

고체 양자 광원 개발 및 응용 연구

1. 서론

빛은 투과, 반사, 굴절, 산란, 회절, 간섭 등 주위 물질과 다양한 방식으로 상호작용을 하면서 그 존재를 드러낸다. 이처럼 다양한 광학 현상을 나타내는 빛은 오랜 기간 동안 인류의 관심과 동경의 대상이자, 본질적인 특성에 대한 이해와 이를 제어하고자 하는 연구 대상이기도 했다. 특히, 상대성 이론과 양자물리와 같은 현대 물리에 있어서도 빛은 기준계와 상관없는 불변의 속도와 광자라는 양자화 특성을 잘 나타내고 있어 현재까지도 중요한 연구 주제이며, 단일 원자와 같은 극미세 구조부터 수백 광년 떨어진 은하 관측 등 광범위한 스케일에서 최첨단 연구를 진행하는데 필수적인 연구 도구로 쓰이고 있다. 선사시대 불의 발견부터 전구의 발명, 1950년대 등장한 레이저 기술 등 빛에 대한 이해와 응용 기술의 발전은 우리의 삶을 다양한 방식으로 변화시켜 왔고, 현재는 빛을 단순히 열을 가하고 어둠을 밝히는 수단을 넘어 정보, 국방, 의료, 산업 등 다양한 분야에서 핵심 기술로 활용하고 있다. 이렇듯 빛을 제어하고 응용하는 기술이 빠르게 발전함에 따라 연구자들의 관심은 빛의 미시적인 양자상태인 광자에 대한 연구와 이를 활용하는 기술에 쏠리고 있다. 특히, 열광원(램프)과 결맞음 광원(레이저)과는 달리 고전 전자기학으로 설명할 수 없는 빛의 양자화된 특성을 잘 나타내는 광원을 양자 광원이라고 한다(그림 1). 자연계의 기본 입자 중 하나인 광자는 각운동량, 경로, 광

자 수, 공간 모드 등의 다양한 방식으로 양자 상태를 표현할 수 있는데, 이를 잘 활용하면 두개 이상의 광자의 양자 상태가 서로 얽혀 있어 하나의 광자 상태의 측정이 원거리 떨어져 있는 얽힘 광자 상태를 순식간에 결정 짓는 양자 얽힘의 구현 또는 불확정성 관계의 두 물리량 (예: 위상과 진폭)의 불확정도를 변화 시켜, 고전 레이저 광원 보다 한쪽 물리량의 불확정도를 크게 줄인 압축광 생성 등 다양한 방식의 양자 광원 생성이 가능하다. 최근 빛의 양자적 특성에 대한 연구를 통해 빛을 광자 수준에서 이해하고 제어하는 것이 점차 가능해지자 양자 광원을 이용한 양자 정보 과학기술이 새롭게 등장하고 있다. 양자 중첩과 복사 불가능성을 이용하여 높은 보안성을 갖는 양자 통신 기술, 다수 양자 얽힘 상태의 양자 광원을 활용하여 고전 정밀도 한계를 극복하는 양자 이미징 기술, 양자 간섭 현상을 기반으로 한 선형 광학계에서의 고전 알고리즘 보다 빠른 연산이 가능한 양자 알고리즘을 구현하는 양자 연산 기술 등이 이와 같은 예시이다. 이러한 빛을 이용한 양자 정보 응용 기술 구현을 위해서는 양자 상태의 빛을 생성하는 양자 광원과 빛을 제어하는 선형 광학 소자, 그리고 빛을 광자 수준에서 높은 효율로 측정 가능한 광검출기 등이 개발되어야 한다. 그중 본 글에서는 양자광원 생성과 제어를 고체 시스템에서 구현하려는 연구 분야를 소개하고자 한다.

열광원



결맞음 광원



양자 광원

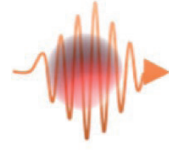


그림1. 서로 다른 특성을 갖는 다양한 빛의 상태. 미시적인 광자 레벨에서는 각 광원 별로 광자 수의 통계적인 분포에 차이가 발생하는데, 열광원의 경우 광자 뭉침, 결맞음 광원은 불균일한 분포, 광자 수 상태(fock state)의 양자 광원은 일정한 광자 수 분포를 나타낸다.

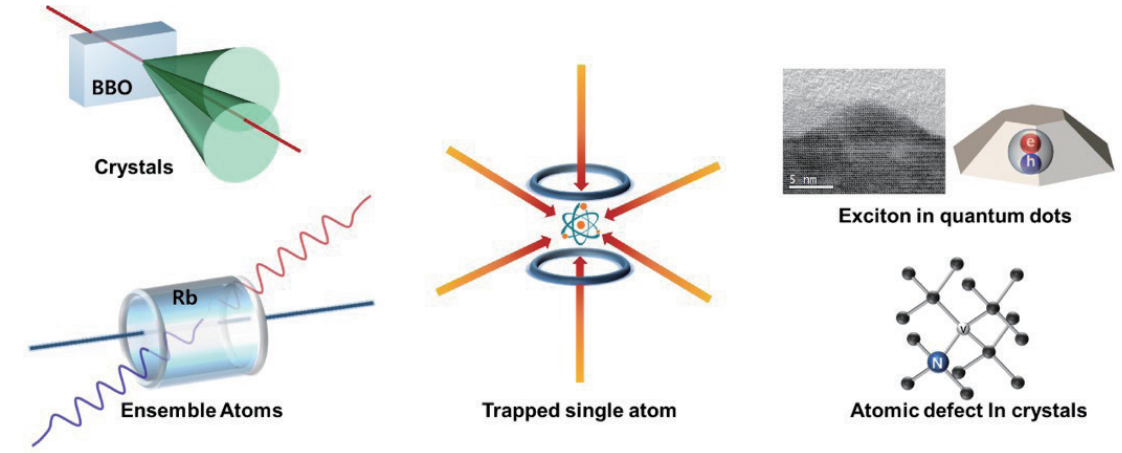


그림2. 다양한 방식의 양자 광원 생성 방식. (왼쪽) 비선형성이 높은 크리스탈 또는 원자 기체에서의 얽힘 광자 생성. (가운데) 포획된 단일 원자에서의 단일 광자 생성. (오른쪽) 고체 내 속박된 인공원자인 양자점 또는 점결합에서의 단일 광자 생성 이미지

