(19)대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(51) 。Int. Cl.
H01L 21/66 (2006.01)

(11) 공개번호 10-2006-0121522
(43) 공개일자 2006년11월29일

(21) 출원번호 10-2005-0043753
(22) 출원일자 2005년05월24일
심사청구일자 2005년05월24일

(71) 출원인 고려대학교 산학협력단
서울 성북구 안암동5가1 고려대학교 내

(72) 발명자 권오명
서울 도봉구 방학1동 대상현대아파트 105동 604호
김경태
서울 성북구 안암동5가 101-104번지 203호

(74) 대리인 현종철
권혁성

전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 반도체 소자내의 불순물 농도 분포 측정시스템 및 측정방법

(57) 요약

반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템이 제공된다.

본 발명에 따른 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템은 주사탐침현미경(100), 상기 주사탐침현미경의 일부 구성요소로서, 통전이 가능하도록 고경도의 전도성 박막이 적층되어 있는 실리콘 탐침(10), 상기 실리콘 탐침(10)의 외팔보(11)에 연결되어 교류전류를 공급하며, 상기 실리콘 탐침(10)과 반도체 소자 샘플간의 접점에서 발생하는 열전전압 신호를 분리하는 록인 증폭기(200), 상기 반도체 소자 샘플의 하부에 연결되어 통전이 되도록 하는 반도체 샘플 고정부(300), 상기 반도체 샘플 고정부(300)에 연결되어 신호측정시 구동전압을 제거하는 가변저항기(400), 및 상기 가변저항기(400)에 연결되어 탐침이 반도체 샘플 표면을 주사하는 동안 전류의 크기를 일정하게 유지시키는 부가저항(500)을 구비하는 것을 특징으로 하며, 대기중에서 작동이 가능한 접촉식 측정방법으로서 접촉면적이 감소함에 따라 분해능 및 측정감도가 향상되는 나노스케일의 공간 분해능을 가지고, 비파괴적인 측정시스템으로서, 도핑되는 불순물이 n형인지 p형인지를 신속히 판별할 수 있을뿐만 아니라, 지면형상과 불순물의 농도를 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다.

대표도

도 5

특허청구의 범위

청구항 1.

주사탐침현미경(100), 상기 주사탐침현미경의 일부 구성요소로서, 통전이 가능하도록 고경도의 전도성 박막이 적층되어 있는 실리콘 탐침(10), 상기 실리콘 탐침(10)의 외팔보(11)에 연결되어 교류전류를 공급하며, 상기 실리콘 탐침(10)과 반도체 소자 샘플간의 접점에서 발생하는 열전전압 신호를 분리하는 록인 증폭기(200), 상기 반도체 소자 샘플의 하부에 연결되어 통전이 되도록 하는 반도체 샘플 고정부(300), 상기 반도체 샘플 고정부(300)에 연결되어 신호측정시 구동전압을 제거하는 가변저항기(400), 및 상기 가변저항기(400)에 연결되어 탐침이 반도체 샘플 표면을 주사하는 동안 전류의 크기를 일정하게 유지시키는 부가저항(500)을 구비하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템.

청구항 2.

제 1항에 있어서, 상기 실리콘 탐침(10)의 외팔보(11) 및 반도체 샘플 고정부(300)에 공통으로 연결되어 회로를 구성하며 접점에 걸리는 전압신호를 상기 록인 증폭기(200)로 출력하는 차동증폭기(600); 및 상기 가변저항기의 양단에 연결되어 회로를 구성하며 구동전압이 제거된 신호를 상기 록인 증폭기(200)로 출력하는 차동증폭기(700)를 더 구비하는 것을 특징으로 하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템.

청구항 3.

제 1항에 있어서, 상기 실리콘 탐침의 첨단 반경은 10nm 이하인 것을 특징으로 하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템.

청구항 4.

제 1항에 있어서, 상기 실리콘 탐침의 첨단에 가해주는 교류전류의 크기는 15~60nA인 것을 특징으로 하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템.

청구항 5.

제 1항에 있어서, 상기 고경도의 전도성 박막은 텅스텐 또는 전도성 다이아몬드인 것을 특징으로 하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템.

청구항 6.

(a) 통전이 가능하도록 고경도의 전도성 박막이 적층되어 있는 주사탐침현미경의 탭핑 모드용 실리콘 탐침을 반도체 소자의 표면에 접촉시켜 나노단위의 접점을 형성시키는 단계;

(b) 상기 접점에 교류전류를 가하여 국소적으로 자체발열시키는 단계;

(c) 상기 자체발열에 의한 온도상승으로부터 발생하는 열전전압을 측정하는 단계;

(d) 상기 열전전압을 통해 상기 접점에서의 국소적인 열전계수를 구하는 단계를 포함하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정방법.

청구항 7.

제 6항에 있어서, 상기 실리콘 탐침의 첨단 반경은 10nm 이하인 것을 특징으로 하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정방법.

청구항 8.

제 6항에 있어서, 상기 (b)단계에서 가해주는 교류전류의 구동전압이 1ω의 주파수를 가질 때, 발생하는 열전전압의 주파수는 2ω인 것을 특징으로 하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정방법.

청구항 9.

제 6항에 있어서, 상기 (b)단계에서 가해주는 교류전류의 크기는 15~60nA인 것을 특징으로 하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정방법.

청구항 10.

제 6항에 있어서, 상기 (d)단계에서 측정된 열전전압과 국소적인 열전계수와의 관계는 하기 식 1로 나타내어지는 것을 특징으로 하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정방법.

$$\Delta V_{TE}(x,y) = S(x,y)\Delta T \quad (1)$$

청구항 11.

제 10항에 있어서, 상기 열전계수와 불순물 농도와의 관계는 하기 식 2로 나타내어지는 것을 특징으로 하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정방법.

$$S_n = -\frac{k_B}{e}\left[\ln\frac{N_C}{n} + \left(\frac{5}{2} + r_e\right)\right], \qquad \tau_e \propto (E - E_C)^{r_e}$$

$$S_p = \frac{k_B}{e}\left[\ln\frac{N_V}{p} + \left(\frac{5}{2} + r_h\right)\right], \qquad \tau_h \propto (E_V - E)^{r_h}$$

(상기 식 중, S_n과 S_p는 각각 n형, p형 불순물의 열전계수이고, e는 전자의 전하량, k_B는 볼쯔만 상수, Nc는 전도대(conductance band) 바닥상태의 상태밀도(density of state), Nv는 가전자대(valence band) 최상단의 상태밀도(density of state), n은 n형 불순물의 농도, p는 p형 불순물의 농도, re 는 자유이송시간(mean free time, τ)에 의하여 정의되는 전자의 산란계수(scattering parameter)이고, rh는 자유이송시간에 의하여 정의되는 정공의 산란계수임)

청구항 12.

제 6항에 있어서, 상기 고경도의 전도성 박막은 텅스텐 또는 전도성 다이아몬드인 것을 특징으로 하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정방법.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 반도체 소자내의 불순물 농도 분포 측정시스템에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 대기중에서도 나노스케일의 공간분해능을 얻을 수 있는 반도체 소자내의 불순물 농도 분포 측정시스템 및 측정방법에 관한 것이다.

반도체 소자내의 불순물 농도 분포(dopant density distribution)는 반도체 소자의 제작, 제조공정의 평가 및 국소적 결함 분석 등 기타 물성의 연구에 있어서 기본이 되는 것이기 때문에 정확한 값을 구하기 위한 측정 방법이 많이 연구 개발되고 있다. 특히, 반도체 소자가 불순물의 종류와 공간적인 분포정도에 의하여 동작되기 때문에 소자의 특성을 알기 위해서는 이들의 정확한 값을 알아내는 것은 필수적이며, 현재 가속화되고 있는 반도체 소자의 극미세화 및 고집적화는 반도체 소자의 구조분석에 있어서 나노 스케일의 분해능을 요구하고 있다.

대표적인 불순물 농도분포 측정 기법으로는 크게 광학식 측정기법, 이차이온을 이용한 방법(Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS) 및 주사탐침현미경(Scanning Probe Microscope)을 활용한 주사정전용량현미경(Scanning Capacitance Microscope)과 주사열전현미경(Scanning Thermoelectric Microscope)을 이용한 방법 등을 들 수 있다.

