

화학적 성분 분석능력을 가진 원자 현미경의 제작

이 동 원[†]

A micromachined cantilever for chemically sensitive scanning force microscope applications

Dong Weon Lee[†]

Abstract

This paper describes a novel concept of a chemically sensitive scanning force microscope (CS-SFM). It consists of the conventional SFM and the time-of-flight mass spectrometer (TOF-MS). A switchable cantilever (SC) fabricated by the micromachining technology combines each advantage of two completely different systems, SFM and TOF-MS. The CS-SFM offers to produce both images of topography and chemical information simultaneously. First we employed a rotatable tip holder based on 4 piezotube actuators for demonstration of the possibility of the CS-SFM concept. Second the CS-SFM concept is optimized with the micromachining technology. The micromachined SC with an integrated bimorph actuator and a piezoresistive strain sensor provides a reasonable switching speed of ~10 ms which is very attractive for the CS-SFM application. The SC is currently being integrated in an ultra-high-vacuum system to perform various experiments.

Key Words : SFM, TOF-MS, cantilever, bimorph actuator

1. 서 론

1980년대 IBM 취리히 연구소에서 개발된 주사형 탐침 현미경(scanning probe microscope, SPM) 기술은 단 원자나 분자의 크기로 다양한 고체 샘플 표면을 3차원 형상화를 위하여 개발되었다^[1,2]. 현재의 SPM 기술은 샘플 표면의 형상뿐만 아니라 온도 분포, 표면 전계 및 자계 형상 등을 3차원적으로 만들 수 있으며, 기존의 기술을 확장하여 단 원자를 임의의 위치에서 다른 특정 위치로 이동시키는 원자 조작기로 이용하기 시작하였다^[3-9]. SPM은 원자를 다루는 유일한 기술로써 지난 20년 동안 반도체 산업, 생물학, 물리학, 표면 과학 등과 관련된 다양한 학문 분야에서 새로운 나노 관련 영역을 개척하였을 뿐만 아니라 기존의 시스템에서는 다룰 수 없었던 새로운 과학 분야를 개발하기 위한 가능성을 열어 놓았다. 이러한 눈부신 발전에도 불

구하고 SPM은 시료 표면에 위치한 단 원자의 화학적 성분은 분석할 수 없다는 유일한 단점을 가지고 있다. 최근 고속 주사 및 고 해상도를 위한 연구는 많이 진행되어 오고 있지만 화학적 성분 분석 능력을 가진 새로운 개념의 현미경 구조에 대한 연구는 현재 미진한 편이다. 화학적 성분 분석을 위해 이용하는 방법은 1990년 초 니시카와^[10]에 의해 제안된 주사형 원자 탐침(scanning atom probe, SAP)과 스펜스^[11]에 의해 제안된 주사형 터널링 현미경(scanning tunneling microscope, STM) 기술에 원자 탐침(AP) 기술을 결합시키는 방법이다. 두 방법이 전통적인 AP 기술의 단점을 해결할 수 있는 장점을 가지지만, 형상과 화학적 성분 분석을 동시에 실행하기 위한 궁극적인 현미경의 목적에는 적합하지 않다. SAP에서의 첫 번째 문제는 다음과 같다. 비록 샘플을 팁의 구조로 만드는 것은 아니지만 전계증발을 실행시키기 위하여 샘플표면이 병렬 마이크로 팁의 구조를 가져야 하며, 두 번째는 주사 전극의 중심이 마이크로 팁 구조물의 바로 위에 정렬시키는 것이 필수적이다. 보다 정확한 정렬을 위해서는 SAP 챔버 내부에 전자 현미경을 집적화하는 등의 복

전남대학교 기계시스템공학부 (Dept. Mechanical Systems Engineering, Chonnam National University)

[†]Corresponding author: mems@chonnam.ac.kr

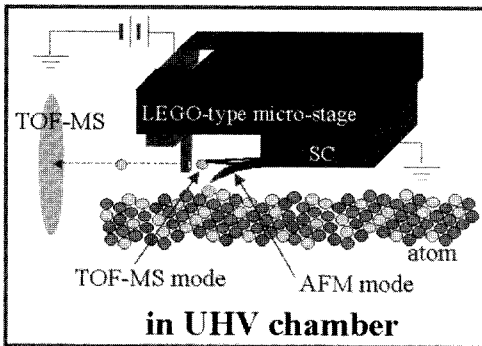
(Received : January 12, 2005, Accepted : January 17, 2005)

