

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 通信波長帯量子もつれ光子とその応用システム

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)：

研究代表者

井上 恭 (大阪大学大学院工学研究科 教授)

主たる共同研究者

武居 弘樹 (NTT 物性科学基礎研究所 主任研究員)

吉澤 明男 (産業技術総合研究所 主任研究員)

3. 研究実施概要

本チームは、ファイバー伝送系への展開を念頭に、通信波長帯の量子情報通信技術の確立を目指して研究を推進した。具体的には、ポイント-to-ポイント(P2P)量子鍵配送(QKD)に関する研究、量子もつれ光子発生技術及びそのシステム応用技術、単一光子検出をはじめとする周辺技術、などである。

「量子もつれとその応用システム」の大きな目標のひとつは量子もつれQKDによる暗号鍵配送距離の拡大であるが、その前段階としてP2Pシステムの性能を見極めることが重要と考え、これに関する実験的・理論的研究を行った。その中で特筆すべき成果は200kmファイバーQKD実験である。本チームが培ってきたオリジナルプロトコルである差動位相シフト(DPS)QKDの実験系に低雑音・高速動作特性を有する超伝導単一光子検出器を適用することにより、世界最長距離を達成した。本実験では、それまでの秘密鍵生成速度に関しても、それ以前の記録を大幅に更新した(2桁以上@100km)。またその他にも、実用性を意識した正弦波ゲート動作InGaAs/InP-APD光子検出器を用いた高速QKD実験や中短距離での高速鍵生成を目指した周波数上方変換型単一光子検出器を用いた1Mbit/s鍵生成実験など、P2P-QKD実験に関する最先端の成果を得た。実験の他にも、強い参照光を用いるB92プロトコル及び単一光子DPS-QKDの無条件安全性証明や実際のデバイスに即したBB84プロトコルの無条件安全性証明など、QKDの安全性理論に関する成果を得た。さらには、DPS-QKDプロトコルのシステム性能向上を目的とする4値DPSやデコイDPS、実用性向上を目的とする巨視的DPS、B92の実用性を高めるプロトコル、などの新規または改良QKD方式の提案・システム性能評価や、暗号鍵を2者に分割して供給する量子秘密共有をDPSのアイデアにより実現するプロトコルの提案・実証実験、などを行った。

本チームの主要テーマである通信波長帯量子もつれ光子に関しては、まず発生技術の確立を図った。光ファイバー内の自然四光波混合(SFWM)による発生法、周期反転分極LiNbO₃(PPLN)内のパラメトリック・ダウン・コンバージョンによる発生法、シリコン細線導波路内のSFWMによる発生法など、各種発生方法について、システム実験に適用可能な高品質かつ高安定な量子もつれ光源を開発した。前2者は原理確認レベルであったものをシステム実験可能なまでに性能アップした成果であり、最後の発生法は本チームが世の中に先駆けて行いその有効性を示した成果である。

次に、発生させた量子もつれ光子のファイバー伝送実験を試みた。冷却した光ファイバーから発生させた時間位置もつれ光子の60km伝送、連続ポンプPPLNもつれ光源から発生させた時間位置もつれ光子の100km伝送、ファイバーループPPLN光源からの偏波もつれ光子の82km及び132km伝送、などを行い、長距離にわたってファイバー伝送させても良好に量子もつれ特性が保たれることを示した。これらは、量子もつれ光子のファイバー伝送距離のトップデータとなる成果である。そしてこれらの成果を基に、ファイバー伝送量子もつれQKD実験を行った。まず、PPLNもつれ光源と超伝導光子検出器を用いて、100kmファイバー伝送量

子もつれ QKD 実験に成功した。さらには、シリコン細線導波路もつれ光源と正弦波ゲート InGaAs/InP-APD 光子検出器を用いた 100km ファイバー伝送量子もつれ QKD 実験にも成功した。これらは、ファイバー伝送量子もつれ QKD の最長距離実験となった。

その他の量子もつれシステム実験として、独立したファイバーもつれ光源あるいは PPLN もつれ光源からの光子を用いて Hong-Ou-Mandel 型量子干渉実験を行い、これらの光源から識別不可能性を有する光子が得られることを実証した。さらにこれらを用いて量子もつれ交換実験を行い、異なる光源から発生する光子間に量子相関を形成することに成功した。これは、QKD の伝送距離拡張のための量子リレーあるいは量子中継システムにつながる成果である。

