

# 고주파 수정진동자를 이용한 고속 근접장 광학 현미경 제작

## Development of high-speed near-field scanning optical microscopy by using a high-frequency quartz-crystal resonator

서용호, 제원호

서울대학교 물리학과 CNAT

yonghoseo@phya.snu.ac.kr

고분해능을 장점으로 하는 근접장 광학 현미경(NSOM)은 최근 높은 관심을 모으고 있으나, 그 촬영 속도가 너무 느린 이유로 실제적인 활용이 미비한 상황이다. scanning 속도를 높이고자 하는 노력들이 많이 진행되고 있으나[1-2] 아직도 실시간 촬영과는 거리가 멀다. 기존의 근접장 광학 현미경(NSOM)은 tuning fork를 사용하여 탐침을 진동시키고 그 진동의 진폭 또는 위상의 변화를 측정함으로써 탐침과 시료의 거리를 측정하는 방식을 사용한다. 이때 tuning fork의 진동수는 약 수십 kHz로써 그 반응 속도가 느리므로 결과적으로 scanning 속도를 떨어뜨리고, 최종적으로 영상을 얻는데 걸리는 시간을 느리게 한다.

본 연구에서는 tuning fork를 이용하여 tip을 진동시키는 부분을 고주파 수정 진동자로 대체하였다. 따라서 tip을 훨씬 더 높은 주파수로 진동하기 때문에 이에 해당하는 반응 속도도 빨라진다. 반응 속도는 이론적으로  $\tau = \sqrt{3}Q/\pi f_0$ 으로 주어지는데 여기서 Q는 진동자의 quality factor 이고  $f_0$ 는 수정진동자의 고유 진동 주파수이다. 따라서 Q를 낮추고  $f_0$ 는 높이면 반응 속도를 높일 수 있다. 본 연구에서는 2MHz 고주파 AT-cut 수정 진동자를 사용하였다. AT-cut 수정진동자는 층 밀기 방향(thickness shear mode)으로 진동하는데 실온에서 온도에 따른 변화가 적다는 장점이 있다.

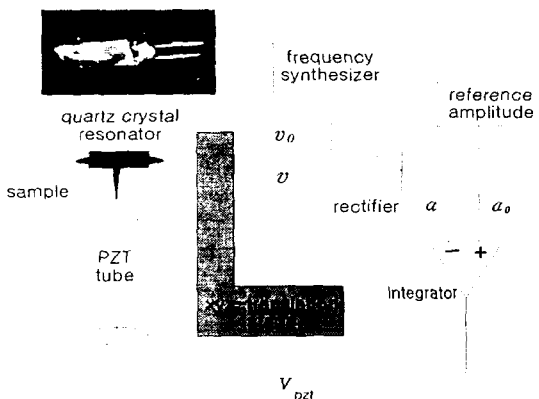


그림 2 수정진동자를 이용하여 진동하는 탐침을 피드백(feedback) 회로로 구성하여 거리조절을 할 수 있게끔 하고 있다.

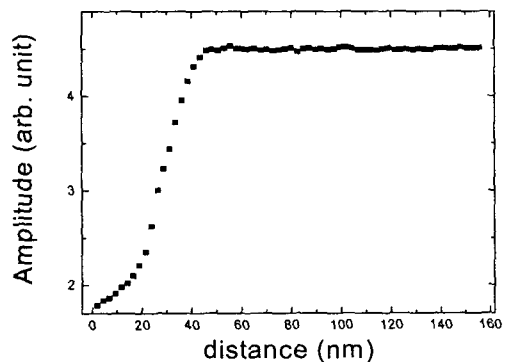


그림2. tip이 시료의 표면에 가까워짐에 따른 진폭의 변화를 보여주고 있다

고주파 수정진동자의 표면 위에 광섬유로 만든 tip(직경 300 nm)을 세워서 붙였다. 이때 고유 진동수는 수 kHz가 줄고, Q값도 줄어서 약 수 백에 이른다. tuning fork를 사용했을 때 고유진동수가 수십 kHz이고 Q가 수 천 정도인 것을 감안하면, 반응속도가 수 백 배 이상 향상될 것으로 기대된다. 그 수정진동자의 고유진동수에 해당하는 전기적인 신호를 한 전극에 가하고 다른 전극으로 유도되는 전압을 측정하여(그림 1), 유도 전압의 진폭으로부터 시료와 탐침을 거리를 측정한다. 그림 2에서는 tip이 시료의 접근하면서 진폭이 줄어드는 현상을 보여주고 있다. 20 nm 정도의 매우 짧은 거리 영역에서 크게 신호가 변화하는 것을 볼 수 있다.