잡한 시스템의 설계가 필요하다. 그리고 궁극적으로 SAP는 구조상 SPM의 목적으로는 적합하지 않다. 스펙스에 의하여 제안된 접근 방법은 비행시간형 질량분석기(time-of-flight mass spectroscope, TOF-MS)와 STM의 기능을 결합한 주사형 터널링 원자 탐침(scanning tunneling atom probe, STAP) 시스템이다. STAP의 구성은 이동식 샘플 스테이지가 없는 전통적인 STM과 거의 비슷하지만, 구조상 연속적인 화학적 성분 분석을 할 수 없고 샘플 지지대를 원래의 위치로 돌리는데 많은 시간을 필요로 하는 등의 비교적 많은 문제점을 가지고 있다.

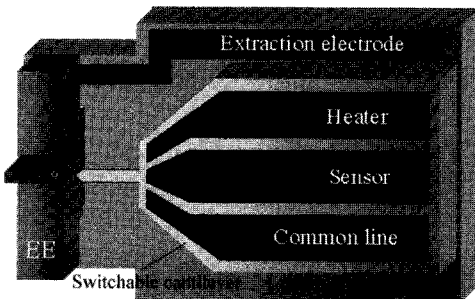
2. CS-SFM 이론

본 논문에서는 화학적 성분 분석 능력을 가진 CS-SFM(chemically sensitive scanning force microscope) 응용을 위해 초소형기계전자시스템(microelectromechanical system, MEMS) 제작 기술을 이용할 것을 제안한다. MEMS 기술을 바탕으로 제작된 캔틸레버형 소자는 자체 구동을 위한 초소형 바이몰프형 구동기와 캔틸레버의 미소 변위 변화를 검출하기 위한 압저항형 스트레인 센서가 소자 내부에 집적화 되어 있어 스위칭 소자로 이용이 가능하다. MEMS 기술로 제작된 초소형 스위칭 소자는 두 개의 서로 다른 시스템이 가지는 장점을 동시에 이용하는 것을 가능하게 한다. 또 다른 장점으로는 캔틸레버 끝에 형성된 팁과 진극 사이의 거리를 $10\ \mu\text{m}$ 이하로 설계하므로 이온방출에 필요한 전압을 줄일 수 있으며, 그리고 SFM과 TOF-MS의 각 모드에서의 작동에서 다른 모드로 전환하는데 필요한 시간을 이상적으로 줄일 수 있다. 새로운 개념의 CS-SFM은 MEMS 기술을 이용하므로 실현가능 할 것으로 기대되며, 샘플 표면의 3차원 형상과 각 원자의 화학적 성분분석을 할 수 있는 매우 소형화된 시스템의 제안을 가능하게 한다. 그림 1은 10^{-10} Torr 정도의 초고진공 챔버 내부에 장착된 CS-SFM 시스템의 구성과 캔틸레버형 소자의 개략도를 보여준다. CS-SFM은 단 원자들의 화학적 성분을 분석하기 위해 제안된 TOF-MS 시스템과 원자 스케일에서 샘플표면의 형상을 만드는 전통적인 SFM 시스템을 기초로 설계 및 제작되었다. 그림 2-a의 개략도와 같이 구동기가 집적화된 캔틸레버는 서로 다른 물질의 열팽창 계수의 차이를 이용하는 바이몰프 구조를 기초로 하여 설계하였으며, 구동효율을 최대화하기 위하여 실리콘과 알루미늄의 두께비를 최적화하였다. 그리고 바이몰프형 구동기가 형성된 영역의 실리콘을 V형으로 식각하여 캔틸레버 길이 방향의 병렬 홈을 형성하므로 실질적인 구동기의 길이를 증가시키는 효과를 가져 구동효율 향상에 도움을 준다. 압저항형 응력센서를 캔틸레버 내부에 집적화하는 방법을 선택하므로 종래의 레이저를 이용하여 캔틸레버의 변위를 측정하는 시스템에 비해 전체적으로 상당히 간략하게 만들 뿐만 아니라 변위센서의 감도를 올리기 위해 캔틸레버의 끝부분에 레이저의 초점을 올리는 등의 시간이 불필요하므로 시스템 초기화에 필요한 시간을 줄일 수 있다. 그림 2-b는 외부에서 캔틸레버의 끝부분에 응력이 인가되었을 때 받는 응력 분포의 FEM 해석결과를 보여준다. 압저항형 변위센서는 캔틸레버의 압저항 감도를 증가시키는 영역인 캔틸레버의 고정된 끝의 가장자리에 형성되었다. 캔틸레버의 모드 변형을 위해 바이몰프형 구동기에 전력을 공급할 때, 팁 영역에서의 원하지 않은 열 확산을 방지하기 위해 비교적 큰 홈이 팁과 바이몰프형 구동기 사이에 형성되었다. 캔틸레버 위에 형성된 실리콘 질화막

