나노역학계의 양자상태와 그 측정

DOI: 10.3938/PhiT.25.033

심 승 보

Quantum-state Measurement in a Nanomechanical System

Seung-Bo SHIM

Nanomechanical resonator is an interesting tool for studying fundamental physics such as energy dissipation mechanisms and macroscopic quantum phenomena. In this article, I will discuss why nanomechanics is interesting to physicist and why we want to measure the quantum-mechanical behavior in a nanomechanical system. As an ongoing effort, the superconducting qubit-coupled nanomechanical resonator project will be covered. The qubit-coupled nanomechanical resonator is being investigated to measure the quantum state of a mechanical structure by utilizing dispersive coupling between a qubit and a resonator.

서 론

바야흐로 양자(quantum)의 시대가 도래했다. 텔레비전 광고에서 양자가 나오는가 하면, 양자 연산 및 양자 암호 등의 말들은 이미 한참 전부터 우리의 귀에 들어와 이제는 익숙하기까지 하다. 우리의 생활에 양자가 들어온 것이다. 양자는 언뜻 손에 잡히지 않는 개념이어서, 물리학을 공부한 사람과 그렇지 않은 사람을 구분하는 개념이었다. 그러나 이제는 양자가 일반인들의 입에 아무렇지도 않게 오르내리는 때가 온 것이다. 이는 물리학의 쾌거라 할 수 있겠다. 물리학에 대한 폭넓은 연구와 발전의 결과로 이해하기 쉽지 않은 개념의 물리학 용어가 우리들에게 친숙하게 다가올 수 있게 된 것이다. 이러한 양자 가운데서 우리가 관심을 가지고 공부하고 있는 것이 바로 나

노역학계의 양자상태이다. 이 글에서는 나노역학계의 양자상태에 대하여 설명하고 그것을 측정하기 위한 노력에 대하여 논의하고자 한다.

나노역학계와 나노역학계의 양자상태

나노역학계는 나노미터 수준 크기의 구조체가 역학적으로 움직이는 시스템을 말한다. 예를 들면, 다이빙 보드나 다리 같은 구조체의 크기를 축소하여 그 길이가 마이크로미터 수준으로 되도록 하고, 폭이나 두께를 백~수백 나노미터 수준으로 만든 것이 바로 나노역학계이다. 나노역학계의 운동은 감쇄조화진동자의 운동방정식으로 아래와 같이 표현된다.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma m \frac{dx}{dt} + kx = f_0 \cos(\omega t + \phi)$$

여기서, m 은 역학계의 질량, γ 는 역학계의 에너지 손실에 기인한 감쇄, k 는 역학계의 용수철 상수, f_0 는 역학계를 구동하는 세기를 의미한다. 이 운동방정식에서 유도되는 물리량 가운데 공진주파수(ω_0)와 Q-factor($Q \cong \omega_0/\gamma$)가 나노역학계의 운동을 설명하고 이해하는데 중요하다.^[1]

그렇다면, 연구자들은 왜 나노역학계 연구를 하게 되었을까? 그것은 바로 MEMS(Micro Electro-Mechanical System)를 이용한 응용연구가 활발해지면서이다. MEMS는 센서, 구동기 등 다양하게 응용될 수 있음이 잘 알려져 있다.^[2] 연구자들은 이러한 소자의 민감도나 분해능을 높이기 위한 노력을 하게 되었고, 소자의 크기를 작게 만드는 것이 하나의 방향이었다. 그래서 NEMS(Nano Electro-Mechanical System)가 등장하게 된 것이다. 그런데, 소자의 크기가 나노미터 수준으로 작아지면서 새롭게 고려해야 할 사항들이 나타났다. 예를 들면, 소자의 Q-factor가 낮아지는 다양한 원인에 대한 이해가 필요해진

저자약력

심승보 박사는 2008년 서울대학교 물리천문학부에서 박사학위를 취득하고 2008년부터 한국표준과학연구원 선임연구원으로 재직 중이다. 나노역학계의 양자상태를 측정하고 제어하기 위한 연구와 비선형 나노역학계에 대한 연구를 수행하고 있다.(seungbo2@kriss.re.kr)

REFERENCES

- [1] A. N. Cleland, *Foundation of Nanomechanics* (Springer, 2002).
- [2] K. L. Ekinci and M. L. Roukes, *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 061101 (2005).

