

< 논문 >

고성능 주사탐침열현미경 열전탐침 제작

김동립* · 김경태* · 권오명† · 박승호** · 최영기*** · 이준식****

(2005년 6월 21일 접수, 2005년 10월 17일 심사완료)

High Performance Thermoelectric Scanning Thermal Microscopy Probe Fabrication

Donglip Kim, Kyeongtae Kim, Ohmyoung Kwon, Seungho Park,
Young Ki Choi and Joon Sik Lee

Key Words : Scanning Thermal Microscope: SThM (주사탐침열현미경), 열저항 탐침(Thermo-resistive Probe), 열전 탐침(Thermoelectric Probe)

Abstract

Scanning Thermal Microscope (SThM) has been known for its superior resolution for local temperature and thermal property measurement. However, commercially available SThM probe which is the key component of SThM does not provide resolution enough to explore nanoscale thermal phenomena. Here, we developed a SThM probe fabrication process that can achieve spatial resolution around 50 nm. The batch-fabricated probe has a thermocouple junction located at the end of the tip. The size of the thermocouple junction is around 200 nm and the distance of the junction from the very end of the tip is 150 nm. The probe is currently being used for nanoscale thermal probing of nano-material and nano device.

1. 서론

나노재료 및 나노소자 공학을 포함하는 나노공학의 발전에 따라서 나노스케일의 열현상을 측정하고 분석할 수 있는 도구의 개발이 요구되고 있다. 예를 들어 현재의 반도체 기술은 이미 최소특성길이가 70 nm 이하인 집적회로를 양산하고 있다. 이러한 나노소자의 동작은 전자(electron)나 혹은 정공(hole) 과 같은 전하 수송자(charge carrier)의 이송현상에 기반을 두고 있다. 이들 전하 수송자의 이송현상은 필연적으로 열을 발생시키며 따라서 이러한 스케일에서의 열현상의 측정은 나노소자의 동작을 분석하는데 있어서 매우 유용하게 사

용될 수 있다.

또한 나노구조물에서는 전자와 포논(phonon)과 같은 에너지 수송자(energy carrier)들의 자유이송경로(mean free path)가 나노 구조물의 특성길이와 비슷해지면서 열전도도(thermal conductivity)같은 에너지 수송특성을 나타내는 열물성이 나노 구조물의 특성길이 및 구조에 의하여 영향을 받게 된다. 따라서 나노스케일에서의 열물성 측정은 나노 구조물의 에너지 수송특성을 파악하고 궁극적으로는 원하는 에너지수송특성을 갖는 나노 구조물 및 재료를 설계하고 개발하는데 있어서 필수적인 기술이다. 이처럼 나노스케일 온도 및 열물성 측정 기술의 개발은 과학적인 측면과 공학적인 측면에서 모두 대단히 중요하다.

현재 이러한 미세영역에서 온도를 가장 높은 공간적 정밀도로 측정할 수 있는 방법은 Table 1 에 나와 있는 것처럼 주사탐침열현미경(Scanning Thermal Microscope: SThM)이다.⁽¹⁾ 주사탐침열현미경은 그 끝에 온도센서가 장치된 탐침(probe)을 샘플 표면에 접촉한 상태로 주사(scan)하여 샘플 표

* 고려대학교 기계공학과
† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : omkwon@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3371 FAX : (02)926-9290
** 회원, 홍익대학교 기계 시스템 디자인 공학부
*** 회원, 중앙대학교 기계공학과
**** 회원, 서울대학교 기계 항공공학부

Table 1 Thermal microscopy techniques⁽¹⁾

Measurement Technique	Spatial Resolution
Infrared Thermometry	1-10 μm
Raman Spectroscopy	1 μm
Reflectance Thermometry	< 1 μm
Near field Optical Thermometry	> 100nm
Scanning Thermal Microscopy	< 100nm

면의 온도 분포를 측정 하는 장치이다. 이때 탐침 첨단은 온도센서와 샘플표면의 접촉력은 원자력 현미경(Atomic Force Microscope)에 탐침을 장착하여 정밀하게 제어된다. 현재 주사탐침열현미경은 100 nm 이하의 공간적 정밀도로 온도분포를 측정할 수 있음이 실험적으로 증명되었다.⁽²⁾

