

高 S/N 比超伝導単一光子検出器の開発（延長）

研究代表者 柴田 浩行 北見工業大学 工学部 教授

1 はじめに

超伝導を用いた検出器は、一般的に超高感度・超高性能を特徴としているが、極低温を必要とするため、電波天文観測、大気環境計測など特殊な用途に限定されていた。しかし近年、科学技術の発展に伴ない従来より高性能な検出器が様々な分野で必要とされ、超伝導検出器の開発が活性化している。本研究では、超伝導ナノ細線を用いた単一光子検出器（SNSPD, SSPD, Superconducting Nano Strip Photon Detector, Superconducting Nanowire Single Photon Detector）の S/N 比向上を目指して開発を進めた。SNSPD は、従来の半導体などを利用した単一光子検出器より高性能で、量子暗号通信、宇宙通信、レーザレーダ、医療・バイオセンシングなどの先進分野で利用が拡大し、さらなる性能向上が期待されている [1-4]。例えば、物理法則に基づく究極の安全性を保つことのできる量子暗号通信では、情報の担い手として増幅不可能な単一光子を利用しているため、伝送距離の増大と共に S/N 比が低下して長距離伝送が不可能になるという欠点がある [5]。SNSPD を用いることによって伝送距離は 300Km 以上まで増加したが、SNSPD の S/N 比がさらに向上すれば、より一層の長距離化が可能となる [6, 7]。

単一光子検出器の S/N 比は、システム検出効率 (η_{system}) ÷ 暗計数率 (DCR) に比例している。ここで、システム検出効率 (η_{system}) は、検出器への入射光子数に対する出力パルス数の比、暗計数率 (DCR) は検出器に光が入射していない時の単位時間当たり出力パルス数である。従って単一光子検出器の S/N 比向上には、高い η_{system} と低い DCR を両立させる必要がある。さらに、 η_{system} は、光結合効率 (η_{coupling})、吸収率 ($\eta_{\text{absorption}}$)、および内部量子効率 ($\eta_{\text{registering}}$) の積で表すことが出来る ($\eta_{\text{system}} = \eta_{\text{coupling}} * \eta_{\text{absorption}} * \eta_{\text{registering}}$)。ここで、 η_{coupling} は検出器に入射した光が検出素子の有感部に照射される割合、 $\eta_{\text{absorption}}$ は、素子に照射された光が、反射・透過せずに超伝導体に吸収される割合、 $\eta_{\text{registering}}$ はパルス生成率とも呼ばれ超伝導体に吸収された光子が電気パルスを出力する割合を表す。高い η_{system} を得るには、これら 3 つのパラメータを全て向上させる必要がある。

昨年度の調査研究の結果、超伝導材料として窒化モリブデン (MoN) を用いた SNSPD は、従来の窒化ニオブ (NbN) を用いた SNSPD より $\eta_{\text{registering}}$ が高いことを見出した。また、極低温で動作可能なナノポジショナーを用いることによって η_{coupling} を 2 倍程度向上可能であること、冷却した光バンドパスフィルタを導入することによって DCR を 1/100 以下に削減できることを示した。今年度は、 $\eta_{\text{absorption}}$ および η_{coupling} の向上を目指して、新しいキャビティ構造を検討した。また、シャント抵抗低減による $\eta_{\text{registering}}$ 向上について新たに検討した。

