

4 量子ノード技術

4-1 光量子制御技術

武岡正裕 藤原幹生 和久井健太郎 金 鋭博 達本吉朗 泉 秀路 佐々木雅英

将来の情報ネットワークでは、爆発的に増加する通信量への対応や、行きかう情報を極めて高いセキュリティで保護するなど、様々な要求が生じると考えられている。ネットワークの持つ物理的なポテンシャルを最大限に活かしてこれらを実現するためには、ノードにおいて光信号を量子レベルで適切に制御する必要がある。ここでは、このような量子ノード技術の実現に向けて、光の量子状態を自在に制御し、従来の技術(古典光学)では実現不可能な量子プロトコルを実現する光量子制御技術の研究開発を紹介する。

1 まえがき

いかに正確に多くの情報を効率よく伝送するかという問題は、スマートフォンやインターネットの普及とともに、我々にとってもますます身近で切迫した課題となっている。実際、最も大量の情報が流れる基幹回線では、早晚通信容量の技術的限界を迎えることが危惧されている。また、人類の通信領域は地上だけでなく、地球を覆う人工衛星網にも拡大しており、将来的には月や火星と地球の間でも高速の通信が必要になると思われる。このような超長距離空間通信では、光信号といえども大きく拡散し、受信機に到達する光強度は極めて弱くなり、光の量子雑音が通信速度を大きく制限する。これらの問題を克服するためには、光信号の持つ情報を極限まで引き出す信号受信を行う必要がある。量子情報理論の最新の成果によれば、物理的に許される究極の伝送容量を実現するためには、受信側で信号パルス間に量子計算を施しながら復号を行う必要があることがわかっている。これは復号回路の中に「シュレディンガーの猫」と称される巨視的な量子重ね合わせ状態や、受信した信号パルス間の量子的な相関である量子もつれ状態を自在に生成し、制御しながら測定を行うことを意味する。このような信号受信機は、量子最適受信機、量子復号などと呼ばれる。

一方で、量子技術は量子暗号という、究極的に安全な暗号技術を提供できることは本特集号でも紹介されているが、現在実用化が進んでいる微弱レーザー光(コヒーレント光)を用いた方式では、距離や鍵生成速度に制限があり、都市圏を越える距離でネットワーク化するためには、「信頼できるノード(trusted node)」を多数用意し、秘密鍵をリレーする必要がある、世界各地で実証が進む量子暗号ネットワークは、いずれもこ

の方式をとっている。しかしこの方式は、離れた2地点の間にあるノードが1つでも攻撃者に乗っ取られると、秘密鍵の情報がすべて漏れてしまうという大きな問題点がある。この限界を克服できると期待されているのが、量子中継と呼ばれる技術である。量子中継では、微弱レーザー光の代わりに量子もつれと呼ばれる特殊な相関を持った光子対を伝送する。中継点では、この量子もつれ光子対を測定で壊すことなく量子的に処理することにより、更に遠くへと量子もつれをリレー中継することが可能となり、従来の量子暗号では不可能な長距離化が実現する。

上記の量子最適受信機や量子中継では、いずれも光の量子状態を自在に、かつ極めて正確に制御する必要があり、現時点では実現していない量子技術が必要となる。我々はそのような光量子制御の実現に向け、基盤技術となる量子もつれ光源の開発や、量子技術で初めて実現可能な通信プロトコルの原理実証実験等を進めている。

2 高速・高純度量子もつれ光源の開発

量子もつれは、従来の力学と電磁気学(量子と対比して古典物理と呼ばれる)だけでは説明不可能な、量子力学の世界だけに現れる相関のことである。例えば、我々が実験室で生成しているのは、偏光が量子もつれ状態にある2つの光子(光子対)である。量子もつれの性質を見るため、まず量子力学を用いない古典的な相関について考える。例えば、縦偏光または横偏光をランダムに選び、選んだ偏光の光子を2つずつ発生する光源を考える。2つの光子の偏光は常に同じであり、それらの間には相関がある。このとき、それぞれの光子に対して縦横偏光を識別するフィルターで測定を行