2. 고체 양자 광원 소개

양자 광원 생성 및 제어 연구는 다양한 방식으로 연구가 진행되고 있다. 우선 가장 손쉽게는 레이저 세기를 충분히 감쇄시켜, 확률적으로 단일 광자 수준의 광원을 얻는 방법도 있지만 이러한 방식은 광자의 통계적인 분포가 불균일한 고전 광원인 레이저의 특성을 그대로 따라가기 때문에 진정한 의미의 양자광원이라고는 보기 어렵다. 대신 레이저를 비선형성이 큰 크리스탈 또는 원자 매질 내 입사하게 되면 자발 매개하향 변환 또는 자발 사광자 혼합 등의 비선형 과정을 통해 편광, 경로, 파장 등이 얽혀 있는 양자 얽힘 광자 쌍 생성이 가능하다. 이러한 얽힘 광원을 이용하여 양자 얽힘, 양자 전송의 구현 등 다양한 양자 광학 실험이 이루어졌다. 또한 광자가 항상 서로 다른 경로로 진행되는 쌍으로 생성되기 때문에 한쪽 경로에 광검출기를 놓고 측정하게 되면 다른 경로에 광자의 존재를 알 수 있어 예고된 방식(Heralded)의 단일 광자원으로도 활용이 가능하다. 양자광원 생성의 또다른 방법으로는 원자와 같이 양자화 된 에너지 구조를 갖는 단일 양자 구조체를 사용하는 것이다. 이러한 불연속적인 에너지 구조를 갖는 양자 구조 기반의 양자 광원 생성 기술은 원하는 순간에 단일 광자 또는 얽힘 광자원을 생성하는 것이 가능하다는 큰 장점을 갖고 있다. 하지만 단일 원자 수준의 포획 기술은 시스템 복잡성과 난이도가 높은 편이라, 실용적인 양자 광원으로 활용하는 것에는 한계가 있다.

이러한 기존 양자광원의 한계를 극복하기 위해서 단일 원자 대신 고체 내 단일 점 결함, 반도체 단일 양자점 등 원자와 유사한 특성을 나타내는 다양한 고체 기반 양자 구조체를 이용한 양자 광원 생성을 위한 연구가 꾸준히 이어져 오고 있다(그림 2). 2000년 고체 양자점 구조에서 양자광원 생성이 보고 된 이후 [1], 특성 개선과 효율 증진을 위한 많은 연구가 진행되었으며 그중 지난 20년간 실용적인 양자 광원이 되기 위한 필수 요구사항인 효율, 상호작용, 불균일성 측면에서의 큰 발전이 있었다.

2.1 고효율 양자 광원 생성

단일 광자 레벨에서 양자 상태가 기록되는 양자 광원의 경우 광자 하나의 손실에도 정보 손실이 발생하기 때문에, 양자 구조체로부터의 광자 생성 효율부터 시작하여 고체 시료 외부로의 광자 추출 효율, 광학계 내 광자 포집 효율, 광학 시스템 내에서 발생하는 광손실, 최종적으로 광검출기에서의 단일 광자 검출 효율 등 생성부터 전송 그리고 측정 과정을 포함한 광학 시스템 전 과정에서 높은 효율을 유지하는 것이 매우 중요하다. 그중 고효율 양자 광원 생성 측면에서 고려되어야 하는 부분은 첫째, 에너지 레벨 천이에서 발생하는 에너지가 광자의 형태로 방출되는 효율을 결정하는 내부 양자 효율의 증진이다. 특히 고체 시료 내 내부 결함과 charge trap state와 같은 비발광 프로세스는 광자 방출을 저해하는 주 원인으로 고품위 시료 성

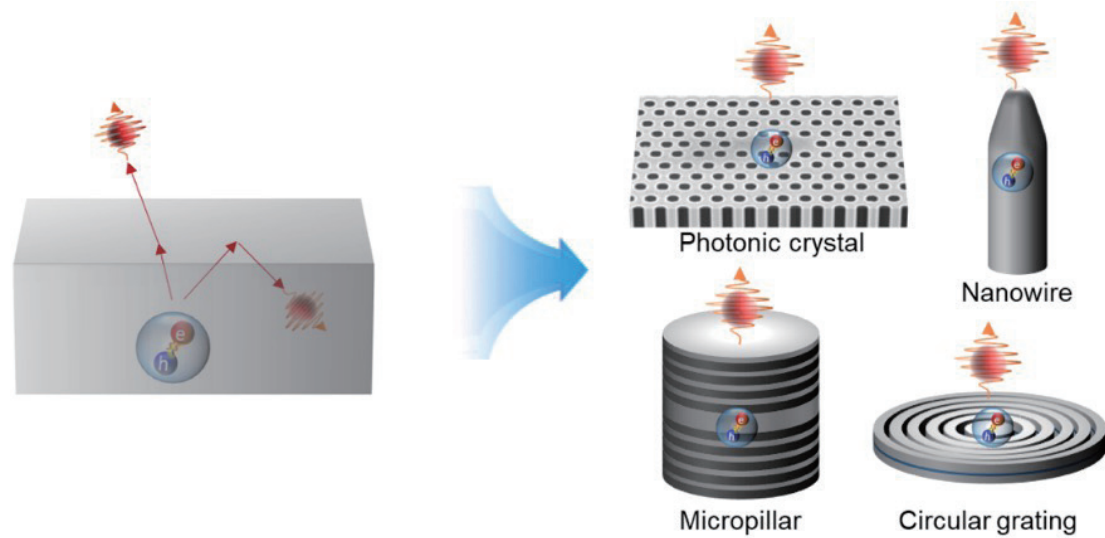


그림3. 기존 벌크형 양자광원 (왼쪽)의 문제점인 낮은 양자 광원 생성 효율을 높이기 위한 다양한 광학구조 이미지 (오른쪽).