Fig. 1. (a) Energy diagram of nanomechanical resonator in the quantum regime ($\hbar\omega \gg k_B T$). The energy level spacing of mechanical resonator should be larger than the thermal fluctuation energy. (b) Scanning electron microscope image of aluminium resonator.

것이다.^[3] 한편, 소자의 크기가 작아지면 공진주파수가 높아지는데, 이것은 새로운 가능성을 열어주었다. 공진주파수를 높이고 온도를 낮추면 나노역학계가 가지는 양자상태의 측정을 시도해 볼 수 있게 된 것이다. 나노역학계가 가지는 에너지 레벨의 간격이 열에너지에 의한 요동보다 커져 역학계의 양자화된 에너지를 관찰할 수 있게 되었다. 이를 양자영역(quantum regime, $\hbar\omega \gg k_B T$)에 있는 나노역학계라고 한다.(그림 1(a))

나노역학계가 양자영역에 위치하면, 나노역학계가 가지는 양자상태를 측정할 수 있는 준비가 되었다는 뜻이다. 나노역학계가 가지는 양자상태를 측정하는 것은 매우 매력적인 일이다. 일반적으로 나노역학계의 운동은, 앞에서 언급한 바와 같이 고전역학에서 설명하는 감쇄조화진동자의 운동으로 잘 이해된다. 이처럼 고전역학으로 잘 설명되는 운동을 하던 구조체가 특정 조건이 만족되면 고전역학적인 설명이 더 이상 유효하지 않아지고 양자역학으로 그 운동을 설명할 수 있게 되는 것이다. 즉, 우리가 만든 기계적인 구조체가 양자역학적인 현상을 나타낸다는 것이다. 나노역학계가 나타내는 양자역학적인 현상은 광자나 전자 등의 그것과는 다르다. 역학계는 광자와 전자와는 다르게 약 10^{10} 개의 원자로 이루어져 있다. 이처럼 수많은 원자로 구성되어 있는, 거시적 시스템인 것이다. 나노역학계는 거시적인 시스템의 운동이 양자상태를 가지는 흥미로운 시스템

이다. 뿐만 아니라, 우리가 양자역학에서 공부한 양자조화진동자가 실험적으로 구현될 수 있는지를 확인할 수 있는 대상이 바로 나노역학계이다.

나노역학계 양자상태의 실험적 구현

나노역학계의 양자상태를 측정하기 위하여 역학계를 양자 영역에 위치하는 것은 생각처럼 쉬운 일은 아니다. 나노역학계를 양자 영역에 위치하게 하려면, 양자 영역($\hbar\omega \gg k_B T$) 관계식에서 유추할 수 있듯이 나노역학계의 공진주파수를 높이는 방법과 온도를 낮추는 방법이 있다. 이러한 노력은 역학계의 에너지 레벨의 간격이 열적 요동보다 커져서 양자화된 에너지를 구별할 수 있게 하기 위함이다. 먼저 역학계의 온도를 낮추는 방법부터 이야기해보자. 위의 관계식에서 알 수 있듯이 온도가 낮으면 낮을수록 역학계의 공진주파수가 낮아도 양자 영역에 위치할 수 있게 된다. 실험적으로는 희석 냉동기(dilution refrigerator)를 활용하여 온도를 낮추는데 일반적으로 10 mK 수준까지 냉각할 수 있다.

