

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02633

研究課題名(和文) 超広帯域量子もつれ光子対と超伝導転移端センサによる単一光子単一画素イメージング

研究課題名(英文) Single-photon single-pixel imaging using ultrabroadband entangled photon pairs and superconducting transition edge sensors

研究代表者

井上 修一郎 (INOUE, Shuichiro)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30307798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：波長 1553 nm の伝令付き単一光子を光源、正弦電圧ゲート動作 InGaAs/InP 単一光子雪崩ダイオードを単一画素とした単一画素イメージングを行った。観察対象による吸収・散乱・回折などが無い理想的な条件下では、波長 1553 nm の光子 54,000 個を検出することで、64 × 64 画素の「光」という文字をイメージング可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、単一光子という究極の微弱光照射により観察対象のイメージングが可能であることを示すものである。また、波長 1553 nm の単一光子を用いることで、単一光子を高効率かつ低雑音で検出可能なイメージセンサが存在しない短波長赤外領域での極限微弱光イメージングを実現した。この単一光子単一画素イメージングを生物・医学の研究に応用することで、従来不可能であった光損傷を受けやすい細胞やバクテリアの観察が可能となり、生物科学や医学の発展に貢献できるものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：We performed the single-pixel imaging using a heralded single-photon source at 1553 nm and an InGaAs/InP-SPAD, and demonstrated that it is possible to image a Chinese character "Hikari" at 64 x 64 pixels resolution detecting 54,000 photons under ideal conditions.

研究分野：量子光学・量子情報

キーワード：単一光子 単一画素イメージング 圧縮センシング 短波長赤外 InGaAs/InP-SPAD 単一光子検出器

### 1. 研究開始当初の背景

微弱光によるイメージング技術は、生物医学や安全保障など様々な分野に応用されている。特に、生物科学の分野では、細胞やバクテリアなどの光照射によるダメージを回避できる(生きたまま観測できる)超微弱光イメージング技術の開発が望まれている。

光の最小単位は光子であり、単一光子によるイメージングは究極の微弱光イメージングと言える。微弱光イメージングでは、画像を取得するイメージセンサにも単一光子検出感度が要求される。可視光領域では、単一光子に感度を有する Intensified CCD (ICCD) や Electron Multiplying CCD (EMCCD) などのイメージセンサが微弱光イメージングに使用されている。一方、赤外領域では、単一光子検出可能なイメージセンサは未開発であるが、単一光子を高効率かつ低雑音で検出可能な Superconducting Transition Edge Sensor (TES) や Superconducting Strip Single Photon Detector (SSPD) などの超伝導単一光子検出器が開発されている。

近年、圧縮センシングと呼ばれる情報理論を応用することで、イメージセンサを使用せず、単一の光検出器で高速なイメージングを行う「単一画素イメージング (Single Pixel Imaging)」の研究が進められている。単一画素イメージングは、単一の光検出器を用いてイメージングを行うため、イメージセンサが存在しない(または高価な)波長領域のイメージングへの応用が進められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、単一光子を光源として最小限の光子数で観察対象の画像を取得することにある。すなわち、1回の測定で観察対象が受ける光量は「光子1個」であり、その画像を得るためには最低何回の測定が必要であるかを明らかにすることにある。

### 3. 研究の方法

本研究では、2次の非線形光学過程である自然パラメトリック下方変換によって生成できる相関光子対(同時刻に発生する波長と偏光に相関をもつ2つの光子)を単一光子生成に使用する。擬似位相整合波長変換素子(PPLNやPPKTP)を使用することで、可視～短波長赤外領域の波長の光子対を高効率に生成できる。この光子対をビームスプリッターで分離し、片方の光子を検出することで、もう片方の光子の存在を認知することができる。この検出されない単一光子(伝令付き単一光子)を単一画素イメージングの光源とする。本研究で使用した光子対の波長は1553 nmであり、単一光子生成率(2つの光子の同時計数)は～50 kHzである。