4 量子ノード技術

えば相関が検出されるが、違う偏光基底、例えば右回り・左回りの円偏光を測定しても、それぞれの光子の回転方向はランダムとなり、相関は見えない。これは古典的な相関である。一方、量子もつれが形成された光子対では、それぞれの光子の縦横偏光を測定しても相関が見えるし、同じ光子対に対して円偏光の測定を行ったとしても、やはり強い相関を検出することができる。しかも、測定の方法は、状態が準備された後に選択したとしても結果は変わらない。このように、異なる測定方法でも相関が形成されていることが量子もつれの最大の特徴である。このような量子もつれは、様々な量子情報技術において基本リソースとなることが知られている。

量子もつれ光源の研究開発は、これまで近赤外波長帯(800 nm 近辺)が一般的であったが、我々は将来の量子情報通信への応用を念頭に、通信波長帯における量子もつれ光源の開発に取り組み、レーザー光の波長変換等に用いられる 2 次の非線形結晶を用いた方法によって、これまで高純度の単一光子源や量子もつれ光源の開発に成功してきた [1]-[3]。

量子もつれ光源を様々な量子情報処理プロトコルに応用するためには、量子もつれ状態が高純度であることに加え、高速に生成・検出できることが重要であるが、その実現は容易ではない。このため、高速化に向けた研究は世界でも活発に進められている。これまで、主に駆動用レーザーのパルス強度増強により、量子もつれ光子対の生成速度向上が試みられてきた。しかし、この方法では雑音も同時に増えるため、量子もつれ相関の劣化を引き起こす。別の方法として、駆動用レーザーの繰り返し周波数を上げることでトータルの強度を上げる方法がある。この場合、パルス当たりの強度は一定のため量子もつれを劣化させることなく生成速度を向上できるが、過去の研究では繰り返し周波数は 76 MHz 付近にとどまっていた。これに対して、

我々は NICT で独自に開発された周波数コム光源による繰り返し周波数 2.5 GHz の新しい駆動用レーザーを、高純度量子もつれ光源に組み合わせることで、雑音を増やすことなく高速化することに成功した [4]。駆動用パルスレーザーには波長・パルス幅可変、かつ高速・安定動作が要求される。NICT の周波数コム光源は、これらの長をすべて兼ね備えている。図 1 に、実験装置の概略図と実験結果を示す。実験結果は、生成した量子もつれ光子対による干渉の明瞭度を、駆動用レーザーの強度を変化させて測定したものである。干渉の明瞭度が高いほど、量子もつれとしての純度が高い。従来の駆動用レーザー(青)に比べ、今回の 2.5 GHz の周波数コム光源を駆動に用いた場合(赤)、強度を上昇させても明瞭度の低下が抑制されていることが明確にわかる。この結果、周波数コム光源を基にシステム全体を新規開発することで、システム動作速度について従来の 30 倍以上の高速化を実現した。

3 量子もつれ光源を用いた量子通信プロトコル・新現象

量子もつれ光源を用いた通信プロトコルの中でも、量子暗号や量子計算のネットワーク化で基本となるのが、量子もつれ交換と呼ばれるプロトコルである。量子もつれ交換の方式を図 2 に示す。まず、地点 A と B、地点 B と C で、それぞれが別々の量子もつれ光子のペアを共有する。この時点で A-B 間と B-C 間で共有される光子のペアには何も相関は無い。次に、地点 B で Bell 測定と呼ばれる、2 光子を量子もつれ基底へと射影する特殊な測定を行い、光子が来たかどうかを判別する。これは目隠しで光子をつかむような測定だが、A と C のどちらから光子が来たかあえてわからないようにすることで、A と C の間に新たな量子もつれを形成することができる。実際の実験系は図 3 に示す

