

平成22年 5月21日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760038
 研究課題名 (和文) 通信波長帯用ギガヘルツ繰り返し単一光子検出器の開発と量子鍵配布への応用
 研究課題名 (英文) Development of telecom-band single-photon detector operated at a gigahertz repetition frequency and application it to a quantum key distribution.
 研究代表者
 行方 直人 (NAMEKATA NAOTO)
 日本大学・理工学部・助手
 研究者番号：20453912

研究成果の概要 (和文)：都市圏量子鍵配送の実現に向けて、高速、高効率かつ低暗計数を有する通信波長帯用 (1550nm帯) 単一光子検出器の研究開発を行った。

開発目標であった2 GHz動作が可能であることを実証した。この繰り返し速度は、InGaAs/InP なだれフォトダイオードを用いた通信波長帯単一光子検出器においては世界最速記録となる。また本検出器の信号雑音比 (S/N) 比は世界最高クラスである。以上のように、今回開発した光子検出器は実用的な半導体ベースの単一光子検出器ながら、高い性能指数を有することを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：We demonstrated that InGaAs/InP avalanche photodiodes can be operated at 2 GHz gate repetition frequency. Furthermore, the high-speed single photon detector has a detection efficiency of 10 % at a telecommunication wavelength (1550 nm) with a dark count probability per gate of 6×10^{-7} . The developed single-photon detector is suitable for the application to a practical quantum key distribution system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	3,000,000	900,000	3,900,000
21年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・基礎工学 ・ 応用光学・量子光工学

キーワード：量子光学

1. 研究開始当初の背景

インターネットの急速な普及に伴い、様々な情報が情報インフラ上を行き交うようになってきている。防衛、電子商取引、個人情報をはじめとする高い秘匿性を要求する情報も多くなってきていることから情報通信

の安全性がますます重要視されるようになり、物理的に安全性を保障する量子鍵配布 (量子暗号) [1] がその回答として注目を集めている。

現在、光ファイバー伝送を基本とした量子鍵配布システムは数十kmの近距離において

安全鍵生成が可能であるレベルにあり、また最近では、既存の情報通信システムへの応用を目指した実用化研究も精力的に行われている[2]。しかしながら、100km以下の伝送距離、1kbit/sと低い安全鍵配布率が近年の通信システムへ適合するものとはいえ、実用化に向けては更なる通信速度、通信距離の向上が必須である。高速化、長距離化にとって重要な課題は単一光子検出器の高性能化（高速化および低雑音化）である。現在、量子鍵配送システムの開発目標として、都市圏情報通信網(100km圏内程度)において安全鍵配布率 100kbpsが挙げられている。この目標を達成するためには、単一光子検出器は 10^{-5} ものS/N比(検出効率/暗計数確率)、数GHzもの繰り返し周波数を有さなくてはならない。

これまでに低暗計数確率を持ちかつ高速な光子検出器の候補として窒化ニオブ超伝導細線を用いたもの(SSPD)や高効率波長変換素子とSi-APDを用いたもの(UCD)が報告されている。両者はともに量子鍵配送実験に応用され、100km以上の伝送距離を実現しており、また10GHzのクロックで動作する超高速システムへ組み込むことが可能である。しかしながら、SSPDは4Kの極低温環境下での動作が要求され、一方でUCDは強い偏光依存性を持つなど、実用化面での課題を残している。ゲート動作型 InGaAs/InP なだれフォトダイオード(APD)がある。これは、上記2つの光子検出器と比べると雑音は大きいものの、数十km圏の量子鍵配布を可能とする程度の性能を持ち、しかも非常に簡便であり実用的である。しかし、ゲートの繰り返し動作速度は最大で1MHz程度と非常に遅いのが問題であった。この問題に対して、申請代表者はゲート電圧として正弦電圧を用いる方法を提案し、本方法が800MHzの繰り返し動作を可能とすることを示した。この検出器技術を量子鍵配布へ応用し、40km程度の通信距離において0.1MHzの安全鍵配布速度も実現している。ただし、最大伝送距離は65km程度までしか実現しておらず、これを100km(都市圏通信網)まで拡張するためには単一光子検出器(APD)の更なる低雑音化が要求される。また、鍵配布率もまだ十分とはいえないため、更なる高速化も要求される。

2. 研究の目的

本研究では、実用都市圏量子鍵配布システムに適する単一光子検出器の開発を目標とし、これを正弦電圧ゲート動作型 InGaAs/InP APD をさらに高性能化することで実現することを目的とした。以下に、本研究開発目標を項目ごとに示す。

(1) APD の 1GHz を超えるゲート繰り返し周波数の実現：

申請代表者が発明した正弦電圧ゲート動作をさらに高速化(し、1~2GHzのゲート繰り返し時における検出効率、暗計数確率、アフターパルス確率を測定する。

また、本質的な最大繰り返し周波数(APDの応答速度で決定される)を明らかにする。

(2) APD 動作環境の最適化：

APDの温度等の動作条件を量子鍵配布の応用を前提に最適化する。

(3) 量子鍵配布実験を通した単一光子検出器の性能証明：

実際に開発した光子検出器を用いた量子鍵配布実験を行い、有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