장, 저온 실험 수행 등의 방식을 통해 개선할 수 있다. 둘째는 광자의 고체 시료 외부로의 추출 효율이다. 높은 굴절율의 고체 매질은 전반사 효과에 의해 광자 방출을 크게 저해한다 (그림 3). 예로써, 굴절율 3.5 정도의 GaAs 물질의 경우 시료 내부 생성된 광자 중 2% 미만의 광자만이 시료 외부로 방출된다. 세번째로 이렇게 방출된 광자 중 일부의 광자만이 사용자의 광학계와 결합이 이뤄지는데, 외부 광학계의 개구수(numerical aperture, NA)가 작을수록 광포집 효율이 크게 낮아진다. 따라서 높은 NA의 광학 부품 사용 또는 양자 광원의 far-field 패턴 개선을 통한 광학 포집 효율 증진 또한 필요하다. 지난 이십 년간 고체 양자 광원의 효율 개선을 위해 광결정, 나노막대, 원형 격자와 같은 다양한 광학 구조가 제안되었고 이를 통한 전반사 제거, Gaussian 형태의 far-field 패턴 형성 등 최적화된 광학구조 결합을 통해 기존 벌크 구조에 비해 높은 광자 추출 및 포집 효율을 얻을 수 있게 되었다 (그림 3). 또한 광학 구조에서의 높은 광자 상태 밀도가 가져오는 Purcell 효과를 이용하여 빠른 광자 생성 속도 및 내부 양자 효율 개선을 이뤄냈다. 그 결과 현재 반도체 양자 광원의 내부 양자 효율, 광추출 효율, 광 포집 효율을 모두 고려한 효율이 65% 이상에 이르고 있다 [2]. 하지만 전체 시스템 입장에서 보았을 때는 양자 광원의 효율 뿐만 아니라 시료 외부의 광학계에서의 손실과 광검출기의 효율 개선이 함께 이뤄져야 하는데, 최근 단일 광자 검출 효

율이 90%를 넘는 초전도 나노선 기반 광검출기의 상용화 등 측정 시스템에서도 빠른 발전이 이뤄지고 있다.

2.2 불필요한 상호 작용 억제

진공 챔버 내에 포획된 단일 원자와 달리 고체 시료 내 양자 구조는 주위 환경(포논, 전하)과 끊임없이 상호작용을 한다. 이는 고체양자 광원의 장점과 단점으로 작용하는데, 이러한 상호작용 덕분에 정밀 제어 레이저 여기 기술이 요구되는 원자기반의 양자 광원과 달리 발광 에너지 보다 크기만 하면 파장에 크게 상관없이 손쉽게 레이저 또는 전류를 주입하여 양자 구조에 에너지를 공급하고 광자를 발생시키는 것이 가능하다. 하지만 이러한 방식으로 생성된 광자는 단광자 특성을 유지하긴 하지만 생성된 광자의 방출 시간과 파장의 위치가 끊임없이 변화하는 문제(timing and spectral jitter)를 일으키고 나아가 광원의 파장 선폰을 증가시켜주는 주 원인이 된다. 이는 결과적으로 광자 간 간섭 가능 여부를 결정하는 광자간 구별 불가능성과 결맞음 시간을 단축시키게 되는데, 이 경우 다수 광자 간 양자 간섭현상을 기반으로 하는 양자 정보 처리에는 사용이 제한된다. 이러한 고체 시료 내 상호 작용을 억제하고자 최근에는 기존의 비공명(non-resonant) 방식 대신 특정 에너지 레벨에 선택적으로 일치시키는 공명(resonant) 방식이 보다 더 많이 연구되고 있으며, 추가적으로 외

부 전기장 제어 등을 통해 고체 시료 내 전하 상태를 안정화시키는 노력 등을 통해 높은 효율을 유지하면서도 99% 이상 높은 간섭 선명도를 갖는 고체 양자 광원이 보고되고 있다 [3].

2.3 양자광원 간 불균일성

양자키분배와 같은 일부 양자 통신 기술은 단일 고체 양자광원에서 고효율로 발생하는 단광자 만으로도 기술 구현이 가능하지만, 실질적으로 대부분의 광자 기반의 양자 정보 기술은 복수의 양자 광원과 이들 간의 상호작용을 통해 구현된다. 특히, 전자와 달리 직접 상호작용이 어려운 광자는 광자 간 양자 간섭 현상을 이용하여 측정을 기반으로 한 양자 상호작용을 구현한다. 이 때 간섭의 선명도를 높이는 것이 무엇보다 중요하는데, 이를 위해서는 각 광자의 긴 결맞음 시간 뿐만 아니라 서로 간섭하는 두개의 광자가 파장, 편광, 공간 모드 등 다양한 자유도 측면에서 모두 구별이 불가능한 상태여야 한다. 하지만 방출 광원의 특성이 동일한 자연계의 원자와 달리 인위적으로 생성된 고체 양자 광원은 양자구조체의 크기, 모양, 응력 정도의 차이에 따른 발광 파장이 상이하하여 양자 간섭 구현에 큰 제한을 발생시킨다. 고체 양자 광원 간 파장을 제어하기 위하여 국소적으로 온도를 변화시키거나 응력, 전기장을 인가하여 다수의 구별 불가능한 양자 광원 생성을 위한 기술 개발이 진행되고 있으며 현재 광자의 동시 생성 개수를 점차 늘려가고 있다 [4, 5].

