양자 정보 기술을 위한 양자 광원 연구 동향

Research Trend of Quantum Light Source for Quantum Information Technology

고영호 (Y.-H. Ko, yhko@etri.re.kr) 양자광학연구실 선임연구원
김갑중 (K.-J. Kim, k.j.kim@etri.re.kr) 양자광학연구실 선임연구원
최병석 (B.S. Choi, chbs@etri.re.kr) 양자광학연구실 책임연구원
한원석 (W.S. Han, wshan@etri.re.kr) 광통신부품연구실 책임연구원
윤천주 (C.J. Youn, cjyoun@etri.re.kr) 양자광학연구실 책임연구원
주정진 (J.J. Ju, jjju@etri.re.kr) 양자광학연구실 책임연구원

ABSTRACT

A quantum light source is an essential element for quantum information technology, including quantum communication, quantum sensor, and quantum computer. Quantum light sources including photon number state, entangled state, and squeezed state can be divided into two types according to the generation mechanism, namely single emitter and non-linear based systems. The single emitter platform contains atom/ion trap, solid-state defect/color center, two-dimensional material, and semiconductor quantum dot, which can emit deterministic photons. The non-linear based platform contains spontaneous parametric down-conversion and spontaneous four-wave mixing, which can emit probabilistic photon pairs. For each platform, we give an overview of the recent research trends of the generation, manipulation, and integration of single photon and entangled photon sources. The characteristics of quantum light sources are investigated for each platform. In addition, we briefly introduce quantum sensing, quantum communication, and quantum computing applications based on quantum light sources. We discuss the challenges and prospects of quantum light sources for quantum information technology.

KEYWORDS 양자 정보 기술, 단일 광자 광원, 얽힘 광원, 양자점, 양자 센서, 양자 통신, 양자 컴퓨터

Ⅰ. 서론

2017년 노벨물리학상을 수상한 레이저 간섭계 중력파 관측소(LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)는[1], 양자 광원을 이용한 양자 센서 기술 도입을 통해 기존 검출 한계의 개선 가능성을 발표하였다[2]. 2018년 인공위성을 기반으로 하여 중국과 오스트리아 사이 7,600km

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340510
* This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2019-0-00434, Development of quantum light source for operation of highly-relivable quantum sensors)

본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2019 한국전자통신연구원

에 이르는 대륙 간 무선 양자 통신의 성공적인 수행이 발표되었다[3]. 2019년 양자 컴퓨터 시제품인 IBM Q System One이 공개되었으며[4], 양자 컴퓨터의 중요한 응용으로 양자 시뮬레이션인 광자 기반 보존 샘플링(Boson sampling) 결과가 발표되었다[5]. 이와 같이 양자 통신, 양자 센서, 양자 컴퓨터 등으로 대표되는 양자 정보 기술(Quantum Information Technology)은 빠르게 발전하여 더 이상 먼 미래의 기술이 아니며, 점점 중요성이 부각되고 있다.

정보보호기술의 한계, 측정 감도의 한계, 계산 능력의 한계 등을 극복 가능하게 하는 양자 통신, 양자 센서, 양자 컴퓨터 등 양자 정보 기술 분야는 양자 중첩, 양자 얽힘, 복사 불가능성 등 양자 물리학적 특성이 핵심이다. 그러한 이유로 양자 정보 기술 분야는 많은 부분 광학 시스템, 특히 양자 광원을 기반으로 한다. 광자(Photon)란 빛을 단위 입자로 이해한 개념으로 양자 역학 발전에 엄청난 영향을 미쳤으며, 양자 정보 기술 발전에 근간이 된다. 광자 개념은 1900년 Plank에 의해 흑체복사를 설명하기 위해 처음 도입되었고[6], 1905년 Einstein에 의해 광전효과를 설명하기 위해서도 도입되었다[7]. 또한 이를 통해 1923년 Compton 산란을 설명하였으며[8], 'photon'이란 용어는 1926년 Lewis에 의해 처음 사용되었다[9].

양자 광원(Quantum light source)은 전자기파(빛)의 양자화(Quantization)를 통해 도입된 광자 개념을 기반으로 한 광자 상태의 양자 중첩, 양자 얽힘 현상, 압축광 등 고전 전자기파로 설명이 불가능한 비고전광(non-classical light)을 의미한다.

1935년 Einstein, Podolsky, Rosen(EPR)으로부터 양자역학 불완전성이 논의되기 시작하였고[10], 1960년대 고전 광원에서 만족해야 하는 Bell 부등식을 위배하는 상태의 존재로 양자 얽힘 상태를 기술함으로써 양자 광학 연구가 본격적으로 시작했다고 할 수 있다[11,12]. 1956년 Hanbury Brown, Twiss(HBT)가 제안한 간섭계 실험을 통해 광자의 상관관계를 관측하였으며[13], 1977년 Kimble은 HBT 간섭계 실험을 통해 양자 광원의 하나인 단일 광자(Single photon)가 나트륨 원자로부터 생성됨을 처음으로 관측하였다[14]. 1980년대 후반 Hong, Ou, Mandel(HOM)에 의해 비선형 물질을 이용한 얽힘 광원 생성을 발표하였고, 이는 지금까지도 양자 광학 연구에 널리 이용되고 있다[15,16].

지금까지 효율적인 양자 광원 생성을 위해 다양한 방식의 연구가 진행되어 왔으며, 양자 광원은 생성 방식에 따라 크게 단일 방출체(Single emitter) 기반 광원과 비선형(non-linear) 현상 기반 광원으로 나눌 수 있다. 각각의 양자 광원 구현을 위한 다양한 시스템이 연구되었으며, 구현 시스템에 따라 생성된 광원의 특성 또한 차이가 존재한다. 즉, 응용 기술의 목적에 따라 효율적인 생성 방식의 고려가 필요하다.

본 고에서는 양자 정보 기술의 핵심인 양자 광원의 특성과 생성 방법에 따른 분류, 각 방법에 대한 양자 광원의 국내외 연구 개발 동향, 그리고 이를 이용한 양자 정보 기술 응용에 대해 기술하고자 한다.

Ⅱ. 양자 광원 연구 개발 동향

1. 양자 광원 개요

양자 광원은 고전 전자기파와 다르게 전자기파의 양자화 개념을 통해서 설명이 가능한 비고전 광원으로서, 대표적으로 광자 수 상태(Photon number state), 얽힘 상태(Entangled state), 압축광(Squeezed state) 등이 있다. 각 광원별 특성은 표 1과 같다.

양자 광원의 특성을 나타내는 다양한 지표들이 있는데, 대표적으로 다음과 같다. (1) 순수도(Puri-

표 1 양자 광원 종류

양자광원	특징
광자 수 상태	한 모드에 정확히 N개의 광자가 존재하는 순수 양자 상태로 Fock state라고도 표현되며, 특히 광자 수가 1인 경우 단일 광자 상태(single photon state)라고 한다.
얽힘 상태	서로 다른 물리계인 두 개의 광자가 상호작용하고 있는 상태로 진동 수 또는 편광, 경로 얽힘 상태 등이 있다. 특히 N개의 광자가 얽힘 상태에 있는 것을 N00N 상태라고 부른다.
압축광 상태	일반적으로 불확정성 원리에 따라 광자의 진폭과 위상을 동시에 정확히 아는 것은 불가능하다. 한 쪽(진폭) 정확도를 낮춤으로써 다른 쪽(위상) 정확도를 의도적으로 증가시키는 것이 가능한데 이를 압축광 상태라 부른다.

