招待論文

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

柴田　浩行[†a)]　清水　薫[††]　本庄　利守[†††]　武居　弘樹[††]
都倉　康弘[††]

Superconducting Single-Photon Detector with the Highest Figure of Merit Using Cold Bandpass Filters and Long Distance QKD

Hiroyuki SHIBATA[†a)], Kaoru SHIMIZU[††], Toshimori HONJO[†††], Hiroki TAKESUE[††], and Yasuhiro TOKURA[††]

あらまし　暗計数率は単一光子検出器の性能を示す最も重要なパラメータの一つである．様々な光学フィルタを冷却して超伝導単一光子検出器入力に加え，暗計数率削減の効果を評価した．冷却フィルタ導入により大幅な暗計数率削減に成功した．例えば透過帯域幅 20nm で帯域外の背景黒体輻射を完全にブロックした場合，暗計数率は 3 ケタ以上（暗計数率 10^{-3}Hz）減少し，性能指数は従来の記録を大幅に上回る 2.7×10^{11} に向上した．残りの暗計数率は透過帯域の背景黒体輻射によるもので，究極的な低暗計数率である．更に帯域幅を 100GHz に狭帯域化すると，暗計数率は 10^{-4}Hz，性能指数は 1.8×10^{12} となった．また，冷却フィルタ付超伝導単一光子検出器が不可欠な応用例として，光ファイバ長 336km（損失 72dB）における長距離量子暗号通信実験について紹介する．

キーワード　超伝導単一光子検出器，背景黒体輻射，暗係数率，冷却フィルタ，量子暗号通信

1. まえがき

1.1 背　　景

2001 年に開発された超伝導ナノストリップを用いた単一光子検出器（Superconducting Strip Photon Detector：SSPD，または Superconducting Nanowire Single-Photon Detector：SNSPD）は [1], [2]，十余年の研究開発により飛躍的に性能が向上し，近赤外域の代表的な高性能単一光子検出器に成長した [3]．既に海外の複数の企業から冷凍機と組み合わせた市販品が販売されている [4]．最近では，従来より用いられていた量子通信，量子光学分野だけでなく，医療計測，蛍光測定，宇宙通信など幅広い分野においても利用が拡大している [3], [5]．これまでの SSPD 開発では，動作原理解明，光子数識別化，多素子化，無偏波依存化，導波路結合化，高温動作化など様々な研究が行われてきたが，最も精力的に行われたのは検出効率向上の研究である [3], [6]～[14]．特に近年，ダブルキャビティ構造の開発や新材料（WSi）利用により [13], [14]，暗計数率は 1kHz と大きいが 90%を超える検出効率が報告されている．一方，検出効率とともに重要なパラメータである暗計数率についての研究はほぼ皆無であった．これは，SSPD の暗計数率は当初より，従来利用されていた InGaAs アバランシェフォトダイオード (InGaAs SPAD) の暗計数率と比較すると，大幅に小さかったためである．我々は，SSPD の暗計数率削減に着目した研究開発を行い，冷却フィルタを用いた暗計数率削減に初めて成功した [15], [16]．

本論文では，様々な冷却フィルタについて，その特性及び暗計数率削減の効果について評価する．更に，極低暗計数率の単一光子検出器が不可欠となる応用

† 北見工業大学電気電子工学科，北見市
Department of Electrical and Electronic Engineering, Kitami Institute of Techology, 165 Koen-cho, Kitami-shi, 090–8507 Japan
†† 日本電信電話株式会社　NTT 物性科学基礎研究所，厚木市
NTT Basic Research Laboratories, NTT Corporation, 3–1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi-shi, 243–0198 Japan
††† 日本電信電話株式会社　NTT ソフトウェアイノベーションセンタ，武蔵野市
NTT Software Innovation Center, NTT Corporation, 3–9–11 Midori-cho, Musashino-shi, 180–8585 Japan
a) E-mail: shibathr@mail.kitami-it.ac.jp

例として，従来の報告より約 70km 長いファイバ長 336km における長距離量子暗号通信実験について紹介する [17].