밀리 켈빈(mK) 영역의 낮은 온도에 더하여 공진주파수를 높여야 한다. 역학계의 공진주파수는 역학계를 이루고 있는 물질과 모양 및 크기에 의하여 결정된다. 영률(Young's modulus)이 높은 물질이 공진주파수가 높다. 그래핀, CNT(carbon nanotube) 그리고 다이아몬드 등 탄소 기반 물질이 다른 반도체 기반 물질이나 금속 등에 비하여 영률이 높다. 그리고 역학계의 크기가 작아지면 공진주파수가 높아진다. 이는 용수철의 길이가 짧아질수록 용수철이 단단해지는 것과 유사한 원리이다. 현재까지 보고된 가장 높은 공진주파수를 가진 역학계는 FBAR(film bulk acoustic resonator)로, 공진주파수는 약 6 GHz이다.^[4] FBAR는 물질의 압전효과를 이용한 공진기로 팽창과 수축을 반복하는 모드를 이용한 것이다. 하지만 우리는 역학계의 질량 중심(center of mass)이 움직이는 운동을 가정하고, 캔틸레버(cantilever)나 공기다리(airbridge) 구조와 같은 나노역학계를 제작하였다. 우리는 나노역학계를 알루미늄을 이용하여 제작하였다.

공기다리 구조의 역학계가 10 mK에서 양자 영역에 위치하기 위해서는 약 200 MHz 이상의 공진주파수를 가져야 한다. 200 MHz의 공진주파수를 가지는 나노역학계를 알루미늄으로 기반으로 제작하면, 그 구조체의 크기는 길이 약 1.6 μm , 두께와 너비가 100 nm가 되어야 한다. 그러나 이와 같은 구조

REFERENCES

- [3] P. Mohanty *et al.*, Phys. Rev. B **66**, 085416 (2002).
- [4] A. D. O'Connell *et al.*, Nature **464**, 697 (2010).

Fig. 2. Schematic diagram of superconducting qubit coupled nanomechanical resonator. Blue lines represent superconducting qubit island. The charge state of qubit island is modulated by the motion of nanoresonator which can be detected with transmission line measurement.

체는 용수철 상수가 매우 높아져서 같은 구동력으로 구동했을 때 큰 변위를 기대하기 어렵다. 다시 말해 역학계의 움직임이 만들어내는 신호의 세기가 매우 작아져서 측정이 매우 어려워진다는 의미이다. 이제는 나노역학계의 양자상태를 측정하기 위하여 고민이 필요해지는 것이다. 우리가 역학계의 양자상태를 측정하기 위하여 제작한 알루미늄 나노역학계는 그림 1(b)와 같다.^[5]

초전도 큐비트와 나노역학계의 결합

나노역학계의 공진주파수를 높이기 위하여 구조체를 작게 만들면, 역학계의 운동 측정이 어려워진다. 이를 극복하기 위하여 우리는 역학계의 운동이 만들어내는 물리량을 보다 더 정확하게 측정할 수 있는 방법을 고안해야 한다. 그것이 바로 초전도 큐비트(superconducting qubit)이다. 큐비트는 잘 정의된 2-레벨 시스템(two-level system)이다. 이러한 2-레벨 시스템과 조화진동자의 결합 구조를 이용하여 조화진동자의 운동을 읽어 내려는 것이다. 이와 같이 서로 다른 양자시스템의 결합 구조에 관한 아이디어는 공동양자전기역학(cavity quantum electrodynamics, CQED)에서 착안하였다.^[6] 공동양자전기역학에서는 조화진동자로써의 빛과 2-레벨 시스템으로써의 원자의 결합 구조를 응용한 것이라면, 초전도 큐비트와 결합된 나노역학계의 구조에서는 나노역학계가 조화진동자가 되고 초전도 큐비트가 2-레벨 시스템이 되는 것이다. 우리는 초전도 큐비트 가운데 전하 큐비트(charge qubit)를 응용하였다. 초전도 전하 큐비트는 전하의 변화에 매우 민감하다. 나노역학계의 운동이 초전도 전하 큐비트의 전하 상태에 영향을 미칠 수 있도록 하면, 역학계의 운동을 초전도 전하 큐비트를 이용하여 매우 민감하게 측정할 수 있다.

