

주사탐침열현미경 기술의 현황 및 그 응용

이 글에서는 나노 스케일의 공간적 해상도로 온도, 열물성 그리고 열전물성을 계측할 수 있는 도구인 주사탐침열현미경 기술의 원리 및 개발 현황 그리고 그 응용분야에 대하여 소개하고자 한다.

초소형기전공학(MEMS)에
서 시작된 초미세현상에
관한 연구가 점차 성숙단계에 이
르면서 최근에 이르러서는 나노
스케일에서의 물리적 현상 및 이
의 응용에 관한 나노기술의 연구
가 활발히 진행되고 있다. 이에
따라 과거 고전적 분야로 여겨지
던 열공학 및 열전달 분야에 있
어서도 나노스케일 현상에 대한
관심이 점차 증가하고 있다. 나노
스케일에서는 궁극적인 에너지
수송자(energy carrier)인 포논
(phonon), 전자, 광자(photon)
의 자유이송경로(mean free
path)가 나노구조물의 특성길이
나 나노재료 조직의 특성길이에

접근하면서 고전적인 에너지전달
방정식으로는 설명할 수 없는 나
노스케일에서의 고유한 특이 현
상들이 나타나게 된다.

이러한 특이 현상을 연구 분석
하여 궁극적으로 활용하기 위해
서는 본 현상들을 실험적으로 입
증하고 목격할 수 있는 측정도구
의 개발이 선행되어야한다. 나노
열공학의 연구에 있어서 핵심적
으로 중요한 측정기술은 (i) 나노
스케일 온도 측정기술, (ii) 나노
스케일 열물성(thermal pro-
perty) 측정기술, (iii) 나노스케
일 열전물성(thermoelectric
property) 측정기술 등 세 가지
가 있다.

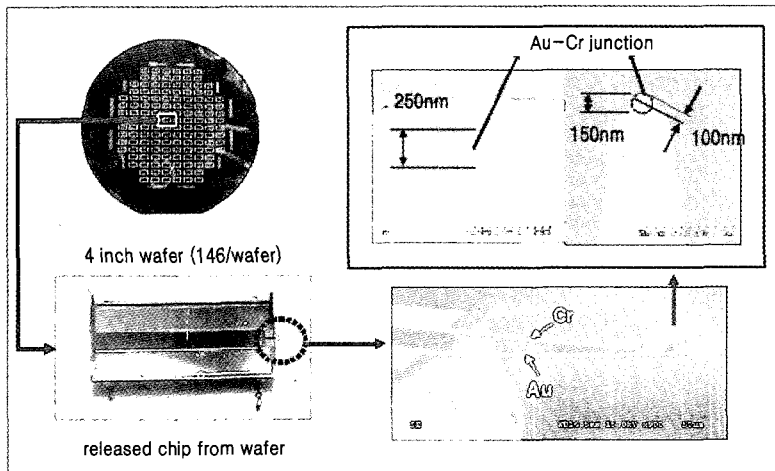
국소 온도, 열물성, 열전물성을
측정하는 기술은 여러 가지 기술
이 있으나 공간적 정밀도를 나노
스케일로 높일 수 있는 방법은
주 사 탐 침 현 미 경 (SPM :
Scanning Probe Micro-
scope)의 한 종류인 주사탐침열
현미경(SThM : Scanning
Thermal Microscope)이 가능
성이 있는 거의 유일한 기술이다.
주사탐침열현미경은 예리한 첨단
(tip)에 위치한 온도, 열물성, 혹
은 열전물성 센서를 측정대상의
표면상에서 일정한 접촉력을 유
지하며 이동시킴으로써 각각을
지극히 높은 공간적 정밀도로 측
정하는 장치이다. 국소 온도 혹은

열물성을 측정하는 기술로는 레이저 반사율 온도측정법(Laser Reflectance Thermometry)이나 마이크로-라만 온도측정법(Micro-Raman Thermometry) 같은 광학적 기술들이 개발되어 있으나 빛의 회절 때문에 그 정밀도는 약 1 μm 내외로 제한된다. 빛의 회절현상을 극복하기 위한 근접 광학기술(Near-field optical technique)도 있지만 그 정밀도는 100nm 정도에 머무르고 있다.

