



光量子回路の実現-量子もつれ合いフィルター

竹内 繁樹 ・ 岡本 亮

光子を用いた量子情報処理は、光子間の量子ゲートを実現する段階から、それらを組み合わせて新たな機能をもつ「光量子回路」実現の段階に入りつつある。本稿では、四つの量子ゲートと経路干渉を巧みに組み合わせて実現された光量子回路「量子もつれフィルター」について紹介する。また、今後の光子を用いた量子情報技術の課題や展望についても述べる。

Keywords : quantum circuit, quantum entanglement, quantum computer, photon, linear optics

1. ま え が き

アインシュタインやシュレーディンガーといった量子論の創始者たちも、彼らの創造した概念である「量子」のもつ性質、その不思議さに注目していた。シュレーディンガーが名づけ、アインシュタインとボーアがその本質を巡り議論を戦わせたのが、本稿でカギとなる概念である「量子もつれ (quantum entanglement)」である。ほかにも、「不確定性原理」、「量子重ね合わせ」や「観測による射影」など、いわゆる「古典」的には現れない性質をもつ。

量子のもつれそれらさまざまな不思議な性質を直接、情報通信や情報処理に応用しようとするのが、量子情報技術だ。不確定性原理を利用して究極のセキュリティーを提供する量子暗号¹⁾や、量子重ね合わせを利用した並列処理によりある種の問題を超高速で解くことのできる量子コンピューター^{2,3)}が提案され、その実現に向けた努力がなされてきた。さらに最近では、通常の限界を大きく超えた測定感度や測定精度を実現する「量子メトロロジー」など、情報通信・処理を超えた応用へも広がりつつある。

量子情報の担体として、電子や原子スピン、超伝導素子などさまざまな候補が研究されている。それらの中で光子は、外界の影響を受けにくく長距離伝送が可能であること、その状態の準備や制御を現状技術でも、 10^{-4} 以上という高い精度で可能であるなどの特長をもち、通信や計測との相性もよい。本稿では、その光子を用いた量子情報処理に関し、「量子もつれフィルター」の実現⁴⁾(図1)について紹介する。

2. 量子もつれフィルターの実現

2.1 量子もつれフィルターとは

おいしいコーヒーを抽出するのにペーパーフィルターが

欠かせないように、さまざまな状態の中から望みの状態だけを取り出すフィルターは、幅広い分野で不可欠なデバイスである。光学実験においても各種のフィルターが用いられるが、その代表的なものに「偏光フィルター」がある(図2(a))。これは、光の特定の偏光成分のみを透過させる働きをする。偏光フィルターに光子を入射すると、例えば垂直偏光の光子は完全に透過するが、水平偏光の光子は吸収される。また、偏光フィルターに、斜め45度直線偏光の光子を入射すると、2分の1の確率で垂直偏光の光子が出力される。これは、斜め45度直線偏光の光子が、水平偏光状態 $|H\rangle$ と垂直偏光状態 $|V\rangle$ の等分の重ね合わせ状態 $(|H\rangle+|V\rangle)/\sqrt{2}$ にあるためである。この偏光フィルターは、光子を用いた量子情報においても、特定の偏光をもつ光子の生成や、偏光状態の純化、さらには光子の偏光状態の測定など、さまざまな用途に用いられている。

量子もつれフィルターは、この偏光フィルターの機能を2光子に拡張したもので、二つの光子(光子1および光子2)が「両方とも垂直偏光 ($|V\rangle_1|V\rangle_2$)」、「両方とも水平偏光

