

## 超伝導ナノワイヤを用いた単一光子検出器の技術動向

国立研究開発法人情報通信研究機構  
未来ICT研究所フロンティア創造総合研究室 主任研究員

みき しげひと  
三木 茂人

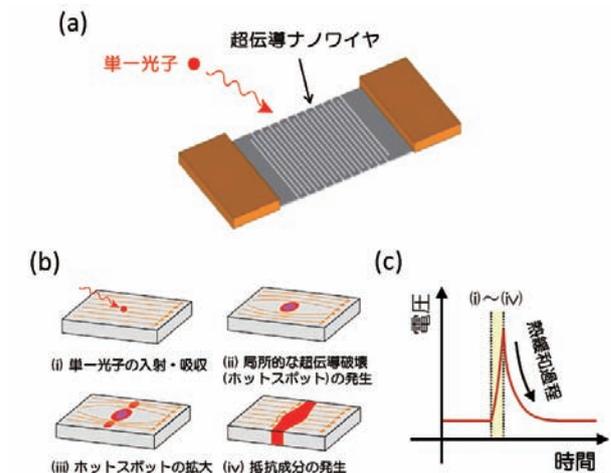


### 1. はじめに

光の最小単位である光子（フォトン）を捉えることのできる単一光子検出技術は、光子を情報担体として用いる量子情報通信技術分野や、深宇宙レーザー通信、レーザーセンシング、生細胞の蛍光観察など、多岐にわたる技術分野において必要不可欠な基盤技術となる。単一光子検出器としては様々なタイプのものが存在するが、超伝導ナノワイヤを利用した単一光子検出器（Superconducting Nanowire Single Photon Detector：SSPD）は、これまで広く用いられてきた光電子増倍管（Photo Multiplier Tube：PMT）や半導体アバランシェフォトダイオード（Avalanche Photo Diode：APD）に比べて、高い検出感度を有し（高検出効率）、誤り検出が少ない（低暗計数率）、時間揺らぎが少ない（低タイミングジッタ）、ゲート同期動作が不要である（ゲートフリー動作）等の優れた特徴を有している。2001年にSSPDの構造や動作原理についての提案がなされて以来、当初はその潜在性能や動作実証に多くの労力が費やされていたが、2005年頃に液体冷媒を必要としない機械式冷凍機を用いた検出システムや高効率光結合技術の発展により、汎用性の高いSSPDシステムが現れるようになると、量子暗号鍵配送試験をはじめとする様々な量子情報通信技術へ適用された。その後、SSPDの更なる高性能化や高機能化に関する研究開発が現在も国内外で積極的に進められている。本稿では、SSPDの研究開発動向について紹介する。

### 2. 超伝導ナノワイヤ単一光子検出（SSPD）システム

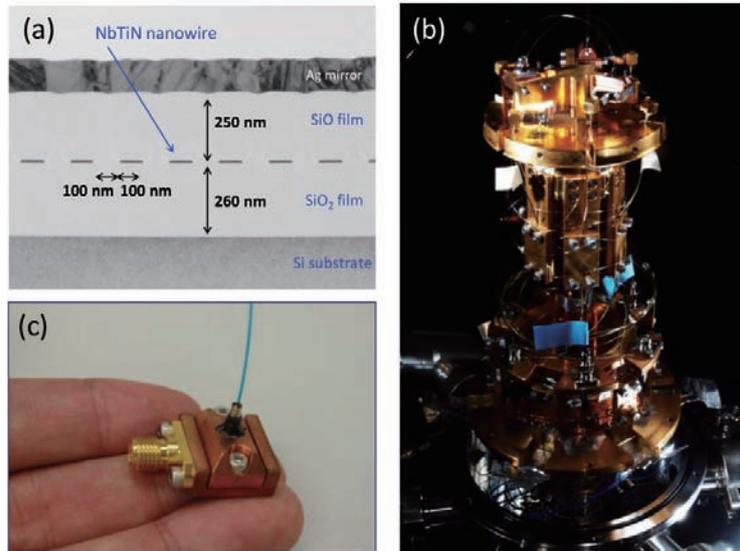
SSPD素子は図1 (a) に示すように、超伝導薄膜によるメアンダ状のナノワイヤによって構成されている。この超伝導ナノワイヤは超伝導転移温度 $T_c$ 以下では超伝導状態となる。このとき、超伝導臨界電流 $I_c$ よりもわずかに小さいバイアス電流 $I_b$ を流した状態にすると、ナノワイヤ中には超伝導電流が流れるために抵抗成分は発生しない。次に、超伝導ギャップエネルギー $2\Delta$ よりも十分に大きいエネルギーの単一光子が入射・吸収されると、超伝導ナノワイヤ中のクーパ対が破壊され、常伝導状態の領域（ホットスポット）が生成される（図1. (b) (i)）。超伝導電流はホットスポット