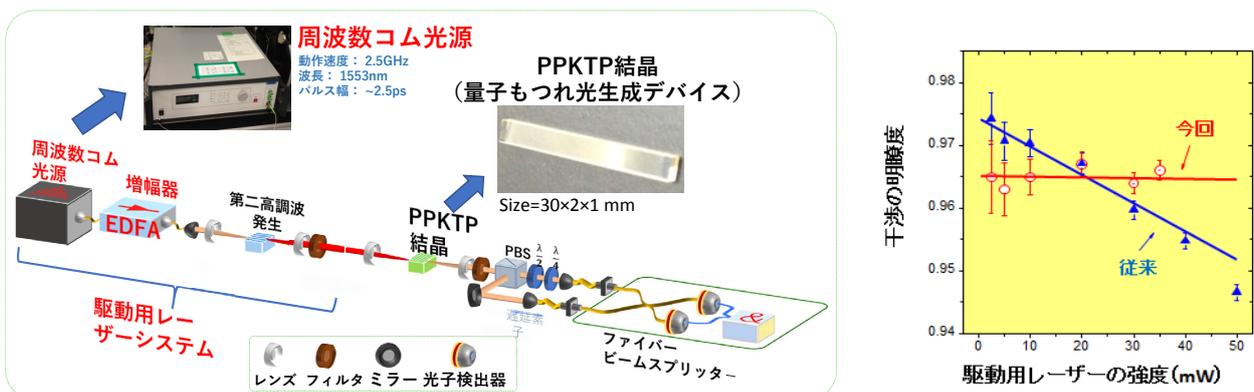


図 1 高速・高純度量子もつれ光源。左：実験装置、右：測定結果。

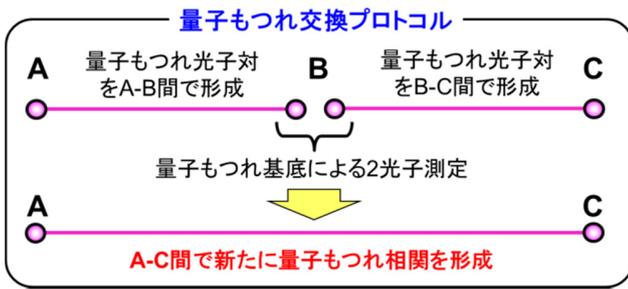


図2 量子もつれ交換の手順

ようなもので、前節で紹介した NICT 開発の量子もつれ光源に加え、特定の波長で高反射率を持つ鏡などの光学素子、また NICT で開発された超伝導単一光子検出器などを用いている。これら独自のデバイスを用いることで、高純度かつ従来よりも大幅に高速な量子もつれ交換を実現し、先行研究と比較して1,000倍以上高い成功回数の量子もつれ交換を実証することに成功した [5]。図3右下の実験結果では、地点 A と C に到達した2つの光子の変更の相関測定を行っており、量子もつれが存在する最低限の条件とされる33%を大きく超える明瞭度が観測されている。この成果により、これまでは速度が遅すぎて不可能だった光ファイバーネットワーク上での量子もつれ交換実験の道が拓けることとなった。

また、我々の高速・高純度な量子もつれ光源・検出技術は、量子光学における新しい現象の観測をも可能にしている。例えば、量子光学でよく知られた Holland-Burnett 干渉と呼ばれる光子間の量子干渉現象がある。従来、これは2つの光子の間の現象しか観測されていなかったが、光源・検出器の高速化により、

多数の光子が関与する現象まで観測が可能となり、6光子が関与する干渉まで測定した結果、観測された光子の数に応じて、様々な異なる振る舞いの量子干渉が生じていることを初めて明らかにした [6]。さらに我々は、米国国立標準技術研究所 (NIST) と協力して、干渉後の光子を周波数分解して測定する技術を開発し、光子の最も基本的な量子干渉現象として知られる Hong-Ou-Mandel (HOM) 干渉の周波数分解測定にも成功した [7]。その結果、通常は HOM 干渉縞が消失すると考えられていたパラメータ領域においても、周波数分解された光子の間では強い量子干渉が存在することを初めて明らかにした。これらは情報通信を行っているわけではないのだが、量子光学という基礎学問を発展させる科学上重要な成果と位置づけている。さらに、この周波数分解技術と新しい量子干渉の知見を応用して、光子対の量子もつれが10以上の異なる周波数に分布し、10次元以上の自由度を持つ高次元量子もつれ光子対の生成にも世界で初めて成功した [8]。また、これらの様々な実験結果の妥当性を確認するため、量子もつれ光実験を、大規模な数値計算をせずに精密にモデル化するための新しい理論のフレームワークも構築している [9][10]。