이들 중 광학식 측정기법은 불순물 농도가 서로 다른 영역을 통과한 빛의 산란 정도가 달라지는 것을 불순물 농도분포 측정에 이용하는 것으로서 시편에 손상이 적고 빠른 측정이 가능하지만 측정 분해능이 빛의 파장(200~300 nm)에 의하여 제한되기 때문에 수십나노 단위의 스케일의 측정이 어렵다는 단점이 있다.

한편, 이차이온을 이용한 방법은 1~30keV의 에너지를 갖는 일차이온의 충돌에 의해 샘플표면으로부터 발생되는 이차이온을 분석함으로써 샘플표면의 원자의 종류와 조성을 측정하는 방법이며 높은 감도와 분해능을 보이지만, 측정신호가 표면전자상태에 민감하며, 정량분석이 곤란할 뿐만 아니라, 샘플의 표면을 파괴하게 되는 파괴적 분석기법이라는 것이 문제점으로 작용한다.

또한, 주사정전용량현미경을 이용하는 방법은 정전용량 센서를 탐침에 연결하여 국소 불순물 농도에 따른 탐침과 샘플사이의 국소 정전용량(capacitance)을 측정함으로써 불순물의 농도를 알아낼 수 있는 방법이다. 도 1에는 주사정전용량현미경을 이용한 불순물 측정장치의 개략도를 도시하였다. 도 1을 참조하면, 주사정전용량현미경에서 사용되는 정전용량 센서는 고주파 발진기와 전기적 공진장치로 구성되어 있으며 외부에 연결된 정전용량이 변하면 공진주파수가 변하는 것에 의해 매우 작은 정전 용량($10^{-19}F$)까지도 측정할 수 있게 되어 있다. 그러나 나노미터 크기의 탐침과 샘플 사이의 정전용량이 매우 작아서(10^{-16} ~ $10^{-18}F$) 직접 측정할 수 없기 때문에, 100Khz 이하의 낮은 주파수로 측정신호를 변조시킨 후 정전용량의 전압에 대한 미분치를 측정한다. 그러나 하기 수학식 1에서 보듯이 정전용량은 작용면적에 비례하므로 탐침 끝의 지름이 작아지면 분해능은 높아지게 되지만 동시에 정전용량의 크기가 작아지게 되고, 이에 따라 신호의 변조가 어려워지고 측정감도가 저하된다는 단점이 있다

$$C=\frac{Q}{V}=\frac{\varepsilon_0 A}{d_c}$$

상기 식에서, ε_0는 탐침과 시편사이의 유전률, A 는 면적이며 d_c 는 탐침끝의 지름이다.

한편, Ho-Ki Lyeo 등은 주사열전현미경 (Scanning Thermoelectric Microscope)을 이용하여 반도체의 p-n 접합부근에서 열전전압을 수 나노미터의 공간적 정밀도로 측정하였다고 보고하였다(Ho-Ki Lyeo, A. A. Khajetoorians, Li Shi, Kelvin P. Pipe, Rajeev J. Ram, Ali Shakouri, C. K. Shih, 2004, "Profiling the Thermoelectric Power of Semiconductor Junctions with Nanometer Resolution," Science, Vol. 303, pp. 816-818). 이는 샘플을 5×10^{-11} torr의 초고진공(ultra high-vacuum) 속에 위치시킨 후 샘플의 후면에 부착된 열원으로 샘플이 주위보다 5~30K 정도 높은 온도를 유지하도록 가열한 후, 상온의 온도를 갖는 나노스케일의 탐침 첨단을 샘플의 표면에 접촉시키면 탐침 첨단으로의 열전달 때문에 샘플에는 국소적으로 온도 구배가 발생하게 된다. 이때, 이러한 온도 구배는 국소 열전계수에 비례하는 열

전 전압을 발생시키는데, 이를 측정함으로써 국소 열전계수를 알아내어 수 나노미터 단위의 높은 공간분해능으로 불순물의 농도를 측정할 수 있는 방법이다. 그러나, 상기 방법은 검출되는 신호의 크기가 탐침과 샘플의 접촉면적과 무관하다는 장점에도 불구하고 초고진공상태에서 측정이 이루어져야 하는 대단히 어려운 측정법이라는 단점이 있다.

한편, 대한민국 특허등록 제1992-0003872호에는 반도체 기판에 경사각을 갖는 사면을 형성하여 두개의 탐침으로 분포저항을 깊이 방향으로 측정하도록 하는 반도체 기판의 분포저항 및 불순물 농도 측정방법이 개시되어 있으나, 나노스케일의 공간분해능을 얻기 어려우며, 반도체 기판을 소정의 경사각으로 갈아내야 하는 파괴적인 방법이라는 문제점이 있다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

따라서, 본 발명이 이루고자 하는 첫 번째 기술적 과제는 대기중에서도 나노스케일의 분해능을 가지며 비파괴적인, 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템을 제공하는 것이다.

본 발명이 이루고자 하는 두 번째 기술적 과제는 상기 시스템을 이용한 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정방법을 제공하는 것이다.

발명의 구성

본 발명은 상기 첫 번째 기술적 과제를 달성하기 위하여,

주사탐침현미경(100), 상기 주사탐침현미경의 일부 구성요소로서, 통전이 가능하도록 고경도의 전도성 박막이 적층되어 있는 실리콘 탐침(10), 상기 실리콘 탐침(10)의 외팔보(11)에 연결되어 교류전류를 공급하며, 상기 실리콘 탐침(10)과 반도체 소자 샘플간의 접점에서 발생하는 열전전압 신호를 분리하는 록인 증폭기(200), 상기 반도체 소자 샘플의 하부에 연결되어 통전이 되도록 하는 반도체 샘플 고정부(300), 상기 반도체 샘플 고정부(300)에 연결되어 신호측정시 구동전압을 제거하는 가변저항기(400), 및 상기 가변저항기(400)에 연결되어 탐침이 반도체 샘플 표면을 주사하는 동안 전류의 크기를 일정하게 유지시키는 부가저항(500)을 구비하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템을 제공한다.

본 발명은 상기 두 번째 기술적 과제를 달성하기 위하여,

(a) 통전이 가능하도록 고경도의 전도성 박막이 적층되어 있는 주사탐침현미경의 탭핑 모드용 실리콘 탐침을 반도체 소자의 표면에 접촉시켜 나노단위의 접점을 형성시키는 단계; (b) 상기 접점에 교류전류를 가하여 국소적으로 자체발열시키는 단계; (c) 상기 자체발열에 의한 온도상승으로부터 발생하는 열전전압을 측정하는 단계; 및 (d) 상기 열전전압을 통해 상기 접점에서의 국소적인 열전계수를 구하는 단계를 포함하는 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정방법을 제공한다.

이하에서는 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템 및 그 측정방법에 대한 바람직한 실시예에 관하여 상세하게 설명한다.

본 발명에 따른 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템 및 그 측정방법은 종래의 주사열전현미경과는 달리, 나노접점에 교류전류를 가함으로써 샘플내에 나노미터의 온도구배를 직접 발생시키기 때문에 초진공이 필요없이 대기중에서도 측정이 가능하다는 것을 특징으로 한다.

본 발명에서 교류전류를 가하는 이유는 가해주는 구동전압과 접점에서 발생하는 열전전압을 분리하여 측정하기 위함이다. 즉, 탐침과 시편의 접점에 ω의 주파수를 가지는 교류 전류를 가하면 접점에서의 열발생은 전류의 제곱에 비례하므로 2ω의 주파수를 가지고 변동하게 되고 따라서 접점의 온도도 2ω의 주파수를 가지게 된며, 접점에서 온도변화와 열전계수와의 곱에 의해 발생되는 열전전압은 2ω의 주파수를 가지게 된다. 이에 의해, 구동전압과 열전전압의 주파수 차이로부터 열전전압을 분리하여 측정할 수 있게 되는 것이다.

도 2에는 본 발명에 따른 접점 및 그 접점에서 발생하는 주기적 정상상태(periodic steady state)에 대한 개략도를 도시하였으며, 본 발명에 따른 측정원리의 이해의 편의를 위해 접점에서 발생하는 주기적 정상상태의 열현상에 대해 상기 도 2를 참조하여 이하와 같은 해석을 수행하였다.