주사탐침열현미경 탐침(SThM probe)은 주사탐침 열현미경의 성능을 결정하는 핵심적인 부품으로 지금까지 여러 연구자들이 각자의 고유한 기술로 다양한 형태의 탐침을 개발해왔다.⁽¹⁾ 그러나 현재 상업적으로 제작되어 구매할 수 있는 주사탐침 열현미경 탐침은 Wollaston-wire 탐침 뿐이다.⁽³⁾ 이 탐침은 열저항 탐침(thermo-resistive probe)으로 공간적 정밀도를 높일수록 측정감도(sensitivity)가 현저히 떨어지기 때문에 공간적 정밀도가 100 nm에 훨씬 못 미치는 수 μm 이다.

현재 공간적 정밀도가 가장 높은 탐침은 Shi 등⁽⁴⁾이 제작한 열전탐침(thermoelectric probe)이다. 이 탐침의 성능은 탐침 첨단에 위치한 열전쌍 접점의 크기에 의해 큰 영향을 받는다. Shi 등⁽⁴⁾은 탐침의 첨단과 샘플 사이의 나노 스케일 점 접촉을 통한 열전달 현상의 분석을 통하여 열전쌍 접점의 크기가 작아질수록 탐침의 감도가 향상되며 특히 900 nm 이하로 작아지면 탐침의 감도가 점점 빠르게 향상된다는 해석 결과를 얻었다. 따라서 탐침 첨단에 위치한 열전쌍 접점의 크기를 최소화하는 것은 대단히 중요하다. Shi 등⁽⁴⁾은 탐침 첨단의 열전쌍 접점의 크기를 300 nm 까지 축소할 수 있었지만 이때 탐침 제작공정의 수율(yield)은 30% 이하라고 보고하였다. 충분한 수율을 확보하는 경우 열전쌍 접점의 크기는 보통 900 nm 였다.

본 논문의 목적은 탐침 첨단에 위치한 열전쌍 접점의 크기를 최소화하고 동시에 높은 수율을 갖는 새로운 공정을 개발하는 것이다. 열전쌍 접점

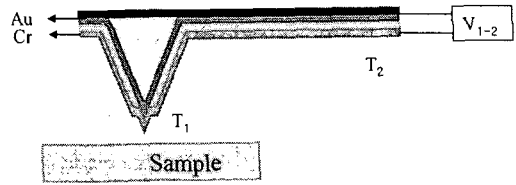


Fig. 1 Schematic diagram of SThM probe and thermoelectric voltage measurement

의 최소화는 주사탐침열현미경 열전탐침(thermoelectric SThM probe)의 온도 측정 감도와 공간적 정밀도를 향상시킨다. 또한, 열전쌍 접점의 최소화는 Roh 등⁽⁵⁾이 제시한 열전탐침을 활용한 교류방식 나노스케일 열물성 측정기법에서도 측정 정밀도 높이기 위해 그 중요성이 매우 강조되고 있다.

현재 국내에서 탐침제작과 관련한 연구로는 정전탐침 제작에 관한 연구⁽⁶⁾와 압전 탐침 제작에 관한 연구⁽⁷⁾가 보고된 바 있으나 온도나 열물성 계측용 탐침 제작에 관해서는 보고된바 없다.

2. 탐침 제작 공정

2.1 열전쌍 금속 선정

본 연구에서 제작한 탐침의 개략적인 구조 및 온도측정 원리가 Fig. 1에 나와 있다. 탐침 첨단의 온도와 계측되는 열전전압의 관계는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$V_{1-2} = \alpha_{1-2}(T_1 - T_2) \quad (1)$$

여기서 V_{1-2} 는 열전 전압, α_{1-2} 는 두 금속의 열전 계수(seebeck coefficient) 차, T_1 은 열전쌍의 접점온도, T_2 는 접촉패드(contact pad)온도이다. 본 연구에서 열전쌍을 이루는 두 금속으로 금(Au)과 크롬(Cr)을 선택하였으며 그 이유는 다음과 같다.

첫째, Table 2에 나타난 것처럼 열전 계수의 차가 충분히 크기 때문이다. 열전쌍(thermo-couple)을 이루는 두 금속의 열전계수 차이가 클수록 같은 온도차이에 대하여 발생하는 열전전압의 크기가 커지기 때문에 존슨 잡음(Johnson noise)의 영향을 최소화 할 수 있다.

