには、平均光子数をパ

Fig. 8 Experimental setup.

Fig. 9 Quantum key generation performance vs. mean photon number (a)QBER (b)Key generation rate.

ルスごとにランダムに選び、符号の有限長を考慮した漏洩情報量推定を行う必要がある²¹⁾。

5. まとめ

以上、量子暗号の高速化に不可欠な(i)PLC(Planar Lightwave Circuit)を用いた干渉計、(ii)APD用の信号検出回路の開発とモジュール化、(iii)WDMクロック同期技術について説明した。さらに、初期的なシステムにおいて伝送距離97 kmでシフト鍵生成レート2.4 kbpsを得た。これは伝送距離50 kmにおいて約25 kbpsに相当する。クロック周波数を1.25 GHzにあげ、SSPDより高感度のAPD光子検出器を利用することでシフト鍵生成レート1 Mbps(安全鍵レート100 kbps以上)にも達するものと思われる。今後システムとしての完成度を高めることにより、メトロ圏内で実用的な性能を持つ量子暗号ネットワークが実用化されていくことが期待される。

謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構(NICT)「量子暗号技術の実用化のための研究開発」の成果である。

参考文献

- 1) N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden: Rev. Mod. Phys. **74** (2002) 145.
- 2) 富田 章久: オプトロニクス **26** (2007) 147.
- 3) 富田 章久: 電子情報通信学会論文誌 A **J90-A** (2007) 358.
- 4) K. Inoue, E. Waks, and Y. Yamamoto: Phys. Rev. A **68** (2003) 022317.
- 5) S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang: IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 285.
- 6) N. Namekata, S. Sasamori, and S. Inoue: Opt. Express **14** (2006) 10043.
- 7) Z. L. Yuan, B. E. Kardynal, A. W. Sharpe, and A. J. Shields: Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 041114.
- 8) J. C. Bienfang, A. J. Gross, A. Mink, B. J. Hershman, A. Nakassis, X. Tang, R. Lu, D. H. Su, C. W. Clark, C. J. Williams, E. W. Hagley, and J. Wen: Opt. Express **12** (2004) 2011.
- 9) T. Honjo, H. Takesue, H. Kamada, Y. Nishida, O. Tadanaga, M. Asobe, and K. Inoue: Opt. Express **15** (2007) 13957.
- 10) H. Takesue, S.-W. Nam, Q. Zhang, R. H. Hadfield, T. Honjo, K. Tamaki, and Y. Yamamoto: Nature Photonics **1** (2007) 343.
- 11) A. Muller, T. Herzog, B. Huttner, W. Tittel, H. Zbinden, and N. Gisin: Appl. Phys. Lett. **70** (1997) 793.
- 12) Y. Nambu, K. Yoshino, and A. Tomita: J. Mod. Optics (in press).
- 13) K. Yoshino, A. Tanaka, Y. Nambu, A. Tajima, and A. Tomita: Technical Digest of ECOC2007, 2007 (IEEE, Berlin, 2007) paper 9.4.7.
- 14) G. Ribordy, J.-D. Gautier, H. Zbinden, and N. Gisin: Appl. Opt. **37** (1998) 2272.
- 15) たとえばD. S. Bethune, W. P. Risk, and G. W. Pabst: J. Mod. Optics **51** (2004) 1359.
- 16) 高橋 成五, 田島 章雄, 富田 章久: 電子情報通信学会2007総合全国大会 (2007) CS-7-4.
- 17) 高橋 成五, 江口 明大, 浜本 貴一, 田島 章雄, 富田 章久: 第55回応用物理学会学術講演会 (2008) 27pZE-8.
- 18) 前田 和佳子, 田中 聡寛, 田島 章雄, 高橋 成五: 電子情報通信学会 光通信システム研究会 (2005) OCS2005-14.
- 19) A. Tanaka, M. Fujiwara, S. W. Nam, Y. Nambu, S. Takahashi, W. Maeda, K. Yoshino, S. Miki, B. Baek, W. Zhen, A. Tajima, A. Tomita, and M. Sasaki: Technical Digest of OFC, 2008 (OSA, San Diego, 2008) paper OWJ2.
- 20) M. Hayashi: New J. Phys. **9** (2007) 284.
- 21) J. Hasegawa, M. Hayashi, T. Hiroshima, A. Tanaka, and A. Tomita: e-print arXiv: 0705.3081v1.