

< 논문 >

## 탐침의 침단과 반도체 시편 나노접점의 교류전류 가열을 통한 나노스케일 열전계수 측정기법 개발

김경태\* · 장건세\* · 권오명†

(2005년 6월 18일 접수, 2005년 12월 22일 심사완료)

### Development of Nanoscale Thermoelectric Coefficient Measurement Technique Through Heating of Nano-Contact of Probe Tip and Semiconductor Sample with AC Current

Kyeongtae Kim, Gun Se Jang and Ohmyoung Kwon

**Key Words :** Thermoelectric Coefficient(열전계수), MOSFET(모스 전계효과 트랜지스터), SPM(주사탐침 현미경)

#### Abstract

High resolution dopant profiling in semiconductor devices has been an intense research topic because of its practical importance in semiconductor industry. Although several techniques have already been developed, it still requires very expensive tools to achieve nanometer scale resolution. In this study we demonstrated a novel dopant profiling technique with nanometer resolution using very simple setup. The newly developed technique measures the thermoelectric voltage generated in the contact point of the SPM probe tip and MOSFET surface instead of electrical signals widely adopted in previous techniques like Scanning Capacitance Microscopy. The spatial resolution of our measurement technique is limited by the size of contact size between SPM probe tip and MOSFET surface and is estimated to be about 10 nm in this experiment.

#### 기호설명

$a$  : 탐침과 샘플 접촉면의 반지름  
 $A$  : 탐침과 샘플의 접점의 면적  
 $C_e$  : 정전용량(capacitance)  
 $d$  : 탐침 침단과 시편 사이의 거리  
 $e$  : 전자의 전하량  
 $F$  : 탐침의 접촉력(contact force)  
 $I$  : 전류  
 $k_B$  : 볼츠만상수  
 $n$  : n형 불순물(donor)의 농도

$N_c$  : 전도대(conduction band) 바닥상태의 상태밀도(density of state)  
 $N_v$  : 가전자대(valence band) 최상단의 상태밀도(density of state)  
 $p$  : p형 불순물(accepter)의 농도  
 $r_e$  : 전자의 산란계수  
 $r_h$  : 정공의 산란계수  
 $R$  : 탐침 침단의 곡률반경  
 $R_c$  : 탐침부터 금속판까지의 저항  
 $R_e$  : 전기저항  
 $R_p$  : 가변저항기의 저항  
 $R_a$  : 부가저항  
 $S_n, S_p$  : n형과 p형 샘플의 열전계수  
 $V$  : 전압  
 $\omega$  : 각주파수

\* 고려대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : omkwon@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3371 FAX : (02)926-9290

$\epsilon_0$  : 유전률

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경 및 동향

반도체 소자 내부의 불순물 농도분포(dopant density distribution)에 대한 신뢰성 있는 정보를 얻는 것은 반도체 소자의 동작 및 국소적 결합분석 그리고 제조 공정을 평가하는데 있어서 매우 중요하다. 이런 이유로 반도체 소자 내부의 불순물 농도분포 측정(dopant profiling)은 지금까지 중요한 연구 대상이 되어 오고 있다. 현재 반도체 소자 제작기술은 70nm 이하의 나노기술 영역에 이미 진입하였다. 이러한 추세는 반도체 소자의 구조분석에 있어서 나노스케일의 분해능을 요구하고 있다.<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 나노스케일의 분해능을 갖는 새로운 반도체의 불순물 농도분포 측정기법을 제안하고 이를 실험적으로 증명하였다.

대표적인 불순물 농도분포 측정 기법은 크게 광학식 측정기법,<sup>(2)</sup> 이차이온 질량분석기법(Secondary Ion Mass Spectrometry),<sup>(3,4)</sup> 그리고 주사탐침현미경(Scanning Probe Microscope)을 활용한 주사정전용량현미경(Scanning Capacitance Microscope)<sup>(5)</sup> 및 주사열전현미경(Scanning Thermoelectric Microscope)<sup>(6)</sup>을 들 수 있다.

광학식 측정기법은 불순물 농도가 서로 다른 영역을 통과한 빛의 산란 정도가 달라지는 것을 불순물 농도분포 측정에 이용하는 것이다. 이 경우 시편의 손상이 적고 빠른 측정이 가능하지만 측정 분해능이 빛의 파장(200~300nm)에 의하여 제한되는 단점이 있다.

