

전자빔 조사에 의한 탄소상 탐침의 성장

김성현* · 최영진

경기도 평택시 진위면 마산리 455-6, 전자부품연구원, 나노정보에너지연구센터
(논문접수일 : 2002년 11월 11일)

Carbon tip growth by electron beam deposition

sunghyun-kim* · Young Jin Choi ·

*Nano-technology based information & Energy Storage Research Center, Korea Electronics Technology Institute, 455-6,
MaSan-Ri, JinWi-Myon, PyungTaek-Si, KyungGi-Do, Korea*

(Received Nov. 11, 2002)

요 약

주사전자현미경을 이용한 전자빔의 직접조사에 의해 실리콘 캔틸레버 위에 탄소상 탐침을 성장하였다. 오일확산 펌프의 잔류가스 분위기에서 실리콘 캔틸레버와 전자빔을 수직으로 정렬한 다음 전자현미경의 스폿 모드를 통해 전자빔을 일정시간 동안 조사시켜 탄소상 탐침을 성장시켰다. 주사전자현미경의 제어변수인 조사시간, 가속 전압, 방출 전류, 전자빔 프로브 전류 등을 변화시킴으로써 다양한 종횡비를 가지는 탐침을 성장시킬 수 있었으며, 성장 위치의 표면 형상과 무관하게 탐침을 성장시킬 수 있었다. 그 결과 유효길이 0.5 μm , 바닥직경 90 nm, 콘의 반각 3.5°인 탐침을 성장시켰다. 탐침이 없는 캔틸레버에 고종횡비 탄소상 탐침을 성장시킬 수 있는 기술은 PZT 박막구동기가 집적화된 AFM 캔틸레버의 탐침 형성 과정에서 발생하는 제작과정의 번거로움을 극복하는데 적용될 수 있다.

주제어 : 원자현미경, 주사전자현미경, 캔틸레버, 탄소상 탐침

Abstract

Carbon tips were grown on Si cantilevers by applying an electron beam to them directly with Scanning Electron Microscope. A carbon tip was fabricated by aligning the electron beam directly down the vertical axis of Si cantilever and then irradiating a single spot on the cantilever for a proper time in the dominant atmosphere of residual gases generated by the oil of the diffusion pump. A number of control parameters for SEM, including exposure time, acceleration voltage, emission current, and beam probe current, were allowed to make various aspect ratio feature. The growth of carbon tips was not affected by the surface morphology of substrates. We could acquired the tip whose effective length is 0.5 μm , bottom diameter is 90 nm and cone half angle 3.5°. The growth technique of the high aspect ratio carbon tips on the tip-free cantilevers is available to reduce the complexities of fabricating sub-micron scale tips on the PZT thin film actuator integrated AFM cantilevers.

