

작동중인 모스 전계 효과 트랜지스터 단면에서의 상대온도 및 전위 분포 측정

권 오 명[†]

(2002년 5월 15일 접수, 2003년 5월 9일 심사완료)

Cross Sectional Thermal and Electric Potential Imaging of an Operating MOSFET

Ohmyoung Kwon

Key Words : SThM(Scanning Thermal Microscope: 주사 탐침 열 현미경), MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor: 모스 전계 효과 트랜지스터), AFM(Atomic Force Microscope: 주사 탐침 원자력 현미경).

Abstract

Understanding of heat generation in semiconductor devices is important in the thermal management of integrated circuits and in the analysis of the device physics. Scanning thermal microscope was used to measure the temperature and the electric potential distribution on the cross-section of an operating metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET). The temperature distributions were measured both in DC and AC modes in order to take account of the leakage current. The measurement results showed that as the drain bias was increased the hot spot moved to the drain. The density of the iso-potential lines near the drain increased with the increase in the drain bias.

기호설명

C	정전용량	[F]
D	열 확산도	[m ² /s]
f	주파수	[s ⁻¹]
I	전류	[A]
I_d	드레인 전류	[A]
L	게이트 채널 길이	[m]
t	시간	[s]
V	전위	[V]
V_0	샘플 단면의 전위	[V]
V_1	교류전압의 진폭	[V]
V_{ds}	드레인과 소스의 전위차	[V]
V_{gs}	게이트와 소스의 전위차	[V]
ω	각속도	[rad/s]
ω_n	공진 각속도	[rad/s]

1. 서론

집적회로 제조기술이 발달함에 따라서 단위면적당 집적되는 전자소자의 수는 계속해서 증가하고 있고 이에 따라 단위면적당 열 발생량도 역시 빠르게 증가하고 있다. 열 발생량이 지나치게 많으면 집적회로의 안정적인 동작이 위협 받게 된다. 따라서, 집적회로의 열적인 관리가 공학적으로 중요한 문제임은 기지의 사실이다. 모스 전계 효과 트랜지스터(MOSFET)는 집적회로의 주요 구성요소로서 그 내부에서의 열 발생에 대한 연구는 집적회로의 안정적인 동작을 보장하기 위해서 필수적이다.

작동중인 모스 전계 효과 트랜지스터 내에서의 온도 분포를 측정하는 것은 집적회로 전체의 열적인 관리뿐만 아니라 모스 전계 효과 트랜지스터의 동작 자체를 분석하는데 있어서도 중요하다. 모스 전계 효과 트랜지스터 내에서 열은 전자와 포논의 산란(Electron-Phonon Scattering)에 의해서 전

[†] 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail: omkwon@korea.ac.kr
TEL: (02) 3290-3371 FAX: (02) 926-9290

자의 에너지가 격자(lattice)로 전달되면서 발생한다. 전자의 에너지는 국소적인 전기장의 세기와 직접적인 관련이 있으며 모스 전계 효과 트랜지스터 내 어느 위치에서의 열 발생량은 국소적인 전기장의 세기와 국소적인 전류 밀도에 비례한다. 따라서 모스 전계 효과 트랜지스터 내의 온도 분포를 측정하는 것은 모스 전계 효과 트랜지스터의 동작을 이해하는데 있어서 매우 유용하다.

이러한 중요성 때문에 작동중인 전자소자내의 온도 분포에 관한 실험적 혹은 이론적인 연구가 수행되어왔다. Fushinobu 등⁽¹⁾은 비소갈륨계 금속 반도체 전계 효과 트랜지스터(GaAs Metal-Semiconductor Field Effect Transistor)의 열적 전기적 특성을 전자와 포논의 비평형성을 고려하며 수치적으로 해석하였다. Lai 와 Majumdar⁽²⁾는 모스 전계 효과 트랜지스터의 열적, 전기적 모델링을 동시에 수행하였다. 즉, 전자의 이송에 있어서 격자의 열적인 효과를 포논의 산란 관계식으로 고려하였다.

Majumdar 등⁽³⁾은 주사 탐침 열 현미경(Scanning Thermal Microscope)을 사용하여 작동중인 금속 반도체 전계 효과 트랜지스터(Metal-Semiconductor Field Effect Transistor)의 표면에서 온도 분포를 측정하였고 게이트(gate)와 드레인(drain)사이에서 최고 온도점(hot spot)이 존재함을 확인하였다. Lai 등⁽⁴⁾은 게이트의 길이가 약 3 마이크로미터인 모스 전계 효과 트랜지스터의 표면에서 온도 분포를 측정하였다. 그러나 이때 표면에서 열 신호(thermal signal)를 얻기 위해서 비정상적으로 큰 드레인 전압(drain bias)을 사용하였으며 측정 정밀도 또한 그리 높지 않았다. 그 이유는 표면과 열이 발생하는 실리콘 영역 사이에 위치한 산화물과 질화물로 된 절연층이 높은 열 저항을 가지고 있는 반면에 열이 발생하는 부분인 단결정 실리콘의 열전도도는 매우 높기 때문이다. Ju 등⁽⁵⁾은 1 마이크로초(micro-second) 이하의 시간적 정밀도로 반도체 소자내의 온도 변화를 측정하였다. 그 목적은 정전기 방전(electrostatic discharge)에 의한 트랜지스터와 접속선(interconnect)의 열적인 파괴현상에 대한 연구였다. 그러나 이 방법의 공간적 정밀도는 측정에 사용된 레이저의 파장에 의해서 제한된다. Fiege 등⁽⁶⁾은 수천 볼트의 고전압 하에서 작동하는 전력소자 표면에서의 온도 분포를 저항 열 탐침(resistive thermal probe)으로 측정하였다.