이차 이온 질량분석법(secondary ion mass spectroscopy)은 일차이온을 발생시킨 후 가속시켜 샘플상의 원하는 위치에 충돌시키는 이온 총(ion gun), 이차이온을 추출하여 에너지를 분석하는 에너지 분석기, 질량대 전하비를 측정하는 질량 분석기와 검출기 등으로 구성되어 있다. 신호 측정 시 1~30keV의 운동에너지로 가속시킨 이온을 측정하고자 하는 샘플 표면에 충돌시키게 된다. 이때 이 일차이온의 운동에너지가 샘플 표면과 표면 내부의 원자들에 전달되면서 표면 결합에너지보다 높은 운동에너지를 샘플 바깥 방향으로 가진 원자는 샘플을 떠나 진공속으로 떨어져 나가게 된다. 이 이차이온(secondary ion)들의 질량대 전하비와 갯수를 측정하여 샘플 표면에 있는 원자의 종류와 그 조성을 측정함으로써 불순물 농도 분포를 알아 내게 된다. 이차 이온 질량분석기는 ppm ~ ppb 수

준의 높은 수준의 정량 분석이 가능하므로 실제 현장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 현재 본 기법의 공간 분해능은 약 1  $\mu\text{m}$  정도로 나노스케일의 정밀도에는 크게 못 미친다. 또한 샘플 표면을 스퍼터 식각하게 되므로 본질적으로 파괴적인 분석방법이라는 단점이 있다.

주사정전용량현미경은 정전용량 센서를 탐침에 연결하여 국소 불순물 농도에 따른 탐침과 시편 사이의 국소 정전용량(capacitance)을 측정한다. 주사정전용량현미경에서 사용되는 정전용량 센서는 고주파(~1 GHz) 발진기와 전기적 공진장치로 구성되어 있으며, 시편의 국소 정전용량이 변하면 공진 주파수가 변하는 것에 의해 매우 작은 정전용량( $10^{-19}$  F) 까지도 측정할 수 있다. 그러나 지름이 수 나노미터 정도인 탐침 첨단과 시편 사이의 정전용량은 매우 작아서( $10^{-16}$ ~ $10^{-18}$  F) 직접 측정할 없기 때문에, 100 KHz 이하의 낮은 주파수로 측정 신호를 변조시킨 후 정전용량의 전압에 대한 미분치를 측정한다. 그러나 식 (1)에서 보듯이 정전용량은 면적에 비례하므로 탐침 끝의 지름이 작아지면 분해능은 높아지게 되지만 동시에 정전용량의 크기가 작아지게 되므로 신호의 변조가 어려워지고 측정감도가 떨어지는 단점이 있다. 또한 기본적으로 비접촉식 측정이므로 접촉식 측정에 비해 공간분해능과 정밀도가 떨어지게 된다.

$$C_e = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_0$ 는 탐침 첨단과 시편 사이의 유전률,  $A$ 는 접촉 면적이며  $d$ 는 탐침 첨단과 시편 사이의 거리이다.

Ho-Ki Lyeo 등<sup>(6)</sup>은 주사열전현미경(Scanning Thermoelectric Microscope)이라고 그들이 명명한 측정 기법을 이용하여 갈륨비소 반도체 p-n 접합부근의 열전전압을 수 나노미터의 공간적 정밀도로 측정하였다. 우선 샘플을  $5 \times 10^{-11}$  torr의 초고진공(ultrahigh-vacuum) 속에 위치시킨 후 샘플의 후면에 부착된 열원으로 샘플이 주위보다 5~30 K 정도 높은 온도를 유지하도록 가열하였다. 그 후 상온의 온도를 갖는 나노스케일의 탐침 첨단을 샘플의 표면에 접촉 시키면 탐침 첨단으로의 열전달 때문에 샘플에는 국소적으로 온도 구배가 발생하게 된다. 이 온도 구배는 탐침과 샘플의 접촉에서의 국소 열전계수에 비례하는 열전전압을 발생시키며 이를 측정함으로써 국소 열전계수 분포를 수 나노미터의 공간분해능으로 정성적으로 측정하였다.

