

# 자속양자힘 발생 캔틸레버의 제작 및 평가 Cantilever Devices for Flux Quantum-based Force Generation

\*#최재혁<sup>1</sup>, 김윤원<sup>1</sup>, 이광철<sup>2</sup>, 박연규<sup>1</sup>, 이호영<sup>1</sup>, 송후근<sup>1</sup>

\*#J. H. Choi(jhchoi@kriss.re.kr)<sup>1</sup>, Y. W. Kim<sup>1</sup>, K. C. Lee<sup>2</sup>, Y. K. Park<sup>1</sup>, H. Y. Lee<sup>1</sup>, H. K. Song<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 한국표준과학연구원 기반표준본부, <sup>2</sup> 한국표준과학연구원 전자기기술연구본부

Key words : Quantum-based, Piconewton, Cantilever

## 1. 서론

마이크로 뉴턴 및 그 이하의 힘 측정을 다루는 극소힘 측정학은 나노바이오 과학의 발전과 함께 큰 관심을 끌게 된 분야이다. 이제 그 응용분야는 나노표면의 이미징을 넘어서 DNA 이중나선풀기, 단백질 폴딩,<sup>1</sup> Casimir 힘 측정<sup>2</sup> 등 단일 생체분자 연구 및 자연 기본힘 연구 등과 같이 고도의 정밀도를 요구하는 분야까지 이르고 있다.

기존의 실하중 방식이 적용되지 않는 이 극소힘 영역에 힘 표준을 제공하기 위한 측정학으로서, 새로운 방식의 극소힘 발생과 교정 방법이 다양하게 제안되어 연구되고 있다. 미국 NIST 에서는 동심형 실린더 타입의 커패시터를 이용하여 두 전극사이에 정전기력을 발생시켜 이를 힘표준으로 활용하는 연구가 진행 중이다.<sup>3</sup> 또한 독일 PTB의 경우 커패시터로서 추처럼 매달린 원판과 고정된 두 평행 원판을 이용하며, 영국 NPL은 평행판 사이에서 유전체가 받는 힘을 이용하여 표준힘을 발생시키는 방식을 취하고 있다. 이들이 발생하는 힘 영역은 나노뉴턴에서 마이크로 뉴턴까지이다.

이보다 낮은 힘 영역인 피코뉴턴 영역에서는 양자기반 힘발생 방식이 최근 제안되었다.<sup>4</sup> 이것은 자기력을 이용하며 양자현상을 직접 활용해 양자단위로 힘을 발생시킨다는 점에서 앞서 소개한 연구들과 차별화된다. 즉, 자기장기울기 내에서 자속양자에 가해지는 자기력을 이용하는 것으로, 서브피코뉴턴 크기의 일정한 힘 단위를 가지며 그에 정수배에 해당하는 힘을 발생하게 된다. 이 힘의 단위가 마치 양자 표준분동의 역할을 하는 것이다.

양자기반 힘발생을 위한 소자는 초전도링이 초고감도 마이크로 캔틸레버 위에 올려져 있는 형태이며, 외부 자기장 기울기 내에 놓이게 된다. 초전도 상태에서는 초전도링을 통과하는 자속이 양자화되며, 이 때 자기모멘트는 특정값의 정수배를 갖는 성분을 갖게 된다. 그 특정값은 전자전하와 같은 기본상수와 초전도링의 크기에 의해 결정된다.

잘 정의된 자장 기울기,  $dB/dz$ , 내에서 초전도링에 미치는 힘은  $F = n m_Q dB_{ext}/dz$ 로 주어진다. 이 때  $m_Q$ 는 자속양자 한 개를 추가했을 때 증가하는 자기모멘트이며  $n$ 은 정수값이다. 내반지름과 외반지름이 각각  $5 \mu\text{m}$ 과  $10 \mu\text{m}$ 이며  $50 \text{ nm}$  두께의 Niobium 초전도링을 가정하는 경우,  $2 \times 10^{-13} \text{ N}$  정도의 힘 스텝이 예측되었다.<sup>4</sup> 자장기울기는  $10 \text{ T/m}$ 를 가정하였다. 이 힘이 초고감도 캔틸레버에 가해질 경우 약 수 nm의 정적인 변위를 발생하게 되며, 이 변위는 광학레버나 광학간섭계를 이용하여 정밀하게 측정할 수 있다.

