

超伝導光子検出器による量子もつれ波長多重量子暗号通信技術に関する研究 (101503004) Entanglement-based multichannel quantum key distribution using superconducting single-photon detectors

井上 修一郎 日本大学
Shuichiro Inoue Nihon University

行方 直人[†] 吉澤 明男^{††} 福田 大治^{††} 土田 英実^{††}
Naoto Namekata[†] Akio Yoshizawa^{††} Daiji Fukuda^{††} Hidemi Tsuchida^{††}
[†]日本大学 ^{††}産業技術総合研究所
[†]Nihon University ^{††}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

研究期間 平成 22 年度～平成 24 年度

概要

量子もつれ光子対発生・検出技術の開発から着手し、量子もつれ量子鍵配送実験を行った。量子もつれ光子対発生に関しては、波長多重時に波長の数だけ光源を並べることを回避するために、1 個の光源から多波長量子もつれ光子対を得る量子もつれ光子対発生技術の開発を二次非線形結晶によるパラメトリック過程を用いて実現した。また、同波長帯で動作する超伝導単一光子検出器の高量子効率化・低ジッタ化・低雑音化技術を開発し、波長多重に対応した受光素子のアレイ化を行った。最後に、偏波自動補正可能な量子もつれ量子鍵配送システムを開発し、量子鍵配送実験を行った。

1. まえがき

量子暗号通信の長距離・高速化を目指した 1.55 μm 帯での研究が盛んであるが、光ファイバーのポテンシャルを活かした量子暗号通信において波長多重化は必須である。本研究課題が目指すものは波長多重化を目的とする広帯域量子もつれ光子対発生技術の開発、高量子効率・高速・低雑音光子検出技術の開発及び量子もつれ光子対による 1.55 μm 帯波長多重量子暗号通信技術の開発である。

2. 研究開発内容及び成果

2.1 広帯域量子もつれ光子対発生技術の開発

ファイバーループ干渉計による偏光量子もつれ光子対発生において、PPLN 導波路長 1 mm を選択し中心波長を 1.55 μm 付近にすることで数 100 nm の帯域を確保した。これは帯域 1.52 μm -1.58 μm において波長多重度 4 の性能を十分に満足する。APD ゲート動作型単一光子検出器を用いて、CW 励起での光子対評価を実施、性能指標の一つである忠実度の測定を実施した。その結果を表 1 に示す。

表 1. 忠実度と同時計数率

忠実度	HH	VV	DD
97.8%	6.55Hz	5.26Hz	5.98Hz
93.7%	13.92Hz	16.42Hz	15.40Hz
92.5%	37.02Hz	36.81Hz	36.79Hz
90.4%	51.77Hz	47.91Hz	49.26Hz
88.8%	82.46Hz	75.97Hz	81.85Hz

2.2 高量子効率超伝導単一光子検出技術の開発

高い量子効率と良好な時間ジッタで光子を検出するためには、超伝導薄膜の抵抗値を下げて、電流感度と熱拡散率を向上させることが有効である。その一つの方法として、超伝導薄膜に近接二重層を適用することがあげられる。

Ti/Au 近接二重層による超伝導薄膜の T_c を測定したところ、Ti の厚さに応じて 200 mK~350 mK の温度範囲で良好な超伝導転移を示すことを確認した。また、有感面積 5 μm 角の TES に平均光子数が数個/パルス程度の微弱コヒーレント光を照射し、その時の電流変化を測定した。その結果を図 1 に示す。各パルス列に含まれる光子数に応じて、明確なピーク状の結果が得られていることが分かる。

波高値 100 (a.u.) 付近のピークが単一光子による応答である。エネルギー分解能は 0.15 eV (FWHM)であり、これは報告されている分解能としては世界で最も優れた性能である。有感面積 10 μm 角の素子は、光ファイバーの MFD との関係から最も小さな結合損が可能であり、量子効率も 91 %まで改善することに成功した。