표 2 양자 광원 생성 방식 분류

종류	분류	특징
감쇄 레이저	확률적	• 생성이 편리 • 양자 특성 이득 없음
	Lasers	
매개 하향 변환	확률적	• 얽힘 생성 유리 • 복잡한 광학 시스템
	BBO, KDP, KTP, $LiNbO_3$	
원자/이온 트랩	확정적	• 긴 가간섭성 시간 • 트랩 시스템 필요
	Cs, Ru	
결함/색 중심	확정적	• 상온 안정성 • 파장 제한, 무작위 분포
	Diamond, SiC	
양자점	확정적	• 집적/소자화, 확장성 • 무작위 분포
	III–As, III–N	

ty): 광자 수의 분포를 나타내는 수치로 단일 광자 생성의 척도이다($g^{(2)}(0)$ 값이 0에 가까울수록 이상적 단일 광자 광원, 1에 가깝거나 그 이상일 경우 고전 광원). (2) 밝기(Brightness): 시간당 광자 수를 나타내는 수치로 양자광원 생성 효율과 광추출 효율에 관련된다. (3) 구별 불가능성(Indistinguishability): 두 개의 다른 광자 간 동일한 정도를 나타내는 수치로 1에 가까울수록 구별 불가능하여 양자 간섭이 가능하다. (4) 신뢰도(Fidelity): 양자 얽힘 특성의 척도로 100%에 가까울수록 이상적 얽힘 광원을 의미한다. (5) 그 외 양자 광원 생성속도(Speed) 등이 있다.

양자 광원 생성은 단일 방출체 기반 생성과 비선형 현상 기반 생성 방식이 있다. 단일 방출체는 이상적으로 단일 광자 생성 확률 100%, 다수 광자 생성 확률 0%인 확정적(Deterministic) 광원으로 원자/이온 트랩(Atom/Ion trap), 고체 기반 결함/색 중심(Defect/Color center), 이차원 물질(2-dimensional material), 반도체 양자점(QD: Quantum Dot) 등이 있다. 비선형 기반 생성은 확률적(Probabilistic) 광자쌍 생성 방식으로 자발 매개하향변환(SPDC: Spontaneous Parametric Down-Conversion), 자발 사광자 혼합(SFWM: Spontaneous Four-Wave Mixing) 등이 있다. 각 방식에 따라 생성되는 양자 광원의 특성은 표 2와 같이 차이가 존재한다.

2. 단일 방출체 기반 광원

가. 원자/이온 트랩

원자들은 불연속적 에너지 준위를 가지고 있는데, 자발 또는 유도 방출 시 그림 1과 같이 잘 정의된 주파수 및 편광을 가진 단일 광자를 생성할 수 있다. 그러나 하나의 광모드로 방출을 유도하거나 단일 원자나 이온을 공간상에 속박시키는 일은 기술적으로 쉽지 않은 작업이다. 광 공동(Optical cavity) 구조 도입을 통해 모든 방향으로의 자발 방출을 막고, 단일 모드로 방출을 유도해 출력의 방향성을 가지며, 공동 내의 진공장에 의해 유도되는 방출 과정은 구동 레이저를 통해 제어가 가능하다.

중성 원자에서의 단일 광자 생성 방법은 광 공동 사이에 낮은 농도의 원자 빔을 흘려주고 공동의 수

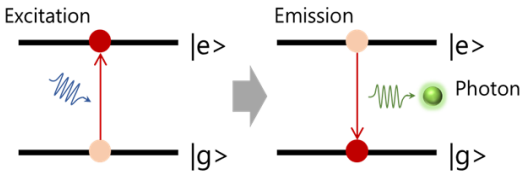


그림 1 단일 원자/이온 발광 원리

직 방향으로 레이저를 조사하여 단일 원자를 포획하는 트랩 시스템을 이용한다. 이때 공동과 원자의 상호작용 시간을 늘려주기 위해 차가운 원자(Cold atom)를 사용하게 된다. 공동의 형태는 Fabry-Perot 형태 이외에 최근에는 광섬유 끝단에 유전체층을 쌓아 형성하거나, 링 공동을 형성하는 micro-toroidal 등이 각광 받고 있다[17-20].

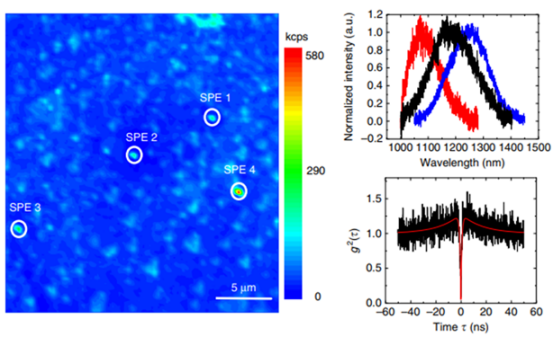
포획된 이온을 이용하는 방법은 중성 원자 방식에 비해 원자와 공동 간의 원치 않는 결합 강도의 변화, 다수 원자 발생, 그리고 길지 않은 포획 시간 등의 문제에 있어 장점을 가진다. 단일 이온을 공동 내에 강하게 국소화시키는 방식으로 Keller 등에 의해 처음 구현되었다[21]. 유전체 거울이 포획 포텐셜에 영향을 주는 문제는 공간적으로 분리된 장착 지점에서 이온을 이동시켜 해결하게 되는데, 이로 인해 공동이 길어져 공동과 결합이 약해지는 문제가 있기도 하다.

나. 결함/색 중심

고체 결정 내의 발광 점 결함을 이용하는 결함/색 중심은 충분히 낮은 밀도로 존재하기 때문에 단일 광자 광원으로 사용될 수 있다. 이들 결함 중심들은 전자의 기저 및 여기 상태가 이를 포함하고 있는 물질의 에너지 띠와 충분히 떨어져 있을 경우 상온에서도 안정적으로 동작이 가능한 장점을 가지고 있다.

다이아몬드 결함 중심은 이중 가장 많이 연구된 물질로서 질소 또는 규소와 이에 수반되는 원자의 빈자리쌍(NV: Nitrogen Vacancy, SiV: Silicon Vacancy)이 대표적이다[22]. 이러한 결함 중심은 자연적으로 생성되기도 하고, 이온 임플란트를 통해 생성시킬 수도 있다. 5K 이하의 저온에서는 포논(Phonon)이 개입되지 않는 천이인 zero phonon line(ZPL)이 충분히 좁아 우수한 단일 광자 성능을 얻을 수 있다[23,24]. NV center의 경우 0이 아닌 전기 쌍극자로 인해 국소적인 응력이나 전기장 영향에 의한 선폭 변화가 크게 나타나기 때문에 좋은 품질의 다이아몬드 성장이 요구된다[25]. 반면에 SiV center는 대칭성을 가지고 있어 이러한 영향에 상대적으로 둔감하다. 또한, ZPL으로의 방출이 70%까지 가능하여 광자를 매개로 한 다중 광원 생성에 유리하다[26]. 하지만 결함의 낮은 양자 효율로 인해 휘도가 높지 않은 단점이 있다.

최근에는 화합물 반도체에서의 결함 중심에 대한 연구가 많이 이루어졌는데 3eV 이상의 큰 밴드갭(Bandgap)을 갖는 SiC가 대표적이다. 핵스핀이 0이 될 수 있어 긴 가간섭성 시간(Coherence time)을 가질 수 있고, 산업적인 수준의 성장이 가능한 물질이라는 큰 장점을 갖고 있다. 탄소 빈자리와 규소 자리의 탄소 치환쌍으로 이루어진 결함 중심을 이용해 상온에서 1,300nm 대역 단일 광자



출처 J. Wang. et al., "Bright room temperature single photon source at telecom range in cubic silicon carbide," *Nat. Communications*, vol. 9, 2018, p. 4106. (CC BY 4.0)

그림 2 SiC 결함/색 중심 기반 단일 광자 광원

광원이 구현되었다[27,28](그림 2). 결함의 위치 제어, 넓은 범위의 파장 변환, 좁은 선폭 구현 등이 결함 구조의 규명과 더불어 해결해야 할 문제들이다.

