



※ 본 연구동향은 양자정보연구지원센터 뉴스레터의 내용입니다.

## 초전도 큐비트 기반 양자소자 연구동향

[작성: 성균관대 여환섭 박사]

최근 중첩상태 및 양자얽힘과 같은 양자적 특성을 이용하여 특수목적의 연산을 수행할 수 있는 범용 양자컴퓨터 개발에 대해 전 세계적으로 많은 투자와 연구가 진행되고 있습니다. 올해에는 범용 게이트를 제어하여 연산을 수행하는 ‘범용 양자컴퓨터’ 개발 측면에서 초전도 큐비트 기반 양자컴퓨터 분야에서 큰 이슈가 있었습니다. Google에서는 올해 7월 달에 50-큐비트 급 초전도 양자 프로세서인 ‘시카모어(Sycamore)’를 통해 논리 큐비트를 구성하여 양자오류정정(Quantum error correction)이 가능하다는 것을 발표[1]하였으며, IBM은 올해 11월에 127-큐비트를 가진 ‘이글(Eagle)’을 발표[2]함으로써 초전도 큐비트 기반 범용 양자컴퓨터 시스템이 큐비트 수를 확장해 나아갈 수 있다는 가능성을 보여주었습니다.

초전도 큐비트의 수를 확장한다는 뜻은 단순히 소자 내 큐비트의 수가 늘어난다는 의미를 넘어서 초전도 큐비트와 신호를 주고받는 주변 환경의 확장이기도 합니다. 초전도 큐비트는 양자 상태를 유지하기 위하여 절대 영도에 (0 켈빈,  $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 가까운 0.01 켈빈 정도의 온도를 유지 시켜주는 극저온 냉동기를 사용하며, 양자상태 제어 및 측정을 수행하기 위해서 수 기가헤르츠(GHz) 대역의 고주파수를 사용하게 됩니다. 큐비트 수 확장의 관점에서 다시 말하자면, 초전도 큐비트들에 할당되는 다수의 고유주파수가 존재하며, 이는 다수의 고주파 계측 장비를 필요로 할 뿐만 아니라 할당된 고주파 사이에 간섭현상 없이 신호를 오롯이 전달하고 측정할 수 있어야 합니다. 이와 동시에 큐비트의 양자상태는 주변 전자기파의 요동에 취약하기 때문에 원하는 고주파 신호는 전달하되 외부잡음은 차단할 수 있어야 합니다. 결과적으로 초전도 큐비트 기반 양자컴퓨터의 큐비트 수를 확장하기 위해서는 1) 높은 집적도로 큐비트를 제작할 수 있는 아키텍처 연구부터 2) 극저온에 놓인 큐비트 소자와 상온의 계측 장비들을 잡음 없이 연결할 수 있는 패키지 연구까지 같은 중요도로 연구가 수행되어야 합니다.

최근 초전도 큐비트 기반 양자 소자는 상기 이슈들을 해결하기 위하여 다양한 연구들이 수행되고 있습니다.

2차원 박막증착기법으로 제작되는 초전도 큐비트는 수가 늘어날수록 2차원 평면 내 복잡성은 증가하고 접근성은 제한됩니다. 보편적인 2차원 평면의 초전도 큐비트 소자에 적용 가능하며 24개의 독립적인 신호를 주고받을 수 있도록 인쇄회로기판(Printed circuit board, PCB)을 설계하고 큐비트 특성에 미치는 영향이 보고되었으며, 인쇄회로기판의 최적화를 통해 고주파 신호 사이의 간섭을 최소화함으로써 큐비트 특성 저하가 없음을 실험적으로 확인하였습니다.[3] 다른 방식으로는 소자 내 역할에 따라 층을 분리하고 3차원 통합 기술이 연구되었습니다. 층 간 신호를 주고받기 위해서 기판에 구멍을 뚫고 초전도 금속을 활용해 전극을 만드는 실리콘관통전극(Through-silicon via, TSV) 기술을 적용하여 각 층 사이의 신호 접근성을 확보한 연구들이 수행되었습니다.[2,4]

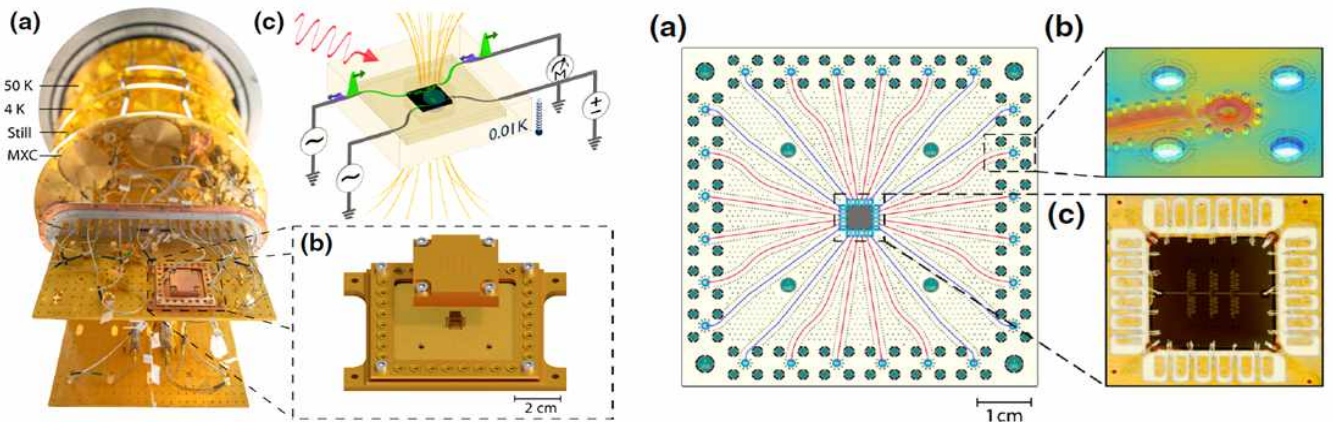


그림 2 (좌) 극저온냉동기에 장착된 초전도 큐비트 소자 사진 및 모식도, (우) 큐비트 칩에 통합 가능한 24개의 도선을 갖는 인쇄회로기판 모식도 및 큐비트와 연결된 사진[3]

