

확장형 양자컴퓨터를 위한 초전도 큐비트 연구 동향

여환섭
성균관대학교

1. 서론

현재 양자적 특성을 활용한 양자컴퓨팅이 각광받고 있다. 특히 고전적인 컴퓨터로 계산하기 힘든 문제들을 양자컴퓨터의 양자적 중첩상태, 얽힘 상태 및 양자상태의 주기성 등을 통해 수월하게 계산할 수 있다. 고전컴퓨터는 0과 1로 이진수 데이터로 표현하지만 양자컴퓨터는 0과 1의 중첩상태를 표현가능한 양자비트(큐비트, Qubit)를 사용한다. 그리고 양자얽힘현상을 사용하여 데이터의 차원을 늘리고 최종적으로 양자상태를 결맞음 제어함으로써 양자연산을 수행하여 결과값을 얻게 된다.

2000년대 초 양자컴퓨터가 보유해야할 조건으로 Di Vincenzo criteria가 제안되었다. 기준에 따르면 큐비트는 확장가능성, 상태 초기화, 긴 결맞음 시간, universal gate의 존재, 그리고 양자상태 측정을 할 수 있어야 한다. 양자컴퓨터를 구현하기 위해 다양한 물리적 요소들이 큐비트의 후보로써 연구되고 있으며, 특히 초전도 물질을 활용한 큐비트가 하나의 핵심 후보로써 활발히 연구되고 있다. 이 글에서는 초전도체 기반 큐비트에 대한 기초적인 설명과 성능발전 과정, 그리고 연구현황 및 분야 전망에 관하여 간단하게 기술하고자 한다.

2. 초전도 큐비트 개요

큐비트는 기본적으로 0과 1에 해당하는 양자상태를 정의할 수 있어야 한다. 그리고 2이상의 양자상태의 영향이 작아 0과 1로 이루어진 이-준위 시스템(two-level system)을 형성하는 것이 이상적이다.

초전도 시스템에서 큐비트의 에너지구조를 형성하는 방식은 그림 1과 같다. 전기 회로에서 유도자(Inductor, 인덕터)와 축전기(Capacitor, 축전기)를 이용하여 LC 조화진

동자를 만들 수 있다. 조화진동자의 에너지준위는 공진주파수 ω 간격만큼 등 간격으로 구성된다. 에너지 간격이 같기 때문에 기저준위(0 상태)에서 첫 번째 들뜬 상태(1 상태)로 전자기파를 이용해 전이(0→1)하게 되면 두 번째 이상 들뜬 상태(1→2, 2→3)로 전이할 확률이 항상 존재하므로 큐비트로써 정의될 수 없다. 초전도 큐비트는 0과 1상태가 고립되도록 일반적인 유도자 대신 초전도체/부도체/초전도체 구조의 조셉슨 접합(Josephson junction)을 사용한다. 초전도체 사이에 얇은 부도체를 넣게 되면 부도체가 에너지장벽 역할을 함과 동시에 양자터널링과 함께 조셉슨 효과가 일어난다. 이때 조셉슨 접합의 비선형 유도자로 반영되어 조화진동자의 에너지가 변형된다. 그림 1b와 같이 초전도 큐비트의 에너지 간격이 0-1전이($\hbar\omega_{01}$)와 1-2전이($\hbar\omega_{12}$)가 달라짐으로써 더 높은 상태로 전이 확률이 낮아진다. 따라서 초전도체를 기반으로 이-준위 시스템을 형성하여 큐비트를 형성할 수 있게 된다.

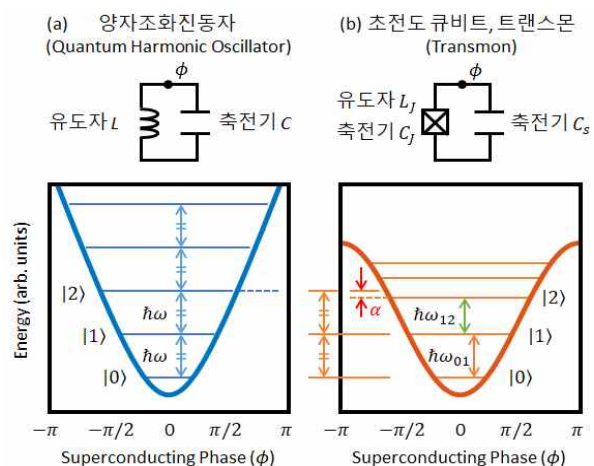


그림 1 (a) 양자조화진동자와 (b)초전도 큐비트(트랜스몬)의 에너지구조 비교. ω_{01} (ω_{12}): 0-1 (1-2) 에너지 준위 차이에 해당하는 공진주파수. α : 양자조화진동자와 에너지 부조화성(Anharmonicity). $\alpha=2\omega_{01}-\omega_{12}$ 로 정의됨.