1.2 単一光子検出器の性能指数

赤外光検出器の雑音に関する性能指数としてよく知られているものに，雑音等価電力 (Noise Equivalent Power, NEP) がある．NEP は実効値 (root mean square value：rms) で表した出力信号電圧を v_s，雑音電圧を v_n とするとき，$v_s/v_n = 1$ を与える入力パワー P_N のことで，次式で定義される．

$$\mathrm{NEP} \equiv P_N = P \cdot \frac{v_n}{v_s} \cdot \frac{1}{\Delta f^{1/2}} \tag{1}$$

ここで測定回路の帯域幅の平方根が分母にあるのは v_n が $\Delta f^{1/2}$ に比例するためであり，NEP の単位は $\mathrm{WHz}^{-1/2}$ となる．一方，単一光子検出器では，雑音は雑音電圧としてではなく，光入力がないときのデジタルな信号出力，すなわち暗計数として出現する．このため，検出効率を η，暗計数率を DCR とすると，検出器の雑音性能は η/DCR に比例する．検出器の動作速度はジッタ Δt で制限されることが多いため，更に Δt で割って無次元化した次式の量 H が，単一光子検出器の性能指数 (Figure of merit) として広く用いられている [15], [16], [18], [19].

$$H \equiv \frac{\eta}{\mathrm{DCR} \cdot \Delta t} \tag{2}$$

H は NEP とは逆に値が大きいほど高い検出能力を示す．

表 1 に通信波長域における様々な単一光子検出器の性能指数について，文献 [18] より引用した値を示す．

表 1 2009 年における様々な通信波長帯単一光子検出器の性能指数 [18]
Table 1 Comparison of single-photon detectors at 2009 adapted from Ref. [18].

Detector type	η	Δt	DCR	Figure of merit
PMT (infrared)	2%	300ps	200kHz	3.33×10^2
InGaAs SPAD (gated)	10%	370ps	91Hz	2.97×10^5
InGaAs SPAD (self-differencing)	10%	55ps	16kHz	1.14×10^5
Frequency up-conversion	9%	400ps	13kHz	1.7×10^4
Frequency up-conversion	2%	40ps	20kHz	2.5×10^4
TES	50%	100ns	3Hz	1.67×10^6
SSPD	0.7%	60ps	10Hz	1.16×10^7

PMT：光電子増倍管，TES：超伝導転移端センサ

これより，既に 2009 年の時点で SSPD は最も性能指数の高い検出器となっていることがわかる．最近のダブルキャビティ構造を用いた高検出効率 SSPD では，性能指数が 10^8 台に向上している．

1.3 暗係数の起源

SSPD の暗計数率は，SSPD 素子のもつ固有の暗計数率，及び他の影響によって生じた外因性暗計数率の二つの要因によって決まる．図 1 に暗計数率のバイアス電流依存性の実験結果を示す [15]．ここで，図 1 (a) は SSPD 素子に光ファイバを接続しない状態で測定した場合の暗計数率，すなわち固有暗計数率を表し，図 1 (b) は素子に接続した光ファイバの室温側端子を遮蔽して，光が入力しない状態で測定したシステム暗計数率である．図 1 (a) より固有暗計数率は高バイアス域では大きいが，バイアス電流の低下とともに指数関数的に減少する．また，温度低下とともに高バイアス側にシフトする．一方，図 1 (b) よりシステム暗計数率は高バイアス側では指数関数的な振る舞いが見られるが，低バイアス側では別のブロードなピークが出現する．つまり，システム暗計数率は高バイアス側では固有暗計数率に支配されているが，低バイアス側では外因性暗計数率によるブロードピークによって支配

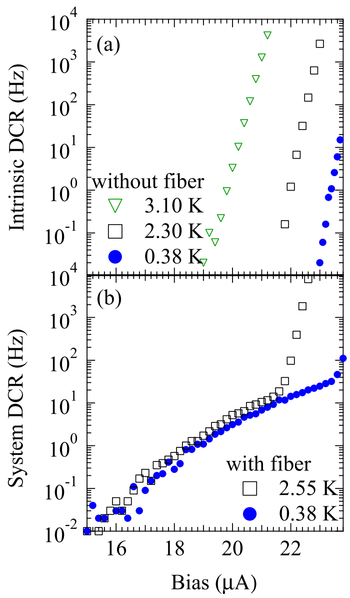

図 1 SSPD の各温度における (a) 固有暗計数率，及び，(b) システム暗計数率，のバイアス電流依存性
Fig. 1 (a) Bias current dependences of (a) intrinsic DCR, and (b) system DCR of the device at various temperatures.

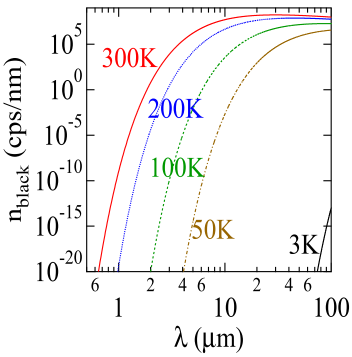

図 2　シングルモードファイバを通して温度 T の黒体輻射が放射する単位 nm 当たりフォトン数の計算値

Fig. 2　Calculated photon count rate per nanometer wavelength due to blackbody radiation of single-mode cavity at various temperatures.