주사탐침열현미경 기술에 있어서 가장 중요한 것은 주사탐침열현미경 탐침(SThM Probe)의 제작 기술 및 본 탐침의 효과적 활용을 위한 신호 처리 및 계측기술이다. 첫째로 나노스케일 온도 계측을 위해서는 수십 나노미터 정도의 첨단 반경을 갖는 탐침의 첨단에 온도센서가 위치한 탐침의 제작이 선행되어야 한다. 최근 국내 연구진은 엄밀한 열적 설계를 고려한 현재까지 만들어진 열전탐침 중 접점의 크기가 가장 작은 탐침을 대량 생산할 수 있는 기술을 개발하였다.

탐침은 외팔보(cantilever)와 첨단(tip)으로 구성되어 있으며 외팔보의 재질은 실리콘 질화막(Silicon Nitride)이다. 첨단의 재질은 실리콘 산화물(Silicon Dioxide)이며 높이가 8 μm , 밑면의 반지름이 4 μm 인 원뿔형상을 하고 있다. 첨단의 끝에는 높이 150nm, 폭 250nm의 금 박막과

최근 국내 연구진은 현재까지 만들어진 열전탐침 중 접점의 크기가 가장 작은 탐침을 대량 생산할 수 있는 제작 기술을 개발함으로써 나노스케일의 정밀도로 온도 및 열물성을 계측할 수 있는 능력을 확보하였다.



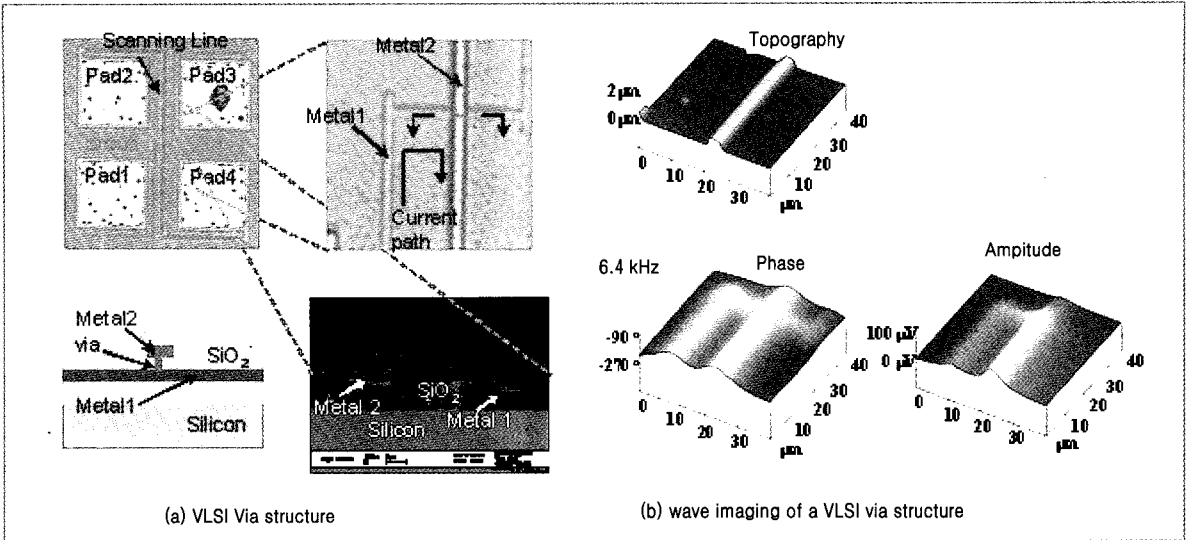
MEMS 가공 기술로 대량 제작된 열전탐침의 전자현미경 사진

크롬 박막이 열전쌍 접점을 이루고 있으며 열전쌍 접점부를 제외한 나머지 부분에서 두 금속 박막은 실리콘 질화막으로 절연되어 있다.