고체 양자 광원이 갖는 불균일성은 발광 파장 뿐 아니라 생성 위치 제어 측면에서도 발생되는데, 앞서 소개한 공진기와 같은 광학구조와 고효율로 결합하기 위해서는 원하는 위치에 양자광원을 배치하

는 것이 중요하다. 현재 제작 단계에서 패턴 기술을 이용한 성장법 또는 ion-implantation 기법 등의 생성 위치 제어 기술의 개발을 통해 양자 광원의 불균일성을 점차 극복해 나가고 있다.

이처럼 현재 고체 양자 광원 생성 및 제어 기술은 고체 소재가 가지고 있는 장점을 극대화 하면서도 고체 환경에서 발생하는 문제점을 차츰 극복해 나가며, 고효율, 고신뢰성의 양자 광원이 가져야 할 요구조건을 하나씩 달성해 나가고 있다.

3. 고체 양자 광원의 집적 소자화 기술

최근 고체 양자 구조 제작 및 제어 기술 개발에 따른 고효율, 고신뢰성의 양자 광원 생성이 가능해지자 이를 보다 실용적으로 이용하려는 연구가 차츰 시도되고 있다. 기존 광학 테이블 위에서 이뤄지는 자유 공간에서의 광자 방출 및 광자 제어 대신 광섬유, 광학 집적 회로와 같은 실질적으로 양자 광원을 필요로 하는 플랫폼에서의 양자 광원 생성과 제어 연구가 특히 주목받고 있다.

3.1 광섬유 결합 고체양자 광원 개발

광섬유는 광자를 원거리까지 전달할 수 있는 장점을 가지고 있어 정보통신에 없어서는 안 될 중요한 플랫폼이자 이미 전세계적으로 구축되어 있는 상용화 플랫폼이기도 하다. 광섬유 내 광자를 제어하기 위한 광섬유 기반 광학소자 또한 상용화 되어 있어 광자의 편광, 경로를 높은 효율로 손쉽게 제어하는 것이 가능하다. 하지만 광섬유 플랫폼 사용시, 전송거리에 따른 손실 및 분산을 최소화하기 위해서는 광섬유 파장 대역으로 알려진 C-band (1550 nm) 또는 O-band

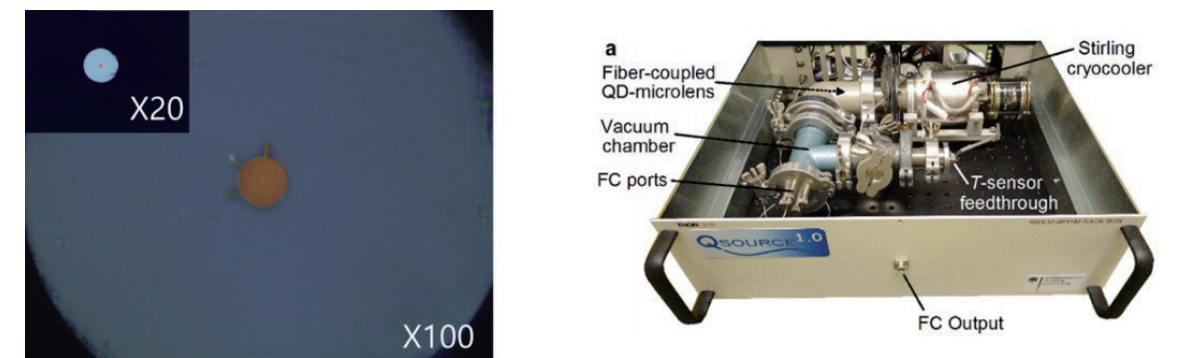


그림4. (왼쪽) 본 그룹에서 개발 중인 광섬유 집적형 양자 광원 소자의 현미경 사진. Single mode 광섬유 코어에 양자점 양자광원 시료가 집적되어 있다. (오른쪽) 독일 그룹에서 개발한 stand-alone 방식의 광섬유 결합 양자 광원 시스템 사진 [6]

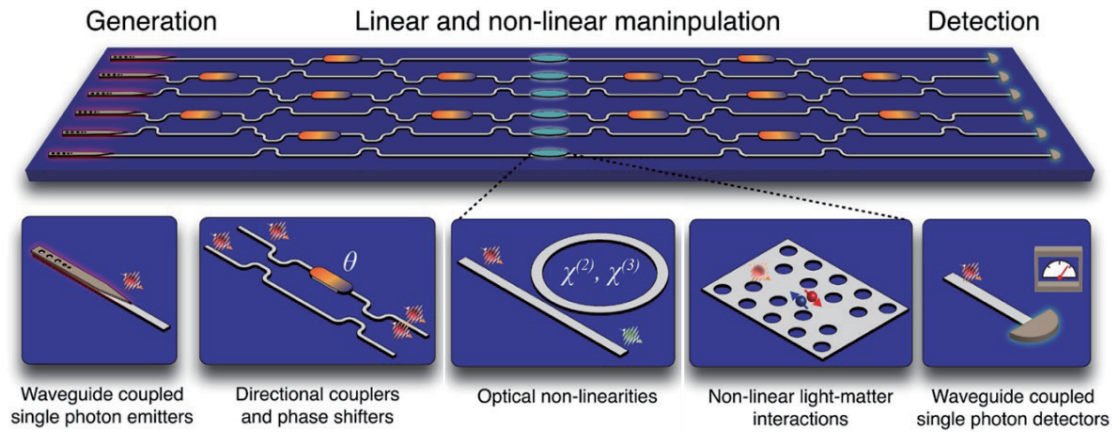


그림5. 양자 광원, 선형 간섭계, 비선형 광학 소자, 광검출기 등 다양한 광학 요소들이 결합된 양자 집적 광학 소자 이미지 [7]

(1310 nm) 와 같은 특정 파장을 사용해야 한다는 점과 싱글모드 광섬유의 NA 가 0.14 정도로 작기 때문에 양자 광원을 광섬유와 결합 시 큰 광자 손실이 발생할 수 있다는 어려움이 존재한다. 광통신 파장에서의 고체 양자 광원 개발 연구는 양자점, 점결합, 이차원 물질 등 다양한 소재에서 가능성이 제시되었으며, 소재의 품질과 광학 특성을 개선하려는 연구가 진행되고 있다. 광섬유 광자 결합 효율 개선을 위해서 고체 양자 광원과 광섬유 사이에 공간 모드 변환을 위한 중간 광학렌즈 시스템을 결합하는 것이 가능하나, 광손실이 크고 복잡한 광학 시스템 대신 광섬유에 양자 구조체를 직접 결합시키는 방법이 관심을 끌고 있다 (그림4). 이 경우 양자 광원이 좁은 각도 범위에서 수직 발광이 이뤄질 수 있도록 적합한 나노광학구조 설계가 이뤄져야 한다. 이러한 Plug&play 방식의 광섬유 결합 양자 광원 제작은 사용자가 부가적인 광학 alignment 과정 없이도 손쉽게 바로 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있어 실용성을 더욱 높여줄 것으로 기대된다.

