

양자정보연구지원센터

Quantum Information Research Support Center

NEWSLETTER

<Research Trend>



※ 본 연구동향은 양자정보연구지원센터 뉴스레터의 내용입니다.

반도체 양자점과 양자얽힘

(Semiconductor quantum dots and quantum entanglements)

[작성: 한국과학기술원 최민호 연구원]

지난 5년 동안 양자기술은 엄청난 발전을 거듭했고, 양자 컴퓨터와 양자 통신, 양자 암호와 같은 용어들은 이제 우리 주변의 일상에서도 쉽게 접할 수 있는 단어가 되었다. 양자 광원은 “양자적인 성질을 갖는” 빛을 방출하는 장치인데, 빛은 주변 환경으로부터 영향을 거의 받지 않고 매우 빠른 속도로 전파할 수 있기 때문에 장거리로 정보를 전달하는 통신, 즉, 양자 통신은 양자 광원이 활용되는 대표적인 분야이다. 물론 양자 광원을 이용하여 양자 컴퓨터와 같은 연산 장치도 만들 수 있지만 현재까지는 초전도체 혹은 이온 포획을 활용한 방법이 가장 앞서가는 양자 컴퓨터의 플랫폼이다. 하지만 현재까지 구현된 양자 연산의 기본이 되는 단위인 큐비트(qubit, quantum bit)의 개수가 실용적인 양자 연산을 하기에 필요한 수(~1,000,000개)와 비교하면 턱없이 부족한 상황이기 때문에 적은 수의 큐비트들로 구성된 “작은” 컴퓨터 노드를 여러 개 묶음으로써 하나의 “큰” 연산을 하는 방식이 대두되고 있다. 여기에 빛의 양자 얽힘 현상을 활용하여 멀리 떨어진 서로 다른 시스템 사이의 양자 상호작용을 할 수 있도록 하는 방법이 가장 대표적인 방법으로 이 경우에도 양자 광원은 필수적인 구성요소이다[1].

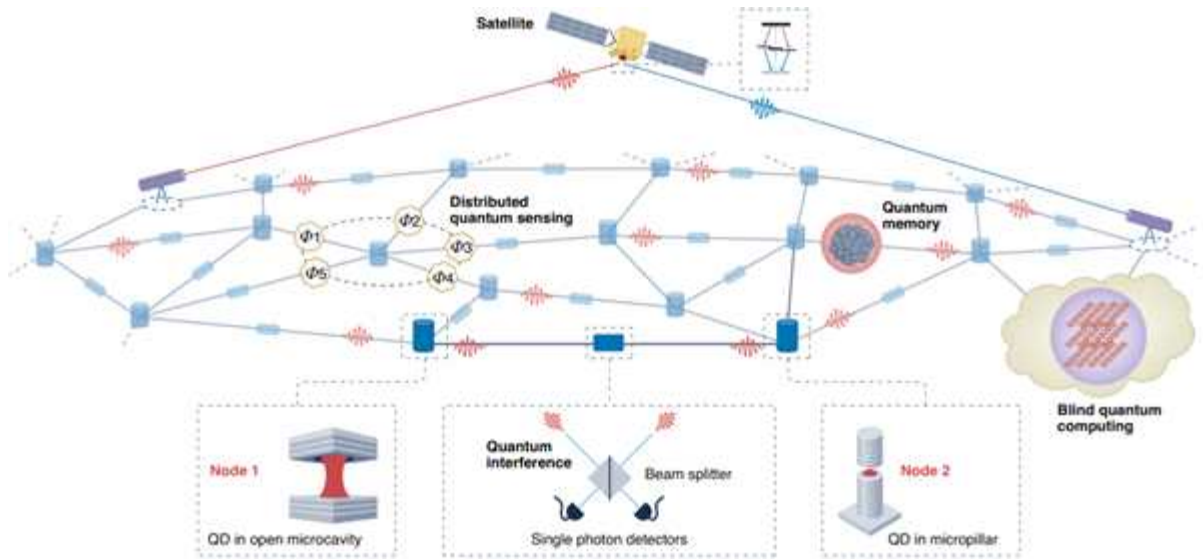


그림 1. 반도체 양자점을 활용한 양자 인터넷의 모식도[1].

양자 광원을 만드는 방법에는 비선형 광학을 이용한 방법, 이온이나 원자를 포획하는 방법 등 다양한 방법이 있다. 반도체 양자점은 양자 광원의 대표적인 플랫폼 중 하나인데, 양자점 내부에 형성된 엑시톤 (exciton)이 3차원적인 속박을 느끼기 때문에 엑시톤이 재결합하면서 방출하는 빛은 두 에너지 준위 사이의 차이에 해당하는 에너지를 갖는 단일 광자이다. 이러한 반도체 양자점은 상대적으로 높은 물리화학적 안정성을 가지고 있고 높은 온도에서도 구동 가능하며, 높은 광자 방출 속도 (repetition rate)를 가지고 있기에 상업적으로 활용되기에 유리하다. 또한 고체 기반이기에 공진기와 결합을 통해 빛과의 상호작용을 높일 수 있고, 이를 통해 양자 메모리 등과 같은 보다 복잡한 시스템을 구현할 수 있다.