이처럼 지금까지 작동중인 소자의 온도 분포는 절연층 위 표면에서 측정되었다. 본 논문에서는 작동중인 모스 전계 효과 트랜지스터의 단면에서의 온도 분포를 측정한다. 이것은 다음과 같은

여러 이유 때문이다. 첫째 절연층을 구성하는 물질인 실리콘 산화물(oxide)이나 질화물(nitride)은 열전도도가 매우 낮아서(~ 1 W/m-K) 표면과 소자의 동작영역 사이에 아주 큰 열 저항을 초래하기 때문이다. 반면에 전류가 흐르며 열이 발생하는 단결정 실리콘 영역의 열전도도는 140 W/m-K 에 달한다. 즉 단결정 실리콘 내에서 열은 실리콘 산화물에서보다 100 배 이상 빠르게 확산된다. 결과적으로 발생된 열의 대부분은 실리콘 기층으로 확산되며 실리콘 산화물 절연층을 통과해서 표면으로 전달되는 양은 아주 미미하다. 따라서 소자내의 열 발생량이 아주 많지 않으면 절연층 표면에서 측정되는 열 신호는 매우 미약해진다.

또한 열은 단결정 실리콘 영역에서만 발생하는 점을 주목해야 한다. 이 때문에 열이 절연층을 통과해서 표면으로 확산되는 과정 중에 단결정 내에서의 온도 분포에 관한 정보를 잃어버리게 된다. 결과적으로 표면 절연층 위에서 측정되는 온도 분포는 절연층 내에서의 열 확산 때문에 실리콘 영역의 온도 분포에 관해서 절연층의 두께 이하의 정밀도를 가질 수 없다. 보통 절연층의 두께는 약 700 nm 정도이다. 따라서 절연층 위에서 온도 분포를 측정한다면 약 100 nm 정도인 주사 탐침 열 현미경의 공간적 정밀도를 충분히 활용하지 못하게 된다.

작동중인 모스 전계 효과 트랜지스터의 단면에서 온도 분포를 측정하는 두 번째 이유는 소자로부터 절연물질을 제거하더라도 표면과 열이 발생하는 단결정 실리콘 영역 사이에 위치한 게이트 전극이 여전히 표면에서의 열 신호측정을 방해하기 때문이다. 절연층과는 달리 게이트는 소자의 작동에 핵심적인 부분으로 제거 될 수 없다. 그런데 모스 전계 효과 트랜지스터의 동작에 있어서 가장 중요한 부분은 게이트의 바로 아래 부분, 소스(source)와 드레인(drain) 사이이다. 열의 대부분은 이 부분의 높은 전기장에 의해서 발생하게 된다. 만약에 온도 분포를 게이트 위에서 측정한다면 게이트 전극내의 열 확산 때문에 실리콘 내의 온도 분포에 관해서 게이트 두께 이하 정도의 정밀도를 가질 수 없다. 따라서 모스 전계 효과 트랜지스터 표면에서의 온도 분포 측정에는 넘어설 수 없는 한계가 있다.

한편 작동중인 소자의 단면에서는 다음과 같은 측정들이 이루어졌다. Nakakura 등⁽⁷⁾은 주사 탐침 용량 현미경(Scanning Capacitance Microscope)을 사용해서 작동중인 모스 전계 효과 트랜지스터의 단면에서 소스에서 드레인으로의 전도경로를 가시화했다. Trenkler 등⁽⁸⁾은 전도성이 있는 주사 탐침

원자력 현미경(Atomic Force Microscope)의 탐침을 사용하여 작동중인 소자 단면에서의 전위 분포를 측정하였다. Luo 등⁽⁹⁾은 주사 탐침 열 현미경을 사용하여 수직 공동 표면 방사 레이저(vertical-cavity surface-emitting laser) 단면에서의 온도 분포를 측정하였다.

본 논문에서는 작동중인 모스 전계 효과 트랜지스터 단면에서의 온도 분포와 전위 분포를 주사 탐침 열 현미경을 사용하여 측정한다. 본 논문은 다음과 같은 부분으로 구성되어있다. 제 2 장에서는 사용된 샘플의 준비과정 및 온도 분포와 전위 분포 측정 방법에 대한 설명이 주어졌다. 제 3 장에서는 측정결과 및 결과에 대한 고찰을 수행한다.

