

4-2 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の開発

寺井弘高

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) は、高検出効率、高最大計数率、低暗計数率、低ジッタという優れた特長から、量子情報分野を中心に量子光学基礎実験や量子暗号通信等のシステム実証実験で、既に数多く利用されている。本稿では、主に量子情報分野での応用を目指した我々の SSPD システムの開発状況を紹介するとともに、更なる高性能化や応用分野の拡大を目指した最近の研究開発への取組について紹介する。

1 まえがき

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) は、深紫外から中赤外という広い波長帯域に感度を持ち、特に通信波長帯である 1,550 nm (1 nm は 1 mm の百万分の 1) において半導体を用いた光子検出器であるアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photo Diode: APD) よりも、検出効率 (出力カウント数を入力光子数で割った値)、最大計数率 (一定時間にカウントできる光子数)、暗計数率 (光入力のない状態での出力カウント数、つまりノイズ)、ジッタ (出力信号の時間揺らぎ) など、多くの点で優れている [1]-[5]。我々のプロジェクトでは、量子鍵配送 (QKD: Quantum Key Distribution) システムでの実用化を目指して SSPD の研究開発に着手し、6 チャンネルの SSPD を 100 V 電源で動作する小型の機械式冷凍機に実装したマルチチャンネル SSPD システムを開発した [6]。我々の開発した SSPD システムは、1,550 nm における検出効率が 80 % 達成しており [7]、東京 QKD ネットワーク実証実験や [8]、量子光学分野の基礎実験でも使用され [9][10]、数多くの優れた成果の創出に貢献している。一方で、光子検出器の応用範囲は、通信・計測から、バイオ・医療まで多岐にわたっている。これらの応用の多くでは 1,000 nm 以下の光が検出対象であり、これまでは光子検出器としてシリコン APD や光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube: PMT) が利用されてきた。シリコン APD の可視波長帯における検出効率は 70 % に達しており、SSPD が今後これらの光子検出器と競合し、その応用範囲を拡大していくためには、単に検出効率が優れているだけでなく、最大計数率、暗計数率、ジッタ等の総合的な性能で優位性を築くことが重要である。

本稿では、主に 1,550 nm の光を対象として我々がこれまでに行った SSPD の研究開発を総括するとともに、更なる応用範囲の拡大や高性能化を目指して、我々

が現在取り組んでいる広波長帯域化、マルチピクセル化について紹介する。

2 マルチチャンネル SSPD システムの開発

2.1 SSPD のデバイス構造と動作原理

図 1 に SSPD のデバイス構造 (a) と光子検出原理 (b) を示す。SSPD の光子検出原理を一言でいえば光子 1 個のエネルギーで超伝導状態を壊すということになる。そのためには超伝導体の容積を極限まで小さくする必要があり、厚さ 5 nm 程度の超伝導薄膜を、幅 100 nm 以下に加工した超伝導ナノワイヤが用いられている。この超伝導ナノワイヤが光子を吸収すると、ホットスポットと呼ばれる局所的に超伝導状態が壊れた領域ができる。超伝導ナノワイヤにバイアス電流を十分に印加した状態では、このホットスポットの発生をトリガーとして、ホットスポット周辺の超伝導電流密度がある臨界値 (これを上回ると超伝導状態が壊れるという値) を超え、ナノワイヤ断面全体の超伝導状態が壊れる。これによりナノワイヤの両端に数 k Ω の抵抗が発生するため、バイアス電流は負荷側の 50 Ω を流れ、その間にホットスポット周辺のジュール熱が基板に拡散し、ホットスポット周辺は超伝導状態に戻る。最終的に、バイアス電流が再び超伝導ナノワイヤを流れた初期状態に戻る。超伝導ナノワイヤ両端の電圧をモニ

