

단일광자 검출기 기술개발 동향

Single Photon Detectors Technologies Development Trends for Quantum Information

이욱재 (W.-J. Lee, lee.wookjae@etri.re.kr)

양자광학연구실 선임연구원

심재식 (J.-S. Sim, jssim@etri.re.kr)

양자광학연구실 책임연구원

윤천주 (C.J. Youn, cjyoun@etri.re.kr)

양자광학연구실 책임연구원

ABSTRACT

Single photon detector technologies have emerged as powerful tools in optical quantum information applications such as quantum communication, quantum information, and integrated quantum photonics. Owing to significant attempts in the previous decade at improving photon-counting detectors, several single photon detectors with high efficiency and low noise have been realized within the optical wavelength regime. In this paper, we provide an overview of current studies on single photon detectors operating at wavelengths from the ultraviolet to the infrared. In addition, we discuss applications of single photon detector technologies in quantum communication and integrated quantum photonics.

KEYWORDS Single photon detector, 단일광자 검출기, 양자정보기술, 양자광학, 양자정보통신

1. 서론

1905년 Einstein에 의해 빛이 에너지 덩어리(Energy Packet), 즉 광자(Photon)라는 개념이 알려진 이후[1] 광전효과는 오늘날 광 검출기(Photodetector) 작동원리의 근간이 되어 현대 광산업의 급속한 발전을 야기해왔다. 광자는 또한 양자화(Quantization)를 통해 불연속적인 에너지 덩어리로 해석되기 시작하면서 양자역학이 고도화될 수 있었고, 미시세

계의 흥미로운 현상들이 하나씩 설명되고 있다.

최근 양자상태의 인위적 조작을 통한 정보전달 방법의 물리적 개념 및 기술적 발전을 통해 우리는 양자암호통신[2]과 양자컴퓨터[3]와 같은 양자 기술(Quantum Technology)의 현실화에 한걸음 더 가까워지고 있다. 이런 양자정보기술은 양자상태의 준비(생성), 제어(조작), 측정(검출)이라는 세 가지 핵심 단계를 거쳐야 한다. 광자는 각 단계에서 다른 양자 매체에 비해 상대적으로 쉽게 준비, 제어,

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2020.J.350403>

* This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT)[(No. NRF-2017R1E1A1A01075263) and IITP (No. 1711103293 and 1711117087)].



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2020 한국전자통신연구원

측정이 다루어질 수 있기 때문에 광 시스템은 양자정보기술의 중요한 플랫폼이 된다. 광자는 중첩(Superposition)과 얽힘(Entanglement) 같은 비고전성(Non-classical)을 가지고 있고, 고전적 도구를 통해 광자의 상태를 변하게 할 수 있어 매우 효율적인 양자 매체이다. 하지만 광 시스템이 양자정보기술 영역을 다루기 위해서는 양자물리학적 특성을 나타낼 수 있는 단일광자를 검출할 수 있어야 한다. 광자 하나의 에너지는 근적외선 영역에서 대략 10^{-19} J로 매우 작기 때문에 단일광자의 검출을 위해서는 극도로 민감한 광 검출기를 사용해야만 한다. 양자 기술 시스템에서 가장 크게 영향을 미치는 부분은 신뢰도이며, 이는 광자가 제때에 검출되었는지가 가장 중요하다. 따라서 양자 기술의 발전은 단일광자 검출기의 발전과 걸음을 함께 하고 있다.

본 고에서는 단일광자 검출기의 성능 지표를 나타내는 특성과 검출기의 종류에 대해 소개한다. 그리고 단일광자 검출기가 핵심 부품으로 사용되는 양자암호통신 및 양자 광집적회로 분야의 연구개발 동향과 어떤 단일광자 검출기가 사용되는지 기술한다.

II. 단일광자 검출기 성능지표

단일광자 검출기는 광자 하나를 검출할 수 있

는 광 검출기로서 성능은 광자 검출효율(Detection Efficiency), 다크 카운트(Dark Count), 불감시간(Dead Time), 타이밍 지터(Timing Jitter)와 같은 특성 지표로 설명 가능하다. 그림 1은 각 성능지표의 이해를 위한 도식이다.

1. 광자 검출효율

단일광자 검출기의 가장 중요한 성능지표로는 광자 검출효율이 있다. 단일광자 검출기의 경우 광자가 검출기에 도달하여 검출될 확률로 효율을 정의한다(η). 이상적인 단일광자 검출기의 광자 검출효율은 다음과 같이 나타낸다.

$$\eta = R_{\text{detected}}/R_{\text{incident}}$$

여기서 R_{detected} 은 검출된 단일광자의 수이고, R_{incident} 은 보내져온 단일광자의 수이다. 하지만 검출기로부터 주어지는 검출신호 중 실제 광자가 도달하지 않았지만 외부의 열이나 검출기 자체의 결함 또는 다른 환경에 의해 주어지는 거짓 신호, 즉 다크 카운트(Dark Count)가 존재하기 때문에 실제 단일광자 검출기의 효율은 다음과 같이 정의한다.

$$\eta = (R_{\text{detected}} - R_{\text{dark}})/R_{\text{incident}}$$

여기서 R_{dark} 는 검출된 거짓 신호이다.

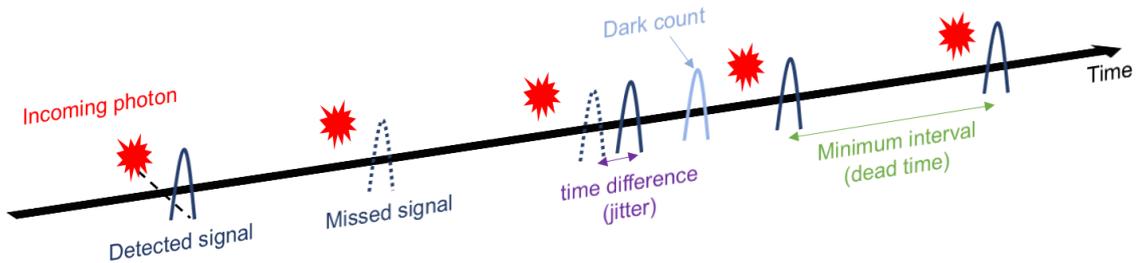


그림 1 단일광자 검출기 성능지표 도식

2. 다크 카운트(Dark count)

대부분의 단일광자 검출기는 검출되는 광자 신호를 전기 신호로 바꿔 광자들이 검출되었음을 알린다. 이때 검출기 내부(물질)나 외부의 잡음(전자 회로)이 항상 존재하게 된다. 단일광자 검출기의 경우 광자의 있고 없음을 감지해야 하는 데 있어서 이런 잡음은 거짓 검출 신호를 야기하여 광자 검출 효율에 큰 영향을 미치게 된다. 이를 다크 카운트(또는 dark noise, dark current)라 하고, 보통 초당 다크 카운트로 표기하여 Hertz 단위로 나타낸다. 효율적 단일광자 검출기 개발을 위해서는 다크 카운트 비율을 낮춰야 한다.