자외선, 가시광 영역의 광소자로 많이 사용되는 GaN 또한 최근 결함 중심으로부터 단일 광자의 상온 구현 가능성이 알려졌다[29,30]. 단일 광자 발생의 근원에 대한 논란이 여전히 존재하지만, 대체로 육방 격자 내에 삽입된 등방 격자 근처에 생성된 점 결함에 의한 것으로 추정하고 있다. 특히, 상용 웨이퍼에서도 단일 광자 발생이 관찰되어 양자 소자나 회로의 확장성을 기대할 수 있다. 최근에는 상온에서 1.5MHz로 동작하는 1,300nm 대역의 단일 광자 광원이 보고되었다[31].

다. 이차원 물질

최근 다양한 형태의 이차원 물질들에서도 결함 중심과 유사하게 단일 광자 생성이 가능함이 알려졌다. 이 형태의 물질들은 크게 두 가지 종류로 나뉘는데, 첫 번째는 국소적인 응력이나 결정학적 결함에 의해 약하게 구속된 엑시톤(Exciton)으로부터 광원을 생성하는 물질들이다. 전이금속 디칼코제나이드(TMD: Transition Metal Dichalcogenide)인 WSe2, MoSe2, WS2, GaSe 등이 이에 해당하며 대부분 극저온에서 동작하게 된다[32]. 두 번째 종류는 큰 밴드갭을 갖는 물질 내의 점 결함에 의해 형성되는데, 보통 육각 질화붕소(hBN: Hexagonal Boron Nitride)를 가리킨다. 이 물질은 자외선부터 근적외선 영역의 다양한 ZPL을 가지고 있는데, 이중 근적외선 영역의 단일 광자 광원은 상온 동작이 가능하고 공동이나 액침렌즈 없이도 검출기 위치에서 4MHz 이상의 휘도를 나타낼 수 있으며 화학적·열적·광학적 안정성을 가지고 있어 유망한 물질로 평가받고 있다[33–35]. 또한 공명 여기 방식을 사용할 경우 상온까지도 푸리에 변환 제한 선폭을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다[36]. 이러한 특성은 상온 양자 소자 구현을 위한 중요한 물질로 사용 가능함을 의미하지만, 여전히 광원의 근본 구조에 대해서는 규명되지 않은 상황이고 양자 정보 기술 응용에 단일 광자 광원으로서 대규모로 적용할 수는 있는 단계는 아니다. 더욱이 스펙트럼 확산, 블링킹, 블리칭 등과 같은 문제는 아직 해결해야 할 숙제로 남아 있다. 탄소나노튜브에서도 국소화된 엑시톤으로 단일 광자 생성, 통신 파장 대역 상온 동작 결과가 보고되었다[37–40]. 이러한 나노미터 크기의 발광체는 소형화에 대한 기대를 갖게 하지만 소자 제작의 어려움, 결함 환경과 주변 분리 이슈 등 해결해야 할 문제들이 남아 있다.

라. 반도체 양자점

반도체 양자점은 밴드갭 에너지가 서로 다른 물질로 이루어진 3차원 고립 구조체이다. 에너지적으로 속박되어 있는 반도체 양자점은 불연속적 에너지 준위를 형성하여 인공 원자라고도 불리며, 형성된 엑시톤이 재결합하며 단일 광자를 생성할 수 있다. 1994년 Marzin 등에 의해 반도체 양자점에서 발광을 관측하였고[41], 2000년 Michler에 의해 양자점에서 단일 광자 생성을 보인 이래로 양자전자역학(QED: Quantum ElectroDynamics)연구가 고체 기반에서도, 특히 양자점을 이용하여 활발히 진행되었다고 할 수 있다[42].

반도체 양자점 광원은 물질과 크기에 의해 결정되는데, GaAs, InP, GaN 등 비교적 발광 효율이 높은 III–V족 화합물 반도체 기반 양자점이 대표적이다. 양자점 광원의 발광 및 광추출 효율 증가를 위해 다양한 광학 구조가 연구되었는데 대표적으로 광결정(Photonic crystal), 나노광도파로(Nano

표 3 양자점 기반 단일 광자 광원 주요 국외 연구 현황

연도	국가 (기관)	물질 (광학 구조)	특성	특이점
2016 [43]	프랑스 (CNRS–LPN)	InGaAs/GaAs (수직 브래그 공진기)	광추출효율 65% 구별 불가능성 99.6%	• 전압 조절을 통한 파장 제어
2014 [44] 2017 [45]	덴마크 (Niels Bohr Institute)	InGaAs/GaAs (수평 나노광도파로)	순수도 99.4% 구별 불가능성 94%	• 광섬유 모드 겹침 80%
2016 [48] 2018 [49]	일본 (도쿄대)	InAs/InP (수평 나노광도파로)	$g^{(2)}(0)\sim4.4\times10^{-4}$	• 1.55μm 파장 단일 광자 광원 • 트랜스퍼 프린팅 실리콘 집적
2015 [50]	미국 (NIST)	InAs/GaAs (원형 브래그 격자)	광추출효율 48% $g^{(2)}(0)\sim0.009$	• 양자점 위치 추적 후 공정
2010 [51] 2016 [52]	스위스 (EPFL) 아일랜드 (UCC)	InGaAs/GaAs (피라미드 구조)	신뢰도 59% 신뢰도 68%	• 위치 제어 양자점 • 얽힘 광원 생성

photonic waveguide), 브래그 공진기(Distributed bragg reflector), 3차원 나노광학구조(3–dimensional nano photonic structure) 등이 있다. 양자점 기반 연구는 주로 대학, 연구소가 주축을 이루고 있으며, 표 3은 국외 주요 연구 그룹의 연구 현황을 보여준다. 양자점 광원의 주요 기술은 양질의 양자점 에피 성장 기술, 나노 광학 구조 기술, 파장 제어 기술 등이 있다. 프랑스 CNRS–LPN(Laboratoire de Photonique et de Nanostructures), 덴마크 Niels Bohr Institute는 고품질 양자점 에피 성장, 광학 구조 결합을 통한 고효율 단일 광자 광원을 발표하였다[43–45]. 전류 구동 소자는 아니지만 양자점 광원 기술로 사업화한 Quandela, Sparrow quantum 등이 있다[46,47].

양자점 기반 양자 광원의 제어, 응용을 위해 광집적회로(PIC: Photonic Integrated Circuit)에 결합되면 유리한데, 일본 도쿄대는 트랜스퍼 프린팅 기술을 이용하여 양자점 기반 광통신대역 단일 광자 광원을 실리콘 광집적회로에 결합한 결과를 발표하였다[48,49]. 일반적으로 양자점 성장 시 크기, 위치가 무작위적으로 형성되고, 따라서 고품위 양자점을 선별 후 사용해야 하기 때문에 수율이나 재현성에 문제가 있었다. 이에 양자점의 위치 제어를 위한 노력이 있는데, 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서는 양자점 위치 스캐닝 시스템을 개발하였고[50], 스위스 EPFL(École Polytechnique Fédérale de Lausanne)과 아일랜드 UCC(University College Cork)는 위치를 찾는 방식이 아닌 원하는 위치에 양자점을 형성시킨 결과를 발표하였다[51,52].