2 キャビティ付超伝導単一光子検出器

2-1 簡易アライメントマーク付 Au ミラー構造

SNSPD は、厚さ 5nm 程度の超伝導材料であるため、光を照射した際に超伝導体に吸収される割合 ($\eta_{\text{absorption}}$) は 30%程度であり、残りの光は反射または透過する。従って、 $\eta_{\text{absorption}}$ を向上するには素子の反射を防止すると共に、透過した光を再度素子に戻して吸収させる必要がある。今回、図 1(a) に示すような新たなデバイス構造を考案・試作した。熱酸化した Si 基板上に、スパッタ装置で金 (Au) を厚さ 100nm 成膜後、原子層堆積 (ALD) 装置でアルミナ (Al_2O_3) を厚さ 221nm 成膜する。アルミナの厚さは、波長 1550nm の $1/4n$ 波長 ($n=1.75$: アルミナの屈折率) であり、金と共にキャビティ構造を形成している。その後、アルミナ薄膜上に超伝導膜 (MoN または NbN) を成長、電子線描画とドライエッチングによるナノ細線形成、リフトオフによるアライメントマークおよび電極作製を行った。作製した素子の顕微鏡写真を図 1(b) に示す。光ファイバーから出射されたレーザ光はスポット径 $10\mu\text{m}$ 程度に集光されており、 $15\mu\text{m}$ 角のメアング部を正確に照射する必要がある。このためには、集光スポットとナノ細線を同時に顕微鏡で観察してアライメントを行う必要があるが、顕微鏡を斜めから見た場合、ナノ細線の凹凸は光の波長より小さくレーザ光は正反射するため、集光スポットを観測することが出来ない。今回、ナノ細線部近傍に図 1(b) に示すミクロンサイズのアライメントマークを追加して、アライメントマークからのレーザ光反射を用いてアライメントを行うことを考案した。図 2 に(a)

レーザ光が上方にずれている場合、(b) 下側にずれている場合、(c) 焦点が合わずにスポットが広がっている場合、(d) 集光している場合、の顕微鏡写真を示す。これから、本手法を用いると斜め上方からの顕微鏡観察でアライメント調整が可能であることが判る。

