고체 기반 큐비트

DOI: 10.3938/PhiT.27.043

이동헌·강세종·최만수

Solid-State-Based Qubits

Donghun LEE, Se-Jong KAHNG and Mahn-Soo CHOI

Recent research trends and prospects of solid-state-based qubits are briefly described. Ion traps, atom traps, superconducting devices, semiconductor quantum dots, quantum-defect-based qubits, and topological qubits have been proposed and studied intensively as candidates for the architecture of quantum computing by many different groups worldwide. Although an architecture based on superconducting circuits is presently leading the development, quantum-defect-based qubits are widely regarded as promising because of their coherence time which is sufficiently long, and their high tunability.

2017년 미국 IBM사는 50 큐비트 양자컴퓨터를 발표했다.^[1] 5 큐비트로 시작한 상용 양자컴퓨터를 채 1년도 지나지 않아 50 큐비트로 용량을 늘린 것이다. IBM뿐만 아니라 인텔도 최근 49 큐비트 양자컴퓨터를 개발했고 구글은 72 큐비트 양자컴퓨터를 보유 중인 것으로 알려졌다.^[2,3] 이들이 제시하고 있는 50개 수준의 큐비트는 상징성이 크다. 기존 컴퓨터의 한계를 넘는 실용적인 양자

저자약력

이동헌 교수는 미국 오하이오주립대에서 2010년 박사학위를 받은 후 미국 예일대 박사후연구원, UCSB 수석연구원을 거쳐 2016년 3월부터 고려대학교 물리학과에 조교수로 재직 중이다. 다이아몬드 NV 센터, 광역학계(cavity optomechanics), 주사탐침현미경(scanning probe microscopy) 등 양자 광학, 응집물리 분야 실험 전문가이고 다이아몬드 NV 센터를 이용한 양자센싱/이미징, 양자계측 연구를 진행하고 있다.(donghun@korea.ac.kr)

강세종 교수는 서울대 물리학과 박사(1998)로 일리노이주립대에서 박사후 연구원(2000)을 하고 송실대(2001) 물리학과에서 조교수로 있다가 2002년부터 지금까지 고려대 물리학과 교수로 재직 중이다. 저온 scanning tunneling microscope를 이용하여 자성분자, 그래핀, 위상물질 등 표면 나노계의 원자구조 및 전자구조를 측정하고 이를 원자수준에서 제어하는 연구를 수행하고 있다.(sjkahng@korea.ac.kr)

최만수 교수는 포항공과대학교 이학박사(1998)로서, 스위스 바젤대학 연구원, 고등과학원(KIAS) 연구원을 거쳐, 2002년부터 고려대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 나노 소자의 양자수송 이론 및 양자점과 초전도 기반 양자컴퓨터 이론을 연구해 왔으며, 고체 기반 큐비트 연구실을 이끌고 있다.(choims@korea.ac.kr)

컴퓨터의 용량(computational capacity), 즉, 양자컴퓨터를 기존 컴퓨터와 근본적으로 차별화하는 용량이 이 부근이기 때문이다.

노벨물리학상 수상자 파인만(R. Feynman)이 1982년 처음 제안한 양자컴퓨터(quantum computer)는 1994년 쇼어(P. Shor)의 양자 인수분해 알고리즘의 등장으로 무한한 잠재력이 입증되면서 과학계뿐만 아니라 일반 대중의 큰 관심을 끌었다.^[4-6] 이로써 1990년대 말 양자정보과학(quantum information science)을 탄생시켰으며 양자역학의 새로운 응용 가능성을 구체적으로 제시한 사례가 되었다. 이미 IBM 등 기업들이 나섰으니 양자컴퓨터 상용화는 더 이상 먼 미래의 이야기가 아니다.