1.2 연구목적 및 내용

일반적으로 반도체의 불순물 농도와 열전계수 (Thermoelectric Coefficient)사이에는 밀접한 관계가 있다. 식 (2)는 열전계수와 불순물 농도와와의 관계를 나타낸다.<sup>(7)</sup>

$$S_n = -\frac{k_B}{e} \left[ \ln \frac{N_C}{n} + \left( \frac{5}{2} + r_c \right) \right] \quad (2)$$

$$S_p = \frac{k_B}{e} \left[ \ln \frac{N_V}{p} + \left( \frac{5}{2} + r_h \right) \right]$$

여기서  $S$ 는 열전계수,  $e$ 는 전자의 전하량,  $k_B$ 는 볼츠만 상수,  $N_C$ 와  $N_V$ 는 각각 전도대(conductance band) 바닥상태의 상태밀도(density of state)와 가전자대(valence band) 최상단의 상태밀도(density of state),  $n$ 과  $p$ 는 각각 n형(donor)과 p형(acceptor) 불순물 농도,  $r_c, r_h$ 는 자유이송시간(mean free time)에 의하여 정의되는 산란계수(scattering parameter)이며 물질마다 고유의 값을 갖는다. 따라서, 국소 열전계수 측정으로부터 국소 불순물 농도의 변화를 알아 낼 수 있다.

열전계수를 측정하여 불순물의 농도분포를 측정하는 방법은 주사정전용량현미경에 비해서 다음과 같은 중요한 장점을 가지고 있다. 우선 탐침과 샘플의 접촉면적이 작아짐에 따라 그 신호의 크기가 작아지는 정전용량과는 달리 열전계수는 그 크기가 일정하게 유지된다. 따라서 높은 공간적 정밀도의 측정에 적합하다. 또한 주사정전용량 현미경은 탐침과 샘플이 비접촉 상태에서 측정이 이루어지기 때문에 주사탐침현미경의 정밀도를 최대한 활용하지 못하지만 열전전압은 탐침과 샘플의 접촉상태에서 측정이 이루어지기 때문에 주사탐침현미경의 정밀도를 최대한 활용할 수 있다.

그러나 Ho-Ki Lyeo 등<sup>(6)</sup>이 개발한 방법은 샘플 전체를 가열하기 때문에 샘플과 탐침 사이에 공기 열전달을 제거해야 나노미터 영역에서 온도구배를 유지할 수 있기 때문에 실험이 초고진공에서 이루어져야 한다는 것과 샘플 표면에서 탐침의 주사(scanning)와 신호의 측정이 동시에 이루어지지 못하고 교대로 이루어져야 하므로 신호 추출이 매우 까다롭다는 단점이 있다. 본 연구에서는 불순물 농도분포측정을 위하여 주사탐침현미경 탐침의 침단(tip)과 샘플의 접점에서 발생하는 열전전압을 측정하되 Ho-Ki Lyeo 등<sup>(6)</sup>이 개발한 방식과는 달리 샘플 내부의 수 나노미터의 국소영역을 가열함으로써 대기중에서도 나노스케일의 공간분해능을 얻을 수 있는 새로운 교류방식 열전계수 측정기법

을 개발하였으며 이를 실험적으로 증명하였다.

2. 측정원리

본 연구에서는 샘플내에 나노미터 수준의 온도구배를 발생시키기 위해서 초고진공을 필요로 하는 Ho-Ki Lyeo 등의 방식과는 달리 대기중에서도 샘플내에 나노미터 수준의 온도구배를 발생시키기 위해서 나노접점에서 바로 열이 발생하도록 나노접점에 직접 전류를 통과시켰다. Fig. 1에 나타난 것처럼 탐침의 끝과 샘플의 접점으로 전류가 통과할 때 접점에 가까워질수록 전류가 통과하게 되는 단면적이 작아지게 된다. 따라서 접점에서는 다른 지점보다 훨씬 더 높은 전류밀도때문에 국소적으로 더 많은 열이 발생하게 된다. 이 열발생으로 인해 탐침과 샘플의 접점 온도는 국소적으로 상승하게 되며 이러한 온도상승에 의해 접점에서는 접점에서의 열전계수에 비례하는 열전전압이 발생하게 된다. 이때 발생한 열전전압을 측정함으로써 국소 열전계수를 나노 접점의 크기와 같은 정밀도로 측정할 수 있게 된다.