바이엑시톤(Biexciton)은 두 쌍의 전자–정공쌍을 가리키는 것으로 엑시톤 상태를 거쳐 바닥 상태로 전이하며 광자를 방출하게 되는데, 이를 바이엑시톤–엑시톤 캐스케이드(Cascade) 과정이라고 한다(그림 3). 2000년 Benson과 공동연구진은 이 과정을 통해 편광 얽힘 광자쌍 생성이 가능함을 발표하였고[53], 이로부터 양자점 기반 얽힘 광원 연구가

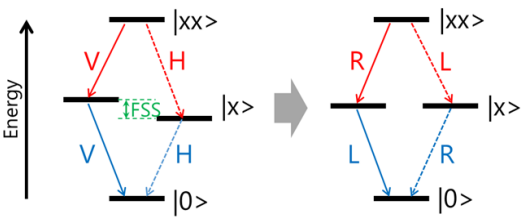
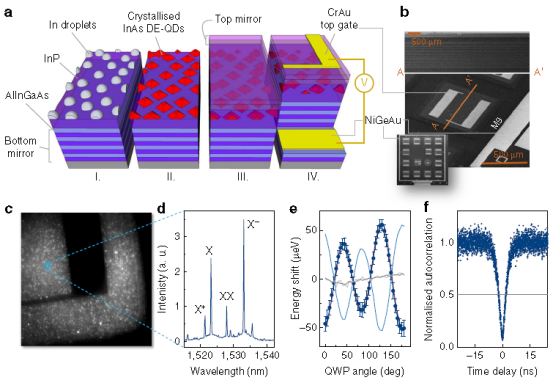


그림 3 양자점 기반 얽힘 광자 생성 원리

표 4 양자점 기반 얽힘 광원 주요 국외 연구 현황

연도	국가 (기관)	물질 (광학 구조)	특성	특이점
2016 [54,55]	오스트리아 (JKU)	InGaAs/GaAs	신뢰도 80%	• 국소 응력 제어 통한 얽힘 생성
2018 [56,57]	영국 (도시바, 캠브리지)	InAs/InP (수직 브래그 공진기)	신뢰도 87%	• 전기장 제어 통한 얽힘 생성 • 전류 구동 소자
2019 [58]	중국 (USTC)	InGaAs/GaAs (원형 브래그 격자)	신뢰도 90%	• 위치 대칭형 양자점 성장 통한 얽힘 생성

활발히 진행되었다. 얽힘 광원 생성을 위해서는 회전 대칭형 양자점 성장 기술이 필수이며, 전기장이나 응력 등 미세 제어 기술을 통해 Fine structure splitting(FSS)을 제거해야 하므로 생성 조건이 까다롭다. 또한 정밀 광분석 시스템도 필요하여 얽힘 광원 생성 연구는 일부 그룹에서 주도하는 상황이다(표 4). 오스트리아 Johannes Kepler University Linz(JKU), 독일 IFW Dresden는 피에조(piezo) 물질로 국소 응력을 제어하여 양자점으로부터 편광 얽힘 광원 생성을 발표하였다[54,55]. 영국 도시바, 캠브리지 대학교 연구 그룹은 그림 4와 같이 전기장 제어를 통해 편광 얽힘 광원을 생성, 전류 구동 소자 제작, 광회로 결합 등 실제 구현 가능성 높은



출처 T. Müller et al., "A quantum light-emitting diode for the standard telecom window around 1,550nm," *Nat. Communications*, vol. 9, 2018 p. 862. (CC BY 4.0)

그림 4 양자점 기반 얽힘 광원 소자

기술을 연구하고 있다[56,57]. 중국 USTC(University of Science and Technology of China)는 양자점을 회전 대칭형으로 성장하여 국소 제어 구조 없이도 90% 신뢰도의 얽힘 광원을 얻었다[58].

국내의 반도체 양자점 기반 양자 광원 연구는 한국전자통신연구원(ETRI), 한국과학기술연구원(KIST), 한국과학기술원(KAIST), 울산과학기술원(UNIST) 등에서 이루어져 왔다. ETRI는 광통신 대역 광소자 기술을 기반으로 하여 InAs/InP 양자점 성장, 양자점 위치 제어 기술 및 공정 기술을 보유하고 있으며, 고품위 저밀도 InAs 양자점을 통해 단일 광자 광원을 확보하였다. 양자점과 결합한 나노 포토닉스 공진기 구조 설계, 공정 기술을 개발하여, 고효율 양자 광원 생성이 가능하다. 마이크로 트랜스퍼 장비 개발을 통해 다수 양자점과 실리콘 광집적회로 등 이종 플랫폼 간의 하이브리드 결합이 가능하며, 광결합 효율이 높은 다중 어레이 집적형 단일 광자 광원 소자 기술을 연구하고 있다. 그뿐만 아니라 FSS 제어 구조를 통해 얽힘 광원 생성 및 양자 광원 집적 소자를 연구하고 있다.

양자점 기반의 양자 광원은 높은 생성 효율과 소자화, 집적화를 필요로 하는 양자 정보 기술에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 하지만 파장 불균일성, 얽힘 생성의 어려움 등이 숙제로 남아 있어 균일도 제어, 안정적인 얽힘 생성, 집적 소자

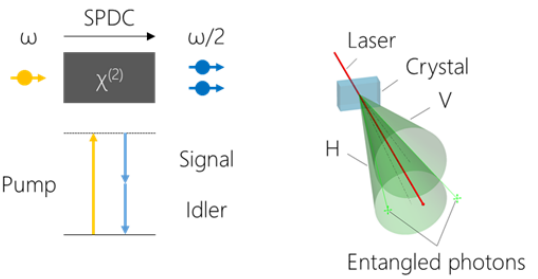
화, 다중 광원 생성 등 향후 양자 광원 확장성을 위한 노력이 예상된다.

3. 비선형 기반 광원

가. 자발 매개하향변환

자발 매개하향변환은 광자와 2차 비선형성을 갖는 물질과의 상호작용을 통해 다른 파장의 광자쌍으로 변환되는 과정으로 수십 년 동안 광자쌍 발생을 위한 좋은 방법으로 활용되고 있다. 광자쌍 발생 과정은 1961년 미국 Bell 연구소의 Luisell에 의해 이론적으로 예측되었고, 1969년 처음으로 소비에트연방 Moscow 주립대학 Zel'dovich에 의해 비고전 광원으로 제안되었으며, 이후 1970년 미국 NASA의 Burnham에 의해 최초로 관측되었다[59-61].

매개하향변환을 통한 광자쌍 생성 효율은 2차 비선형 값에 따라 에너지 보존과 운동량 보존과 관련된 위상 정합의 정도에 따라 결정된다. 2차 비선형성을 갖는 물질로는 BBO(Beta barium borate), KDP(Potassium dideuterium phosphate), KTP(Potassium titanyl phosphate), $LiNbO_3$(Lithium niobate), $LiIO_3$(Lithium iodate), AlGaAs 등이 있다. 생성을 위해 이용할 물질들은 관심 파장에서 위상 정합이 맞지 않는 경우 광자쌍이 생성되지 않거나 생성 효율이 떨어져 사용하기 어렵다. 하지만 단결정의 분극을 주기적으로 반전시키는 주기적 분극(Periodic poling)을 통해 위상 정합을 맞춤으로써 효율적인 매개하향변환을 이룰 수 있다. 2002년 미국의 MIT에서 주기적 분극 구조인 PPLN(Periodically Poled Lithium Niobate)을 통해 준 위상 정합을 얻었으며, 효과적인 광자쌍 생성을 실험적으로 보였다[62]. 스위스 IDQ社에서는 PPLN 기반의 광자쌍 광원 상용 제품을 제작하기도 하였다. 위상 정합을 맞추기 위한 또 다른 방법으로 브래그 격자 반사(Bragg grating reflection)를 이용한 도파로나 양자 우물 혼합(Quantum well intermixing)을 사용할 수 있다. 이는 복굴절이 거의 없는 III-V족 반도체를 위한 방법이며 이를 통해 효율적인 매개하향변환을 이룰 수 있다. 2012년 캐나다 Waterloo 대학은 준 위상 정합 조건을 만족하는 브래그 반사 도파로를 통해 광자쌍을 생성하였으며, 2013년 캐나다 Toronto 대학에서는 GaAs/AlGaAs의 양자 우물 혼합을 통해 준 위상 정합을 얻었으며, 이를 통해 광자쌍을 생성하였다[63,64].