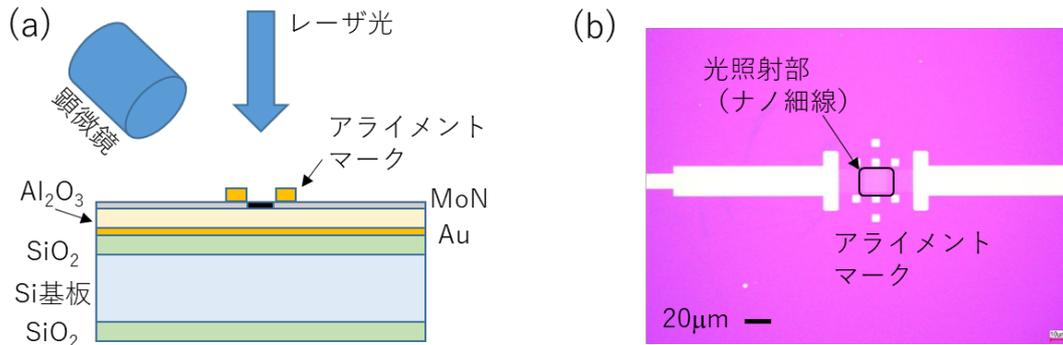


図 1 : 簡易アライメントマーク付 Au ミラー素子の (a) 構造概略図、(b) 微細構造部顕微鏡写真

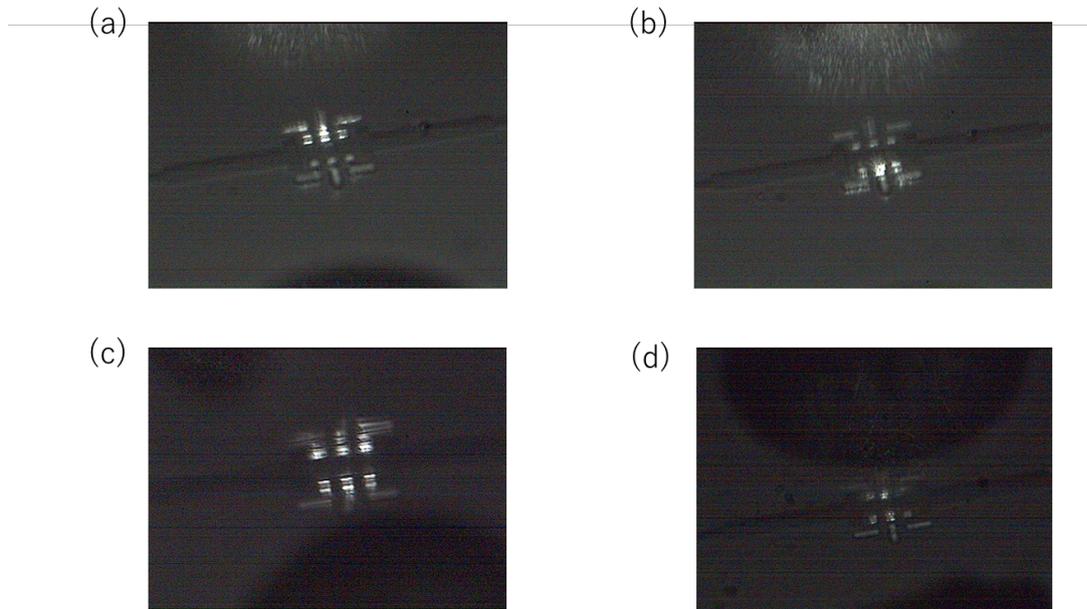


図 2 : レーザ光照射時の微細構造部顕微鏡写真。(a) メアンダ上部を照射、(b) メアンダ下部を照射、(c) レーザ光スポット径が大きい、(d) メアンダに集光

一方、作製した素子の一部はショートしているため動作不可能なものがあった。これは、アルミナ薄膜内のピンホールまたは素子周辺部を介して MoN 薄膜と下地の Au 薄膜が繋がったためであると推測される。このため、Au ミラーとアルミナを用いた本構造の開発を中断した。

2-2 簡易アライメントマーク付 DBR 構造

ショートを回避するため、Au ミラーとアルミナによるキャビティ構造の代わりに、図 3(a) に示すように SiO₂ と Si₃N₄ の DBR (Distributed Bragg Reflector) 多層膜の上に超伝導ナノ細線およびアライメントマークを形成した。図 3(b) に SiO₂ 265nm 厚および Si₃N₄ 195 nm 厚を 10 層重ねた場合のシミュレーション結果を示す。波長 1550nm で反射率 97.7% となり、Au ミラーとアルミナによるキャビティ構造と同様に $\eta_{\text{absorption}}$ の向上が期待できると共に、誘電体 (絶縁体) であるためショートすることはない。

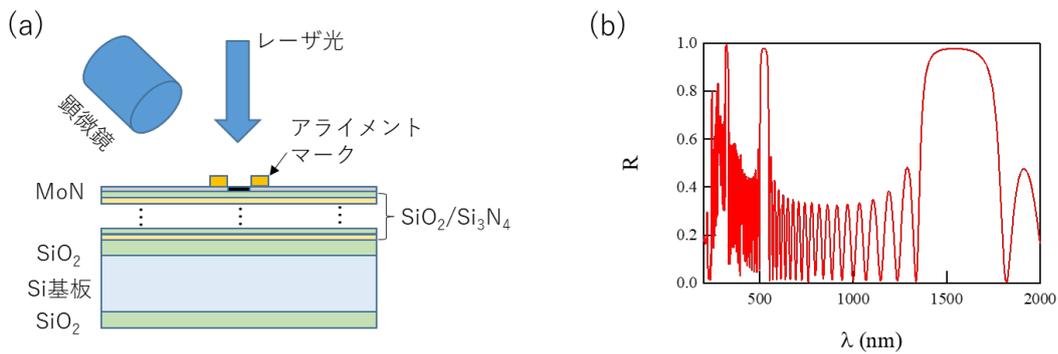


図3：簡易アライメントマーク付き DBR 多層膜素子の (a)構造概略図、および (b)DBR 膜の反射シミュレーション

気相成長 (CVD) 装置で DBR 多層膜を成長し、その上に 2-1 と同様に超伝導ナノ細線とアライメントマークを形成した。作製したデバイスは全てショートがなく、良好な電流電圧特性を示したが、DBR 構造による検出効率の向上は見られなかった。これは、DBR 構造を CVD 装置で作製したため、界面の急峻性がなく、緩やかな凹凸が生じたためと考えられる。急峻な界面を得るにはスパッタ法などが適していると思われるが、使用可能な装置がないために本手法を中断した。