上記の他にも、フォトニック量子インターフェースに関する実験、広帯域量子もつれ光子発生実験、APD 光子検出器の性能向上に関する検討、周波数変換型光子検出器の偏波無依存化、量子/古典波長多重伝送に関する検討、光雑音を用いた乱数発生法の検討、などを行った。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

チームリーダーの着想である差動位相シフト量子鍵配送(DPS-QKD)方式を、200km の光ファイバーシステムで実現し、それまでの伝送距離、鍵生成速度を大幅に記録更新して大きなインパクトを与えた。他にも、シリコン導波路や光ファイバーによる量子もつれ光子対の発生など新しい部品技術を開発し、この分野の裾野を広げることにも多大の貢献をした。また、28 件という本領域で最多の特許を出願している。主な研究論文を以下にまとめる。

<主な論文>

- 1) Nature Photon, 2007. 6, "Quantum key distribution over 40 dB channel loss using superconducting single-photon detectors", H. Takesue, S. W. Nam, Q. Zhang, R. H. Hadfield, T. Honjo, K. Tamaki and Y. Yamamoto.
要旨:超伝導単一光子検出器を用いた長距離ファイバー量子鍵配送(QKD)実験。200km 伝送時に 12bps、105km 伝送時に 17kbps、の鍵生成速度を達成した。伝送距離/鍵生成速度ともそれまでの記録を大幅に更新した。QKD 実験におけるベンチマーク的な成果である。
- 2) Opt. Express, 2008. 11, "Long-distance entanglement-based quantum key distribution over optical fiber", T. Honjo, S. W. Nam, H. Takesue, Q. Zhang, H. Kamada, Y. Nishida, O. Tadanaga, M. Asobe, B. Baek, R Hadfield, S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, Z. Wang, K. Inoue, and Y. Yamamoto.
要旨:周期反転分極 LiNbO₃ 内のパラメトリックダウンコンバージョンに基づく時間位置量子もつれ光源を用いた 100km ファイバーQKD 実験。受信系に超伝導単一光子検出器を使用し、100km 伝送時において速度 3.9kbps での秘密鍵生成に成功した。初の長距離ファイバー伝送もつれ QKD 実験である。
- 3) Opt. Express, 2009. 6, "Entanglement swapping using telecom-band photons generated in fibers", H. Takesue and B. Miquel.
要旨:2つの独立なファイバー内自然四光波混合に基づく時間位置量子もつれ光源及び正弦波ゲート動作 APD 光子を用いた通信波長帯量子もつれ交換実験。量子もつれ交換は、量子リレー、量子中継、さらには量子通信ネットワークにつながる重要技術である。これに関し、従来報告を大幅に上回る確率(20 倍)で実証実験に成功した。
- 4) Appl. Phys. Lett., 2007. 11, "Entanglement generation using silicon wire waveguide", H. Takesue, Y. Tokura, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, and S. Itabashi.
要旨:シリコン細線導波路内の自然四光波混合を利用して時間位置もつれ光子対を発生させた。シリコン

導波路による初の量子もつれ光子発生であり、量子もつれ光源の新しい可能性を示した。量子情報通信分野にシリコンフォトニクス技術を導入したユニークな研究であり、多くの招待講演を受けるなど注目を集めた。

- 5) New J. Phys, 2009. 4, "Megabits secure key rate quantum key distribution", Q. Zhang, H. Takesue, T. Honjo, K. Wen, T. Hirohata, M. Suyama, Y. Takiguchi, H. Kamada, Y. Tokura, O. Tadanaga, Y. Nishida, M. Asobe and Y. Yamamoto.

要旨:連続動作が可能な周波数変換型単一光子検出器を用いた高速量子鍵配送実験。10km ファイバー伝送において、1.3Mbps の安全鍵生成速度を達成した。比較的短い距離ではあるが、トップデータとなる秘密鍵生成速度を達成した。

- 6) Opt. Express, 2008. 8, "Stable source of high quality telecom-band polarization-entangled photon-pairs based on a single pulse-pumped, short PPLN waveguide", H. Lim, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, and K. Kikuchi.