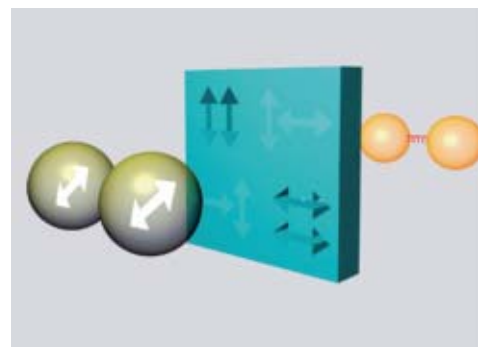


図1 量子もつれフィルターのイメージ。二つの斜め45度偏光の光子が入力されると、出力は2光子が偏光に関する量子もつれ状態となる。

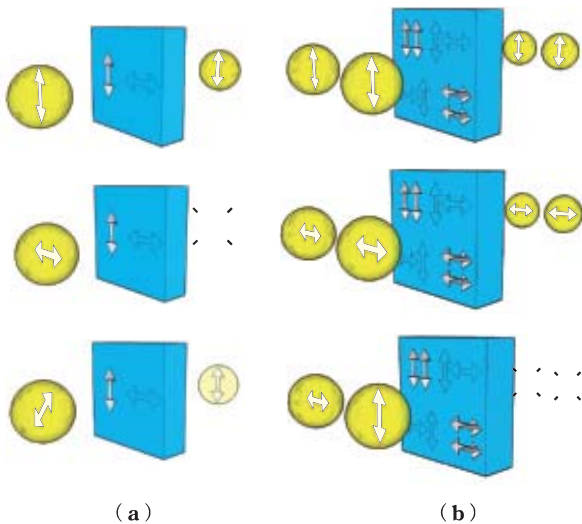


図2 (a)偏光フィルターの機能. この場合, 垂直偏光成分のみを透過する. (b)量子もつれフィルターの機能. 二つの光子の偏光状態のうち, 両方の光子が共に垂直偏光, もしくは水平偏光の場合のみ透過する.

($|H\rangle_1|H\rangle_2$)という特定の偏光相関をもつ場合について, その状態間の重ね合わせを維持しながら抜き出すことができる(図2(b)). もしも一方の光子が垂直偏光, 他方の光子が水平偏光の場合には, ブロックされる.

この量子もつれフィルターに, 斜め45度偏光の二つの光子を入射したのが図1である. このとき, 二つの光子の偏光状態は,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_1+|V\rangle_1)\otimes\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_2+|V\rangle_2) \\ & =\frac{1}{2}(|H\rangle_1|H\rangle_2+|H\rangle_1|V\rangle_2 \\ & \quad +|V\rangle_1|H\rangle_2+|V\rangle_1|V\rangle_2) \end{aligned} \quad (1)$$

という四つの状態の重ね合わせ状態となっている. ここで $|H\rangle_1|H\rangle_2$ は, 二つの光子が水平偏光をもつ状態である. この状態を量子もつれフィルターに入力すると, 状態 $|H\rangle_1|H\rangle_2$ と $|V\rangle_1|V\rangle_2$ だけが, その状態間のコヒーレンスを保ったまま抜き出されるため,

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_1|H\rangle_2+|V\rangle_1|V\rangle_2) \quad (2)$$

という状態が出力される. この状態は, 光子1と光子2がそれぞれ特定の偏光をもつ状態としては記述できない, いわゆる量子もつれ状態になっている.

このように, 量子もつれフィルターは, 量子もつれの生成や純化, さらには検出器と組み合わせることで特定のもつれ合い状態の検出など, 量子もつれを利用するさまざまな量子情報処理に幅広く応用可能である.

2.2 光量子回路のしくみ

2002年, この量子もつれフィルターを実現する光学回路が提案された(図3(a))⁵⁾. 図でBSは反

射率・透過率ともに50%の半透鏡(Beam Splitter: BS)を, PBS(Polarizing Beam Splitter)は水平偏光を透過し, 垂直偏光を反射する偏光ビームスピリッターを表す. 二つの任意の偏光をもった光子がI1, I2から入力される. それらに加え, 水平偏光をもつ補助光子がA1, A2から適当なタイミングで入力される. そして, 検出器D1, D2において光子が一つずつ検出され, D3, D4で光子が検出されなかった場合(これを成功事象と呼ぶ), O1, O2から, 特定の偏光のみがフィルターされた状態が出力される.