2. 샘플 및 실험장치

실험에 사용된 n 채널 모스 전계 효과 트랜지스터의 절단 전과 후의 모양이 Fig. 1 에 나와있다. 사진에서 알 수 있는 것처럼, 소스, 드레인, 게이트의 접촉 패드(contact pad)가 절단 후에도 작동이 가능하도록 배열되어있다. 샘플을 게이트 폭(width) 방향의 중앙에서 게이트 길이(length) 방향으로 정확하게 절단하기 위해서 레이저 빔으로 소스와 드레인 쪽에 홈을 파낸 후 절단하였다. 게이트 부분의 손상을 피하기 위해서 게이트 부근에는 레이저 빔을 조사하지 않았다.

실험에 사용된 모스 전계 효과 트랜지스터의 절단 전의 드레인 특성 곡선(drain characteristic curves)이 Fig. 2 에 나와있다. 본 실험에 사용된

모스 전계 효과 트랜지스터에는 게이트 전압이 0 V 인 경우에도 완전히 off 되지 않고 상당한 양의 드레인 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다. 실험에 사용된 모스 전계 효과 트랜지스터는 임계전압(threshold voltage)이 0 V 보다 낮고 누설전류(leakage current)의 양도 상당한 것으로 보인다. 따라서 이 두 가지 영향을 고려하기 위해서 온도 분포는 직류방법과 교류방법 두 가지 방법으로 측정하였다. 두 방법 모두에서 소스는 접지(ground) 시켰고 드레인에는 직류 전압을 가했다. 직류 방법에서는 게이트에 직류전압을 가한 상태에서 단면의 온도 분포를 측정하였고 교류방법에서는 게이트에 교류전압을 가하면서 온도 변동의 진폭 분포를 측정하였다. 따라서 교류방법에서는 게이트 전압의 변화에 따른 on-off 동작에 의한 온도 변화만이 측정된다.

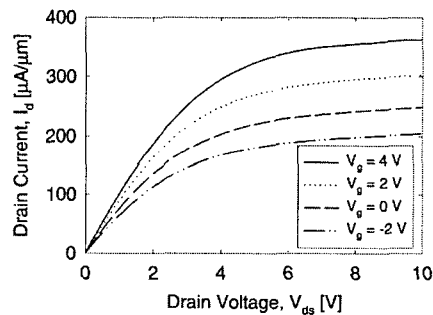


Fig. 2 I_d versus V_{ds} of the MOSFET used in the experiment at several gate biases before cleavage

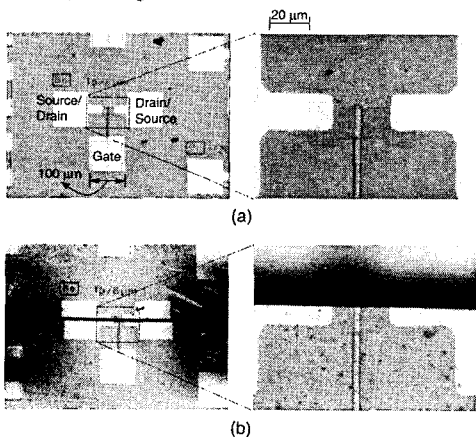


Fig. 1 The optical microscope images of the top view of a n-channel MOSFET used in the experiment: (a) before cleavage; (b) after cleavage

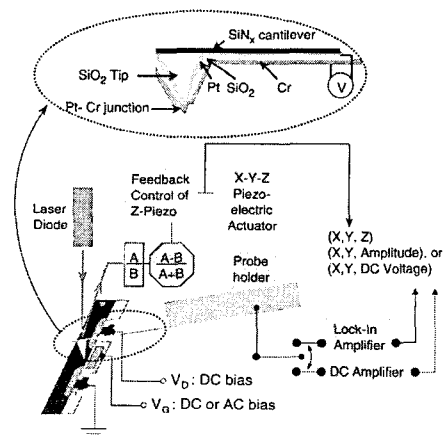


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup used both in DC and AC mode measurements

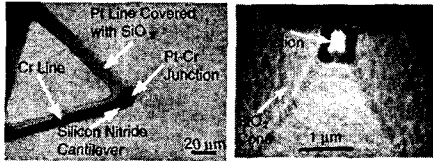


Fig. 4 Electron micrographs of a thermal probe. To the left is an overview of the thermal probe; to the right is a close-up of the Pt-Cr junction at the tip end

본 실험에서 사용한 주사 탐침 열 현미경은 Veeco 사의 Dimension 3100 Scanning Probe Microscope (SPM)과 자체 제작한 주사 탐침 열 현미경 탐침(SpHM probe)으로 구성되어있다. 주사 탐침 열 현미경 탐침의 끝에는 열전쌍이 위치해있다. 두 가지 측정 방법에 사용된 실험 장치의 개략도와 주사 탐침 열 현미경 탐침의 구조를 설명해 주는 그림이 Fig. 3에 나와있다. 주사 탐침 열 현미경 탐침의 전자현미경 사진은 Fig. 4에 나와있다. 본 주사 탐침 열 현미경 탐침의 제작 방법은 다른 곳⁽¹⁰⁾에 설명되어있다. 본 주사 탐침 열 현미경 탐침을 사용하면 샘플의 온도 분포와 표면 형상을 동시에 측정할 수 있다.