次に、連続発振 (CW) 半導体レーザーの出力光を減衰器で制御し、入射する光子に対する計数率が 10 kHz~100 MHz となるように調整した。この入力に対して、応答時間 200 ns を持つ検出器 (超伝導転移温度 T_c ~294 mK) では、3.3 MHz までの光子を検出することに成功した。MHz 超領域での計数率特性は、Ti/Au に対して世界最速である。

時間ジッタは入射光子のエネルギーに明確に依存するが 2 ns にまで低減できることを示した。暗計数率については、光子未入射時の信号応答から評価した結果、黒体放射による計数が支配的であり、これを抑圧することで 10 Hz 以下の暗計数率を達成した。また、開発した TES 素子及び低雑音・高帯域信号読出し技術を用いて光検出素子の多重化 (4 素子 TES アレイ×4) を行った。(図 2)

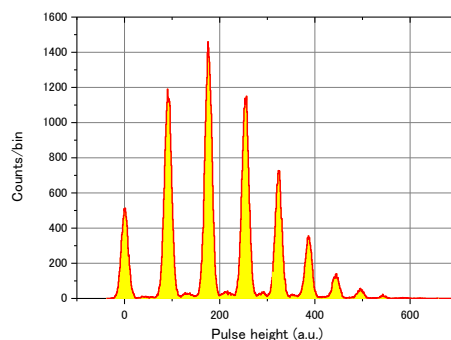


図 1. Ti/Au 近接二重層 TES による光子数識別

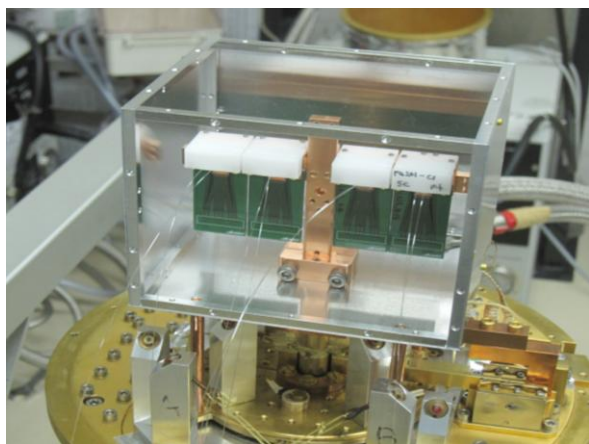


図 2. TES 多重化モジュール

2.3 量子もつれ量子暗号通信技術の開発

波長 1556.55 nm のレーザー光をモニター光として、波長 1553 nm ~ 1559 nm の ITU グリッド 8 波 (1553.33 nm, 1554.13 nm, 1554.94 nm, 1555.75 nm, 1556.55 nm, 1557.36 nm, 1558.17 nm, 1558.98 nm) に対して偏波自動補正を行い、各波長における量子鍵配送系のベースライン誤り率を測定した。その結果、波長 1556.55 nm における誤り率は 0.2 % であり、誤り率を 3 % まで許容すれば 4 波長同時偏波補正が可能であることを示した。

次に、これまでに開発した (1) Type-II 型ニオブ酸リチウム接着リッジ導波路による狭帯域直交偏波量子もつれ光源、(2) 多波長同時自動偏波補正技術、(3) 高効率高速超伝導転移端センサ (TES) を用いて、BBM92 量子鍵配送システムを構築し、ITU グリッドに対応した 4 波長 (1558.98 nm, 1558.17 nm, 1557.36 nm, 1556.55 nm) による量子鍵配送実験を行った。実験に使用した TES の性能を表 2 に示す。伝送路として 10.5 km の分散シフトファイバーを用いた場合の実験結果を表 3 に示す。波長多重度 4 においてシフト鍵生成率約 5 kbps (ビット誤り率約 10 %) が得られた。