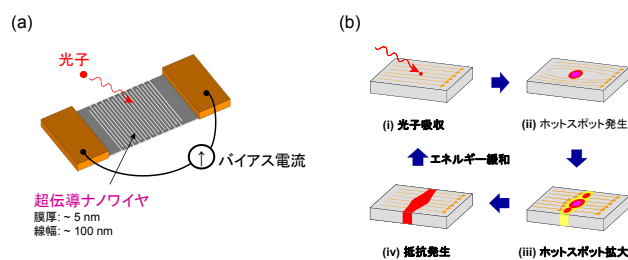


図 1 (a) SSPD のデバイス構造 (b) 光子検出原理

4 量子ノード技術

タしている、光子を吸収するごとに、スパイク状の電圧パルスが現れる。この電圧パルスを室温の計測機器でモニタすることで光子を検出できる。

2.2 高検出効率 SSPD システムの開発

SSPD の動作原理はいたってシンプルであるが、高い検出効率を実現するためには、いくつかの技術的なハードルがある。SSPD の検出効率を決める 3 つの要素として、光ファイバとの結合効率、ナノワイヤの光吸収効率、パルス生成確率がある (図 2)。我々は通信波長帯で使われるシングルモード (SM) ファイバからの光が漏れなく受光面に照射されるよう、専用のファイバパッケージを開発した。SSPD の受光面は SM ファイバのコア径 (約 $10\ \mu\text{m}\phi$) より大きい $15 \times 15\ \mu\text{m}^2$ とし、ファイバの終端に Graded Index (GRIN) レンズを融着し、受光面にフォーカスすることで、ほぼ 100 % のファイバ結合効率を達成した [11]。

超伝導ナノワイヤの膜厚は 5 nm 程度と薄く、単層の薄膜では光の透過や反射により、高い光吸収効率を実現することが難しい。そこで、我々はダブルサイドキャビティと呼ばれるデバイス構造を採用し、光をシリコン基板と金属反射層との間に閉じ込めることで、ナノワイヤ近傍で光電界強度が最大となるよう素子構造を最適化した。その結果、1,550 nm の光に対して 90 % を超える光吸収効率を実現した。超伝導ナノワイヤが素子全体に占める面積比率 (フィリングファクタ) は通常 50 % 程度であるが、ダブルサイドキャビティ構造ではフィリングファクタを 25 % 以下にしてもこれまでと変わらない光吸収効率が見いだした [7][12]。フィリングファクタを小さくする

ことで、ナノワイヤ長が短くなるため、より高い計数率を実現できる。

最後のパルス生成確率とは、図 1 の原理に従って光子吸収によりナノワイヤの超伝導状態が壊れる確率である。受光面に敷き詰めた超伝導ナノワイヤのどこか一箇所にでも膜質や線幅に不均一があると、その部分の超伝導臨界電流密度が低くなるため、ナノワイヤに供給できるバイアス電流はこの臨界電流の最も小さい部分で制限され、他の正常な部分に十分なバイアス電流を供給できない。この場合、超伝導ナノワイヤが光子を吸収しても超伝導状態が壊れない確率が高くなる。高いパルス生成確率を実現するためには、非常に薄く、細く、長い超伝導ナノワイヤを均一に作製することが重要となる。我々は、薄膜表面が酸化しにくい窒化物超伝導体 (NbN, NbTiN) を薄膜材料として採用し、特性の均一性に優れた厚さ 5 nm の極薄膜を実現した。また、パターンニングには加速電圧 125 kV の電子線描画を導入し、高いパターンニング精度で幅 100 nm のナノワイヤを実現した。その結果、パルス生成確率においても 90 % 以上の値を実現した。

図 3 に NICT で開発した 6 チャンネル SSPD システムの外観と性能をまとめた。先述した 3 つの要素をそれぞれ最大化することで、1,550 nm における検出効率として 80 % を実現した [7]。この値は、半導体材料に InGaAs を用いた APD の 20 % と比べても圧倒的に優れており、また暗計数率についても、InGaAs APD では 10,000 (カウント/秒) 以上あるが、SSPD では 100 (カウント/秒) 以下と圧倒的に低い。InGaAs APD にはアフターパルスと呼ばれる検出器の応答と相関を持つノイズがあり、このノイズを抑制