残念ながらこの回路は, 毎回は動作しない. 例えば, 状態 $|H\rangle_1|H\rangle_2$ (あるいは $|V\rangle_1|V\rangle_2$) を入力した場合, 成功信号が得られるのは16回に1回だ. ただし重要なのは, 成功事象では, 理論的には確実に(確率1で), フィルターされた後の状態の光子対が出力される点だ.

この回路の中では, 四つの半透鏡(BS1~BS4)における2光子量子干渉^{6,7)}が重要な役割を果たしている. 半透鏡に同じ偏光をもった二つの光子が入力されると, 「両方の光子が透過する」過程と「両方の光子が反射する」過程が打ち消しあい, 結果として二つの光子は一方からしか出力されない(図3(a)挿入図). このため, もしBS3の左側から光子が一つだけ入射した場合, A2から入力される補助光子との2光子干渉の結果, 検出器D2で光子を一つだけ検出する確率は0である.

一方で, BS3の左側から光子が入力されない場合, 検出器D2が光子を一つ検出する確率は1/2である. 紙面の都合で詳細を省くが, BS3の左側から二つの光子(2光子状態)が入力された場合, 検出器D2が光子を一つ検出する確率は1/8だ⁵⁾.

いま, I1とI2から水平偏光, 垂直偏光の光子一つずつ($|H\rangle_1|V\rangle_2$)を入力した場合を考えよう. その場合, 最初の二つのPBSによって, 光子1($|H\rangle_1$)だけがBS1に入力される. この光子はBS2あるいはBS3のいずれか一方に向かう. その向かった先では, 先ほど見た補助光子との2光

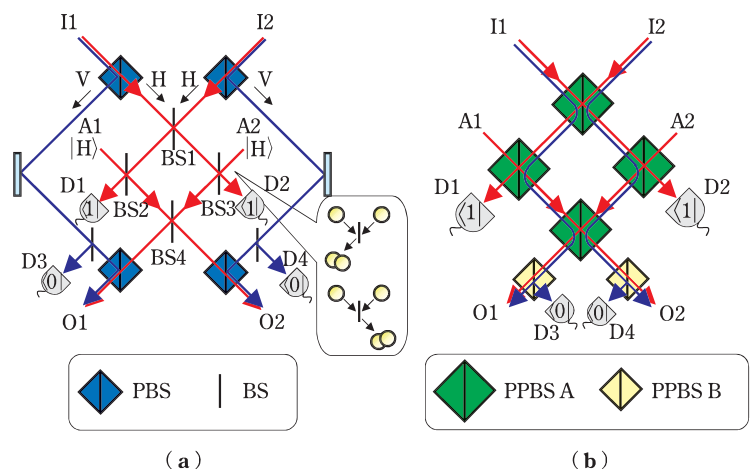


図3 (a)理論的に提案された, 量子もつれフィルターの光学回路⁵⁾. (b)部分偏光ビームスピリッターを用いることで簡略化された光学回路.

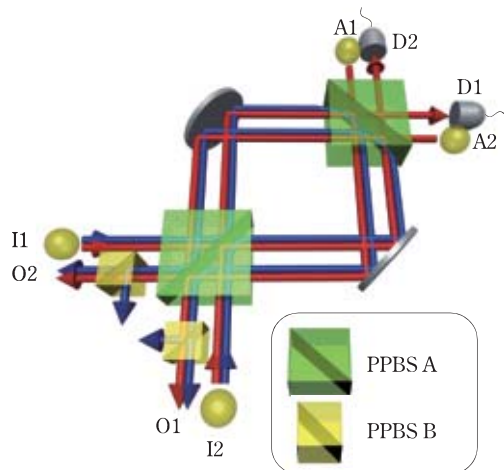


図4 量子もつれフィルター実験装置。図3(b)の回路が、変型サニャック干渉計として実装されており、パッシブな制御のみでの非常に安定な経路干渉が実現した。詳細は本文を参照。

子干渉の結果、検出器が光子を一つ検出する確率は0である。つまり、状態 $|H\rangle_1|V\rangle_2$ を入力した場合、検出器D1, D2のいずれかは決して1光子検出信号を出力せず、結果として「成功事象」は発生しない。