これらの研究は、まだ基礎の段階であり、今のところ情報通信の高性能化に直結するものではないが、こうした物理学上の新しい知見を組み合わせることで、将来的に量子ノードの基盤技術が確立されていくものと期待される。

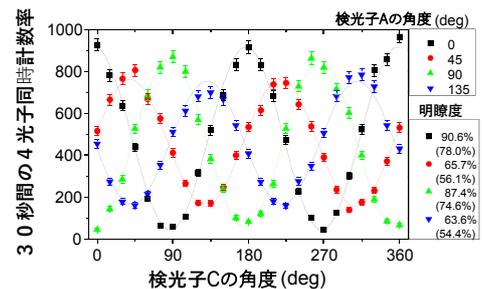
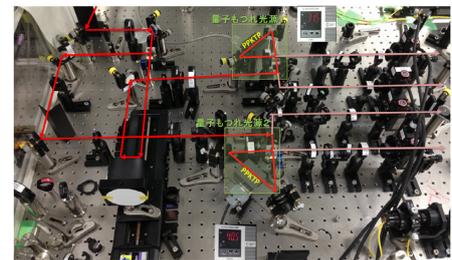
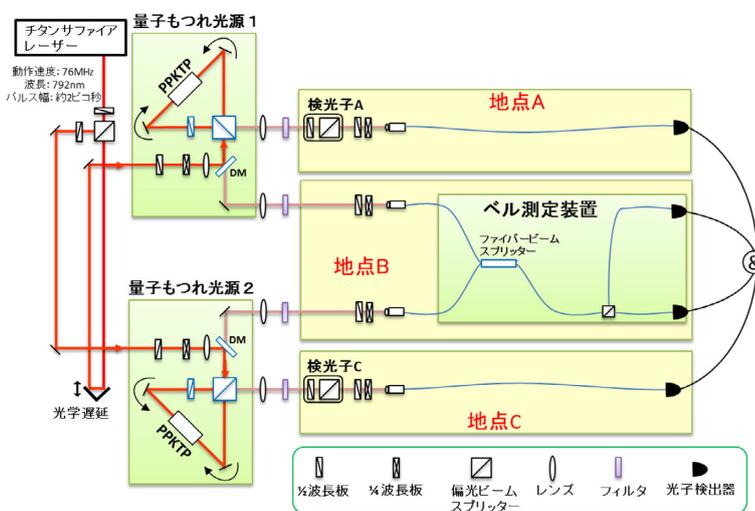


