
단채널 MOSFET의 열잡음모델링을 위한 잡음 파라미터의 분석과 추출방법

김규철*

Analysis and extraction method of noise parameters for short channel
MOSFET thermal noise modeling

Gue-chol Kim*

요 약

단채널 MOSFET의 열잡음 모델링을 위한 정밀한 잡음 파라미터를 유도하고 추출했다. MOSFET의 잡음 파라미터를 계산하기 위한 Fukui모델을 단채널에서의 기생성분의 영향을 고려하여 수정하였고, 기존의 모델식과 비교하였다. 또한 소자 고유의 잡음원을 얻기 위해서 서브마이크론 MOSFET의 잡음 파라미터(최소잡음지수 F_{min} , 등가잡음 저항 R_n , 최적 소스어드미턴스 $Y_{opt}=G_{opt}+B_{opt}$)를 추출하는 방법을 제시하였다. 이러한 추출방법을 통하여 프로브 패드의 영향과 외부기생소자 영향을 제거한 MOSFET 고유의 잡음 파라미터가 RF잡음측정으로부터 직접 얻어지게 된다.

ABSTRACT

In this paper, an accurate noise parameters for thermal noise modeling of short channel MOSFET is derived and extracted. Fukui model for calculating the noise parameters of a MOSFET is modified by considering effects of parasitic elements in short channel, and it is compared with conventional noise model equation. In addition, for obtaining the intrinsic noise sources of devices, noise parameters(minimum noise figure F_{min} , equivalent noise resistance R_n , optimized source admittance $Y_{opt}=G_{opt}+B_{opt}$) in submicron MOSFETs is extracted. With this extraction method, the intrinsic noise parameters of MOSFET without effects of probe pad and extrinsic parasitic elements from RF noise measurements can be directly obtained.

키워드

MOSFET, 잡음, RF, CMOS

Key word

H.264, Encoder, DMAC, Motion estimation, Intra Prediction

* 목포해양대학교 해양전자통신공학부

접수일자 : 2009. 09. 03

심사완료일자 : 2009. 09. 24

I. 서 론

최근, CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 기술은 공정기술의 발전에 의한 소자의 지속적인 크기축소로 MOSFET의 고주파 성능이 기존의 화합물 반도체 소자 수준까지 개선되었으며, 고집적화에 의한 낮은 제작비용으로 휴대폰이나 무선LAN과 같은 RF 회로에 점차 사용되어지고 있다. 하지만 소자의 미세화, 고속화에 의해 MOSFET의 각 단자에 존재하는 기생소자 및 게이트 NQS(Non-Quasi-Static) 저항 등에 의해 발생하는 잡음은 점차 증대하고 있으며 이러한 잡음이 회로의 성능을 열화시키는 문제점이 된다[1, 2]. 회로에서 발생하는 잡음 중 고주파에서 지배적으로 영향을 끼치는 열잡음은 고성능의 RF회로를 설계하기 위해서는 반드시 고려되어야 하며 고주파 잡음모델링을 위해선 F_{min} (Minimum noise figure), R_n (Equivalent Noise resistance), Y_{opt} (Optimized source admittance)와 같은 잡음 파라미터의 정확한 측정기술이 필연 시 되어진다[2, 3]. 잡음 파라미터중 F_{min} 은 고주파 성능평가에 중요한 지표가 되고 있으며 Fukui의 노이즈 모델에서 표현되어지는 게 일반적이다[4]. 하지만 이러한 모델에서 조차 고주파영역에서의 단채널 MOSFET에 영향을 끼치는 게이트NQS저항에 대해서는 고려하고 있지 않다. 본 논문에서는 이러한 영향을 고려한 정밀한 모델식을 제안하였다. 또한 MOSFET의 고주파 잡음모델링을 위해선 잡음 파라미터를 정확하게 측정하는 기술이 요구되어지나 아직까지 확립되어 있지 않고 이에 따라 정확한 모델링을 수행하는 것도 어려운 실정이다. MOSFET의 잡음 파라미터를 측정하는데 있어 어려운 점은 잡음 측정결과에서 측정프로브 및 소자의 각 단자에 존재하는 외부기생소자들에 의한 영향을 분리하는 것이다. 따라서 정확한 잡음모델링을 위해선 측정결과로부터 이러한 외부의 기생성분들의 영향을 정확하게 제거하고 MOSFET 고유의 파라미터를 추출해 내는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 고주파 영역에서의 잡음 측정결과를 기반으로 한 잡음 파라미터에서 측정용 프로브 패드 및 소자의 외부 기생요소를 제거하는 기술을 확립하고 이론치와 비교함으로써 그 실효성을 입증한다.