一方、両方水平偏光の光子 $|H\rangle_1|H\rangle_2$ が入力された場合には、今度はBS1において、その二つの光子間で、2光子干渉が生じる。この結果、2光子ともがBS2またはBS3のいずれか一方に向かう。さきほど見たように、BS2またはBS3に光子が入力されない場合は1/2の確率で、2光子が入力された場合には1/8の確率で光子が一つ検出されるから、結果として1/16の確率で「成功事象」が発生する。同様に、両方垂直偏光の光子 $|V\rangle_1|V\rangle_2$ の場合、検出器D1, D2が同時に光子を検出する確率が1/4、検出器D3, D4が同時に光子を検出しない確率が1/4であるため、結果として確率1/16で「成功事象」が発生する。垂直偏光の経路に半透鏡が設置され、検出器D3, D4において垂直偏光光子のロスを検出しているのは、これら二つの確率を一致させるためである。

実際には、(1)式の四つの偏光状態ごとに、以上の過程が重ね合わせ状態として進行する。その結果、成功事象においては、入力状態のうち、状態 $|H\rangle_1|H\rangle_2$ と $|V\rangle_1|V\rangle_2$ の確率振幅や相対位相(量子コヒーレンス)は保たれたまま、状態 $|H\rangle_1|V\rangle_2$ と $|V\rangle_1|H\rangle_2$ は消去された状態が出力される。以上が、量子フィルター回路の動作の仕組みである。

2.3 実現に向けた工夫

しかし、図3(a)の光学回路は、二つの入力光子、二つの補助光子と計四つの光子に対して、四つの2光子量子干渉部を含む非常に複雑な構造をもつ。しかも、四つの経路間の経路長差をナノメートルオーダーで完全に一致させ続けなければならないという困難があった。今回われわれは、その困難に対し、「コンパクトな制御ノットゲートの実現^{8,9)}」ならびに「4光子もつれ光干渉実験^{10,11)}」において開

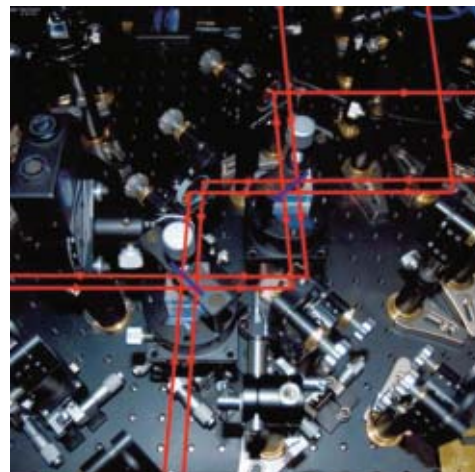


図5 実験装置写真。光子の経路を赤い補助線で、また図4のPPBS Aの鏡部分が青い補助線で示されている。この写真を180度回転させたものが、図4に相当する。

発した、部分偏光ビームスプリッター(Partially Polarizing Beam Splitter: PPBS)、および変型サニャック干渉計を用いて解決した。

PPBSとは、偏光に依存した反射率をもつビームスプリッターである。図3(a)のBS1からBS4を、V偏光を完全に反射し、H偏光に対して50%の反射率をもつPPBS Aに、また図3(a)のV偏光経路に設置されていた二つのBSを、H偏光は透過しV偏光に対して50%の反射率をもつPPBS Bに置き換えることで、結果的に図3(b)の光学回路へと省略化できる。しかし、まだ四つのPPBS Aで構成される、マッハツェンダー型の経路干渉の安定化が課題として残る。

この干渉部分を巧妙におりたたんで実現したのが図4の実験装置である。図3(b)では干渉部で経路ごとで異なる光学部品を経由していたのに対して、図4では二つの経路は同じ光学部品を経由する。このため、振動やドリフトにより光学部品の位置が変化しても、二つの経路長差には影響がほとんど及ばない。