図3 量子もつれ交換実験。左：実験装置概略、右上：装置写真、右下：実験結果。

4 量子ノード技術

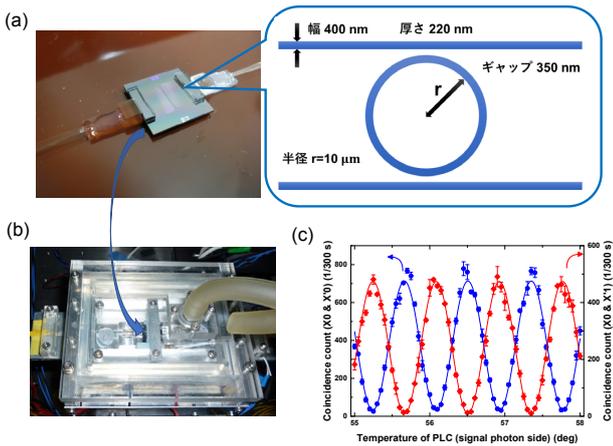


図4 集積化量子もつれ光源の実験。シリコンリング共振器(図の(a))は、温度制御された環境で動作(図の(b))。(c)生成された量子もつれ光子の明瞭度。

4 量子もつれ光源の集積化

量子もつれ光源を実用的なデバイスとしていくためには、できるだけ汎用的な材料により、デバイスを集積化していくことが欠かせない。そこで我々は、シリコンフォトニクスを活用した通信波長帯量子もつれ光源の集積化にも取り組んでいる。基板上に半径約10ミクロンの微小なシリコンリング共振器を2本のシリコン導波路で挟んだ集積回路を作成し、導波路から注入された励起光によって、リング共振器内で非線形光学過程である四光波混合を起こすことにより、量子もつれ光子対を生成する(図4(a)、(b))。波長1551.63 nmのレーザーを励起光としたところ、いずれも通信波長帯である1539.01 nm、1564.43 nmの

2つの異なる波長から相関のある光子の対が生成されていることが観測された[11]。出射された光子対のそれぞれをプレーナ光波回路(PLC)の非対称干渉計に通すことで、光子が時間軸上の位置情報に関する量子もつれ状態(time-bin entanglement)を形成することができる。

生成された量子もつれは、90%以上の高い量子干渉性を示し、質の高い量子もつれであることが実証された(図4(c))。さらに、デバイスの温度や取り出し周波数に関するフィルター等を適切に制御することにより、4つの波長から同時に2つの光子対を生成する「波長多重量子もつれ光子対生成」にも成功している[12]。また、この実験では、片方の導波路の双方向の入力から励起を行い、もう片方の導波路の両端からそれぞれ光子対を出力するダブルポンプ方式にも成功した(図5)。興味深い点は、普通に考えれば両端から出力される光子対の生成レートの合計は、片側励起-片側出力の場合のレートの2倍になると思われるが、実際には合計のレートは片側の場合の2倍よりも更に増強されていることが実験的に明らかになったことである(図5右。上下のグラフは、片側励起-片側出力で生成された量子もつれ光子対の量子干渉と、双方向励起で、2つの出力のうち片側から出てくる量子もつれ光子対の量子干渉の観測結果。比べると、下のグラフの方が、光子検出レートが増大していることがわかる)。これは、回路内の導波路-共振器の結合点などにおける励起光の反射と干渉により、実効的な励起レートが2倍以上に増強されているためと考えられるが、詳細な解析は今後の研究が待たれる。いずれにせよ、今後の量子集積デバイス開発において非常に有用な現

