

高感度・高速超伝導 ナノワイヤ単一光子検出器

—マルチチャンネルシステム開発と量子情報通信応用—

「超伝導窒化ニオブ(NbN)を用いた高感度・高速ナノワイヤ単一光子検出システムを開発し、通信波長帯において世界最高性能の達成と量子情報通信などの応用へ展開しています。」

王鎮 (ワン チン)

未来 ICT 研究所
主管研究員

学生の頃から巨視的量子現象である超伝導に魅せられ、約 30 年間一筋にやってきましたが、まだ分からないことが多い。NICT に入所してから始めたテニスはなかなか上達しないけど、部員の少ない未来 ICT 研究所では貴重な戦力となっています。最近、15 年以上疎遠になっていた二胡を再び手に取り、稽古に励んでいます。

● 研究の背景

量子暗号や量子情報通信技術の実現には、高感度、高速かつ低雑音で単一光子を検出する技術の開発が 1 つの鍵となっています。光子検出器としては、光電子倍增管(PMT)、Si や InGaAs/InP などの半導体材料を用いたアバランシェフォトダイオード(APD)がすでに開発され、通信波長帯(波長: 1,550nm)では InGaAs/InP 半導体 APD が主に使用されています。しかし、半導体 APD は材料及び検出原理により検出効率や動作速度などが制限され、量子情報通信技術を実現するために光子検出技術のブレークスルーが必要とされています。そのため、我々は半導体 APD と全く異なる材料と原理で動作する超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)の研究開発を行ってきました。



なぜ超伝導？




SNSPD は、巨視的な量子現象である超伝導がもたらした高速な電子・フォノン相互作用と極低温で動作するため、通信波長帯において PMT や半導体 APD の性能をはるかに凌駕するポテンシャルを有しています。また、SSPD の波長感度領域が極めて広く、素子 1 つで Si-APD と InGaAs/InP-APD の感度領域を全てカバーできます。さらに、SNSPD は APD のようなゲート同期動作が不要であるため、実用化の際にシステムの構築も容易とであるなど非常に大きなメリットがあります。表 1 では、各種光子検出器の性能を比較しています。SNSPD は、他の光子検出に比べて暗計数率が極めて低く、トータル性能を表す指標である性能指数が現時点でも既に 100 倍高く、研究開発の進展によりさらに性能向上が期待されています。

マルチチャンネル SNSPD システム開発

SNSPD では、超伝導ナノワイヤにおける超伝導状態から常伝導状態に移行する際に生じた急激な抵抗変化を利用して光子検出を行っています。

その性能を左右するキーテクノロジーとしては、高品質・極薄超伝導薄膜の作製、ナノワイヤ微細加工、入射光子と素子の高効率結合などが挙げられます。また、実用化のために、マルチチャンネル検出システムの開発が必要不可欠です。我々は、基礎研究で蓄積してきた NICT 独自の高品質窒化ニオブ(NbN)超伝導薄膜作製技術とナノ微細加工技術を駆使して、厚さ 5 nm 以下、線幅 80 ~ 100 nm のナノワイヤ単一光子検出素子(図 1)の作製に成功しました。また、光ファイバにより入射した光子を検出素子に効率良く結合させるために、光ファイバと SNSPD 素子の実装技術を開発し、ミクロンオーダーの精度で光ファイバと素子を合わせることを可能にしました(図 2)。さらに、実用化を目指して、無冷媒かつ家庭用 100V 電源で駆動可能な小型可搬式ギフォート・マクマホン(GM)冷凍機を用いたマルチチャンネル SNSPD システムを開発しました(図 3)。開発したマルチチャンネルシステムには、光ファイバを実装した SNSPD パッケージ 6 個を実装しており、同時に 6 チャンネルの光子検出が可能となっています。図 4 は 1,550nm 通信波長帯において測定した 6 チャンネル検出器のシステム検出効率と暗計数率です。全てのチャンネルは暗計数率

表1 通信波長帯光子検出器の性能比較

波長: 1,550nm				
検出器	検出効率 (%)	暗計数率 (c/s)	カウントレート (MHz)	性能指数 $\times 10^3$
 PMT	2	2×10^5	10	1
 InGaAs/InP APD	20	10×10^3	100	2
 SNSPD (NICT)	20	100	100	200

性能指数 = 検出効率 × カウントレート / 暗計数率

100c/s(カウント/秒)において20%を超える高い検出効率を示しています。表2に、システム仕様・性能をまとめています。現時点では、量子検出効率が20%、動作速度が100MHz、暗計数率が100c/sなど世界最高性能を達成しています。

量子情報通信応用

我々は、開発したマルチチャンネルSNSPDシステムを用いて、2007年にけいはんな地区において量子暗号鍵配送(QKD)のフィールド実験を行い、実際の敷設光ファイバで世界最長距離(97km)かつ最高速(10 kbits/s/photon)で量

子暗号鍵配送に成功しました。また、2010年には東京QKDネットワークに2台のSNSPDシステムを導入し、都市圏敷設光ファイバ網で世界初の量子暗号通信によるテレビ会議の実現に貢献しました。