■ 図1. (a) SSPD素子の外観 (b) 単一光子検出原理 (c) 出力信号波形

以外の部分を流れるが（図1. (b) (ii)）、その部分の電流密度も増大し、ホットスポットがナノワイヤの端から端を覆うように拡大し（図1. (b) (iii)）、抵抗成分が発生する（図1. (b) (iv)）。ホットスポット中の励起電子はエネルギーを拡散することによって超伝導状態へと回復するが、このホットスポット生成、回復による素子の抵抗変化により、電圧パルスを信号として観測することができる（図1. (c)）。この過程において、抵抗成分を生成させるためには、入射光子よりも十分に小さいエネルギーギャップを有した超伝導材料を用いて極細く均一なナノワイヤを実現する必要がある。情報通信研究機構（NICT）では、エネルギーギャップが比較的小さく、極微細加工も可能である超伝導窒化ニオブチタン（NbTiN）薄膜を、線幅100nm以下にまで加工することで通信波長帯（1550nm）における単一光子に対して、高い感度を実現することに成功している。超伝導ナノワイヤは膜厚数nmの非常に薄い超伝導薄膜によって構成されているため、ナノワイヤ層の光吸収効率（例えばNbTiNで30%程度）によって検出効率が律則されてしまう。そこで、図2 (a) に示すように、誘電体層、反射層を備えた光キャビティ構造を採用することでナノワイヤ層の吸収効率を改善し、検出効率を向上させることに成功している。

SSPD素子を動作させるためには $T_c$ 以下にまで冷却する必要があるため、極低温冷却システムが必要となるが、様々



■図2. (a) SSPD素子断面TEM像 (b) シングルモード光ファイバ結合パッケージ (c) 多チャンネルSSPDシステム

な応用分野への適用を考えると、小型・簡便・連続運転可能な冷却システムが望ましい。我々は、量子情報通信技術への適用を見据え、小型可搬式ギフォード・マクマホン (GM) 冷凍機を用いたSSPDシステムを開発した。図2 (b) に多チャンネルSSPDシステムの写真を示す。GM冷凍機システムは液体冷媒を必要とせず、100V電源で自動冷却が可能となっている。また、連続運転が可能で試料ステージの最低到達温度は2.3K以下まで冷却可能となっている。開発された冷凍機システムは、図2 (c) に示すようなSSPD素子が実装されたパッケージを最大6個まで導入することが可能で、それぞれ独立した入出力ポートを備えているため、複数の検出器を必要とする応用にも1台のシステムで賄うことが可能となっている。実装されたSSPD素子は冷凍機内に導入された同軸ケーブルを通して、バイアス印可及び出力信号の取り出しが行われる。また、パッケージは1550nm波長帯用シングルモード (SM) ファイバが各SSPD素子と結合されており、室温に設置された光入力ポートから光子を入射することが可能となっている。

表1にNICTで開発されたSSPDシステムの性能を示す。2017年に開発された新型SSPDシステムにおいて、システム検出効率81%、暗計数7c/s、タイミングジッタ65psと優れた性能が得られている。SSPDシステムは、様々な量子情報通信技術や蛍光観察、レーザセンシング、深宇宙光通信技術への適用が既になされており、実用段階となっている。

■表1. NICT製通信波長帯 (1550nm) 用SSPDシステム性能 (注：同一素子における数値)

	従来型SSPDシステム (2013年)	新型SSPDシステム (2017年)
検出効率	75 %	81 %
タイミングジッタ	70 ps	65 ps
暗計数率	100 c/s	7 c/s
応答速度	~10 MHz	~80 MHz
動作温度	2.3 K	2.3 K

### 3. 高性能化へむけた取組み

表2にSSPDシステムにおいて重要となる各性能の変遷と将来目指す究極の目標値を示す。機械式冷凍機を用いた実用的なSSPDシステムが世に現れはじめたのは2005年頃であるが、当時に比べて各数値が飛躍的に向上している。その一方で、表1に示した各数値は同一のSSPD素子において同時に達成したわけではなく、現状としては各数値間においてトレードオフ関係にあるのが現状である。更なる性能向上及びこれらを同時に達成するための興味深い取組みについて、これまでの経緯とともに紹介する。