직류방법에서는 탐침의 끝에 위치해 있는 열전쌍에서 발생하는 전압을 직류증폭기에서 증폭하여 샘플 단면에서의 온도 분포를 측정하였다. 그러나 이 때 탐침의 끝에 위치한 열전쌍에서 측정된 온도가 단면의 실제 온도는 아니라는 점에 주의해야 한다. 이는 탐침 끝에 위치한 열전쌍과 샘플 단면 사이에 접촉 열 저항이 존재하고 이 때문에 열전쌍과 단면 사이에 온도 차이가 발생하기 때문이다. 이에 대한 자세한 논의는 Luo⁽¹¹⁾ 등을 참조하라. 교류방법에서는 게이트 전압의 주파수와 같은 주파수로 샘플 단면에서 온도가 변동하고 이에 따라 주사 탐침 열 현미경의 끝에 위치한 열전쌍에서 같은 주파수의 전압이 발생한다. 열전쌍 전압의 변동 진폭은 록인 증폭기(Lock-In Amplifier)로 측정하였다.

모스 전계 효과 트랜지스터 샘플 단면의 전위 분포는 다음과 같은 원리를 사용하여 측정하였다. 탐침의 끝 부분과 샘플 사이의 정전기력은 식 (1)과 같다.

$$F = -\frac{V^2}{2} \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (1)$$

여기서 V 는 탐침의 끝 부분과 샘플간의 전위차이

고 C 는 탐침의 끝 부분과 샘플간의 정전용량이며 z 는 탐침의 끝 부분과 샘플간의 거리이다. 탐침의 끝 부분에 교류전압을 가하면 탐침의 끝 부분과 샘플 사이의 전위차는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$V = V_0 + V_1 \sin(\omega_n t) \quad (2)$$

V_0 는 샘플 단면의 전위이고 V_1 은 탐침의 끝 부분에 가해진 교류전압의 진폭이며 ω_n 은 탐침의 기계적 진동의 공진 각속도이다. 탐침의 기계적 진동의 진폭은 식 (3)으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \text{Amplitude} = S \times [& V_0^2 + 2V_0V_1 \sin(\omega_n t) \\ & + \frac{V_1^2}{2} (1 - \cos(2\omega_n t))] \quad (3) \end{aligned}$$

여기서 S 는 전위차와 탐침의 기계적 진동의 크기간의 보정계수이다. 본 계수는 거리에 따른 정전용량의 변화와 탐침의 탄성계수의 영향을 포함한다. 여기서 주목할 점은 탐침의 공진 주파수에서의 진폭은 V_0V_1 에 비례한다는 점이다. 따라서 공진 주파수에서의 기계적 진동의 진폭을 측정함으로써 샘플 단면의 전위 분포를 구할 수 있다. 이미 지적된 바⁽¹²⁾처럼 보정계수를 정하기 어렵기 때문에 본 기술을 사용해서 전위를 정량적으로 측정하는 것은 어렵다. 그러나 본 방법은 작동중인 모스 전계 효과 트랜지스터 단면에서의 상대적인 전위 분포를 구하는 데는 충분히 효과적이다. 이 경우에는 소스와 드레인의 최대 및 최소 전위를 미리 알 수 있기 때문이다.

온도 분포 측정에 사용한 주사 탐침 열 현미경 탐침을 전위 측정에도 사용하였다. 탐침의 끝 부분에 가해진 교류전압의 진폭은 0.2 V였다. 교류전압의 주파수는 탐침의 기계적 진동의 고유진동수를 선택하였는데 보통 그 범위는 45에서 50 kHz였다. 탐침의 기계적 진동 폭은 탐침의 끝을 샘플의 단면으로부터 100 nm 위에 위치시키고 측정하였다. 단면으로부터 항상 일정한 높이에서 진폭을 측정하기 위해서 탐침은 같은 주사선을 두 번 왕복하였다. 첫 번째 스캔에서는 탐침의 끝이 샘플 단면에 접촉된 상태에서 표면의 형상을 측정하였고 두 번째 스캔에서는 샘플 단면의 100 nm 위에서 기계적진동의 진폭을 측정하였다.

3. 측정결과 및 토의

온도 분포와 동시에 얻어진 샘플 단면 형상이

Fig. 5 에 나와 있다. 단면은 아주 매끄럽고 게이트가 위치해 있는 MOS 전계 효과 트랜지스터의 표면 쪽에 돌출부가 있음을 알 수 있다.