単一画素としては、1553 nmの単一光子を検出するためにPrinceton Lightwave社製InGaAs/InP-SPAD(Single-Photon Avalanche Diode)を使用する。InGaAs/InP-SPADはSi-SPADに比べ、バンドギャップエネルギーが小さく、化合物半導体であるため、欠陥準位密度が高い。その結果、荷電子帯からの熱励起及び欠陥準位に捕獲された電子の再放出に起因する暗計数が多く、単一光子検出の妨げとなる。この暗計数を抑圧し、高速・高効率な単一光子検出を実現するために、InGa/InP-SPADを周波数1 GHzの正弦電圧ゲートで動作させる<sup>1)</sup>。本研究で使用したInGaAs/InP-SPADの受光面の有効径は25 μm、光子検出効率～20%、暗計数率～1500 cps(counts/sec)である。

図1に伝令付き単一光子を光源、正弦電圧ゲート動作SPAD(SG-SPAD)を単一画素とした単一光子単一画素イメージングシステムの概要を示す。本研究では、観察対象による吸収・散乱・回折の影響を排除し、理想的な条件下で単一光子イメージングを評価するために、(透過型)観察対象をデジタルマイクロミラー素子(DMD)の前方に配置せず、DMDのマスクパターンにデジタル的に作製した「光」という文字を重畳した画像をDMDに表示した。

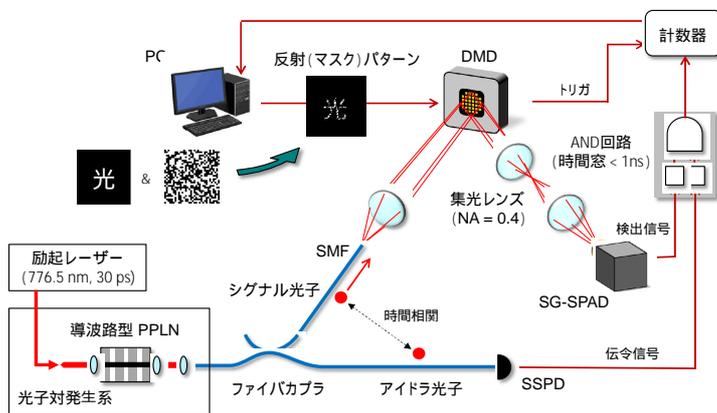


図1. 単一光子単一画素イメージングシステム

導波路型周期分極反転 LiNbO<sub>3</sub> を繰り返し周波数 1 GHz、波長 776.5 nm、パルス幅 30 ps のパルスレーザで励起し、波長 1553 nm の相関光子対を生成する。ファイバカプラにより光子対を分離し、片方の光子 (アイドラ光子) を SSPD (検出効率 ~ 80%, 暗計数率 100 cps) で検出する。その検出信号をもう片方の光子 (シグナル光子) の存在を知らせる伝令信号とする。SSPD の光子計数率は 5 Mcps である。単一モードファイバ (SMF) から出力されたシグナル光子をコリメートし、DMD に入射する。DMD によって反射されたシグナル光子は、NA = 0.4 のレンズ系によって SG-SPAD に集光される。SG-SPAD による光子計数は、DMD のマスクパターン更新に同期した計数器によって行う。DMD のマスクパターン生成には、ランダムアダマール (RH) 法<sup>2)</sup> とロシア人形 (RD) 法<sup>3)</sup> を採用し、TVAL3 アルゴリズム<sup>4)</sup> により画像再構築を行った。

#### 4. 研究成果

本研究では、64 × 64 (4096) 画素で画像再構築を行った。図 1 に示す光学系では、DMD の反射率が 7%、SG-SPAD の光子結合効率を含めた検出効率は 13% である。また、DMD のマスクパターンの ON 状態によりサンプリングされた文字部分に入射した光子のみが SG-SPAD へ集光されるため、SSPD の伝令信号 (5 MHz) と同時に SG-SPAD で計数される光子は ~ 35 cps、暗計数は ~ 10 cps であった。RH 法、RD 法によって生成された DMD パターンにより画像再構築を行った結果を図 2、図 3 に示す。図の横軸は画像再構築に使用した DMD のマスクパターン数 (= 測定回数)、縦軸は 1 回の測定における平均光子計数 (計測時間) を示す。RH 法では、1 回の測定における光子計数が平均で 250 程度、DMD のパターン数が 1000 程度 (圧縮率 1000/4096 ~ 25%) で「光」文字を認識可能である。一方、RD 法では ~ 5% の高圧縮率でも「光」文字を認識できる。RD 法では、積算時間を増やしても解像度にあまり変化は現れない。理想的な条件下での RD 法による画像再構築に必要な被検出光子の総数は、わずか  $5.4 \times 10^4$  個 ( $5.3 \times 10^{-15}$  Joule) であり、極めて少数の光子検出で画像再構築が可能である。