今後の展望

SNSPDによる単一光子検出技術は、将来の量子情報通信技術を支えるコア技術として、実用化に向けた研究開発が始まったばかりです。現在、この技術は半導体APDを超える性能を示しており、素子の改良とシステムの最適化を図ることにより、更なる性能アップが期待できます。

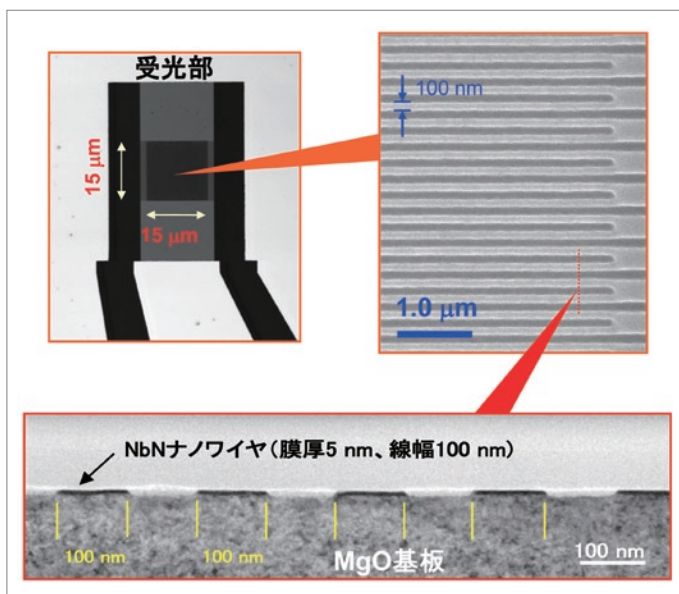


図1 窒化ニオブSNSPD素子とナノワイヤ受光部の電子顕微鏡写真

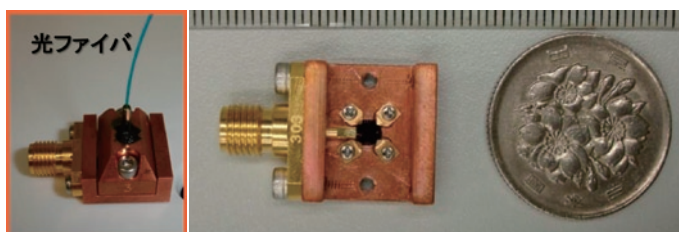


図2 光ファイバを実装したSNSPDパッケージ

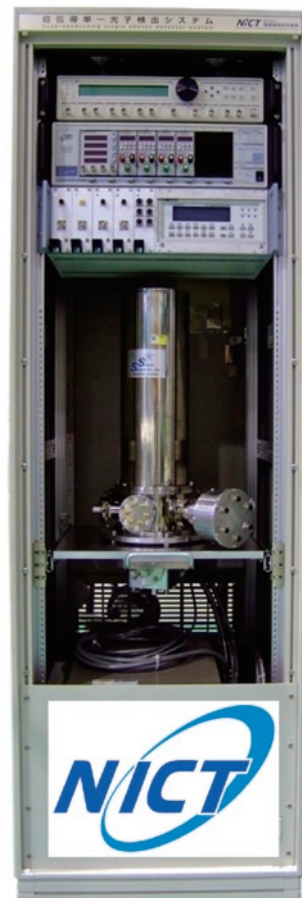


図3 マルチチャンネルSNSPDシステム

今後、この技術は、光子検出器として、量子情報通信分野だけではなく、量子光学、宇宙物理学、生体質量分析、新薬開発、低エネルギー粒子検出など様々な分野への応用が可能と考えられることから、その実現に向けて我々はチャレンジを続けていきます。

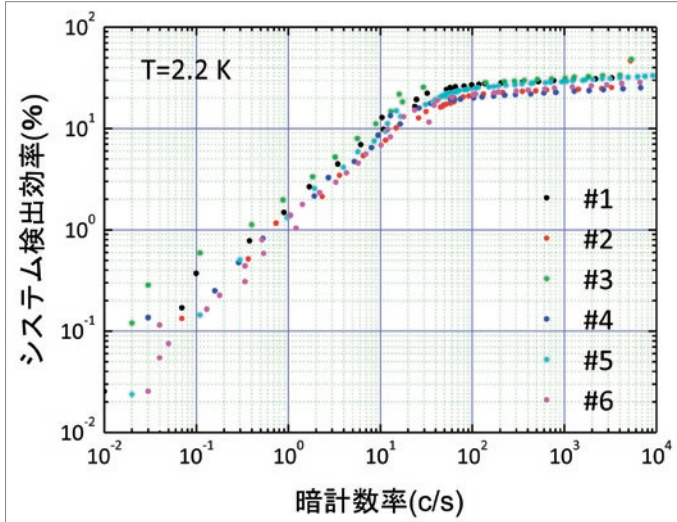


図4 1,550nm波長帯におけるマルチチャンネルSNSPDシステムの検出効率と暗計数率

表2 マルチチャンネルSNSPDシステム仕様・性能

チャンネル数	6
システム検出効率	20%
暗計数率	100 c/s
応答速度	100 MHz
ジッター	100 ps
動作温度	2.5 K
冷凍機消費電力	1.2 kW
サイズ	H175 x W57 x D65 (cm)