3.2 광집적 회로 결합 고체양자 광원 개발

실리콘 포토닉스로 대표되는 광학 집적 회로 기술은 현재 구축된 높은 집적도와 정밀도의 전자 소자기술을 활용하여, 광자의 경로와 위상제어를 구현하는 수천개의 광학 소자를 수 mm 크기의 칩 안에 집적시키는 것을 가능케 한다. 또한, 실리콘 뿐만 아니라 Si3N4, LiNbO3, AlN 등 다양한 광학 칩 소재 활용하여 극저손실, 초고속 위

상 변조 등 목적에 맞는 광학 소자 구현이 가능하다. 하지만 이러한 광학 집적 회로의 문제점은 소자 내 광원을 직접적으로 생성할 수 없어 외부로부터 광원을 결합시켜야 한다는 점이다. 특히, 양자 광학 집적소자 제작을 위해서는 단일 광자 수준의 양자 광원을 소자 내부에 고효율로 전달해야 하는 어려움이 발생된다. 연구 초기에는 이를 광섬유를 통해서 전달하는 법 또는 빛 생성이 가능한 물질을 광학칩 위에 성장시키는 방법 등이 고려되었으나, 높은 광손실과 소재의 품질 저하 문제로 최근에는 광학 칩과 고체 양자 광원 소재를 개별적으로 최적 조건에서 성장 및 제작 후, 하이브리드 방식으로 이를 재결합하는 연구가 보다 각광받고 있다 [7].

하이브리드 집적 방식의 핵심은 서로 다른 두개의 플랫폼에서 제작된 고체 양자 광원과 광학회로 간에 정밀 재결합을 하는 것인데, PDMA 물질과 같은 점성이 높은 마이크로 스탬프를 이용하는 방식과 마이크로 팁을 이용하여 Pick-and-place 방식으로 재결합을 하는 방법들이 제안되었다. 최근에는 이러한 방법을 이용하여 다수의 고체 양자 광원을 결합하고 각각의 양자 광원의 파장을 개별적으로 제어하여 광집적 회로 내에서 양자 간섭 현상을 구현하는 수준에 이르고 있다 (그림5) [8].

4. 고체 양자 광원을 이용한 양자 응용 기술 개발

높은 효율과 신뢰성을 갖는 양자 광원 생성 및 제어 시스템은 양자 정보 과학 연구를 위한 플랫폼과 이를 활용한 다양한 양자 정보 응용

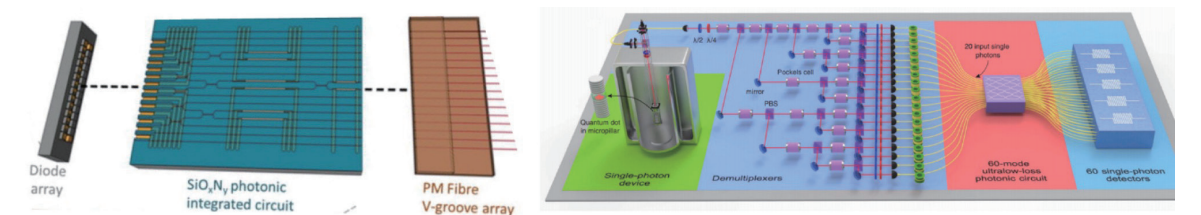


그림6. (왼쪽) 다수의 양자광원이 집적된 양자 광학 회로 구성. 파장 제어를 위한 독립적인 제어 시스템을 가지고 있다 [4]. (오른쪽) 하나의 양자광원과 demultiplexing 기법을 이용하여 20개의 동시 광자 생성이 가능하다 [9].

기술 연구를 가능케 한다. 활용 가능한 리소스의 품질과 개수가 늘어남에 따라 점점 많은 응용 기술에 제안되고 있는데, 최근 진행되고 있는 고체 양자 광원 기반의 양자 정보 응용 연구를 간략히 소개하면 아래와 같다.

4.1 다광자 양자 간섭 시스템

양자 물리의 선형적인 특성은 선형 광학을 기반으로 양자 시뮬레이션을 가능하게 한다. 이를 활용하면, 고전 컴퓨터로는 결과를 예측하기 어려운 물리 시스템을 다수의 동일 양자 광원과 다수의 beamsplitter의 구성 만으로도 시뮬레이션하는 것이 가능하다. 대표적인 예가 보존 입자의 샘플링 문제인데, 고전적으로는 결과를 예측하는 것이 매트릭스의 퍼머넌트를 계산하는 것이라 input 모드와 보존입자의 개수가 늘어날수록 계산에 걸리는 시간이 기하급수적으로 늘어난다. 하지만 이를 보존입자인 다수의 단일 광자원과 간섭계를 기반으로 한 선형 양자 광학 시스템을 통해 빠른 속도로 시뮬레이션을 하는 것이 가능하다. 하지만, 다수의 구별불가능한 광자 동시 생성에 실질적인 어려움이 있어 동시 광자 생성 개수를 증가시키기 위한 노력이 계속되고 있다. 가장 잘 알려진 접근 방식인 자발 매개 하향 변환 방식의 경우 광자 간 구별 불가능성이 높아 해당 방식으로 생성된 다광자를 이용하여 앞선 결과들이 나오고 있다. 하지만 광자 수가 증가할수록 동시 다광자 발생확률이 지속적으로 감소하여 동시 생성 광자 수가 주로 5개 이하에 머무르는 등 확장성에는 아직 어려움을 겪고 있다. 이를 극복하고자 원하는 순간에 광자 생성이 가능한 고체 양자 광원을 이용하여 이를 구현하려는 노력이 계속되고 있으며, 앞서 언급한 것처럼 파장 제어를 통한 다수의 고체 양자 광원을 사용하려는 노력과 함께 하나의 양자 광원에서 시간에 따라 일정하게 나오는 광자를 demultiplexing 기술을 이용, 공간적으

