

MOSFET에서 Steady-State Nyquist 정리의 실험적 검증 (Experimental Verification of Steady-State Nyquist Theorem in MOSFETs)

宋斗憲*, 閔弘植*, 朴榮俊*

(Du-Heon Song, Hong-Shick Min and Young-June Park)

要約

MOSFET의 채널 열잡음 현상을 설명하는 데 있어 기존의 열잡음 이론과 새로운 이론인 steady-state Nyquist 정리의 차이를 실험적으로 규명하기 위하여, 비균일한 채널 및 균일한 채널을 가지는 MOSFETs에서 열잡음을 측정하고 비교하였다. 측정결과, MOSFET에서 채널 열잡음의 옳은 이론은 기존의 열잡음 이론이 아니라 steady-state Nyquist 정리임이 판명되었다.

Abstract

To resolve the discrepancy between the existing channel thermal noise theory of MOSFETs and a new theory called the steady-state Nyquist theorem, we have measured the channel thermal noise of specially designed MOSFETs with both uniform and nonuniform channels. The experimental results clearly show that the correct theory of the channel thermal noise in MOSFETs should be the steady-state Nyquist theorem.

1. 서론

전계효과 트랜지스터(JFET, MOSFET, MESFET, HEMT 등)의 열잡음을 설명하는 이론에는 크게 두 가지가 있다.^{[1] [2]} 그 중의 하나가 최근에 유도된 dc 정상상태에서 동작하는 2단자 반도체 소자의 열잡음 이론인 steady-state Nyquist 정리이고^[2], 다른 하나는 현재까지 사용되어 온 전계효과 트랜지스터의 채널 열잡음 이론이다.^[1] 이 두 이론은 열잡음 이론으로서 가지는 물리적 개념이 다르므로 어느 이론이

옳은지에 대한 검토가 필요하다. 최근 선형영역에서 동작하는 균일한 채널을 가진 MOSFET에서 두 이론에 대한 이론적, 실험적 검토가 있었다.^[3] 여기서 균일한 채널이라 함은 채널을 따라 문턱전압이 일정한 경우를 의미하고, 비균일이라 함은 문턱전압이 채널을 따라 균일하지 않음을 의미한다. 이론적 검토 결과로는 steady-state Nyquist 정리가 물리적으로 타당한 이론으로 판단되지만, 균일한 채널을 가진 MOSFET가 선형영역에서 동작하는 경우의 열잡음을 측정한 결과, 실험적으로 두 이론의 차이를 보일 수 없었다. 최근에 비균일한 채널을 갖는 MOSFET에서 열잡음 측정결과를 기존 및 새로운 이론에 기초한 컴퓨터 모의실험 결과와 비교하여, steady-state Nyquist 정리가 옳음을 보였다.^[4] 그러나 모든 전계효과 트랜지스터(JFET, MES-

*正會員, 서울大學校 半導體 共同研究所 및 電子工學科 (Dept. of Elec. Eng., and Inter-University Semiconductor Research Center Seoul Nat'l Univ.)

接受日字: 1994年 2月 1日

FET, HEMT 등)의 열잡음 이론이 기존의 이론에 바탕을 두고 있으므로 기존의 이론이 틀렸다면 그 의미가 매우 중대하므로, 컴퓨터 모의실험을 이용하지 않고 실험만으로 두 이론의 차이점과 타당성을 검증하는 것은 충분한 의미가 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 실험만으로 두 이론을 규명할 수 있는 균일 및 비균일 채널을 갖는 세 가지의 MOSFET 소자를 제작하고 선형영역에서 채널 열잡음을 측정하여, steady-state Nyquist 정리가 옳은 이론임을 검증하고자 한다.

II. 기존 열잡음 이론 및 steady-state Nyquist 정리

전계효과 트랜지스터(JFET, MOSFET, MESFET, HEMT 등)에서 가장 중요한 고주파 잡음원은 채널의 열잡음이다. 채널의 열잡음을 설명하는 이론에는 크게 두 가지가 있다. ^[1] ^[2] 기존 이론 ^[1]에 의하면 채널 열잡음 전류의 전력밀도 $S_{id}(\omega)$ 는

$$S_{id}(\omega) = \frac{4KT}{L^2} \int_0^L g_0(x) dx \quad (1)$$

로 주어진다. 여기서 K는 Boltzmann 상수, T는 절대온도, L은 채널의 길이, 그리고 $g_0(x)$ 는 단위 길이의 채널 conductance 이다. 최근에 나온 이론 ^[2]인 steady-state Nyquist 정리에 의하면 채널 열잡음 전류의 spectral density $S_{id}(\omega)$ 는

$$S_{id}(\omega) = 4KT \frac{1}{\int_0^L \frac{dx}{g_0(x)}} = 4KT \frac{I_D}{V_D} \quad (2)$$

로 주어진다.