図5は実際の実験系の写真である。この写真を180度回転させたものが、図4に対応している。実験では、パラメトリック下方変換を用いて、波長780 nmの光子対を2組発生させ、それらを単一モードファイバーに導入、それを対物レンズによりコリメートし、I1, I2, A1, A2から入射した。その対物レンズ位置を微動ステージにより調整することで、量子もつれフィルター実験系への光子の入射タイミングを制御した。また今回の実験では、出力O1, O2において、波長板と偏光ビームスプリッターおよび光子検出器(Single Photon Counting Module: SPCM)を用い、出力状態の偏光解析を行った。光子検出器D1, D2ならびに、O1, O2に設置された前述の光子検出器のすべてが光子を検出した場合を積算した。

2.4 実験結果

図6は、HもしくはV偏光の入力光子に対して、その出

力状態を H/V 偏光基底で測定した場合の入出力特性につき、(a)は理想的な量子もつれフィルター、(b)が実験結果⁴⁾である。以下、例えば HV は状態 $|H\rangle_1|V\rangle_2$ を表す。量子もつれフィルターは、HH および VV の場合のみを透過し、HV あるいは VH は透過させない。このため、理想的には入力 HH (VV) のときには出力が HH (VV) である確率は 1 であり、そのほかで出力される確率は 0 となる。一方、入力が、HV または VH のときには、すべての出力状態において確率は 0 である。実験結果は、HH, VV の 4 光子同時計数率に対して、HV および VH の同時計数率が大きく抑制されており、フィルターが想定された動作をしていることがわかる。この H/V 基底入力-H/V 基底出力の場合の忠実度は、0.80 であった。

量子もつれフィルターは、H 偏光や V 偏光の入力に対してのみでなく、その重ね合わせ状態に対しても動作しなければならない。そのため、斜め +45 度 (P) 偏光/-45 度 (M) 偏光の入力に対して、右回 (R)/左回 (L) 偏光基底や PM 偏光基底での出力状態を求めた。その結果、P/M 偏光入力に対して R/L 偏光基底で測定した場合の忠実度は 0.68、また P/M 偏光入力に対して P/M 偏光基底で測定した場合の忠実度は 0.60 であった。これらの結果から、プロセス全体の忠実度 F_p は 0.54、もつれ合い能力 (Entanglement Capability) $C=0.08$ が 0 を超え、このもつれ合いフィルターの動作が真に量子的であることが確認された。最新の実験では、 F_p は 0.57、 $C=0.14$ が得られている。

しかし、図 6(b)にも明らかなように、フィルターは本来完全にブロックすべき HV (VH) 入力状態を一部透過してしまうなどのエラーが生じている。解析によって、エラー原因の最大のもの、2 光子量子干渉の不完全さであることがわかっている。

3. 今後の展望

この量子もつれフィルターの実現により、光量子情報処理が、量子ゲート素子を実現する段階から、それらの素子を組み合わせて機能をもった回路の実現段階に入ったと考えられる。今後は、量子情報通信や量子メトロロジーの応用をにらんださまざまな光量子回路の実現、さらに将来的には光量子コンピューターの実現も期待される。

そのために待たれてやまないのが、①良質な光子源、②高い量子収率をもつ検出器、③可変光遅延器 (量子メモリ)、および④高い効率の量子ゲートである。

まず光子源に関しては、量子干渉性が高いことが求められる。その指標となる HOM (Hong-Ou-Mandel) 干渉の明瞭度は、今回の実験においては、同一光子対の光子間で 96%、異なる光子対間でも 85% と、現状得られる最良に近い値である。しかし、これらの値の 100% からの差が、一