chanical system, MEMS) 제작 기술을 이용할 것을 제안한다. MEMS 기술을 바탕으로 제작된 캔틸레버형 소자는 자체 구동을 위한 초소형 바이몰프형 구동기와 캔틸레버의 미소 변위 변화를 검출하기 위한 압저항형 스트레인 센서가 소자 내부에 집적화 되어 있어 스위칭 소자로 이용이 가능하다. MEMS 기술로 제작된 초소형 스위칭 소자는 두 개의 서로 다른 시스템이 가지는 장점을 동시에 이용하는 것을 가능하게 한다. 또 다른 장점으로는 캔틸레버 끝에 형성된 팁과 진극 사이의 거리를 $10\ \mu\text{m}$ 이하로 설계하므로 이온방출에 필요한 전압을 줄일 수 있으며, 그리고 SFM과 TOF-MS의 각 모드에서의 작동에서 다른 모드로 전환하는데 필요한 시간을 이상적으로 줄일 수 있다. 새로운 개념의 CS-SFM은 MEMS 기술을 이용하므로 실현가능 할 것으로 기대되며, 샘플 표면의 3차원 형상과 각 원자의 화학적 성분분석을 할 수 있는 매우 소형화된 시스템의 제안을 가능하게 한다. 그림 1은 10^{-10} Torr 정도의 초고진공 챔버 내부에 장착된 CS-SFM 시스템의 구성과 캔틸레버형 소자의 개략도를 보여준다. CS-SFM은 단 원자들의 화학적 성분을 분석하기 위해 제안된 TOF-MS 시스템과 원자 스케일에서 샘플표면의 형상을 만드는 전통적인 SFM 시스템을 기초로 설계 및 제작되었다. 그림 2-a의 개략도와 같이 구동기가 집적화된 캔틸레버는 서로 다른 물질의 열팽창 계수의 차이를 이용하는 바이몰프 구조를 기초로 하여 설계하였으며, 구동효율을 최대화하기 위하여 실리콘과 알루미늄의 두께비를 최적화하였다. 그리고 바이몰프형 구동기가 형성된 영역의 실리콘을 V형으로 식각하여 캔틸레버 길이 방향의 병렬 홈을 형성하므로 실질적인 구동기의 길이를 증가시키는 효과를 가져 구동효율 향상에 도움을 준다. 압저항형 응력센서를 캔틸레버 내부에 집적화하는 방법을 선택하므로 종래의 레이저를 이용하여 캔틸레버의 변위를 측정하는 시스템에 비해 전체적으로 상당히 간략하게 만들 뿐만 아니라 변위센서의 감도를 올리기 위해 캔틸레버의 끝부분에 레이저의 초점을 올리는 등의 시간이 불필요하므로 시스템 초기화에 필요한 시간을 줄일 수 있다. 그림 2-b는 외부에서 캔틸레버의 끝부분에 응력이 인가되었을 때 받는 응력 분포의 FEM 해석결과를 보여준다. 압저항형 변위센서는 캔틸레버의 압저항 감도를 증가시키는 영역인 캔틸레버의 고정된 끝의 가장자리에 형성되었다. 캔틸레버의 모드 변형을 위해 바이몰프형 구동기에 전력을 공급할 때, 팁 영역에서의 원하지 않은 열 확산을 방지하기 위해 비교적 큰 홈이 팁과 바이몰프형 구동기 사이에 형성되었다. 캔틸레버 위에 형성된 실리콘 질화막