큐 비트

기존의 컴퓨터는 0 혹은 1을 값으로 갖는 비트를 메모리와 연산의 기본 단위로 사용한다. 반면 양자컴퓨터는 2개의 논리 상태의 중첩으로 이루어진 양자상태, 즉 $C_1 |0\rangle + C_2 |1\rangle$ 을 메모리와 연산의 기본 단위로 사용하고 이를 큐비트(qubit=quantum bit)이라 부른다[그림 1 참조]. 이때 계수 C_1 과 C_2 는 복소수이며 그 제곱의 합이 1이다. 만일 2개의 큐비트가 있다면, $(C_1 |0\rangle + C_2 |1\rangle) \otimes (C_3 |3\rangle + C_4 |4\rangle)$ 등의 조합이 가능하고, 큐비트가 50개라면 최대 2^{50} (약 1000조)개의 항으로 이루어진 복잡한 중첩상태를 가질 수 있다. 이와 같이 큐비트가 기존 비트와 다른 점은 한 개의 큐비트로 무한히 많은 중첩상태를 표현할

REFERENCES

- [1] Will Knight (2017-11-10). "IBM Raises the Bar with a 50-Qubit Quantum Computer", MIT Technology Review. Retrieved 2017-12-13.
- [2] Jeremy Hsu (January 9, 2018). "CES 2018: Intel's 49-Qubit Chip Shoots for Quantum Supremacy", Institute of Electrical and Electronics Engineers. Retrieved July 5, 2018.
- [3] Susan Curtis (2018-03-06). "Google aims for quantum supremacy", PhysicsWorld. Retrieved 2018-09-12.
- [4] Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (2nd ed.) (Cambridge: Cambridge University Press, 2010), ISBN 978-1-107-00217-3.
- [5] Neil Gershenfeld and Isaac L. Chuang (June 1998). "Quantum Computing with Molecules" (PDF). Scientific American.
- [6] Artur Ekert and Richard Josza, "Quantum computation and Shor's factoring algorithm", Rev. Mod. Phys. **68**, 733 (1996). doi:10.1103/RevModPhys.68.733.

Fig. 1. The Bloch sphere representations of the quantum states $|0\rangle$, $|1\rangle$, and $C_1|0\rangle + C_2|1\rangle$.

수 있다는 점과 큐비트의 연산은 기존 이진법 연산이 아니라 중첩 상태를 보존하는 유니터리 행렬 연산이라는 점인데, 이로 인해 기존 컴퓨터보다 지수적으로 빠른 양자 정보처리가 가능하다.

그동안 여러 종류의 물리계에서 큐비트 구현이 실험적으로 시도되었다. 이온트랩(ion trap), 원자트랩, 초전도소자, 반도체 양자점, 양자결합, 위상 큐비트 등이 그 예이다.^[7] 이들 중 이온트랩과 원자트랩을 제외한 것들은 모두 고체물질의 특성을 이용하고 있어서 고체기반 큐비트로 분류할 수 있다. 또한 원거리 양자통신 및 양자암호 기술 등에 유리한 광자 기반 양자컴퓨터 연구도 진행되고 있다. 이온트랩은 이온화된 원자에서 주로 최외각 전자의 에너지를 양자상태로 사용하며, 이온간 쿨롱 상호작용에 따른 양자화된 진동모드(즉, 포논)와 이온 내 전자상태의 결합을 이용하여 양자상태를 제어한다. 포획한 (중성) 원자의 특정 에너지 상태를 이용하는 원자트랩 양자컴퓨터에서는 광학격자(optical lattice)를 이용하여 원자 간 상호작용을 선택적으로 제어하여 양자정보를 처리한다. 이온과 원자트랩의 장점은 양자상태의 안정성이 높다는 것인데, 이것은 역설적으로 양자상태 제어에 걸리는 시간이 길어 양자 결맞음 시간 내 가능한 정보처리 횟수는 오히려 상대적으로 낮아질 수 있을 뿐만 아니라, 큐비트 개수가 늘어남에 따라 레이저 등 외부 제어장치가 급격히 복잡해지는 현실적 어려움이 있다.