접점에 전류를 가하기 위하여 필요한 구동전압과 접점에서 발생하는 열전전압을 분리하여 측정하기 위해서 본 연구에서는 교류방식 측정방법을 사용하였다. 탐침과 시편의 접점에  $1\omega$ 의 주파수를 가지는 교류 전류를 가하면 접점에서의 열발생은 식 (3)에서 알 수 있듯이 전류의 제곱에 비례하므로  $2\omega$ 의 주파수를 가지고 변동하게 되고 따라서 접점의 온도도  $2\omega$ 의 주파수를 가지게 된다. 따라서 접점에서 온도변화와 열전계수와의 곱에 의해 발생하는 열전전압은  $2\omega$ 의 주파수를 가지게 된다. 따라서 구동전압과 열전전압의 주파수 차이로부터 열전전압을 분리하여 측정할 수 있게 된다

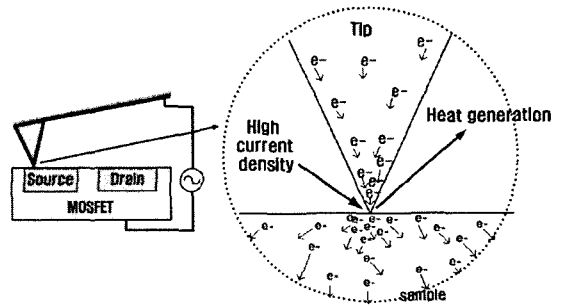


Fig. 1 Heat generation at the contact point

### 3. 실험 장치 및 재료

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 본 실험에 사용된 탭핑모드(tapping mode)용 실리콘 탐침 및 첨단부의 사진이 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 각각 나와 있다. 본 탐침의 외팔보(cantilever)의 길이와 너비는 각각  $225\mu\text{m}$ 와  $28\mu\text{m}$ 이고 시편과 접촉하게 되는 탐침의 첨단부의 높이는  $10\sim 15\mu\text{m}$ , 첨단의 반경은  $10\text{nm}$  이하이다. 본 실험에서는 이와 같은 탐침에 전기가 통하게 하고 동시에 첨단이 국소적 발열에 의하여 상하지 않도록  $100\text{nm}$ 의 텅스텐 박막을 적층한 후 사용하였다. 본 탐침은 Fig. 3(c)와 같은 Veeco사의 Dimension-3100 주사탐침현미경(Scanning Probe Microscope) 시스템에 장착되어 사용되었다. 시편으로는 불산(Hydrofluoric Acid)을 사용하여 게이트 영역의 산화막과 금속층이 제거된 모스전계효과 트랜지스터(MOSFET)를 사용하였으며 Fig. 3(d)에 그 구조가 나와 있다. 게이트가 제거된 모스전계효과 트랜지스터 시편은 실버페이스트(silver paste)를 사용하여 회로와 연결된 금속판 위에 고정하였다.

잘 알려져 있는 것처럼 실리콘은 공기중에서 산화되어 표면에 산화막을 형성하게 된다. 따라서 시편과 전기적 접촉을 이루기 위해서는 탐침의 첨단이 산화막을 뚫어야 한다. 이를 위해서 외팔보의 스프링 상수가 접촉 모드(contact mode)용 실리콘 질화물 탐침(silicon nitride probe)보다 훨씬 큰 탭핑 모드(tapping mode)용 실리콘 탐침을 사용하였다. 또한 측정 직전에 샘플을 불산으로 처리함으로써 산화막의 영향을 최소화하였다.