탐침과 샘플의 접점으로부터의 거리를 r이라고 할 때, 주기적으로 가열되는 접점의 온도변화를 해석하기 위한 에너지 평형식은 하기 수학식 2로 나타낼 수 있다.

$$\rho C_p A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r}\left(kA \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q} A$$

(상기 식 중, ρ와 Cp는 각각 밀도와 비열이고, A는 전류가 통과하는 단면적이며, T는 온도, K는 열전도 계수임)

한편, 상기에서 $\dot{q}$ 는 단위부피당 발열량이며, 이는 하기 수학식 3으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{q} = j^2 \rho_e = \frac{I^2}{a^2 r^4} \rho_e$$

(상기 식 중, a는 접점으로부터의 거리 r에 따른 넓이 계수이고, ρ_e는 전기비저항임)

상기 수학식 3에서 알 수 있듯이 발열량은 전류의 제곱에 비례하고 접점으로부터의 거리의 네제곱에 반비례하게 된다. 따라서, 탐침이 샘플에 가까워질수록 발생되는 국소적 열량은 급격히 증가함을 알 수 있다. 한편 상기 수학식 3에서 I는 ω의 주파수를 가지는 교류전류이므로 열발생중 주기적 성분은 하기 수학식 4로 표현될 수 있다.

$$q = q_0 e^{i2\omega t}$$

한편, 온도변화는 열량의 주기적인 변화에 대해 어느정도의 위상뒤짐을 가지고 나타나는데 이는 하기 수학식 5로 나타낼 수 있다.

$$T = \Delta T e^{i2\omega t}$$

(상기 식 중, △T는 복소온도이며 이로부터 주기적 정상상태 온도변화의 진폭과 위상을 얻을 수 있음)

이제 상기 수학식 2의 에너지 평형식으로부터 복소온도를 구하면, 하기 수학식 6으로 나타낼 수 있고,

$$\Delta T(r) = \frac{C_1}{r e^{\frac{r}{S}}} + \frac{SG}{2r}\left[\frac{1}{Sr} + \frac{e^{\frac{r}{S}} \cdot \ln r}{2S^2}\left(1 - e^{-\frac{2r}{S}} \right) + \frac{e^{\frac{r}{S}}}{2S^2}\left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(-\frac{r}{S} \right)^n}{n \cdot n!} - e^{-\frac{2r}{S}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{r}{S} \right)^n}{n \cdot n!} \right) + C_2 \right]$$

(상기 식 중, S는 침투깊이(penetration depth)이고, C1과 C2는 적분상수임)

상기 수학식 6에서, 접점으로부터의 거리 r이 무한대가 될 때 온도변화의 진폭은 0이 되므로, 이때의 C_2는 하기 수학식 7로 표현될 수 있다.

$$C_2 = -\frac{SG}{2r}\left[\frac{e^{\frac{r}{S}}}{2S^2}\left(\ln r + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{\left(-\frac{r}{S}\right)^n}{n\cdot n!}\right)\right]$$

또한, 탐침과 샘플이 접촉했을 때 탐침의 첨단부와 샘플의 접점에서는 온도의 진폭이 같고 열유동율(heat flux)이 같다는 조건으로부터 C_1을 구할 수 있는데, 이는 하기 수학식 8로 나타낼 수 있다.

$$C_1 = \frac{S_t G_t e^{\frac{2R}{S_t}}\cdot I_1}{2}\left[\frac{K_t(\frac{R}{S_t}-1)-K_s(\frac{R}{S_t}+1)}{K_t(\frac{R}{S_t}+1)+K_s(\frac{R}{S_s}+1)}\right]+\frac{S_t G_t I_2}{2}+$$

$$\frac{G_s K_s e^{\frac{R}{S_t}+\frac{R}{S_s}}\cdot RI_3}{K_t(\frac{R}{S_t}+1)+K_s(\frac{R}{S_s}+1)}+\frac{{I_0}^2\cdot\rho_c e^{\frac{R}{S_t}}}{\pi^2R^2\left[K_t\left(\frac{R}{S_t}+1\right)+K_s\left(\frac{R}{S_t}+1\right)\right]}$$

(상기 식 중, 하첨자 t와 s는 각각 탐침과 샘플을 의미하는 것으로서 S_t와 S_s는 각각 탐침과 샘플의 침투깊이를 나타내며, K_t와 K_s는 각각 탐침과 샘플의 열전도계수를 나타내고, R은 접점의 반지름임)

다음으로, 교류전류의 주파수가 500Hz이고 회로에 흐르는 전류의 크기가 20nA이며 접점의 반지름이 2nm인 경우에 대하여 접점으로부터의 거리에 따른 온도 진폭에 대한 이론적인 계산 결과를 도 3에 나타내었다. 도 3을 참조하면 접점으로부터 10nm 정도 이내에 온도진폭의 90% 이상이 발생함을 알 수 있고, 이는 본 발명에 따른 시스템에서 접점에서 발생하는 국소적 열발생의 원리를 설명해 준다.

한편, 교류전류의 주파수가 500Hz이고 회로에 흐르는 전류의 크기가 20nA인 경우에 대하여 접점의 반지름의 크기에 따른 온도진폭에 대한 이론적인 해석 결과를 도 4에 나타내었는데, 접점의 크기가 작을수록 접점에서 측정되는 열전전압의 크기가 커진다는 것을 알 수 있다. 특히 접점의 크기가 1nm에서 2nm로 변하는 동안 10 배 이상의 온도진폭 변화가 발생함을 확인할 수 있는데, 본 발명에서는 샘플과 탐침이 접촉된 상태에서 신호가 측정되므로 측정의 공간 분해능은 탐침과 샘플의 접점의 크기에 의해 결정된다는 것을 알 수 있고, 본 발명에서는 탐침과 샘플의 접점의 반지름이 수 nm 수준이며 따라서 고분해능의 측정이 가능하게 될 뿐만 아니라, 접점의 반지름이 작아질 수록 국소적 발열량 및 열전전압의 크기가 커지게 되므로 측정감도 또한 매우 뛰어나게 된다. 상기 이론적인 계산결과는 후술하는 실시예의 결과와 비교를 통해서 접점의 크기를 추정하는 자료로 사용될 수 있다.

도 5에는 본 발명에 따른 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템의 개략도를 나타내었다. 도 5를 참조하면, 본 발명에 따른 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템은 통상적인 주사탐침현미경(Scanning Probe Microscope, 100)을 구비하고 있으며, 그 내부에는 통전이 가능하도록 텅스텐 박막이 적층되어 있는 실리콘 탐침(10), 레이저 다이오드(12), 압전 위치 스캐너(piezo position scanner, 13) 등이 일부 구성요소들로서 구비되어 있다. 이러한 주사탐침현미경은 당업계에서 통상적으로 사용되는 것이면 특별히 제한되지 않으며, 도 6에는 본 발명에 사용되는 주사탐침현미경의 일례의 정면도를 도시하였다. 한편, 도 7에는 본 발명에 사용되는 실리콘 탐침의 확대사진을 도시하였는데, 상기 실리콘 탐침(10)은 탭핑모드(tapping mode)용인 것이 바람직하다. 그 이유는 주지되어 있는 바와 같이, 반도체 소자에 사용되는 실리콘은 공기중에서 산화되어 표면에 약 1nm정도의 산화막을 형성하게 되는데, 탐침이 샘플과 전기적인 접촉을 이루기 위해서는 탐침의 첨단이 상기 산화막을 뚫어야 하기 때문이다. 이를 위해서 외팔보(cantilever)의 스프링 상수가 접촉모드(contact mode)보다 훨씬 큰 탭핑모드용 실리콘 탐침을 이용하는 것이 좋다. 한편, 상기 실리콘 탐침의 외팔보의 길이와 너비 및 탐침 첨단부의 높이는 특별히 제한되는 것은 아니며, 필요에 따라 변경될 수 있다. 상기 실리콘 탐침은 반도체 소자와 접촉시 통전이 가능하도록 고경도의 전도성 박막이 적층되어 있는데, 상기 고경도의 전도성 박막의 적층 두께는 특별히 제한되는 것은 아니지만, 탐침의 첨단이 국소적 발열에 의해 손상되지 않도록 약 100nm 정도로 적층하는 것이 바람직한데, 상기 적층 두께가 두꺼워질 수록 공간분해능이 떨어질 수 있다. 상기 고경도의 전도성 박막은 당업계에 통상적으로 사용되는 것이

면 특별히 제한되지 않으며, 예를 들면, 텅스텐 또는 전도성 다이아몬드일 수 있다. 한편, 본 발명에 사용되는 실리콘 탐침의 첨단 반경은 10nm 이하인 것이 바람직한데, 그 이유는 이미 설명한 바와 같이, 첨단반경이 작을수록 접점의 반지름도 작아지며, 이에 의해 수 nm 단위의 공간분해능을 얻을 수 있기 때문이다.