본 논문에서는 자속양자힘 발생을 위한 핵심부품 개발을 위해 한국표준과학연구원에서 진행하고 있는 소자 제작과 특성평가 연구를 다루고자 한다.

## 2. 소자 제작

본 연구의 양자힘발생 캔틸레버소자는 최대 길이  $400 \mu\text{m}$ , 폭  $4 \mu\text{m}$ , 두께  $0.34 \text{ nm}$ 의 패들(paddle)이 붙은 긴 레버 형태로  $0.8 \times 10^{-4} \text{ N/m}$ 의 스프링상수를 가지도록 디자인되었다. 패들 외에 변위측정용 레이저를 반사하기 위한 반사판이 있으며 패들 위에는 Nb 초전도링 박막이 증착되게

된다.

먼저 SOI (Silicon-on-Insulator) 웨이퍼의 두께  $340 \text{ nm}$ 의 상층 실리콘 위에 포토리지스터를 광묘화법을 이용해 캔틸레버 모양으로 패터하였다. 노출된 실리콘은 Reactive ion etching (RIE)을 이용해 제거하였다. 포토리지스터를 제거한 뒤 실리콘 패들 위에 광묘화법 또는 전자빔묘화법을 이용해 초전도링 모양을 패터하였다. 그리고, DC 스퍼터를 이용하여 노출된 실리콘 위에 양질의 Nb 박막을  $50 \text{ nm}$  두께로 올린 뒤,  $1 \mu\text{m}$  두께의 silicon oxide 보호층을 올렸다. 그리고, SOI 웨이퍼의 바닥면을 광묘화법으로 패터한 뒤 노출된 실리콘을  $450 \mu\text{m}$  두께만큼 deep RIE를 이용해 에칭하였다. silicon oxide를 buffered oxide etchant 로 제거하면 캔틸레버 칩이 실리콘 프레임에 약하게 연결된 형태가 남게 되며, 마지막으로 critical point drying을 거치면 최종적인 소자를 얻게 된다.

Fig.1 은 최종적으로 나온 양자발생 캔틸레버소자의 광학현미경 이미지와 초전도링 부분을 전자주사현미경으로  $6000$  배 확대 촬영한 것이다. 매우 길고 얇은 형태에도 불구하고 각 제작공정의 최적화를 통해 휘어지거나 뒤틀리지 않았으며, 공정 초기에 증착한 Nb 초전도링이 최종적인 에칭 공정 후에도 형태가 잘 남아 있는 것을 확인할 수 있었다.

다만 Fig.1(b)에서 보는 것처럼 Nb 초전도링의 가장자리 부분이 다소 거칠고 불균일해보이는데, 광묘화방식의 문제라기보다 공정 중에 Nb 박막이 일부 손상되는 것으로 보인다. 초전도링의 크기와 균일도는 발생되는 힘스텝의 정확도에 영향을 끼치는 요소이므로 향후 공정개선 연구가 필요하다.

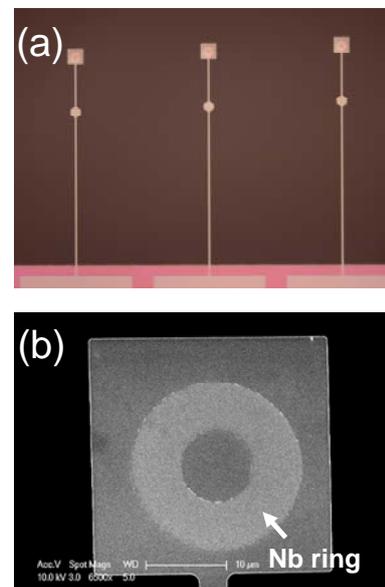


Fig. 1 Optical microscope and scanning electron microscope images of cantilever devices for flux-quantum-based force generation