출처 English Wikipedia user J-Wiki [GFDL] https://en.wikipedia.org/wiki/Spontaneous_parametric_down-conversion

그림 5 자발 매개하향변환 원리

그림 5와 같이 비선형 물질에서 생성된 광자쌍은 입력된 광자를 둘러싸는 원뿔 형태를 이루는데, 이러한 형태는 광섬유와의 광 결합 효율을 떨어뜨려 장거리 양자 통신 응용에 적합하지 않다. 이를 해결하기 위해 최근에는 광섬유와 광 결합이 용이한 단일 모드 도파로에 관한 연구가 진행되었는데, 도파로의 구조 변화로 위상 정합 조건을 만족시킬 수 있어 높은 효율로 광자쌍 생성에 장점을 가지고 있다. 2009년 미국 MIT는 광섬유 광 결합 효율이 49%인 주기적 분극 KTP 도파로를 제작하였고, 효율 높은 광자쌍을 생성하였다[65].

나. 자발 사광자 혼합

자발 사광자 혼합은 두 개의 광자로 다른 두 개

의 광자쌍을 만들어내는 3차 비선형과정이며(그림 6), 유리나 실리콘과 같이 2차 비선형 항이 없는 중심대칭(centrosymmetric) 물질에서 일어나는 현상이다. 최근 분산 천이 광섬유, 광결정 광섬유, 복굴절 단일 모드 광섬유의 사광자 혼합을 이용한 단일 광자 광원이 발표되고 있다. 자발적 라만 산란으로 생성된 잡음 광자는 광자쌍의 양자 상관을 저해시키는 역할을 하는데, 이를 해결하려는 다양한 노력이 있다. 2008년 미국 NIST는 광섬유 온도를 4K로 떨어뜨려 라만 산란을 제거하였으며, 이를 통해 12배 높은 광자쌍 생성 효율을 보였다[66].

최근 집적화 칩 기반의 양자광원 개발이 활발하게 이루어지고 있는데, 특히 상보적 금속 산화막 반도체(CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor) 공정 기술에 사광자 혼합을 결합하기 위하여 중심 대칭성 재료인 Si, Si_3N_4, SiO_xN_y가 이용되고 있다. 이 기술로 제작된 단일 광자 광원은 소비 전력을 소화할 수 있으며, 집적도를 크게 향상시킬 수 있다.

실리콘은 높은 굴절률을 갖는 물질로 광자가 강하게 구속되어 광자와 물질과의 상호작용을 높일 수 있고, 이를 통해 비선형성을 높일 수 있다. 실리콘 도파로의 비선형성은 광섬유에 비해 약 10,000배 높아 수 센티미터 길이만으로도 광자쌍을 생성할 수 있다. 광자쌍 생성의 이론 연구는 2006년 미국 Rochester 대학에서 진행되었으며, 같은 해 미국 Cornell 대학에서 실험적으로 증명되었다[67,68]. 느린 군속도를 갖는 도파로나 공진기는 광자와 물질과의 상호작용을 더욱 높여 짧은 길이의 도파로나 초소형의 공진기로도 높은 효율의 광자쌍을 발생시킬 수 있다. 2010년 영국 St. Andrews 대학은 느린 군속도에서 발생하는 손실을 현저히 줄여 높은 비선형 효과를 갖는 광결정 도파로의 가능성을 보였으며, 2013년 호주 Sydney

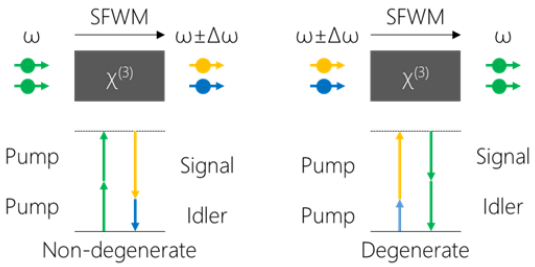


그림 6 자발 사광자 혼합 원리

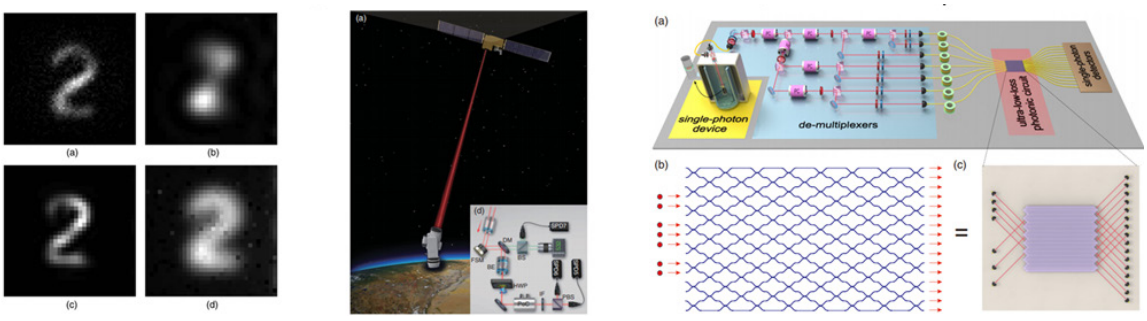
대학은 느린 군속도와 공간적 다중화를 통해 높은 효율의 단일 광자를 발생시켰다[69,70]. 2012년 이탈리아의 Pavia 대학은 10,000×500nm² 크기의 링 공진기를 사용하여 0.12mW의 저전력으로 높은 효율의 광자쌍을 발생시켰으며, 2013년 620×500nm² 크기의 초소형 광결정 공진기를 사용하여 링 공진기보다 100배 높은 효율의 광자쌍을 발생하였다[71,72].

Ⅲ. 양자 정보기술 응용 및 전망

1. 양자 센서 응용

양자 센서 기술은 양자 이미징, 양자 중력 센서, 양자 자기 센서 등 고전 계측 기술의 한계를 뛰어넘는 기술을 의미한다. 이미징/분광 기술은 고전 광원이 갖는 광자 수 분포 또는 위상 변동 정도로 인하여 분해능과 신호 대 잡음비 등 측정의 정확도 개선에 근본적인 한계가 존재한다.

양자 이미징/분광 기술은 양자 광원을 기반으로 고전 계측 기술의 한계를 뛰어 넘어, 고분해능 이미징, 고감도 이미징, 고스트 이미징 등 새로운 패러다임의 양자 계측을 가능케 한다. 고전적으로 분해능은 광원의 파장에 비례하는 Rayleigh 한계가 존재하는데[73], N광자 상태 양자광원을 이용하면 N배 분해능이 상승하여 초분해능 이미징(Super-resolution imaging)이 가능하다[74]. 이를 이



출처 (a) M. Unternährer et al., "Super-resolution quantum imaging at the Heisenberg limit," *Optica*, vol. 5, 2018, p. 1150. Reprinted figure with permission from [(b) J. Yin et al., Physical Review Letters, vol. 119, no. 20, p. 200501, 2017, (c) H. Wang et al., "Physical Review Letters," vol. 120, no. 23, 2018, p. 230502.] Copyright 2019 by the American Physical Society.

그림 7 양자 광원의 양자 정보 기술 응용 분야: (a) Quantum sensor, (b) Quantum Communication, (c) Quantum Computer

용한 양자 리소그래피는 반도체 공정에 사용되는 리소그래피의 회절 한계, 미세 공정 한계를 극복할 수 있게 한다.