다시 도 5를 참조하면, 본 발명에 따른 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템에서, 불순물의 농도를 측정하고자 하는 반도체 소자 샘플은 본 발명에 따른 시스템 회로에 연결되어 있는 금속으로 이루어진 반도체 샘플 고정부(300)에 예를 들면, 실버 페이스트 등을 사용하여 고정시킬 수 있다. 본 발명에 따른 시스템에서 실리콘 탐침(10)과 샘플간의 접점에서의 열전전압을 측정하기 위한 회로의 저항은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 우선 탐침으로부터 샘플이 고정되어 있는 샘플 고정부(300)까지의 저항인 Rc, 다음으로 상기 반도체 샘플 고정부(300)에 연결되어 신호측정시 구동전압을 제거하는 가변저항기(Rp, 400), 및 상기 가변저항기(400)에 연결되어 탐침이 반도체 샘플 표면을 주사하는 동안 전류의 크기를 일정하게 유지시키는 부가저항(Ra, 500)으로 나눌 수 있는데, 상기 부가저항(Ra, 500)는 Rc와 Rp보다 훨씬 큰 저항을 사용한다. 이는 탐침이 샘플의 표면을 주사하는 동안 접점의 저항이 변화하더라도 접점을 통과하는 전류의 크기를 일정하게 유지하기 위함이다. 한편, Rc 에는 측정하고자 하는 2ω의 주파수를 갖는 열전전압과 1ω의 주파수를 같는 구동전압이 동시에 걸리게 된다. 열전전압은 구동전압에 비해서 보통 매우 작은 전압이므로 이를 측정하기 위해서는 우선 구동전압을 제거한 후 록인 증폭기(Lock-in amplifier)를 사용하여 열전전압을 분리해 내야한다. 이를 위해서 가변저항기(Rp, 400)를 Rc 와 같은 크기가 되도록 조절한 후에 Rc 에 걸리는 전압에서 가변저항기(Rp, 400)에 걸리는 전압을 빼준후 남은 신호로부터 록인 증폭기(200)를 사용하여 열전전압을 분리해낸다. 이를 위한 회로의 구성은 특별히 제한되지 않으며 예를 들면, 상기 실리콘 탐침(10)의 외팔보(11) 및 반도체 샘플 고정부(300)에 공통으로 연결되어 회로를 구성하며 접점에 걸리는 전압신호를 상기 록인 증폭기(200)로 출력하는 차동증폭기(600); 및 상기 가변저항기의 양단에 연결되어 회로를 구성하며 구동전압이 제거된 신호를 상기 록인 증폭기(200)로 출력하는 차동증폭기(700)를 구비하는 것에 의해 달성할 수 있다.

본 발명에 따른 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템에서, 상기 실리콘 탐침의 첨단에 가해주는 교류전류의 크기는 15~60nA인 것이 바람직한데, 15nA 미만인 때에는 발생하는 열전전압이 너무 작다는 문제점이 있고, 60nA를 초과하는 때에는 높은 발열로 인해 탐침 끝이 손상될 염려가 있기 때문이다.

한편, 본 발명에서 가해주는 교류전류의 주파수는 100~1000Hz인 것이 바람직한데, 주파수가 100Hz 미만인 때에는 노이즈가 커지고 Fourier Transform에 소요되는 시간이 길어져서 스캐닝을 지나치게 느리게 해야한다는 문제가 있고, 1000Hz를 초과하는 경우에는 진폭이 작아지므로 온도상승에 필요한 열량이 충분히 공급되지 못할 염려가 있다.

본 발명에 따른 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정방법은 (a) 통전이 가능하도록 고경도의 전도성 박막이 적층되어 있는 주사탐침현미경의 탭핑 모드용 실리콘 탐침을 반도체 소자의 표면에 접촉시켜 나노단위의 접점을 형성시키는 단계; (b) 상기 접점에 교류전류를 가하여 국소적으로 자체발열시키는 단계; (c) 상기 자체발열에 의한 온도상승으로부터 발생하는 열전전압을 측정하는 단계; 및 (d) 상기 열전전압을 통해 상기 접점에서의 국소적인 열전계수를 구하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

본 발명에 따른 측정방법에서는 우선, 교류전류의 인가에 의해 국소적으로 발열이 되고, 이에 의한 온도상승으로 인해 발생하는 열전전압을 측정하게 되는데, 이러한 열전전압과 열전계수와의 상관관계식을 이용하여 열전계수를 측정한 뒤, 최종적으로 열전계수와 불순물 농도와의 상관관계식을 이용하여 불순물의 농도를 측정할 수 있다. 열전전압과 열전계수의 상관관계는 하기 수학식 9로 나타낼 수 있으며, 열전계수와 불순물 농도와의 상관관계는 하기 수학식 10으로 표현된다.

$$\Delta V_{TE}(x,y) = S(x,y)\Delta T$$

(상기 식 중, $\triangle V_{TE}$는 열전전압의 진폭, S는 열전계수 이고, △T는 접점에서의 온도진폭임)

$$S_n = -\frac{k_B}{e}\left[\ln\frac{N_C}{n} + \left(\frac{5}{2} + r_e\right)\right], \qquad \tau_e \propto (E - E_C)^{r_e}$$

$$S_p = \frac{k_B}{e}\left[\ln\frac{N_V}{p} + \left(\frac{5}{2} + r_h\right)\right], \qquad \tau_h \propto (E_V - E)^{r_h}$$

(상기 식 중, S_n과 S_p는 각각 n형, p형 불순물의 열전계수이고, e는 전자의 전하량, k_B는 볼쯔만 상수, Nc는 전도대(conductance band) 바닥상태의 상태밀도(density of state), Nv는 가전자대(valence band) 최상단의 상태밀도(density of state), n은 n형 불순물의 농도, p는 p형 불순물의 농도, re 는 자유이송시간(mean free time, τ)에 의하여 정의되는 전자의 산란계수(scattering parameter)이고, rh는 자유이송시간에 의하여 정의되는 정공의 산란계수임)

상기에서 Nc와 Nv는 온도의 함수이고, re, rh는 물질에 따라 결정되는 값인데, 결국 상기 수학식 10을 이용하면 열전계수를 통해 불순물의 농도를 구할 수 있다.

본 발명에서 얻어지는 열전계수의 부호는 n형 불순물이 도핑된 부분과 p형 불순물이 도핑된 부분에서 반대로 얻어지기 때문에 불순물이 n형인지 p형인지도 구분해 낼 수가 있다.

이하에서는 바람직한 실시예를 들어 본 발명을 더욱 상세하게 설명하지만, 본 발명이 이에 의해 제한되는 것은 아니다.

예비 실시예 1

주사탐침현미경은 Veeco사의 Dimension-3100을 사용하였으며, 탭핑모드용 실리콘 탐침에 100nm의 텅스텐 박막을 스퍼터링을 이용하여 적층하였다. 상기 실리콘 탐침의 외팔보의 길이와 너비는 각각 225㎛와 28㎛였고, 샘플과 접촉하게 되는 탐침의 첨단부의 높이는 약 12㎛이고 첨단의 반경은 약 10nm였다. 샘플로는 불산을 사용하여 게이트 영역의 산화막과 금속층을 제거한 모스전계효과 트랜지스터를 사용하였으며, 도 8에 상기 모스전계효과 트랜지스터의 확대사진을 도시하였다. 본 발명에서는 금속 고정부에 실버페이스트를 사용하여 상기 모스전계효과 트랜지스터를 고정하였다. 우선 열전전압이 제대로 검출되는 지 파악하기위하여 탐침의 첨단부를 모스전계효과 트랜지스터의 소스 부분에 접촉시킨 상태에서 교류전원의 주파수를 1~10000 Hz 로 증가시키면서 2ω신호를 측정하였으며 그 결과를 도 9에 도시하였다. 도 9를 참조하면 측정된 2ω신호는 회로에 흐르는 전류변화량의 제곱에 비례함을 근사적으로 알 수 있으며, 이는 접점에서의 단위부피당 발열량을 나타낸 수학식 3과 일치하는 경향을 보임을 확인할 수 있다.