2-3 裏入射型ダブルキャビティ構造

簡易アライメントマークの手法を一旦中止し、Si 基板を熱酸化して 1/4 波長厚 (250nm 厚) の SiO₂ を形成後、その上に超伝導ナノ細線、アルミナ 1/4 波長厚 (221nm 厚)、Au ミラー 100nm 厚からなる、図 4 に示すような従来型ダブルキャビティ構造の素子を作製した [8]。本構造の場合、Au ミラーをメアンダ細線と同じ大きさ (15 μ m 角) に加工することで、Si 基板の裏面からレーザー光を照射し、Au ミラー側から赤外顕微鏡でアライメントすることが可能となる。

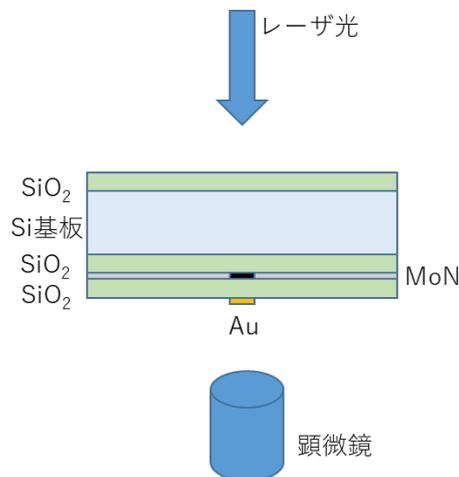


図4：裏入射型ダブルキャビティ素子の構造概略図

作製した素子の SEM 像を図 5 に示す。本構造を有する MoN 素子は、良好な電流電圧特性を示すと共に、キャビティ無しの場合より 2 倍以上高い検出効率を示した。現在、作製条件の最適化を進めて、更なる検出効率の向上を目指している。

