

# 스핀 큐비트 양자 프로세서의 잡음 발생 원인 규명

(2026.07.12., 양자정보연구지원센터)

## □ 도쿄대 연구진, 스핀 큐비트 양자 프로세서의 잡음 원 밝혀

- 일본 도쿄 이과대(TUS)와 일본 산업기술종합연구소(AIST) 공동연구진, 실리콘 스핀 큐비트 양자 프로세서의 잡음(Noise) 발생 원인을 규명
  - 연구 결과는 “IEEE Access(2026년 5월)”에 게재.
  - 전하 잡음(Charge Noise)을 유발하는 “2준위 변동체(Two-Level Fluctuators, TLFs)”를 이론 모델과 대규모 통계 시뮬레이션으로 분석해 큐비트 주파수 변동의 원인을 규명
  - 연구진은 반도체 · 산화막 계면의 트랩(Trap) 상태에서 발생하는 전자 전이가 스핀 큐비트 성능 저하의 주요 원인임을 확인
- 스핀 큐비트, 차세대 양자컴퓨터의 유력 후보
  - 스핀 큐비트는 전자의 스핀(Spin) 상태에 양자정보를 저장하는 방식으로 긴 코히런스(Coherence) 시간과 기존 반도체 공정과의 높은 호환성을 갖는 대표적인 양자컴퓨팅 플랫폼
  - 최근 단일 및 2큐비트 게이트 정확도가 양자 오류정정(Surface Code)에 필요한 수준을 넘어섰으나, 실용적인 내결함(Fault-tolerant) 양자컴퓨터 구현을 위해서는 큐비트 주파수 변동 문제 해결이 필수적
- 큐비트 공진주파수 변동이 성능 저하의 핵심 원인
  - 스핀 큐비트는 일정한 라머(Larmor) 주파수를 유지해야 안정적으로 동작하지만, 제어용 마이크로파 신호에서 발생하는 열과 전하 잡음으로 공진주파수( $f_q$ )가 변동
  - 온도가 낮을 때는 주파수가 증가하다가 일정 온도 이상에서는 다시 감소하는 비단조적(Non-monotonic) 특성이 나타나 게이트 정확도를 떨어뜨림

- 기존 연구에서는 일반적인 동작 온도인 20mK보다 높은 200mK에서 오히려 게이트 정확도가 향상되는 현상이 관측됐으나 그 원인은 밝혀지지 않았음

#### ○ 대규모 시뮬레이션으로 잡음 메커니즘 규명

- 연구진은 실리콘/실리콘-게르마늄(Si/SiGe) 양자점 구조를 기반으로 스핀 큐비트 모델을 구축
- 총 108개 조건과 5,000개의 무작위 TLF 구성을 적용한 대규모 통계 시뮬레이션을 수행해 온도 변화에 따른 큐비트 주파수와 게이트 정확도를 분석
- 활성화 에너지가 지수 분포를 따르고 전하 전이 속도가 온도에 크게 의존하는 조건에서 실제 실험 결과와 가장 잘 일치하는 것으로 확인

#### ○ 잡음의 근본 원인은 반도체 계면 트랩 상태

- 연구 결과, 반도체 전도대와 계면 트랩 상태 사이에서 발생하는 “전자 전이(Generation/Recombination)”가 큐비트 주파수 변동의 주요 원인으로 분석
- 기존에 제기됐던 원자 구조의 느린 움직임보다 계면 트랩에 의한 전하 잡음이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타남
- 반도체·산화막 계면의 트랩 상태를 최소화하는 공정 기술이 향후 대규모 실리콘 양자 프로세서의 성능 향상에 핵심이 될 것으로 전망

#### ○ 연구 의의

- 이번 연구는 스핀 큐비트에서 발생하는 잡음의 미시적 발생 메커니즘을 규명해 양자 게이트 성능 개선 방향을 제시
- 향후 저잡음 반도체 공정과 안정적인 큐비트 주파수 제어 기술 개발을 통해 대규모 내결함 실리콘 양자컴퓨터 구현에 기여할 것으로 기대됨

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/06/05/scientists-identify-the-origin-of-noise-in-spin-qubit-quantum-processors/>