국소 온도측정기술은 기초기술로서 다양한 분야에 응용되어 왔다. 열전탐침을 활용한 주사탐침 열현미경은 MOS전계효과 트랜지스터(MOSFET : Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)와 같은 전자소자(Microelectronic device), 반도체 레이저(semiconductor laser)의 동작을 분석하고 소자의 결함 및 고장 원인을 분석하

는데 적용되었으며 또한 탄소나노튜브(carbon nanotube)의 발열현상을 분석하는 데 사용되었다. 열전탐침을 활용한 주사탐침 열현미경은 전기적으로 가열된 지름이 10nm인 MWCN(Multi-Wall Carbon Nanotube)의 온도분포 측정을 통해서 그 공간적 정밀도가 30~50nm 이내임이 입증되었다.

한편 주사탐침열현미경을 활용한 새로운 교류방식 측정법인 주사탐침열파현미경(Scanning Thermal Wave Microscopy)은 마이크로스케일의 파장을 갖는 열파(thermal wave)의 이미징(imaging)이 가능하며 본 방



VLSI 표본과 표면에서 측정된 열파의 위상 및 진폭 이미지

법을 활용하면 매크로 스케일 (Macroscale)에서 음파를 사용하여 비파괴 검사를 수행하듯이 마이크로 및 나노 스케일에서는 열파를 사용하여 비파괴 검사가 가능하다. 본 기술이 초고밀도 집적회로(VLSI : Very Large Scale Integrated Circuit)의 절연층에 묻혀있는 금속선의 위치 및 상태 분석에 적용된 예가 그림에 나와 있다.

주사탐침 열현미경의 두 번째 응용분야인 국소 열물성 측정 기술의 현황은 다음과 같다. 열물성은 어떤 물질의 가열에 대한 열적 반응 특성이라고 할 수 있다. 따라서 열물성을 측정하기 위해서는 열원과 온도 센서 두 가지 모두 필요하다. 이런 맥락에서 국소 열물성 계측은 국소 온도 계측보다 난이도가 한 단계 높다고

할 것이다. 일반적으로 국소 열물성 계측을 위해서는 공간적 정밀도를 향상시키기 위해서 열원과 센서의 기능을 동시에 수행할 수 있는 하나의 센서를 사용하는 것이 효과적이다. 이 때문에 국소 열물성 계측에 있어서는 열원이자 동시에 센서로 동작할 수 있는 열저항 탐침이 주로 사용되었다. 열저항 탐침은 주사탐침열현미경 탐침의 한 종류로서 감지부인 선형의 도선을 주울효과로 가열하면서 열저항효과로부터 온도를 계측한다.

열저항 탐침 중 가장 흔히 쓰이는 월러스톤 와이어 탐침(Wollaston wire probe)은 지름이 약 5 μm 인 백금선을 전기적으로 가열하면서 동시에 백금선의 전기저항 변화로부터 백금선의 온도변화를 추적함으로써 국

소 열물성을 측정한다. 본 기술은 현재 상용화되어 Veeco 사의 Explorer Scanning Probe Microscope의 한 가지 측정모드로 개발되어 있다.

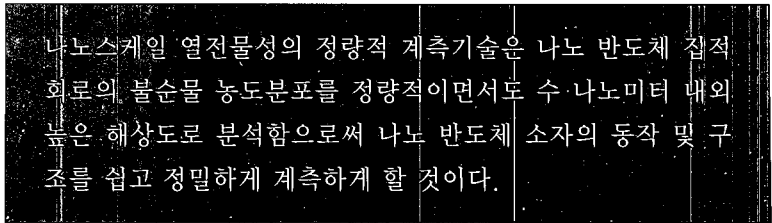
최근 마이크로/나노제작기술의 발전과 함께 새로운 형태의 나노 열저항 탐침을 제작함으로써 공간적 정밀도를 향상시키기 위한 연구가 수행되었으나, 그 공간해상도는 나노스케일에는 훨씬 미치지 못하였다. 열저항 탐침을 활용한 국소 열물성 계측방법의 공간해상도가 열전 탐침을 활용한 온도 계측방법의 공간해상도에 미치지 못하는 이유는 두 가지로 요약할 수 있다.