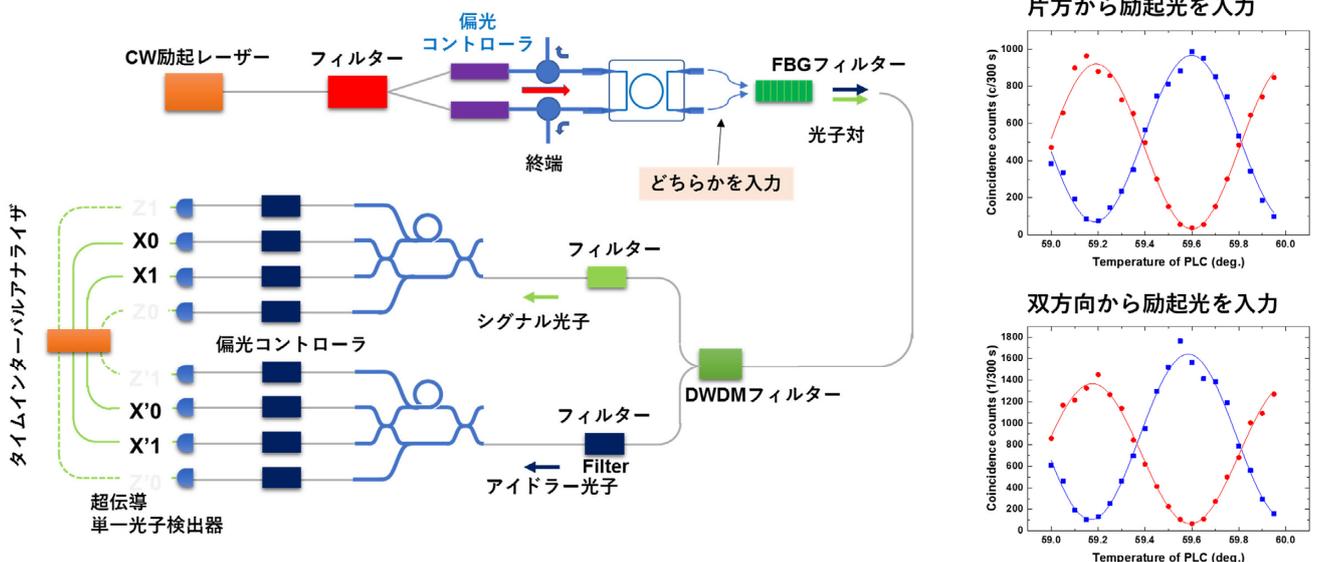


図5 シリコンリング共振器双方向入力実験。左：装置概念図、右：実験結果。

象であると考えられる。

5 おわりに

光量子制御技術の研究開発について、量子もつれ光源に関する開発を中心に紹介した。高速・高純度、さらに集積化された量子もつれ光源が実現すれば、次世代の量子暗号方式の重要光源となることが期待される。また、より技術的に高度になるが、物質の量子メモリーと光の間で自在に量子情報をやりとりすることができるようになれば、量子中継技術の実現も見えてくる。

一方、NICT では、冒頭で簡単に紹介した光子レベルの微弱なコヒーレント光信号から超高感度で情報を取り出す量子受信技術の研究開発も進めている [13]-[19]。光子レベルの微弱光では、信号の変調に比べて量子雑音の影響が大きく、従来の光通信で用いられる受信技術で信号識別が困難になるが、光子検出技術や信号の量子性を損なわない特殊な位相・振幅変調などにより、信号識別の限界まで感度を上げる技術である。このような量子受信機に、更に量子もつれの制御技術を加えることで、将来的には信号の誤りを量子レベルで訂正する量子復号技術が可能となり、物理学的に許される究極の通信容量限界に迫る光通信が可能となる。

【参考文献】

- 1 R. Jin, R. Shimizu, K. Wakui, H. Benichi, and M. Sasaki, "Widely tunable single photon source with high purity at telecom wavelength," Opt. Express 21, 10659, 2013.
- 2 R. Jin, K. Wakui, R. Shimizu, H. Benichi, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, Z. Wang, M. Fujiwara, and M. Sasaki, "Nonclassical interference between independent intrinsically pure single photons at telecommunication wavelength," Phys. Rev. A 87, 063801, 2013.
- 3 R. Jin, R. Shimizu, K. Wakui, M. Fujiwara, T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, Z. Wang, and M. Sasaki, "Pulsed Sagnac polarization-entangled photon source with a PPKTP crystal at telecom wavelength," Opt. Express 22, 11498, 2014.
- 4 R. Jin, R. Shimizu, I. Morohashi, K. Wakui, M. Takeoka, S. Izumi, T. Sakamoto, M. Fujiwara, T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, Z. Wang, and M. Sasaki, "Efficient generation of twin photons at telecom wavelengths with 2.5 GHz repetition-rate-tunable comb laser," Sci. Rep. 4:7468, 2014.
- 5 R. Jin, M. Takeoka, U. Takagi, R. Shimizu, and M. Sasaki, "Highly efficient entanglement swapping and teleportation at telecom wavelength," Sri. Rep. 5 :9333, 2015.
- 6 R. Jin, M. Fujiwara, R. Shimizu, R. J. Collins, G. S. Buller, T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, M. Takeoka, and M. Sasaki, "Detection-dependent six-photon Holland-Burnett state interference," Sci. Rep. 6 :36914, 2016.
- 7 R. Jin, T. Gerrits, M. Fujiwara, R. Wakabayashi, T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, R. Shimizu, M. Takeoka, and M. Sasaki, "Spectrally resolved Hong-Ou-Mandel interference between independent photon sources," Opt. Express 22, 28836, 2015.
- 8 R. Jin, R. Shimizu, M. Fujiwara, M. Takeoka, R. Wakabayashi, T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, T. Gerrits, and M. Sasaki, "Simple method of generating and distributing frequency-entangled qudits," Quantum Sci. Technol. 1, 015004, 2016.
- 9 M. Takeoka, R. Jin, and M. Sasaki, "Full analysis of multi-photon pair effects in spontaneous parametric down conversion based photonic quantum information processing," New J. Phys. 17, 043030, 2015.
- 10 K. P. Seshadreesan, M. Takeoka, and M. Sasaki, "Progress towards