されている．図 1 (a) と (b) の実験上の違いは，検出器冷凍機内部における光ファイバ接続の有無だけである．これから外因性暗計数率の起源は，室温の黒体輻射がファイバを通して SSPD 素子に照射したため生じたと考えられる [15], [20], [21].

よく知られているように，室温の黒体輻射の波長分布は赤外域にピークを有し（ウィーンの変位則），ピークより短波長側では急減する．図 2 に，温度 T の黒体空洞がシングルモードファイバを通して放射する単位波長当たりの光子数の計算結果を示す [15], [22], [23]. 温度 300K では，光ファイバを透過可能な波長域 0.5〜3μm において光子数は充分大きく，無視できない大きさの暗計数率を与えることがわかる．一方，温度 3K では黒体輻射による光子数はほぼ消失する．したがって，光学フィルタを導入してフィルタ自体を 3K まで冷却し，透過帯域外の黒体輻射による光子を阻止すれば，暗計数率を大幅に抑制できると期待できる [15].

2.　フィルタ付 SSPD の特性評価

2.1　実 験 方 法

光学フィルタには，市販のバルク型，またはピグテイル型フィルタを用いた．表 2 に用いたフィルタのカタログ仕様を示す．バルク型フィルタは銅製の両端光ファイバ付フィルタホルダにマウントして，冷凍機の 3K ステージに取り付けた．フィルタホルダの損失は約 1dB，狭帯域化に用いた #5 の光通信用 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) ピグテイル型フィルタモジュールの損失は室温で 0.5dB，低温下では約 2dB であった．SSPD は筆者らが作製した NbN 素子で，η_{max} = 12%〜26%を有する．ジッタ測定には，繰り返し周波数 100MHz のフェムト秒レーザ及び時間相関モジュール（TIA）を用いて分解能 0.1ps で測定した [24].

表 2　通信波長帯光学フィルタの仕様

Table 2　Specification of optical filters at telecommunication wavelength.

Filter No.	trans. (%)	FWHM (nm)	blocking region (nm)
#1 (Edmund) (84-647)	≥85	725	1650–1960
#2 (Edmund) (85-891)	≥90	50	200–1800
#3 (Edmund) (86-088)	≥85	10	400–1800
#4 (Andover) (200FC40)	≥70	20	–2400
#5 (Advanced) (DWDM-1-40)	≥79	100GHz	–

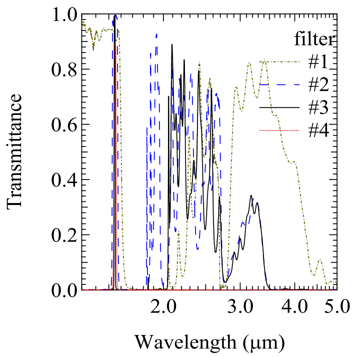

図 3　フーリエ分光装置で測定した光学フィルタの室温透過スペクトル

Fig. 3　Transmission spectra of various optical filters at room temperatures using FT-IR.

2.2　光学フィルタ特性

SSPD は紫外域から赤外域の広い波長にわたって感度を有するため，黒体輻射を防止するためには阻止域の広いフィルタを冷却する必要がある．図 3 は，フーリエ分光器を用いて，フィルタの室温における広帯域透過率を測定した結果である．フィルタ #1〜#3 は透過帯域 (1550nm) の透過率が高く，帯域近傍の阻止特性は良好であるが，より長波長側の光を透過する．一方，フィルタ #4 は透過帯域の透過率が若干低いが，波長 5μm までの阻止域を有しており，これを用いると光ファイバを通じて流入する黒体輻射を完全に防止することが期待できる．

2.3　暗 計 数 率

フィルタ #3 を冷却した場合のシステム暗計数率及

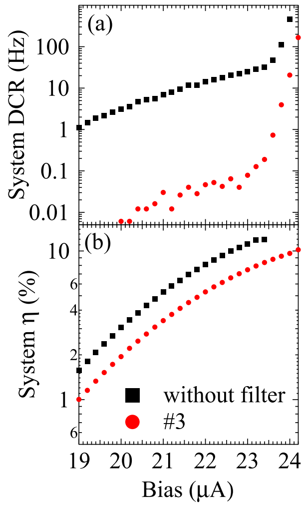

図 4　冷却フィルタ（#3）導入による (a) 暗計数率，及び (b) 検出効率のバイアス電流依存性

Fig. 4　Bias current dependence of (a) system dark count rate and (b) system detection efficiency (η) with cold filter #3.

