

확장 가능한 실리콘 스핀 큐비트, 99% 충실도 달성

(2024.10.24., 양자정보연구지원센터)

- 확장 가능한 실리콘 스핀 큐비트, CMOS 기술을 사용하여 양자 컴퓨팅에서 99% 이상의 충실도 달성
 - 실리콘 스핀 큐비트와 확장 가능성
 - 실리콘 스핀 큐비트는 기존 반도체 제조 기술과의 호환성 덕분에 확장 가능하고 상업적으로 실현 가능한 양자 프로세서로 주목받고 있음
 - 최근 연구에 따르면, 300mm 반도체 웨이퍼에서 실리콘 스핀 큐비트를 제조하여 99% 이상의 충실도를 달성함
 - 이는 기존 학문적 연구에서 실험실 환경에서만 가능했던 고충실도 성능을 산업적 규모에서도 구현할 수 있음을 입증함
 - 반도체 산업의 기여와 양자 컴퓨팅
 - 반도체 산업은 오랜 시간 동안 스마트폰에서 슈퍼컴퓨터에 이르는 다양한 기기들에 적용되는 정밀 공정을 발전시켜 옴
 - 실리콘 스핀 큐비트는 이러한 정밀 공정을 활용할 수 있어 확장 가능성이 높다고 평가됨
 - 다만, 연구실 환경에서 실험된 성능이 실제 산업적 규모에서 유지될 수 있을지에 대한 우려가 있었음
 - 이번 연구는 300mm 웨이퍼스케일 CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor) 공정을 사용하여 양자 컴퓨터에서 필수적인 고충실도와 두 개의 큐비트 게이트를 성공적으로 구현함
 - 이전 연구와 차별점
 - 이전 연구는 Nature Physics에 발표된 두 큐비트 게이트에서 99% 이상의 충실도를 달성한 바 있음
 - 그러나 이번 연구는 더 나아가 확장성 있는 300mm 웨이퍼를 사용하여, 산업적 규모에서도 높은 신뢰성을 유지하며 큐비트를 제

작하는 데 중점을 둠

- 이전에는 소규모 공정에 의존했으나, 이번 연구에서는 대규모 생산으로 전환하는 데 성공함

○ 고충실도 양자 게이트 구현

- 이번 연구에서 300nm CMOS 공정을 사용하여 대량 생산 가능한 스핀 큐비트를 제작, 양자 컴퓨터에서 필요한 99% 이상의 충실도를 유지함
- 이는 실험실에서의 성능을 산업적 환경에서도 유지할 수 있음을 보여줌
- 연구팀은 게이트 세트 토모그래피(GST)를 사용하여 시스템의 오류를 종합적으로 분석함
- 분석 결과, 모든 큐비트 작동에서 99% 이상의 충실도를 달성하였고, 이는 결합 허용 양자 컴퓨팅을 위한 필수 조건임

○ 소음 및 코히런스 문제 해결

- 큐비트 작동에서 발생하는 주요 소음은 충전 소음, 핵 스핀 소음
- 충전 소음(charge noise)은 양자점과 주변 환경의 전기적 상호작용에서 발생하지만, 이번 연구에서는 장치 설계를 통해 충전 소음을 효과적으로 억제함, 주요 오류 원인은 실리콘 기판 내의 29i 동위원소로 인한 핵 스핀 소음(nuclear spin noise)임
- 이는 동위원소 정제를 통해 해결 가능하며, 이는 이미 다른 연구에서도 성공적으로 시연된 바 있음

○ 큐비트 코히런스 시간 및 성능 개선

- 연구에서는 T1 스핀 수명이 6.3초, T2 코히런스 시간이 803 마이크로초로 이전 실리콘 기반 큐비트 시스템보다 성능 개선
- 이는 소음 문제를 해결하고, 큐비트 코히런스 성능을 크게 향상시킴

○ 대량 생산을 위한 산업적 전환

- 연구팀은 이번 연구에서 큐비트 제조를 기존 반도체 제조 공정과 성공적으로 통합함

- 300mm 웨이퍼 공정을 통해 양자점 구조를 설계하고, 단일 전자 트랜지스터로 스핀을 판독하는 구조를 개발함
- 이는 기존의 소규모 연구에서 산업적 규모의 대량 생산으로 전환한 중요한 성과임
- 양자점 구조와 장치 설계
 - 장치는 이중 양자점 구조를 기반으로 하며, 플러저 게이트 전극 아래 형성된 양자점이 전자를 포획하여 마이크로파 신호로 스핀을 제어할 수 있음
 - 이는 신뢰할 수 있는 양자 작동을 가능하게 하는 중요한 요소임
 - 장치 설계는 고온 산화물로 분리된 세 겹의 증착된 폴리실리콘 게이트 스택을 포함하며, 정밀한 스핀 제어를 가능하게 함
- 향후 개선 방향
 - 연구팀은 잔여 핵 스핀 소음을 해결하고 실리콘 기판의 동위원소 순도를 더욱 개선할 필요가 있다고 제안함
 - 이러한 개선은 향후 양자 컴퓨팅에서 필요한 99.9% 이상의 충실도를 달성하는 데 중요한 역할을 할 것으로 보임
- 연구팀은 300mm CMOS 공정을 사용하여 대규모 큐비트 생산이 가능하며, 결합 허용 양자 시스템의 성능 요구를 충족할 수 있는 하드웨어 개발 가능성을 시연함
 - 실리콘 스핀 큐비트의 대량 생산은 향후 양자 컴퓨터가 상업적으로 실현될 가능성을 높이며, 더욱 신뢰할 수 있는 성능을 보장할 수 있는 기반을 마련함

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2024/10/23/scalable-silicon-spin-qubits-achieve-over-99-fidelity-for-quantum-computing-with-cmos-technology/>