要旨:ファイバーループ構成、短尺 PPLN 光導波路を用いるパルス励起型の偏波もつれ光子対源を 1550nm 帯で実現した。量子状態トモグラフィによるもつれ光子対評価では純度 94%、忠実度 96%を確保することができた。通信波長帯偏波もつれ光子対としては最高品質であり、ファイバーループ構成により安定な動作も実現した。

- 7) Opt. Express, 2010. 4, "Hong-Ou-Mandel dip measurements of polarization-entangled photon pairs at 1550 nm", Y. Xue, A. Yoshizawa, and H. Tsuchida.

要旨:ファイバーループ構成型の偏波もつれ光子対源を二台用いることで、四光子レベルでのマンデルデイツプ測定を 1550nm 帯で行い可干渉度 74.5%を確認した。通信波長帯偏波もつれ光子対を用いる四光子レベルの量子干渉実験として初の報告であり、良好な可干渉度(74.5%)を得ている。

- 8) Opt. Express, 2010. 7, "Long-distance entanglement-based quantum key distribution experiment using practical detectors", H. Takesue, K. Harada, K. Tamaki, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, and S. Itabashi.

要旨:シリコン細線導波路中の自然放出四光波混合に基づく時間位置量子もつれ光子源を用いた 100km ファイバー伝送 QKD 実験。受信系に正弦波ゲート APD 単一光子検出器を使用し、100km 伝送時において速度 0.15bps での安全鍵生成に成功した。鍵生成速度は2番目の論文に劣っているが、実用性の高い APD 光子検出器を用いており、また新規に開発したシリコン細線導波路量子もつれ光源の可能性を示した。

- 9) Phys. Rev. A, 2009. 9, "Unconditional security of the Bennett 1992 quantum-key-distribution scheme with a strong reference pulse", K. Tamaki, N. Lutkenhaus, M. Koashi, and J. Batuwantudawe.

要旨:強い参照光を用いる B92 量子鍵配送プロトコルの無条件安全性を初めて証明した。

安全性解析は量子暗号における重要な研究分野である。B92 は BB84 に次いで代表的な量子鍵配送プロトコルであり、その無条件安全性証明に成功したことの意義は大きい。

- 10) Phys. Rev. A, 2009. 2, "Differential-quadrature-phase-shift quantum key distribution" K. Inoue and Y. Iwai.

要旨:DPS-QKDとBB84を組み合わせたQKDプロトコルを提案し、安全性解析及び実証実験を行った。BB84 の安全性と光子数分割攻撃に強いという DPS の特長を併せ持ったプロトコルである。QKD のシステム性能の向上が期待される新提案プロトコルである。

次に主な受賞リストをまとめる。

<主な受賞>

1. H. Takesue, T. Honjo, K. Tamaki, Y. Tokura, ITU-T Kaleidoscope Academic Conference: Innovations in NGN - Future Network and Services, Best Paper Award, second place for presentation “Differential phase shift quantum key distribution,” (May, 2008).
2. 武居弘樹、平成 22 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞受賞、(業績名: 光通信波長帯における高速・長距離量子暗号通信の研究)、(April, 2010).

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

本チームは単一光子、量子もつれ光子対を用いた量子鍵配送技術で世界をリードする地位を築き、現在も東芝ケンブリッジグループと競い合いながら、これを維持している。この分野の研究の進展に大きな貢献をした。2010 年 10 月に東京で開催された東京 QKD ネットワークにおいても、この技術は最長の区間で使用され成功を収めた。この技術で日本が世界をリードする立場にあることを宣伝できた意義は大きかった。

4-3. 総合的評価

研究計画の目標はほぼ達成しており、代表的な論文(2007年Nature Photonics)が既に100回以上引用されているなど、世界へ大きなインパクトを与えた。チームリーダーは、プロジェクトのスタート時にNTT研究所から大阪大学へ異動し、ゼロから研究室を立ち上げるというハンデを背負っての5年であったが、新しいアイデアを次々に考案し、チームとして十分な成果を上げたことを評価したい。今後、この技術が実用技術として社会の中に入って行く為に、社会的ニーズと整合させる等の努力を続けて頂きたい。それと同時に、量子暗号のサイエンスとしての面白さ、を広く社会に宣伝、広報していくことも大切なことと考えられる。この面での活躍も期待したい。