SSPDにおいて高い検出効率を実現するための取組みの一つとして、どのような超伝導材料を用いれば効率よく抵抗領域を形成することができるかについての探索が行われている。SSPDの提案時から用いられているNbNやNbTiN

■表2. SSPDの高性能化の変遷と将来目標値。  
(注：各数値は同一素子において達成した値ではない)

	2009年	2015年	2019年	将来目標値
検出効率	0.7%	93%	98%	99.9%
タイミングジッタ	60 ps	18 ps	2.6 ps	100 fs
暗計数率	< 10 c/s	< 1 c/s	< 1 c/day	< 1/day
応答速度	100 MHz	1 GHz	1.2 Gbps	10 Gbps
波長帯域	700 -1500 nm	X線 -5 μm	X線 -10 μm	X線 - 20 μm
受光部数	1	64	1024	10 <sup>6</sup>
動作温度	4 K	4 K	20 K	77 K

薄膜はMgO基板上に成膜されたエピタキシャル薄膜からシリコン基板上に成膜された多結晶膜へと移行することにより、通信波長帯において80%を超える検出効率を実現するに至っている。また、表2に示した、93%(2015年)、98%(2019年)の値は、米国NISTの研究グループによって超伝導アモルファス薄膜材料であるタングステンシリサイド (WSi) を用いたSSPD素子を開発した結果得られた値となっている。他にも、モリブデンシリサイド (MoSi) や窒化モリブデン (MoN) など別の超伝導材料の適用によって高検出効率を実現している報告例も相次いでいる。ただし、これらの超伝導材料は超伝導転移温度が全般的にNbNやNbTiNと比較すると低いことから、1K以下の極低温動作を必要とする。これらを動作させるために、ソーブションポンプを用いた小型な4He冷凍機ユニットによって、1K程度まで冷却が可能な小型な冷却システムが実現されてきているが、連続運転が難しいなどの課題は残されている。

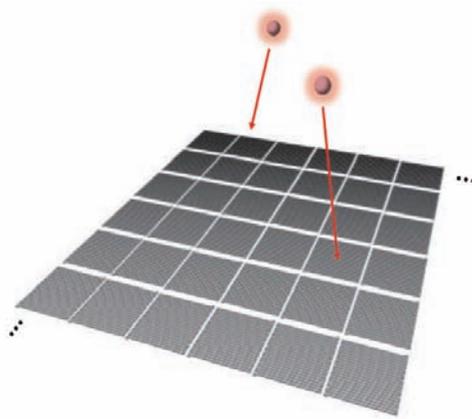
高検出効率、低タイミングジッタ、高速応答を同時に達成することを目指して、これまでの1本の超伝導ナノワイヤによる構成とは異なる様々な構成の提案や実証もなされている。例えば、複数本のナノワイヤを並列に配置した構造は、2007-2008年には既に提案及び動作実証がなされているが、近年、これらの構造が実用レベルで使用できるまでに性能向上がなされている。並列構造としては、光子が入射したナノワイヤのみが抵抗状態へと転移するタイプと、雪崩的に他のナノワイヤも転移するタイプ (アバランシェ型SSPD) が存在する。前者の場合は、抵抗状態へと転移したセクションの数に応じた出力波高値が得られるため、疑似的ではあるが光子数識別機能を有する。一方、後者のタイプでは、光子数識別機能は有しないが、全てのセクションに流れるバイアス電流を出力として取り出すことが可能で

あるため、高信号対雑音比を向上させ、低タイミングジッタ及び高速応答を実現することが可能となっている。どちらのタイプにおいても、現在では通信波長帯における検出効率として80%を超えるものが報告されている。表1における新型SSPDシステムは、我々が開発したアバランシェ型SSPD素子を採用している。また、極低温低雑音増幅器の適用や、インピーダンス整合回路の挿入などにより、出力信号対雑音比を向上させ、タイミングジッタ性能が改善したなどの報告もされている。

これまでは、SSPDの通信波長帯応用を中心に研究開発が進められてきたが、短波長領域 (波長300-1000nm) あるいは長波長領域 (波長2μm-10μm) への適用に向けて、以下に紹介するような積極的な取り組みがなされている。波長が1000nmよりも短い領域においては、通信波単一光子のエネルギーが通信波長帯よりも大きいため、SSPDにおいてホットスポットを生成しやすく信号生成効率も高い。誘電体多層膜構造を短波長領域用SSPDに適用することにより、性能向上及び応用展開が進められており、例えば、短波長領域においても80%を超える検出効率を取得することに成功している。一方、WSiなどの超伝導材料をナノワイヤに適用することにより、検出効率の大幅な向上がなされたことで、長波長領域における光子検出の潜在性能を示す報告もなされはじめています。NISTのグループによる報告では、WSi-SSPDにおいて波長10μm程度まで検出感度を有することが報告されているなど、中赤外波長領域における高性能単一光子検出器の実現も期待される。