초전도 큐비트에 사용되는 조셉슨 접합은 주로 이각 전자빔 증착방식(double-angle electron beam evaporation)을 통해 형성하며, 그림 2의 순서와 같다. 높은 비저항을 가지며 신호 손실이 적은 웨이퍼 위에 lift-off 공정용 레지스트와 전자빔에 반응하는 레지스트를 두 층으로 스핀 코팅한다. 전자빔 식각 및 lift-off용 레지스트에 undercut을 수행하여 조셉슨접합 크기수준의 레지스트 다리를 형성한다. 임의의 각도를 가진 채로 전자빔증착을 수행하면 레지스트 다리가 가림막 역할을 하여 일부분을 가리게 된다. 이후 금속산화과정을 통해 부도체 역할을 하는 산화물질을 형성한다. 반대 각도로 전자빔증착을 수행하면 레지스트 다리가 다시 가림막 역할을 하여 새로 증착된 부분 중 일부만 초전도/부도체/초전도 구조의 조셉슨 접합을 형성할 수 있다. 이러한 방식은 조셉슨 접합의 면적을 조절할 수 있게 되고 나아가 유도자의 크기를 조절할 수 있게 된다. 마지막으로 레지스트를 lift-off 하여 불필요한 부분을 제거하면 조셉슨접합이 형성된 초전도 큐비트를 제작할 수 있다.

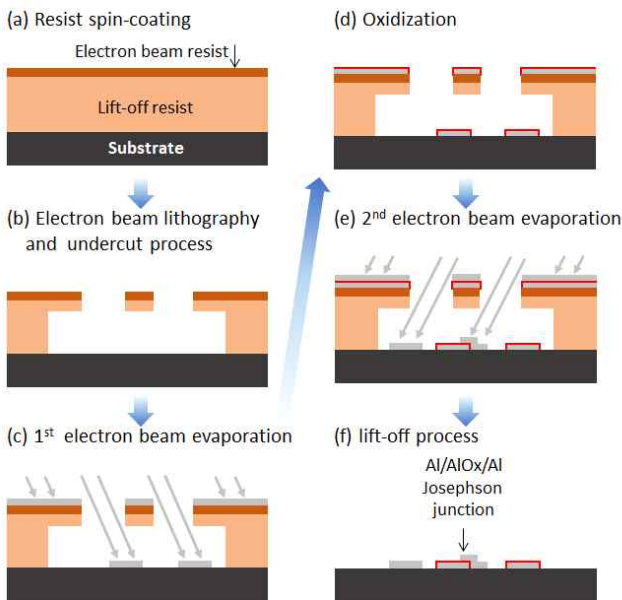


그림 2 초전도 큐비트에 사용되는 조셉슨접합 제작 과정. (a) lift-off 및 전자빔 식각용 레지스트 스핀코팅. (b) 전자빔 식각 및 undercut 공정을 통해 레지스트 다리 및 물질 증착 공간 확보. (c) 임의의 각도로 초전도 물질 증착. (d) 표면 산화. (e) (c)과정과 다른 방향의 각도로 초전도 물질 증착. (f) Lift-off 과정을 통해 불필요한 부분 제거

초전도 큐비트를 구동하기 위해서는 크게 두 가지 요소를 필요로 한다. 하나는 0과 1 상태가 열적 평형이 이루어지는 것을 막기 위하여 수 mK 수준의 극저온 환경을 만들 수 있는 냉동기이며, 나머지는 큐비트의 공진주파수인 수 GHz 대역에 해당하는 고주파 발생장치와 고주파를 펄스 형태로 만들 수 있는 합성기(mixer)를 필요로 한다.