고전 광원은 $1/\sqrt{N}$ (shot-noise limit)에 해당하는 잡음이 항상 존재하여 측정 감도 한계를 갖고 있다. 하지만 양자 광원은 양자 한계인 $1/N$ (Heisenberg limit)까지 향상이 가능하며, 이를 이용한 결과로 레이저 간섭 기반의 중력파 검출 시스템 LIGO에서 양자 광원을 이용한 잡음 감소, 측정 감도 향상 결과가 있다[3]. 또한 양자 센서 기술로 미세 분자나 미량 가스 검출 등 고감도 센싱에 이용될 수 있다.

양자 광원을 사용하면 고전적으로 불가능한 관측도 가능한데, 대표적으로 고스트 이미징(Ghost imaging)이 있다. 얽힘 광자쌍 중 하나의 광자는 피사체로, 다른 하나는 검출기로 바로 보내면 얽힘 특성으로부터 피사체와 직접적인 상호작용 없이도 이미징이 가능하다. 고스트 이미징은 군사적 응용이나 라이다(LiDAR: Light Detection And Ranging)에 응용하여 탐지 성능 향상, 노이즈 문제 해결 등을 기대하고 있다. 이탈리아 INRIM은 얽힘 광자쌍을 이용하여 shot noise를 감소시킨 양자 이미징을 구현하였고[75], 미국 Air force research laboratory는 양자 광원을 이용한 고해상도 양자 LiDAR의 가능성을 발표하였다[76].

양자 센서 기술을 위한 기존 광원은 비교적 생성이 쉬운 열광원 혹은 자발 매개하향변환 기반이 대부분이었다. 양자 이미징/분광 기술의 실제 구현을 위해서 고효율 광원 생성, 얽힘 광원 광자 수 증가, 신뢰성 있는 확정적 광원, 소형화/집적화 소자, 다수 광원 확장성 등이 앞으로 풀어야 할 숙제로 남아 있다.

2. 양자 암호 통신 응용

양자 광원을 이용한 양자 암호 통신의 응용은 효율성, 안전성, 네트워크 구성 및 확장성 등 다양한 측면에서 중요하다.

현재 양자 암호 통신은 코히어런트 감쇄 광원을 주로 사용하고 있는데, 광자 생성 확률이 포아송(Poisson) 분포로 다중 광자 확률이 높아 안전성 측면에서 위협이 된다. 다중 광자 확률을 낮추기 위해 펄스당 평균 광자 수가 0.1 정도의 낮은 수준에서 사용되므로 암호키 생성 속도, 전송 거리 등에

서 비효율적이다. 따라서 확정적 단일 광자 광원이 사용되면 양자 암호 통신의 효율성이 개선될 수 있으므로 최근 일본, 유럽 등 여러 그룹에서는 고순도 단일 광자 광원을 이용한 양자 암호 통신을 함께 연구하고 있다[77,78].

얽힘 광원을 이용한 양자 암호 통신은 E91 또는 BBM92 양자 암호 프로토콜에 의해 구현될 수 있다[79,80]. 얽힘 광원 기반 양자 암호 통신은 도청자가 얽힘 광원을 해킹할 수 있어도 양자역학적으로 무조건적 안전성을 보장하며 강한 상관 관계 특성에 의해 환경 변화에 강건한 특성을 갖는 장점이 있다. 최근 중국은 지상에서 1,200km 떨어진 저궤도 위성에서 코히어런트 감쇄 광원 기반 양자키분배뿐만 아니라 위성에서 두 지상국으로 얽힘 광원 분배, 위성-지상 얽힘 기반 양자키분배 기술을 보고하였다[81-83].

유선 양자 암호 통신 기술은 많이 발전되어 왔지만 아직 실제 양자 신호의 전송 거리는 광섬유 손실에 의해 100km 급으로 제한된다. 이를 극복하기 위해 얽힘 광원 및 양자 메모리 기반 양자 중계기 기술이 연구되고 있지만 현재의 기술로 완전히 구현되기는 어렵다[84,85]. 현재 네트워크의 중간 노드는 신뢰해야 하는 신뢰 노드 기반 양자 네트워크 구축 기술은 구현 가능하다. 중국은 2016년 광섬유 기반 베이징-상하이 2,000km 전송 거리에서 32개의 신뢰 노드 기반 양자 백본 네트워크를 구축하였다[86]. 그러나 궁극적으로 네트워크 측면의 완전한 안전성을 보장하기 위해서는 중간 노드도 신뢰하지 않아도 되는 양자 중계기 기반의 양자 네트워크 구축 기술이 요구된다. 장거리 양자 암호 통신 및 유/무선 양자 네트워크를 위해서 고속 고효율 양자 광원, 단일 광자 검출기, 양자 메모리 및 양자 중계기 기술, 파장 변환 및 인터페이스 기술, 장거리 양자 암호 프로토콜 기술 등 혁신적인 요소 기술 개발이 요구된다. 특히 단일 광자 광원 또는 얽힘 광원과 같은 양자 광원 기술은 미래의 양자 암호 통신 분야에서 아주 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

3. 양자 컴퓨터 응용

양자 광원의 양자 컴퓨터 응용은 불연속 큐비트 모델(Discrete qubit model)과 연속 변수 모델(Continuous-variable model)로 구분할 수 있다[87]. 광자의 양자 상태를 입자로 기술하는 방법과 전자기파 파동으로 기술하는 차이가 있다. 큐비트 모델은 광자 상태를 편광, 경로, 주파수, 시간, 공간 모드 등을 2개의 서로 다른 양자 상태(0과 1)로 구별하지만, 연속 변수 모델은 광자의 양자 상태를 보존 조화진동자(Bosonic harmonic oscillator)로 위치와 운동량을 기술한다. 광자 기반의 양자 컴퓨터 관련 사업화를 진행하는 기업으로는 큐비트 모델 기반의 PsiQ[88], 연속 변수 모델 기반의 Xanadu[89] 등이 있다.

매개하향변환, 사광자 혼합 혹은 양자점 기반 단일 광자 광원을 이용한 양자 컴퓨터 모델로 boson sampling 기술이 소규모 양자 알고리즘으로 동작하는 실험이 구현되었으며, 양자 광원과 양자 상태 제어 및 검출 소자를 광집적회로에 온칩(on-chip)으로 통합하는 기술이 개발되고 있다[90]. 양자 광원의 향후 도전 과제로는 큐비트 모델의 선형 광학기반 양자 컴퓨터를 위한 완전한 구조 개발, 순수도, 효율, 구별 불가능성 등 특성에 대한 정밀한 기준 설정, 다채널 어레이 구조 집적 기술 등 확장성 극복이 있다. 클러스터 상태 양자 컴퓨터를 위한 대규모 리소스를 생성하는 측면에서 신뢰도 높고 큰 크기의 다중 광자 얽힘 상태 생성이 매주 중요하며, 양자 광원 생성, 제어, 측정 기능의 집적

화 기술이 미해결 이슈이다.

Ⅳ. 결론

최근 급격한 정보 통신 기술의 발전과 함께 양자 암호 통신, 양자 센서, 양자 컴퓨터 기술은 빠르게 발전하여 점점 가시화되고 있다. 양자 정보 기술은 연구적 측면뿐만 아니라 경제적·사회적 관점에서 점점 더 중요해지고 있다. 양자 광원은 양자 정보 기술의 핵심으로서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

본 고에서는 양자 중첩, 양자 얽힘, 복사 불가능성 등 양자 물리학적 특성을 갖는 양자 광원의 개념, 생성 방법에 따른 분류, 각 방법에 대한 원리 및 특성, 국내외 연구 개발 동향, 해결해야 할 문제점, 그리고 이를 이용한 양자 정보 기술 응용에 대해 살펴보았다. 단일 방출체 기반 광원으로 원자/이온 트랩과 같은 기체 기반 시스템에서부터 결함/색 중심, 이차원 물질, 반도체 양자점 등 고체 기반 광원까지 다양한 방식의 시스템을 알아보았다. 비선형 기반 광원으로는 자발 매개하향변환, 자발 사광자 혼합 등을 살펴보았다. 다양한 광원 생성 방식이 존재하고, 목적에 따라 각각 장단점이 존재하지만, 공통적으로 양자 광원을 고효율화하고 안정적으로 생성하려는 노력이 진행되고 있다. 특히 소자화, 집적화, 확장성 측면에서 유리한 고체 기반의 반도체 양자점 기술은 전 세계적으로 몇몇 그룹들이 선도하고 있는 상황이며, 국내의 고체 기반 양자 광원 기술은 선도 그룹 대비 연구 환경, 인프라, 보유 기술 등이 미흡하지만 양자 정보 기술에 있어 필수적으로 확보해야 하는 기술이다. 또한 다양한 분야에 지속적으로 적용 가능성이 높은 기술인만큼 기초 연구 및 원천 기술이 개발되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/press-release/

[2] J. Aasi et al., "Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light," Nat. Photon., vol. 7, no. 8, 2013, pp. 613-619.