## 4. 高機能化に向けた取り組み

従来のSSPD素子は単一の受光面を有するものであったが、受光面 (ピクセル) を複数個配置して多ピクセルアレイ化することにより、最大計数率の向上、受光面積の増大、疑似光子数識別、空間分解能を得ることが可能となる。例えば図3に示すように、2次元状に多数ピクセルを配置することができれば、SSPDの特徴を兼ね備えた光子イメージングカメラが実現し、量子計測、光子分光、イメージンググライダー、半導体LSI動的解析や生体イメージングなど、幅広い先端計測分野において多大なるインパクトを与えることが期待できる。多ピクセルSSPDアレイの実現においてピクセル数の増大に伴って直面する課題の一つとして、多出力信号読み出しにおける冷凍機システムへの熱流入負荷の低減が挙げられる。従来のSSPD信号出力の読み出し方式では、1本/ピクセルの同軸ケーブルを冷凍機内に導入し



#### 応用分野:

- 量子計測
- 光子分光
- イメージングライダー
- 半導体LSI動的解析
- 生体イメージング  
など

#### 技術課題:

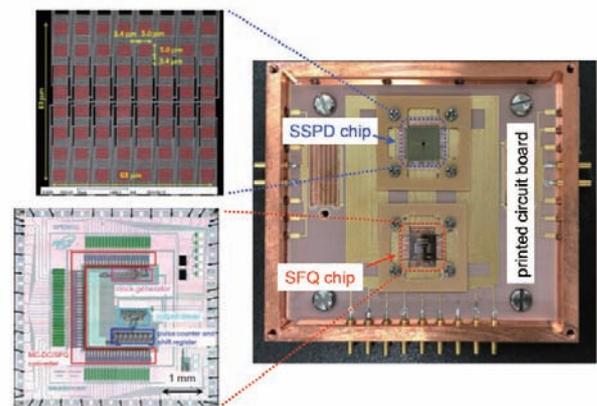
- 均一なナノワイヤ作成歩留まりの向上
- 冷凍機内SSPDアレイへの入射光結合技術
- 極低温下における多出力信号処理技術

■図3. SSPDイメージングアレイと期待される応用分野及び実現に向けた技術課題

なければならず、ピクセル数の増加に伴い、熱流入が増大しSSPD素子の冷却が困難となってしまいます。したがって、多ピクセル信号の読み出し方式の検討が必要となってくる。

米国MITのグループでは、1本の長い超伝導ナノワイヤを分布定数型のマイクロストリップラインとして扱い、ナノワイヤ両端から出力される信号の時間差によって、光子入射位置を同定する手法を提案及び動作実証が行われた。これにより、800ピクセル相当の空間分解能を実現することに成功している。また、超伝導ナノワイヤ部のインダクタンス成分による共振周波数を利用してRF信号による多重化読み出し方式もドイツのKITのグループにより提案がなされ、16ピクセル程度までの多重化信号読み出しに成功している。

NICTでは、極低温環境下で動作し、低消費電力・低ジッタ・高速動作が可能な超伝導単一磁束量子 (SFQ) 回路を用いたSSPD用多重化信号処理方式を世界に先駆けて提案し、動作実証を行っている。例えば、図4に示すように、64ピクセルSSPDアレイと64入力SFQエンコーダ回路を同一パッケージ状に搭載し、同一冷凍機内において正常動作実証に成功している。SSPDアレイの読み出し方式として $2 \times N$ 個の出力で $N \times N$ 個アレイの読み出しが可能な行列読出構造と組み合わせることにより、1024ピクセルまでの拡張が可能であると考えている。この実証試験として $4 \times 4$ ピクセルの行列読出型SSPDアレイとSFQエンコーダによる動作実証試験にも成功している。



■図4. パッケージ内実装された64ピクセルSSPDアレイ及び64入力SFQエンコーダ回路

## 5. おわりに

2013年から2014年にかけて、WSiあるいはNbNにおいても通信波長帯において80%を超える極めて高い検出効率が報告され、今や量子情報通信技術をはじめとする様々な応用研究への適用が成されている。一方、検出器としての技術の成熟が見られたかのように思われがちであるが、本稿で紹介したように、今なおSSPDの研究開発は多様化した方向性のもとで、ますます精力的に進められており、更なる応用展開の拡大がなされるものと強く感じる。