직류방법으로 측정 한 온도 분포는 Fig. 6에 나와

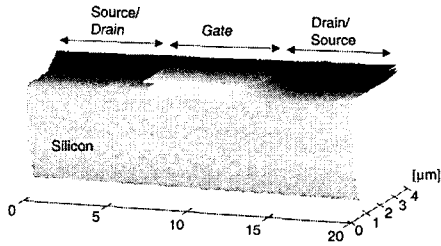


Fig. 5 The topography of the cross section of the MOSFET obtained with the thermal signal distribution simultaneously

있고 교류방법으로 측정 한 온도 변동 진폭의 분포는 Fig. 7에 나와 있다. Fig. 6의 (a)와 (b)에서 게이트 전압은 0 V 이고 소스는 접지시켰으며 드레인 전압은 4 V 이다. Fig. 6의 (a)에서 소스는 왼쪽이고 드레인은 오른쪽이다. Fig. 6의 (b)에서 소스와 드레인의 위치는 그 반대이다. 두 경우 모두 게이트 전압이 0 V 일 때도 게이트 아래 부분에서 열이 발생하고 있다. 이는 누설전류와 0V 보다 낮은 임계 전압 때문인 것으로 보인다. Fig. 6의 (a)와 (b)에서 최고 온도점(hot spot)은 모두 드레인 쪽에 가깝다.

Fig. 6의 (c)와 (d)에서 게이트 전압은 4 V 이다. Fig. 6의 (c)에서 소스는 왼쪽이고 드레인은 오른쪽이다. Fig. 6의 (d)에서 소스와 드레인의 위치는 그 반대이다. 이 두 가지 경우에는 (a)와 (b)의

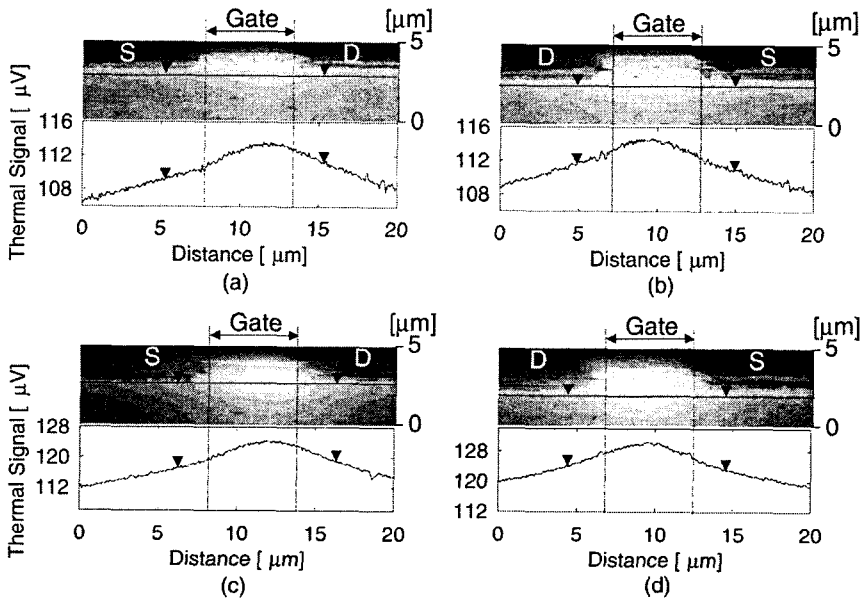


Fig. 6 The thermal signal measurement results in DC mode: (a), (b) thermal signal distributions at $V_{gs} = 0\text{ V}$, $V_{ds} = 4\text{ V}$; (c), (d) thermal signal distributions at $V_{gs} = 4\text{ V}$, $V_{ds} = 4\text{ V}$

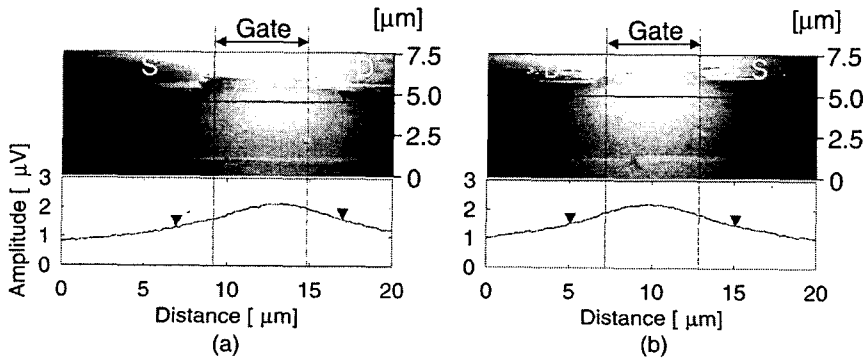


Fig. 7 The amplitude measurement results in AC mode at $V_{gs} = 2\sin(2\pi ft)\text{ V}$, $V_{ds} = 4\text{ V}$, $f = 1\text{ kHz}$

경우보다 전류가 더 많이 흐르므로 열 발생량이 더 많고 따라서 전체적으로 열 신호(thermal signal)의 크기가 더 크다. 또한 이 두 경우 모두 게이트 아래 부분에서 최고 온도점은 드레인 쪽에 가깝다. 이것은 예측된 결과이다. 그러나 이 경우에 측정된 온도 분포는 게이트의 on-off 동작에 의한 결과만 포함하는 것은 아니다. 누설전류에 의한 신호도 측정결과에 중첩되어 있는 것이다.

게이트에 교류전압을 가한 경우의 온도 변동의 진폭 분포 측정 결과가 Fig. 7의 (a)와 (b)에 나와 있다. 게이트의 전압 변동에 무관한 신호는 모두 배제되었기 때문에 측정된 신호는 모두 소자의 on-off 동작에서 유도된 것이다. 최고 온도 변동점(hot spot)의 위치를 Fig. 7로부터 알 수 있다. 두 경우 모두 최고 온도 변동점은 드레인에 가깝다.