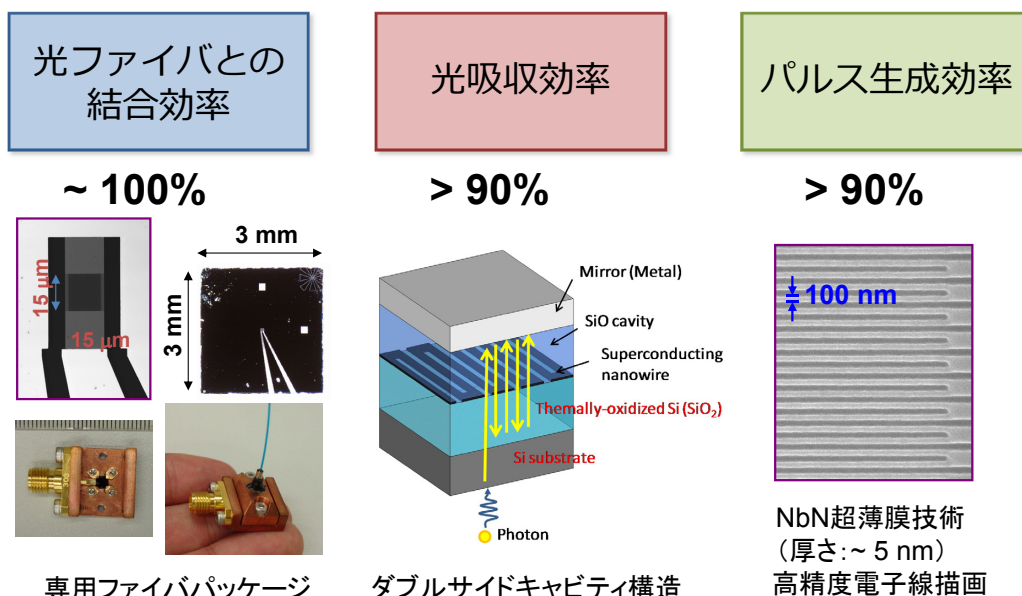


図 2 SSPD の検出効率に影響を及ぼす 3 大要素

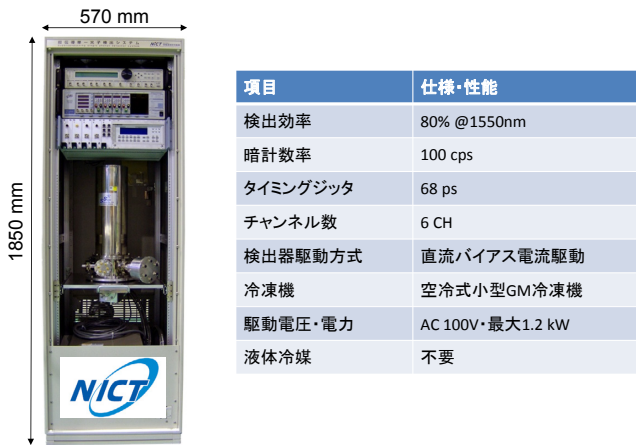


図3 6チャンネル SSPD システムの外観と仕様・性能

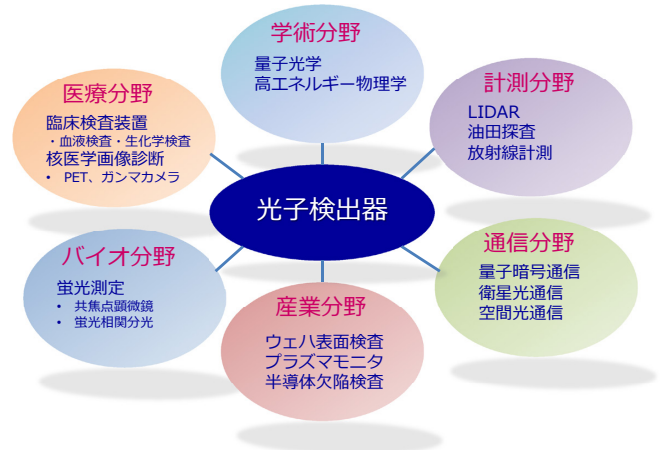


図4 光子検出器の応用分野

するために光信号と同期したゲートバイアスが必要であるが、暗計数が小さくアフターパルスのない SSPD では直流のバイアス電流による駆動が可能であることも大きな利点である。

我々は、SSPD の優れた性能をより使いやすい形でユーザーに提供するため、6チャンネルの SSPD を 100 V 電源で動作する小型の機械式冷凍機 (0.1 W Gifford McMahon 冷凍機) に実装し、システム全体を 19 インチラックに収納したマルチチャンネル SSPD システムを開発した [6]。この機械式冷凍機は水冷が不要で、スイッチを入れるだけで SSPD を 2.5 K 以下に冷却できる。機械式なので、液体ヘリウム等の冷媒は一切不要で、メンテナンスフリーで長時間の連続運転が可能である。いつでも、どこでも、誰もが手軽に利用できる光子検出システムとして、東京 QKD ネットワークのシステム実証実験をはじめとする数多くの量子情報分野における実験で既に使用されている [8]–[10]。

