

超伝導シングルフォトンカメラによる革新的イメージング技術の創出

Development of new imaging technology based on superconducting single-photon camera

課題番号：18H05245

寺井 弘高（TERAI, HIROTAKA）

情報通信研究機構・未来 ICT 研究所フロンティア創造総合研究室・上席研究員



研究の概要（4行以内）

可視から中赤外にわたる広い波長範囲に感度を持ち、数 10 ps という優れた光子検出時間精度を持つ超伝導ナノワイヤ検出器アレイと極低温で動作する超低消費電力なデジタル信号処理技術を組み合わせて、位置分解能、時間分解能、高い検出効率を兼ね備えたシングルフォトンカメラとも呼ぶべき革新的光子イメージング技術の創出を目指す。

研究分野：電気電子工学

キーワード：単一光子検出器、イメージセンサ、超伝導デジタル信号処理

1. 研究開始当初の背景

光子の空間・時間情報の高精度な検出は、量子情報処理、量子通信、光子分光、天体観測、バイオイメージング等、幅広い分野で重要となる基盤技術である。現状最も優れた感度を持つイメージセンサである冷却 CCD は月明かり（約 1 ルックス）の 1 億分の 1 の光を検出することが可能であるが、光子数に換算すると 1 秒あたり数万個に相当する。それよりも微弱な光を検出するためには光子計数が可能な光電子増倍管やアバランシェ光検出器を用いる必要があるが、イメージセンサとして機能する大規模フォーマットのアレイはこれまでのところ実現していない。超伝導ナノワイヤ光子検出器（SSPD）は、深紫外から中赤外に渡る幅広い波長範囲に感度を持ち、量子情報分野での利用が進んでいる。1.55 μm での検出効率は 90% を超え、1 cps 以下の低暗計数率、20 ps 以下のタイミングジッタという優れた低ノイズ性、高時間精度を有している。SSPD の 2 次元アレイ化により、深紫外～赤外での高い検出感度、超低ノイズ、高い空間・時間分解能を兼ね備えた光子イメージング技術の実現が可能である。

2. 研究の目的

単一磁束量子（SFQ）回路、断熱型磁束量子パラメトロン（AQFP）回路による極低温信号処理技術を導入することにより、これまでの信号読み出しによる限界を打破し、超伝導シングルフォトンカメラとも呼ぶべき 100

x 100 ピクセル規模の SSPD アレイを実現し、高い空間・時間分解能を持つ革新的光子イメージング技術の創出を目指す。

3. 研究の方法

NIST が提案する行列読み出し方式の 2 次元 SSPD アレイと極低温信号処理を組み合わせた図 1 に示す構成で、大規模 SSPD イメージセンサの実現を目指す。極低温信号処理回路として、これまで取り組んできた SFQ 回路に加えて、より小さなバイアス電流で駆動可能な AQFP を導入する。SSPD アレイ信号処理回路の作製は AIST Nb 標準プロセスを用いて行い、最終的に 100 x 100 ピクセル規模の SSPD イメージセンサを実現し、光子分光システムやバイオイメージングでその有用性の実証を目指す。

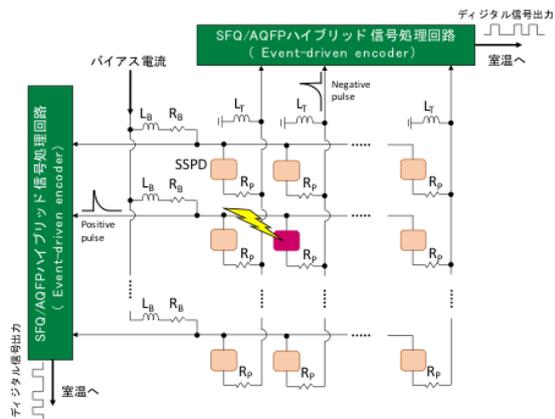


図 1 超伝導単一光子イメージセンサの構成

4. これまでの成果

図1に示す我々のアプローチの原理実証を目的として、比較的小規模な4x4ピクセル行列読み出し方式 SSPD アレイの動作テストを行った。行列読み出し方式の SSPD アレイ用の多層配線プロセスを新たに開発し、行列読み出し用のSFQエンコーダ回路はNICTで設計、設 AIST Nb 2.5 kA/cm² 標準プロセスを用いて作製した。