[3] S. K. Liao et al., "Satellite-relayed intercontinental quantum network," Phys. Rev. Lett., vol. 120, no. 3, 2018, p. 030501.

[4] https://www.research.ibm.com/ibm-q/system-one/

[5] H. Wang, et al., "High-efficiency multiphoton boson sampling," Nat. Photon. vol. 11, no. 6, 2017, pp. 361-365.

[6] M. Planck, "Über eine Verbesserung der Wienschen Spectralgleichung," Verhandl. Dtsc. Phys. Ges, vol. 2, 1900, p. 202.

[7] A. Einstein, "Indeed, it seems to me that the observations regarding black-body radiation, photoluminescence, production of cathode rays by ultraviolet," Annalen der Physik, vol. 17, 1905, pp. 132-148.

[8] A. H. Compton, "A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements," Phys. Rev., vol. 21, no. 5, 1923, pp. 483-502.

[9] G. Lewis, "The Conservation of Photons," Nature (London), vol. 118, 1926, pp. 874-875.

[10] A. Einstein et al., "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?," Phys. Rev., vol. 47, 1935, pp. 777-780.

[11] J. S. Bell, "Physics Long Island City," N.Y., vol. 1, no. 195, 1964, p. 1.

[12] J. F. Clauser et al., "Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories," Phys. Rev. Lett., vol. 23, no. 15, 1969, pp. 880-884.

[13] R. H. Brown et al., "Correlation between photons in two coherent beams of light," Nature, vol. 177, no. 4497, 1956, pp. 27-29.

[14] H. J. Kimble et al., "Photon Antibunching in Resonance Fluorescence," Phys. Rev. Lett., vol. 39, no. 11, 1977, pp. 691-695.

[15] C. K. Hong et al., "Measurement of Subpicosecond Time Intervals between Two Photons by Interference," Phys. Rev. Lett., vol. 59, no. 18, 1987, pp. 2044-2046.

[16] Z. Y. Ou et al., "Violation of Bell's Inequality and Classical Probability in a Two-Photon Correlation Experiment," Phys. Rev. Lett., vol. 61, no. 1, 1988, pp. 50-53.

[17] Y. Colombe et al., "Strong Atom-Field Coupling For Bose-Einstein Condensates in an Optical Cavity on a Chip," Nature, vol. 450, 2007, pp. 272-276.

[18] M. Trupke et al., "Atom Detection and Photon Production in a Scalable, Open, Optical Microcavity," Phys. Rev. Lett., vol. 99, 2007, p. 063601.

[19] B. Dayan et al., "A Photon Turnstile Dynamically Regulated by One Atom," Science, vol. 319, no. 5866, 2008, pp. 1062-1065.

[20] T. Aoki et al., "Efficient Routing of Single Photons by One Atom and a Microtoroidal Cavity," Phys. Rev. Lett., vol. 102, 2009, p. 083601.

[21] M. Keller et al., "Continuous Generation of Single Photons with Controlled Waveform in an Ion-Trap Cavity System," Nature, vol. 431, 2004, pp. 1075-1078.

[22] I. Aharonovich. et al., "Diamond nanophotonics," Adv. Opt. Mater., vol. 2, no. 10, 2014, pp. 911-928.

[23] A. Sipahigil et al., "Indistinguishable photons from separated silicon-vacancy centers in diamond," Phys. Rev. Lett., vol. 113, 2014, p. 113602.

[24] A. Sipahigil et al., "Quantum interference of single photons from remote nitrogen-vacancy centers in diamond," Phys. Rev. Lett., vol. 108, 2012, p. 143601.

[25] V. M. Acosta et al., "Dynamic stabilization of the optical resonances of single nitrogen-vacancy centers in diamond," Phys. Rev. Lett., vol. 108, 2012, p. 206401.

[26] L. J. Rogers et al., "Multiple intrinsically identical single-photon emitters in the solid state," Nat. Commun., vol. 5, no. 4739, 2014, pp. 1-6.

[27] A. Lohrmann et al., "Single-photon emitting diode in silicon carbide," Nat. Commun., vol. 6, no. 7783, 2015, pp. 1-7.

[28] J. Wang et al., "Bright room temperature single photon source at telecom range in cubic silicon carbide," Nat. Commun., vol. 9, no. 4106, 2018, pp. 1-6.

[29] A. M. Berhane et al., "Bright room-temperature single-photon emission from defects in gallium nitride," Adv. Mater. vol. 29, no. 12, 2017, p. 1605092.

[30] A. M. Berhane et al., "Photoinduced blinking in a solid-state quantum system," Phys. Rev. B, vol. 96, 2017, p. 041203.

[31] Y. Zhou et al., "Room-temperature solid state quantum emitters in the telecom range," Sci. Adv. vol. 4, 2018, p. 3580.

[32] M. Toth et al., "Single photon sources in atomically thin materials," Ann. Rev. Phys. Chem, vol. 70, 2019, pp. 123-142.

[33] T. T. Tran et al., "Quantum emission from hexagonal boron nitride monolayers," Nat Nanotechnol, vol. 11, 2016, pp. 37-41.

[34] L. J. Martínez et al., "Efficient single photon emission from a high-purity hexagonal boron nitride crystal," Phys. Rev. B, vol. 94, 2016, p. 121405.

[35] T. T. Tran et al., "Robust multicolor single photon emission from point defects in hexagonal boron nitride," ACS Nano, vol. 10, 2016, pp. 7331-7338.

[36] A. Dietrich et al., "Persistence of Fourier transform limited lines from a solid state quantum emitter in hexagonal boron nitride," arXiv: 1903.02931, 2019, pp. 1-14.

[37] S. Ghosh et al., "Oxygen doping modifies near-infrared band gaps in fluorescent single-walled carbon nanotubes," Science, vol. 330, no. 6011, 2010, pp. 1656-1659.

[38] Y. Piao et al., "Brightening of carbon nanotube photoluminescence through the incorporation of sp3 defects," Nat. Chem., vol. 5, 2013, pp. 840-845.

[39] X. He et al., "Tunable room-temperature single-photon emission at telecom wavelengths from sp3 defects in carbon nanotubes," Nat. Photon., vol. 11, 2017, pp. 577-582.

[40] X. Ma et al., "Room-temperature single-photon generation from solitary dopants of carbon nanotubes," Nat. Nanotech., vol. 10, 2015, pp. 671-675.

[41] J.-Y. Marzin et al., "Photoluminescence of Single InAs Quantum Dots Obtained by Self-Organized Growth on GaAs," Phys. Rev. Lett., vol. 73, no. 5, 1994, pp. 716-719.

[42] P. Michler et al., "A Quantum Dot Single-Photon Turnstile Device," Science, vol. 290, no. 5500, 2000, pp. 2282-2285.

[43] N. Somaschi et al., "Near-optimal single-photon sources in the solid state," Nat. Photon., vol. 10, 2016, pp. 340-345.