3 応用範囲の拡大に向けた取組

3.1 広波長帯域化

これまで、主に量子情報分野での応用を想定して 1,550 nm の光波長に対して光吸収効率が最大となるよう SSPD のデバイス構造を最適化してきたが、光子検出器の応用範囲は、通信・計測から、バイオ・医療まで多岐にわたっている (図 4)。使われる光波長は応用によって異なるため、今後 SSPD をより幅広い分野に応用していくためには、1,550 nm だけでなく様々な波長の光を検出できることが重要となる。光子のエネルギーで超伝導状態を壊すという SSPD の光子検出原理を考えると、よりエネルギーの高い短波長の光ほど高いパルス生成効率を実現するうえで有利であるが、図 2 (b) のダブルサイドキャビティ構造では、シリコン基板の裏面から光を照射するため、シリコンのバン

ドギャップよりもエネルギーの大きい $1\mu\text{m}$ 以下の光は基板に吸収されてしまう。そこで、 $1\mu\text{m}$ 以下の光波長にも対応でき、より柔軟な設計が可能なデバイス構造として、図 5 に示す誘電体多層膜を用いたデバイス構造を検討した [13][14]。異なる屈折率を持つ 2 種類の誘電体 (我々の実験では SiO_2 と TiO_2) の膜厚や周期を変えることで、超伝導ナノワイヤに吸収される光波長を自在に設計することができる。

我々は、構造の最適化に要する時間を削減するため、マトリックス法と有限要素法を併用した最適化手法を考案した。まず、誘電体多層膜上に単層のナノワイヤに加工していない NbN 薄膜が付いた構造で、マトリックス法 (例えば Essential MacLeod 等の光学薄膜最適化ソフトウェア) を用いて所望の光波長で高い光吸収効率が得られるよう SiO_2 と TiO_2 の膜厚、周期を最適化する。次に、NbN 薄膜を実際の SSPD のデバイス構造であるメアンダ状のナノワイヤとして、今度は有限要素法 (COMSOL 等のソフトウェアを使用) を用いて、偏波依存性まで含めた光吸収効率の光波長依存性を計算する。マトリックス法と併用することで、最初から有限要素法を用いて計算するよりも、大幅な計算時間の削減が可能となる。この手法により 650 ~ 900 nm を目標波長として誘電体多層膜の構造を最適化して得られた光吸収効率の光波長依存性を図 5 に示す。650 ~ 900 nm の範囲で高い光吸収効率を実現し、それ以外の波長では光吸収効率が低く抑えられていることがわかる。この構造の SSPD を実際に作製・評価して、光吸収効率をプロットした結果を、図 5 に重ねて示す。実験で得られた光吸収効率は、計算で得られた結果とよく一致しており、我々の最適化手法が有効であることがわかる [13][14]。

SSPD の暗計数率の起源については諸説あるが、低バイアス領域での SSPD の暗計数率は光ファイバを通して入射する室温の黒体放射が支配的である [15]。誘

4 量子ノード技術

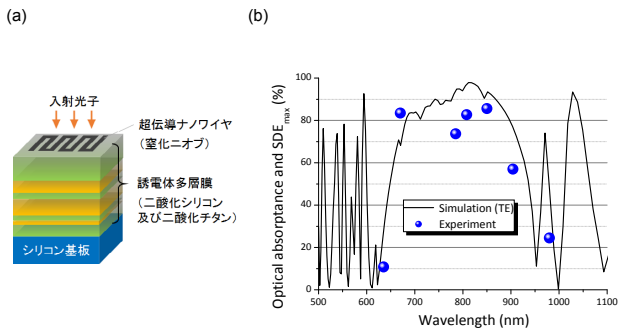


図5 誘電体多層膜を用いたデバイス構造とその光吸収効率の波長依存性

電体多層膜を用いることで、検出したい波長以外の光の吸収を抑制することが可能であるため、黒体放射による暗計数率の低減にも有効であると考えられる。今後、様々な光波長に対して誘電体多層膜を用いたデバイス構造を適用していくと同時に、暗計数率の低減という観点でその有効性を検証していく予定である。

3.2 マルチピクセル化

1 μm 以下の光波長では Si APD でも検出効率は 70% に達しており、SSPD が今後その応用範囲を広げていくためには、単に検出効率が高いというだけでなく、最大計数率、暗計数率、ジッタといった総合的な性能で、既存技術と競合し、優位性を実証していく必要がある。