예비 실시예 2

주사탐침현미경은 Veeco사의 Dimension-3100을 사용하였으며, 탭핑모드용 실리콘 탐침에 100nm의 텅스텐 박막을 적층하였다. 상기 실리콘 탐침의 외팔보의 길이와 너비는 각각 225㎛와 28㎛였고, 샘플과 접촉하게 되는 탐침의 첨단부의 높이는 약 12㎛이고 첨단의 반경은 약 10nm였다. 샘플로는 불산을 사용하여 게이트 영역의 산화막과 금속층을 제거한 모스전계효과 트랜지스터를 사용하였으며, 금속 고정부에 실버페이스트를 사용하여 상기 모스전계효과 트랜지스터를 고정하였다. 다음으로 회로에 흐르는 전류를 20nA로 고정시킨 상태에서 교류전원의 주파수를 500Hz로 설정하였으며, 접점의 크기를 추정하기 위하여 처음에는 탐침의 첨단을 미접촉 상태에서 소스의 상단에 위치시킨 후에 탐침이 모스전계효과 트랜지스터의 표면에 가까워 질때와 접촉후 다시 떨어질 때의 탐침의 외팔보의 굽힘정도와 열전전압의 진폭을 동시에 측정하여 도 10에 도시하였다. 도 10을 참조하면 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 약 1nm 정도의 자연 산화막(nativeoxide)을 뚫기위한 부가적인 접촉력(contact force)이 필요함을 의미한다. 즉, 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 같은은 현상으로 추측된다. 즉, A 지점에서 B 지점까지는 전체 회로 저항의 대부분을 접점의 전기저항(Rc)이 차지하는 것으로 판단되며, 이런 경우에 발열량은 하기 수학식 11에 따라 표현할 수 있다.

$$P = IV = \frac{V^2}{R_c}$$

따라서, 인가전압의 대부분이 접점에 걸리게 되고 접촉면적이 늘어남에 따라 저항이 줄어들게 되며 B 지점에 이르기 까지 발열량이 증가하게 되는 것이다.

그 후, B 지점에서 C 지점에 이르기까지는 접촉력이 좀 더 증가하면서 전기적 접촉면적이 좀더 증가하게 되고 이때는 전체 회로 저항의 대부분이 부가저항 Ra 에 걸리는 것으로 생각된다. 이 경우에 B 지점에서 C 지점까지는 접점을 통과하는 전류가 거의 일정한 값을 갖는다고 볼 수 있으며 이 경우의 발열량은 하기 수학식 12에 의해 표현될 수 있다.

$$P = IV = I^2 R_e$$

즉, 이 경우에는 오히려 발열량이 저항에 비례하게 되며 C 지점에 이르기 까지 발열량이 감소하게 되는 것으로 판단된다.

다음으로, C 지점에 다다른 후부터는 텅스텐이 소성변형을 일으킬 때까지는 접촉면적의 변화는 없으며 따라서 열전전압의 진폭은 일정하게 유지된다. 한편, 탐침이 소스 표면으로부터 멀어지는 경우에 나타나는 열전전압 진폭의 경향은 소스 표면으로 접근하면서 나타난 열전전압의 진폭의 변화경향과 거의 동일한 경향을 보이고 있는데 이는 탐침의 첨단이 소스 표면에 접하면서 탄성변형을 일으키고 있음을 보여준다. 본 발명에 사용된 실리콘 탐침의 외팔보의 힘상수(spring constant)가 2.8N/m 이고, C 지점 후로 신호 크기에 더 이상의 변화가 없으므로 외팔보의 45nm의 굽힘에 해당하는 접촉력 F를 계산해 보면 126nN의 값을 얻을 수 있다. 이때 접촉지점의 크기는 하기 수학식 13으로부터 구할 수 있다.

$$a = \left(\frac{3FR}{2E_e} \right)^{1/3}$$

$$E_e = \frac{1}{\frac{1-\eta_1^{\,2}}{E_1} + \frac{1-\eta_2^{\,2}}{E_2}}$$

(상기 식 중, a는 접촉지점의 지름이고, R은 탐침첨단의 곡률반경, h은 포아송비(Poisson's ratio), E는 탄성 모듈러스(elastic modulus)이며 하첨자 1, 2는 접하는 두 가지 물질을 나타냄)

상기 수학식 13을 이용하여 계산한 탐침과 모스전계효과 트랜지스터의 접점의 반지름의 크기는 약 5nm 정도이다.

예비 실시예 3

주사탐침현미경은 Veeco사의 Dimension-3100을 사용하였으며, 탭핑모드용 실리콘 탐침에 100nm의 텅스텐 박막을 적층하였다. 상기 실리콘 탐침의 외팔보의 길이와 너비는 각각 225㎛와 28㎛였고, 샘플과 접촉하게 되는 탐침의 첨단부의 높이는 약 12㎛이고 첨단의 반경은 약 10nm였다. 샘플로는 불산을 사용하여 게이트 영역의 산화막과 금속층을 제거한 모스전계효과 트랜지스터를 사용하였으며, 금속 고정부에 실버페이스트를 사용하여 상기 모스전계효과 트랜지스터를 고정하였다. 다음으로 교류전원의 주파수를 500Hz로 설정한 상태에서 전류를 10에서 60nA까지 변화시키며 열전계수를 측정하고 그 결과치와, 접점의 반지름이 1.2~1.5nm인 경우에 해당하는 열전전압의 예상치(계산값)을 도 11에 도시하였다. 도 11을 참조하면, 접점의 반지름이 1.3nm인 경우의 예상치가 실제 측정값과 가장 유사함을 알 수 있다. 따라서 상기 예비 실시예 2에서 역학적으로 계산한 접점의 추정치와 열공학적으로 추정한 접점의 크기 사이에 약 3.5nm의 오차가 존재하는데, 그 원인은 나노스케일의 열 및 역학적 현상을 마크로스케일에 사용되는 지배방정식을 통하여 해석했기 때문으로 판단된다. 본 예비 실시예 3의 결과로 미루어 본 발명에 따른 측정시스템의 공간 분해능은 약 3~4nm일 것으로 예상할 수 있으며, 이에 따라 나노스케일의 분석이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

실시예 1

주사탐침현미경은 Veeco사의 Dimension-3100을 사용하였으며, 탭핑모드용 실리콘 탐침에 100nm의 텅스텐 박막을 적층하였다. 상기 실리콘 탐침의 외팔보의 길이와 너비는 각각 225㎛와 28㎛였고, 샘플과 접촉하게 되는 탐침의 첨단부의 높이는 약 12㎛이고 첨단의 반경은 약 10nm였다. 샘플로는 불산을 사용하여 게이트 영역의 산화막과 금속층을 제거한 모스전계효과 트랜지스터를 사용하였으며, 금속 고정부에 실버페이스트를 사용하여 상기 모스전계효과 트랜지스터를 고정하였다. 다음으로 회로에 흐르는 전류를 20nA로 고정시킨 상태에서 교류전원의 주파수를 1~10000 Hz로 증가시키면서 모스전계효과 트랜지스터의 소스, 드레인 및 게이트가 제거된 영역에서의 연전전압의 진폭의 크기와 위상을 측정하였으

며, 그 결과를 도 12 및 13에 도시하였다. 도 12를 참조하면 소스와 드레인 부분의 열전전압이 게이트를 제거한 영역의 신호보다 10 배 정도 크게 측정되고 있음을 알 수 있는데, 이는 소스와 드레인 영역의 불순물 농도가 게이트를 제거한 영역의 불순물 농도보다 훨씬 높기 때문이다. 한편, 도 13을 참조하면 소스와 드레인 영역의 위상과 게이트가 제거된 부분의 위상의 부호는 서로 반대 값을 갖고 있다. 이는 모스전계효과 트랜지스터 제작시 소스와 드레인 영역에 도핑되는 불순물(dopant)의 종류가 게이트가 제거된 영역에 도핑되는 불순물의 종류가 서로 다르기 때문이다. 즉, n 형 불순물이 도핑된 부분과 p형 불순물이 도핑된 부분의 열전계수의 부호가 서로 다르기 때문이다.