두 번째, 두 금속간의 접촉저항을 최소화하기 위함이다. 만약 첫 번째 금속이 쉽게 산화되는 물질일 경우, 산화막에 의하여 두 금속 사이에는 큰 접촉저항이 발생하게 되며, 이로 인해 존슨

Table 2 Thermal physical properties and hardness

금속	열전도도 (W/m-K) 300K	열전계수 (μ V/K) 300K	Mineral hardness (no unit)
Al	327	-1.66	2.75
Au	317	1.94	2.5
Cr	93.7	21.8	8.5
Ni	90.7	-19.5	4.0
Pt	71.6	-5.28	3.5
Si	148	-	6.5

잡음이 커지게 된다.

세 번째, 제작공정의 용이성 때문이다. 백금과 크롬의 경우에는 열전계수의 차이가 금과 크롬보다 크지만, 백금의 제작 공정이 지나치게 어렵기 때문에 본 연구에서는 금을 선택하였다. 샘플과 접촉하는 두 번째 금속은 탐침의 마모를 최소화하기 위하여 경도가 큰 크롬을 선택하였다.

2.2 탐침 제작 공정

전체 탐침 제작 공정에 대한 도식적인 설명이 Fig. 2 에 나와 있으며 각 공정에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

우선 양면 웨이퍼(double-side polished silicon wafer)에 저압화학기상증착법(LPCVD:Low Pressure Chemical Vapor Deposition)을 사용하여 양면에 0.5 μ m 두께의 저응력 실리콘 질화막(low stress SiN)을 성층하였다. 저응력 실리콘 질화막은 탐침의 캔틸레버(cantilever) 부분을 형성하게 된다. 질화막 성층 후 저압화학기상증착을 사용하여 약 8 μ m 두께의 저온산화막(LTO:Low Temperature Oxide)을 양면에 성층하였다. 저응력 실리콘 질화막에 남아 있는 잔류응력을 최소화하기 위하여 1000 $^{\circ}$ C에서 1 시간 동안 열처리(annealing)공정을 수행하였다. 열처리 후 웨이퍼 하면에 성층된 저온산화막을 불산(HF)용액으로 제거하고 마지막 탐침 분리공정을 위해 실리콘 질화막을 패터닝(patterning)하는 과정까지가 Fig. 2(a)에 나타나 있다. 그 후 캔틸레버 끝에 높이가 8 μ m인 예리한 저온산화막 첨단(LTO tip)을 형성하기 위해 크롬을 0.3 μ m 스퍼터링(sputtering)하여 성층하고 Fig. 2(b)와 같이 패터닝하였다. 크롬 패터닝 후 저온산화막을 약 5 μ m 정도 건식 식각(dry etching) 후 완충식각액