위의 두 식은 다음과 같은 큰 차이점을 갖는다. 첫째, 열평형 근처($V_D \sim 0V$)에서 동작하는 비균일한 채널을 가진 MOSFET(그림 1 참조)의 경우, 식 (1)은 Nyquist 정리에 수렴하지 않으나, 식 (2)는 Nyquist 정리에 수렴한다는 것이다. ^[2] ^[3] ^[5] 둘째, 같은 동작 조건에 있는 MOSFET의 경우, 식 (1)에 의하면 $S_{id}(\omega)$ 가 채널 conductance가 큰 채널 영역에 의해 지배되나, 식 (2)에 의하면 $S_{id}(\omega)$ 가 채널 conductance가 작은 영역에 의하여 지배된다는 것이다. 그러나 균일한 채널을 가진 MOSFET에서는 $V_D = 0V$ 근처에서 식 (1)과 식 (2)가 같아지는 것을 알 수 있다. 실제 측정 결과 ^[3], 균일한 채널을 갖는 MOSFET의 경우 $V_D \leq 2/3V_{Dsat}$ 일 때 두 이론이 같은 결과를 주는 것을 확인할 수 있었다.

MOSFET의 열잡음을 측정함으로써 식 (1)과 식 (2) 중에서 어느 것이 옳은지를 실험적으로 검증하기 위해서 먼저 세 가지의 MOSFET 소자를 제작하였다. 소자 #1은 비균일한 채널을 갖는 MOSFET으로, 그림 1에 그려진 바와 같이 두 가지의 산화막층을 갖는 MOSFET을 제작함으로써 구현되었다.

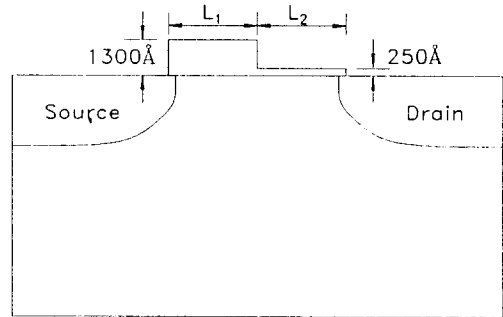


그림 1. 비균일한 채널을 갖는 MOSFET의 개략도
Fig. 1. Schematic of a MOSFET with nonuniform channel.

표 1. 잡음 측정에 사용된 소자의 parameter
Table 1. Device parameters for the devices under test.

	Device #1	Device #2	Device #3
L_1/L_2	5 μ m/5 μ m	10 μ m/0 μ m	0 μ m/10 μ m
W	1500 μ m	1500 μ m	1500 μ m
T_{ox}	1300 Å / 250 Å	1300 Å / 250 Å	1300 Å / 250 Å
V_T	0.135V	0.243V	-0.106V
N_{sub}	$5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$	$5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$	$5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$

소자 #2와 소자 #3은 각각 소자 #1의 두꺼운 산화막층과 얇은 산화막층과 똑같은 산화막층 두께를 갖는 균일한 채널을 갖는 MOSFET이다. 제작된 소자의 주요 parameter는 표 1에 주어져 있다.

균일한 채널을 갖는 MOSFET의 경우에는 열평형 상태 부근($V_D \sim 0V$)에서는 식 (1) 및 식 (2)는 약 반전 영역에서부터 강반전 영역까지 전 영역에 걸쳐 모두 같은 값을 준다. 열평형 상태 근처($V_D = 5 \text{ mV}$)에서 V_G 의 값이 고정되고 그 크기가 소자 #2는 약반전, 소자 #3은 강반전 영역에 있도록 하는 범위에서, 만일 세 소자 모두 Si-SiO₂ 계면상태가 같고, 또 소자 #1에서 비균일한 채널의 경계를 기준으로 서로 다른 두 영역 사이에 전자의 넘쳐 흐름 (spill-over)이 무시된다면, 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\begin{cases} g_o^{#1}(x) \equiv g_o^{#2}(x) & 0 < x < \frac{L}{2} \\ g_o^{#1}(x) \equiv g_o^{#3}(x) & \frac{L}{2} < x < L. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} g_o^{#1}(x) \ll g_o^{#3}(x) & 0 < x < \frac{L}{2} \\ g_o^{#1}(x) \gg g_o^{#2}(x) & \frac{L}{2} < x < L \\ g_o^{#1}(x) \ll g_o^{#1}(x_2) & 0 < x_1 < \frac{L}{2}, \frac{L}{2} < x_2 < L. \end{cases} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 고려하여 기존의 열잡음 이론에 따라 열평형 상태 근처 ($V_D = 5 \text{ mV}$)에서 소자 #1의 채널 열잡음을 계산하면