### 3. 실험 및 분석

민감한 캔티레버 위에 증착된 초전도링에 대해 직접적인 전기적 특성조사나 형상분석이 어렵기 때문에 초전도성 평가를 위한 시료를 별도로 준비하였다. 적절한 선폭과 두께를 찾기 위해 선폭이 다른 7 개의 박막선과 박막선에 연결된 전극을 디자인하여 전자빔묘화 방법으로 패터하였다. 또한 DC 스퍼터의 증착시간을 조절하여 50 nm 에서 5  $\mu\text{m}$  까지 다양한 두께의 Nb 을 증착하였다. Nb 증착 기판에 광묘화방법으로 전극패턴을 내고 e-beam evaporator 와 thermal evaporator 를 사용하여 Cr/Au 를 증착하여 임계특성 측정을 위한 시료를 준비하였다. Fig.2 의 Inset 은 Nb 박막선의 전극이 증착되기 전 SEM 사진을 보여준다. 준비된 Nb 박막선은 DAQPad, Pre-amplifier, Digital Voltmeter, 저온장치를 사용하여 온도에 따른 저항과 전류-전압곡선을 측정하였다.

Fig.2 는 5 K에서 14 K까지 두께 50 nm, 폭 5  $\mu\text{m}$ 인 Nb 박막선의 저온 저항특성을 보여주고 있다. 초전도전이 시작하는  $T_{c,onset}$  이 7.3 K으로, Bulk 시료의 값보다는 다소 낮은 값을 보인다. Nb 박막의 두께가 얇을 때 전이온도가 감소한다는 보고가 있으나, 그에 따르면 두께 50 nm에서 8.8 K 정도의 전이온도를 가져야 하므로 7.3 K의 낮은 전이온도는 그 외에도 전자빔묘화 방식으로 인한 Nb 박막의 불순물 증가 등 다른 원인이 기여했을 것으로 본다.

자속양자발생 캔티레버 소자의 역학적 성질을 조사하기 위해 1310 nm의 파장을 갖는 레이저를 이용, 광간섭계 방식으로 그 진동 특성을 측정하였다. 스프링상수가 매우 낮으므로 공기에 의한 댐핑을 줄이기 위해  $\sim 10^{-5}$  Torr 의 진공에서 실험을 수행하였고, 상온에서 측정하였다.

주파수 스캔 모드와 열적잡음 스펙트럼 모드, 두 가지 모드를 이용하여 진동을 조사하였다. 주파수 스캔 모드인 경우 캔티레버 홀더에 연결된 피에조 액추에이터를 특정 주파수로 가진시키고 그 주파수를 변화시키면서 간섭계에 연결된 Lock-in amplifier 의 신호를 관측하였다. 열적잡음 스펙트럼 모드의 경우 피에조 액추에이터를 멈춘 상태에서 열적 잡음에 의해서 생기는 캔티레버 진동만 관측한다. 이렇게 Time series 데이터를 얻은 다음 Fast Fourier transformation 을 이용하여 최종 스펙트럼을 얻게 된다.

Fig.3 는 이 중 주파수스캔 모드로 측정된 상온결과를 보여준다. 스펙트럼 피크를 Lorentzian 함수를 Fitting 하여 1129.6 Hz 의 공명주파수를 얻게 되었고, 열적잡음 스펙트럼 모드에서 얻은 1129 Hz 와 잘 일치함을 볼 수 있었다. Quality factor 는 다소 낮은 값인 220 을 얻었는데, 개선이 필요하나 저온에서의 증가를 감안하면 소자 활용에는 큰 문제가 없을 것으로 본다.