탐침과 시편간의 접촉에서의 열전전압을 측정하기 위한 회로의 저항은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 우선 탐침부터 시편이 고정되어 있는 금속판까지의 저항,  $R_c$ 와 가변저항기(potentiometer)의 저항,  $R_p$ , 그리고 부가저항,  $R_a$ 로 나눌 수 있다. 본 회로에서 부가저항  $R_a$ 는  $R_c$ 와  $R_p$ 보다 훨씬 큰 저항을 사용한다. 이는 탐침이 시편의 표면을 주사하는 동안 접촉의 저항이 변화하더라도 접촉을 통과하는 전류 크기를 일정하게 유지하게 해준다. 전체 회로에 일정하게 유지된 교류 전류를 인가하면 저항  $R_c$ 에 의해 열이 발생하게 된다. 이때 발생하는 열은 아래 식 (3)과 같이  $2\omega$ 의 주파수를 가지게 되고, 이 열발생에 의해 동일 주파수의 온도 진폭과 열전전압이 발생하게 된다.

$$Q = [I(\omega)]^2 \cdot R_c = \frac{1}{2} \cdot I_0^2 R_c \sin(2\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

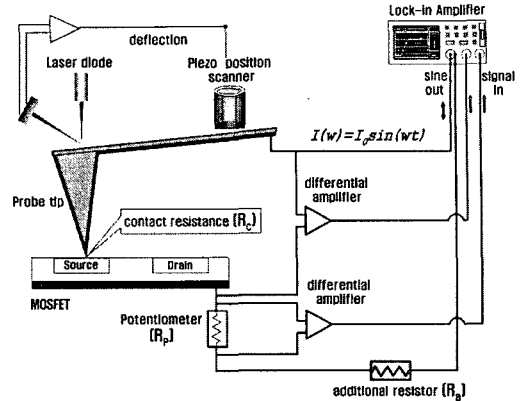


Fig. 2 Schematic of experimental setup and circuitry for data acquisition

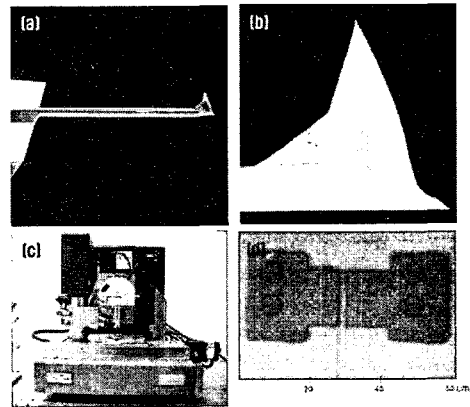


Fig. 3 Parts of experimental setup (a) Silicon probe (b) Probe Tip (c) SPM (d) MOSFET

한편,  $R_c$ 에는 측정하고자 하는  $2\omega$ 의 주파수를 갖는 열전전압과  $1\omega$ 의 주파수를 갖는 구동전압이 동시에 걸리게 된다. 열전전압은 구동전압에 비해서 매우 작은 전압이므로 이를 측정하기 위해서는 우선 구동전압을 제거한 후 록인 증폭기(Lock-in amplifier)를 사용하여 열전전압을 분리해 내야한다. 이를 위해서  $R_p$ 를  $R_c$ 와 같은 크기가 되도록 조절한 후에  $R_c$ 에 걸리는 전압에서  $R_p$ 에 걸리는 전압을 빼준후 남은 신호로부터 록인 증폭기를 사용하여 열전전압을 분리해낸다.

### 4. 실험 결과 및 분석

회로에 흐르는 전류를  $20\text{ nA}$ 로 고정시킨 상태에서 교류전원의 주파수를  $1\sim 10000\text{ Hz}$ 로 증가시키면서 모스전계효과 트랜지스터의 소스, 드레인, 그리고 게이트 영역에서의 열전전압의 진폭의 크기와 위상뒤짐을 측정하였다.