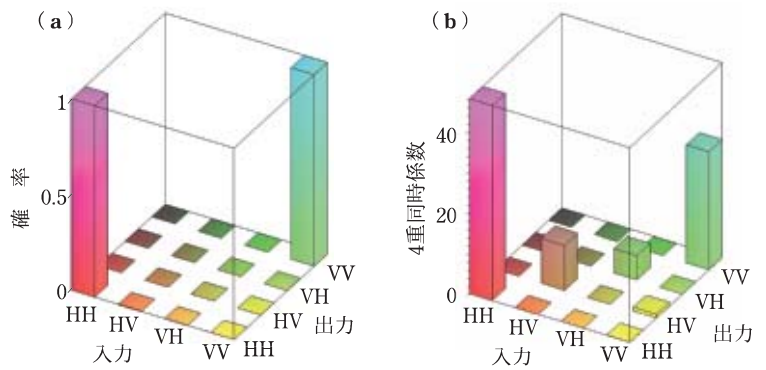


図 6 (a)理想的な量子もつれフィルターの、入力状態に対する出力状態の発生確率。H は水平偏光、V は垂直偏光を表し、HV は光子 1 が水平偏光、光子 2 が垂直偏光であることを示す。(b)実験結果。縦軸は、図 4 における検出器 D1, D2 ならびに出力部 O1, O2 に設置された検出器の 4 重同時検出数 (800 秒当たり)。HH, VV の 4 光子同時計数率に対して、HV および VH の同時計数率が大きく抑制されている。

つ一つの量子ゲートにおけるエラーとして積み重なってしまう。量子干渉性を高めるには、光子源の種類にかかわらず、発生時刻のジッターの低減が非常に重要である¹²⁾。光子源についても一つ重要なのは、パルス内に高い確率で光子が一つだけ存在することだ。パルスに光子が存在しないと効率が減少し、また二つ以上の光子が存在すれば一般にエラーを引き起こす。パラメトリック下方変換を利用した光源では、この点に関して理想的な解決方法が存在せず、この二つを天秤^{てんびん}にかけて実験条件を探さざるを得ない。高い量子干渉性を持ち、かつパルス内に高確率で光子を一つずつ射出できる光子源の実現は、光子を用いた量子情報技術に飛躍的な発展をもたらすだろう。

次に、検出器の量子収率 η も重要である。実験の成功確率は、 N 個の光子検出器が必要となる光量子回路においては、 η^N に比例するためである。この実験で用いた、アバランシェフォトダイオードをガイガーモードで用いた検出器である SPCM の量子効率 η は 0.7 程度にとどまる。可視光に対して量子収率が 0.9 程度をもち、かつ光子数を分別可能な検出器も報告され^{13,14)} ている。最近、高い効率をもった超伝導光子検出器素子も報告されており¹⁵⁾、進展が期待される。

また、可変光遅延器 (量子メモリ) とは、光子の量子状態を変化させずに、任意の時間遅延させられるデバイスである。現在、電磁誘起透明化現象を利用した方法などの研究が進められている。

最後に、高い効率の量子ゲートである。今回の実験は、半透鏡における 2 光子量子干渉を利用しているが、その場合効率 η は最大でも 50% にとどまることが知られている。クラスター量子計算^{16,17)} などのように、事前に巨大な量子もつれ状態を作成する場合には、成功するまで繰り返せばよいから、たとえ効率 η が 50% でも理論上は問題ない¹⁸⁾。しかしそのためには多数の光子の量子状態を長時間保存できるメモリが必要であり、実際には大きな問題となっている。

この効率の限界は、半透鏡における2光子量子干渉とは異なる物理過程を利用することで突破できる可能性がある。われわれは、単一2準位原子における吸収飽和を利用することで、少なくとも83%の効率が達成可能であることを理論的に示している¹⁹⁾。現在、テーパファイバーと微小球共振器を結合させた高透過率高Q値固体光共振器と単一発光体を結合させた系を用いて、その実現に取り組んでいる²⁰⁾。ほかにも、それほど大きくない光非線形性によっても、プローブ光への測定のバックアクションを利用することで、量子ゲートとして利用する方法などが提案されている²¹⁾。

また、今回紹介した実験装置は、個々の光学部品を組み合わせており、そのサイズは50 cm角ほどもあり、この小型化も課題である。最近同様の回路を、光導波路を用いることで、数cm角と大幅に小型化する研究も行われている^{22,23)}。単一光子源や光子検出器、量子ゲートなどを一つのチップ上に集積した光量子集積回路の実現が、将来的には目標だろう。