Fig. 3. Device image of superconducting qubit coupled nanomechanical resonator. This device consists of transmission line, LC circuit, superconducting qubit and mechanical resonator which are capacitively coupled to each other.

초전도 전하 큐비트와 나노역학계의 결합 구조의 운동은 아래와 같은 상호작용 해밀토니안으로 표현된다.^[7]

$$\hat{H} = E_{cl}(V_g)\sigma_z + E_J(B)\sigma_x + \hbar\omega(\hat{a}^\dagger\hat{a} + \frac{1}{2}) + \hbar\lambda(\hat{a}^\dagger + \hat{a})\sigma_z$$

이 해밀토니안에서 $E_{cl}(V_g)$ 은 큐비트의 정전기적 에너지(electrostatic energy)를, $E_J(B)$ 는 큐비트의 조셉슨 에너지(Josephson energy)를 의미한다. σ_z 와 σ_x 는 파울리 행렬(Pauli matrices)이다. 세 번째 항은 나노역학계의 양자화된 에너지를 그리고 마지막 항은 나노역학계와 초전도 큐비트와의 상호작용이며, λ 는 상호작용의 세기를 $\hat{a}^\dagger + \hat{a}$ 항은 역학계의 변위를 의미한다. 이러한 해밀토니안을 실험적으로 구현하기 위하여 만든 회로는 그림 2와 같다.

나노역학계와 초전도 큐비트 사이의 상호작용은 두 시스템의 에너지와 결합력 사이의 관계를 바탕으로 공명 결합(resonant coupling)과 분산 결합(dispersive coupling)으로 나눌 수 있다. 먼저 공명 결합은 상호작용하는 시스템의 에너지 차이가 결합력보다 작은 경우, 다시 말해서 두 시스템의 에너지가 유사한 ($\Delta E \approx \hbar\omega$) 경우이다. 한편으로 분산 결합의 경우는 상호작용하는 시스템의 에너지 차이가 결합력보다 큰($\hbar\lambda \ll \Delta E - \hbar\omega$) 경우를 말한다. 여기서 ΔE 는 초전도 큐비트의 에너지로 $\Delta E = \sqrt{E_{cl}^2 + E_J^2}$ 으로 표현된다.^[7] 이 글에서 다루는 시스템에서는 분산 결합을 활용할 수 있도록 설계하였다. 그 이유는 공명 결합의 경우에는 상호작용이 일어나면서 두 시스템이 서로 양자를 맞교환하는 일이 발생을 한다. 이는 측정과 함께 역학계의 양자가 없어지게 되는 양자상태 파괴 측정법이다. 반면에 분산 결합을 활용하면 나노역학계의 양자상태를 초전도

REFERENCES

- [5] F. Rouxinol *et al.*, arXiv:1504.02908v1.
- [6] A. Wallraff *et al.*, Nature **431**, 162 (2004).
- [7] E. K. Irish and K. Schwab, Phys. Rev. B **68**, 155311 (2003).

Fig. 4. (a) Magneto-motive detection of aluminium mechanical resonator. The measured resonant frequency is 289.3 MHz and the quality factor is about 1,350. (b) The transition energy of superconducting qubit.

큐비트를 통하여 읽어내더라도 역학계의 상태는 그대로 유지된다. 이와 같이 양자상태를 유지하는 측정(nondestructive measurement)을 위하여 분산 결합을 활용할 수 있도록 하였다.

그림 2에서 보이듯이 나노역학계(nanoresonator)가 움직이면 나노역학계와 초전도 큐비트 사이의 전기적 결합에 의해 초전도 큐비트의 전하 상태가 변하게 된다. 초전도 큐비트의 상태 변화는 전기적으로 결합되어 있는 초전도 공진기의 공진주파수에 영향을 미치게 된다. 이와 같은 방법을 통하여 우리는 초전도 공진기의 공진주파수 측정 방법을 통하여 초전도 큐비트와 나노역학계의 운동을 측정할 수 있는 것이다.