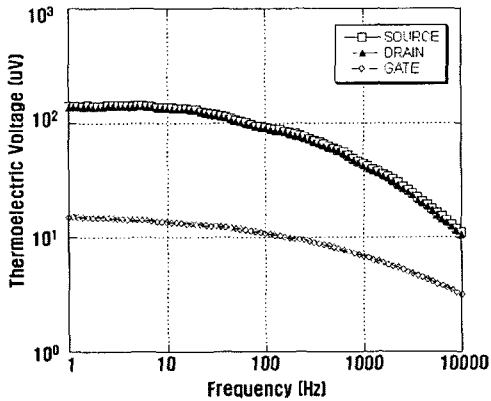


Fig. 4 Measured Thermoelectric Voltage at Source, Drain, Gate

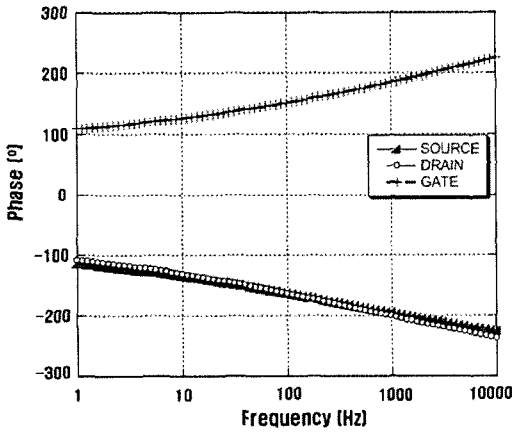


Fig. 5 Measured phase variation for  $w=1\sim 10000\text{Hz}$

그 결과가 Fig. 4 과 Fig. 5 에 각각 나와 있다. Fig. 4 는 소스와 드레인 영역이 게이트 영역의 불순물 농도보다 월등히 높고, 식 (2)에서 알 수 있듯이 열전계수는 불순물 농도에 반비례하기 때문에 불순물 농도가 낮은 게이트 영역에서 큰 열전계수에 의해 열전전압이 10 배 정도 크게 측정되었음을 보여준다. 그리고 Fig. 5 는 주입된 불순물의 종류, 즉 n 형 불순물과 p 형 불순물에 의한 열전 계수의 부호가 식 (2)에서 알 수 있듯이 서로 다르기 때문에 교류 신호의 부호를 나타내는 위상이 소스와 드레인 영역과 게이트 영역에서 서로 반대로 측정되었음을 보여준다.

이 결과로 본 측정 기법을 통하여 모스전계효과 트랜지스터에서 열전 전압 신호의 크기를 통하여 주입된 불순물의 농도를 알 수 있고, 또한 위상 신호를 통하여 주입된 불순물의 종류를 알 수 있음을 확인하였다. 다음으로 모스전계효과 트랜지스

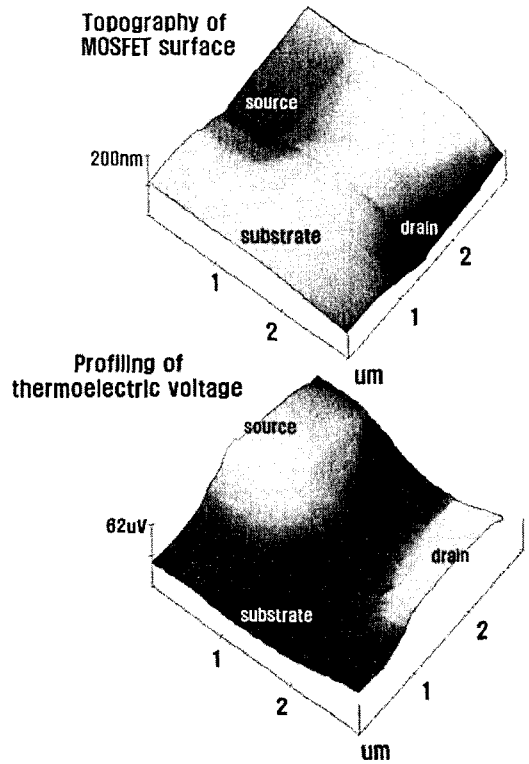


Fig. 6 MOSFET topography and thermoelectric voltage profiling

터의 지면형상(topography) 과 열전전압의 분포를 주사하며 동시에 측정하였고 그 결과가 Fig. 6 에 나타나 있다. 접점에서의 온도변화량을 일정하게 하기 위해 회로에 흐르는 전류의 크기를 20 nA 로 일정하게 유지하였으며 교류 전원의 주파수는 500 Hz 로 설정하였다. 또한, 접점에서의 발열량이 전류밀도에 대해 민감하게 반응하므로 높은 발열로 인한 탐침 끝의 마모방지와 안정적인 신호측정을 위해 전류를 작게 유지하고 교류전원의 주파수를 높게 설정하였다. 측정결과 Fig. 6 에서 보듯이 다른 지점에 비해 상대적으로 불순물의 농도가 높은 소스와 드레인 영역의 열전전압이 훨씬 크게 나오고 있음을 알 수 있다.