실시예 2

주사탐침현미경은 Veeco사의 Dimension-3100을 사용하였으며, 탭핑모드용 실리콘 탐침에 100nm의 텅스텐 박막을 적층하였다. 상기 실리콘 탐침의 외팔보의 길이와 너비는 각각 225㎛와 28㎛였고, 샘플과 접촉하게 되는 탐침의 첨단부의 높이는 약 12㎛이고 첨단의 반경은 약 10nm였다. 샘플로는 불산을 사용하여 게이트 영역의 산화막과 금속층을 제거한 모스전계효과 트랜지스터를 사용하였으며, 금속 고정부에 실버페이스트를 사용하여 상기 모스전계효과 트랜지스터를 고정하였다. 다음으로 회로에 흐르는 전류를 20nA로 고정시킨 상태에서 교류전원의 주파수를 500Hz로 설정하여 모스전계효과 트랜지스터의 지면형상(topography)과 열전전압의 분포를 동시에 측정하였으며, 그 결과를 도 14에 나타내었다. 도 14를 참조하면, 다른 지점에 비해 상대적으로 불순물의 농도가 높은 소스와 드레인 영역의 열전전압의 진폭이 훨씬 크게 나옴을 확인할 수 있다.

발명의 효과

상기에서 살펴본 바와 같이, 본 발명에 따른 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템은 대기중에서 작동이 가능한 접촉식 측정방법으로서 접촉면적이 감소함에 따라 분해능 및 측정감도가 향상되는 나노스케일의 공간 분해능을 가지며 비파괴적인 측정시스템이라는 장점이 있고, 도핑되는 불순물이 n형인지 p형인지를 신속히 판별할 수 있을뿐만 아니라, 지면형상과 불순물의 농도를 동시에 측정할 수 있다.

도면의 간단한 설명

도 1은 종래의 주사정전용량현미경을 이용한 불순물 측정장치의 개략도이다.

도 2는 본 발명에 따른 접점 및 그 접점에서 발생하는 주기적 정상상태에 대한 개략도이다.

도 3은 교류전류의 주파수가 500Hz이고 회로에 흐르는 전류의 크기가 20nA이며 접점의 반지름이 2nm인 경우에 대하여 접점으로부터의 거리에 따른 온도진폭에 대한 이론적인 계산결과이다.

도 4는 교류전류의 주파수가 500Hz이고 회로에 흐르는 전류의 크기가 20nA인 경우에 대하여 접점의 반지름의 크기에 따른 온도진폭에 대한 이론적인 계산결과이다.

도 5는 본 발명에 따른 반도체 소자내의 불순물 농도분포 측정시스템의 개략도이다.

도 6은 본 발명에 사용되는 주사탐침현미경의 일례의 정면도이다.

도 7은 본 발명에 사용되는 실리콘 탐침의 확대사진이다.

도 8은 본 발명에 샘플로서 사용한 모스전계효과 트랜지스터의 확대사진이다.

도 9는 예비 실시예 1에 따른 주파수 대 열전전압 그래프이다.

도 10은 예비 실시예 2에 따른 외팔보의 굽힘정도와 열전전압의 진폭에 대한 그래프이다.

도 11은 예비 실시예 3에 따른 전류 대 열전전압 그래프이다.

도 12는 실시예 1에 따른 주파수 대 열전전압 그래프이다.

도 13은 실시예 1에 따른 주파수 대 위상 그래프이다.

도 14는 실시예 2에 따른 지면형상과 열전전압의 분포를 나타내는 도면이다.