소자내의 열 발생 현상을 좀 더 잘 이해하기 위해서 여러 가지 드레인 전압과 교류 게이트 전압의 조합에서 온도 변동의 진폭 분포를 측정하였

다. 측정 중에 탐침이 단면을 지나서 단면과의 접촉을 잃어버리는 영역까지는 탐침이 이동하지 않도록 주의를 기울였다. 그 이유는 탐침이 단면에서 떨어졌다가 다시 단면과 접촉을 이루는 과정에서 탐침이 종종 손상되었기 때문이다. 주사 영역은 좀 더 자세한 관찰을 위해서 축소되었다.

여러 가지 다른 드레인 전압과 게이트에 가해진 교류전압의 조합에서의 온도 변동의 진폭 분포 측정결과가 Fig. 8에 나와 있다. 드레인 전압이 열 발생에 미치는 영향을 알아보기 위해서 Fig. 8의 (a)에서 (c)에 걸쳐서 게이트에는 동일한 교류전압을 가하면서 드레인 전압만 4, 7, 10 V로 각각 변화시켰다. 최고 온도 변동점의 위치를 쉽게 비교하기 위해서 그 위치를 작은 원으로 표시하였다. 측정오류영상(artifact) 또한 작은 원으로 표시하였다. 측정오류영상은 단면과 탐침의 끝에 위치한 열전쌍과의 접촉면적이 탐침을 스캔 하는 중에 변하기 때문에 발생한다. 접촉 면적의 변화는

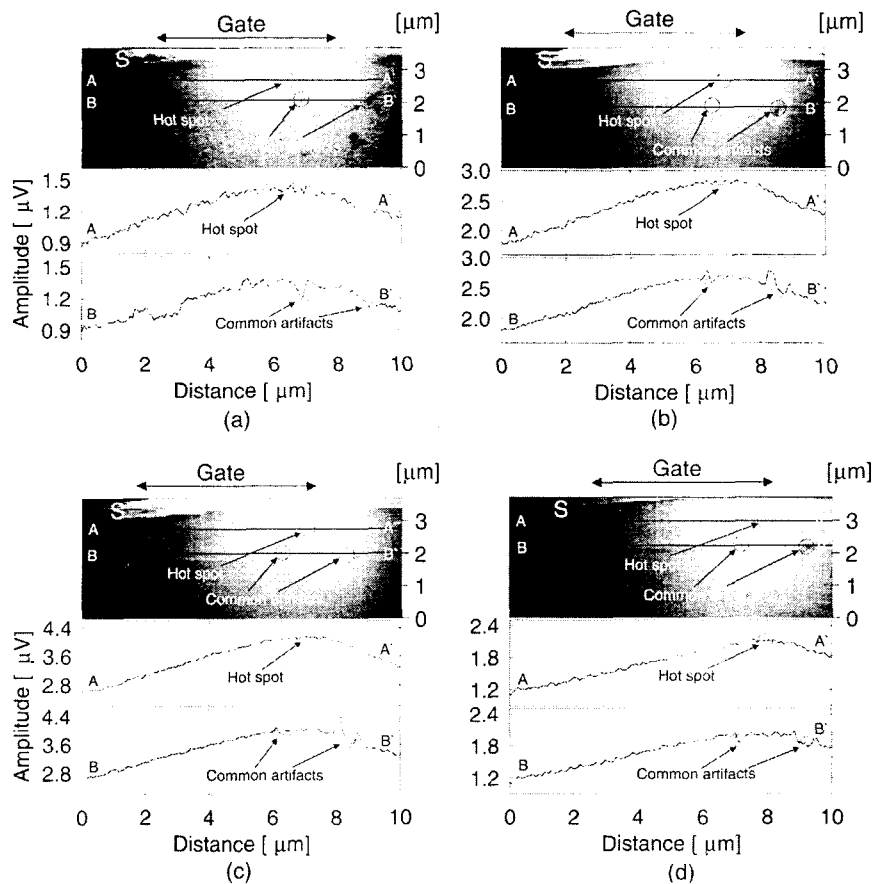


Fig. 8 The amplitude distributions of the thermal signal fluctuation at several combinations of drain bias and AC bias applied to the gate: (a) $V_{ds} = 4$ V, $V_{gs} = 2+2\sin(2\pi ft)$ V; (b) $V_{ds} = 7$ V, $V_{gs} = 2+2\sin(2\pi ft)$ V; (c) $V_{ds} = 10$ V, $V_{gs} = 2+2\sin(2\pi ft)$ V; (d) $V_{ds} = 10$ V, $V_{gs} = 1-\sin(2\pi ft)$ V, $f = 1$ kHz