이미 언급한 바와같이 본 측정기법의 공간분해능은 탐침과 시편의 접점의 크기에 의해 결정이 되므로 그 접점의 크기를 추정하는 것이 중요한 문제라 할 수 있겠다. 접점의 크기를 추정하기 위하여 처음에는 탐침의 침단을 미접촉 상태에서 모스전계효과 트랜지스터의 소스의 상단에 위치시킨 후에 탐침이 표면에 가까워 질때와 접촉후 다시 떨어질 때 탐침의 외팔보의 굽힘정도와 열전전압

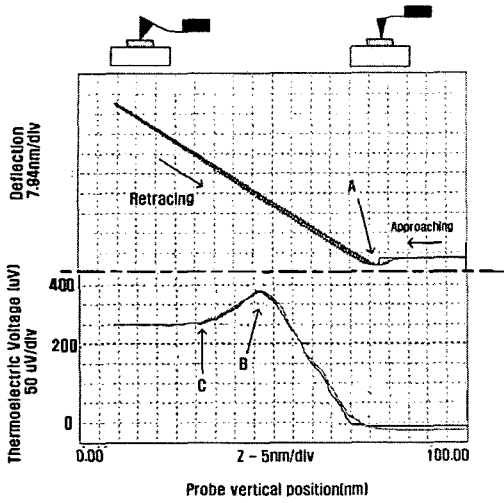


Fig. 7 Cantilever deflection and thermoelectric voltage response of the contact point as a function of probe vertical position

의 크기를 동시에 측정하였다. 그 측정결과가 Fig. 7에 나타나 있다.

탐침의 첨단은 A 지점에서 소스 표면에 접촉이 이루어지지만 외팔보가 약 5nm 가량 굽혀진 후에야 비로서 열전전압의 신호에 변화가 생기는 것을 알 수 있다. 이것은 탐침과 소스의 전기적 접촉이 이루어지기 위해서는 모스전계효과 트랜지스터 표면에 존재하는 자연 산화막(native oxide)을 뚫기 위해 추가적인 접촉력(contact force)이 필요하기 때문인 것으로 보인다. 전기적 접촉이 이루어진 후 외팔보가 약 30nm 정도 굽혀지는 B 지점까지 열전전압의 진폭은 계속 증가하다가 다시 B 지점에서 외팔보가 약 45nm 정도 굽혀지는 C 지점까지는 도리어 열전전압의 진폭이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 다음과 같은 현상으로 추측된다.

A 지점에서 B 지점까지는 전체 회로 저항의 대부분을 접점의 전기저항이 차지하는 것으로 보인다. 따라서 인가전압의 대부분이 접점에 걸리게 되고 이런 경우에 접점 발열량은 식 (3)처럼 저항에 반비례한다고 볼 수 있으며 B 지점에 이르기까지 발열량이 증가한다.

$$P = IV = \frac{V^2}{R_c} \quad (4)$$

그 후 B 지점에서 C 지점에 이르기까지는 접촉력이 좀 더 증가하면서 전기적 접촉면적이 좀더 증가하게 되고 이때는 전체회로 저항의 대부분이 부

가저항  $R_s$ 에 걸리는 것으로 생각된다. 이 경우에 B 지점에서 C 지점까지는 접점을 통과하는 전류가 거의 일정한 값을 갖는다고 볼 수 있으며 이 경우에는 식 (4)처럼 발열량은 도리어 저항에 비례하게 되며 C 지점에 이르기까지 발열량이 감소하게 된다.

$$P = IV = I^2 R_c \quad (5)$$

C 지점에 다다른 후부터는 접촉면적의 변화가 완만해 지면서 열전전압의 크기가 거의 일정하게 유지된다. 한편 탐침이 소스 표면으로부터 멀어지는 경우에 나타나는 열전전압 크기의 경향은 소스 표면으로 접근하면서 나타나는 열전전압 크기의 변화 경향과 거의 동일한 경향을 보이고 있는데 이는 탐침의 첨단이 소스 표면에 접하면서 탄성변형을 일으키기 때문인 것으로 추측된다.