3. 불감시간(Dead time)

하나의 광자가 검출되고 다음 광자를 검출하기 위해서는 검출기가 광자 검출 준비상태로 돌아가야 하는데, 이 시간대를 불감시간 또는 회복시간(Recovery Time)이라 한다. 불감시간은 검출기를 구성하고 있는 물질에 매우 민감하고, 검출기 회로가 어떻게 설계되어 있는지에 따라 다양한 시간 차이를 갖게 된다. 또한 단일광자 검출기는 검출된 광자의 개수나 시간 차이를 측정하기 위해 외부 전자기기를 사용하게 되는데, 검출기 자체의 불감시간보다는 외부 전자기에 의한 불감시간이 더 커지는 경우가 있다. 불감시간은 단일광자 검출기의 검출 속도를 제한하기 때문에 빠른 속도의 단일광자 검출을 위해서는 불감시간을 줄여야 한다. 현재 상용화된 단일광자 검출기의 가장 빠른 불감시간은 수십 ns 정도이다.

4. 타이밍 지터(Timing jitter)

검출된 광 신호를 전기 신호로 발생시키는 과정

에서 필연적으로 발생하는 검출시간의 통계적 변화를 타이밍 지터 또는 지터라고 부른다. 지터는 광자 검출효율에는 영향을 미치지 않는다. 지터가 작으면 작을수록 단일 광자의 도달 순간 시간 변화 없이 광자를 검출할 수 있다. 불감시간과 함께 지터는 단일광자 검출기의 속도에 영향을 주기 때문에 빠른 속도로 시간 차이를 두어 양자 신호를 전달하는 시스템의 경우 지터는 매우 중요한 특성이다. 최근 단일광자 검출기의 물질 변화, 그리고 디자인이나 전자기기의 성능 향상에 의해 지터 값은 작아지고 있고 상용화된 단일광자 검출기의 지터는 대략 수십 ps 수준이다.

5. 기타 특성

단일광자 검출기로 검출 가능한 광자의 파장범위는 응용을 고려했을 때 매우 중요하다. 무선 양자통신에서는 가시광선 영역이나 근적외선 영역의 파장을 갖는 단일광자를 이용하지만, 유선 응용을 위해서는 광통신 파장 영역의 단일광자를 이용해야 장거리 전송에 유리하다. 따라서 응용분야에 따라 특정 파장에서 좋은 특성을 갖는 단일광자 검출기의 사용이 요구된다.

단일광자 검출기는 광자가 검출되었는지 아니면 여러 개의 광자가 동시에 들어와 검출되었는지를 구분하지 못한다. 다시 말하자면, 다수의 광자가 단일광자 검출기에 동시에 입사될 때 단일광자 검출기는 하나의 신호만을 주게 되고 하나의 광자로 카운트하게 된다. 양자 통신에 사용되는 대부분의 광원은 레이저의 감쇄를 통해 얻어내는 확률적인 단일광자 광원으로 하나의 광자가 있는 경우와 여러 개의 광자가 함께 있는 경우가 혼재되어 있다. 확률적 단일광자 광원은 양자 통신에 사용되어도 문제없지만, 단일광자 상태(single photon states)가

요구되는 양자 정보 프로토콜의 경우 단일광자 검출기가 광자 수를 분해할 수 없는 제한적 특성으로 인해 레이저의 감쇄를 통해 얻어내는 확률적 단일광자 광원은 양자광원으로써 사용할 수 없게 된다. 따라서 광자 수 분해능을 가진 다양한 형태의 단일광자 검출기 연구가 활발히 진행 중이다[4-6].

III. 단일광자 검출기 종류

단일광자 검출기는 다양한 물리적 원리와 물질 체계에 의해 구성되어 있다. 다양한 단일광자 검출기의 종류에 대해 알아보고 특성 및 장단점에 대해 알아보자. 단일광자 검출기의 종류와 특성에 대한 비교는 표 1에 정리하였다.

1. 광전 증폭관(Photomultiplier tubes)

가장 오랜 역사를 가진 단일광자 검출기는 광전 증폭관이다. 1949년 단일광자 검출이 가능함을 보인 이후[7] 지금까지도 널리 사용되고 있다. 작동원리는 진공관 안에 있는 포토캐소드(Photocathode)가 광자를 흡수하여 광전효과에 의해 전자를 방출하고, 다이노드(Dynode)로부터 증폭된 전자들을 검출하는 것이다. 포토캐소드의 형태에 따라 transmission mode(원통형)와 reflection mode(우물형)로 나뉜

다. 광전 증폭관은 검출면적이 넓고 115~1,700nm 파장 영역의 단일광자를 검출할 수 있지만 동작을 위한 전압이 매우 높고 검출효율이 50%대이다.

2. Single-photon avalanche diodes

Photon이 가지는 에너지는 파장이나 주파수에 따라 결정된다. 반도체는 물질에 따라 고유의 bandgap 에너지를 가지며, 이보다 큰 에너지의 빛이 조사되면 빛이 물질에 흡수된다. 이러한 photon의 흡수에 의해 valance band(가전자대역)의 전자가 conduction band(전도대역)로 여기(excitation)되고, 이로 인해 전자-정공 쌍(EHP: Electron-Hole Pair)이 생성되며, photocurrent로 나타난다. 반도체 물질의 bandgap energy에 따라 흡수되는 빛의 파장이 결정되는데, 주로 가시광선 대역(400~900nm)에서는 실리콘(Si)이 이용되고, 적외선 대역(1,000~1,700nm)에서는 InGaAs가 이용된다. Photodetector가 빛을 전기 신호로 변환하는 효율을 Responsivity(R_{ph})라 하며, 입사되는 optical power에 대해 흐르는 photocurrent로 정의된다. 또 다른 요소는 Quantum Efficiency(QE, η)이며, QE는 입사되는 photon에 대해 생성되는 EHP의 수로 정의된다 [8,9].