practical device-independent quantum key distribution with spontaneous parametric down-conversion sources, on-off photodetectors, and entanglement swapping," Phys. Rev. A 93, 042328, 2016.

- 11 R. Wakabayashi, M. Fujiwara, K. Yoshino, Y. Nambu, M. Sasaki, and T. Aoki, "Time-bin entangled photon pair generation from Si micro-ring resonator," Opt. Express 23, 1103, 2015.
- 12 M. Fujiwara, R. Wakabayashi, M. Sasaki, and M. Takeoka, "Wavelength division multiplexed and double-port pumped time-bin entangled photon pair generation using Si ring resonator," Opt. Express 25, 3445, 2017.
- 13 K. Tsujino, D. Fukuda, G. Fujii, S. Inoue, M. Fujiwara, M. Takeoka, and M. Sasaki, "Quantum receiver beyond the standard quantum limit of coherent optical communication," Phys. Rev. Lett. 106, 250503, 2011.
- 14 S. Guha, J. L. Habif, and M. Takeoka, "Approaching Helstrom limits to optical pulse-position demodulation using single photon detection and optical feedback," J. Mod. Opt. 58, 257, 2011.
- 15 C. R. Müller, M. A. Usuga, C. Wittmann, M. Takeoka, C. Marquardt, U. L. Andersen, and G. Leuchs, "Quadrature phase shift keying coherent state discrimination via a hybrid receiver," New J. Phys. 14, 083009, 2012.
- 16 M. Fujiwara, S. Izumi, M. Takeoka, and M. Sasaki, "Performance gain of displacement receiver with optimized prior probability," Phys. Lett. 377, 2723, 2013.
- 17 S. Izumi, M. Takeoka, M. Fujiwara, N. Dalla Pozza, A. Assalini, K. Ema, and M. Sasaki, "Displacement receiver for phase-shift-keyed coherent states," Phys. Rev. A 86, 042328, 2012.
- 18 S. Izumi, M. Takeoka, K. Ema, and M. Sasaki, "Quantum receivers with squeezing and photon-number-resolving detectors for M-ary coherent state discrimination," Phys. Rev. A 87, 042328, 2013.
- 19 S. Izumi, M. Takeoka, K. Wakui, M. Fujiwara, K. Ema, and M. Sasaki, "Optical phase estimation via the coherent state and displaced-photon counting," Phys. Rev. A 94, 033842, 2016.



武岡正裕 (たけおか まさひろ)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 先端開発センター
センター長
博士 (工学)
量子光学、量子情報理論



藤原幹生 (ふじわら みきお)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 先端開発センター
研究マネージャー
博士 (理学)
量子鍵配送、光子検出技術、極低温エレクトロニクス



和久井健太郎 (わくい けんたろう)

経営企画部
企画戦略室
プランニングマネージャー
博士 (工学)
量子光学

4 量子ノード技術



金 鋭博 (じん るいぼ)

武漢工程大学
理学部
教授
博士(工学)
量子光学



遠本吉朗 (つじもと よしあき)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 先端開発センター
研究員
博士(理学)
量子光学

泉 秀路 (いずみ しゅうろ)

デンマーク工科大学
物理学科
博士研究員
博士(理学)
量子光学



佐々木雅英 (ささき まさひで)

未来 ICT 研究所
主管研究員
理学博士
量子通信、量子暗号