그림 3에서는 본 연구로 개발된 NSOM을 이용하여 얻은 결과들을 보여 주고 있다. (a)는 높낮이를 나타내고 있으며, (b)는 error signal을 보여주고 있다. 시료로 Compact Disk (CD)를 사용하였고 주사한 면적은  $55 \mu\text{m}^2$ 이고, 이 이미지를 얻는데 겨우 0.5 초가 소요되었다. 이 경우의 scanning 속도는 1.2 mm/s에 달한다. 즉, 기존의 tuning fork를 사용한 것[1-2]보다 5배 내지 10배에 달하는 속도의 향상을 보였다. 그림 3(a)의 작은 부분 그림에서는 이미지의 흰색으로 나타난 선의 단면을 그래프로 보여주고 있는데 각 검은 색 점이 측정된 지점으로, 100 nm의 간격으로 기존의 비접촉식 AFM의 분해능에 비해 차지하지 않음을 보여 주고 있다.

근접장 주사 광학 현미경으로 이용하기 위해서는 탐침에 빛을 coupling시키는 과정이 중요하다. 수정진동자에 부착된 광섬유 탐침 끝에 렌즈를 통해서 레이저 빔의 초점을 맞춰야 한다. 탐침을 통해 레이저 빛을 통과시키고 반사되어 온 빛의 세기를 photo detector를 통해 측정했다. 이렇게 제작된 NSOM으로 grating의 표면을 촬영하였다. 그림 3(c)는 grating의  $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}^2$ 의 면적을 0.5초 동안에 촬영하였고, (d)는 배율을 높여서  $1.8 \times 1.8 \mu\text{m}^2$ 의 면적을 2초 동안에 촬영한 것으로 높은 해상도를 보여주고 있다.

본 연구로 개발된 NSOM은 일초 이내의 고속 촬영이 가능함을 보여준 것이고, 나아가 실시간(real time)의 영상을 보여줄 수 있는 NSOM의 구현에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] N. Ookubo and S. Yumoto, Appl. Phys. Lett. 74, 2149 (1999).
- [2] F. J. Giessibl, Appl. Phys. Lett. 73, 3956 (1998).

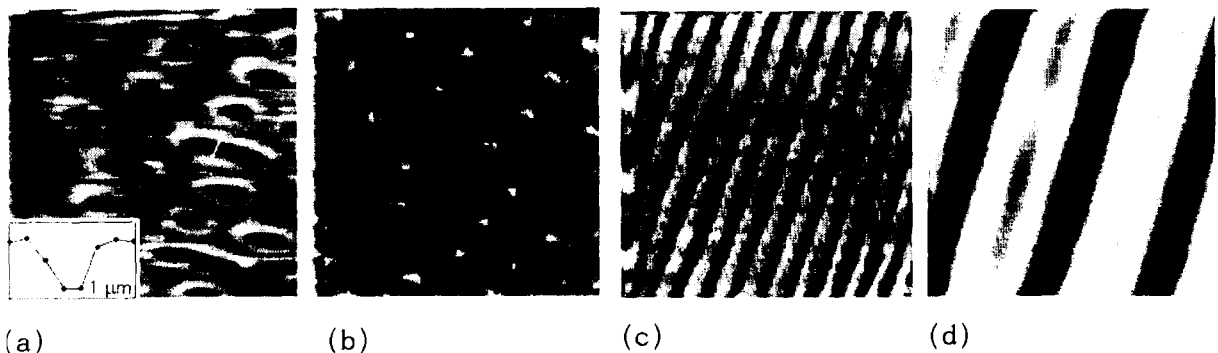


그림 3. 제작된 NSOM으로 CD 표면의 (a) 높낮이 (topography)와 이때에 동시에 측정된 (b) error signal의 변화를 보여주고 있다. 또한 광학 신호로부터 grating의 표면을 촬영한 결과를 보여주고 있다. (c)는 grating의  $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}^2$ 의 면적을 0.5초 동안에 촬영한 것이고, (d)는 배율을 높여서  $1.8 \times 1.8 \mu\text{m}^2$ 의 면적을 2초 동안에 촬영한 것으로 높은 해상도를 보여주고 있다.