반도체 물질 내에서 carrier(전하)는 격자들 사

표 1 단일광자 검출기 성능 비교

검출기 종류	동작온도(K)	검출효율(%)	다크 카운트(Hz)	불감시간(ns)	지터(ps)	광자 수 분해
PMT(visible)[18]	300	45@550nm	100	-	50	불가능
PMT(IR)[19]	200	2@1,550nm	200,000	-	300	불가능
Si SPAD[20]	263	80@800nm	200	50	400	불가능
InGaAs SPAD[21]	250	25@1,550nm	50	1,000	150	불가능
TES[22]	0.1	95@1,550nm	-	~1,000	100,000	가능
SNSPD[23]	2.7	85@1,550nm	300	30	25	불가능

이로 움직이는데, 반도체에 bias를 가하게 되면 electric field가 격자 내에서 형성되고 field에 의한 힘에 이끌려 전하 및 정공은 서로 반대의 일정한 방향으로 움직이게 된다. 전기장의 크기가 약 수십~수백 kV/cm에 이르게 되면 전하는 큰 에너지를 가지게 되고, 이 상태로 격자에 충돌하면 격자 내에 속박된 전자를 튕겨낸다. 이 상황을 energy band 이론으로 설명하면 가전자대역의 안정적인 격자가 전하의 충돌로부터 에너지를 얻어 전도대역으로 여기되고, 동시에 가전자대역에는 정공이 생성된다. 이렇게 생성된 2차 EHP는 다시 전기장에 의해 가속되어 이들 중 일부 혹은 전부가 또다시 새로운 EHP를 만들게 되는데, 이와 같은 현상을 impact ionization(충돌 이온화)이라 한다. 충돌 이온화는 하나의 에너지 전하 운반체가 다른 전하 운반체를 생성함으로써 에너지를 잃을 수 있는 물질에서의 과정이다. 아발란치(Avalanche) 항복은 충돌 이온화가 연속적으로 발생하는 것으로 단위 길이당 충돌 이온화가 발생하는 횟수를 이온화 계수라고 한다. 이온화 계수의 역수가 전자나 정공이 충돌 이온화 없이 진행할 수 있는 평균거리이다. 전자에 대한 충돌 이온화 계수를 α , 정공에 대한 충돌 이온화 계수를 β 라고 한다. 동일한 물질 내에서 가해지는 electric field(전기장)에 따라 서로 다른 값을 가진다. 실리콘의 경우 α 가 β 보다 50배가량 크며, InP의 경우 β 가 α 보다 2~3배가량 크다. InP는 정공에 의해 주로 아발란치 항복이 발생한다[10].

반도체 기반의 광 검출기는 구조와 동작원리에 따라 다양한 종류가 있으며, p-type, n-type 반도체 사이에 intrinsic 반도체를 둔 p-i-n photodiode(PIN PD)이며, reverse bias(역전압)를 인가하여 아발란치 항복이 일어나게 하여 소자 내부에 gain(이득)을 가지도록 한 것이 avalanche photodiode(APD)이

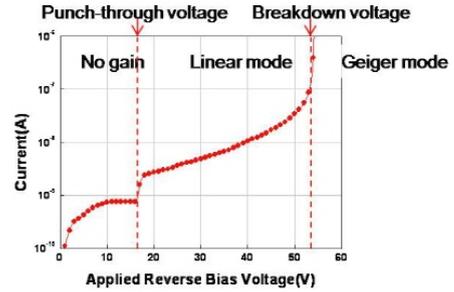


그림 2 APD의 두 모드(Geiger and linear modes)

다. APD의 장점은 다이오드에서 아발란치 효과에 의한 전류 증폭 작용으로 신호 대 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)가 높고, 양자효율이 40~80%로 다른 검출기에 비해 높다. 역전압을 항복전압보다 작게 인가하면 출력전류의 크기는 입력되는 광세기에 선형적으로 비례하여 증가하고 역전압의 크기에 비례하여 이득특성을 가진다. 이를 Linear mode operation(선형모드 동작)이라 한다. 단일광자를 검출하기 위해서는 역전압을 항복전압보다 크게 인가하는데 Geiger mode operation(가이저 모드 동작)이라 한다[11]. 그림 2와 표 2에서 선형 모드와 가이저 모드 동작의 동작 bias voltage와 current level 및 특징을 나타내었다.

증폭층에 인가하는 전기장의 세기가 크기 때문

표 2 Linear 모드와 Geiger 모드의 비교

작동방식	Linear 모드	Geiger 모드
동작전압	광이득이 약 10인 바이어스 전압	항복전압 이상의 바이어스 전압
동작방식	일정 바이어스 전압조건에서 신호 획득	짧은 시간 동안 가이저 모드로 동작
특성	입사 광량에 일정 이득으로 전류 생성	단일광자 레벨 입력에 디지털 출력 신호 발생
이득구간	10~100	$10^5 \sim 10^7$
응답속도	~0.1nsec	~0.1nsec
수신감도	100photons/1nsec	1photon/1nsec

에 소량의 광자를 흡수하더라도 아발란치 전류의 항복현상이 발생하게 되어 거대 전류 펄스가 출력되므로 단일광자의 검출이 가능하게 된다. 역전압이 클수록 열적 전자가 여기상태에 있을 확률과 터널링 확률이 증가하게 되어 광자의 흡수 없이도 아발란치 전류가 발생하는 Dark current(암전류)가 증가하게 된다. 아발란치 전류의 발생 시 excess current(과잉전류)가 흐를 수 있다. 그래서 APD를 가이저 모드로 동작할 때는 아발란치 전류의 지속적인 흐름을 억제하는 회로(Quenching Circuit)가 필요하다. 이러한 억제회로에는 passive quenching circuit(수동 억제 회로)와 active quenching circuit(능동 억제 회로)가 있다[9, 12].

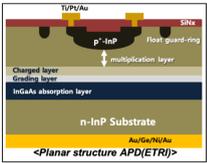
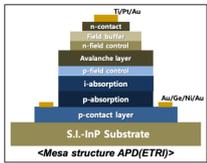
APD는 크게 두 가지 형태로 제작할 수 있다. 하나는 planar 구조이고, 다른 하나는 mesa 구조이며, 장점과 단점은 표 3에 나타내었다. Planar 구조는 낮은 암전류, 다크 카운트, 높은 reliability 등의 장점이 있지만 diffusion 공정을 거쳐야 하기 때문에 제작 과정이 복잡한 단점이 있다. Mesa 구조는 성장한 에피층을 etching을 통해 제작하므로 에피층의

성장이 매우 중요하며, 제작 공정은 비교적 간단한 장점이 있지만, etching을 통해 제작하므로 표면의 노출이 많기 때문에 큰 암전류, 낮은 reliability 등의 단점이 있다.