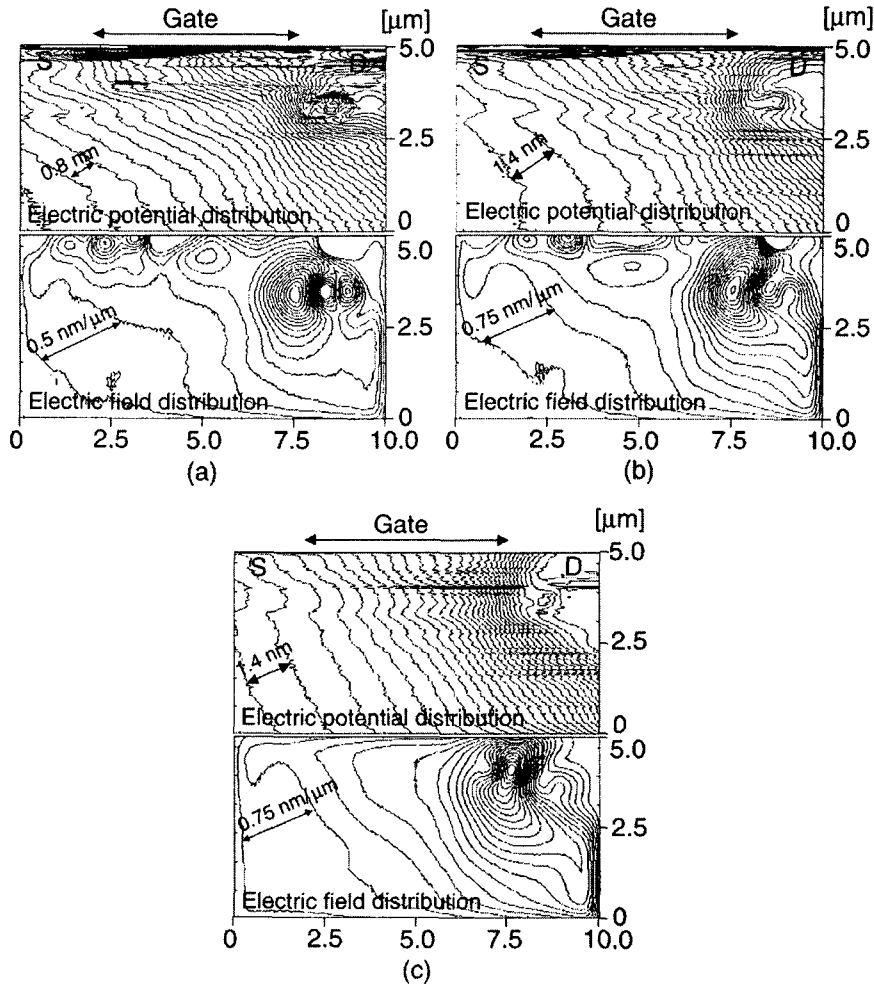


Fig. 9 The measurement results of the amplitude distribution of 1ω component of the mechanical vibration which is proportional to the potential on the sample surface and the electric field along channel calculated from the amplitude distribution: (a) $V_{ds} = 4\text{ V}$, $V_{gs} = 4\text{ V}$; (b) $V_{ds} = 7\text{ V}$, $V_{gs} = 4\text{ V}$; (c) $V_{ds} = 10\text{ V}$, $V_{gs} = 4\text{ V}$

열 신호 감지부와 단면간의 열 저항을 변화시키고 따라서 열 신호 감지부에 측정되는 신호의 크기에 영향을 준다. 보통 측정오류영상은 바람직하지 않은 것으로 여겨진다. 그러나 Fig. 8에서 공통 측정오류영상(common artifact)의 위치는 최고 온도 변동점의 위치를 상대적으로 비교하기 위한 기준으로 사용되었다.

최고 온도 변동점의 위치와 공통 측정오류영상의 위치를 비교해보면 최고 온도 변동점의 위치가 드레인 전압이 증가함에 따라 드레인 쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 한편 Fig. 8의 (d)에서는 드레인 전압은 10 V로 유지하면서 게이트전압은 $1 + \sin(2\pi ft)$ V로 변화시켰다. 최고 온도 변동점의 위치는 Fig. 8의 (c)와 (d)의 경우에는 거의 동일했

다. 최고 온도 변동점의 위치는 게이트전압의 변화에 별로 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

샘플 표면의 전위에 비례하는 탐침의 기계적 진동의 진폭 분포 측정결과와 이로부터 계산된 채널 길이 방향의 전기장의 강도가 Fig. 9에 나와 있다. Fig. 9의 (a)에서 (c)까지 게이트 전압은 4 V로 고정되었고 드레인 전압은 4, 7, 그리고 10 V로 변화시켰다. 드레인 부근에서 전기장이 가장 강한 곳이 나타나고 있다. 열 발생은 높은 에너지를 가진 전자가 산란현상(scattering)에 의해서 격자구조에 에너지를 전달하면서 발생한다. 본 측정 결과는 드레인 근처에 전기장이 가장 강한 곳이 최고 온도점의 위치와 관련이 있음을 보여준다. 그러나 최고 온도점의 위치와 전기장이 가장

강한 곳의 위치가 정확하게 일치하는지 확인하기는 어려웠다.

