

보도일시	배포 즉시
	2025. 1. 21.(화)
문의	연구단장/연구책임자 물리천문학부 김도헌 교수(02-880-6612) / 교신저자
	연구단/연구진 박재민, 장현규 연구원 / 공동 제1저자

■ 제목/부제

제목	실리콘 스핀 큐비트 에너지 잡음의 수동 및 능동 억제
부제	실리콘 스핀 큐비트의 노이즈 제어 기술

■ 요약

연구 필요성	양자컴퓨터는 상태의 중첩, 얽힘, 간섭을 이용하여 고전컴퓨터로 푸는 데에 막대한 시간이 드는 소인수분해와 같은 특정 문제들에 대해 우월성이 있는 것으로 알려져있다. 하지만 외부환경에 매우 민감한 양자계는 작은 상호작용으로도 큰 영향을 받게 되어 양자연산의 정확도를 저하시킨다. 외부에서 유입되는 잡음을 최소화하는 것과 동시에 잡음에 대한 영향을 억제하는 것이 매우 중요하다.
연구성과/기대효과	본 연구를 통해 반도체 양자점 큐비트 소자의 전하센서에서 오는 잡음을 줄이고, 큐비트에 영향을 주는 저주파 잡음을 실시간으로 추정하며 그에 따른 주파수 피드백을 가함으로써 큐비트의 제어 충실도와 정확도를 크게 향상하였다. 해당 결과는 반도체 양자점 기반 큐비트에서 잡음 및 그 영향을 최소화하여 높은 정확도의 양자연산 구현에 활용될 수 있다.
Abstract	Professor Dohun Kim's research team from the Department of Physics and Astronomy at SNU has successfully developed two techniques to suppress noise and its effects, which hinder high-fidelity quantum operations. Using these methods, they achieved a two-fold improvement in inhomogeneous coherence time and a ten-fold improvement in the quality of Rabi oscillations.
	Addressing and mitigating decoherence sources plays an essential role in the development of a scalable quantum computing system, which requires low gate errors to be consistently maintained throughout the circuit execution.

	<p>While nuclear spin-free materials, such as isotopically purified silicon, exhibit intrinsically promising coherence properties for electron spin qubits, the omnipresent charge noise, when converted to magnetic noise under a strong magnetic field gradient, often hinders stable qubit operation within a time frame comparable to the data acquisition time. Here, we demonstrate both open- and closed-loop suppression techniques for the transduced noise in silicon spin qubits, resulting in a more than two-fold (ten-fold) improvement of the inhomogeneous coherence time (Rabi oscillation quality) that leads to a single-qubit gate fidelity of over 99.6% even in the presence of a strong decoherence field gradient. Utilizing gate set tomography, we show that adaptive qubit control also reduces the non-Markovian noise in the system, which validates the stability of the gate fidelity. The technique can be used to learn multiple Hamiltonian parameters and is useful for the intermittent calibration of the circuit parameters with affordable experimental overhead, providing a useful subroutine during the repeated execution of general quantum circuits.</p>
<p>Journal Link</p>	<p>https://www.nature.com/articles/s41467-024-55338-z</p>