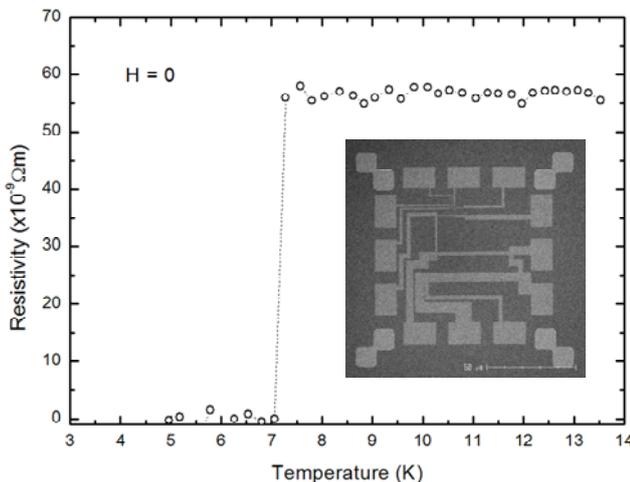


Fig. 2 Resistance vs. temperature for a Nb film strip of width 5  $\mu\text{m}$  and thickness 50 nm. Inset: SEM image of Nb film strips

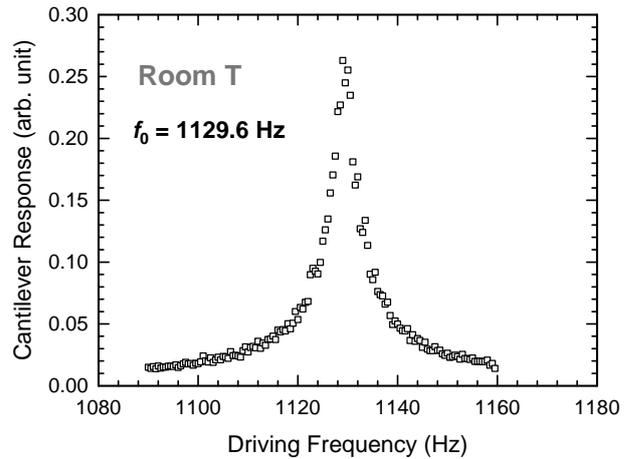


Fig. 3 Cantilever vibration response at driving frequencies of a piezo-actuator

### 4. 결론

양자기반 힘 발생 개념을 실현하기 위한 핵심부품인 자속양자힘 발생 캔티레버 소자의 제작공정을 개발하고 소자의 특성을 평가하였다. SOI 공정과 초전도박막공정을 결합하여, Nb 초전도링이 증착된 초고감도 Si 캔티레버를 제작하였다. Nb 초전도박막선의 저온 저항측정을 통해 초전도임계 특성을 보고, 캔티레버 소자의 진동을 광간섭계로 측정하여 역학적 특성을 조사하였다. 크기가 잘 정의되고 균일한 초전도박막링 제조를 위한 공정개선이 필요할 것으로 본다.

### 참고문헌

1. Bornschogl, T., and Rief, M., "Single Molecule Unzipping of Coiled Coils: Sequence Resolved Stability Profiles," *Phys. Rev. Lett.* **96**, 118102, 2006, and references therein.
2. Chiaverini, J., Smullin, S. J., Geraci, A. A., Weld, D. M., and Kapitulnik, A., "New Experimental Constraints on Non-Newtonian Forces below 100  $\mu\text{m}$ ," *Phys. Rev. Lett.* **90**, 151101, 2003.
3. Pratt, J. R., Smith, D. T., Newell, D. B., Kramar, J. A., and Williams, E. R., "Progress toward Système International d'Unit s traceable force metrology for nanomechanics," *J. Mater. Res.* **19**, 366, 2004, and references therein.
4. Choi, J.-H., Kim, M.-S., Park, Y.-K., and Choi, M.-S., "Quantum-based mechanical force realization in piconewton range," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 073117, 2007.
5. Ilina, K. S., Vitusevich, S. A., Jina, B. B., Gubina, A. I., Klein, N., and Siegel, M., "Peculiarities of the thickness dependence of the superconducting properties of thin Nb films," *Physica C*, **408-410**, 700, 2004.