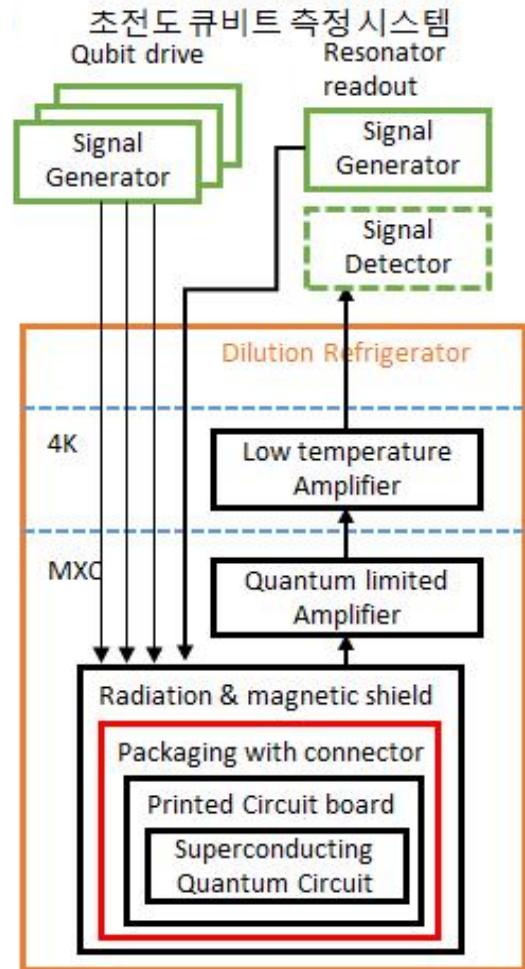


그림 3 단순화된 초전도 큐비트 측정시스템 모식도. 주황색: 극저온 희석 냉동기. 빨간색: 초전도 큐비트가 포함된 양자 프로세서

초전도 큐비트를 측정하는 과정은 그림 3에 표현된 것과 같다. 먼저 상온에서 임의의 형발생기를 사용하여 수십 나노초 수준의 전압펄스를 고주파 발생기에서 발생한 GHz 대역의 고주파와 합성한다. 펄스형태로 만들어진 고주파는 극저온 냉동기의 여러 온도단계를 거쳐 최종적으로 큐비트에 도달한다. 주로 GHz 대역에서 사용되는 SMA타입의

동축케이블을 초전도 회로에 연결하기 위해 SMA연결부가 설치된 패키지 → 인쇄회로기판(Printed circuit board, PCB) → 금속 와이어본딩 → 초전도 회로 순서로 연결한다. 그리고 큐비트 상태를 제어하는 고주파 펄스도 각각의 동축케이블을 따라 초전도 회로로 주입된다. 큐비트 상태제어가 끝난 뒤 상태측정을 위해 초전도 공진기의 공진주파수로 고주파를 통과시키는데, 극저온 상태까지 투과하는 동안 에너지손실이 크기 때문에 증폭기를 이용하여 측정신호를 증폭한다. 증폭기는 각각 소자마다 잡음온도를 가지고 있어 잡음이 포함되는데, 신호잡음을 줄이기 위하여 밀리켈빈 수준의 온도에서 동작하는 양자-한계 증폭기(Quantum-limited amplifier) 및 저온 증폭기를 사용한다. 증폭된 펄스신호에서 합성기를 이용해 고주파 성분을 제거하면 저주파 성분이 전압으로 나타나는데, 이것을 이용하여 양자상태를 분석할 수 있다.

3. 초전도 큐비트 연구동향

3A. 단일 큐비트 생존시간 및 결맞음 향상

큐비트는 주변 환경에 의한 에너지 손실과 양자잡음이 존재하기 때문에 무한대의 생존시간과 결맞음시간을 가질 수 없다. 그런데 양자연산을 수행하기 위해서는 큐비트가 결맞음 상태를 유지하여야 한다. 결맞음 상태가 서서히 감쇄할수록 수행되는 양자연산의 결과값에 에러가 발생한다. 따라서 초전도 큐비트에 대한 연구 중 높은 비중을 차지하는 것이 초전도 큐비트의 생존시간(T1) 및 결맞음 시간(T2)을 향상시키는 것이다.