■ 본문

<p>□ 문단 1</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 반도체 양자점 기반 스핀 큐비트는 현대 반도체 산업에서 발전된 대규모 공정법을 그대로 사용하여 양자기술로 도약할 수 있는 잠재력이 있어 양자 프로세서를 개발하기 위한 유망한 플랫폼으로 주목받고 있다. 그동안의 재료적인 발전, 특히 핵스핀이 없는 ²⁸Si 동위원소 정제가 가능함에 따라 현재 양자컴퓨터 구현을 주도하는 다른 플랫폼 (초전도, 이온트랩, 원자기반 등) 에 견주어도 손색 없는 고충실도 다중 큐비트 연산이 가능해졌다. 하지만 Fault-tolerant 양자 컴퓨팅을 구현하기 위해서는 오랜 시간동안 일관된 높은 충실도의 제어가 필수적이다. 이를 위해 큐비트 매개변수를 정밀하게 제어하는 능력과 큐비트 시스템에 영향을 미치는 잡음의 원인을 이해하고 그것을 완화하는 전략이 필요하다. ○ 실시간 적응 제어(Real-time adaptive control)는 잡음을 능동적으로 억제하여 큐비트 제어를 정밀하게 할 수 있는 도구로 다양한 플랫폼에서 실험적으로 검증되었다. 실리콘 양자점 플랫폼에서는 스핀 큐비트와 환경 간의 불필요한 상호작용을 완화하기 위해 시스템 매개변수의 느린 변화를 자동으로 교정한 연구결과가 있다. <p>□ 문단 2</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 큐비트 제어를 위해 형성한 큰 자기장 구배 하에 실리콘 양자점 스핀 큐비트는 전하 노이즈가 자기 노이즈로 바뀌어 부정적인 영향을 받게 된다. 큐비트 구동과 측정시간에 비해 비교적 느린 주파수로 요동하는 노이즈는 베이스 추론을 이용한 해밀토니안 매개변수 추정법을 통해 실시간으로 측정가능하다는 이론적인 제안이 있어왔지만 아직까지 실리콘 스핀 큐비트에서 실험적으로 이를 검
--

증하는 것은 낮은 측정 충실도 등의 문제로 제약이 있어왔다.

○ 본 연구진은 정제된 28-실리콘 스핀 큐비트 소자에서 실시간으로 잡음을 억제하는 방법을 구현하였다. 주요한 잡음은 큐비트 제어를 위한 자성체 구조물로 인해 전하 잡음이 자기 잡음으로 변환된 것이다. 큐비트 근처의 센서닷으로부터 발생하는 잡음을 열린 루프 제어로, 남아있는 노이즈는 하드웨어 기반의 베이스 추론 및 주파수 피드백 회로를 통해 닫힌 루프 제어로 억제하였다. 이 방법을 적용하여 강한 자기장 구배와 상당한 전하 노이즈가 존재하는 환경에서도 단일 큐비트 게이트의 충실도를 99.6% 이상으로 향상시켰다.

□ 연구결과

Passive and active suppression of transduced noise in silicon spin qubits

Jaemin Park, Hyeongyu Jang, Hanseo Sohn, Jonginn Yun, Younguk Song, Byungwoo Kang, Lucas E. A. Stehouwer, Davide Degli Esposti, Giordano Scappucci, and Dohun Kim*
(Nature Communications 16, 78 (2025))

양자 컴퓨터는 과학 전 분야에 걸쳐 고전 컴퓨터로 해결하기 어려운 특정 문제를 단시간내에 효율적으로 풀 수 있어, 구글의 Sycamore 프로세서 & Willow chip (2019년도, 2024년도 공개), 중국의 Jiuzhang 광양자 컴퓨터(2020년도 공개) 등이 고전 컴퓨터를 뛰어넘는 양자 우월성을 보여왔다. 하지만 아직까지 양자 컴퓨터의 높은 에러율을 줄이기 위한 완벽한 에러 교정법은 구현되지 않았고 대표적인 양자오류정정 외에 양자 오류 완화법, 큐비트의 요동을 실시간으로 추적하여 고속 피드백 제어하는 방법 등이 제시되었다.

본 연구에서는 물리적인 큐비트들을 사용해 에러를 줄이는 양자오류정정 방식과는 다른 물리적인 실리콘 웨이퍼 기반 반도체 스핀 큐비트에서 발생하는 전하 노이즈 문제를 해결하기 위한 수동 및 능동적인 억제 방식을 제안했다. 이 기술은 전하 노이즈가 자기 노이즈로 변환되는 과정을 분석하고, 이를 최소화하는 고속 피드백 제어 전략을 통해 큐비트의 에러율을 감소시켰다. 연구결과, 큐비트의 비동질적 결맞음 시간(inhomogeneous coherence time, T_2^*)이 두 배 이상 향상되었으며, 큐비트의 양자 게이트 충실도는 99.6% 이상을 (억제 방식을 적용하기 전 98% 수준) 기록했다. 특히, 능동적 억제 방식은 반복적인 양자 연산에서 발생할 수 있는 시스템 불안정을 효율적으로 억제함으로써 물리적인 큐비트의 안정적인 양자 연산을 가능하게 했다. 이러한 하드웨어 단계에서의 잡음 억제를 통한 기술적 진보는 대규모 양자 시스템 구현에 중요한 토대를 제공하며, 양자 알고리즘의 신뢰성과 정확성을 동시에 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