今後、これらの課題が着実に解決され、光子の能力をフルに引き出された情報処理や計測技術の実現へとつながることを強く期待している。

紹介した量子フィルターの実現については英国 Bristol 大学 Jeremy O'Brien 教授、広島大学 Holger Hofmann 准教授、北海道大学笹木敬司教授、永田智久氏、ならびに著者らの共同研究である。これらは、JST-CREST、総務省 SCOPE、文部科学省科学研究費、科学技術振興調整費および大和日英基金による支援を受けた。この場をお借りして感謝申し上げます。また、研究室スタッフ・学生各位の協力を心より感謝いたします。

文 献

- 1) 富田章久：電子情報通信学会論文誌 A, J90-A No. 5, 358 (2007).
- 2) 竹内繁樹, 井須俊郎：応用物理 **68**, 1038 (1999).
- 3) 竹内繁樹：量子コンピュータ (講談社ブルーバックス, 2005).
- 4) R. Okamoto, J. L. O'Brien, H. F. Hofmann, T. Nagata, K. Sasaki, and S. Takeuchi : Science **323**, 483 (2009).
- 5) H. F. Hofmann and S. Takeuchi : Phys. Rev. Lett. **88**, 147902 (2002).
- 6) C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel : Phys. Rev. Lett. **59**, 2044 (1987).
- 7) 竹内繁樹：応用物理 **71**, 1367 (2002).

- 8) R. Okamoto, H. F. Hofmann, S. Takeuchi, and K. Sasaki : Phys. Rev. Lett. **95**, 210506 (2005).
- 9) 岡本 亮：応用物理 **75**, 1340 (2006).
- 10) T. Nagata, R. Okamoto, J. O'Brien, K. Sasaki and S. Takeuchi : Science **316**, 726 (2007).
- 11) 竹内繁樹：応用物理 **77**, 129 (2008).
- 12) M. Tanida, S. Takeuchi *et al.* : in preparation.
- 13) S. Takeuchi, J. Kim, Y. Yamamoto, and H. H. Hogue : Appl. Phys. Lett. **74**, 1063 (1999).
- 14) J. Kim, S. Takeuchi, Y. Yamamoto, and H. H. Hogue : Appl. Phys. Lett. **74**, 902 (1999).
- 15) D. Fukuda, G. Fujii, T. Numata, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, H. Fujino, H. Ishii, T. Itatani, S. Inoue and T. Zama : Metrologia **46**, 288 (2009).
- 16) R. Raussendorf and H. J. Briegel : Phys. Rev. Lett. **86**, 5188 (2001).
- 17) 竹内繁樹：レーザー研究 **36**, 482 (2008).
- 18) M. Varnava, D. E. Browne, and T. Rudolph : Phys. Rev. Lett. **97**, 120501 (2006).
- 19) K. Kojima, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki : Phys. Rev. A **70**, 013810 (2004).
- 20) H. Konishi, H. Fujiwara, S. Takeuchi and K. Sasaki : Appl. Phys. Lett. **89**, 121107 (2006).
- 21) P. Kok, W. J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J. P. Dowling, G. J. Milburn : Rev. Mod. Phys. **79**, 135 (2007).
- 22) A. Politi, M. J. Cryan, J. G. Rarity, S. Yu, and J. L. O'Brien : Science **320**, 646 (2008).
- 23) 竹内繁樹：パリティ **24**, 11 (2009).

(2009年10月2日 受理)



たけうち しげき
竹内 繁樹

1993年京都大学大学院理学研究科物理学第一専攻修士課程修了。同年、三菱電機中央研究所入社。99年北海道大学電子科学研究所講師、00年同助教授、07年教授。現在に至る。95年から01年まで、科学技術振興事業団さきかけ研究「場と反応」、01年から同「光と制御」に所属。光子を用いた量子計算、もつれ合い光子対の研究などに従事。現在研究所間連携の一環として、大阪大学産業科学研究所に常駐。博士(理学)。



おかもと りょう
岡本 亮

2006年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年、科学技術振興機構研究員。07年より北海道大学電子科学研究所助教。研究分野は量子光学、量子計算、量子メトロロジーなど。現在研究所間連携の一環として、大阪大学産業科学研究所に常駐。