$$S_{id}^{#1} = \frac{4KT}{L^2} \int_0^L g_o^{#1}(x) dx \equiv \frac{4KT}{L^2} \int_{\frac{L}{2}}^L g_o^{#1}(x) dx \quad (5)$$

$$\equiv \frac{4KT}{L^2} \int_{\frac{L}{2}}^L g_o^{#3}(x) dx = \frac{1}{2} S_{id}^{#3}(\omega),$$

$$S_{id}^{#1} \gg S_{id}^{#3}(\omega). \quad (6)$$

의 관계가 성립한다. 마찬가지로 steady-state Nyquist 정리에 의해 소자 #1의 열잡음을 계산하면

$$S_{id}^{#1}(\omega) = \frac{4KT}{\int_0^L \frac{dx}{g_o^{#1}(x)}} \equiv \frac{4KT}{\int_0^{\frac{L}{2}} \frac{dx}{g_o^{#1}(x)}} \quad (7)$$

$$\equiv \frac{4KT}{2 \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{dx}{g_o^{#2}(x)}} = 2S_{id}^{#2}(\omega),$$

$$S_{id}^{#1}(\omega) \ll S_{id}^{#3}(\omega). \quad (8)$$

의 관계가 성립한다. 식 (5), (6)과 식 (7), (8)을 비교하면 세 소자에서 두 이론이 완전히 다른 $S_{id}^{#1}(\omega)$, $S_{id}^{#2}(\omega)$ 및 $S_{id}^{#3}(\omega)$ 사이의 관계를 주고 있음을 알 수 있다. 식 (4)의 관계는 두 산화막층의 두께의 차이가 많이 날수록 잘 성립하며, 이 경우에 식 (5), (6) 및 식 (7), (8)로부터 기존의 이론과 steady-state Nyquist 정리가 예측하는 결과 사이에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 식 (2)의 steady-state Nyquist 정리가 옳다면 세 소자의 측정된 $S_{id}(\omega)$ 를, 측정으로 구한 I_D 와 V_D 를 이용한 $4KT I_D / V_D$ 와 비교할 수 있다.

III. 실험 및 검토

소자 #1과 소자 #2의 열잡음은 잡음 다이오드의

잡음의 크기를 기준으로 삼아 이와 비교하여 측정하였으며, 그림 2와 같은 잡음측정 시스템에 의하여 주파수 $f = 200 \text{ kHz}$ 에서 측정이 이루어졌다. 소자 #3의 경우에는 측정하고자 하는 모든 동작점에서 임피던스가 작아서, 우리가 갖고 있는 그림 2와 같은 잡음측정 시스템으로는 측정결과의 정확성을 신뢰할 수가 없다. 따라서 소자 #3의 열잡음은 동조 회로를 이용하여 공진 주파수에서 잡음을 측정하는 방법^[6]을 사용하여 공진 주파수 $f = 222 \text{ kHz}$ 에서 측정하였다. 소자 #1, 소자 #2 및 소자 #3의 열잡음은 모두 열평형 상태부근에서 측정되었기 때문에 $1/f$ 잡음의 영향은 없었다.

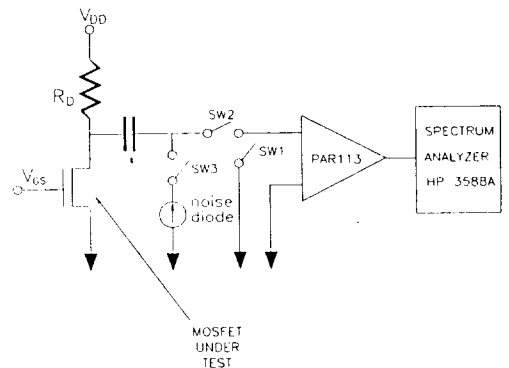


그림 2. 잡음측정 시스템의 개략도

Fig. 2. Schematic of the noise measurement system.