SSPD の特長の 1 つに高い最大計数率があるが、原理的には光子の吸収により発生したホットスポットの準粒子緩和時間で決まり、潜在的に 1 GHz での動作も可能と考えられている。しかしながら、コア径 10 μm 程度のシングルモードファイバと損失なく結合するためには 15 μm 角程度の受光面積が必要であり、幅 100 nm の超伝導ナノワイヤをメアンダ状に受光面全体に敷き詰めると、ナノワイヤのカイネティックインダクタンス L_K は 1 μH に達する。そのため、SSPD の不感時間（ある光子を検出してから次の光子を検出できる状態に回復する時間）は L_K と負荷抵抗 R との比 (L_K/R 時定数) により制限され、現状の SSPD の最大計数率は数 10 MHz である。これは APD 等の競合技術と比べても、必ずしも優位な数値とは言えない。また、応用によっては（特に可視波長帯で使用する場合）、コア径が 50 μm と SM ファイバに比べて大きいマルチモードファイバとの結合が必要であり、より大きな受光面積が必要となる。その結果、不感時間は更に増大し、最大計数率が低下する。

この L_K による最大計数率の限界を克服するため、SSPD のマルチピクセル化が提案されている [16]。図 6 にマルチピクセル化のメリットをまとめた。マルチピクセル化により、全体としてファイバとの結合に

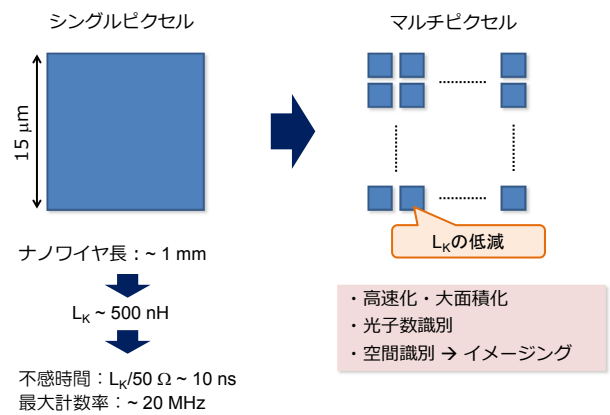


図6 SSPD のマルチピクセル化

必要な受光面積を確保しつつ、個々のピクセルの小型化により L_K を低減し、検出効率を犠牲にすることなく不感時間を短縮できる。マルチピクセル化は大面積化による不感時間の増大を抑えるうえでも有効である。

また、シングルピクセルの SSPD は光子数識別能力を持たないが、マルチピクセル SSPD では別々のピクセルに同時入射した複数の光子を検出できるため、疑似的ではあるが光子数識別が可能となる。将来的に百万ピクセル規模のマルチピクセル化が可能となれば、フォトンカウンティングレベルの感度を持つ究極のカメラの実現も夢ではない。

マルチピクセル SSPD を実現するうえでの最大のボトルネックは出力信号の読み出しである。一般に広帯域な同軸ケーブルほど熱の良導体であり、冷凍機への熱負荷という観点で、小型の機械式冷凍機に実装できるケーブル本数には限界がある。NICT では、読み出しのケーブル本数を削減するため、世界に先駆けて単一磁束量子 (Single Flux Quantum: SFQ) 論理回路による極低温信号処理を提案し [17]、これまでに SSPD からの信号読み出し及び多重化動作 [18][19]、4 ピクセル SSPD の SFQ 回路による信号多重化まで含めたクロストークフリー動作 [20]、SFQ 読み出し回路による従来手法に比べて低タイミングジッタでの信号読み出しの実証に成功している [21]。また、更に大規模なマルチピクセル化の試みとして 64 ピクセル SSPD イメージングシステムの開発も行っている。既に、SSPD の各ピクセルの検出効率を個別に評価し、ファイバ照射光のビームプロファイルの再現に成功しており [22]、現在 64 ピクセル SSPD 用のエンコーダ回路の開発を進めている。エンコーダ回路とは、光子を検出したピクセルの位置情報をコード化して、1 本の同軸ケーブルで読み出すための回路であり、これにより 64 ピクセル SSPD によるリアルタイムのイメージングが可能となる。光子を検出するごとに回路内部でクロックを生成するイベント駆動型の回路とすることで、光子の