로 나누어서 이를 동시 입사시키는 방식을 사용하려는 연구도 많이 진행되고 있다 (그림6). Demultiplexing 기술 활용시 광자의 개수 증가에 따라 다광자 생성 확률이 여전히 감소하긴 하지만 감소 정도가 선형적이라는 점과 함께 하나의 광원을 사용하고 있어 별도의 파장 제어 기술 없이 안정적으로 구별 불가능한 광자를 생성할 수 있다는 큰 장점이 있다. 2019년에는 20개의 광자와 60개의 광학 모드를 사용한 결과가 보고되기도 하였다 [9]. 보존 샘플링 구현 외에도 위상 제어가 가능한 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 원하는 unitary operation 을 구현하고 이를 통해 양자 알고리즘을 구현하려는 시도가 계속되고 있다 [10]. 아직 초기 결과이기는 하나 고체 양자 광원을 이용한 Shor 의 인수분해 알고리즘의 핵심인 Quantum Fourier transformation 을 가능성 보여준 결과가 최근 보고 되기도 하였다 [11]. 이외에도 현재 고체 양자 광원에서의 얽힘 광자쌍을 이용한 양자 전송 실험 등의 연구가 자유공간, 광섬유, 집적 회로 등 다양한 플랫폼에서 진행되고 있다 [12].

4.2 양자 메모리 소자

양자점, 점결합과 같은 고체 양자 구조체는 양자광원으로써 뿐만 아니라, 내재하고 있는 전자 스핀 등을 이용 시 양자 정보를 저장하는 양자 메모리로서 활용가능성도 매우 높다. 특히, 다이아몬드와 실리콘카바이드와 같은 물질 내 속박된 점결합의 경우 스핀 결맞음 특성이 우수하여 수백 ms 또는 수초 이상 긴 시간동안 양자 정보를 저장하는 것이 가능하다. 이는 수십 us 이하의 빠른 gate operation 시간을 고려할 때 많은 횟수의 양자 operation 이 가능한 시간이다. 또한, 하나의 양자 구조를 넘어 수 nm 인근의 다수의 양자구조를 동시에 활용하게 되면 양자 구조 간 전기적 상호작용을 통해 다수 양자 얽힘 상태 구현이 가능하다 (그림7) [13]. 뿐만 아니라 광자를 매개로 하여

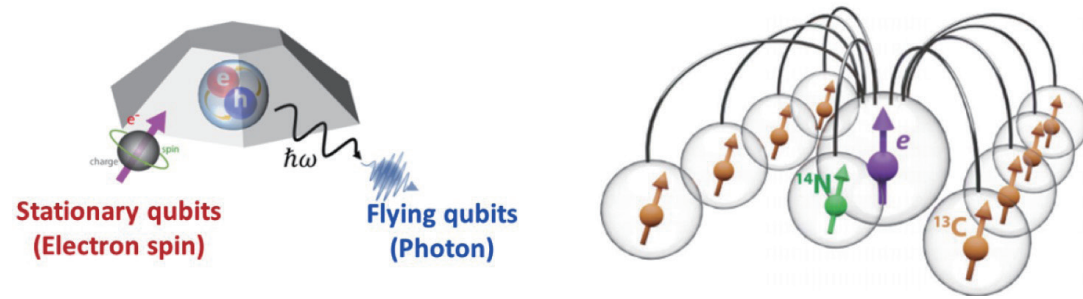


그림7. (왼쪽) 고체 양자 구조에서 stationary / flying 큐비트의 생성 이미지. (오른쪽) 다이아몬드 결정 내 전자 스핀과 주위 탄소 원자의 스핀간 다수 얽힘 상태 구현 이미지 [13]

멀리 떨어진 양자구조 간 양자 얽힘을 구현하는 연구도 확장성을 넓이기 위한 방안으로 연구가 진행중이다 [14]. 이와 같이 고체 양자구조의 경우 flying 큐비트 인 양자 광원과 stationary 큐비트인 스핀을 모두 활용할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있어, 이를 양자 광학 소자에서 활용 시 보다 다양한 응용 기술 개발이 가능하다.

4.3 비선형 양자 광학 소자

광자와 선형 광학계를 기반으로 한 양자 광학 소자의 경우 비선형 상호작용을 발생시키는 것이 쉽지 않다. 하지만 고체 양자 구조 활용 시, 양자 광원과 양자 메모리로서 활용 뿐만 아니라 광자와 양자 구조체 간 상호작용을 기반으로 한 비선형 양자 광학 소자를 구현할 수 있다. 이러한 광자와 스핀 간 상호작용 증진을 위해서는 단일 광자의 흡수와 방출이 단일 양자구조에서 잘 이뤄질 수 있도록 고효율의 양자 인터페이스가 요구되는데, 빛과 물질 간 상호작용을 극대화하는 공진기가 고효율의 비선형 양자 인터페이스로 사용될 수 있다. 특히, Harmonic oscillator 인 공진기 모드와 two-level 시스템인 양자 구조체 간 강한 상호작용 구현 시, 시스템이 갖는 해밀토니안은 에너지 간격이 일정하지 않은 Anharmonic ladder 타입의 에너지 상태를 갖게 되어 단일 광자 수준에서도 상호작용 정도가 크게 달라지는 높은 비선형성을 나타낸다. 이러한 비선형성을 활용하게 되면 다광자 상태는 투과시키고 단일 광자만 선택적으로 반사를 시키는 광자수 필터 구현이 가능하다 (그림 8) [15]. 또한, 공진기에서 반사되는 광자의 위상이 공진기와 결합된 양자 구조체의 스핀 상태에 따라 달라지는 특성을 이용하여 스핀 상태로 광자의 편광을 조절하는 것이 가능하고, 한걸음 더 나아가 첫번째 광자의 위상이 스핀 상태를 제어하고 이어서 스핀이 두번째 광자의 위상을 제어하는 방식으로 광자-광자