실리콘 탐침의 외팔보의 힘 상수(spring constant)가  $2.8 \text{ N/m}$  이고, C 지점 후로 신호 크기에 더 이상의 변화가 없으므로 외팔보의 45nm의 굽힘에 해당하는 접촉력은 약 126 nN이다. 이때 접촉면의 반지름은 식 (5)로부터 구할 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$a = \left( \frac{3FR}{2E_c} \right)^{1/3}, \quad E_c = \frac{1}{\frac{1-\eta_1^2}{E_1} + \frac{1-\eta_2^2}{E_2}} \quad (6)$$

여기서  $a$ 는 접촉면의 반지름이고,  $R$ 은 탐침첨단의 곡률반경,  $\eta$ 는 Poisson's ratio,  $E$ 는 elastic modulus이며 하첨자 1, 2는 접하는 두 가지 물질을 나타낸다. 식 (5)을 사용하여 계산하면 탐침과 모스전계효과 트랜지스터의 접점의 반지름의 크기는 약 5 nm 정도로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 반도체 표면에서의 불순물 농도 분포를 나노스케일의 공간분해능으로 측정할 수 있는 새로운 측정방법을 제안하였으며 이를 실험적으로 입증하였다. 또한 본 측정기법의 물리적 이해와 탐침과 시편의 접점의 크기를 추정하기 위한 추가적인 실험이 수행되었다. 반도체 표면과 탐침의 접점에서 발생하는 열전전압을 측정함으로써 반도체 소자 내부의 불순물 농도 분포에 대한 정성적인 측정이 가능함을 실험으로 확인하였다. 본 측정기법의 공간 분해능은 탐침과 시편의 접점

의 지름에 의해 결정되고 그 크기는 10 nm 정도일 것으로 추정된다.

현재 본 기법은 텅스텐 탐침을 활용하고 있음에도 불구하고 실리콘 샘플과 접하는 접점의 높은 스트레스로 인해서 탐침의 내구성 측면에서 상당한 문제점을 보이고 있다. 이를 보완하기 위해서 현재 전도성 다이아몬드 탐침을 활용한 연구가 진행 중이며 측정된 신호에 대한 보다 정량적인 이해를 위해서 탐침과 샘플 접점 부근의 열발생 및 전달 현상에 대한 이론적인 분석도 진행 중이다.

### 후 기

본 연구는 학술진흥재단의 젊은과학자 연구활동지원사업(R08-2004-000-10619-0-0)과 고려대학교 특별연구비 지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) David Appel, 2002, "Nanotechnology : Wired for Success," *Nature*, p. 419, 553.
- (2) Li Zhou, Li Chen, Minna Hovinen, Alex Salnick,

- Michael J. Rendon and Jinhong shi., 1999, "Use of a New Thermal Wave Technology for Ultra-Shallow Junction Implant Monitoring," *IEEE*, pp. 578~581.
- (3) Napolitani, E., Carnera, A., Privitera, V. and Priolo, F., 2001, "Ultrashallow Profiling of Semiconductors by Secondary Ion Mass Spectrometry: Methods and Applications," *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 4, pp. 55~60.
- (4) Kelly, M. J., 1995, "Low-Dimensional Semiconductors," *Clarendon press*, pp. 36~38.
- (5) Joseph J. Kopanski, Jay F. Marchiando and Jeremiah R. Lowney, 1997, "Scanning Capacitance Microscopy Applied to Two-Dimensional Dopant Profiling of Semiconductors," *Materials Science and Engineering*, Vol. 44, pp. 46~51.
- (6) Ho-Ki Lyeo, Khajetoorians, A. A., Li Shi, Kelvin P. Pipe, Rajeev J. Ram, Ali Shakouri and Shih, C. K., 2004, "Profiling the Thermoelectric Power of Semiconductor Junctions with Nanometer Resolution," *Science*, Vol. 303, pp. 816~818.
- (7) Nolas, G. S., Sharp, J. and Goldsmid, H. J., 2001, *Thermoelectrics Basic Principles and New Materials Developments*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- (8) Warren C. Young and Richard Budynas, 2001, *Roark's Formulas for Stress and Strain 7<sup>th</sup> ed.*, McGraw-Hill.