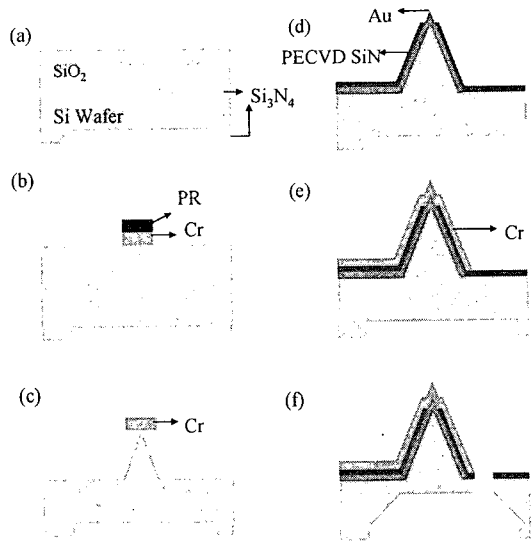


Fig. 2 The Schematic of SThM probe fabrication process

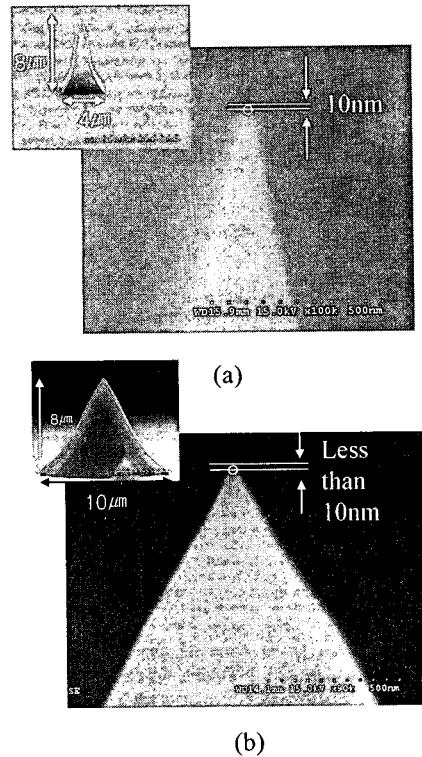


Fig. 3 Fabricated LTO tip (a) using BOE etching after RIE; (b) only BOE etching

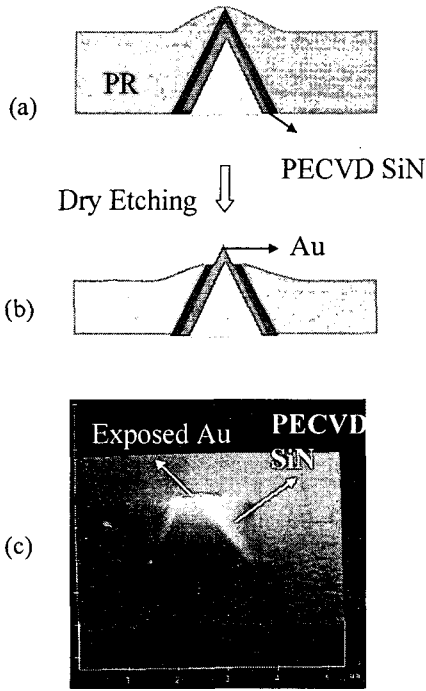


Fig. 4 (a) Thick PR coating on after Au deposition, (b) simultaneous RIE of PR and PECVD SiN, (c) AFM image after etching of PR and PECVD Nitride

(BOE:Buffered Oxide Etchant)으로 습식 식각(wet etching)하여 높은 종횡비(aspect ratio)를 가지는 침단을 형성하였다. 이렇게 제작된 침단의 전자현미경 사진이 Fig. 3(a)에 나와 있다. 이 사진에서 침단 끝의 곡률반경이 약 10 nm 내외로 매우 예리한 것을 알 수 있다. 또한 습식 식각만으로 제작된 침단의 사진이 Fig. 3 (b)에 나와 있다. 역시 매우 예리한 침단이 제작되었다.

이렇게 만들어진 침단에 60 nm 두께의 금을 스퍼터링하여 패터닝 후 크롬과의 전기적 절연을 위해 플라즈마 화학기상증착(PECVD : Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)을 이용하여 상면에 실리콘질화막을 성층하였다. 성층 후 침단 끝의 질화막을 부분적으로 제거하여 가능한 한 작은 부분의 금을 노출시켰다. 본 공정은 탐침의 성능을 좌우하는 대단히 중요한 공정으로 다음과 같은 방법으로 실리콘질화막을 제거하여 100 nm 내외의 매우 작은 금속점접을 형성할 수 있었다.

준비된 감광제(PR:Photo resistive)에 전용 용제(solvent)를 사용하여 가능한 범위에서 점성을 줄이고, 회전도포(spin coating)시 회전수를 낮게 하여 표면 장력 효과를 증가 시킬 수 있었다. 감광제의 목표 두께를 침단보다 낮게 하여 웨이퍼에

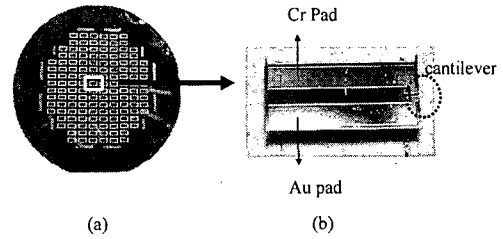


Fig. 5 Arrayed a probe chip at wafer (a) and a released probe chip from wafer (b)