자 인터페이스가 요구되는데, 빛과 물질 간 상호작용을 극대화하는 공진기가 고효율의 비선형 양자 인터페이스로 사용될 수 있다. 특히, Harmonic oscillator 인 공진기 모드와 two-level 시스템인 양자 구조체 간 강한 상호작용 구현 시, 시스템이 갖는 해밀토니안은 에너지 간격이 일정하지 않은 Anharmonic ladder 타입의 에너지 상태를 갖게 되어 단일 광자 수준에서도 상호작용 정도가 크게 달라지는 높은 비선형성을 나타낸다. 이러한 비선형성을 활용하게 되면 다광자 상태는 투과시키고 단일 광자만 선택적으로 반사를 시키는 광자수 필터 구현이 가능하다 (그림 8) [15]. 또한, 공진기에서 반사되는 광자의 위상이 공진기와 결합된 양자 구조체의 스핀 상태에 따라 달라지는 특성을 이용하여 스핀 상태로 광자의 편광을 조절하는 것이 가능하고, 한걸음 더 나아가 첫번째 광자의 위상이 스핀 상태를 제어하고 이어서 스핀이 두번째 광자의 위상을 제어하는 방식으로 광자-광자

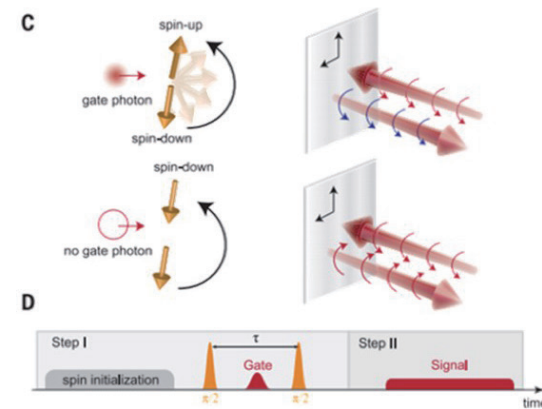
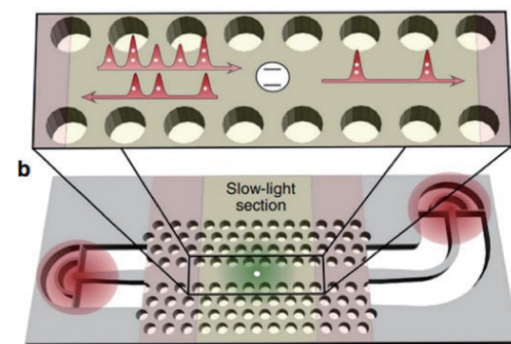


그림8. (왼쪽) 광학침내 양자구조를 이용하여 광자 수 필터를 구현한 예시 [15]. (오른쪽) 광자-스핀 인터페이스를 이용하여 단일광자 트랜지스터를 구현한 예시 [16]

간 상호작용을 구현하는 단일 광자 트랜지스터 구현 등 다양한 비선형 양자 광학소자가 고체 광학칩에서 실험적으로 구현되고 있다 (그림8) [16].

5. 맺음말

LED와 LD 로 대표되는 반도체 광원 기술은 높은 실용성, 안정성, 특성 가변성 등의 장점으로 기존 램프, 형광등, 기체 레이저와 같은 고전광원을 대체해 나가고 있다. 또한, 이러한 플랫폼의 변화는 단순히 소형화, 전류 구동과 같은 고체 소자화의 장점 이외에도 플랫폼을 디스플레이, 정보통신, 군사, 의료용 광원 등 새로운 응용분야를 창출하기도 하였다. 이처럼 새로운 광원 기술과 플랫폼의 변화는 우리의 삶에 큰 변화를 가져오곤 한다. 현재 아직까지 널리 활용되고 있지 않은 새로운 빛의 상태인 양자 광원의 경우 아직 기초 연구 수준이고 이를 이용하여 무엇을 할 수 있을지에 대한 응용 기술도 초기 연구 상태이다. 지금까지의 선행연구 결과들보다 비추어 볼 때, 양자 광원의 등장은 기존 계측기술과 결합하여 정밀도를 높이거나 양자 전송 등 새로운 개념의 정보통신 구현에 활용될 수도 있을 것이다. 또한, 양자 연산과 같은 양자 알고리즘을 구현하는데 적용도 가능하다. 이러한 다양한 응용 가능성 중 양자적 특성(양자 간섭, 얽힘 등)을 적게 사용할수록 응용이 비교적 용이할 것으로 예상할 수 있다. 예로서 단일 광자만을 사용하는 양자 키분배 기술처럼 일부 양자 통신 기술의 경우 현재 수준에서도 적용이 가능한 기술도 있으나 (아직 사용거리, 속도 측면에선 해당 기술 역시 활용이 상당히 제한된다.), 양자 연산과 같은 다수 큐비트간 양자 얽힘과 긴 결맞음 시간이 많이 요구되는 높은 수준의 양자 기술 분야처럼 해결해야 할 숙제가 아직 많이 남아 있는 기술도 있다. 하지만 이러한 난제를 극복하기 위한 많은 연구자들의 노력이 계속되고 있는 바, 양자 광원이 우리 주위에서 다양한 모습으로 널리 활용될 수 있기를 기대해본다.