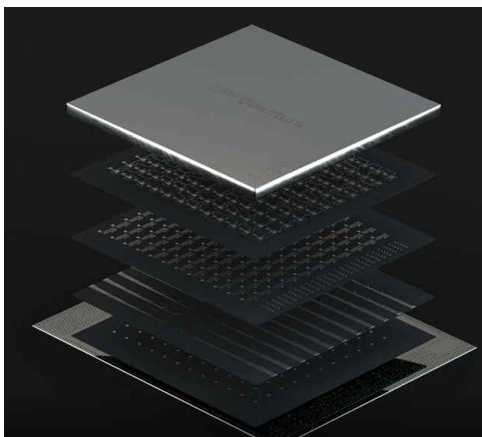


그림 3 IBM 사의 127 큐비트 Eagle 소자의 모식도[2]

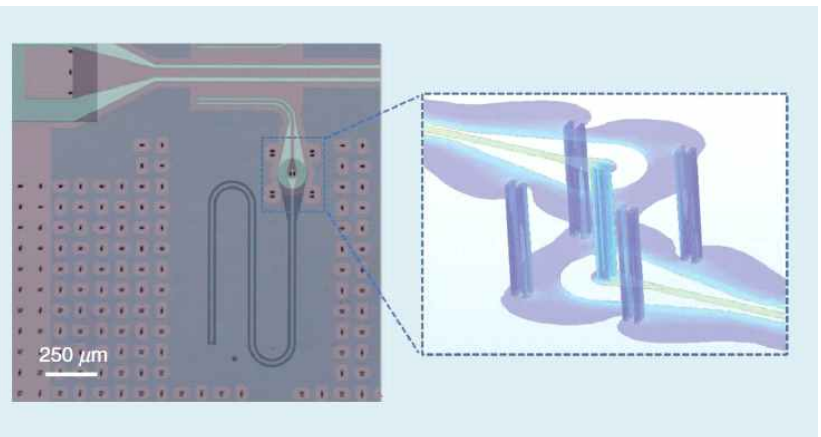


그림 4 실리콘관통전극 (Through-silicon via, TSV) 이 적용된 초전도 소자 회로의 예시 및 전류 흐름 시뮬레이션 결과[4]

초전도 큐비트 기반의 양자컴퓨터 개발은 다양한 분야의 지식이 접목되어있기 때문에 앞으로의 연구는 큰 규모로 진행될 것으로 예상됩니다. 동작 원리는 기본적으로 양자역학 및 공진기 양자 전기동역학(cavity quantum electrodynamics)과 같은 물리학적 지식을 바탕으로 하지만 실제화하는 과정에서 전기전자공학적인 요소들을 많이 사용하고 있습니다.

또한 초전도 큐비트의 핵심인 초전도/부도체/초전도 형태의 조셉슨접합과 같은 나노 구조를 형성할 수 있는 패터닝 기술 및 박막증착과 관련하여 고난이도 소자공정기술을 사용합니다. 그리고 현재 초전도 기반 큐비트 시스템은 고도로 발달된 소자공정기술을 발판삼아 빠르게 확장해 나가고 있습니다. IBM의 경우 양자컴퓨터 개발 로드맵에서 2023년도까지 1000 큐비트급 시스템을 개발을 목표[5]하고 있으며, Google의 경우 큐비트 수 확장 및 오류보정된 논리 큐비트의 수를 늘려가는 것을 목표[6]로 하고 있습니다. 따라서 양자프로세서의 확장성 관련된 연구는 당분간 지속적으로 관심받을 것으로 보입니다.

#### 참고 문헌:

- [1] Google Quantum AI. Exponential suppression of bit or phase errors with cyclic error correction. Nature 595, 383–387 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03588-y>
- [2] <https://research.ibm.com/blog/127-qubit-quantum-processor-eagle>
- [3] Huang, Sihao, et al. Microwave package design for superconducting quantum processors. PRX Quantum 2.2 (2021): 020306.
- [4] Rosenberg, Danna, et al. Solid-state qubits: 3D integration and packaging. IEEE Microwave Magazine 21.8 (2020): 72–85.
- [5] <https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap>
- [6] <https://quantumai.google/learn/map>

\* [참고자료] 범용 양자컴퓨터 용어 정의 및 기술동향 국내 자료 (2019년도 기준) : 임승혁, 범용양자컴퓨터, 한국과학기술기획평가원(KISTEP) 기술동향브리프 (2019-19호)

▶ [참고자료] 다운로드 바로가기 링크:

[https://www.kistep.re.kr/board.es?mid=a10306010000&bid=0031&act=view&list\\_no=34979](https://www.kistep.re.kr/board.es?mid=a10306010000&bid=0031&act=view&list_no=34979)