Geiger mode(가이저 모드) APD는 민감도가 좋아서 광자 한 개의 수준도 검출할 수 있어 single-photon avalanche diode(SPAD)라고도 한다. 가이저 모드 APD의 이득은 이론상 무한대이고, 실제 $10^5 \sim 10^6$ 정도이다[13]. 가이저 모드 APD의 동작 흐름은 그림 3에 나타내었다. 빛이 들어오게 되면 수많은 전자와 정공이 생성되어 방출된다. 아발란치 항복이 발생하고 난 후 quenching과 recharge 회로를 이용하여 검출기의 전원을 OFF(quenching)한 후 다시 충전하는 동안(Recharge) 일정한 시간이 필요하고, 이 시간 동안 어떠한 신호도 검출할 수 없다. Dead time은 가이저 모드 APD를 구성하고 있는 물질의 재료나 quenching 회로가 어떻게 설계되어 있느냐에 따라 수 $\mu s \sim$ 수 ns 정도로 나타난다.

아발란치 전류 발생 시 이종접합부에 잡히는 전하가 많으며, 이 전하들이 모두 방출되기 전에 다음의 gate 펄스가 입력되면 새로운 아발란치 전류가 야기된다. 이를 afterpulse라고 하는데, gate 펄스의 시간간격이 작을수록 잡음 카운트율을 증가시키게

표 3 APD의 구조 비교

	Planar 구조	Mesa 구조
구조		
장점	<ul style="list-style-type: none"> • Low dark current • Large active region • High reliability 	<ul style="list-style-type: none"> • Low crosstalk(array) • No diffusion, No guard ring • Simple fabrication
단점	<ul style="list-style-type: none"> • Diffusion variation • Low uniformity 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesa etching defect (Large dark current) • Low reliability
Issue	• Diffusion depth	• Mesa passivation

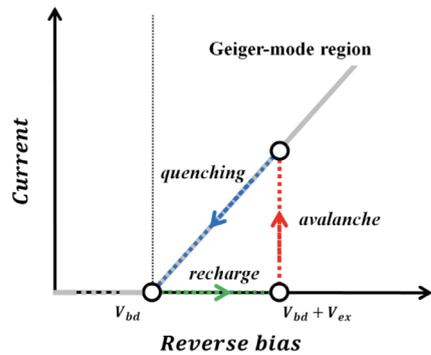


그림 3 Geiger mode cycle

되므로 APD의 최대 동작속도를 결정하는 요인이 된다.

단일광자 검출기는 사용하는 파장대역에 따라 적외선 대역에서 사용하는 InGaAs SPAD와 가시광선 대역에서 사용하는 실리콘 SPAD로 구분할 수 있다. 광검출효율은 InGaAs SPAD는 최대 50%, 실리콘 SPAD는 최대 90%의 검출효율을 가질 수 있으나 다른 성능 요소가 미흡하여 광자 검출효율과 함께 모든 성능 요소를 개선시키는 연구가 지속적으로 필요하다.

3. Superconducting transition-edge sensors

다양한 파장에서 매우 높은 검출효율을 갖는 단일광자 검출기로는 초전도 transition-edge sensor(TES)가 있다. 초전도 필름으로 이루어져 있는 광자 흡수 매질이 광자를 흡수하며 변화된 온도를 감지하는 작동 원리이다. 초전도 TES의 장점은 광통신 파장의 광자를 95%의 효율로 검출 가능하고 광자의 에너지에 비례하는 온도 변화 현상을 읽을 수 있기 때문에 광자 수 분해가 가능하다. 그러나 동작온도가 수백 mK으로 거대한 냉동 시스템이 요구되고 타이밍 지터가 수백 ns를 갖기 때문에 동작속도의 한계를 갖는다. 그럼에도 100%에 가까운 효율 특성과 광자 수 분해가능 특성으로 인해 많은 양자광학 실험분야나 장거리 양자암호 전송 분야에서 관심을 가지고 있다.

4. Superconducting nanowire single photon detectors

초전도 나노와이어 단일광자 검출기(SNSPD: Superconducting Nanowire Single Photon Detector)는 가

시광 영역에서부터 중적외선 영역까지 넓은 파장 영역의 단일광자를 낮은 다크 카운트, 짧은 불감시간, 작은 지터, 높은 광자 검출효율을 가지고 검출할 수 있는 특성을 가지고 있다. 단일광자 검출 영역은 매우 얇은 초전도 필름(수 nm)을 대략 100nm(초전도 결맞음 길이)의 선폭을 갖는 구불구불한(meander) 형태의 나노와이어로 만들어진다. 초전도 물질이 가지고 있는 광자 흡수계수에 의해 흡수된 광자를 검출하기 때문에 검출효율을 높이기 위한 방법으로 광학적 공진기(Cavity) 구조와 함께한다. 공진기 구조는 파장에 민감하게 반응하기 때문에 파장에 따른 광자 검출효율이 일정하지 않으므로 목표하는 파장을 중심으로 공진기를 설계한다. 동작 온도는 1~4K으로 TES에 비해 상대적으로 작은 크기의 냉동기가 사용된다.