図2に行列読み出し方式4x4ピクセル SSPD アレイのチップ実装写真とテスト出力波形を示す。光子を検出したことを示すビット出力に引き続き、4x4すべてのピクセルに対してアドレス情報が正常にバイナリコードとして出力されており、4x4ピクセル SSPD アレイから、2本の同軸ケーブルで、光子検出の時間情報、位置情報を室温環境に取り出すことができている。すべてのピクセルで80 ps以下という優れた読み出し時間精度で信号読み出しが可能であることも確認された。

32x32ピクセル SSPDアレイ用のSFQエンコーダの0.1 W GM冷凍機での動作にすでに成功しており、現在 SSPDアレイの試作を進めている。SSPDアレイ単体の評価で中央の5x5ピクセル(冷凍機の配線数で制限)について正常動作を確認しており、出力電流値としてもSFQ回路で十分検出可能な14 μAが得られている。

また、極低温信号処理回路のさらなる電力削減を目的として、4ピクセル SSPDアレイ読み出し用SFQ/AQFPハイブリッド読

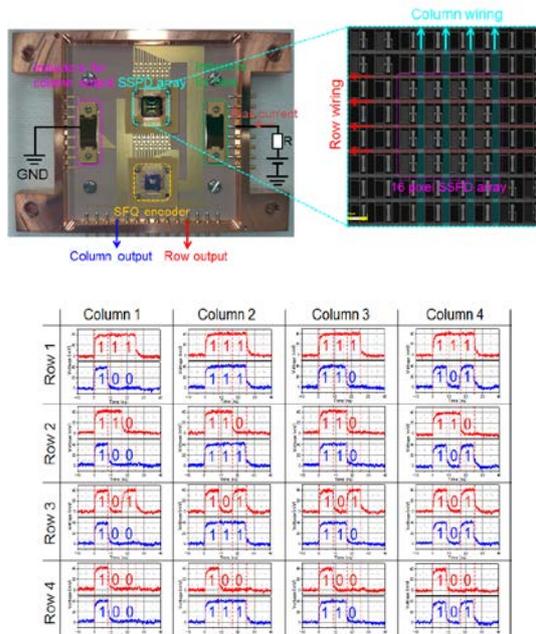


図2 SFQエンコーダを用いた行列読み出し方式4x4ピクセル SSPDアレイのチップ実装写真と出力波形
読み出し回路を設計・評価し、正常動作を確

認した。この回路は、SFQエンコーダに比べて、大規模化してもバイアス電流が増加しないため、100x100ピクセルに向けたさらなる大規模化において重要な技術になると考えている。

SSPDアレイの応用が期待される光子分光計測技術についても、量子的なフーリエ操作による量子もつれ光子のスペクトル操作の原理検証実験に成功し、SSPDアレイによる周波数自由度を利用した量子情報技術の高機能化の見通しが得られた。

5. 今後の計画

32x32ピクセル SSPDアレイの動作実証に向けた要素技術はすでに揃っており、早期に実証実験を行う予定である。100x100ピクセルに向けたモノリシック集積化の検討、空間光入力冷凍機システムに SSPDアレイを実装したシステム性能評価、光子分光計測への適用を進めていく予定である。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. R. Jin, K. Tazawa, N. Asamura, M. Yabuno, S. Miki, F. China, H. Terai, K. Minoshima, R. Shimizu, “Quantum optical synthesis in 2D time-frequency space,” arXiv:2002.08197.
2. N. Takeuchi, T. Yamashita, S. Miyajima, S. Miki, N. Yoshikawa, and H. Terai, “Demonstration of a superconducting nanowire single-photon detector using adiabatic quantum-flux-parametron logic in a 0.1-W Gifford-McMahon cryocooler,” IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 29, no. 5, pp. 2201004-2201008, 2019.
3. S. Miyajima, M. Yabuno, S. Miki, and H. Terai, “Single-Flux-Quantum based Event-Driven Encoder for Large-Pixel Superconducting Nanowire Single-Photon Detector Array,” IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 29, no. 5, pp. 2200804-2200807, 2019.
4. S. Miyajima, M. Yabuno, S. Miki, T. Yamashita, and H. Terai, “High-time resolved 64-ch single-flux-quantum based address encoder integrated with multi-pixel superconducting nanowire single-photon detector,” Optics Express, vol. 26, no. 22, pp. 29045-29054, Oct. 2018.

7. ホームページ等

<http://www2.nict.go.jp/frontier/super/terai@nict.go.jp>