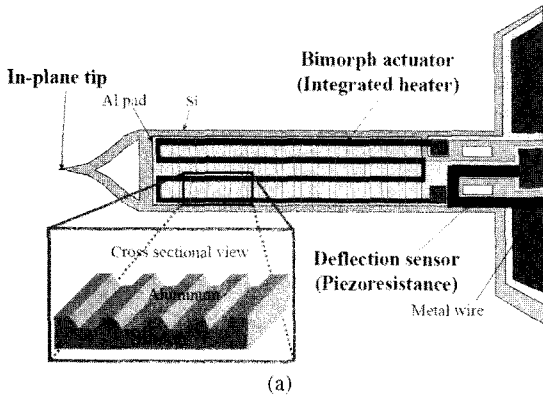
(a)



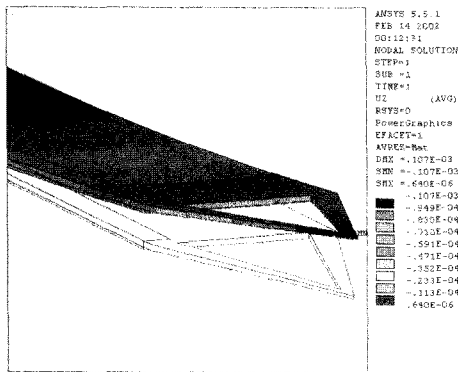
(b)

Fig. 1. (a) TOF-SFM basic concept and (b) switchable cantilever, extraction electrode and microstage-assembly concept.

그림 1. (a) TOF-SFM의 구조도, (b) 액츄에이터가 집적화된 캔틸레버, 방출전극, 그리고 마이크로 스테이지의 집적화를 위한 개략도



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Schematic layout of the switchable cantilever and (b) finite element method simulation result

그림 2. (a) 액튜에이터가 직접화된 캔틸레버의 구조도, (b) 유한요소법에 의한 응력해석 결과

층의 응력 조절에 의해 팁은 20°의 각도로 휘어져 있으며 이 결과로 SFM 모드에서 팁의 끝이 샘플의 표면에 접근하는 것이 편리하게 된다. CS-SFM의 전체적인 동작순서의 다음과 같다. 먼저 팁은 샘플표면을 전체적으로 주사하여 표면의 3차원적 형상을 이미지화 한다. 그 이미지를 통하여 화학적 성분 분석이 필요한 부분이 있는 경우 팁은 종래의 SFM의 벡터주사 기술을 이용하여 팁의 위치를 원하는 지역으로 이동시키고 난 후, 이온중발 등의 방법을 이용하여 샘플표면에서 원하는 원자를 팁의 끝으로 이동시킨다. 그 다음 직접화된 바이몰프형 구동기를 이용하여 팁 끝의 위치를 SFM 모드에서 TOF-MS 모드로 전환시키고 강한 바이어스를 방출 전극에 인가하므로 샘플로부터 이동된 원자를 다시 팁에서 이온 검출기로 날려 보낸다. 이온이 날라가는 시간은 원자의 질량과 인가된 전압에 관계하므로 간단한 식을 이용하여 방출된 이온의 화학적 성분은

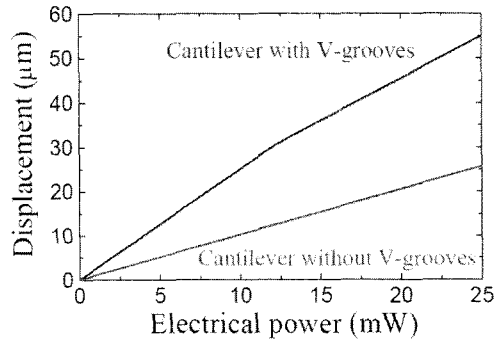


Fig. 3. Tip deflection vs. electrical power for bimorph actuation.