□ 용어설명

보존 샘플링 문제 : 광자와 같은 보손 입자가 양자 간섭을 통해 생성하는 확률 분포를 계산하

는 문제

큐비트(Qubit) : Quantum + Bit 의 줄임말로 양자 상태를 기반으로 정보를 저장하고 처리하며, 중첩(superposition)과 얽힘(entanglement)을 통해 고전 비트보다 더 많은 정보를 표현할 수 있는 양자 컴퓨팅의 기본 단위, 또는 양자 게이트 연산 정보의 최소 단위

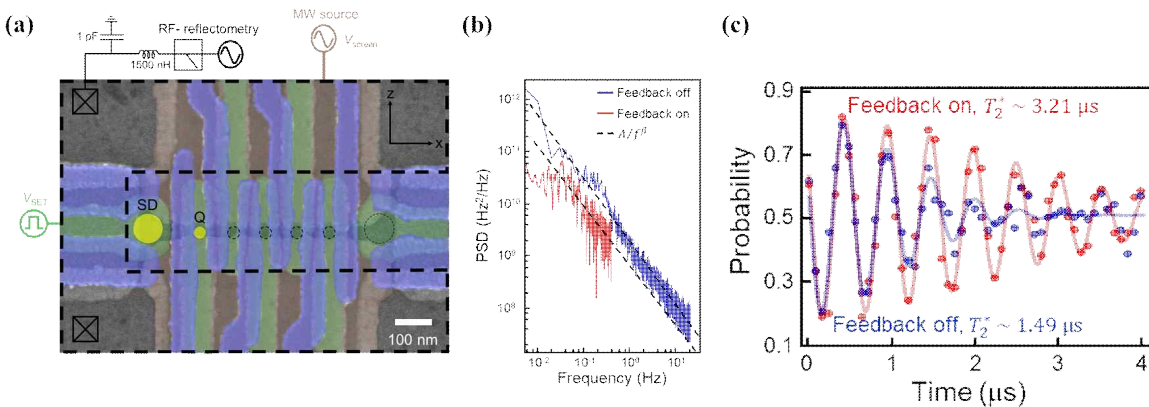
양자 게이트 : 큐비트의 양자 상태를 특정 연산에 따라 변환하는 기본적인 연산으로, 중첩과 얽힘을 활용하여 양자 컴퓨터의 계산을 수행

양자오류정정 : 오류가 있는 물리 비트 여러 개를 모아 오류를 줄인 로직 비트를 만들어서 현재의 고전컴퓨터에 준하는 안정성을 구현하는 방법

비동질적 결맞음 시간 : 양자 상태가 외부 잡음과의 상호작용 및 시스템 내 랜덤한 변동에 의해 상실되기 전까지 유지되는 시간을 나타내는 척도

양자 알고리즘 : 양자 컴퓨터에서 고전적인 알고리즘보다 더 효율적으로 문제를 해결하기 위해 양자 중첩, 얽힘, 간섭 등의 특성을 활용하는 알고리즘

□ 그림설명



(a) 실리콘 큐비트 나노소자 (b) 고속 피드백을 통한 저주파 노이즈 감소 (c) 피드백 전-후 결맞음 시간 변화

□ 연구자

- 성 명 : 김도헌
- 소 속 : 반도체 양자프로세서 연구단 단장
서울대학교 물리천문학부 교수
- 연락처 : 02-880-6612, dohunkim@snu.ac.kr

- 성 명 : 박재민
- 소 속 : 서울대학교 물리천문학부 박사과정생
- 연락처 : jaeminpark@snu.ac.kr

- 성 명 : 장현규

○ 소 속 : 서울대학교 물리천문학부 박사과정생

○ 연락처 : jhg94520@snu.ac.kr