본 실험에 사용된 소자의 경우에 게이트 전압의 변동에 따른 최고 온도 변동점의 위치는 드레인 전압이 증가됨에 따라서 드레인 쪽으로 접근하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 등 전위선의 밀도가 드레인 전압이 증가됨에 따라서 드레인 근처에서 증가함을 관찰할 수 있었다.

그러나 본 실험 결과 만으로부터 모스 전계 효과 트랜지스터 내의 열 발생 현상에 대한 일반적인 결론을 도출하기는 어렵다. 모스 전계 효과 트랜지스터 내의 물리적 현상은 게이트의 길이, 도핑(doping)정도, 게이트 절연층의 두께 등 여러 요소에 의해서 영향을 받기 때문이다.

4. 결 론

본 논문에서는 작동중인 모스 전계 효과 트랜지스터 단면에서 상대온도와 전위의 분포를 측정하였다. 소자 단면에서의 온도 측정은 소자의 표면에서 온도를 측정하는 것보다 높은 정밀도를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 온도는 소자의 누설 전류의 영향을 고려하기 위해서 직류방법과 교류방법으로 측정하였다. 교류방법 측정 결과에 따르면 본 실험에 사용된 모스 전계 효과 트랜지스터의 경우에 드레인 전압이 증가함에 따라서 최고 온도 변동점의 위치는 드레인 쪽으로 움직임을 알 수 있었다. 단면에서의 전위 분포는 샘플 표면과 온도 탐침의 끝 부분 사이의 정전기력에 의해서 발생하는 기계적진동의 진폭 분포로부터 전위 분포가 얻어졌다. 전위 분포로부터 채널 방향으로의 전기장의 분포가 얻어졌다. 전기장의 크기가 가장 큰 곳은 드레인 부근에서 나타났다.

작동중인 소자의 단면에서의 온도 분포측정은 소자의 동작을 분석하는 데 중요한 정보를 제공한다. 따라서 본 방법은 소자의 개발에 있어서 효과적인 도구로 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 과학재단의 우수 연구센터인 마이크로 열 시스템 ERC의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 제위께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Fushinobu, K., Majumdar, A., and Hijikata, K., 1995, "Heat Generation and Transport in Submicron Semiconductor Devices," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 25~31.
- (2) Lai, J., and Majumdar, A., 1996, "Concurrent Thermal and Electrical Modeling of Sub-micrometer Silicon Devices," *Journal of Applied Physics*, Vol. 79, pp. 7353~7361.
- (3) Majumdar, A., Carrejo, J. P., and Lai, J., 1993, "Thermal Imaging Using the Atomic Force Microscope," *Applied Physics Letters*, Vol. 62, pp. 2501~2503.
- (4) Lai, J., Chandrachood, M., Majumdar, A., and Carrejo, J. P., 1995, "Thermal Detection of Device Failure by Atomic Force Microscopy," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 16, pp. 312~315.
- (5) Ju, Y. S., Käding, O. W., Leung, Y. K., Wong, S. S., and Goodson, K. E., 1997, "Short-Timescale Thermal Mapping of Semiconductor Devices," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 18, pp. 169~171.
- (6) Fiege, G. B. M., Niedernostheide, F. J., Schulze, H. J., Barthelmeß, R., and Balk, L. J., 1999, "Failure Analysis of Integrated Devices by Scanning Thermal Microscopy (SThM)," *Microelectronics Reliability*, Vol. 39, pp.1149~1152.
- (7) Nakakura, C. Y., Hetherington, D. L., Shaneyfelt, M. R., Shea, P. J., and Erickson, A. N., 1999, "Observation of Metal-oxide-semiconductor Transistor Operation Using Scanning Capacitance Microscopy," *Applied Physics Letters*, Vol. 75, pp. 2319~2321.
- (8) Trenkler, T., Wolf, P. De, Vandervorst, W., and Hellemans, L., 1998, "Nanopotentiometry: Local Potential Measurement in Complementary Metal-oxide-semiconductor Transistors Using Atomic Force Microscopy," *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 16, pp. 367~372.
- (9) Luo, K.; Herrick, R.W.H.; Majumdar, A.; Petroff, P., 1997, "Scanning Thermal Microscopy of a Vertical-cavity Surface-emitting Laser," *Applied Physics Letters*, Vol. 71, pp. 1604~1606.
- (10) Shi, L., Kwon, O., Wu, G., and Majumdar, A., 1999, "Thermal Design and Batch Fabrication of Cantilever Probes for Scanning Thermal Microscopy," *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Nashville, MEMS*, Vol. 1, pp. 93~99.
- (11) Luo, K., Shi, Z., Varesi, J., and Majumdar, A., 1997, "Sensor Nanofabrication, Performance, and Conduction Mechanisms in Scanning Thermal Microscopy," *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 15, pp. 349~360.
- (12) Weaver, J. M. R., and Abraham, D. W., 1991, "High Resolution Atomic Force Microscopy Potentiometry," *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 9, pp. 1559~1561.
- (13) Majumdar, A. 1999, "Scanning Thermal Microscopy," *Annual Review of Material Science*, Vol. 29, pp. 505~585.

(1) Fushinobu, K., Majumdar, A., and Hijikata, K., 1995,