그림 4에는 SNSPD의 작동 원리를 나타냈다. 초전도 전이온도보다 낮은 온도에서 초전도 상태가 깨지기 전까지 전류를 흘려주고 광자가 초전도 나노와이어로 입사되면 흡수된 광자가 핫스팟(Hotspot)을 생성한다. 생성된 핫스팟은 확산에 의해 나노와이어의 양 끝단까지 이동하여 저항 영역이 형성되고 초전도 전류 분포를 막아 더 이상 초전도 상태를 유지하지 못하고 저항을 갖는 일반 상태(Normal State)로 전이된다. 이때 생성된 저항과 인가되고 있는 전류에 의해 전압이 검출되어 광자의 검출이 가능해진다[14]. 여기서 초전도 상태가 깨

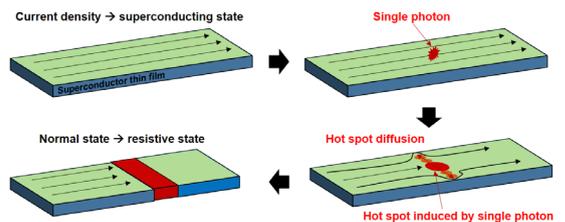
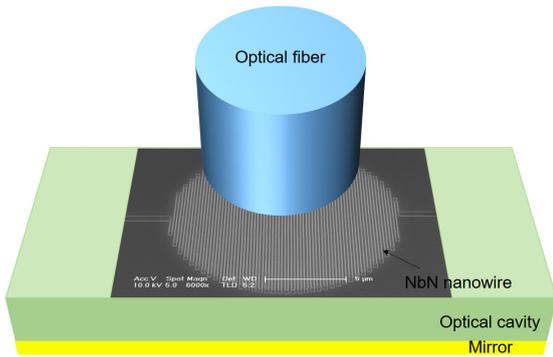


그림 4 SNSPD 작동 원리



* 외부로부터 광섬유를 통해 meander 구조의 초전도 나노와이어로 단일광자가 방출되면 optical cavity 영역에서 공진을 통해 향상된 흡수를 보인다.

그림 5 일반적인 meander 형태의 SNSPD 구조

지게 되는 mechanism에 대한 이론적 연구가 진행 중이며, 다양한 이론이 제안, 검증되고 있다[15].

현재 상용화된 meander 구조의 SNSPD는 그림 5와 같이 광섬유와 효율적인 결합을 위해 수십 $\mu\text{m} \times$ 수십 μm 의 면적으로 나노와이어가 이어져 있어 초전도 필름의 두께나 너비의 균일도가 검출기의 성능에 크게 영향을 미친다. SNSPD가 가지고 있는 가장 큰 장점은 반도체 기반의 SPAD와는 달리 불감시간이 짧고 광집적회로에 집적화가 쉽다는 것이다. SPAD는 다양한 doping 영역을 갖는 구조물이 광집적회로 내에 있는 단일광자 검출 영역에 놓여야 하기 때문에 공정상 어려움을 갖지만, SNSPD의 경우 박막을 단일광자 검출 영역에서 나노와이어 형태로 만드는 간단한 공정이다. 따라서 빠른 동작 속도를 가지고 공정이 쉬운 광도파로 집적형 단일광자 검출기에 대한 SNSPD 응용이 활발하게 진행되고 있다[16,17].

초전도 물질로는 비교적 높은 초전도 임계온도를 갖는 NbN이나 NbTiN가 많이 사용되고 있는데 물질의 결정형태에 따라 특성이 크게 달라지는 단점을 가지고 있어, 비정질(Amorphous)인 WSi이나 MoSi 같은 물질도 많이 사용되고 있다. 하지만 물

질 특성으로 인해 NbN, NbTiN은 2.5K 온도 영역에서 동작되는 반면, WSi나 MoSi는 주로 1K 영역에서 동작된다. 다행스럽게도 SNSPD의 동작온도까지 closed-cycle 냉동기 시스템으로 유지 가능하기 때문에 광통신 파장 영역에서 빠른 속도와 높은 효율을 가진 SNSPD가 앞으로 많은 양자정보처리 응용 분야에 사용될 것으로 예상된다.

상용화된 SNSPD의 경우 80% 이상의 검출효율과 수십 ns의 불감시간, 그리고 수십 ps의 지터를 갖고 있다. 높은 효율과 빠른 검출 속도를 갖는 장점에 비해 SNSPD는 소형화가 어렵기 때문에 최근 질소 분위기에서 초전도성을 갖는 물질을 활용한 단일광자 검출기가 연구되고 있고 closed-cycle 냉동기 시스템이 필요 없는 소형 SNSPD 개발을 위해 노력하고 있다.

IV. 단일광자 검출기의 활용분야

1. 양자암호통신

단일광자 검출기는 양자암호통신 시스템의 전송거리나 키 속도 성능을 좌우하는 핵심 부품이다. 특히 양자암호통신에서 키 속도와 전송 거리의 증가는 고속 동작하는 저잡음 단일광자 검출기의 발전과 밀접한 관련이 있다. 광섬유기반의 유선 양자암호통신에서는 1,550nm 광통신 파장대역의 검출이 가능한 InGaAs/InP SPAD가 주로 사용되고, 자유공간 양자암호통신에서는 가시광에서 근적외선 파장대역을 이용하기 때문에 실리콘 SPAD가 사용되고 있다. 또한 고속 장거리 양자암호통신을 위해서 부피가 큰 냉각장치를 필요로 하지만 광자 검출효율이 아주 높고 불감시간이 짧은 SNSPD를 이용하는 연구도 진행되고 있다. 그리고 하나의 양자암호통신 시스템에 사용되는 단일광자 검출기의 개수는 사용하는 양자암호 프로토콜이나 구현

방식에 따라서 다수의 단일광자 검출기를 필요로 하는데 주로 2개, 4개를 필요로 하며 RFI(Reference Frame Independent) 양자암호 프로토콜 같은 경우에는 6개를 필요로 하는 경우도 있다[24].

가. SPAD 기반의 양자암호통신 연구동향

InGaAs/InP SPAD가 주요 양자암호통신 실험에 사용된 것을 연도순으로 알아보면 다음과 같다. 스위스 제네바대학교의 Ribordy는 저주파수 게이티드 모드(Gated Mode) 방식의 InGaAs/InP SPAD를 1990년대 말 양자 키분배 시스템에 사용하기 시작하였다[25]. 이후 Richard J. Hughes 등은 2000년에 48km 길이의 광섬유에서 BB84 단방향 위상 인코딩 양자 키분배 실험을 구현하였고[26], 2002년 Stucki 등은 스위스 제네바와 로잔 사이의 67km 이상의 포설 광섬유에 대해서 plug and play 양자 키분배 현장 실험을 보고하였다[27]. 2004년 Toshiba Research Europe 그룹은 -100°C 에서 낮은 다크 카운트를 갖는 SPAD를 개발하여 최대 122km까지 거리의 양자 키분배 시스템을 보고했다[28].