그림 3. 인가전력에 따른 바이몰프 구동기의 팁 변위특성

작성된 테이블을 이용하여 분석하는 것이 가능하다. 캔틸레버형 소자의 제작과 관련하여서는 참고문헌 12에 비교적 상세하게 기술되어 있다.

3. 실험방법 및 결과

그림 3은 바이몰프 구동기에서 인가 전력에 따른 캔틸레버 팁 끝에서의 변위 특성을 보여준다. 신호발생기를 이용하여 사각파를 발생시키고 구동전력을 증가시키면서 바이몰프 구동기를 10 Hz의 주파수에서 작동시켰다. 팁 끝부분에서 얻어진 최대 변형은 60 μm 정도이며 이때 인가된 전력은 약 25 mW이다. V 형태의 홈이 형성된 캔틸레버는 구조물이 형성되어 있지 않은 바이몰프형 구동기에 비해 약 두 배 정도의 큰 변위 특성을 보여줌을 그래프로부터 알 수 있다. 인가된 전력에 따른 히터의 예측 온도는 Al의 녹는점(660 °C)을 통하여 예측하는 것이 가능하다. 최대 변위 때의 온도는 약 150 °C 정도로 이때의 변위 크기는 FEM을 통한 컴퓨터 해석 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 바이몰프형 구동기에서 Al 용융은 110 mW 정도에서 시작되었으며 이 현상은 고배율 현미경을 통하여 관찰하는 것이 가능하다. 그림 4는 캔틸레버의 1차 공진점을 찾기 위한 시스템의 제작(a)과 1차 공진 모드 부근의 주파수에서 구동되는 캔틸레버의 광학현미경 사진(b)을 보여준다. 제작된 캔틸레버를 0.5 mm 두께의 압전 구동기 위에 접착제를 이용하여 고정된 다음, 자작 전압증폭기를 이용하여 약 150 V로 증폭하여 구동하였다. 공진점에서 벗어나서 압전 구동기를 작동시킬 경우 광학사진에서와 같이 변위의 변화는 관측되지 않았으나, 1차 공진점에 가까운 주파수로 접근되면서 캔틸레버의 변위가 급격하게 증가됨을 알 수 있다. 측정된 1차 공진주

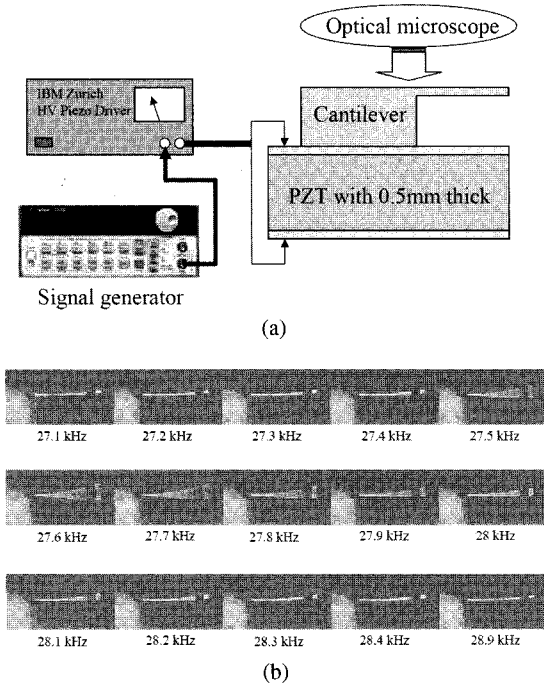


Fig. 4. (a) Experimental setup and (b) frequency response of the SC with V-grooves