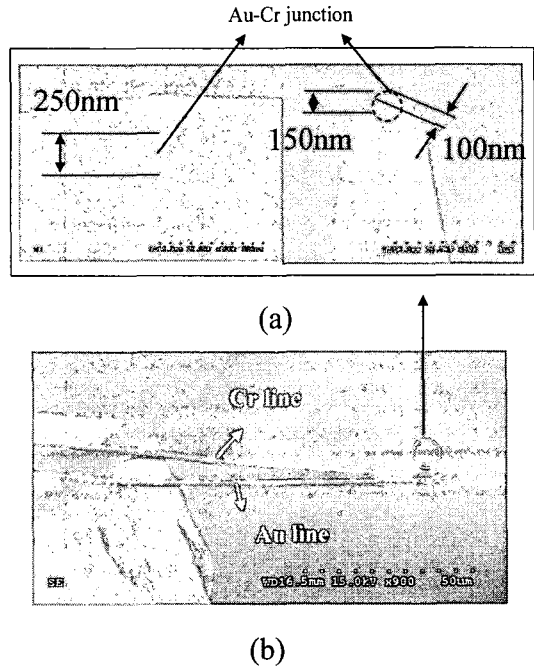


Fig. 6 SEM picture of a batch fabricated probe. Close up of the Au-Cr junction at the tip end (a), Overview of cantilever (b)

가능한 고르게 분포 시켰고, 이렇게 도포된 감광제는 침단이 있는 부분에서 표면 장력의 효과로 침단의 높이 차이에 영향 없이 Fig. 4(a)처럼 고르게 분포시킬 수 있었다.

도포 후 감광제 및 실리콘질화막을 동시에 건식 식각하여 Fig. 4 (b)처럼 금을 노출시켰다. 감광제와 실리콘질화막의 식각비가 1:1 이었으며 침단의 노출 여부는 원자력현미경으로 주사하여 판단하였다. 그 결과가 Fig. 4 (c)에 나와 있다. 다음으로 크롬을 80 nm 스퍼터링하고 Fig. 2 (c)와 같이 패터닝하였다. 마지막으로 앞면에 남아 있는 실리콘질화막 및 초기의 저응력 실리콘질화막을 Fig. 2

(f)와 같이 식각한 다음 수산화칼륨 용액으로 비등 방성 습식 식각(bulk micromachining) 하였다.

제작이 완료된 웨이퍼가 Fig. 5 (a)에 나와있다. 한 웨이퍼에 146 개의 탐침이 제작되며 Fig. 5 (b)는 완성된 하나의 탐침이다. 탐침의 핵심인 캔틸레버와 주요 부분이 Fig. 6 에 나타나있다. 이 사진을 통하여 첨단 끝의 반경이 100 nm 이고, 측정 정밀도를 좌우하는 첨단 끝의 금속 접점이 그 크기가 외부 크롬박막의 두께를 고려할 때 높이는 70 nm, 폭은 90 nm 로 매우 정교히 제작되었음을 알 수 있다.

3. 열전탐침의 성능 및 특성 실험

3.1 탐침의 전기저항 분석

탐침의 전기저항은 전압신호 측정 시 발생하는 존슨 잡음(Johnson noise)의 크기를 증가시키기 때문에 가능한 최소화하는 것이 바람직하다. 특히 첨단 끝에 집중되는 저항은 R_{oh} 등⁽⁵⁾ 이 제시한 열전탐침을 활용한 교류방식 나노스케일 열물성 측정법의 경우에 첨단 끝에서 집중적으로 발생하는 열량을 예측하기 위하여 꼭 필요한 정보이다. 따라서 탐침의 전기저항의 원인과 분포를 측정하여 분석하는 것이 필요하다.

제작된 탐침의 전기 저항 분포를 분석하기 위하여 금속선의 길이가 각각 120 μm , 180 μm 이고 선 폭이 각각 4.5 μm , 10 μm 인 4 가지 탐침의 전기 저항을 측정하였다. 금속선의 길이에 따른 탐침의 저항을 측정한 결과가 Fig. 7 이다. 이 그래프의 기울기와 금속선의 두께와 폭으로부터 계산된 비저항은 일반(bulk) 상태의 비저항 보다 약 8.5 배 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 Shi 등⁽²⁾ 에 의하여 이미 보고된 바 있으며 그 원인은 박막의 두께가 얇아지면서 계면에서의 산란현상에 의하여 에너지 수송자의 이동이 제한되기 때문이다.