II. MOSFET의 고주파용 열잡음 파라미터

RF 프론트엔드에 있어서 중요한 성능중 하나가 잡음지수(NF)이다. NF를 저감시키기 위해서는 MOSFET내부의 잡음 이외에 기생 저항에도 주의할 필요가 있다. NF의 기생 저항 의존성에 대해서는 Fukui모델의 모델 이외에는 대부분 해석이 되어있지 않은 상황이다[5]. 그러나 Fukui의 식은 CMOS LNA(Low Noise Amplifier)의 설계에서 중요시 되는 게이트 NQS잡음전류를 고려하지 않고 있다. 따라서 이러한 효과를 모두 고려한 모델식을 제안한다. MOS디바이스의 드레인 잡음전류와 게이트 잡음전류의 2개의 잡음원에 소스 및 게이트의 기생 저항에 의한 열잡음을 고려한 등가 회로를 그림 1에 나타내었다.

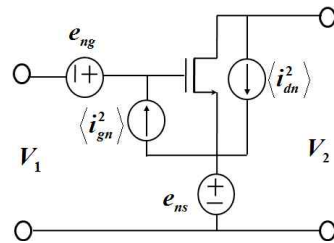


그림 1. 소스와 게이트의 열잡음을 고려한 MOSFET등가회로

Fig 1. Equivalent circuit of MOSFET including source and gate thermal noise

여기서 드레인 잡음전류 $\langle i_{dn}^2 \rangle$ 게이트잡음전류 $\langle i_{gn}^2 \rangle$ 는 다음과 같이 나타낼수 있다[6].

$$\langle i_{dn}^2 \rangle = 4kT\Delta f \gamma g_{d0} \tag{1}$$

$$\langle i_{gn}^2 \rangle = 4kT\Delta f \delta \zeta \frac{\omega^2 C_{gs}^2}{g_{d0}} \tag{2}$$

여기서 γ, δ, ζ 는 바이어스에 의해 변화하는 잡음요소들이며 g_{d0} 는 제로바이어스일 때의 드레인컨덕턴스를 나타낸다. 그리고 g_g 는 게이트와 소스어드미턴스를 나타낸다. 이 경우, y 파라미터를 고려한 소스 접지의 MOSFET 입력 환산잡음은 이하의 식으로 나타내어진다.

$$e_n = -v_1 \Big|_{v_2=0, i_2=0} \quad (3)$$

$$= e_{ng} - \frac{y_{21} + y_{22}}{y_{21}} e_{ns} + \frac{i_{dn}}{y_{21}}$$

$$i_n = -i_1 \Big|_{v_2=0, i_2=0} \quad (4)$$

$$= \frac{\Delta y}{y_{21}} e_{ns} + \frac{y_{11} i_{dn}}{y_{21}} - i_{gn}$$

여기에서 $\Delta y = y_{11}y_{22} - y_{21}y_{12}$ 이다. 잡음저항 $R_n = \overline{|e_n|^2} / 4k_B\Delta f$, 상호어드미턴스 $Y_c = \overline{e_n^* i_n} / |e_n|^2$, 등가 잡음 컨덕턴스 $G_u = \overline{|i_n|^2} / 4k_B\Delta f - R_n |Y_c|^2$ 일 때 이러한 식들은 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$R_n = \frac{\overline{|eng|^2} + \left| \frac{y_{21} + y_{22}}{y_{21}} \right|^2 \overline{|ens|^2} + \left| \frac{1}{y_{21}} \right|^2 \overline{|id|^2}}{4k_B\Delta f} \quad (5)$$