양자 키분배 실험은 확정적 단일광자 광원 대신 레이저 펄스 광원을 단일광자 수준으로 낮추어 실험한 결과이며 레이저 펄스 광원의 광자 수가 푸아송(Poisson) 분포를 나타내므로 다중 광자 수가 발생할 수 있다. 이로 인해 다중 광자 수에 광자 수 분할 공격으로 인한 안전성에 문제가 있을 수 있으며, 실제 위의 보고된 전송거리보다 안전성을 고려하면 더욱 전송 거리가 제한될 수 있다. 이후 미끼 상태(Decoy State)를 이용한 방법이 제안되어 광자 수 분할 공격에 의한 안전성이 문제가 해결되었으며, 감쇄된 레이저 펄스 광원을 이용한 양자 키분배 시스템이 실험적으로 더욱 안전해졌다[29,30]. 2007년 중국 칭와대의 Peng은 InGaAs/InP SPAD를 사용하여 100km 이상의 거리에서 미끼 상태 양자

키분배 실험 결과를 보고하였다[31].

양자 키분배에서 더 높은 키속도와 더 먼 장거리 전송을 위해서는 높은 주파수 게이팅과 애프터 펄스 효과가 낮은 단일광자 검출기가 요구된다. 2007년 일본 NTT의 Namekata는 sinusoidally gated InGaAs/InP SPAD를 사용하여 500MHz의 클럭 속도, 15km 광섬유 전송거리에서 0.33Mbps 최종 보안 키속도를 가질 수 있는 차동 위상 편이(Differential Phase Shift) 양자 키분배 실험을 구현하였다[32]. 2008년 영국 Toshiba Research Europe 연구소의 Yuan은 단일광자 검출기에 self-differencing 모드 동작 방식을 개발하여 GHz 양자 키분배 실험을 시도하였으며, 65.5km에서 27.9kbps의 비밀 키속도를 달성하였다[33]. 또한 self-differencing 모드 동작 단일광자 검출기 기술을 계속 개선하여 1,550nm 파장대역에서 55% 이상의 광자 검출효율을 가질 수 있는 InGaAs/InP SPAD 기술을 보고하였으며, 최근에는 2dB의 채널 손실(약 10km 전송거리)에서 세계 최고 비밀키 생성 속도에 해당하는 10Mb/s 이상의 비밀키 생성 속도를 가지는 양자 키분배 시스템 기술을 보고하였다[34,35].

양자 키분배 프로토콜이 1984년에 처음 제안되었지만 실험적으로 구현된 것은 1989년에 실험실 내의 32cm 자유 공간 링크를 통해 이루어졌다[36]. 자유 공간 양자 키분배 실험은 초창기에는 PMT(PhotoMultiplier Tube)를 이용하여 단일광자검출을 수행하였지만 2000년대 이후 광자 검출효율이 높은 실리콘 SPAD가 주로 사용되었다. 실리콘 SPAD가 주요 양자암호통신 실험에 사용된 것을 연도순으로 알아보면 다음과 같다. 2002년 미국에서 10km 대기 거리에서 수동 퀀칭 방식의 실리콘 SPAD를 이용하여 양자 신호를 송수신하는 데 성공하였다[37]. 2007년에는 독일, 오스트리아, 네덜란드, 싱가포르, 영국 등의 연합 연구 그룹은 지상

두 기지국의 최장 거리인 144km 거리, 850nm 파장대역, 10MHz 클럭 속도에서 수동 퀀칭 방식의 실리콘 SPAD를 이용하여 128bps 수준의 키를 생성할 수 있는 무선 양자 키분배 실험 결과를 보고하였다[38].

2010년대에는 위성 양자암호통신을 위한 이동체와 고정 기지국 간의 연구가 수행되기 시작하였다. 2013년 독일 LMU 대학과 Max-Planck-Institute에서는 시속 290km로 움직이는 비행기와 4개의 실리콘 SPAD가 있는 지상 기지국 간의 자유 공간 양자암호통신 결과를 보고하였다[39].

중국 USTC 그룹은 2016년에 세계 최초로 목자(MICIUS)라고 불리는 양자암호통신용 저궤도 인공위성 발사에 성공하였다. 이 양자위성을 이용하여 2017년에 세계 최초로 저궤도 양자위성(송신부)과 지상 기지국(수신부) 간의 1,200km 떨어진 거리에서 약 1.1kbps 수준의 Sifted 키 생성속도를 얻을 수 있는 양자 키분배 실험 결과를 저널 Nature에 보고하였으며, 2018년 중국 Xinglong과 오스트리아 Graz 사이의 7,600km 거리의 두 지상국을 양자 위성을 릴레이로 이용하여 양자 키분배 실험 결과를 발표하였다[40, 41]. 대부분의 실험에서는 850nm 파장에서 50% 이상의 광자 검출효율을 가지는 능동 퀀칭형 실리콘 SPAD가 사용되었다.

전 세계적으로 양자 위성을 이용한 양자 키분배 프로젝트 연구가 계속 진행되고 있으며 가시광이나 근적외선(850nm) 파장대역을 사용하는 무선 및 위성 환경에서는 대부분 실리콘 SPAD가 사용될 것으로 예상된다[42].

한편 대부분 무선 양자 키분배 실험이 850nm 이하의 파장에서 수행되어 왔지만 1,550nm 파장대역에서 태양광에 의한 잡음의 양이 850nm 파장대역보다 낮으므로 무선 및 위성 간의 양자 키분배 실험은 1,550nm 파장대역을 사용하는 연구도 진

행되고 있다[43].

나. SNSPD 기반의 양자암호통신 연구동향

장거리 고속 양자 키분배를 위해서는 광자 검출 효율이 높고 다크 카운트가 낮으며 타이밍 지터가 아주 짧은 단일광자 검출기가 요구된다. 이러한 성능을 만족시키는 가장 좋은 것은 SNSPD이다.

2007년에 일본 NTT의 Takesue는 SNSPD를 사용하여 42dB 채널 손실, 200km 광섬유에 대한 양자 키분배 실험을 처음으로 보고했다[44]. 이때 SNSPD의 광자 검출효율은 1.4%로 매우 낮지만 50Hz의 낮은 다크 카운트와 50ps의 작은 타이밍 지터를 가지고 장거리 양자 키분배 실험 가능성을 보고하였다. 2011년 일본 NICT 주축의 국제 그룹은 도쿄 QKD 네트워크 구축하였고 45km 링크에 10% 이상의 광자 검출효율을 가지는 SNSPD를 설치하였다[45]. 또한 NTT 그룹은 2014년에 0.01cps의 초저 다크 카운트를 갖는 SNSPD를 사용하여 72dB 채널 손실, 336km 이상의 광섬유에 차동 위상 편이 양자 키분배 실험을 보고하였다[46].