그림 4. (a) 측정 시스템의 개략도, (b) 캔틸레버 구동에 따른 변위의 주파수 응답특성

파수는 27.6 kHz이며, 집적화된 압저항 소자의 $\Delta R/R$ 감도는 $6.7 \times 10^{-7}/\text{nm}$ 로 비교적 높은 감도를 보여 준다. 최대 스위칭 속도를 알기 위해 25 mW의 구동 전력을 가지고 1 Hz에서 20 kHz까지 주파수를 변환시키면서 집적화된 저항체에 인가하였다. 바이몰프형 구동기의 변위를 측정된 결과 10 kHz 부근에서 급격히 변위가 감소됨을 알 수 있었으며 이는 발열 소자 냉각에 필요한 시간을 충분히 가지지 못하여 발생하는 것으로 판단되나 측정된 ~ 10 ms의 스위칭 속도는 초기 CS-SFM 시스템 구현에 있어서 이미 충분히 만족함을 알 수 있다. 그림 5는 제작된 캔틸레버를 이용하여 임의의 샘플 위를 주사하여 만든 형상이미지이다. 비 접촉방식을 이용하였으며 팁 끝과 샘플원자 사이에 발생하는 힘을 측정하기 위하여 집적화된 압저항형 응력센서를 이용하였다. 먼저 캔틸레버를 고유 진동주파수 부근에서 외부의 압전 구동기를 이용하여 일정한 진폭으로 진동을 시키고, 외부에서 팁으로 인가되는 힘의 크기 변화에 따라 비례하여 발생하는 진동주파수의 이동은 압저항체의 저항변화로 감지된다. 저항 변화는 다시 외부에 형성된 휘스톤브릿지 회로를 통하여 전압의 변화로 나

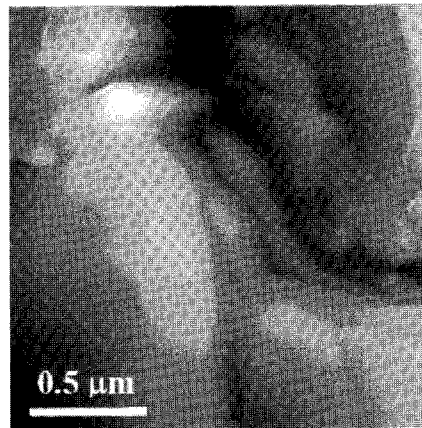


Fig. 5. Topographic image of a standard sample for AFM calibration imaged by a switchable cantilever with piezoresistive strain sensor.

그림 5. 집적화된 스트레인 센서를 이용하여 형상화한 표준샘플의 표면 이미지

타나며 이 변화값을 피드백 회로를 통하여 압전 구동기를 제어하므로 캔틸레버를 항상 일정한 진동주파수로 진동하게 하는 것을 가능하게 함과 동시에 압전 구동기 제어에 이용되는 전압을 이용하여 샘플의 3차원 표면 형상 이미지를 만들 수 있다. 다음은 인가된 전압에 따른 팁으로부터 전자방출 현상을 실험하기 위해서 팁의 위치를 바이몰프형 구동기를 이용하여 TOF-MS 모드로 전환하였다. 먼저 방출전극에 양의 전압을 서서히 증가시켜 팁으로부터 방출되는 에미션 전류를 측정하였다. 고 진공에서 팁으로부터 방출된 에미션 전류는 그림 6-a에서와 같이 전압의 함수에 따른 에미션 전류의 크기로 나타내는 것이 가능하다. 본 실험에서는 서로 다른 재료의 두 개의 팁이 이용되었으며 실리콘 팁 보다는 백금이 코팅된 팁의 경우가 더욱 더 낮은 전압에서 전자를 방출시키는 것이 확인되었으나 이 현상은 일 함수의 차이에 의해 나타난 것으로 보여진다. 그림 6-b는 전류-전압 곡선에 의한 Fowler-Nordheim의 그래프를 보여주며 이 결과를 통하여 누설전류가 아닌 에미션 전류임을 확인 할 수 있다. MEMS로 제작된 방출전극이 아닌 경우에는(팁-전극간의 거리: 1 mm) 기존의 시스템과 비슷하게 약 1000 V에서 에미션 전자가 검출되었으며, 상대적으로 낮은 전압에서 에미션 전자가 검출된 것은 10 μm 보다 짧은 팁-전극간의 거리, 10 nm 이하의 팁 곡률반경 그리고 백금의 낮은 일 함수에 의한 결과로 예측된다. 에미션 전류의 측정은 팁으로부터의 이온방출에 필요한 전압을 예측하기 위하여 필요하며 본 실험에서 나타난 결과로 수 백 볼트 정