Key Words : AFM, SEM, Cantilever, Carbon tip

1. 서 론

AFM이 갖는 낮은 측정속도는 AFM이 산업용 측정장치로 보급되는 데에 걸림돌로 작용하고 있다. 일반적으로 AFM 캔틸레버가 시편 표면을 주사하는 속도는 AFM의 되먹임 시스템의 속도에 의해 결정되는데, 되먹임회로의 속도는 캔틸레버 수직방향 구동기의 공진주파수에 의해 제한된다. 따라서 AFM 영상을 얻는 시간을 단축하기 위해서는 캔틸레버 수직방향 구동기의 공진주파수를 향상시키는 것이 필수적이다. 일반적인 AFM 시스템에서는 공진주파수가 1kHz 미만인 피에조 튜브를 캔틸레버 수직방향 구동기로 사용하고 있고, 좀더 진보된 형태의 AFM 시스템의 경우 10kHz 부근의 공진주파수를 가지는 판 형태의 피에조 접합체를 사용하고 있다. 그러나 단일 캔틸레버의 주사 속도가 증대하더라도 전체 시스템의 영상획득 시간은 다른 측정장비에 비해 현저히 느리다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 다수의 캔틸레버를 동시에 작동시켜 병렬적으로 영상정보를 획득함으로써 AFM의 측정속도를 획기적으로 개선하고자 하는 시도가 진행되어 오고 있다. 이 경우 개개의 캔틸레버에 수직방향 구동기를 부착하는 것은 불가능해지므로 캔틸레버에 박막형으로 수직방향 구동기를 집적화하는 것이 필수적이다. 초기에는 ZnO 계열이 주로 연구되어 왔으나, 최근에는 여러 가지 물성 측면에서 우수한 PZT 계열의 박막을 이용하여 100kHz 이상의 공진주파수를 갖는 수직방향 구동기를 집적화하려는 시도가 진행되어 오고 있다 [1]. 그러나, PZT 박막 구동기를 집적화하는 경우, 일반적으로 팁을 먼저 형성한 후 PZT 박막구동기를 제작함으로써 공정 중에 팁이 손상되는 경우가 발생하고, 이를 방지하려면 여러 단계의 팁 보호 공정을 도입하거나 전체 공정 후 탐침을 FIB(Focused Ion Beam)를 이용하여 선택적으로 식각하는 방법을 사용해야 한다. 이러한 경우 전체적인 공정이 복잡해질 뿐 아니라 캔틸레버 제작비용의 상승을 초래하게 된다. 따라서 PZT 박막구동기 제작공정에 영향을 받지 않으면서, 기존 캔틸레버의 탐침 정도의 날카로움을 유지할 수 있는 간단한 팁 제작 기술의 개발은 PZT 박막구동기가 집적화된 캔틸레버 제작에 있어서 진일보한

방식이라고 할 수 있다.

전자빔을 조사하여 탄소상 탐침을 성장하는 연구는 90년대 초부터 이루어져 왔다. 초기에는 제작 재현성이 낮은 STM의 금속계 탐침에 대응하기 위해서 연구가 되었으나 [2], AFM의 해상도를 높이기 위한 탐침 세밀화에 대한 요구로 인해 AFM 탐침으로의 적용 가능성에 대한 연구로 확대되어 왔다 [3-4].

AFM이 급속도로 발전하는 반도체 산업에 측정 장비로 진입하기 위해서는 미세하고 깊이가 깊은 선평에 대한 정확한 측정이 요구되는데, 이 요구를 충족시키기 위해 탄소나노튜브를 AFM의 탐침으로 사용하려는 시도가 널리 진행되고 있다 [5-8]. 그러나 열기상증착법(CVD)을 이용한 탄소나노튜브 성장 방식은 캔틸레버 전체를 고온에서 열처리하므로 이 과정에서 PZT 박막구동기의 압전 물성이 사라지게 된다.

본 연구에서는 국부적으로 전자빔을 조사하여 캔틸레버의 다른 물성은 변화시키지 않으면서, 기존의 상용 캔틸레버 수준의 날카로움을 유지하고, 깊은 홈 구조 측정이 가능하도록 고종횡비를 가지는 탄소상 탐침을 성장시킬 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

2. 실험 방법

오일확산펌프를 이용하여 배기되는 전자현미경에서 오일의 역류로 인한 잔류가스에 의해 탄소계 물질이 시편 표면에 성장한다는 보고에 기반하여, Topcon사의 SM-300 모델 전자현미경의 배기 장치를 터보분자펌프에서 오일확산펌프로 개조하여 30 kV 까지 전자빔을 가속할 수 있도록 장치를 꾸몄다 [9]. 또한 터보분자펌프가 장착되어 있는 Licca사의 Stereoscan 420 모델 전자현미경을 준비하여 오일 잔류 가스 존재 유무에 따른 탐침성장의 거동을 비교 분석하고자 하였다. 두 대의 전자현미경의 진공도는 모두 5×10^{-6} Torr로 설정하였다. 탐침 성장을 위한 기판으로는 팁 끝이 매우 샤프한 캔틸레버와 팁 끝이 완만한 캔틸레버 및 탐침이 없는 캔틸레버 등 세 종류의 캔틸레버를 준비하였다. 그림 1에서는 준비된 캔틸레버의 탐침 끝을 보여준다.