び検出効率のバイアス電流依存性を，フィルタなしの場合とともに図 4 に示す．図 4 (a) に示すように，冷却フィルタ導入によってシステム暗計数率は 2 ケタ以上の大幅な減少を示している．これは，冷却フィルタ導入により，黒体輻射由来の外因性暗計数率が抑制されたためである．一方，図 4 (b) よりシステム検出効率はフィルタ導入による損失のために約 7 割に低下している．例えば，バイアス電流 23μA では，冷却フィルタ導入前の $\eta = 11.2\%$，DCR $= 24.7$Hz が，導入後は $\eta = 7.5\%$，DCR $= 0.08$Hz となる．次節で示すようにフィルタ導入によるジッタの変化は小さいので無視すると，性能指数は約 200 倍向上しており，冷却フィルタ導入が SSPD の性能向上に非常に効果的であることがわかる．一方，冷却フィルタ #3 は波長 2μm より長波長側の黒体輻射を阻止しておらず，これを除去すれば更なる暗計数率の削減が期待できる．

黒体輻射を完全に除去するため，フィルタ #4 を冷却した場合の DCR，η，Δt を図 5 に示す．図 5 (a) には，ファイバを接続しない場合の暗計数率，すなわち固有暗計数率，及び帯域幅 20nm の黒体輻射によって生じる暗計数率の計算値も示している．フィルタ導入によりシステム暗計数率（赤丸）は 3 ケタ以上減少しており，予想通りフィルタ #4 は #3 より大きな効果をもつ．また，システム暗計数率は高バイアス側（$\geq 12\mu$A）では固有暗計数率（青▲）に一致し，

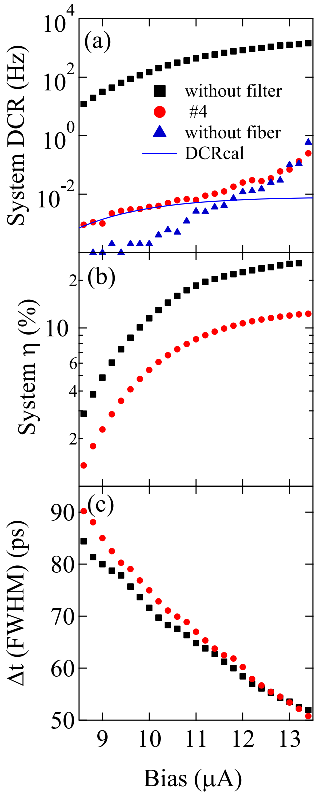

図 5　冷却フィルタ（#4）導入による (a) 暗計数率，(b) 検出効率，(c) ジッタ，のバイアス電流依存性

Fig. 5　Bias current dependence of (a) system dark count rate, (b) system detection efficiency (η), and (c) jitter with cold filter #4.

低バイアス側（$\leq 11\mu$A）では黒体輻射の計算値（青線）に一致している．したがって，冷却フィルタ #4 付 SSPD の低バイアス域におけるシステム暗計数率は，背景黒体輻射の帯域幅によるもので，究極的な低暗計数率である．一方，図 5 (b) よりフィルタ #4 は損失が大きいため，システム検出効率が約半分に低下するという欠点がある．また，図 5 (c) よりジッタはバイアス電流増加とともに減少しているが，フィルタ導入により数 ps 程度増加している．この理由はフェムト秒レーザの帯域幅約 200nm が冷却フィルタの帯域幅 20nm より広く，パルス波形がひずんだためである．バイアス電流 12μA では，冷却フィルタ導入前の $\eta = 22.5\%$，DCR $= 843$Hz，$\Delta t = 59.2$ps が，導入後は $\eta = 10.7\%$，DCR $= 0.025$Hz，$\Delta t = 60.2$ps となり，性能指数は 4.6×10^6 から 7.1×10^{10} に 4 ケタ以上向上している．