最終的に、波長 1550 nm に反射率を最適化した DMD を使用し、その他の光学系の損失もできる限り低減することで、イメージングシステムの全光学損失を 13 dB 低減することができた。この光学損失の改善により、イメージングに要する時間を大幅に短縮することができた。図 4 に光学損失改善前後の測定時間と再構築画像を示す。DMD のパターンが 900 パターンの場合、光学損失改善前では測定に 3.75 時間を要したが、改善後は 15 分の測定で同程度の画質の画像を再構築することが出来た。これは、光損失を低減することで、1 つの DMD パターンを表示する時間を 15 秒から 1 秒に短縮しても画像再構築に必要な S/N 比を確保できたからである。

上記の実験により、単一光子検出可能なイメージセンサが存在しない短波長赤外領域 (1550 nm 帯) において、単一光子単一画素イメージングを世界で初めて実証した。このイメージング技術により、光損傷を受けやすい細胞やバクテリアの観察が可能となることが期待できる。

尚、研究開始当初、広帯域量子もつれ光子対を単一画素イメージングの光源に使用する予定であったが、広帯域量子もつれ光子対を発生させるためのチャープ擬似位相整合波長変換素子の作製が順調に進まなかったため、単一波長の光子対を使用した。また、単一画素には光子のエネルギー (波長) 測定可能な超伝導転移端センサ (TES) を使用する予定であったが、DMD による空間変調によって波面が崩れた光子を単一モードファイバに効率良く結合させることが困難であったため、光子を空間入力可能な InGaAs/InP-SPAD を使用した。(TES は光子の入力に単一モードファイバを使用する。) 今後、広帯域量子もつれ光子対の生成方法及び TES への多モードファイバによる光子入力について検討することで、単一光子単一画素分光イメージングの実現を目指す。