最後に、伝送路として各チャンネルに 5 dB の光学減衰器を挿入した 10 m の単一モードファイバを使用することで通信距離 50 km をシミュレートした。このとき、伝送路以外の光学損失を低減するために基底選択は行わず手動偏波制御系を用いた。その結果、シフト鍵生成率約 100 kbps (1 波長あたり 25 kbps 程度) を得た。

表 2 TES の性能

	TES1	TES2
検出効率 (%)	80	74
暗係数 (cps)	1000	1000
ジッタ (ns)	9	11

表 3 各波長におけるシフト鍵生成率とビット誤り率

波長	シフト鍵生成率	ビット誤り率
1558.98 nm	1559 bps	0.161
1558.17 nm	1276 bps	0.0997
1557.36 nm	1335 bps	0.0985
1556.55 nm	1247 bps	0.0847

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

近年のインターネットの急速な普及により、情報通信ネ

ットワークは社会・経済活動を支える重要なインフラとなっている。個人情報を含む膨大なデータ、機密情報は、不正アクセスなどによるデータの流出・漏洩・紛失をはじめコンピュータウイルスなど多様なリスクにさらされている。今日の高度情報社会において、情報通信ネットワークにおけるセキュリティや安全性の重要性が認識され、絶対安全性が保証される量子暗号通信に対する期待も高い。

本研究の成果は、量子もつれ量子暗号通信技術を基本とする光ファイバー量子ネットワークの一形態を提示するものである。もちろん、実用化のためには、量子中継技術、ソフトウェア、既存のネットワークとの共存など解決すべき課題は山積している。更に、量子暗号鍵配送が個人や家庭レベルまで浸透するのはさらに先のことになると予想されるが、社会・経済活動や個人の生活における情報通信ネットワークの重要性は今後さらに高まることは確実であり、将来の大きな市場に結びつくと考えている。

今後の取り組みであるが、量子メモリの候補となる可能性のある物質・メカニズムの探索等を本研究成果と結びつけることで次世代量子暗号通信技術の中核である量子中継技術の開発を目指し、情報セキュリティに関する新たな産業分野の形成、安全・安心を提供する情報通信ネットワーク技術の開発への寄与を深めることで社会経済活動の活性化への貢献を果たしたい。

4. むすび

本委託研究が目指すものは量子もつれ波長多重量子暗号通信技術の開発であり、波長多重化に必須の要素技術の研究開発から、実用化を意識した ITU グリッド波長による波長多重量子暗号通信実験まで幅広い。超伝導薄膜の作成・評価のような基礎的な研究開発を含みながらも、量子もつれ波長多重量子暗号通信技術をシステム全体として捉えた包括的な研究開発であり、新たな原理や方式の提案よりも、既存の原理を具現化して装置化するための研究開発と位置づけることもできる。

【誌上发表リスト】

- [1] N. Namekata, H. Takesue, T. Honjo, Y. Tokura, and S. Inoue, "High-rate quantum key distribution over 100 km using ultra-low-noise, 2-GHz sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiodes," *Opt. Express* Vol. 19, No. 11, pp. 10632-10639 (2011.5.23).
- [2] G. Fujii, D. Fukuda, T. Numata, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, S. Inoue, "Thin gold covered titanium transition edge sensor for optical measurement," *J. Low Temp. Phys.*, Vol. 167, pp. 815-821 (2012.6.1).
- [3] A. Yoshizawa, D. Fukuda, H. Tsuchida, "Evaluation of polarization entanglement generated by pulsed spontaneous parametric down-conversion with multi-pairs using four single-photon detectors for quantum state tomography," *Opt. Commun.* Vol. 285, pp. 3502-3506 (2012.7.15)

【受賞リスト】

- [1] 福田大治、日本学術振興会超伝導エレクトロニクス第 146 委員会賞、“超伝導光検出技術に基づく高効率光子数識別器の開発”、2011 年 6 月 6 日

【報道掲載リスト】

- [1] “毎秒 24 キロビット 100 km 伝送成功 量子暗号通信に道”、日刊工業新聞、2011 年 5 月 16 日