그림 4에 초전도 큐비트의 성능 발전과정을 요약하였다. 초기에는 조셉슨접합을 사용하여 전하 큐비트(Charge qubit)를 구성하고 전자 쿠퍼쌍(Cooper pair)이 수 나노초 정도의 생존시간을 보였다.[1] 이후 여러 개의 조셉슨 접합을 비대칭적으로 구성하여 에너지 구조를 변경한 Quantronium[2] 및 전하잡음보다는 자기장잡음에 민감하도록 설계된 Flux 큐비트[3]를 이용하여 마이크로초에 해당하는 생존시간을 관찰하였다. 2008년에 전하 큐비트를 획기적으로 발전시킨 트랜스몬(Transmon)형태의 큐비트가 제안되었

다.[4] 전하 큐비트는 게이트전하에 따라 에너지 분산이 크게 변하여 주변 전하요동에 의해 결맞음이 감소하는 문제가 있었다. 이것을 극복하기 트랜스몬 큐비트는 축전기의 용량을 키움으로써 조셉슨접합에 생기는 조셉슨에너지를 축전기에서 생기는 충전에너지보다 크게 하였다. 충전에너지가 상대적으로 작아졌기 때문에 전하요동에 대한 민감도를 크게 낮추어 결맞음을 향상시킬 수 있었다. 그리고 양자시스템의 자발방출시간(생존시간)이 주변에 결합된 공진기에 의해 달라지는 현상인 Purcell 효과를 이용하여 생존시간을 향상시켰다.

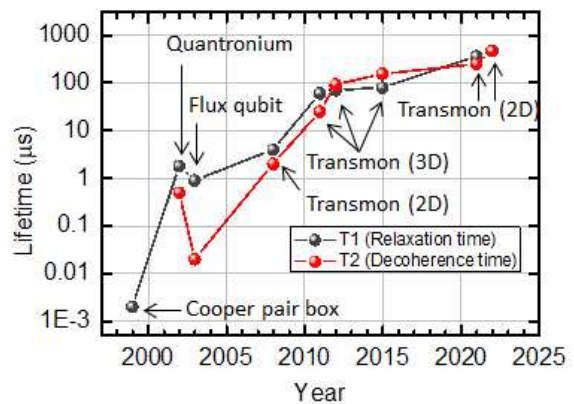


그림 4 초전도큐비트의 생존시간(T1) 및 결맞음 시간(T2)의 발전 과정. 괄호에 표시된 2D 및 3D는 각각 이차원 초전도공진기 삼차원 공진기를 의미함.

초전도 큐비트와 공진기가 결합된 구조를 활용하기 시작하면서 양자 비파괴 측정(Quantum non-demolition measurement)을 통해 연구를 수행하였다. 큐비트와 공진기의 공진주파수의 차이(Δ)가 큐비트-공진기 간 상호작용의 크기(g)보다 큰 상황을 dispersive regime이라 부르는데, 공진기의 위상이 큐비트 상태에 따라 변화하는 현상을 이용하여 측정행위 자체가 큐비트를 결맞음 시간에 영향을 미치는 정도에 대한 연구도 같이 수행되었다.

초전도 큐비트 생존시간 및 결맞음시간 향상 측면에서 한 단계 큰 도약이 있었다. 이차원 초전도 공진기보다 높은 품질 인자(Quality factor)를 갖는 삼차원 공진기와 트랜스몬 큐비트를 결합함으로써 100 마이크로초 이상의 생존시간을 보고하였다.

[5-7]

최근 초전도 큐비트에 사용되는 초전도 물질의 변화로부터 성능을 향상시켰다. 2021년도 프린스턴 대학에서는 탄탈럼(Tantalum, Ta) 박막의 body-centered cubic(BCC) 알파위상상태를 이용해 축전기와 공진기를 만들고, 기존 방식과 동일한 Al/AlOx/Al 조셉슨 접합을 결합하여 초전도 큐비트를 제작하였다. 다른 초전도 물질에 비해서 α -Ta 박막을 사용함으로써 초전도 박막에서 발생하는 에너지 손실을 줄일 수 있었으며, 이를 이용하여 0.3 밀리초 수준의 생존시간을 보고하였다.[8] 나아가 2022년 1월에는 다른 그룹에서 Ta 기반 초전도 큐비트에 사용되는 금속 식각과정의 최적화를 통해 0.5 밀리초 수준의 결맞음 시간이 측정됨을 보고하였다.[9]