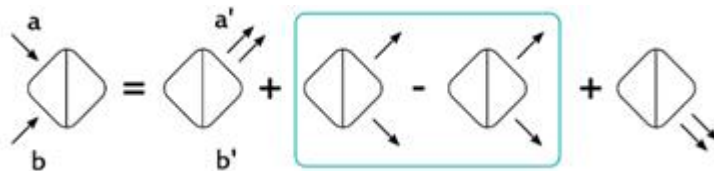


그림 2. 동시에 빔분할기에 도착한 구분 불가능한 빛이 얽힘 광자쌍이 되는 과정 모식도[2].

양자점 내부의 엑시톤이 재결합하면서 방출되는 빛을 이용해서 양자 얽힘을 구현하는 첫 번째 방법은 바로 서로 다른 시점에 방출된 빛을 정확히 일치하는 시점에 빔분할기를 통과하도록 하는 것이다. 만약 동시에 빔분할기에 도착한 빛이 서로 구분이 불가능하다면 두 빛은 얽힘 상태가 되어 같은 방향으로 방출된다[2]. 이때 반도체 양자점으로 부터 서로 다른 시점에 방출된 빛이 서로 구분 불가능하기 위해서는 몇 가지 조건을 만족해야 한다. 먼저, p-펄스로 양자점을 여기하여 엑시톤의 양자 상태를 완벽히 1로 만들어야 한다. 이를 위해 엑시톤의 에너지 준위와 정확히 일치하는 에너지의 펄스 레이저를 이용하는 공명여기 (resonant excitation) 방식이 활용되지만 엑시톤의 재여기 (re-excitation) 때문에 다중방출이 일어남으로 인해 단광자의 순도가 제한되는 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 쌍엑시톤과 이광자 여기 (two-photon excitation) 방식을 활용하여 재여기가 일어나지 않도록 하였으나, 이 경우에는 쌍엑시톤-엑시톤 다단계 재결합과정을 통해 엑시톤의 발광이 일어나는 과정에서 엑시톤 발광 시간의 불확실성 (time jitter)이 발생하여 단광자의 구분 불가능성이 감소하게 되는 문제가 있다. 최근에는 쌍엑시톤과 이광자 여기 방식에 추가적으로 유도 레이저 (stimulated laser)를 활용하여 쌍엑시톤에서 엑시톤으로의 변환을 강제함으로 엑시톤 발광 시간의 불확실성을 낮추는 방법이 개발되었고, 유도 레이저를 활용하여 양자 광원의 구분 불가능성 뿐만 아니라 원하는 편광 방향으로의 방출 또한 제어할 수 있었다[3, 4]. 이 외에도 엑시톤이 재결합하는데 걸리는 시간이 엑시톤의 결맞음 시간보다 작아야 높은 구분 불가능성을 가질 수 있기 때문에 광공진기를 활용하여 엑시톤의 재결합시간을 줄이는 연구 또한 활발히 이루어지고 있다.

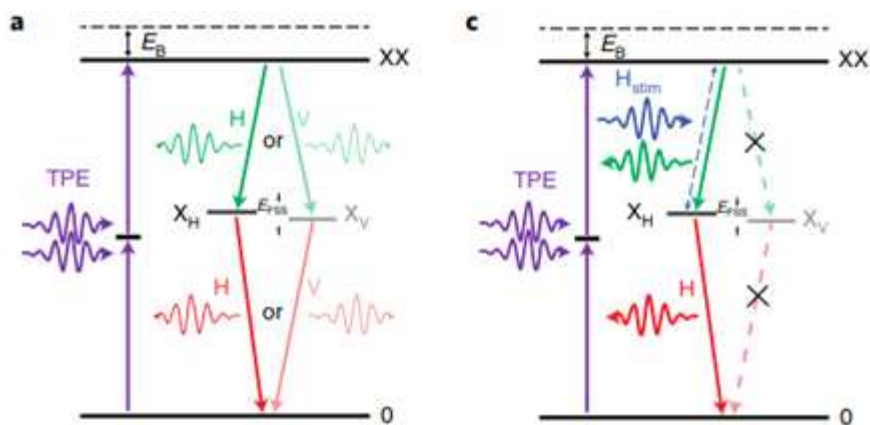


그림 3. 유도 레이저를 이용한 반도체 양자점 양자 광원의 구분 불가능성 향상 방법 모식도[4].

쌍엑시톤-엑시톤 다단계 재결합과정으로부터 편광 얽힘 광자쌍을 형성하는 방법도 양자 얽힘을 구현하는 대표적인 방법이다. 이 방식으로 높은 얽힘 정도를 구현하기 위해서는 양자점의 모양이 좌우로 매우 대칭적이어야 하는데, droplet epitaxy를 통해 형성된 GaAs 양자점을 활용하여 약 350 m 떨어진 두 건물 사이에서 측정한 결과 98.7%의 높은 편광 얽힘 정도를 구현하였다[5]. 또한 엑시톤이 재결합하며 빛을 방출하는 중간에 추가적인 p-펄스 여기를 활용하여 광자 수 기반의 양자 얽힘을 구현하는 방법도 최근에 새로이 개발되었다[6].