참고문헌

[1] P. Michler, A. Kiraz, C. Becher, W. V. Schoenfeld, P. M. Petroff, L. Zhang, E. Hu, and A. Imamoglu, "A Quantum Dot Single-Photon Turnstile Device," *Science* 290, 2282-2285 (2000)
 [2] S. Liu, Y. Wei, R. Su, R. Su, B. Ma, Z. Chen, H. Ni, Z. Niu, Y. Yu, Y. Wei, X. Wang, and S. Yu, "A deterministic quantum dot

micropillar single photon source with >65% extraction efficiency based on fluorescence imaging method," *Scientific Reports* 7, 13986 (2017)
 [3] N. Somaschi, V. Giesz, L. De Santis, J. C. Lored, M. P. Almeida, G. Hornecker, S. L. Portalupi, T. Grange, C. Antón, J. Demory, C. Gómez, I. Sagnes, N. D. Lanzillotti-Kimura, A. Lemaître, A. Auffeves, A. G. White, L. Lanco, and P. Senellart, "Near-optimal single-photon sources in the solid state," *Nature Photonics* 10, 340-345 (2016)
 [4] D. J. P. Ellis, A. J. Bennett, C. Dangel, J. P. Lee, J. P. Griffiths, T. A. Mitchell, T.-K. Paraiso, P. Spencer, D. A. Ritchie, and A. J. Shields, "Independent indistinguishable quantum light sources on a reconfigurable photonic integrated circuit," *Applied Physics Letters* 112, 211104 (2018)
 [5] J.-H. Kim, C. J. K. Richardson, R. P. Leavitt, and E. Waks, "Two-Photon Interference from the Far-Field Emission of Chip-Integrated Cavity-Coupled Emitters," *Nano Letters* 16, 7061-7066 (2016)
 [6] A. Schlehahn, S. Fischbach, R. Schmidt, A. Kaganskiy, A. Strittmatter, S. Rodt, T. Heindel, and S. Reitzenstein, "A stand-alone fiber-coupled single-photon source," *Scientific Reports* 8, 1340 (2018)
 [7] J.-H. Kim, S. Aghaieimodi, J. Carolan, D. Englund, and E. Waks, "Hybrid integration methods for on-chip quantum photonics," *Optica* 7, 291-308 (2020)
 [8] N. H. Wan, T.-J. Lu, K. C. Chen, M. P. Walsh, M. E. Trusheim, L. De Santis, E. A. Bersin, I. B. Harris, S. L. Mouradian, I. R. Christen, E. S. Bielejec, and D. Englund, "Large-scale integration of artificial atoms in hybrid photonic circuits," *Nature* 583, 226-231 (2020)
 [9] H. Wang, J. Qin, X. Ding, M.-C. Chen, S. Chen, X. You, Y.-M. He, X. Jiang, L. You, Z. Wang, C. Schneider, J. J. Renema, S. Höfling, C.-Y. Lu, and J.-W. Pan, "Boson Sampling with 20 Input Photons and a 60-Mode Interferometer in a 10^{14} -Dimensional Hilbert Space," *Physical Review Letters* 123, 250503 (2019)

- [10] P. J. Coles, S. Eidenbenz, S. Pakin, A. Adedoyin, J. Ambrosiano, P. Anisimov, W. Casper, G. Chennupati, C. Coffrin, and H. Djidjev, "Quantum algorithm implementations for beginners," arXiv, arXiv: 1804.03719 (2018)
- [11] Z.-C. Duan, J.-P. Li, J. Qin, Y. Yu, Y.-H. Huo, S. Höfling, C.-Y. Lu, N.-L. Liu, K. Chen, and J.-W. Pan, "Proof-of-principle demonstration of compiled Shor's algorithm using a quantum dot single-photon source," Opt. Express 28, 18917-18930 (2020)
- [12] M. Anderson, T. Müller, J. Huwer, J. Skiba-Szymanska, A. B. Krysa, R. M. Stevenson, J. Heffernan, D. A. Ritchie, and A. J. Shields, "Quantum teleportation using highly coherent emission from telecom C-band quantum dots," npj Quantum Information 6, 14 (2020)
- [13] C. E. Bradley, J. Randall, M. H. Abobeih, R. C. Berrevoets, M. J. Degen, M. A. Bakker, M. Markham, D. J. Twitchen, and T. H. Taminiau, "A Ten-Qubit Solid-State Spin Register with Quantum Memory up to One Minute," Physical Review X 9, 031045 (2019)
- [14] H. Bernien, B. Hensen, W. Pfaff, G. Koolstra, M. S. Blok, L. Robledo, T. H. Taminiau, M. Markham, D. J. Twitchen, L. Childress, and R. Hanson, "Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres," Nature 497, 86-90 (2013)
- [15] A. Javadi, I. Söllner, M. Arcari, S. L. Hansen, L. Midolo, S. Mahmoodian, G. Kiršanské, T. Pregolato, E. H. Lee, J. D. Song, S. Stobbe, and P. Lodahl, "Single-photon non-linear optics with a quantum dot in a waveguide," Nature Communications 6, 8655 (2015)
- [16] S. Sun, H. Kim, Z. Luo, G. S. Solomon, and E. Waks, "A single-photon switch and transistor enabled by a solid-state quantum memory," Science 361, 57-60 (2018) 

저자 약력

김제형 교수는 고려대 물리학과에서 학사, 카이스트 물리학과에서 박사학위를 취득하였으며, 미국 University of Maryland 에서 박사 후 연구원으로 근무하였다. 현재 유니스트 물리학과에 재직 중이며 고체 기반 양자광학 연구실을 이끌고 있다. 주요 연구 분야로는 고효율 반도체 양자 광원, 양자 광집적 소자 개발 등이며, 이를 이용한 빛과 물질 간의 상호 작용 및 양자 정보 응용 연구를 수행하고 있다.

Email: jehyungkim@unist.ac.kr