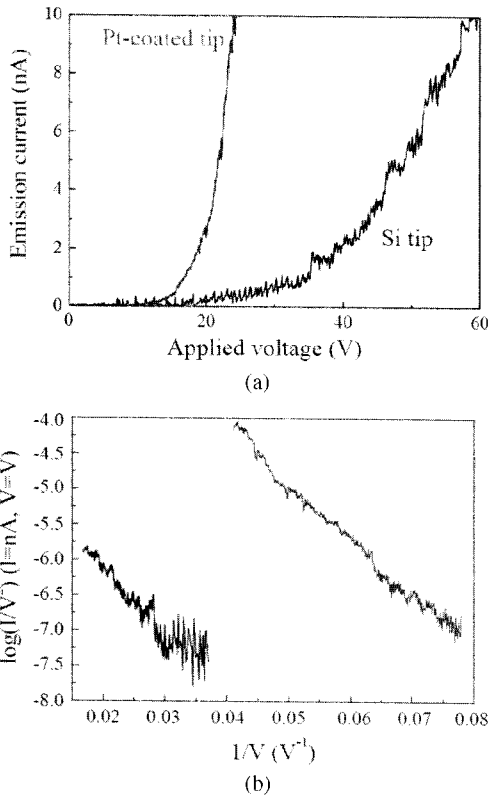


Fig. 6. (a) Emission current vs. voltage characteristics of Pt-coated tip and Si tip, and (b) Fowler-Nordheim plot.

그림 6. (a) 실리콘과 백금팁의 인가전압에 따른 에미션 전류 특성 그래프, (b) Fowler-Nordheim 그래프

도의 비교적 낮은 전기장에서 이온을 방출 시킬 수 있다는 것을 알 수 있으며 이는 간단한 CS-SFM을 만들기 위한 높은 흥미를 유발시킨다. 마지막으로 CS-SFM의 동작을 검증하기 위해 백금으로 코팅된 팁을 가지고 TOF-MS의 실험을 수행하였다. 먼저 기본적으로 샘플의 표면을 형상을 3차원으로 이미지화 하였으며, 그 다음 팁 끝의 위치를 TOF-MS의 이온검출기 정면으로 향하게 위치를 바꾸었다. 팁-이온검출기 사이에 인가된 일정 바이어스 아래에서 방출전극에 Biuimlein-type nanosecond pulser를 사용하여 몇 번의 네거티브 펄스 전압을 인가하였다. 초기 네거티브 펄스 진폭을 포지티브 직류 전압 값의 20~30%에 설정하고, 팁에 인가된 포지티브 직류 전압 값을 일정하게 유지하면서 방출전극에 인가된 네거티브 펄스 진폭을 첫 번째 이온충돌이 이온검출기에서 발견될 때까지 서서히 증가시켰다. 주어진 전계가 이온을 방출시키기에 충분할 경우, 백금

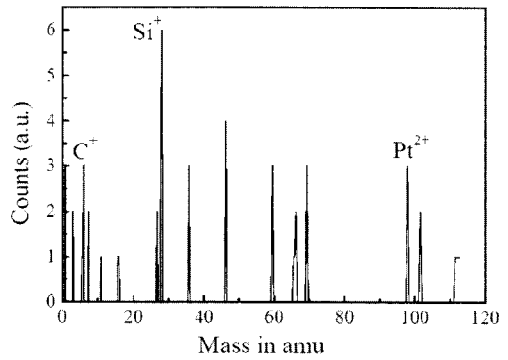


Fig. 7. Mass spectrum of the switchable cantilever with a Pt-coated tip.