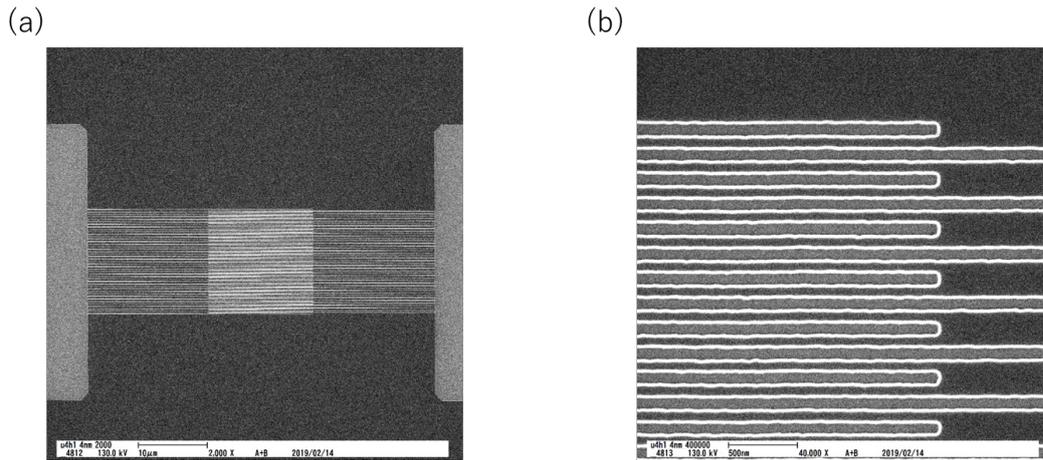


図5：裏入射型ダブルキャビティ MoN 超伝導単一光子素子の SEM 像

3 シャント抵抗低減による検出効率向上

3-1 マイクロブリッジ

従来、超伝導単一光子検出器ではナノサイズの超伝導細線が必須であり、細線の断面積が大きくなると単一光子を検出することは不可能であった。しかし、昨年、マイクロスケールの超伝導細線においても対破壊電流 (I_{depair}) 近くまでバイアス電流を増大すると単一光子検出可能であるという報告があった [9]。従来、内部検出効率向上のためにはできるだけナノ微細化を進める必要があったが、上記報告を利用すると、マイクロスケールの微細化でも内部検出効率 ($\eta_{\text{absorption}}$) の向上が可能となる。図 6(a) に示すように、幅 $1\text{-}5\mu\text{m}$ 、長さ $20\mu\text{m}$ の NbN マイクロブリッジを作製した。図 6(b) にマイクロブリッジに並列に導入したシャント抵抗を変化させた時の電流電圧特性を示す。超伝導を保つバイアス電流の最大値 I_{sw} は、シャント抵抗無しの場合 $30\mu\text{A}$ 、 50Ω シャント抵抗では $32\mu\text{A}$ 、 25Ω シャント抵抗では $42\mu\text{A}$ に増加する。

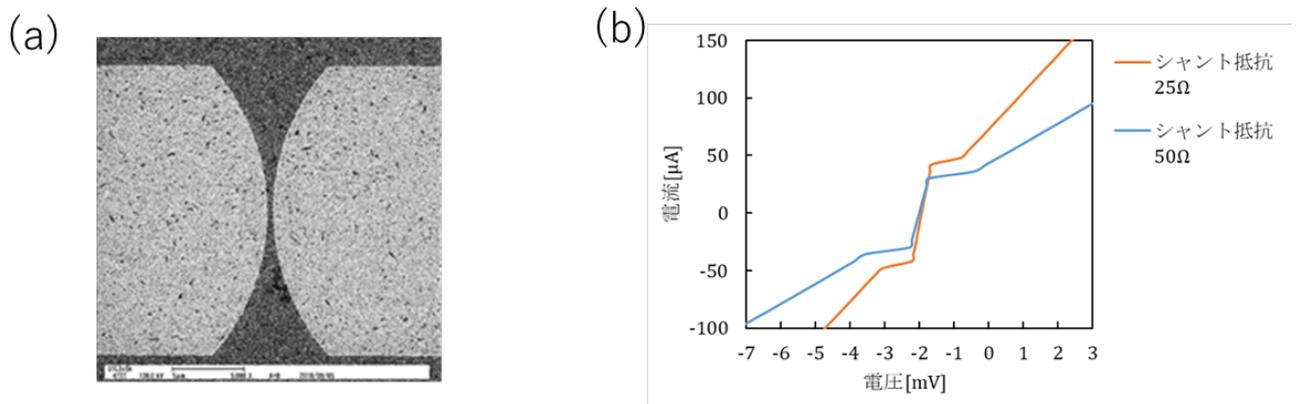


図6：NbN マイクロブリッジの (a) SEM 像、および、(b) シャント抵抗を変えた時の電流電圧特性

さらに、図 7(a) に示す測定系を用いてマイクロブリッジに微弱光を照射し、その光応答を測定した。その結果を図 7(b) に示す。図より、シャント抵抗 50Ω 、 25Ω の場合、シグナルの検出数は光強度 (入射光子数) に比例しており単一光子検出していることが判る。また、光強度一定において 25Ω の方が大きなシグナル数であり、検出効率が高いことが判る。シャント抵抗無しの場合には単一光子検出が不可能であった。