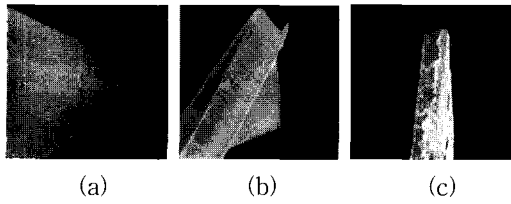


그림 1. 준비된 캔틸레버의 탐침 형상
 (a) 팁 끝 반지름 10 nm 이하인 캔틸레버
 (b) 팁 끝 반지름 100 nm 이상인 캔틸레버
 (c) 팁이 없는 캔틸레버

성장 제어 변수로 전자빔의 가속전압, 방출 전류, 프로브 전류, 배율, 작동거리(WD), 캔틸레버 접촉제 종류(카본풀, 은풀, 카본테이프), 조사시간 등을 설정하여 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

먼저 터보분자펌프 진공 분위기에서 가속전압 10~30kV까지 가변하고 방출 전류 100~120 μ A, WD 5~10 mm, 조사시간 5~10분, 프로브 전류 1~120 pA, 배율 30,000~50,000배의 조건으로 전자빔을 준비된 캔틸레버에 조사하는 경우 그림 2에서처럼 전도성이 떨어지는 물체에 높은 가속전압으로 전자빔을 조사 할 때 생기는 일반적인 시료 손상을 제외하고는 어떤 변화도 일어나지 않았다.

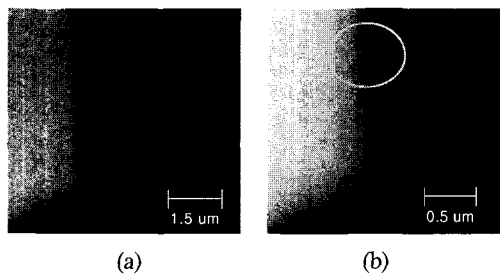


그림 2. 오일잔류가스가 없는 분위기에서의 전자빔 조사 효과 (팁 끝이 완만한 캔틸레버 기관의 경우)

- (a) 전자빔 조사 전(탐침 측면 영상).
- (b) 가속전압 30 kV, 방출전류 120 μ A, WD 5mm, 프로브 전류 90 pA, 배율 30,000배에서 5분간 전자빔 조사 후(탐침 측면 영상).

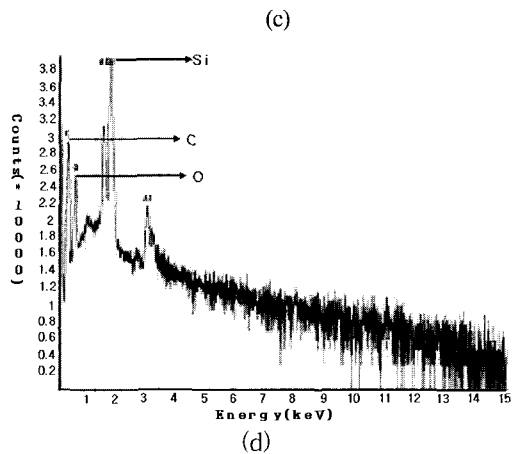
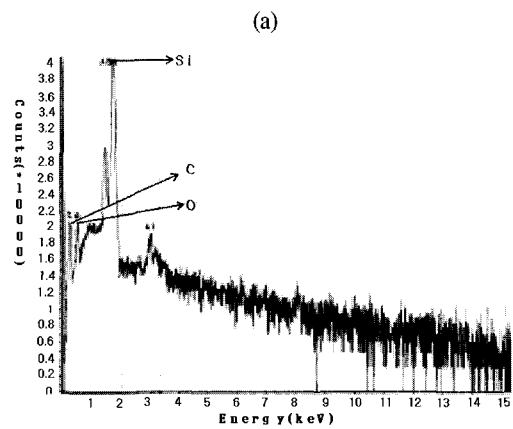
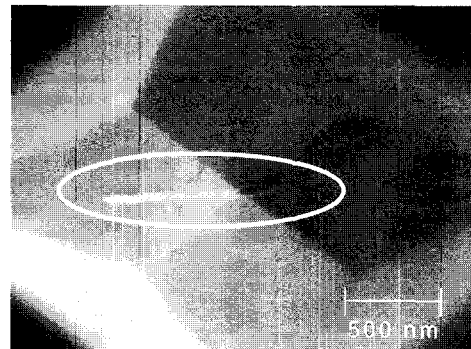