그림 7. 이온방출 후 측정된 백금 팁의 질량분석 그래프

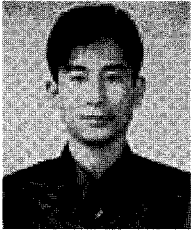
팁으로부터 방출된 이온은 그라운드로 설정된 이온검출기를 향해 주어진 전계를(800 V) 따라서 비행하고, 최종적으로는 이온검출기에 물리적으로 충돌하여 도착을 알린다. 팁의 끝에서 방출된 시간(t_0)과 이온검출기에 도달된 시간(t) 그리고 인가된 전압을 Lab view를 이용하여 제어하고 방출된 이온을 테이블로 분석하므로 방출된 원자의 화학적 성분을 분석하는 것이 가능하며 그 결과는 그림 7과 같다. TOF-MS로 화학적 성분을 측정하는 동안의 챔버 진공도는 $\sim 3 \times 10^{-10}$ Torr이었으며, 방출전극에 인가된 $V_{pulse} = -204$ V, 팁에 인가된 $V_{dc} = 800$ V, 그리고 전체적으로 30 펄스가 방출전극에 인가 되었다. 설계된 CS-SFM 시스템의 싱글이온 검출 능력은 약 60%이다. 백금으로 코팅된 팁으로부터 방출된 이온들은 $Pt^{2+}(97.5)$, $Si^+(28)$ 그리고 $C^+(12)$ 가 검출되었으며 탄소계열이 검출되는 것은 백금을 코팅하기 위하여 진공 중에서 이온빔 증착기를 이용하였기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문은 고체 샘플의 표면에서 연속적인 3차원 형상 분석과 화학적 성분 분석을 동시에 할 수 있는 새로운 개념의 원자현미경 CS-SFM의 개념도와 기본적인 실험 결과를 보여주었다. MEMS 기술을 이용하여 제안된 캔틸레버형 소자는 수 많은 장점을 가지지만 그 중에서도 10 ms 이하의 구동속도에서 서로 다른 두 시스템을 연결하는 것이 가능하게 하는 것을 실험적으로 증명하였다. 끝으로 본 논문에서 제안된 MEMS-based CS-SFM 시스템은 반도체 산업, 생물학, 물리학, 표면과학 등과 관련된 다양한 학문 분야에서 획기적인 도움을 줄 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] G. Binning, H. Rohrer, C. Gerber, and E. Weibel, "7×7 reconstruction on Si (111) resolved in real space", *Phys. Rev. Lett.*, 50, pp. 120-123, 1983.
- [2] G. Binning, C. F. Quate, and C. Gerber, "Atomic force microscopy", *Phys. Rev. Lett.*, 56, pp. 930-933, 1986.
- [3] D. M. Eigler and E. K. Schweizer, "Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope", *Nature*, 344, pp. 524-526, 1990.
- [4] M. F. Crommie, C. P. Lutz, and D. M. Eigler, "Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface", *Science*, 262, pp. 218-220, 1993.
- [5] M. F. Crommie, C. P. Lutz, D. M. Eiger, and E. J. Heller, "Waves on a metal surface and quantum corrals", *Surf. Rev. Lett.*, 2, pp. 127-137, 1995.
- [6] R. Wiesendanger, "Scanning probe microscopy and spectroscopy", Cambridge Press, Cambridge, 1994.
- [7] H. Tanaka and T. Kawai, "STM observation of cop-per-phthalocyanine and nucleic acid base molecules on reduced SrTiO₃ (100) and Cu(111) surfaces", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 1 35, pp. 3759-3763, 1996.
- [8] J. K. Spong, H. A. Mizes, L. J. LaComb, Jr., M. M. Dovek, J. E. Frommer, and J.S. Foster, "Contrast mechanism for resolving organic molecules with tunneling microscopy", *Nature*, 338, pp. 137-139, 1989.
- [9] <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html>.
- [10] O. Nishikawa and M. Kimoto, "Toward a scanning atom probe - computer simulation of electric field -", *Appl. Surf. Sci.*, 76/77, pp. 424-430, 1994.
- [11] J. C. H. Spence, U. Weierstall, and W. Lo, "Atomic species identification in scanning tunneling microscopy by time-of-flight spectroscopy", *J. Vac. Sci. Technol.*, B 14, pp. 1587-1590, 1996.
- [12] D. W. Lee, M. Despont, U. Drechsler, C. Gerber, P. Vettiger, A. Wetzel, R. Bennewitz, and E. Meyer, "Switchable cantilever fabrication for a novel time-of-flight scanning force microscope", *Microelectron*, 67-68, pp. 635, 2003.



이 동 원 (李 東 原)

- 1996년 경일대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1998년 영남대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 2001년 일본 동북대학 기계전자공학과 졸업(공학박사)
- 2004년 IBM 연구소 박사후연구원
- 2004년 ~ 현재 전남대학교 조교수
- 주관심분야 : 마이크로나노시스템, 바이오 멤스, 능동형 캔틸레버 소자