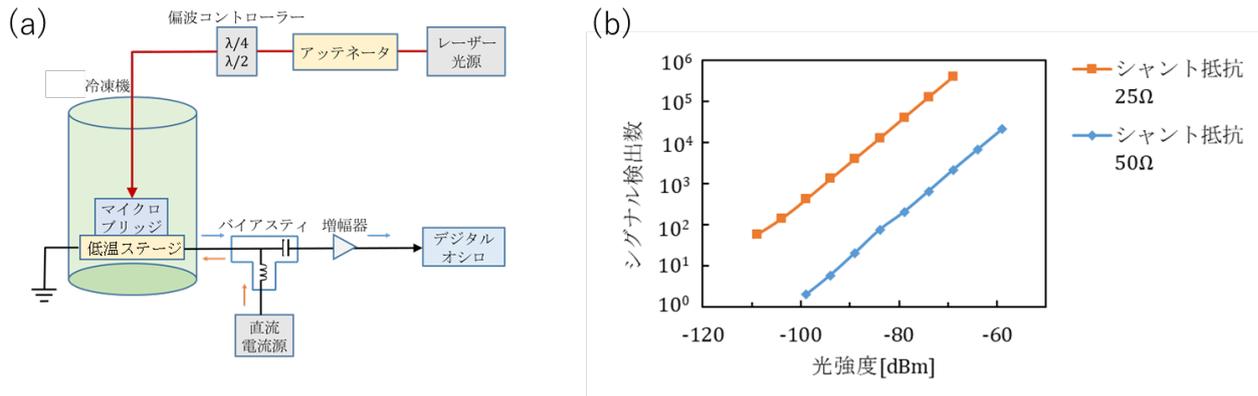


図 7 : (a) マイクロブリッジ光測定系概略図、(b) シグナル検出数の光強度依存性

3-2 ナノスケール細線

マイクロブリッジの結果から、従来の超伝導ナノ細線素子においてもシャント抵抗の抵抗値を下げると内部検出効率を向上することが期待できる。そこで、以前作製済みの NbN 超伝導ナノ細線素子を用いて、シャント抵抗低減による検出効率の変化について調査した。NbN ナノ細線素子について、シャント抵抗 (R_{sh}) を変化させた時の電流電圧特性を図 7(a) に示す。 I_{sw} は、シャント抵抗無しの場合の $10.0\mu A$ から、 $R_{sh} = 16.7\Omega$ における $14.5\mu A$ まで R_{sh} の低下と共に増加する。また、検出効率は、図 7(b) に示すように、 $R_{sh} = 50\Omega$ における 23% (バイアス電流 $13.5\mu A$) から、 $R_{sh} = 16.7\Omega$ における 33% (バイアス電流 $14.5\mu A$) まで、10% 向上した。

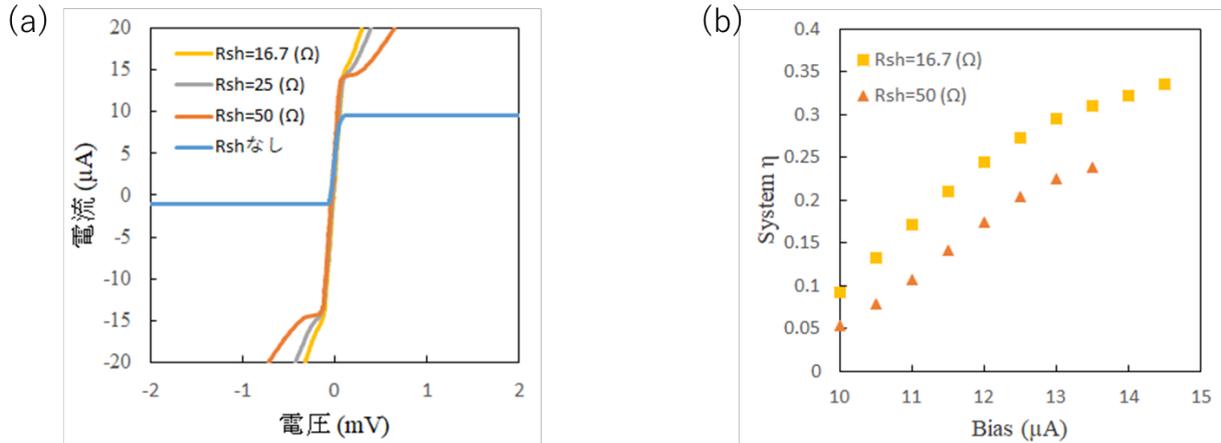


図 7 : 様々なシャント抵抗 (R_{sh}) における NbN-SNSPD の (a) 電流電圧特性、(b) 光検出効率のバイアス電流依存性

現在、新たに作製中のキャビティ構造付 MoN 単一光子検出器についても、シャント抵抗削減による内部検出効率の向上を進めている。

4 まとめと展望

本研究では、S/N 比の高い超伝導単一光子検出器の開発を目指して、新しいキャビティ構造の開発、MoN を用いた光子検出素子の最適化、シャント抵抗削減による内部検出効率の向上を進めた。キャビティ構造により検出効率は 2 倍以上向上し、シャント抵抗削減によって検出効率は 10% 向上した。昨年度実施した、ナ