한편 Fig. 7 에서 주목할 점은 금속선의 길이와 두께가 다른 경우에도 그 길이가 0 인 경우의 저항값이 0 이 아니며, 그 값이 거의 일치한다는 점이다. 이 값은 4.5 μm 선 폭에서는 150 Ω , 10 μm 선 폭에서는 145 Ω 으로 나타났다. 총 저항에서 금속선의 저항을 제외한 부분의 저항은 (i) 저항을 측정하는 탐침과 금속 패드의 저항, (ii) 첨단을 덮고 있는 금속의 저항, 그리고 (iii) 첨단 끝의 두 금속의 접촉면의 저항으로 구성된다. 여기서 (i) 저항 측정 탐침과 금속 패드의 저항은 통전 접촉제(silver paste)를 사용하여 크롬 패드와 금 패드를

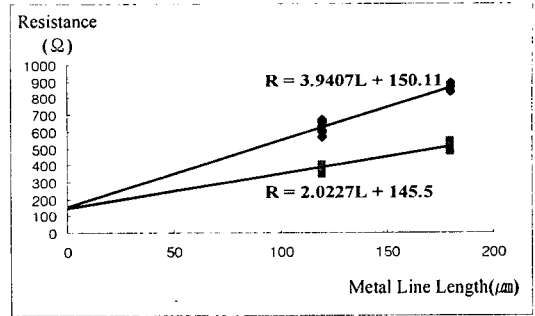


Fig. 7 Resistance as a function of the metal line length

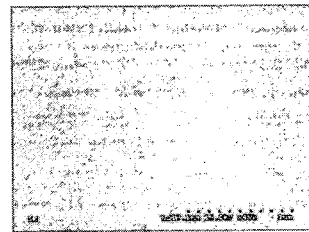


Fig. 8 Destruction of metal junction at the tip end

단락 시킨 후 측정하였으며 그 값은 45 Ω 으로 나타났다. 다음 (ii) 첨단을 덮고 있는 크롬 막과 금 박막의 저항은 Fig. 7 으로부터 구해진 비저항을 사용하고 Fig. 6 의 사진으로부터 유추한 첨단의 형상으로부터 계산하였으며 그 값은 약 100 Ω 이다. 따라서 (iii) 첨단 끝의 두 금속의 접촉면의 저항이 약 10 Ω 임을 알 수 있다.

일반적으로 흔히 사용되는 저항측정기(multimeter)의 경우저항 측정 시 2 W 의 전력을 인가하여 저항을 측정하게 된다. 본 연구에서 제작한 탐침 중에서 첨단의 열전쌍 접점의 크기가 매우 작은 것은 저항 측정 시 인가되는 미소한 전력만으로도 접점의 온도가 약 800 ~ 1200 $^{\circ}\text{C}$ 정도 상승하는 것으로 예측된다. 그 결과 일부 탐침은 Fig. 8 과 같이 탐침 첨단의 열전쌍 접점이 파괴되는 경우도 있었다. 저항 측정 시 높은 온도 상승으로 접촉면 안쪽의 금이 증발하며 높은 압력을 발생시켜 폭발된 형상으로 추측된다.

3.2 온도분포 측정

우선 선폭이 10 μm , 두께가 70 nm 인 금선에 전류를 가하여 주열(Joule)열을 발생시키면서 탐침과 금선의 거리에 따른 온도 변화를 측정할 그림이 Fig. 9 에 나와 있다. 탐침과 금선의 거리가 가까워짐에 따라 온도가 상승함을 알 수 있다. 이는 탐침의 첨단과 금선의 거리가 가까워질수록

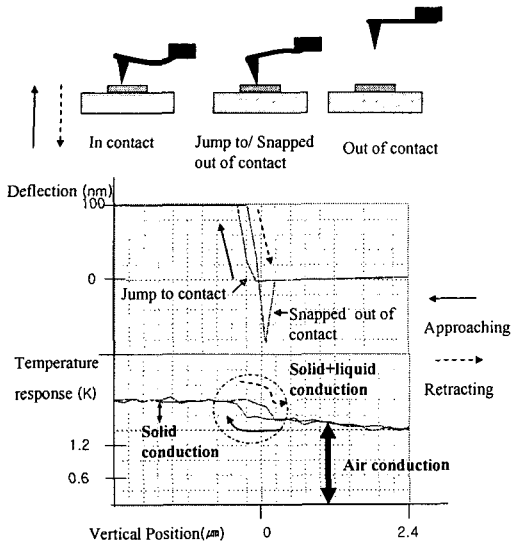


Fig. 9 Cantilever deflection and temperature response of the probe when the probe approached and then retracted from the sample