<도면의 주요부분에 대한 부호의 설명>

10... 탐침 11... 외팔보

12... 레이저 다이오드 13...압전위치 스캐너

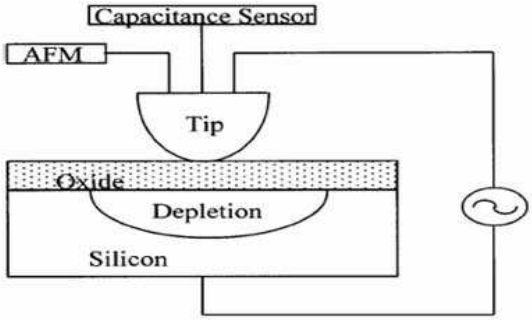
100...주사탐침현미경 200...록인 증폭기

300...반도체샘플 고정부 400...가변저항기

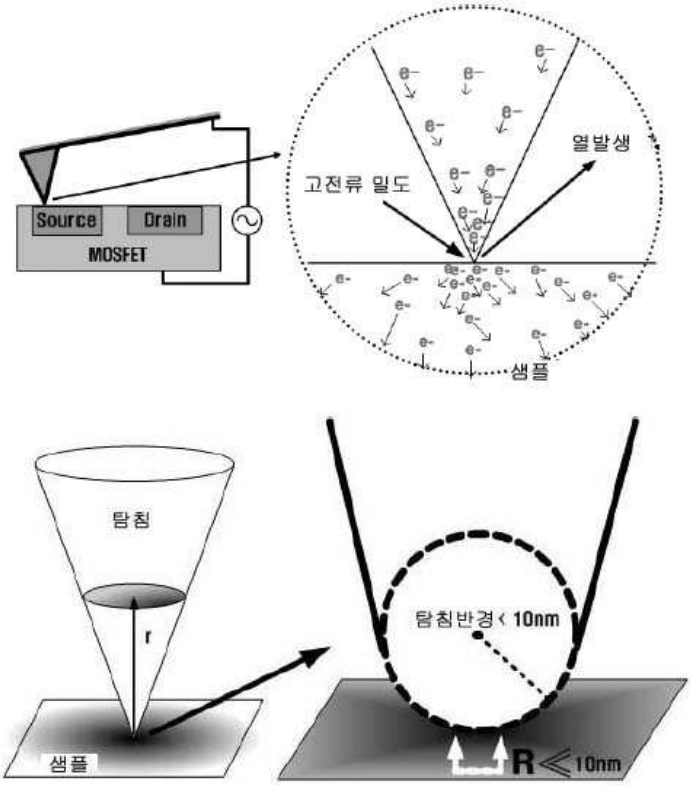
500...부가저항 600, 700...차동 증폭기

도면

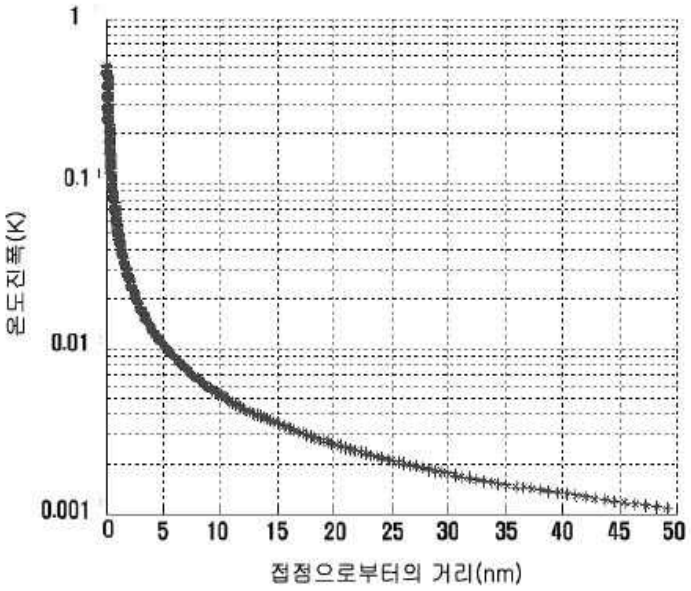
도면1



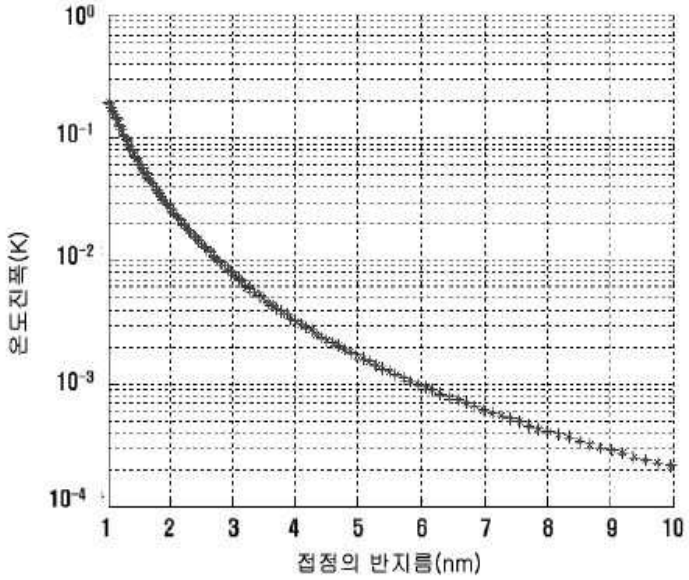
도면2


Source
Drain
MOSFET
고전류 밀도
열발생
샘플
탐침
r
샘플
탐침반경 < 10nm
R ≪ 10nm

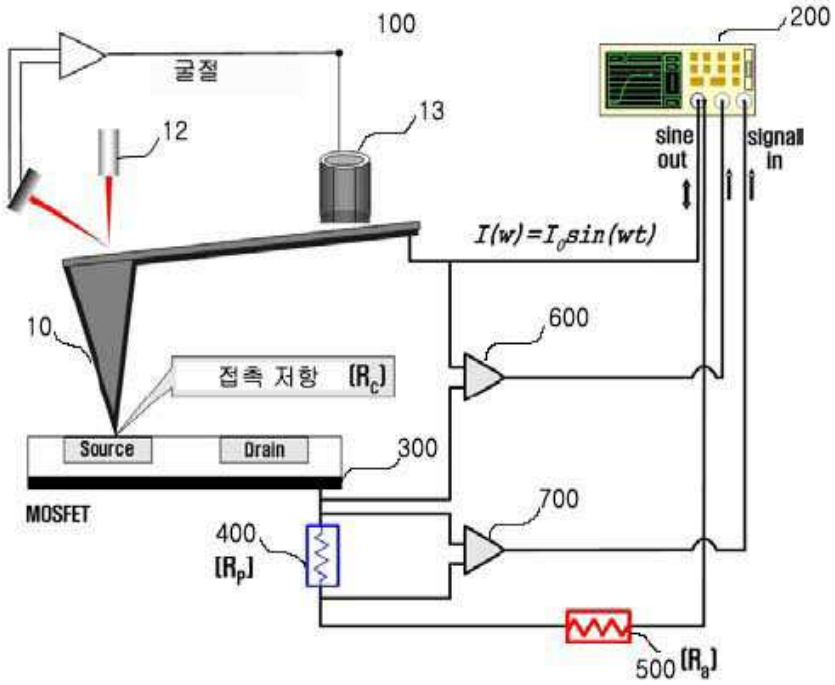
도면3


1
0.1
0.01
0.001
온도진폭(K)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
접점으로부터의 거리(nm)

도면4


10^0
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
온도진폭(K)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
접정의 반지름(nm)

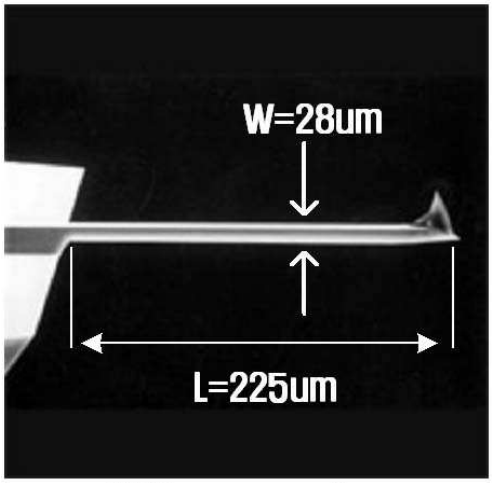
도면5


100
굴절
12
13
200
sine out
signal in
$I(w)=I_0 sin(wt)$
10
600
접촉 저항 (R_c)
Source
Drain
300
MOSFET
700
400
(R_p)
500 (R_a)