2016년 중국 USTC 그룹의 Tang은 측정 장치에 안전한 양자 키분배 프로토콜인 MDI(Measurement-Device-Independent) 양자 키분배 프로토콜에서 66%의 광자 검출효율과 100Hz의 다크 카운트를 갖는 고성능 SNSPD를 사용하였다[47]. 2018년 Toshiba Research Europe 연구소는 Nature에 양자 중계기 없이 장거리 전송을 할 수 있는 Twin Field 양자 키분배 프로토콜을 제안하였으며, 최근 중국 USTC 그룹은 Twin Field 양자 키분배 프로토콜을 초전도체 단일광자 검출기를 이용하여 509km 이상 광섬유 전송이 가능하다는 실험한 결과를 보고하고 있다[48, 49].

앞서 소개한 연구들의 경우에서 알 수 있듯이, 단일광자 검출기의 성능 발전에 따라 양자 키분배

시스템의 전송거리나 속도가 함께 발전해 왔다. 향후 단일광자 검출기는 장거리 초고속 시스템을 위한 높은 광자 검출효율, 낮은 다크 카운트, 짧은 타이밍 지터, 낮은 애프터 펄스 효과, 짧은 불감시간 등의 성능 확보를 위한 기술 개발뿐만 아니라 초소형 모듈 및 다른 칩과의 집적화를 위한 연구 기술 개발이 함께 진행되어야 한다.

2. 양자 광집적회로

단일광자의 양자 상태는 편광이나 경로 등을 서로 다른 두 개의 상태로 구분되고 중첩을 통해 quantum bit(qubit)라고 불릴 수 있다(광자가 아닌 다른 플랫폼의 시스템에서도 두 개의 상태가 중첩된 경우 qubit이라 한다). 의미 있는 양자정보처리는 수천 개 이상의 qubit을 생성(준비)하고 제어를 통해 검출하는 과정을 거쳐야 한다. 자유공간상에 수천 개의 단일광자를 다루기에는 공간의 제약이 크기 때문에 수천 개 이상의 단일광자를 생성, 제어, 검출할 플랫폼으로 광집적회로가 각광받고 있다. 초기의 양자 광집적회로 연구는 양자광원과 단일광자 검출기를 광집적회로 외부에 위치시키고 제어만 광집적회로를 통해 하는 형태에 집중했던 반면, 최근엔 단일광자 광원 및 검출기를 on-chip화 하는 기술을 활발하게 연구하고 있다[50]. 또한 양자 광학 현상이 양자 광집적회로에서도 가능함을 보이던 초기 연구로부터 선형 광학기반의 양자컴퓨팅 연구에도 많은 관심을 쏟고 있어[51] 실용적인 양자 광집적회로의 가능성을 높이고 있다. 하지만 양자 광원의 효율과 광자의 구별불가능성에 대한 신뢰도가 만족되어야 하며 광집적회로에서 발생하는 손실에 대한 최적화가 이루어져야만 실용적인 양자 광집적회로로써 동작할 수 있기 때문에 실용적 응용을 위해 가야 할 길이 아직 멀다.

V. 결론

본 고에서는 양자정보처리 응용 분야에 사용되고 있는 단일광자 검출기의 핵심 성능과 종류에 대해 설명하였다. 그리고 양자암호통신과 양자 광집적회로 분야에 어떻게 사용되는지도 함께 알아보았다. 반도체 기반의 단일광자 검출기는 매우 성숙된 산업을 바탕으로 실험실에서부터 산업에까지 널리 사용되고 있는 반면, 광통신 파장대역의 광자 검출효율이 낮고 속도가 느리다. 초전도 기반의 단일광자 검출기는 광통신 파장대역에서 80% 이상의 높은 검출효율을 가지고 있고, 빠른 동작 속도를 가지는 장점이 있으나 3K 이하의 동작온도가 요구되어 closed-cycle 냉동기 시스템과 함께 사용되기 때문에 이동형(Portable) 장치로는 적합하지 않다. 따라서 양자정보처리 각 응용 분야에 적합한 파장이나 효율, 속도와 같은 요소들을 가장 잘 만족하는 단일광자 검출기가 선택되어 사용되고 있다. 또한 각 단일광자 검출기들의 한계를 극복하고자 전 세계 연구진이 활발하게 연구에 매진하고 있으며, 앞으로 향상된 성능을 가지는 단일광자 검출기는 천문, 바이오 이미징 분야에도 응용될 것으로 기대되고 있다.

약어 정리

APD	Avalanche Photodiode
EHP	Electron-Hole Pair
MDI	Measurement-Device-Independent
PIN PD	p-i-n photodiode
PMT	PhotoMultiplier Tube
QE	Quantum Efficiency
RFI	Reference Frame Independent
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SNSPD	Superconducting Nanowire Single