이러한 회로를 실험적으로 구현한 것이 그림 3이다.^[5] 이 그림에서 나노역학계와 초전도 큐비트 사이의 결합력을 극대화하기 위하여 역학계와 큐비트 사이의 간격을 매우 좁게 만들어야 한다. 우리는 약 70 nm 수준의 간격을 가지는 소자를 제작하였으며, 이를 통하여 기대할 수 있는 결합력은 대략 1 MHz 수준으로 예상된다. 제작된 소자는 조셉슨 접합을 만들기 위하여 알루미늄으로 이루어져 있다. 나노역학소자 또한 알루미늄으로 만들어졌으며, 그 크기는 길이가 1.8 μm , 두께가 100 nm, 폭

이 200 nm이다. 이를 바탕으로 공진주파수를 예상해 보면 약 300 MHz 수준에 이를 것으로 예상된다. 이는 측정 결과와도 잘 맞는 것을 확인할 수 있다(그림 4(a)). 그림 4(a)는 제작된 나노역학계의 운동을 초전도 큐비트와 별개로 자기 동인 기술(magneto-motive technique)을 이용하여 측정한 결과이다. 4.2 K의 온도와 10^{-5} Torr 수준에 해당하는 진공도에서 자기장을 7 테슬라를 걸어주고 측정한 결과 공진주파수는 약 289.3 MHz이며 Q-factor는 약 1,350 정도로 측정되었다. 측정결과에 의하면 제작된 알루미늄 나노역학계는 10 mK에서 평균 열적 점유수(average thermal occupation number)가 0.5 이하가 될 것으로 예상되어 나노역학계의 양자상태 측정을 시도해 볼 수 있을 것으로 생각된다.

초전도 큐비트의 특성은 그림 4(b)에 나타난 것과 같이 측정되었다.^[5] 측정 결과를 바탕으로 초전도 큐비트의 특성을 분석한 결과 정전기적 에너지가 약 1.3 GHz, 조셉슨 에너지가 11.7 GHz 수준이 될 것으로 예측되었다. 현재까지의 측정 결과로는 나노역학계의 운동을 초전도 큐비트로 읽어내지는 못했다. 그러나 그림 4(b)에 나타난 수많은 세부 구조가 약 300 MHz의 간격을 가지고 있는 것으로 보아 나노역학계의 운동이 간접적으로 보이는 것이라 해석할 수도 있으나, 이 부분은 추가적인 연구를 통하여 검증할 필요가 있다.

맺음말

나노역학계의 양자상태를 측정하기 위한 노력은 거시적인 시스템이 보이는 새로운 양자상태를 측정하는 것으로, 실험적으로 양자역학을 이해하는데 기여할 수 있는 흥미로운 주제이다. 이 글에서는 나노역학계의 운동을 측정하기 위한 정밀 센서로 초전도 전하 큐비트를 응용한 시스템을 설계하고, 소자를 제작하여 그 기초적인 측정 결과를 보여주었다. 이러한 일련의 측정 결과는 한국표준과학연구원과 시라큐스 대학의 LaHaye 교수팀과의 협력 연구를 통하여 얻은 결과이다. 이러한 기초적인 결과에 기반하여 나노역학계의 양자상태를 읽어낼 수 있도록 추가 연구를 수행할 예정이다. 나노역학계가 특정 양자상태에 어떠한 확률로 존재하는지를 측정하는 기술의 개발을 통하여 역학계의 열적 상태(thermal state) 측정을 할 수 있으면, 나노역학계를 극저온 영역에서의 온도 표준으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 나아가 우리가 실험적으로 이해하는 양자 시스템이 더 추가된다면 양자가 좀 더 보편화될 시대를 한 걸음 빠르게 다가오게 할 수 있을 것이라 기대해 본다.