소자 #1, 소자 #2 및 소자 #3를 제작할 때 채널 이온주입을 하지 않았고, 세 소자의 기판 농도는 표 1에서 보는 바와 같이 모두 같다. 소자 #1, 소자 #2 및 소자 #3은 Si-SiO₂ 계면상태가 같은 상태를 가질 수 있도록 가능한 한 동일한 공정 조건에서 제작되었으나 소자 #1과 소자 #2의 문턱전압의 차이에서 보듯이 소자마다 계면조건이 조금씩 다를 수 있다. 따라서 Si-SiO₂ 계면상태의 차이로 인해 소자 #1, 소자 #2 및 소자 #3에 같은 게이트 전압을 인가하더라도 식 (3)이 성립하지 않을 수 있다. 식 (3)이 성립할 수 있도록 하기 위해서는 소자 #1, 소자 #2 및 소자 #3의 게이트 전압에 대한 보정이 필요하다. 일반적으로 계면상태가 문턱전압에 주는 영향은 게이트 산화막의 캐패시턴스에 반비례하므로, 산화막의 두께가 1300Å으로 게이트 산화막의 캐패시턴스가 작은 소자 #1과 소자 #2의 경우에는 계면상태의 영향을 보정하는 것이 필요하고, 소자 #3의 경우는 게이트 산

화막의 두께가 250 Å으로 게이트 산화막의 캐패시턴스가 상대적으로 커서 계면상태에 의한 문턱전압이 변동이 작아 굳이 보정을 하지 않아도 된다. 물론 소자 #1의 경우에는 산화막의 두께가 얇은 영역도 있으나, 소자의 문턱전압은 두꺼운 산화막층의 채널영역에 의하여 결정되므로 위의 고찰은 무리가 없다고 사료된다. 또한 소자 #3은 열잡음의 측정이 행해진 모든 동작 범위가 강반전 영역에 있기 때문에 게이트 전압의 보정은 더욱 더 의미가 없음을 알 수 있다. 그림 3의 x 축의 V_G 값은 소자 #2의 경우, 실제 측정을 행한 V_G 값에서 소자 #1의 문턱전압과 소자 #2의 문턱전압의 차이를 빼서 보정한 값이다.

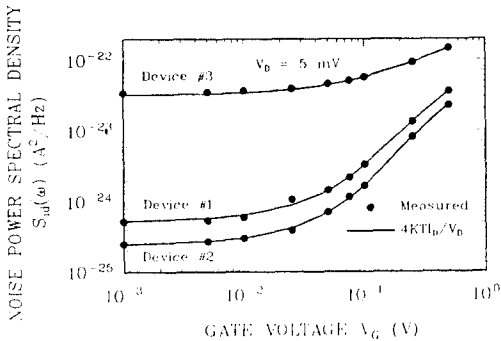


그림 3. 열평형 상태 부근에서 게이트 전압에 따른 소자 #1, 소자 #2 및 소자 #3의 열잡음 측정 결과

Fig. 3. Measured (solid circles) noise spectral densities $S_{id}(\omega)$ as a function of V_G at $V_D = 5$ mV for device #1, device #2 and device #3. The solid lines show values derived from the steady-state Nyquist theorem.

고정된 드레인 전압 $V_D = 5$ mV에서 게이트 전압에 따른 소자 #1, 소자 #2 및 소자 #3의 열잡음의 측정결과는 그림 3에 그려져 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이 열잡음 측정결과는 세 가지 소자에 대해서 각각 측정된 I_D 와 V_D 로 계산된 steady-state Nyquist 정리와 잘 일치함을 알 수 있다.

기존의 이론이 옳다면 식 (4)가 만족되는 V_G 의 범위인 $V_G \leq 0.1V$ 에서의 측정결과는 식 (5)와 (6)의 예상대로 소자 #1의 잡음전력밀도가 소자 #3의 잡음전력밀도의 대략 절반 정도이어야 하고, 또한 소자 #1의 잡음전력밀도가 소자 #2의 잡음전력밀도에 대하여 $S_{id}^{#1}(\omega) \gg S_{id}^{#2}(\omega)$ 의 경향을 보여줘야 한다. 그러나 기존의 이론이 예측하는 결과와는 달리, 그림 3이