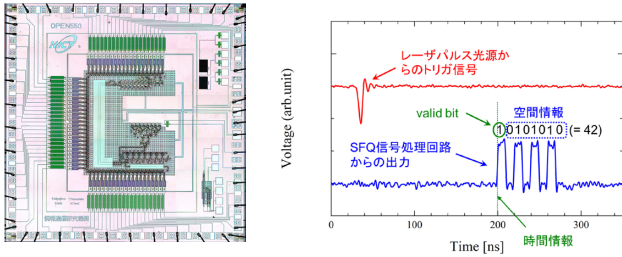


図7 64ビットイベント駆動型SFQエンコーダのチップ顕微鏡写真と出力波形

位置情報だけでなく、時間情報も検出できる設計となっている。飛行時間計測は、光子がある計測点から行って帰ってくる時間を計測することで対象物までの距離が測れる。それは、対象物の深さ方向の情報であり、どのピクセルが光子を検出したかで再現する2次元画像に加えて、深さ方向の情報が加わり3次元画像が得られる。

SFQ回路は低消費電力での動作を特長とするが、非常に低インピーダンスの回路であり、ジョセフソン接合1万個を含む回路を駆動するには約1 Aのバイアス電流が必要である。図7に64ビットイベント駆動型SFQエンコーダ回路の顕微鏡写真と出力波形を示す。当初の設計では回路の駆動に370 mAのバイアス電流が必要であったが、冷凍機に実装してテストしたところ、バイアスケابلで発生するジュール熱による冷凍機の温度上昇が無視できないことがわかった[23]。そこで、回路設計を抜本的に見直し、最終的にバイアス電流を150 mAにまで低減することで、小型の機械式冷凍機で動作させることに成功した。この64ビットエンコーダ回路を64ピクセルSSPDと同一のサンプルブロックに実装し、SSPDに光照射しながらSFQエンコーダ回路の出力を観測した。その結果、光信号入力と同期して、光子を検出したピクセルのアドレス情報(バイナリコード)が出力されており、マルチピクセルSSPDがSFQエンコーダ回路と組み合わせて動作することが確認された[24]。今後は、室温の信号処理も含めてリアルタイムでのイメージング動作を実証すると同時に、米国国立標準技術研究所(NIST)のグループが提案している $N \times N$ ピクセルSSPDから $2N$ 本の出力で信号を読み出す手法等を取り入れつつ[25]、SFQ信号処理というNICTの強みを活かして、更なる大規模ピクセル化を進めていく予定である[26]。

SFQ信号処理の究極のゴールは、マルチピクセルSSPDとのモノリシック集積化である。我々は、16ピクセルSSPDとSFQ多重化回路のモノリシック集積化に既に取り組んでおり、マルチピクセルSSPDと同一基板上に集積化したSFQ回路を介してSSPDからの光検出信号を読み出すことに成功している[27]。し

かしながら、現状の検出効率は0.25%程度と、シングルピクセルのSSPDで得られている80%の検出効率に比べて著しく低い。SFQ回路の作製プロセスで、薄膜のストレスによりSSPDの光キャビティを構成するSiO₂薄膜の一部に剥離が発生するなど、作製プロセス上の課題がまだ数多く残っており、膜の付着性の向上、薄膜のストレス緩和等、今後改善を図っていく必要がある。

4 今後の展望

SSPDの性能はこの5年ほどで劇的に向上し、本稿でも述べたようにその検出効率は既に80%に達している。今後は、応用範囲を拡大するために、様々な波長の光に対して高い検出効率を実現するとともに、高計数率、低暗計数率、低ジッタという検出効率以外のSSPDの特長も活かして、他の競合する光子検出器と性能を差別化していくことが重要である。その際にユーザーの要求をどれだけの確にとらえて研究開発を進めていくかが重要になると考えている。本稿では紹介できなかったが、NICTではSSPDのバイオ・医療分野での応用を目指して、蛍光相関分光(FCS)への適用を進めている。これは、SSPDのアフターパルスがないという低ノイズ性、高速性に着目した応用で、FCSで使用する可視波長用のSSPDを開発し[28]、シリコンAPDでは難しかった分子の回転拡散の観測に成功している[29][30]。また、深宇宙通信への応用を目指した大面積のマルチピクセルSSPDの開発にも、宇宙通信研究室の研究者と連携しながら取り組んでいる。今後、どれだけ新たな需要を発掘し、その中で既存の光子検出器との性能競争を勝ち抜き、応用分野を広げていけるかが研究開発の鍵となると考えている。