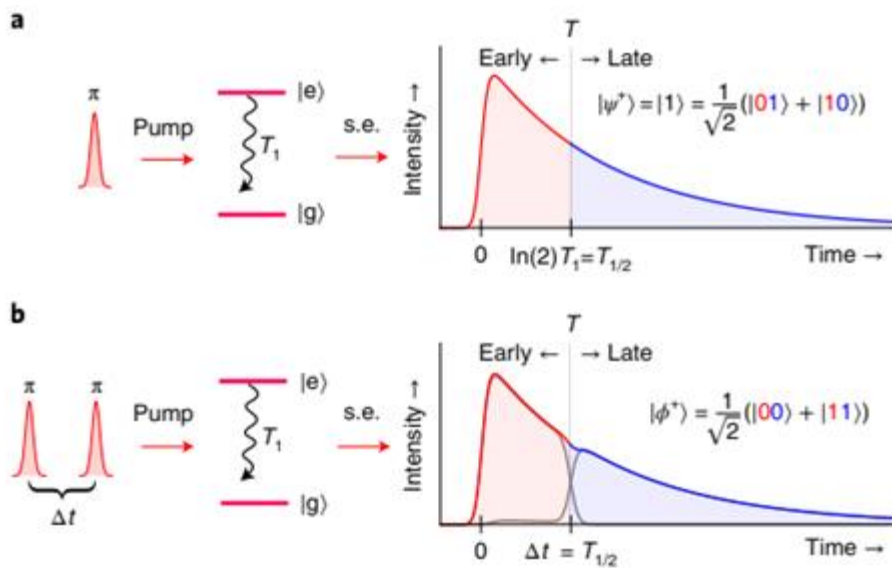


그림 4. 추가적인 p-펄스 여기를 활용하여 광자 수 얽힘 상태를 구현하는 방법 모식도[6].

최근에 양자점에 대한 많은 연구들은 “단일” 양자 광원의 단광자 순도와 구분불가능성과 같은 광특성을 향상시키는 연구 뿐만 아니라 “여러 개의” 양자 광원을 원하는 위치에 형성하고 이들 사이의 결합효율과 양자 네트워크를 향상시키는 방향으로 확장되고 있다. 때문에 다양한 물질 플랫폼 사이의 이종 결합기술과 더불어 처음부터 원하는 위치에 동일한 광특성을 갖는 양자 광원을 형성하고 부족한 부분은 전자기장 등의 다양한 변조 방법을 통해 개선하는 기술들에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다. 많은 수의 양자 광원이 복합적인 양자 얽힘 상태에서 빛을 방출하고 이를 통해 여러 양자 노드들이 결합되어 있는 시스템이 구현되기까지 많은 시간이 걸리지 않을 것으로 기대된다.

참고문헌:

- [1] Chao–Yang Lu and Jian–Wei Pan, Quantum–dot single–photon sources for the quantum internet, *Nat. Nanotechnol.* **16**, 1294–1296 (2021).
- [2] F. Pelayo García de Arquer, Dmitri V. Talapin, Victor I. Klimov, Yasuhiko Arakawa, Manfred Bayer, and Edward H. Sargent, Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges, *Science* **373**, 640 (2021).
- [3] Friedrich Sbresny, Lukas Hanschke, Eva Schöll, William Rauhaus, Bianca Scaparra, Katarina Boos, Eduardo Zubizarreta Casalengua, Hubert Riedl, Elena del Valle, Jonathan J. Finley, Klaus D. Jöns, and Kai Müller, Stimulated generation of indistinguishable single photons from a quantum ladder system, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 093603 (2022).
- [4] Yuming Wei, Shunfa Liu, Xueshi Li, Ying Yu, Xiangbin Su, Shulun Li, Xiangjun Shang, Hanqing Liu, Huiming Hao, Haiqiao Ni, Siyuan Yu, Zhichuan Niu, Jake Iles–Smith, Jin Liu and Xuehua Wang, Tailoring solid–state single–photon sources with stimulated emissions, *Nat. Nanotechnol.* (2022).
- [5] Christian Schimpf, Marcus Reindl, Daniel Huber, Barbara Lehner, Saimon F. Covre Da Silva, Santanu Manna, Michal Vybicka, Philip Walther, and Armando Rastelli, Quantum cryptography with highly entangled photons from semiconductor quantum dots, *Sci. Adv.* **7**, eabe8905 (2021)
- [6] Stephen C. Wein, Juan C. Loredó, Maria Maffei, Paul Hilaire, Abdelmounaim Harouri, Niccolò Somaschi, Aristide Lemaître, Isabelle Sagnes, Loïc Lanco, Olivier Krebs, Alexia Auffèves, Christoph Simon, Pascale Senellart, and Carlos Antón–Solanas, Photon–number entanglement generated by sequential excitation of a two–level atom, *Nat. Photon.* (2022).