

# 분자 큐비트에서 단일 광자 기반 양자 제어 구현

(2026.06.09., 양자정보연구지원센터)

## □ 분자 큐비트에서 단일 광자 기반 양자 제어 성공

### ○ 단일 분자 기반 양자 제어 기술 구현

- 독일의 NVision Imaging Technologies와 Ulm University 연구진은 단일 유기 분자 하나를 이용해 양자정보를 저장·조작·판독할 수 있는 기술을 시연함
- 연구진은 단일 분자 수준에서 광학적 판독, 양자 상태 제어, 단일 광자 방출을 구현하여 분자 기반 양자 하드웨어의 가능성을 제시함
- 이번 연구는 초전도, 이온트랩, 중성원자, 고체결함(NV center) 기반 플랫폼과는 다른 새로운 분자 기반 양자기술 분야의 가능성을 보여줌

### ○ 광-스핀 인터페이스 구현

- 연구진은 특수 설계된 카벤(carbene) 분자를 결정(host crystal) 내부에 삽입하여 분자 큐비트를 구현함
- 해당 분자는 두 개의 비짝지은 전자(unpaired electrons)를 포함하는 삼중항(triplet) 바닥상태를 형성하며, 이를 통해 스핀 기반 양자정보 저장이 가능함
- 결정 구조는 외부 진동과 환경 잡음을 최소화하여 양자 상태의 안정성을 크게 향상시킴
- 그 결과 단일 분자 수준에서 안정적인 광 방출과 코히런트(coherent) 양자 제어를 달성함

### ○ 단일 광자 방출 및 양자 상태 제어

- 극저온 공초점 현미경(Cryogenic Confocal Microscopy)을 이용하여 단일 분자의 단일 광자 방출을 관측함
- 광학적으로 검출되는 자기공명(ODMR)과 마이크로파 펄스를 이용한 스핀 제어를 성공적으로 수행함

- 단일 분자의 광학 선폭(linewidth)은 약 38 MHz 수준이며, 1시간 이상 매우 높은 스펙트럼 안정성을 유지함
- 분자 큐비트는 극저온 환경에서 밀리초(ms) 수준의 양자정보 보존 시간을 달성했으며, 이는 기존 분자 큐비트 대비 10배 이상 향상된 성능임
- 연구진은 해당 성능이 기존 다이아몬드 NV 센터와 같은 고체 결합 기반 플랫폼과의 격차를 크게 줄였다고 평가함

#### ○ 분자 기반 양자 플랫폼의 특징

- 기존 양자컴퓨터가 반도체 공정 기반의 Top-down 제조 방식을 사용하는 반면, 분자 시스템은 화학 합성을 통한 Bottom-up 방식으로 제작 가능함
- 화학적 설계를 통해 광학 특성, 스핀 특성, 핵스핀 구조 등을 원자 단위로 조정할 수 있음
- 특정 위치에 동위원소를 배치하여 분자 내부에 양자메모리를 설계하는 것도 가능할 것으로 전망됨
- 다이아몬드나 실리콘 카바이드(SiC)와 비교해 불필요한 결함이 적어 보다 깨끗한 자기 환경을 제공할 수 있음

#### ○ 광자 집적회로와의 결합 가능성

- 분자 시스템은 박막(thin film) 형태로 제작 가능하여 광자 집적회로(Photonic Integrated Circuit)와의 통합에 유리함
- 실리콘 나이트라이드(SiN) 및 리튬 나이오베이트(LiNbO<sub>3</sub>) 기반 광자칩에 집적될 가능성이 제시됨
- 연구진은 온칩 광자 라우팅, 양자 중계기(Quantum Repeater), 분산형 양자컴퓨팅 네트워크 등에 활용 가능성을 제시함

#### ○ 상용화 전략 및 응용 분야

- NVision은 기존 양자 센싱 및 MRI 분야에서 확보한 기술을 양자컴퓨팅과 의료 응용 분야로 확대하고 있음
- 최근 약 5,500만 달러 규모의 Series B 투자를 유치했으며, 양자

컴퓨팅 기반 신약 설계와 POLARIS 양자 MRI 플랫폼을 연계하는 전략을 추진 중임

- 향후 분자 기반 양자 하드웨어가 신약 개발, 분자 시뮬레이션, 바이오·의료 분야의 양자컴퓨팅 플랫폼으로 활용될 가능성이 있음

○ 한계점 및 향후 과제

- 연구는 아직 arXiv에 공개된 동료평가 전(preprint) 단계의 결과임
- 현재 실험은 극저온 환경과 정밀한 광학 장비를 필요로 함
- 단일 분자 제어는 성공했지만 다중 분자 큐비트 간 얽힘 생성이나 대규모 확장형 양자컴퓨팅 구조는 아직 구현되지 않음
- 광자 수집 효율, 나노광자 집적 기술, 대량 생산 공정 등은 추가 연구가 필요한 과제로 남아 있음
- 연구진은 이번 성과를 완전한 양자컴퓨터가 아닌 초기 단계 플랫폼 검증(platform demonstration)으로 설명하고 있음

○ 결론

- 이번 연구는 단일 유기 분자에서 광자를 이용한 양자정보 저장·제어·판독을 구현함으로써 분자 기반 양자기술의 실현 가능성을 보여준 중요한 성과임
- 특히 화학적으로 설계 가능한 분자 구조와 광자 네트워크의 결합 가능성을 제시하여, 향후 광자 양자컴퓨팅·양자센싱·분산형 양자컴퓨팅을 위한 새로운 플랫폼으로 발전할 잠재력을 보여줌
- 다만 아직 초기 연구 단계이며, 다중 큐비트 확장성과 실용적 하드웨어 구현 여부는 향후 검증이 필요함

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/05/20/molecular-qubit-achieves-single-photon-quantum-control/>