謝辞

本稿の執筆にあたり、日頃から議論していただいているフロンティア創造総合研究室・超伝導デバイスプロジェクトの三木茂人主任研究員、山下太郎主任研究員、宮嶋茂之研究員、藪野正裕研究員、川上彰主任研究員、今村三郎研究技術員に感謝する。また、SFQ回路の作製でご協力いただいた産業技術総合研究所の永沢秀一氏、日高睦夫氏、FCSに関して有益なご議論を頂いたフロンティア創造総合研究所の原口徳子主任研究員、大阪大学大学院生命機能研究科の平岡泰教授、北海道大学大学院先端生命科学研究院の金城正孝教授、山本条太郎氏に感謝する。本研究の一部は科学研究費(基盤研究(A) No. 26249054)の助成を受けたものである。

【参考文献】

- 1 G. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardarov, C. Williams, and R. Sobolewski, "Picosecond superconducting single-photon optical detector," *Appl. Phys. Lett.* 79, pp.705-707 2001.
- 2 E. Dauler, M. Grein, A. Kerman, F. Marsili, S. Miki, S. W. Nam, M. Shaw, H. Terai, V. Verm, and T. Yamashita, "Review of Superconducting Nanowire Single Photon Detector System Design Options and Demonstrated Performance," *Opt. Engineering* 53, 061907, 2014.
- 3 F. Marsili, V. Verma¹, J. Stern, S. Harrington¹, A. Lita, T. Gerrits, I. Vayshenker, B. Baek, M. D. Shaw, R. P. Mirin¹, and S. W. Nam, "Detecting single infrared photons with 93 % system efficiency," *Nature Photonics* 7, pp.210-214, 2013.
- 4 D. Rosenberg, A. J. Kerman, R. J. Molnar, and E. A. Dauler, "High-speed and high-efficiency superconducting nanowire single photon detector array," *Opt. Express* 21, 1440, 2013.
- 5 S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, and Z. Wang, "High performance fiber-coupled NbTiN superconducting nanowire single photon detectors with Gifford-McMahon cryocooler," *Opt. Express* 21, 10208, 2013.
- 6 S. Miki, T. Yamashita, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Multichannel SNSPD system with high detection efficiency at telecommunication wavelength," *Opt. Lett.* 35, pp.2133-2135, 2010.
- 7 <http://www.nict.go.jp/press/2013/11/05-1.html>
- 8 M. Sasaki, M. Fujiwara, H. Ishizuka, W. Klaus, K. Wakui, M. Takeoka, S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, A. Tanaka, K. Yoshino, Y. Nambu, S. Takahashi, A. Tajima, A. Tomita, T. Domeki, T. Hasegawa, Y. Sasaki, H. Kobayashi, T. Asai, K. Shimizu, T. Tokura, T. Tsurumaru, M. Matsui, T. Honjo, K. Tamaki, H. Takesue, Y. Tokura, J. F. Dynes, A. R. Dixon, A. W. Sharpe, Z. L. Yuan, A. J. Shields, S. Uchikoga, M. Legre, S. Robyr, P. Trinkler, L. Monat, J.-B. Page, G. Ribordy, A. Poppe, A. Allacher, O. Maurhart, T. Langer, M. Peev, and A. Zeilinger, "Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network," *Opt. Express* 19, 10387, 2011.
- 9 T. Kobayashi, R. Ikuta, S. Yasui, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, "Frequency-domain Hong-Ou-Mandel interference," *Nat. Photonics* 10, pp.441-444, 2016.
- 10 R. Ikuta, T. Kobayashi, K. Matsuki, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, T. Yamamoto, M. Koashi, T. Mukai, and N. Imoto, "Heralded single excitation of atomic ensemble via solid-state-based telecom photon detection," *Optica* 3, 1279, 2016.
- 11 S. Miki, M. Takeda, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Compactly packaged superconducting nanowire single-photon detector with an optical cavity for multichannel system," *Opt. Express* 17, pp.23557-23564, 2009.
- 12 T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, and Z. Wang, "Low-filling-factor superconducting single photon detector with high system detection efficiency," *Optics Express* 22, 27177, 2013.
- 13 T. Yamashita, K. Waki, S. Miki, R. Kirkwood, R. Hadfield, and H. Terai, "Superconducting nanowire single-photon detectors with non-periodic dielectric multilayers," *Scientific Reports* 6, 35240, 2015.
- 14 <http://www.nict.go.jp/press/2016/10/24-1.html>
- 15 T. Yamashita, S. Miki, K. Makise, W. Qiu, H. Terai, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Origin of intrinsic dark count in superconducting nanowire single-photon detectors," *Appl. Phys. Lett.* 99, 161105, 2011.