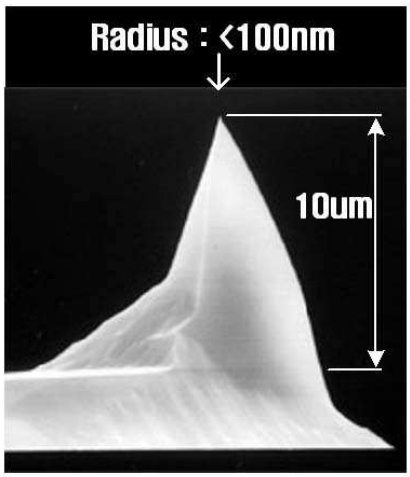
도면6



도면7

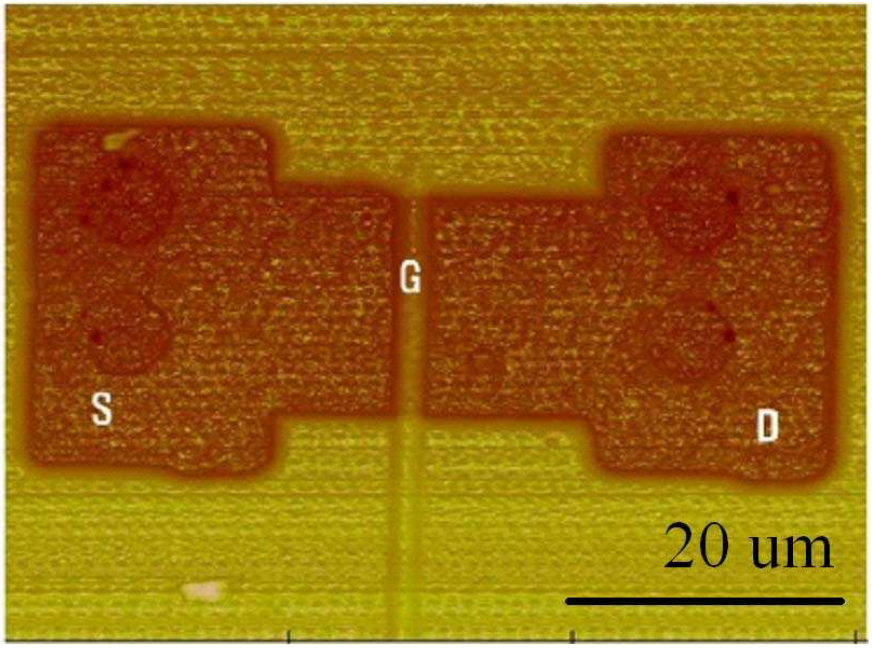


Silicon probe

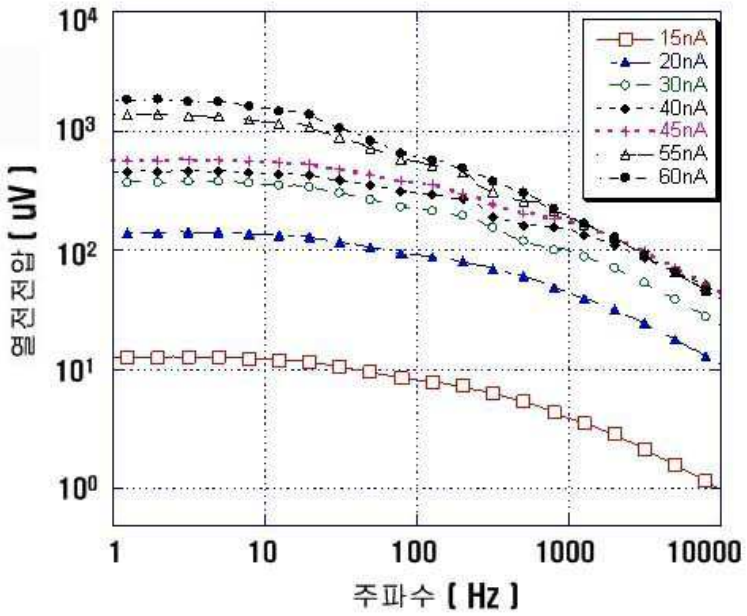


Probe Tip

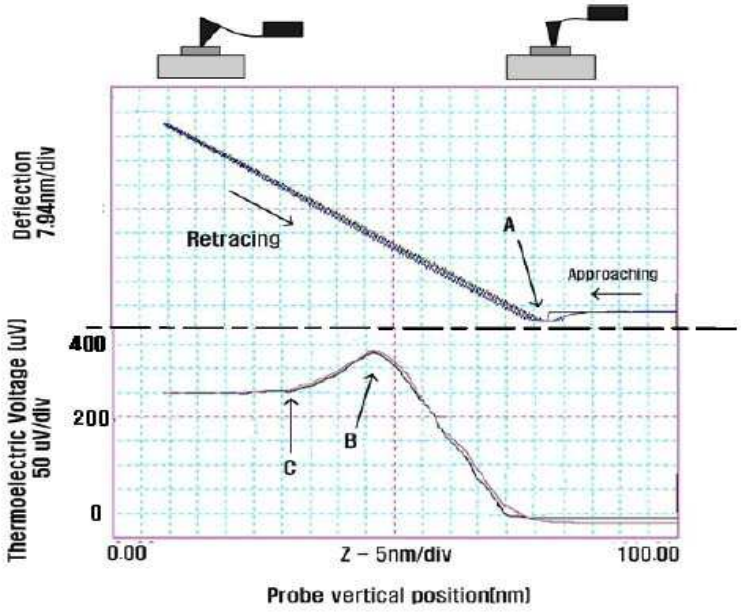
도면8


G
S
D
20 um

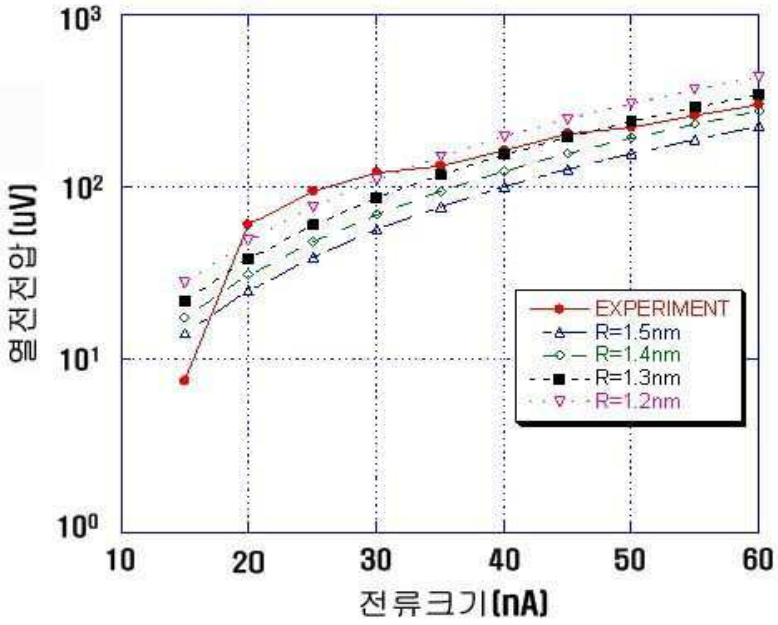
도면9


15nA
20nA
30nA
40nA
45nA
55nA
60nA
열전전압 [uV]
주파수 [Hz]
1
10
100
1000
10000

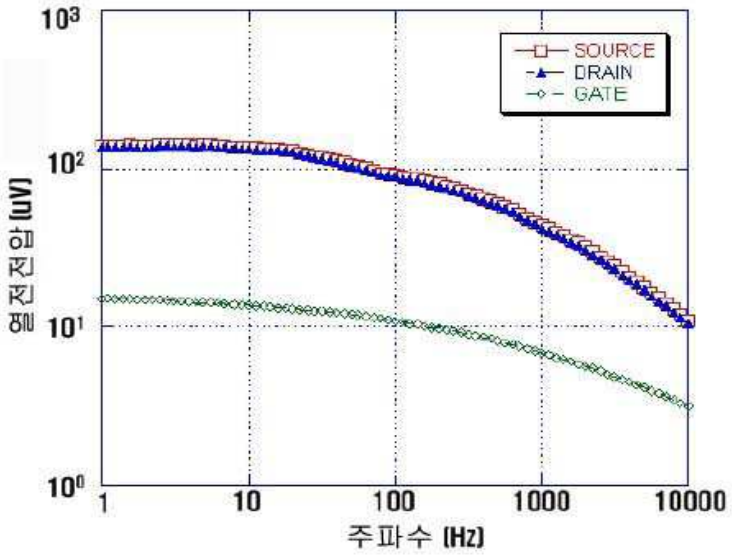
도면10


Deflection
7.94nm/div
Retracing
A
Approaching
Thermoelectric Voltage (uV)
50 uV/div
400
200
0
B
C
0.00
Z - 5nm/div
100.00
Probe vertical position(nm)

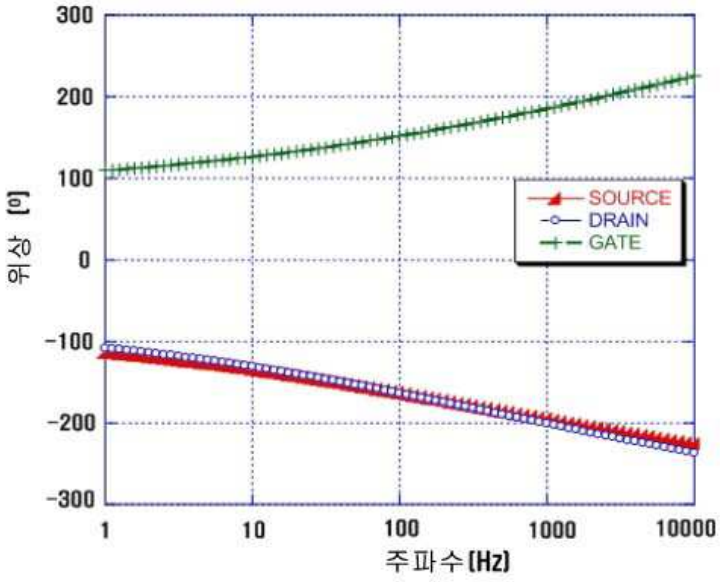
도면11


열전전압 (uV)
10³
10²
10¹
10⁰
10
20
30
40
50
60
전류크기(nA)
EXPERIMENT
R=1.5nm
R=1.4nm
R=1.3nm
R=1.2nm

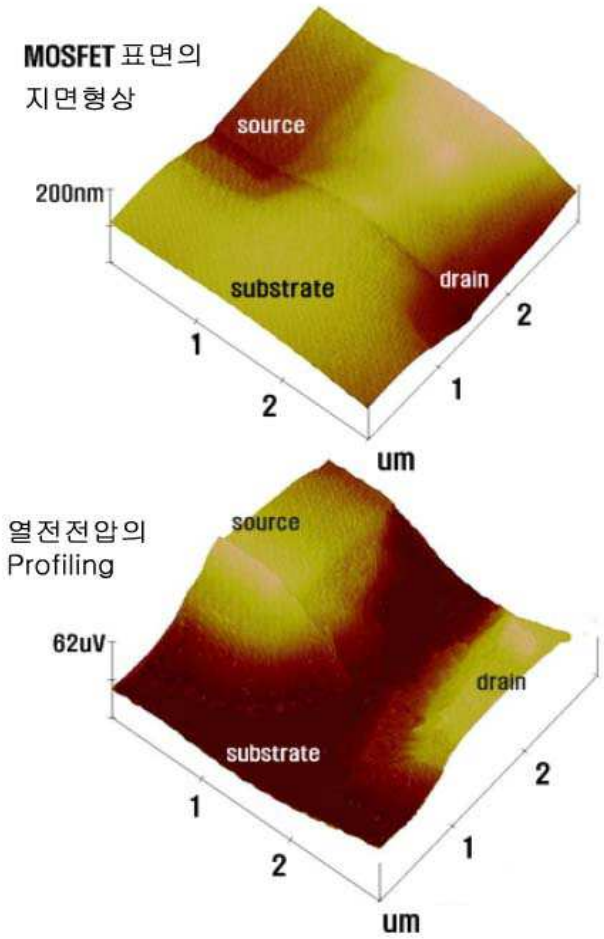
도면12


SOURCE
DRAIN
GATE
열전전압 [uV]
10^3
10^2
10^1
10^0
1
10
100
1000
10000
주파수 (Hz)

도면13


SOURCE
DRAIN
GATE
위상 [°]
300
200
100
0
-100
-200
-300
1
10
100
1000
10000
주파수 (Hz)

도면14


MOSFET 표면의
지면형상
source
200nm
substrate
drain
1
2
2
1
um
열전전압의
Profiling
source
62uV
drain
substrate
1
2
2
1
um