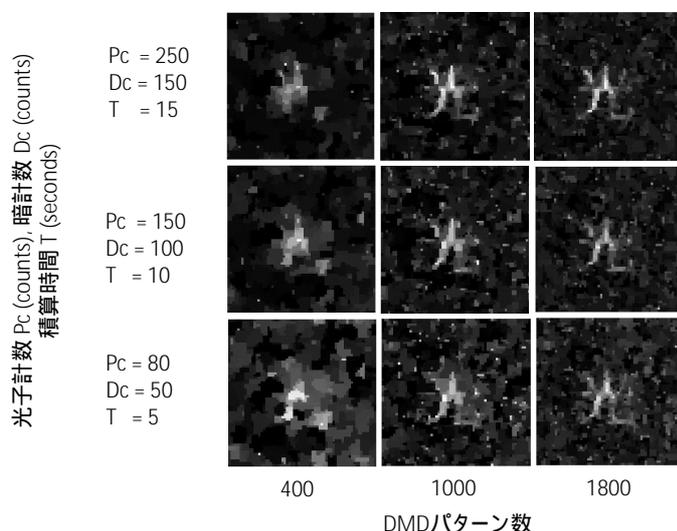


図 2. RH 法による再構築画像

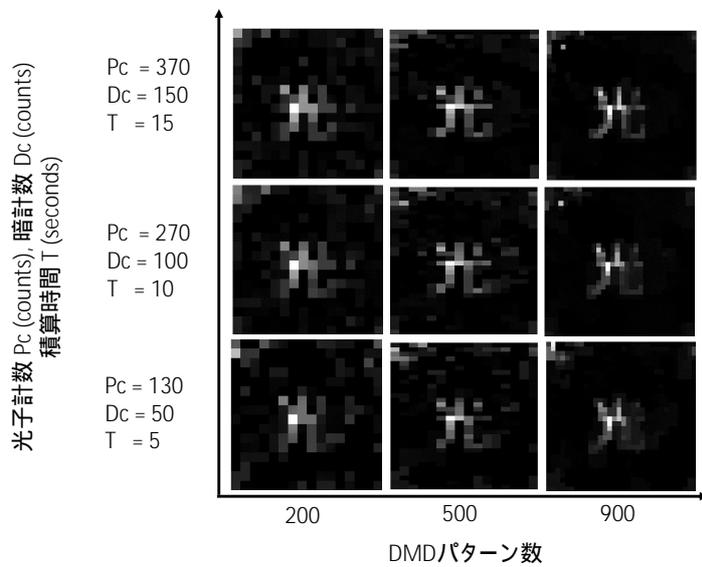


図 3. RD 法による再構築画像

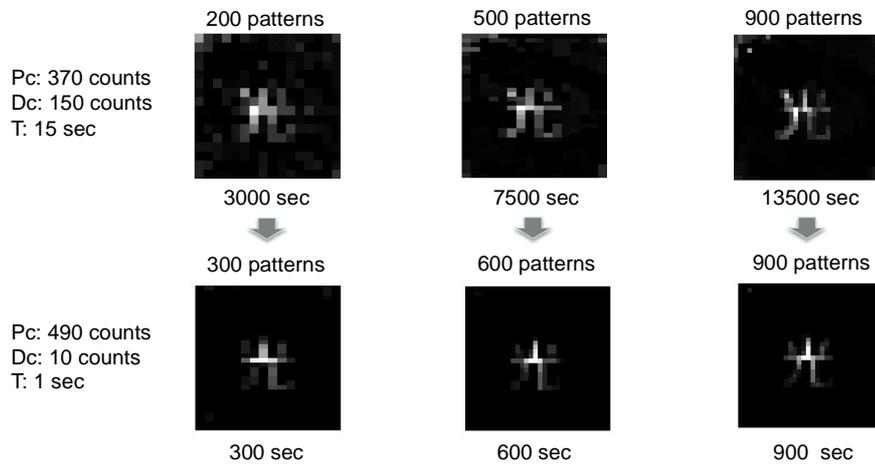


図 4. 光損失の改善前後における測定時間と再構築画像の比較

参考文献

- 1) N. Namekata, S. Sasamori, and S. Inoue: Opt. Express **14** (2006) 10043.
- 2) G. A. Howland: Ph. D. thesis, Rochester University (2014).
- 3) Ming-Jie Sun, et al.: Scientific Reports **7** (2017) 3464.
- 4) C. Li: Ph. D. thesis, Rice University (2011).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Hagihara, K. Yokota, N. Namekata, and S. Inoue	4. 巻 11295
2. 論文標題 Near infrared single-photon imaging based on compressive sensing with a sinusoidally gated InGaAs/InP single-photon avalanche diode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 112950R (1-6)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2547022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 萩原広揮、横田一広、行方直人、井上修一郎
2. 発表標題 極微弱光・量子光を用いた単一画素圧縮イメージングの検討
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 萩原広揮、横田一広、行方直人、井上修一郎
2. 発表標題 正弦波ゲート InGaAs/InP単一光子アバランシェダイオードを用いた近赤外領域での単一画素圧縮イメージング
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Hagihara, K. Yokota, N. Namekata, and S. Inoue
2. 発表標題 Near infrared single-photon imaging based on compressive sensing with a sinusoidally gated InGaAs/InP single-photon avalanche diode
3. 学会等名 SPIE（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Hagihara, K. Yokota, N. Namekata, S. Inoue
2. 発表標題 Near infrared single-pixel imaging of a spatial distribution of plasmonic quantum walkers
3. 学会等名 HQS (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 分光画像生成装置	発明者 井上修一郎	権利者 日本大学
産業財産権の種類、番号 特許、2019-159556	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 量子画像伝送システム	発明者 井上修一郎	権利者 日本大学
産業財産権の種類、番号 特許、2020-012762	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>単一光子単一画素イメージング  <a href="http://www.quant-ph.cst.nihon-u.ac.jp/qog-nu/?page_id=12#theme01">http://www.quant-ph.cst.nihon-u.ac.jp/qog-nu/?page_id=12#theme01</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	行方 直人  (NAMEKATA Naoto)  (20453912)	日本大学・理工学部・准教授    (32665)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	福田 大治  (FUKUDA Daiji)  (90312991)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・首席研究員    (82626)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	萩原 広揮  (HAGIHARA Hiroki)		
研究協力者	横田 一広  (YOKOTA Kazuhiro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関