첫째는 탐침의 열적 설계이다. 온도 계측의 감도를 향상시키기 위해서는 탐침의 온도 감지부를 가능한 열적으로 잘 단열되어 있

는 탐침의 침단에 위치시켜야 한다. 국소 열물성 계측에 있어서도 마찬가지로 탐침의 열적 설계는 당연히 중요하다. 그러나 월러스튼 와이어 프로브의 경우 열저항 센서가 열전도율이 높은 백금선에 바로 연결되어 있기 때문에 온도 계측부의 단열이 적절히 이루어지지 않았다. 이 때문에 탐침의 감도와 공간적 해상도는 상당히 떨어진다.

두 번째 이유는 열저항 탐침의 측정 원리 때문이다. 열저항 탐침은 주울 효과(Joule effect)로 감지부인 선형의 저항선 전체를 가열하면서 열저항효과로 인한 저항선 전체의 저항 변화로부터 온도를 계측한다. 이는 열저항 탐침이 기본적으로 선 가열-선 측정 방식의 열물성 센서임을 말한다. 이에 반해서 열전 탐침은 열전쌍의 접점에서 발생하는 열전전압을 계측함으로써 온도를 측정한다. 이는 열전 탐침이 점 계측 방식의 온도 센서임을 의미한다. 따라서 측정원리상 열전 탐침은 본질적으로 국소 측정에 적합한 센서이기 때문에 공간 해상도를 높이는데 효과적이지만 열저항 탐침은 측정원리상 공간적 해상도를 향상시키기 어렵다.

최근 국내 연구진은 국소 열물성 계측에 있어서 열저항 탐침이 갖는 한계를 극복하기 위해서 새



로이 열전쌍 탐침을 활용한 나노스케일 열물성 계측기술을 새롭게 개발하였다. 지금까지 수동적으로 온도만을 계측하는 열전탐침을 단순히 온도측정만 하는 수동적인 센서가 아닌 열물성을 계측할 수 있는 능동적인 센서로 사용하기 위해서 국내 연구진은 전기적으로 열전쌍 접점을 가열하면서 동시에 열전쌍 접점에서 발생하는 열전 전압을 측정할 수 있는 신호 측정법을 개발하였으며 이를 검증하였다.

현재 국내의 국소 온도 계측기술 및 열물성 계측기술은 세계 최고 수준으로서 LCD 소자 내의 발열현상 분석, 나노소자의 동작 분석, 상변화메모리 소자의 분석 등의 연구에 응용되고 있으며 장치 그 응용분야는 더욱 넓어지리라 생각된다.

주사탐침 열현미경의 세 번째 응용분야인 나노스케일 열전물성 측정기술은 최근 양자점이나 나노선을 활용한 고효율 에너지 변환장치 개발에의 필요성 및 반도체 소자의 불순물 농도분포 계측

에 있어서의 효율성으로 인해서 연구가 활발히 진행되고 있다. 열전물성은 어떤 물질의 가열에 대한 전기적 반응 특성이라고 할 수 있다. 따라서 열전물성의 정량적 계측을 위해서는 수십 나노미터 정도의 반경을 갖는 탐침 침단의 열전쌍에서 국소가열, 온도 측정, 열전전압 분리측정의 세 가지 기능을 동시에 수행할 수 있는 센서 및 신호 측정기법의 개발이 필요하다.

가장 최근에는 주사탐침열전현미경(Scanning Thermoelectric Microscope)이라는 나노스케일 열전물성 계측기법이 보고되었으나 본 기법은 매우 제한된 샘플에 대하여 재현이 어려운 대단히 까다로운 과정을 거쳐서 정성적인 데이터를 얻는 데 그치고 있다. 만약 간단하면서도 높은 해상도를 갖는 정량적인 국소 열전물성 계측기법이 개발된다면 나노 반도체 소자의 구조 및 동작 분석에 있어서 매우 광범위하게 활용될 것으로 기대된다.