고체기반 큐비트

큐비트 구현이 여러 방향으로 시도되고 있기는 하지만 상용화

가 가능한 “대용량(scalable)” 양자컴퓨터는 궁극적으로 고체 기반일 가능성이 높다. 그동안의 컴퓨터 시스템이 대부분 고체를 기반으로 만들어져 대용량에 필요한 집적기술이 잘 쌓여 있는 점은 차지하더라도, 특히, IBM, 인텔, 구글이 개발한 양자컴퓨터가 모두 초전도 큐비트를 사용하고 있으며, 양자 최적화 기계라 할 수 있는 D-Wave 컴퓨터 역시 초전도 큐비트로 구성되어 있다는 점은 시사하는 바가 크다.

이들 기업들이 초전도 큐비트를 공통적으로 사용하는 이유는 현재 기술적으로 대용량 가능성이 앞서 있기 때문이다. 게다가 각 큐비트의 크기가 비교적 커서(수백 나노미터에서 수 마이크로미터) 제작공정이 상대적으로 쉽고, 외부 전자회로와의 연결이 자연스러워 제어성이 뛰어나다는 장점이 있다. 현 상태에서는 그렇지만 언제 이보다 더 좋은 성능을 제공하는 큐비트가 다른 방법으로 구현될지는 두고 볼 일이다. 특히, 대용량 양자컴퓨터에 가장 적합한 고체 기반 큐비트가 어떤 방식, 형태인지는 앞으로 더 깊은 연구가 필요하다[표 1 참조].

그 이유의 하나로 다음과 같은 점을 들 수 있다. 일반적으로 양자 결맞음 유지와 제어 가능성은 서로 배타적이다. 그러니까 결맞음을 오래 유지할 수 있다면 제어하기가 어렵고, 제어하기가 수월하면 결맞음을 오래 유지할 수 없다. 양자 결맞음을 오래 유지하기 위해서는 외부의 영향이 적어야 하는데, 그 만큼 외부 제어장치와 결합도 어려워지기 때문이다. 충분히 길게 결맞음을 유지할 수 있으면서 제어 가능성도 높은 큐비트에 대해 아이디어가 필요하며 누군가 이에 대해 돌파구를 마련할 것이라 본다.

양자결합 큐비트

양자결합 혹은 양자불순물 주변에 국소화된(localized) 에너지 준위는 스핀 1 혹은 1/2 값을 갖고 있으며 빛을 사용하여 전자 상태를 제어하기에 적합하다.^[8] 이를 고체결합 기반 스핀 큐비트이라 부르는데 그 대표적인 것이 다이아몬드나 실리카 내의 색 결함(color center)이다[그림 2 참조].

고체 결정 내 특정 양자결함(quantum defects)이나 양자불순물(quantum donors)의 에너지 준위는 양자 특성이 뛰어나 양자 결맞음 시간이 격리된(isolated) 원자와 비슷한 수준(수 밀리초 이상)으로 매우 길다. 그럼에도 초전도 회로(superconducting circuits) 혹은 양자점(quantum dot) 등과 같은 소위 인공원자

REFERENCES

- [7] Quantum Information Science and Technology Roadmap: https://qist.lanl.gov/qcomp_map.shtml.
- [8] M. Atature, D. Englund, N. Vamivakas, S.-Y. Lee and J. Wrachtrup, “Material platforms for spin-based photonic quantum technologies”, Nature Reviews Materials 3, 38 (2018).

Table 1. Characteristics of three types of solid-state qubits.