보여주고 있는 측정결과는 steady-state Nyquist 정리가 예상하고 있는 바와 같이 소자 #2의 열잡음 전력밀도는 식 (4)가 만족되는 V_G 의 범위인 $V_G \leq 0.1V$ 에서 소자 #1의 열잡음 전력밀도의 대략 절반 정도의 크기를 보여줌으로써 식 (7)을 뒷받침 해주고 있다. 게이트 전압이 커지면서 $V_G \geq 0.1V$ 인 범위에서 $S_{id}^{#1}(\omega) \sim 2S_{id}^{#2}(\omega)$ 의 관계를 벗어나는 것은 소자 #1의 두꺼운 산화막층의 채널 영역도 강반전 영역에 있기 때문에 식 (4)의 관계식이 더 이상 성립하지 않기 때문이다. 또한 식 (8)이 예상하고 있듯이 소자 #3의 열잡음 전력밀도의 크기는 소자 #1이 약반전 영역에 있는 게이트 전압의 동작 범위에서 소자 #1의 경우보다 약 50 배 이상 크다는 것을 그림 3에서 볼 수 있다. 이상과 같이, 측정결과와 기존의 이론 및 새로운 이론인 steady-state Nyquist 정리가 예측하는 결과와 비교하면, 선형영역에서 동작하는 비균일한 채널을 가진 MOSFET의 열잡음 측정결과를 기존 이론으로는 강반전 및 약반전 영역에서 모두 설명할 수 없는 반면에, steady-state Nyquist 정리는 실험결과를 아주 잘 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 steady-state Nyquist 정리가 비균일한 채널을 가진 MOSFET의 열잡음을 강반전 및 약반전의 선형영역에서 매우 잘 설명하고 있으며, 전계효과 트랜지스터에서 채널 열잡음을 설명하는 옳은 이론은 기존의 열잡음 이론이 아니라 steady-state Nyquist 정리임이 실험결과로부터 명백하게 규명되었다.

IV. 결론

비균일한 채널을 가지고 선형영역에서 동작하는 MOSFET의 경우, 강반전 및 약반전 영역에서 steady-state Nyquist 정리와 기존의 열잡음 이론이 예측하는 결과가 서로 크게 차이를 보였고, 어느 예측결과가 옳은지를 실험적으로 검증하기 위하여, 세 가지 종류의 MOSFET에서 열평형 상태 부근 ($V_D \sim 0$ V)에서 채널 열잡음을 측정하였다. 그 결과, 기존의 열잡음 이론은 실험결과를 설명할 수 없으나, steady-state Nyquist 정리가 예측하는 결과는 실험결과와 잘 일치하였다. 그러므로 MOSFET에서 타당한 채널 열잡음 이론은 steady-state Nyquist 정리임을 실험적으로 규명하였다.

參考文獻

[1] F.M. Klaassen and J.Prins, "Thermal noise of MOS transistors," Philips Res.

- Rep., vol.22, p.505, 1967.
- [2] H.S. Min, "Steady-state Nyquist theorem for nondegenerate semiconductors," *J. Appl. Phys.*, vol.64, p. 6339, 1988.
- [3] Duheon Song, Jungbae Lee, H.S. Min and Y.J. Park, "Theory of thermal noise in MOS transistors," in *Proc. 11th Int'l Conf. on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations*, Kyoto, 1991, p.269.
- [4] D.H. Song, J.B. Lee, H.S. Min and Y.J. Park, "Modeling of high frequency noise of MOS transistors operating in weak inversion," in *Proc. 12th Int'l Conf. on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations*, St. Louis, 1993, p.378.
- [5] H.S. Min, "A generalized formula for the a.c. admittance of nondegenerate semiconductor devices with one-dimensional geometry near equilibrium," *Solid-State Electron.*, vol.32, p.295, 1989.
- [6] J. Andrian, G. Bosman, A. van der Ziel and C.M. van Vliet, "Hot electron diffusion noise associated with intervalley scattering in short GaAs Devices," in *Proc. 8th Int'l Conf. on Noise in Physical Systems and 1/f Noise*, Rome, 1985, p.171.
- [7] A. van der Ziel, *Noise in Solid State Devices and Circuits*, New York : John Wiley & Sons, 1986, p.61.

 著 者 紹 介



宋斗憲(正會員)

1986年 2月 서울대학교 전자공학과(공학사). 1988年 2月 서울대학교 전자공학과(공학석사). 1994年 현재 서울대학교 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심 분야는 반도체 소자 물리 및 모델링 등임.

閔弘植(正會員) 第 27卷 第 6號 參照

현재 서울대학교 전자공학과 교수

朴榮俊(正會員) 第 27卷 第 6號 參照

현재 서울대학교 전자공학과 부교수