Photon Detector

SPAD Single-Photon Avalanche Diode
 TES Transition-Edge Sensor

참고문헌

- [1] A. Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt," *Annalen der Physik*, vol. 322, no. 6, 1905, pp. 132-148.
- [2] S. K. Liao et al., "Satellite-relayed intercontinental quantum network," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, no. 3, 2018, Article no. 030501.
- [3] F. Arute et al., "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature*, vol. 574, 2019, pp. 505-510.
- [4] A. Divochiy et al., "Superconducting nanowire photon-number-resolving detector at telecommunication wavelengths," *Nature Photon.*, vol. 2, 2008, pp. 302-306.
- [5] E. Pomarico et al., "Room temperature photon number resolving detector for infrared wavelengths," *Opt. Express*, vol. 18, no. 10, 2010, pp. 10750-10759.
- [6] B. Calkins et al., "High quantum-efficiency photon-number-resolving detector for photonic on-chip information processing," *Opt. Express*, vol. 21, 2013, pp. 22657-22670.
- [7] G. A. Morton, "Photomultiplier for scintillation counting," *RCA Rev.*, vol. 10, 1949, pp. 525-553.
- [8] K. Ekert, "Quantum Cryptography Based on Bell's Theorem," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 67, no. 6, 1991, pp. 661-663.
- [9] C. H. Nennett et al., "Experimental quantum cryptography," *J. Cryptology*, vol. 5, no. 3, 1992, pp. 3-28.
- [10] C. A. Armiento et al., "Impact ionization in (100)-, (110)-, and (111)-oriented InP avalanche photodiodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 43, no. 2, 1983, pp. 198-200.
- [11] S. G. Choi et al., "3-Dimensional LADAR Optical Detector Development in Geiger Mode Operation," *Korean J. Optics Photonics*, vol. 24, no. 4, 2013, pp. 176-183.
- [12] S. Cova et al., "Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 12, 1996, pp. 1956-1976.
- [13] S. Johnson et al., "Analysis of Geiger-mode APD laser radars," *Proc. SPIE*, vol. 5086, 2003, pp. 359-368.
- [14] G. N. Goltsman et al., "Picosecond superconducting single-photon optical detector," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, 2001, Article no. 705.
- [15] C. M. Natarajan et al., "Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications," *Supercond. Sci. Technol.* 25, 2012, p. 063001.
- [16] W. H. P. Pernice et al., "High-speed and high-efficiency travelling wave single-photon detectors embedded in nanophotonic circuits," *Nature Commun.*, vol. 3, 2012, Article no. 1325.
- [17] M. K. Akhlaghi et al., "Waveguide integrated superconducting single-photon detectors implemented as near-perfect absorbers of coherent radiation," *Nature Commun.*, vol. 6, 2015, Article no. 8233.
- [18] <https://www.picoquant.com/products/category/photon-counting-detectors/pma-hybrid-series-hybrid-photomultiplier-detector-assembly#specification>
- [19] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/NIR-PMT_APPLI_TPMO1040E.pdf
- [20] https://marketing.idquantique.com/acton/attachment/11868/f-0238/1/-/-/-/ID120_Brochure.pdf
- [21] https://marketing.idquantique.com/acton/attachment/11868/f-0234/1/-/-/-/ID230_Brochure.pdf
- [22] A. E. Lita et al., "Counting near-infrared single photons with 95% efficiency," *Opt. Express*, vol. 16, 2008, pp. 3032-3040.
- [23] <https://singlequantum.com/products/single-quantum-eos/>
- [24] H. Chun et al., "Handheld free space quantum key distribution with dynamic motion compensation," *Opt. Express*, vol. 25, 2017, pp. 6784-6795.
- [25] G. Ribordy et al., "Automated plug & play quantum key distribution," *Electron Lett.* vol. 34, 1998, pp. 2116-2117.
- [26] R. J. Hughes, G. L. Morgan, and C. G. Peterson, "Quantum key distribution over a 48km optical fibre network," *J. Mod. Opt.*, vol. 47, 2000, pp. 533-547.
- [27] D. Stucki et al., "Quantum key distribution over 67km with a plug&play system," *New J. Phys.*, vol. 4, 2002, Article no. 41.
- [28] C. Gobby, Z. L. Yuan, and A. J. Shields, "Quantum key distribution over 122km of standard telecom fiber," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, 2004, Article no. 3762.
- [29] W.-Y. Hwang, "Quantum Key Distribution with High Loss: Toward Global Secure Communication," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 91, 2003, Article no. 057901.
- [30] H.-K. Lo, X. Ma, and K. Chen, "Decoy State Quantum Key Distribution," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 94, 2005, Article no. 230504.
- [31] C. Z. Peng et al., "Experimental long-distance decoystate quantum key distribution based on polarization encoding," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, 2007, Article no. 010505.
- [32] N. Namekata et al., "Differential phase shift quantum key distribution using single-photon detectors based on a sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, 2007, Article no. 011112.
- [33] Z. L. Yuan et al., "Gigahertz quantum key distribution with InGaAs avalanche photodiodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, 2008, Article no. 201104.
- [34] L. C. Comandar et al., "Gigahertz-gated InGaAs-InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55% at

- 1550nm,” *J. Appl. Phys.*, vol. 117, 2015, Article no. 083109.
- [35] Z. Yuan et al., “10-Mb/s quantum key distribution,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 36, 2018, pp. 3427-3433.
- [36] C. H. Bennett and G. Brassard, “Experimental quantum cryptography: the dawn of a new era for quantum cryptography: the experimental prototype is working!,” *ACM Sigact News*, vol. 20, 1989, pp. 78-80.
- [37] R. J. Hughes et al., “Practical free-space quantum key distribution over 10km in daylight and at night,” *New J. Phys.*, vol. 4, 2002, Article no. 43.
- [38] T. Schmitt-Manderbach et al., “Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144km,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, 2007, Article no. 010504.
- [39] S. Nauerth et al., “Air-to-ground quantum communication,” *Nature Photon.*, vol. 7, 2013, pp. 382-386.
- [40] S.-K. Liao et al., “Satellite-to-ground quantum key distribution,” *Nature*, vol. 549, 2017, pp. 43-47.
- [41] S.-K. Liao et al., “Satellite-relayed intercontinental quantum network,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, 2018, Article no. 030501.
- [42] I. Khan et al., “Satellite-Based QKD,” *Opt. Photon. News*, vol. 29, 2018, pp. 26-33.
- [43] S. Liao et al., “Long-distance free-space quantum key distribution in daylight towards inter-satellite communication,” *Nature Photon.*, vol. 11, 2017, pp. 509-513.
- [44] H. Takesue et al., “Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors,” *Nat. Photon.*, vol. 1, no. 6, 2007, pp. 343-348.
- [45] M. Sasaki et al., “Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network,” *Opt. Exp.*, vol. 19, no. 11, 2011, pp. 10387-10409.
- [46] H. Shibata, T. Honjo, and K. Shimizu, “Quantum key distribution over a 72dB channel loss using ultralow dark count superconducting single-photon detectors,” *Opt. Lett.*, vol.39, no.17, 2014, pp. 5078-5081.
- [47] Y.-L. Tang et al., “Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution over Untrustful Metropolitan Network,” *Phys. Rev. X*, vol. 6, no. 1, 2016, Article no. 011024.
- [48] M. Lucamarini et al., “Overcoming the rate-distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters,” *Nature*, vol. 557, 2018, pp. 400-403.
- [49] J.-P. Chen et al., “Sending-or-Not-Sending with Independent Lasers: Secure Twin-Field Quantum Key Distribution over 509km,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 124, 2020, Article no. 070501.
- [50] G. Reithmaier et al., “On-chip time resolved detection of quantum dot emission using integrated superconducting single photon detectors,” *Scientific Reports*, vol. 3, 2013, Article no. 1901.
- [51] E. Knill, R. Laflamme, and G. J. Milburn, “A scheme for efficient quantum computation with linear optics,” *Nature*, vol. 409, 2001, pp. 46-52.