유형	주요 특징
초전도 큐비트	<ul style="list-style-type: none"> - 수 마이크로미터 크기의 초전도 회로의 거시 양자상태 이용 - 전하 큐비트, 자속 큐비트, 위상 큐비트, 트랜스몬(transmon) 큐비트 등 - 현재 트랜스몬 큐비트가 가장 널리 사용됨
반도체 양자점 큐비트	<ul style="list-style-type: none"> - 수백 나노미터 크기의 양자점에 갇힌 전자의 스핀 이용 - 고체 내 핵스핀을 양자상태 메모리로 이용할 때 큐비트와 메모리 사이의 양자상태 전환에 유리
양자결함 큐비트	<ul style="list-style-type: none"> - 고체 결정 내 양자결함(quantum defect)이나 양자불순물(quantum donor)의 전자 구조 및 스핀 특성 이용 - 원자 기반 큐비트의 양자 결맞음 특성을 보임 - 인공원자 수준의 제어 가능성을 보임 - 반도체 공정을 이용한 집적도 향상에 유리

Fig. 2. The structure of diamond nitrogen-vacancy color center and its quantized energy levels.

(artificial atom)에 육박하는 제어 가능성(controllability)을 보여 준다(예를 들면, 수 나노초 이하의 빠른 제어, 나노공정을 통한 집적화, 대용량 등등). 따라서, 양자결함(quantum defects)이나 양자불순물(quantum donors) 기반 스핀 큐비트는 진짜 원자의 양자 결맞음 유지성과 인공원자의 제어 가능성을 모두 갖는다.

양자결함 큐비트는 호스트 물질이 고체 결정을 이루고 있어서 집적도를 크게 향상시킬 수 있는데, 이것은 양자오류정정코드 등을 감안한 대용량 논리 큐비트를 구현하는데 중요한 장점이 될 수 있다. 뿐만 아니라 광 공진기(cavity photons), 마이크로파 회로(microwave circuits), 나노진동소자(acoustic devices) 등 다양한 양자소자들과 결합할 수 있기 때문에 하이브리드 양자소자(quantum hybrid device)로 사용될 수 있어 전망이 밝다.

전 망

IBM사의 50 큐비트 양자컴퓨터 제작으로 마치 양자컴퓨터는 이미 상용화되었으며 이제 공학적 문제만 남은 것처럼 들릴 수

있는데, 현실은 그렇지 않다. 아직은 큐비트 연산의 신뢰도(fidelity)가 대략 95% 수준으로 그리 높지 않다. 정말 쓸 만한 양자컴퓨터에 요구되는 신뢰도는 99.999999% 이상이어야 아직 갈 길이 멀다. 낮은 신뢰도를 해소하는 방법으로 양자오류정정(quantum error correction)에 대한 시도가 진행되고 있는데, 이 또한 간단치 않다. 큐비트 1개에 대한 오류정정을 수행하려면 각 연산의 신뢰도에 따라 적게는 5개에서 많게는 약 수십 개의 큐비트가 추가로 필요하다. 결국 현재의 50 큐비트는 실제적으로는 몇 개의 논리적 큐비트에 불과한 것이다. 이렇듯 현실성 있는 양자컴퓨터의 실현을 위해서는 아직 해결해야 할 원리적, 물리학적 문제들이 많이 남아 있다.

양자컴퓨터 개발은 최근 큰 발전에도 불구하고 아직 기술적인 면은 물론이고 원리적, 물리학적 도전성이 매우 큰 부분이다. 이에 미국은 물론, 유럽, 일본, 특히 최근 중국에서 천문학적인 연구비와 인력을 투입하여 양자컴퓨터 개발에 박차를 가하고 있다.^[9] 우리도 이들과 견줄만한 연구가 필요하다. 그런데 여러 가지 이유로 인해 국내의 수준이 10년 이상 뒤떨어져 있는 것도 현실이니 이에 대한 고려도 해야겠다. 이를 제대로 극복하려면 대형 장기 집중 연구와 함께, 중소 규모, 중장기 연구, 개인연구를 통해 양자정보과학에 필요한 연구 인력과 역량을 늘리고 최적의 연구 환경을 확충하는 것이 무엇보다 시급하다.

인류 전체 관점에서 볼 때 큐비트 연구의 미래는 아주 밝다. 그 중 우리가 얼마나 갖게 될지는 지금부터 우리하기에 달려 있다.

REFERENCES

- [9] Quantum Manifesto for Quantum Technologies: <http://quope.eu/manifesto>.