以下に、実施した研究方法を項目ごとに示す。

(1) APDの1GHzを超えるゲート繰り返し周波数の実現：

InGaAs/InP APD (Princeton Lightwave社製)を1GHz以上の正弦電圧ゲート動作させた場合、光子検出信号は1ns以下の短パルス信号を得る。今回、500psパルスが弁別可能な弁別器を開発し、弁別時の取りこぼし(計数損失)を抑圧した。また、正弦電圧ゲート動作の電子回路の低雑音化を実施した。これにより、ゲート動作手法にも関わらず、出力の雑音レベルは熱雑音限界に近いレベルまで抑圧できた。出力雑音レベルの抑圧は、光子検出に必要なAPD内部利得の低減が可能であることを意味し、高繰り返し時に問題となるアフターパルス雑音を大きく抑圧できることが予想された。

(2) APD 動作環境の最適化：

暗計数発生の主原因は InGaAs/InP APD 中に熱励起される電子である。これを低減するためには単純に InGaAs/InP APD を冷却することで実現する。しかし、冷凍機等の大がかりなシステムは実用的ではない。よって、ペルチェ素子(電子冷却)で冷却可能な範囲にとどめ、暗計数の抑圧を試みた。

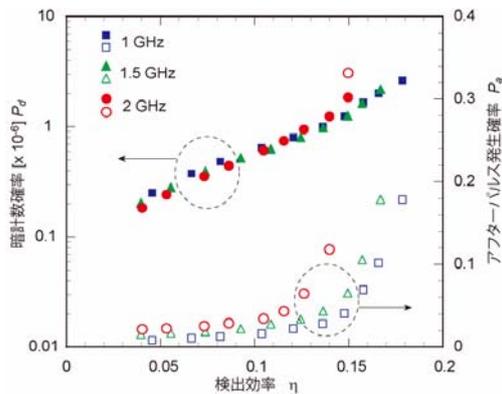
(3) 量子鍵配布実験を通した単一光子検出器の性能証明：

開発した通信波長帯単一光子検出器の有用性を示すために、直交偏光量子もつれ光子対共有実験を行った。つまり、BBM92量子鍵配布プロトコルが開発した光子検出器を用いて実装できるかを試みた。

4. 研究成果

(1) APDの1GHzを超えるゲート繰り返し周波数の実現：

開発した単一光子検出器の性能測定結果を図1に示す。検出効率は波長1550nm、幅50ps



のパルスレーザーを使用して行った。正弦電圧ゲートの繰り返し周波数は 2 GHzまで行った。繰り返し周波数 1GHz時においては、検出効率 10.4%において暗計数確率 6.4×10^{-7} 、アフターパルス確率 1.6%を得た。繰り返し周波数 2GHzにおいても、検出効率 10.5%、暗計数確率 6.1×10^{-7} 、アフターパルス確率 3.4%を得た。以上のように、量子鍵配送への応用時に大きな障害とならない程度までアフターパルス確率を抑圧した状態で繰り返し周波数は開発目標であった 2GHzを達成できた。本繰り返し周波数は、InGaAs/InP APDベースの単一光子検出器においては世界最速となる。超電導光子検出器SSPDは 10GHzの繰り返し動作が可能ではあるものの、検出効率は 1%程度と、今回開発した光子検出器と比較して 1/10 である。よって、得られる正味の光子計数率は開発した正弦電圧ゲート動作型InGaAs/InP APDの方が高くなる。よって、本検出器を用いることで、超高速量子鍵配布が可能となる見通しとなった。

(2) APD 動作環境の最適化：

上記の項目 (1) において、InGaAs/InP APD は -50°C まで電子冷却された。その冷却による熱電子の抑圧、また正弦電圧印加による極めて短い有効ゲート時間幅 (2GHz 時において 100ps 程度) により、暗計数確率は 10^{-7} オーダーを実現している。この暗計数確率はこれまで報告されている InGaAs/InP APD ベースの単一光子検出器と比較して 1桁程度低い。性能指数 (検出効率÷暗計数確率) は超電導単一光子検出器、SSPD との比較でさえも、1桁程度の差まで近づけることができた。

(3) 量子鍵配布実験を通した単一光子検出器の性能証明：

Type-II 型周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路から発生する直交偏光光子対を用い、偏光量子もつれ光子対を発生させた。これを開発した高速単一光子検出器を用いて測定し、高純度量子もつれ状態が共有できるかを