3B. 초전도 큐비트 간 상호작용

양자컴퓨터에서 사용하는 양자게이트에는 제어 큐비트(control qubit)상태에 따라 목표 큐비트(target qubit)의 상태를 변화시키는 controlled-gate가 존재한다. 이러한 게이트들을 구현하기 위해서는 임의의 큐비트 간 상호작용을 발생시켜야 한다. 가장 이상적인 형태로는 모든 큐비트가 다른 각각의 큐비트에 대해 연결성(connectivity)을 보유하는 것이다. 하지만 초전도 큐비트는 박막증착기반 이차원 소자이기 때문에 배치에 한계가 있어 모든 큐비트 간 연결성을 보유하기 어렵다. 현재 초전도 큐비트분야에서는 큐비트를 격자 형태로 배치함으로써 가장 근접해있는 큐비트끼리 먼저 상호작용을 일으키고 더 멀리 배치되어있는 큐비트로 연쇄적으로 나아가는 방식을 주로 사용하고 있다.

양자프로세서 개발을 위해서 단일 큐비트의 성능 향상과 동시에 큐비트 사이의 상호작용에 대해서 활발히 연구가 진행되었다. 2013년 UCSB 대학교에서는 새로운 타입의 큐비트를 제안하였다.[10] 기존 트랜스몬 큐비트는 그림 5(a)와 같이 일반적인 축전기 형태를 유지하기 위해 두 개의 축전기 패드 존재하고 주변 접지평면으로 둘러 쌓인 형태다. 새로운 타입은 기존과 다르게 초전도 회로에 존재하는 접지평면을 축전기의 한 부분으로 사용함과 동시에 큐비트의 모양을 X형태(Xmon)로 만들었다.

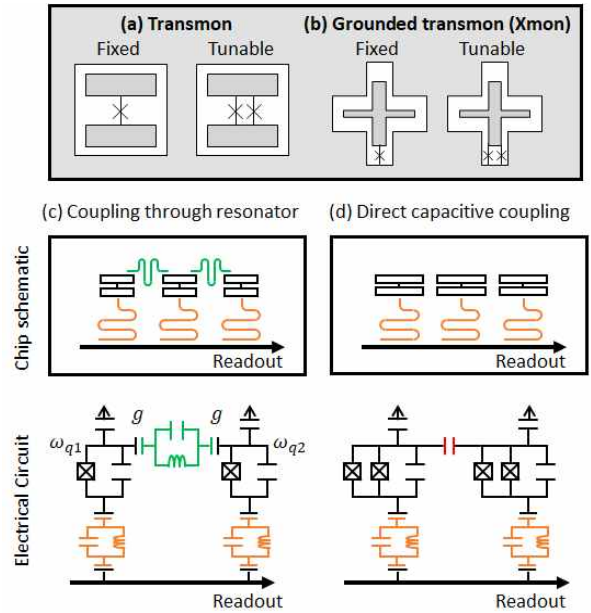


그림 5 초전도 고정큐비트 및 조정가능한 큐비트(조정큐비트)의 단순화된 모습 (a) 트랜스몬 큐비트, (b) 접지된 트랜스몬(Grounded transmon, Xmon). X 표시 : 조셉슨 접합. 회색음영 : 초전도체. 초전도 큐비트 상호작용 방법에서 (c) 초전도 공진기를 이용한 상호작용, (d) 큐비트 축전기를 이용한 직접 상호작용. 초록색: 상호작용을 위한 공진기, 주황색: 큐비트 상태측정용 공진기.

이러한 형태는 높은 충전에너지 E_C 를 갖기 위해 필연적으로 커지게 되는 축전기 패드 크기를 줄일 수 있게 되어 소형화 측면에서 장점이 있다. 또한 하나의 접지평면을 공유하고 있기 때문에 국소전하요동에 의한 잡음을 줄일 수 있다. 마지막으로 X자의 각 날개를 이용하여 인접한 큐비트와 상호작용 할 수 있으며 격자 형태로 배치하기에 유리하다는 장점이 있다. 2013년도 당시 보고된 생존시간은 44 us 수준이었으며, 2014년도에 5개의 Xmon 큐비트를 사용하여 다중 큐비트 얽힘 상태를 관찰하였다.[11]

트랜스몬 큐비트는 공진주파수 제어 여부에 따라 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 조셉슨 접합 한 개를 사용한 경우 유도자와 축전기가 확정되기 때문에 큐비트는 고정된(Fixed) 공진주파수를 가진다. 조셉슨 접합 두 개를 고리형태로 배치할 경우 초전도 양자간섭 소자(Superconducting QUantum Interference Device, SQUID)형태가 되어 고리 내부에 투과하는 자기장에 따라 유도자

크기를 변화시킬 수 있고 나아가 공진주파수를 조정할 수 있다(Tunable).