- 16 E. A. Dauler, B. S. Robinson, A. J. Kerman, J. K. W. Yang, K. M. Rosfjord, V. Anant, B. Voronov, G. Gol'tsman, and K. K. Berggren, "Multi-Element Superconducting Nanowire Single-Photon Detector," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17, (2007) 279.
- 17 H. Terai, S. Miki, and Z. Wang, "Readout electronics using single-flux-quantum circuit technology for superconducting single-photon detector array," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 19, 350, 2009.
- 18 H. Terai, S. Miki, T. Yamashita, K. Makise, and Z. Wang, "Demonstration of single-flux-quantum readout operation for superconducting single-photon detectors," *Appl. Phys. Lett.* 97, 112510, 2010.
- 19 S. Miki, H. Terai, T. Yamashita, K. Makise, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Superconducting single photon detectors integrated with single flux quantum readout circuits in a cryocooler," *Appl. Phys. Lett.* 99, 111108, 2011.
- 20 T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise, and Z. Wang, *Opt. Lett.*, "Crosstalk-free operation of multielement superconducting nanowire single-photon detector array integrated with single-flux-quantum circuit in a 0.1 W Gifford McMahon cryocooler," *Opt. Lett.* 37, 2982, 2012.
- 21 H. Terai, T. Yamashita, S. Miki, K. Makise, and Z. Wang, "Low-jitter single flux quantum signal readout from superconducting single photon detector," *Opt. Express* 20, 20115, 2012.
- 22 S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, and Z. Wang, "High detection efficiency fiber-coupled NbTiN superconducting nanowire single photon detectors with Gifford-McMahon cryocooler," *Opt. Express* 21, 10208, 2013.
- 23 H. Terai, K. Makise, T. Yamashita, S. Miki, and Z. Wang, "Design and testing of SFQ signal processor for 64-pixel SSPD array," *Applied Superconductivity Conference 1EO1A-03*, 2014.
- 24 S. Miyajima, T. Yamashita, S. Miki, and H. Terai, "A Cryogenic Event-Driven Encoder Based on Single-Flux-Quantum Circuit for Multi-Pixel Superconducting Single-Photon Detectors," *Applied Superconductivity Conference 3EO1B-05*, 2016.
- 25 M. S. Allman, V. B. Verma, M. Stevens, T. Gerrits, R. D. Horansky, A. E. Lita, F. Marsili, A. Beye, M. D. Shaw, D. Kumro, R. Mirin, and S. W. Nam, "A near-infrared 64-pixel superconducting nanowire single photon detector array with integrated multiplexed readout," *Appl. Phys. Lett.* 106, 192601, 2015.
- 26 M. Yabuno, S. Miyajima, S. Miki, T. Yamashita, and H. Terai, "Design for Building the Large-scale Superconducting Nanowire Single-photon Detector Imaging Array," *International Superconducting Electronics Conference We-SQE-19*, 2017.
- 27 H. Terai, S. Nagasawa, S. Miyajima, T. Yamashita, S. Miki, M. Yabuno, and M. Hidaka, "Design of large-scale superconducting nanowire single-photon detector array monolithically integrated with cryogenic single-flux-quantum signal processor," *Applied Superconductivity Conference 3EO1B-03*, 2016.
- 28 T. Yamashita, D. Liu, S. Miki, J. Yamamoto, T. Haraguchi, M. Kinjo, Y. Hiraoka, Z. Wang, and H. Terai, "Fluorescence correlation spectroscopy with visible-wavelength superconducting nanowire single-photon detector," *Opt. Express* 22, 28783, 2014.
- 29 J. Yamamoto, M. Oura, T. Yamashita, S. Miki, T. Jin, T. Haraguchi, Y. Hiraoka, H. Terai, and M. Kinjo, "Rotational diffusion measurements using polarization-dependent fluorescence correlation spectroscopy based on superconducting nanowire single-photon detector," *Opt. Express* 23, 32633, 2015.
- 30 <https://www.nict.go.jp/press/2015/12/22-1.html>



寺井弘高 (てらい ひろたか)

未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室
上席研究員
博士(工学)
超伝導エレクトロニクス、量子情報通信