フィルタ #4 に更にフィルタ #5 を追加して帯域幅を

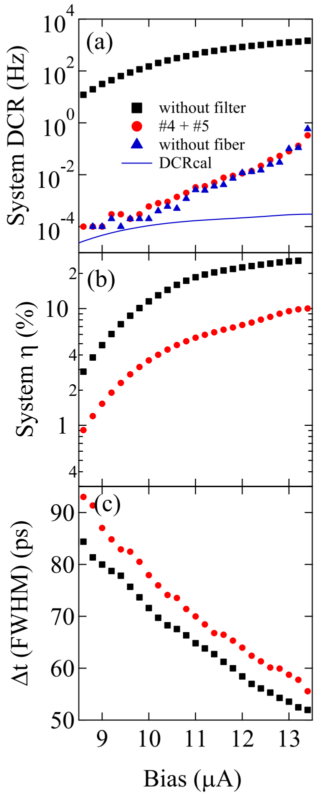

図 6　冷却フィルタ（#4 及び #5）導入による (a) 暗計数率，(b) 検出効率，(c) ジッタ，のバイアス電流依存性

Fig. 6　Bias current dependence of (a) system dark count rate, (b) system detection efficiency (η), and (c) jitter with cold filters #4 and #5 in series.

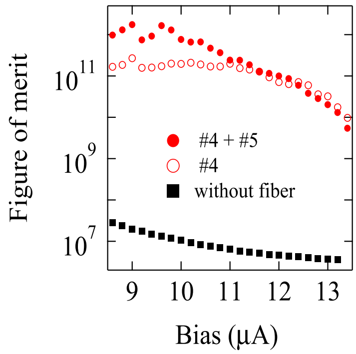

図 7　冷却フィルタ付 SSPD における性能指数のバイアス電流依存性

Fig. 7　Bias current dependence of the figure of merit with the cold bandpass filters.

100GHz に狭帯域化した場合の DCR，η，Δt を図 6 に示す．図 6 (a) よりシステム暗計数率（赤丸）はバイアス電流全域にわたって固有暗計数率（青▲）とほぼ一致している．また，測定値は帯域幅 100GHz の黒体輻射による暗計数率の計算値（青線）より大きく，これから黒体輻射による暗計数率は完全に抑制されていることがわかる．一方，図 6 (b) よりフィルタ導入によって検出効率はフィルタなしの 3 割に低下している．例としてバイアス電流 11μA において，冷却フィルタ導入前の $\eta = 18.5\%$，DCR = 440Hz，$\Delta t = 64.9$ps が，導入後は $\eta = 5.6\%$，DCR = 0.0033Hz，$\Delta t = 70.0$ps となり，性能指数は 6.5×10^6 から 2.4×10^{11} に 3.7×10^4 倍向上している．

2.4　性 能 指 数

図 7 に冷却フィルタ #4 または #4 及び #5 を導入した場合の性能指数のバイアス電流依存性を示す．全電流域にわたって，冷却フィルタ導入により性能指数が 3 ケタから 5 ケタ向上しており，冷却フィルタ導入が性能指数向上に非常に効果的であることが確認できる．図 7 において，バイアス電流の低下とともに性能指数が向上するのは，システム暗計数率が低下するためである．一方，更にバイアス電流を下げると性能指数が低下するのは，システム検出効率が急減するためである．バイアス電流 9μA において性能指数は極大値を取り，冷却フィルタ #4 の場合 2.7×10^{11}，冷却フィルタ #4 及び #5 では 1.8×10^{12} まで向上している．これらの値は，従来報告された値を大幅に上回っている．

3.　長距離量子暗号通信への応用

冷却フィルタ付 SSPD が不可欠な応用例として，長距離の量子暗号通信について紹介する [17]．量子暗号通信は，物理法則に基づく究極的な安全性を提供する次世代の通信で，様々な方法が提案されている [25], [26]．現在，最も研究が進展している単一光子を用いた point-to-point の量子暗号通信では，距離とともに増加する光ファイバの損失によって信号が雑音に埋もれてしまうため，到達距離に制限が生じる [27]．長距離化にはできるだけ低雑音で高検出効率，したがって高い性能指数を有する単一光子検出器が必要である．今回，冷却フィルタ導入により DCR = 0.01Hz に抑制した SSPD を利用して量子鍵配送実験を行った．量子鍵配送には BB84 をはじめ様々なプロトコルがあるが，本研究では差動位相シフト量子鍵配送プロトコル (Differential phase shift quantum key distribution：