양자컴퓨팅 입장에서 요구하는 큐비트 시스템은 게이트가 적용되는 순간에만 상호작용 발생하고 게이트가 끝난 유희상태에서는 상호작용이 없어야 한다. 초전도회로 내에서 축전기 상호작용을 한다고 가정하면, 초전도회로를 구성한 이후에는 물리적으로 변화하기 쉽지 않아 유희상태에서 항상 상호작용이 발생하고 있는 상태(Always-on)가 된다. 이 상태를 극복하기 위하여 고정 큐비트와 조정 큐비트는 각기 다른 방식을 사용한다.

먼저 고정큐비트는 그림 5(c)와 같이 큐비트를 잇는 방식으로 공진기를 사용한다. 매개 공진기와 큐비트들의 상호작용 크기(g)보다 큐비트간 공진주파수 차이($\Delta_{12} = \omega_{q1} - \omega_{q2}$)가 큰 경우($g \ll \Delta_{12}$), 양쪽에 연결된 큐비트의 주파수는 상호작용에 의해 큐비트 주파수가 조금 변화하게 된다. ($\tilde{\omega}_q = \omega_q \pm \frac{g^2}{2\Delta_{12}}$) 이 상태

가 되면 목표큐비트의 라비진동의 주기가 제어큐비트의 상태에 따라 변화하는 cross-resonance라는 현상이 발생하는데, 이것을 이용하면 제어큐비트의 상태를 변화하지 않고 목표 큐비트만 변화시키는 controlled-gate를 구현할 수 있다.[12]

공진주파수 조절이 가능한 Tunable 큐비트의 경우 다른 방식을 사용한다. 상호작용의 크기는 큐비트 간 축전기용량 크기에 비례하며 공진주파수가 일치할 때 크기가 가장 세다. 따라서 그림 5(d)와 같이 직접적으로 축전기를 통해 상호작용하며, 상호작용이 필요한 순간에는 공진주파수를 일치시키고 게이트 연산이 끝나면 다시 주파수를 떨어뜨려 상호작용의 크기를 줄이는 방식을 사용한다.[13]

각각의 방식에는 확장형 양자컴퓨터 관점에서 장단점이 존재한다. 먼저 Fixed 큐비트의 경우는 각각의 단일 큐비트의 결맞음 특성이 Tunable 큐비트에 대하여 높을 수 있다. 왜냐하면 Tunable 큐비트는 SQUID를 포함하고 있기 때문에 자기장잡음에 의해 결맞음을 잃거나 공진주파수를 변경하는 도중 물질 내 점결함에 의한 이-준위 시스템(two-level system)과 원하지 않는 상호작용을 거쳐 결맞음을 잃어버릴 수 있기 때문이다. 또한 고정큐비트는 주파수 자유도 측면에서 변수를 줄일 수 있다. Fixed 큐비트는 초전도 회로

구성 이후 주파수가 크게 변화하지 않아 초기 계측 수행 후 이후 측정에 큰 차이가 없지만, Tunable 큐비트는 공진주파수 변경을 위해 직류전류가 흐를 도선을 필요로 하고 시간에 따른 전류안정성 등이 매우 중요하므로 초전도 큐비트의 개수가 많아질수록 양자프로세서를 변수를 통제하는데 많은 노력을 필요로 한다.

반대로 Tunable 큐비트의 경우 높은 상호작용 크기를 활용해 빠르게 게이트를 수행할 수 있다. 따라서 같은 결맞음 시간 내에 많은 연산을 수행함으로써 양자 오류를 줄일 수 있다. 또한 Fixed 큐비트의 상호작용 크기는 큐비트 사이의 공진주파수 차이 Δ_{12} 에 의존하는데, 조셉슨접합 공정 시 발생하는 편차에 의해 큐비트의 개수가 많아질수록 상호작용 크기를 통제하기 어렵다. 하지만 Tunable 큐비트는 주파수 할당을 자유롭게 할 수 있어 상호작용 크기를 조정할 수 있다는 장점을 가진다. 두 방식 모두 장단점을 가지고 있으며 양자컴퓨터 개발 시 주요 어려움이 초전도큐비트 제작측면에 있는지 제어측면에 있는지 차이이며, 현재 초전도 양자컴퓨팅을 선도하는 두 그룹 중 IBM Q에서는 고정큐비트 플랫폼을 사용하고 Google Quantum AI에서는 Tunable큐비트 플랫폼을 활발히 연구 및 개발을 수행하고 있다.