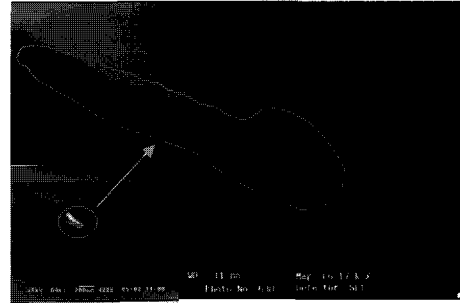
그림 3. 오일잔류가스가 존재하는 분위기에서의 전자빔 조사 효과.

- (a) 연속적으로 5분 동안 한 위치를 전자빔으로 조사했을 때 전자의 대전(charge-up)효과로 인해 시료가 이동하면서 성장한 모습(탐침 정면 영상).
- (c) 전자빔 조사 전 EDX 분석.
- (d) 전자빔 조사 후 EDX 분석.

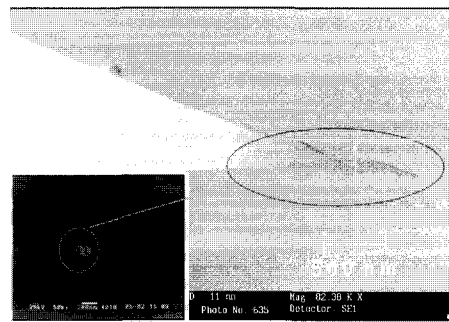
그러나 그림 2와 동일한 전자빔 조사 조건에서 오일확산펌프 진공 분위기로 바꾸어 실험을 진행하였을 때 그림 3의 (a)는 단순한 시료의 손상이 아닌 특정 물질이 성장한다는 것을 알 수 있었다. 이 때 성장물질의 물성을 파악하기 위하여 성장 전후의 기판에 대해서 그림 3의 (c), (d)와 같이 EDX 정량 분석을 실시하였다. 그 결과 그림 3의 (d)에서와 같이 전자빔 조사 전에 측정된 탄소 신호보다 전자빔 조사 후에 측정된 성장물질의 탄소 신호가 현저히 증가함을 볼 수 있었고, 이로부터 탄소계 물질이 성장한 것으로 판단할 수 있었다. 이는 오일확산펌프 사용시 챔버 내의 잔류가스로 알려진 탄화수소, 산소, 일산화탄소, 물 등이 전자빔에 의해 열분해된 후 탄소계열의 물질이 기판에 증착된 것이라고 볼 수 있다 [2].

특정한 위치에서 장시간 전자빔을 조사하는 경우, 시료 표면에 전하가 축적되어 전자빔의 위치가 움직이게 된다 [10]. 이러한 대전효과에 의해 그림 3의 (b), 그림 4의 (a)와 같이 탐침의 특정 위치에 장시간 전자빔을 조사하면 탄소계 물질이 수평 방향으로 성장하는 경향을 나타내었다. 따라서 탄소계 물질을 탐침형태로 수직 성장시키기 위해서 전자빔을 연속적으로 조사하지 않고 짧은 시간 동안 전자빔을 조사한 후 전하가 충분히 빠져나간 후에 다시 조사하는 방식을 사용하였다. 전자빔을 30초의 간격으로 1분씩 4회, 30초씩 6회로 나눠 조사한 결과 그림 4의 (b)와 같이 길이가 1 μm 이르는 탄소상 탐을 성장시킬 수 있었다.