調べた。光子検出器の暗計数、アフターパルス雑音等、全ての不完全性を含んだ状態において、2光子干渉明瞭度 88%以上を得た。本結果はBBM92プロトコルを実装する量子鍵配布が可能であることを示唆しており、今後、伝送ファイバーを通した実験を行い、長距離量子鍵配布が可能であることを明らかにしたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① N. Namekata, S. Adachi, and S. Inoue, "Ultra-Low-Noise, Gated Avalanche Photodiode for High-Speed Single-photon Detection at Telecommunication Wavelengths," to be published in *IEEE Photo. Tech. Lett.* 査読有, Vol.22, No.8, 2010, pp. 529-531.
- ② N. Namekata, S. Adachi, and S. Inoue, "High-Speed Single-Photon Detection Using 2-GHz Sinusoidally Gated InGaAs/InP Avalanche Photodiode," *Quantum Communication and Quantum Networking* (Springer), 査読有, 2010, 34-38.
- ③ N. Namekata, T. Kono, S. Kurimura, and S. Inoue, "Narrowband Polarization-Entangled Photon Pairs in Telecommunication Band Using a Type-II Periodically Poled Lithium Niobate Waveguide," *Quantum Communication and Quantum Networking* (Springer), 査読有, 2010, pp. 261-265.
- ④ N. Namekata, S. Adachi, and S. Inoue, "1.5 GHz single-photon detection at telecommunication wavelengths using sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode," *Opt. Express*, 査読有, Vol.17, No.8, 2009, pp.6275-6282.
- ⑤ S. Adachi, N. Namekata, and S. Inoue, "Telecom-band single-photon detector with a gigahertz repetition frequency using a sinusoidally gated avalanche photodiode," *Ninth International Conference on QCMC: AIP Conference Proceedings*, 査読有, Vol. 1110, 2009, pp.287-290.

[学会発表] (計 11 件)

- ① T. Segawa, G. Fujii, N. Namekata, S. Inoue, D. Fukuda, "Preservation of indistinguishability between correlated two photons under propagation in surface plasmons waveguide," *The 7th Asia-Pacific conference on Near-Field Optics (APNFO-7)*, IV(1)-BW3, Jeju, Korea

(November 25-27, 2009) [口頭].

- ② N. Namekata, S. Adachi, and S. Inoue, "High-Speed Single-Photon Detection Using 2-GHz Sinusoidally Gated InGaAs/InP Avalanche Photodiode," *International Conference on Quantum Communication and Quantum Networking*, Napoli, Italy (October 26-30, 2009) [口頭].
- ③ N. Namekata, T. Kono, S. Kurimura, and S. Inoue, "Narrowband Polarization-Entangled Photon Pairs in Telecommunication Band Using a Type-II Periodically Poled Lithium Niobate Waveguide," *International Conference on Quantum Communication and Quantum Networking*, Napoli, Italy (October 26-30, 2009). [口頭].
- ④ N. Namekata, S. Adachi and S. Inoue, "Generation of high-purity polarization entangled photon pairs using a Type-II PPLN waveguide," *18th International Laser physics workshop (LPHYS '09)*, 7-3-6, Barcelona, Spain (July 13-17, 2009) [口頭].
- ⑤ N. Namekata, T. Kono, K. Hasegawa, S. Kurimura, and S. Inoue, "Thermal-noise-limited, gated InGaAs/InP avalanche photodiode for high-speed single-photon detection," *18th International Laser physics workshop (LPHYS '09)*, P7-6, Barcelona, Spain (July 13-17, 2009) [ポスター].
- ⑥ 河野太一, 行方直人, 栗村直, 井上修一郎 "偏光量子もつれ光子対の 10.5kmファイバー伝送実験," *第21回量子情報技術研究会* pp.196-199, 電気通信大学 (November 4-5, 2009) [ポスター].
- ⑦ 河野太一, 行方直人, 栗村直, 井上修一郎, "直交偏光量子もつれ光子対の 10.5 kmファイバー伝送実験," *第70回応用物理学会学術講演会*, 11a-T-7, 富山大学 (September 8-11, 2009) [口頭].
- ⑧ S. Adachi, N. Namekata, and S. Inoue, "Telecom-band single-photon detector with a gigahertz repetition frequency using a sinusoidally gated avalanche photodiode," *The 9th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing*, P2-34, Calgary, Canada (August 19-24, 2008), [ポスター].
- ⑨ N. Namekata, S. Adachi, and S. Inoue, "Telecom-Band Single-Photon Detection Using Sinusoidally Gated APD for GHz Clocked Systems," *the Quantum Network*

Demonstration and Science Conference, Vienna, Austria (October 8-10, 2008) [口頭].

- ⑩ 足立俊介, 行方直人, 井上修一郎, "正弦電圧ゲート型単一光子検出器の 1.5GHz動作," *第19回量子情報技術研究会*, QIT2008-74, 125-128, 大阪府立大学 (November.20-21, 2008) [ポスター].
- ⑪ 足立俊介, 行方直人, 井上修一郎, "正弦電圧ゲート動作型なだれフォトダイオードを用いたGHz繰り返し通信波長帯単一光子検出器," *第69回応用物理学会学術講演会*, 5a-ZD-5, 中部大学 (September 2-5, 2008) [口頭].

[その他]
特になし

6. 研究組織
(1) 研究代表者
行方直人 (NAMEKATA NAOTO)
日本大学・理工学部・助手
研究者番号: 20453912