[44] M. Arcari et al., "Near-Unity Coupling Efficiency of a Quantum Emitter to a Photonic Crystal Waveguide," Phys. Rev. Lett., vol. 113, 2014, p. 093603.

[45] G. Kiršanskė et al., "Indistinguishable and efficient single photons from a quantum dot in a planar nanobeam waveguide," Phys. Rev. B, vol. 96, 2017, p. 165306.

[46] http://quandela.com/products/

[47] https://sparrowquantum.com/

[48] T. Miyazawa et al., "Single-photon emission at 1.5μm from an InAs/InP quantum dot with highly suppressed multi-photon emission probabilities," Appl. Phys. Lett. vol. 109, 2016, p. 132106.

[49] R. Katsumi et al., "Transfer-printed single-photon sources coupled to wire waveguides," Optica, vol. 5, no. 6, 2018, pp. 691-694.

[50] L. Sapienza et al., "Nanoscale optical positioning of single quantum dots for bright and pure single-photon emission," Nat. Commun., vol. 6, no. 7833, 2015, pp. 1-8.

[51] A. Mohan et al., "Polarization-entangled photons produced with high-symmetry site-controlled quantum dots," Nat. Photon., vol. 4, 2010, pp. 302-306.

[52] T. H. Chung et al., "Selective carrier injection into patterned arrays of pyramidal quantum dots for entangled photon light-emitting diodes," Nat. Photon., vol. 10, 2016, pp. 782-787.

[53] O. Benson et al., "Regulated and Entangled Photons from a Single Quantum Dot," Phys. Rev. Lett., vol. 84, no. 11, 2000, pp. 2513-2516.

[54] R. Trotta et al., "Wavelength-tunable sources of entangled photons interfaced with atomic vapours," Nat. Commun., vol. 7, 2016, p. 10375.

[55] Y. Chen et al., "Wavelength-tunable entangled photons from

silicon-integrated III-V quantum dots," Nat. Commun., vol. 7, 2016, p. 10387.

[56] T. Muller et al., "A quantum light-emitting diode for the standard telecom window around 1,550nm," Nat. Commun., vol. 9, no. 862, 2018, pp. 1-6.

[57] D. J. P. Ellis et al., "Independent indistinguishable quantum light sources on a reconfigurable photonic integrated circuit," Appl. Phys. Lett., vol. 112, 2018, p. 211104.

[58] H. Wang et al., "On-Demand Semiconductor Source of Entangled Photons Which Simultaneously Has High Fidelity, Efficiency, and Indistinguishability," Phys. Rev. Lett., vol. 122, no. 11, 2019, p. 113602.

[59] W. H. Louisell et al., "Quantum Fluctuations and Noise in Parametric Processes. I.," Phys. Rev., vol. 124, 1961, pp. 1646-1654.

[60] B. Ya. Zel'dovich et al., "Field statistics in parametric luminescence," JETP Lett., vol. 9, 1969, p. 69.

[61] D. C. Burnham et al., "Observation of Simultaneity in Parametric Production of Optical Photon Pairs," Phys. Rev. Lett., vol. 25, no. 2, 1970, pp. 84-87.

[62] E. J. Mason et al., "Efficient generation of tunable photon pairs at 0.8 and 1.6μm," Opt. Lett., vol. 27, no. 23, 2002, pp. 2115-2117.

[63] R. Horn et al., "Monolithic Source of Photon Pairs," Phys. Rev. Lett., vol. 108, 2012, p. 153605.

[64] P. Sarrafi et al., "Continuous-wave quasi-phase-matched waveguide correlated photon pair source on a III-V chip," Appl. Phys. Lett., vol. 103, 2013, p. 251115.

[65] T. Zhong et al., "High performance photon-pair source based on a fiber-coupled periodically poled KTiOPO4 waveguide," Opt. Express, vol. 17, no. 14, 2009, pp. 12019-12030.

[66] S. D. Dyer et al., "High-efficiency, ultra low-noise all-fiber photon-pair source," Opt. Express, vol. 16, no. 13, 2008, pp. 9966-9977.

[67] Q. Lin et al., "Silicon waveguides for creating quantum-correlated photon pairs," Opt. Lett., vol. 31, no. 21, 2006, pp. 3140-3142.

[68] J. E. Sharping et al., "Generation of correlated photons in nanoscale silicon waveguides," Opt. Express, vol. 14, no. 25, 2006, pp. 12388-12393.

[69] L. O'Faolain et al., "Loss engineered slow light waveguides," Opt. Express, vol. 18, no. 26, 2010, pp. 27627-27638.

[70] M. J. Collins et al., "Integrated spatial multiplexing of heralded single-photon sources," Nat. Commun., vol. 4, no. 2582, 2013, pp. 1-7.

[71] S. Azzini et al., "From classical four-wave mixing to parametric fluorescence in silicon microring resonators," Opt. Lett., vol. 37, no. 18, 2012, pp. 3807-3809.

[72] S. Azzini et al., "Stimulated and spontaneous four-wave mixing in silicon-on-insulator coupled photonic wire nano-cavities," Appl. Phys. Lett., vol. 103, 2013, p. 031117.

[73] J. Goodman, "Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill Physical and Quantum Electronics Series," 1968.

[74] M. Unternährer et al., "Super-resolution quantum imaging at the Heisenberg limit," Optica, vol. 5, no. 9, 2018, pp. 1150-1154.

[75] G. Brida et al., "Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging," Nat. Photon., vol. 4, 2010, pp. 227-230.

[76] J. Dowling, "Quantum Lidar-Remote Sensing at the Ultimate Limit," Air Force Research Laboratory Technical Report, ADA502521, AFRL-RI-RS-TR-2009-180, 2009.

[77] K. Takemoto et al., "Quantum key distribution over 120km using ultrahigh purity single-photon source and superconducting single-photon detectors," Sci. Rep., vol. 5, no. 14383, 2015, pp. 1-7.

[78] M. Rau et al., "Free space quantum key distribution over 500meters using electrically driven quantum dot single-photon sources-a proof of principle experiment," New J. Phys., vol. 16, no. 043003, 2014, pp. 1-10.

[79] A. K. Ekert, "Quantum cryptography based on Bell's theorem," Phys. Rev. Lett., vol. 67, no. 6, 1991, pp. 661-663.

[80] C. H. Bennett et al., "Quantum cryptography without Bell's theorem," Phys. Rev. Lett., vol. 68, no. 5, 1992, pp. 557-559.

[81] S.-K. Liao et al., "Satellite-to-ground quantum key distribution," Nature, vol. 549, 2017, pp. 43-47.

[82] J. Yin et al., "Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers," Science, vol. 356, no. 6343, 2017, pp. 1140-1144.

[83] J. Yin et al., "Satellite-to-Ground Entanglement-Based Quantum Key Distribution," Phys. Rev. Lett., vol. 119, 2017, p. 200501.

[84] N. Sangouard et al., "Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics," Rev. Mod. Phys., vol. 83, 2011, pp. 33-80.

[85] S. Muralidharan et al., "Optimal architectures for long distance quantum communication," Sci. Rep., vol. 6, no. 20463, 2016, pp. 1-10.

[86] R. Courtland, "China's 2,000-km Quantum Link Is Almost Complete," IEEE Spectrum, Technology, Engineering, and Science News, 26 Oct., vol. 53, no. 11, 2016, pp. 11-12.

[87] S. Takeda et al., "Toward large-scale fault-tolerant universal photonic quantum computing," Appl. Phys. Lett. Photonics, vol. 4, 2019, p. 060902.

[88] https://psiquantum.com/

[89] https://www.xanadu.ai/

[90] D. J. Brod et al., "Photonic implementation of boson sampling: a review," Advanced Photonics, vol. 1, no.3, 2019, p. 034001.