4. 초전도 큐비트 전망

초전도 전하큐비트 발견 이래로 생존시간과 결맞음시간은 비약적으로 발전했다. 단일 양자게이트와 두-큐비트 게이트의 시간이 대략 수십 나노초 수준임을 감안하였을 때 0.5 밀리초 수준의 생존시간은 굉장히 높은 수준임을 알 수 있다. 초전도 물질 공정과정을 최적화하는 연구가 꾸준히 진행된다면 더 긴 결맞음 시간도 가능할 것이라 예상된다.

현재 다양한 기업들이 확장형 양자컴퓨터 개발을 위해 초전도 큐비트 플랫폼을 사용하여 연구개발을 진행하고 있다. 특히 2021년도 7월 Google Quantum AI은 50-큐비트급 양자 프로세서인 '시카모어(Sycamore)'를 사용하여 양자오류정정이 가능하다는 것을 발표하였으며, IBM Quantum은 11월에 127-큐비트를 가진 '이글(Eagle)'에 기판관

통전극(Through Substrate Via, TSV) 공정까지 활용하여 적층구조를 갖는 양자프로세서를 제작함으로써 지속적으로 확장형 양자컴퓨터 개발가능성을 보여주고 있다. 지금까지의 초진도 큐비트의 발전 과정을 보았을 때 단일 큐비트 성능향상과 더불어 확장성을 측면에서 초진도 플랫폼을 이용한 양자프로세서가 앞으로도 각광받을 것으로 전망된다.

참고문헌

[1] Y. Nakamura et al., "Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box", *Nature*, p786-788 March (1999)

[2] D. Vion et al., "Manipulating the Quantum State of an Electrical Circuit", *Science* 296 p886-889 (2002)

[3] I. Chiorescu et al., "Coherent Quantum Dynamics of a Superconducting Flux Qubit", *Science* 299 p1869-1871 (2003)

[4] A. A. Houck et al., "Controlling the Spontaneous Emission of a Superconducting Transmon Qubit", *Phys. Rev. Lett.*, 101, 080502 (2008)

[5] H. Paik et al., "Observation of High Coherence in Josephson Junction Qubits Measured in a Three-Dimensional Circuit QED Architecture", *Phys. Rev. Lett.*, 107, 240501 (2011)

[6] C. Rigetti et al., "Superconducting qubit in a waveguide cavity with a coherence time approaching 0.1 ms", *Phys. Rev. B*, 86, 100506(R) (2012)

[7] X. Y. Jin et al., "Thermal and Residual Excited-State Population in a 3D Transmon Qubit", *Phys. Rev. Lett.* 114, 240501 (2015)

[8] A. P. M. Place et al., "New material platform for superconducting transmon qubits with coherence times exceeding 0.3 milliseconds", *Nat. Comm.* 12:1779 (2021)

[9] C. Wang et al., "Towards practical quantum computers: transmon qubit

with a lifetime approaching 0.5 milliseconds", *npj Quantum Information* 3 (2022)

[10] R. Barends et al., "Coherent Josephson Qubit Suitable for Scalable Quantum Integrated Circuits", *Phys. Rev. Lett.* 111, 080502 (2013)

[11] R. Barends et al., "Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance", *Nature* 508, p500-508 (2014)

[12] C. Rigetti and M. Devoret, "Fully microwave-tunable universal gates in superconducting qubits with linear couplings and fixed transition frequencies", *Phys. Rev. B* 81, 134507 (2010)

[13] J. Majer et al., "Coupling superconducting qubits via a cavity bus", *Nature* 449, p443-447 (2007)

저자이력



여환섭 (呂煥燮)
 2013년 한국과학기술원 물리학과 (학사),
 2020년 한국과학기술원 물리학과 반도체물리 (석박사통합),
 현재 성균관대학교 성균나노과학기술원 (Post Doc.)