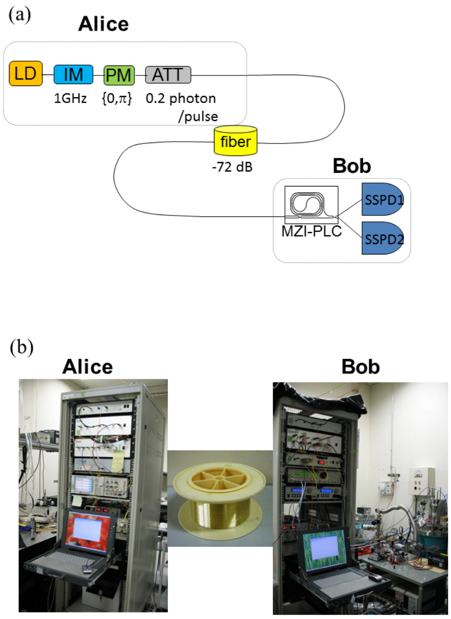

図 8　量子鍵配送システムの (a) 概略ブロック図，及び (b) 全体写真

Fig. 8　(a) Block diagram and (b) photo of the QKD system.

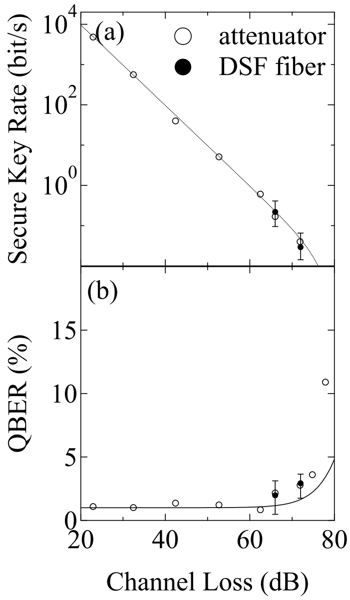

図 9　冷却フィルタ付 SSPD を用いた量子鍵配送実験における (a) 安全鍵生成率，及び (b) エラー率，のファイバ損失依存性

Fig. 9　Channel loss dependence of (a) secure key rate and (b) QBER using SSPD with cold optical filters.

DPS-QKD) を用いた [28], [29]．これは長距離，高速の鍵配送に適したプロトコルで，数多くの実績がある [30], [31]．DPS-QKD で微弱コヒーレント光を用いた場合，シフト鍵のエラー率が 4.1%以下で一般個別攻撃に対する安全鍵を生成することが可能である．測定系の概略ブロック図及び全体写真を図 8 (a)，(b) に示す．Alice 側では波長 1547nm の cw レーザー光をクロック周波数 1GHz，パルス幅 100ps で強度変調後，位相変調器を用いて 0 または π にランダム変調する．その後，平均光子数 0.2/pulse まで減衰した後に伝送用光ファイバに送信する．光ファイバには分散シフトファイバを用いた．Bob 側では伝送ファイバからの信号を 1 ビット遅延干渉計及び 2 台の SSPD で検出する．干渉計は，2 パルス間の位相差が 0 の場合 SSPD1 側に，位相差 π の場合 SSPD2 側に出力される．これをビット {0，1} に対応させることにより鍵を Alice と共有することが可能となる．

図 9 に実験結果を示す．白丸は伝送損失にアッテネータを用いた場合の結果，黒丸は分散シフトファイバの結果，細線は計算値である．安全鍵生成率は損失 70dB 付近まで伝送損失の増大とともに指数関数的に減少する．一方，エラー率は損失 65dB 付近までは 1%以下と小さい．このエラー率は 1 ビット遅延干渉計の消光比によるものである．より長距離では検出器の暗計数率によってエラーが増大する．損失 72dB（光ファイバ長 336km）ではエラー率は 2.93%，安全鍵生成率 0.03bit/s となる．より高損失域ではエラーが急増し，安全鍵の生成が不可能であった．この結果，暗計数率 0.01Hz の SSPD を用いると，従来の記録である光ファイバ長 260km を上回る 336km の量子鍵配送が可能であることがわかった．

4. む す び

本研究では，超伝導単一光子検出器の性能指数向上に向けて，様々な光学フィルタを冷却して検出器入力に加え，暗計数率，検出効率，ジッタに対する影響を評価した．冷却フィルタ導入によって 2 ケタから 5 ケタの大幅な暗計数率削減に成功した．特に透過帯域を 100GHz に狭帯域化した場合，暗計数率は 10^{-4}Hz，性能指数は 1.8×10^{12} まで向上した．冷却したフィルタによって帯域を制限するという比較的簡易な手法にもかかわらず，その効果は格段に大きく，他の低温動作型単一光子検出器の性能向上にも役立つと思われる．