이러한 탄소상 탐침 성장방법을 AFM 팁 제작에 응용하기 위하여 팁이 없는 캔틸레버를 준비하여 캔틸레버의 끝단에 탄소상 탐침을 성장시킬 수 있는지를 확인하고자하는 실험을 수행하였다. 특히 AFM 팁으로 이용하기 위해서는 팁의 길이와 지름을 제어하는 것과 성장의 재현성을 확보하는 것이 관건이므로 전자현미경의 제어 파라미터 중 가속전압과 프로브 전류를 변경시키면서 탄소상 탐침의 성장거동을 관찰하였다. 이 때 전자현미경의 다른 제어변수인 배율, WD, 조사시간, 접착제, 방출전류 등은 각각 50,000배, 5 mm, 30초, 은플 접착제, 100 μA 등으로 고정시켰다. 그 결과 그림 5와 같이 팁이



(a)



(b)

그림 4. 전자빔 연속주사에 따른 대전효과.

- (a) 3분 동안 전자빔을 연속 조사했을 때 대전에 의해 전자빔의 미세 거동으로 탐침의 벽면을 따라 탄소상 물질이 성장한 형상.
- (b) 총 7분 동안 시간분할을 통해 탐침에 수직한 방향으로 탄소상 물질을 성장한 형상.

없는 평면에서도 탄소상 탐침이 잘 성장하는 것으로 판단되었고, 최적의 경우 바닥직경 90 nm이하, 길이 500 nm이상, cone angle 3.5° 이하의 중형비가 매우 큰 탐침 성장이 가능함을 확인하였다. 특히 일정한 가속전압 하에서는 프로브 전류량이 증가함에 따라 탐침의 길이가 증가하다가 어느 이상이 되면 더 이상 수직방향으로는 성장하지 않고 바닥직경이 커지는 경향을 보임을 알 수 있었다. 또한 프로브 전류를 고정시키고 가속전압을 증가시키는 경우 가속전압이 증가함에 따라 탐침의 길이가 증가하다가 어느 이상이 되면 더 이상 수직방향으로는 성장하지 않음을 관찰할 수 있었다. 따라서 전자빔의 가속전압과 프로브 전류를 제어함으로써 탐침의 길이와 바닥직경을 제어할 수 있다.

마지막으로 탄소상 탐침의 성장 재현성을 확인하기 위하여 가속전압 30 kV, 프로브 전류 5 pA, 작동거리 5 mm, 방출 전류 100 μ A, 배율 50,000배의 조건에서 그림 6과 같이 완전한 모양의 탐침을 가지는 캔틸레버의 탐 옆면에 탄소상 탐침을 수직으로 성장하였다. 바닥직경은 표면 상태에 따라 조금의 차이가 있지만 거의 비슷하게 나타났으며, 성장 길이 또한 매우 재현성 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

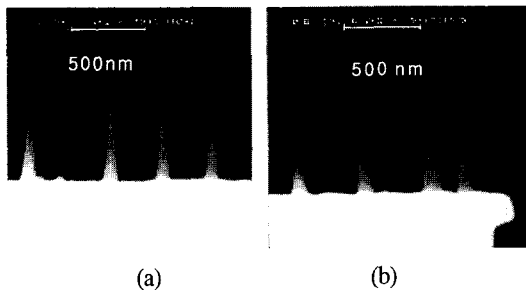


그림 5. 가속전압과 프로브 전류의 변화에 따른 탄소상 탐침의 성장 거동.

- (a) 가속전압을 25 kV 고정시키고 오른쪽부터 프로브 전류 각각 20 pA, 15pA, 10pA, 5 pA로 나누어서 전자빔을 조사했을 때 성장된 탐침의 형상.
- (b) 프로브 전류를 5 pA 고정시키고 오른쪽부터 가속전압 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV로 나누어서 전자빔을 조사 했을 때 성장된 탐침의 형상.