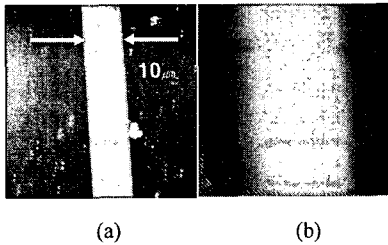


Fig. 10 Topographic image (a) and thermal images of a 10 μm Au line (b)

공기를 통한 열전달량이 증가하기 때문이다. 접촉 하는 순간 탐침의 온도가 급격히 증가하며, 이와 반대로 탐침이 시료에서 떨어질 때 온도가 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 탐침과 금선의 접점 사이의 존재하는 액막에 의하여 열전달량이 급격히 증가하기 때문이다.⁽⁴⁾ 한편 온도분포 측정 결과는 Fig. 10 에 나와 있다. 현재 얻어진 측정 결과는 탐침의 동작여부를 나타내는 매우 기초적인 측정결과이며 현재 정량적 온도 및 열물성 측정을 위한 해석과 실험이 진행 중이다.

4. 결론

본 논문에서는 탐침 첨단에 위치한 열전쌍 접점의 크기를 최소화하면서도 높은 수율을 갖는 새로운 공정을 개발하였다. 제작된 첨단 끝의 열전쌍

접점의 높이는 70 nm, 폭은 90 nm 이고 첨단 끝의 곡률 반경은 100 nm 이며 평균 수율은 95% 이상이었다. 제작된 탐침의 금속박막의 비저항은 일반 상태 일 때 보다 8.5 배 크게 나타났으며 두 금속 사이에 발생하는 접촉 저항은 ~ 10 Ω 정도로 판단된다.

현재 확보된 탐침의 제작기술을 바탕으로 고성능 다기능 탐침을 제작하기 위한 연구가 진행 중이다. 또한 본 연구에서 제작된 탐침으로 나노스케일 열물성을 정량적으로 측정하기 위한 연구가 진행 중이다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단의 젊은과학자연구지원사업과 서울대학교 마이크로열시스템연구센터의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Majumdar, A., 1999, "Scanning Thermal Microscopy," *Annual Review of Material Science*, Vol. 29, pp. 505~585.
- (2) Shi, L., O. Kwon, Miner, A. C. and Majumdar, A., 2001, "Design and Batch Fabrication of Probes for Sub-100 nm Scanning Thermal Microscopy," *Journal of MEMS*, Vol. 10, No. 3, pp. 370~378.
- (3) Hammiche, A., Reading, M., Pollock, H. M., Song, M. and Hourston, D. J., 1996, "Localized Thermal Analysis Using a Miniaturized Resistive Probe," *Rev. Sci. Instrum*, Vol. 67, No. 12 pp. 4268~4274.
- (4) Shi, L. and Majumdar, A., 2002, "Thermal Transport Mechanisms at Nanoscale Point Contacts," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 124, pp. 329~337.
- (5) Hee Hwan Roh et al., 2004, "Development of Nanoscale Thermal Property Measurement Technique Using AC Heating and Temperature Monitoring of Nano Thermocouple Junction of Scanning Thermal Microscope Probe," *Proceeding of the 13th KIEE MEMS Symposium*, Vol. 7, No. 1, pp. 29~35.
- (6) Chang Soo Lee, Jae Joon Choi, Dong Gi Min, Dong Ryeol Jeon, Jong Up Jeon, 2001, "Development of Capacitance Probe Array for Ultra-small Large-Capacity Storage System," *The 3rd Korean MEMS Conference*, pp. 239~247.
- (7) Sang Hoon Lee, Seung Seop Lee, Jong Up Jeon, Gwang Choon Rho, 2003, "A study on fabrication of ZnO Piezoelectric Cantilever with High Aspect Ratio Nanotip," *The 5th Korean MEMS Conference*, Jeju island, Korea, May15-17, pp. 290~295.