次に，極低暗計数率の単一光子検出器が不可欠となる応用例として，暗計数率 0.01Hz の SSPD を用いた，世界最長となる光ファイバ長 336km（損失 72dB）における量子鍵配送について紹介した．高い性能指数の単一光子検出器を必要とする応用分野は QKD 以外にも数多くあり，今後の発展が期待できる．

SSPD 開発において，高い検出効率（$\eta \geq 50\%$）と極低暗計数率（DCR $\leq 10^{-3}$Hz）が両立した SSPD を開発することは，今後の重要な課題である．このためには冷却フィルタの損失を削減する必要があるが，例えば SSPD 素子の上に直接フィルタを作製する方法が既に試みられている [32]．高検出効率かつ極低暗計数率をもつ SSPD は，応用分野の更なる進展・拡大に大きく貢献するだろう．

謝辞　本研究において技術的な御支援を頂いた，玉村敏昭氏，芦田高弘氏に感謝致します．

文　　献

[1] 本検出器は伝統的に，Superconducting Single Photon Detector: SSPD と呼ばれているが，国際標準機関 IEC/TC90 の CD (Committee Draft) では，Superconducting Strip Photon Detector: SSPD で名前の統一を諮っており，本論文ではこれに準拠した．

[2] G.N. Gol'tsman, 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., vol.79, pp.705–707, 2001.

[3] C.M. Natarajan, M.G. Tanner, and R.H. Hadfield, "Superconducting nanowire single-photon detectors: Physics and applications," Supercond. Sci. Technol., vol.25, 063001, 2012.

[4] SCONTEL 社（http://www.scontel.ru/index.html），ID Quantique 社（http://www.idquantique.com/），SINGLE QUANTUM 社（http://www.singlequantum.com/），Photon Spot 社（http://www.photonspot.com/）など．

[5] D.M. Boroson, B.S. Robinson, D.V. Murphy, D.A. Burianek, F. Khatri, J.M. Kovalik, Z. Sodnik, and D.M. Cornwell, "Overview and results of the lunar laser communication demonstration," Proc. SPIE 8971, 89710S, 2014.

[6] H. Shibata, M. Asahi, T. Maruyama, T. Akazaki, H. Takesue, T. Honjo, and Y. Tokura, "Optical response and fabrication of MgB_2 nanowire detectors," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, pp.358–360, 2009.

[7] 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., vol.97, 112510, 2010.

[8] H. Shibata, H. Takesue, T. Honjo, T. Akazaki, and Y. Tokura, "Single-photon detection using Magnesium diboride superconducting nanowires," Appl. Phys. Lett., vol.97, 212504, 2010.

[9] D. Sahin, A. Gaggero, Z. Zhou, S. Jahanmirinejad, F. Mattioli, R. Leoni, J. Beetz, M. Lermer, M. Kamp, S. Hofling, and A. Fiore, "Waveguide photon-number-resolving detectors for quantum photonic integrated circuits," Appl. Phys. Lett., vol.103, 111116, 2013.

[10] H. Shibata, T. Akazaki, and Y. Tokura, "Fabrication of MgB_2 nanowire single-photon detector with meander structure," Appl. Phys. Express, vol.6, 023101, 2013.

[11] 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, vol.21, pp.10208–10214, 2013.

[12] H. Shibata, "Fabrication of a MgB_2 nanowire single-photon detector using Br_2-N_2 dry etching," Appl. Phys. Express, vol.7, 103101, 2014.

[13] 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, vol.21, pp.1440–1447, 2013.

[14] F. Marsili, V.B. Verma, J.A. Stern, S. Harrington, A.E. Lita, T. Gerrits, I. Vayshenker, B. Baek, M.D. Shaw, R.P. Mirin, and S.W. Nam, "Detecting single infrared photons with 93% system efficiency," Nat. Photon., vol.7, pp.210–214, 2013.

[15] H. Shibata, K. Shimizu, H. Takesue, and Y. Tokura, "Superconducting nanowire single-photon detector with ultralow dark count rate using cold optical filters," Appl. Phys. Express, vol.6, 072801, 2013.

[16] H. Shibata, K. Shimizu, H. Takesue, and Y. Tokura, "Ultimate low system dark-count rate for superconducting nanowire single-photon detector," Opt. Lett., vol.40, pp.3428–3431, 2015.

[17] 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., vol.39, pp.5078–5081, 2014.

[18] R.H. Hadfield, "Single-photon detectors for optical quantum information applications," Nat. Photon., vol.3, pp.696–705, 2009.