ノポジショナーによる約2倍の光結合効率(η_{coupling})向上、冷却フィルタ導入による2桁以上の暗計数率(DCR)削減と合わせて、世界最高性能のS/N比を有する超伝導単一光子検出器を早急に実現する。本研究助成によって、上記目標だけでなく、様々な新奇超伝導ナノデバイスの開発に繋がる非常に有益な研究を推進することが出来た。

【参考文献】

- [1] G. Goltsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and R. Sobolewski, “Picosecond superconducting single-photon optical detector”, Appl. Phys. Lett. 79, pp. 705-707 (2001).
- [2] C. M. Natarajan, M. G. Tanner, and R. H. Hadfield, “Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications”, Supercond. Sci. Technol. 25, 063001 (2012).
- [3] H. Shibata, T. Hiraki, T. Tsuchizawa, K. Yamada, Y. Tokura, and S. Matsuo, “A waveguide-integrated superconducting nanowire single-photon detector with a spot-size converter on a Si photonics platform”, Supercond. Sci. Technol. 32, 034001 (2019).
- [4] 柴田浩行、清水薫、本庄利守、武居弘樹、都倉康弘、「冷却フィルタを用いた超伝導単一光子検出器の性能指数向上及び長距離量子暗号通信への応用」電子情報通信学会誌 Vol. J99-C, No.3, pp.51-58 (2016).
- [5] H. K. Lo, M. Curty, and K. Tamaki, “Secure quantum key distribution”, Nat. Photon. 8, pp. 595-604 (2014).
- [6] H. Shibata, T. Honjo, and K. Shimizu, “Quantum key distribution over a 72 dB channel loss using ultralow dark count superconducting single-photon detectors”, Opt. Lett. 39, pp. 5078-5081 (2014).
- [7] H. L. Yin, T. Y. Chen, Z. W. Yu, H. Liu, L. X. You, Y. H. Zhou, S. J. Chen, Y. Mao, M. Q. Huang, W. J. Zhang, H. Chen, M. J. Li, D. Nolan, F. Zhou, X. Jiang, Z. Wang, Q. Zhang, X. B. Wang, and J. W. Pan, “Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution Over a 404 km Optical Fiber”, Phys. Rev. Lett. 117, 190501 (2016).
- [8] D. Rosenberg, A. Kerman, R. Molnar, and E. Dauler, “High-speed and high-efficiency superconducting nanowire single photon detector array”, Opt. Express 21, pp. 1440-1447 (2013).
- [9] Y. Korneeva, D. Y. Vodolazov, A. V. Semenov, I. Florya, N. Simonov, E. Baeva, A. A. Korneev, G. N. Goltsman, and T. M. Klapwijk, “Optical single photon detection in micron-scaled NbN bridges”, Phys. Rev. Appl. 9, 064037 (2018).

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Superconducting nanostrip photon detector using various materials	International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD2018), Invited	平成30年7月27日
Fabrication of MoN Superconducting Single Photon Detector	31st International Symposium on Superconductivity (ISS2018), Invited	平成30年12月12日
Simple photon incidence method from the front side for Superconducting Single-Photon Detector (SSPD) using alignment mark	31st International Symposium on Superconductivity (ISS2018)	平成30年12月14日
ミクロンスケールの NbN ブリッジによる単一光子検出の可能性	第54回応用物理学会北海道支部学術講演会	平成31年1月5日
簡易的な表側入射方法を用いた超伝導単一光子検出器 (SSPD) の開発	第54回応用物理学会北海道支部学術講演会	平成31年1月5日