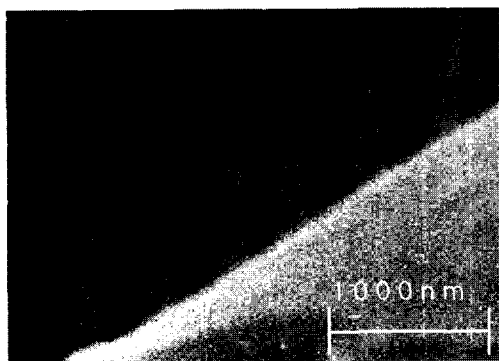


그림 6. 동일 조건에서 바닥직경과 성장길이의 재현성 구현 결과.

오일확산펌프 챔버 분위기에서 주사전자현미경의 전자빔을 제어함으로써 캔틸레버의 표면 형상과 무관하게 탄소상 탐침을 성장시킬 수 있음을 확인하였으며, 이 때 성장된 탐침은 기존의 AFM 탐침에 비해 높은 종횡비를 가질 수 있도록 제작이 가능함을 보여주었다. 또한 주사전자현미경의 제어 파라미터인 가속전압과 프로브 전류를 제어함으로써 탐침의 바닥직경과 유효길이를 원하는 만큼 제어할 수 있었다. 전자빔을 이용한 국부적인 탐침 성장은 캔틸레버의 다른 부위에 전혀 영향을 주지 않으면서 고종횡비의 탐침을 얻을 수 있으므로, PZT 박막구동기가 집적화된 캔틸레버에서 고종횡비의 탐침을 형성하는 공정에 적용될 수 있다. 특히 PZT 박막구동기가 집적화된 캔틸레버는 AFM의 측정속도를 획기적으로 개선하기 위한 캔틸레버 병렬구동에 있어서 핵심적인 요소이므로, 본 연구 결과는 미세하고 깊이가 깊은 반도체 선폭 측정을 위한 AFM이 산업용 측정장비로 진입하는데 있어서 일조할 것으로 기대된다.

후 기

주사전자현미경의 개조와 사용에 있어서 많은 도움을 주신 성우상사 조규명사장님께 감사드리며, SM-300 모델의 자유스러운 사용을 허락하신 충남대학교 김길무 교수님께 무한한 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- [1] H. J. Nam, S. M. Cho, Y. J. Yee, H. M. Lee, D. C. Kim, J. U. Bu, and J. W. Hong, *Integrated Ferroelectrics* **35**, 185 (2001).
- [2] Y. Akama, E. Nishimura, and A. Sakai, H. Murakami, *J. Vac. Sci. Technol. A* **8**, (1990).
- [3] M. Wendel, H. Lorenz, and J. P. Kotthaus, *Appl. Phys. Lett.* **67**, (1995).
- [4] M. Yanmaki, T. Miwa, H. Yoshimura, and K. Nagayama, *J. Vac. Sci. Technol. B* **10**, (1992).
- [5] E. Yenilmez, Q. Wang, R. J. Chen, D. Wang, and H. Die, *Appl. Phys. Lett.* **80**, (2002).
- [6] H. Dai, J. Hafner, A. Rinzler, D. colbert, and R.

전자빔 조사에 의한 탄소상 탐침의 성장

- Smalley, Nature(London) **384**, 147 (1996).
- [7] S. Wong, E. Joselevich, A. Woolley, C. Cheung, and C. Lieber, Nature(London) **394**, 52(1998).
- [8] H. Dai, N. Franklin, and J. Han, Appl. Phys. Lett. **73**, 1508(1998).
- [9] N. Miura, H. Ishii, J. Shirakashi, A. Yamada, and M. Konagai, Applied Surface Science **113/114**, 269 (1997).
- [10] R. D. Van Veld, and T. J. Shaffner, SEM Symposium, 19-24 (1971).