[19] M.D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, and S.V. Polyakov, "Single-photon sources and detectors," Rev. Sci. Instrum., vol.82, 071101, 2011.

[20] T. Yamashita, S. Miki, W. Qiu, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Temperature dependent performances of superconducting nanowire single-photon detectors in an ultralow-temperature region," Appl. Phys. Express, vol.3, 102502, 2010.

[21] S. Subashchandran, R. Okamoto, L. Zhang, A. Tanaka, M. Okano, L. Kang, J. Chen, P. Wu, and S. Takeuchi, "Investigation of the performance of an ultralow-dark-count superconducting nanowire

single-photon detector," Jpn. J. Appl. Phys., vol.52, 102801, 2013.
[22] A.J. Miller, A. Lita, D. Rosenberg, S. Gruber, and S.W. Nam, "Superconducting photon number resolving detectors: Performance and promise," Proc. 8th Int. Conf. Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC '06), pp.445–450, Tsukuba, Japan, Nov. 2006.
[23] D. Fukuda, G. Fujii, T. Numata, K. Amemiya, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, H. Fujino, H. Ishii, T. Itatani, S. Inoue, and T. Zama, "Titanium superconducting photon-number-resolving detector," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.21, pp.241–245, 2011.
[24] T. Seki, H. Shibata, H. Takesue, Y. Tokura, and N. Imoto, "Comparison of timing jitter between NbN superconducting single-photon detector and avalanche photodiode," Physica C 470, pp.1534–1537, 2010.
[25] W.J. Munro, A.M. Stephens, S.J. Devitt, K.A. Harrison, and K. Nemoto, "Quantum communication without the necessity of quantum memories," Nat. Photon., vol.6, pp.777–781, 2012.
[26] K. Azuma, K. Tamaki, and H.K. Lo, "All-photonic quantum repeaters," Nat. Commun., vol.6, 6787, 2015.
[27] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden, "Quantum cryptography," Rev. Mod. Phys., vol.74, pp.145–195, 2002.
[28] K. Inoue, E. Waks, and Y. Yamamoto, "Differential phase shift quantum key distribution," Phys. Rev. Lett., vol.89, 037902 , 2002.
[29] K. Wen, K. Tamaki, and Y. Yamamoto, "Unconditional security of single-photon differential phase shift quantum key distribution," Phys. Rev. Lett., vol.103, 170503, 2009.
[30] H. Takesue, S.W. Nam, Q. Zhang, R.H. Hadfield, T. Honjo, K. Tamaki, and Y. Yamamoto, "Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors," Nat. Photon., vol.1, pp.343–348, 2007.
[31] S. Wang, W. Chen, J.F. Guo, Z.Q. Yin, H.W. Li, Z. Zhou, G.C. Guo, and Z.F. Han, "2 GHz clock quantum key distribution over 260 km of standard telecom fiber," Opt. Lett., vol.37, pp.1008–1010, 2012.
[32] X. Yang, H. Li, W. Zhang, L. You, L. Zhang, X. Liu, Z. Wang, W. Peng, X. Xie, and M. Jiang, "Superconducting nanowire single photon detector with on-chip bandpass filter," Opt. Express, vol.22, pp.16267–16272, 2014.

（平成 27 年 9 月 7 日受付，9 月 29 日再受付，
28 年 2 月 9 日公開）

柴田　浩行　（正員）

1987 年早稲田大学大学院修士課程修了．同年日本電信電話株式会社基礎研究所入所．2015 年北見工業大学電気電子工学科教授．超伝導エレクトロニクスの研究に従事．

清水　薫

1990 年早稲田大学大学院修士課程修了．同年日本電信電話株式会社伝送システム研究所入所．現在，NTT 物性科学基礎研究所グループリーダー．量子光学・量子通信の研究に従事．

本庄　利守

1998 年東京工業大学大学院修士課程修了．同年日本電信電話株式会社ソフトウェア研究所入所．現在，NTT ソフトウェアイノベーションセンタ主任研究員．並列分散処理の研究に従事．

武居　弘樹

1996 年大阪大学大学院修士課程修了．同年日本電信電話株式会社アクセス網研究所入所．現在，NTT 物性科学基礎研究所特別研究員．量子光学・量子通信の研究に従事．

都倉　康弘

1985 年東京大学大学院修士課程修了．同年日本電信電話株式会社武蔵野電気通信研究所入所．現在，NTT 物性科学基礎研究所リサーチプロフェッサー．2012 年筑波大学大学院数理物質研究科教授．量子輸送理論の研究に従事．