$$Y_c = \frac{\left(\frac{y_{21} + y_{22}}{y_{21}} \right)^* \frac{\Delta y}{y_{21}} \overline{|ens|^2} + y_{11} \left| \frac{id}{y_{21}} \right|^2 - \left(\frac{1}{y_{21}} \right)^* \overline{i_g^* i_d}}{\overline{|eng|^2} + \left| \frac{y_{21} + y_{22}}{y_{21}} \right|^2 \overline{|ens|^2} + \left| \frac{1}{y_{21}} \right|^2 \overline{|id|^2}} \quad (6)$$

$$G_u = \frac{\overline{\left| \frac{\Delta y}{y_{21}} \right|^2 \overline{|ens|^2} + \left| \frac{y_{11}}{y_{21}} \right|^2 \overline{|id|^2} + |ig|^2} - 2Re \left[\left(\frac{y_{11}}{y_{21}} \right)^* \overline{i_g^* i_d} \right]}{4k_B\Delta f} - R_n |Y_c|^2 \quad (7)$$

식(1)~(4) 및 소스접지 MOSFET의 y파라미터를 대입하면

$$R_n = R_G + R_s \frac{\gamma}{\alpha} \frac{1}{g_m} \quad (8)$$

$$Y_c = \frac{j \frac{\omega}{\omega_T} \frac{\gamma}{\alpha} \left(1 - \alpha |c| \sqrt{\frac{\delta}{\kappa \gamma}} \right)}{R_G + R_s + \frac{\gamma}{\alpha} \frac{1}{g_m}} \quad (9)$$

$$G_u = \frac{g_m \left(\frac{\omega}{\omega_T} \right)^2 \frac{\gamma \delta}{\kappa g_m} (1 - |c|^2) + (R_G + R_s) \left(\frac{\gamma + \alpha \delta}{\alpha} \frac{\delta}{\kappa} \right)}{R_G + R_s \frac{\gamma}{\alpha} \frac{1}{g_m}} + (R_G + R_s) \left(-2|c| \sqrt{\frac{\gamma \delta}{\kappa}} \right) \frac{1}{R_G + R_s \frac{\gamma}{\alpha} \frac{1}{g_m}} \quad (10)$$

가 된다. $G_c = \text{Re}[Y_c] = 0$ 에 가깝기 때문에 $F_{min} = 1 + 2 \sqrt{R_u G_n}$ 이 된다. 이 식을 이용하면

$$F_{min} = 1 + 2 \frac{\omega}{\omega_T} \sqrt{g_m \left[\frac{\delta}{\kappa g_m} (1 - |c|^2) \right] + \left[(R_G + R_s) \times \left(\frac{\gamma}{\alpha} + \frac{\alpha \delta}{\kappa} - 2|c| \sqrt{\frac{\gamma \delta}{\kappa}} \right) \right]} \quad (11)$$

가 얻어진다. 식 (11)이 기생저항과 게이트 NQS저항의 효과를 고려했을 때의 F_{min} 가 된다. 만일 NQS게이트잡음이 없다면 F_{min} 은

$$F_{min} = 1 + 2 \frac{\omega}{\omega_T} \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha} g_m (R_G + R_s)} \quad (12)$$

가 되어 Fukui의 식과 같아진다. 또한 $R_G + R_s \ll 1/g_m$ 인 경우, F_{min} 은

$$F_{min} = 1 + 2 \frac{\omega}{\omega_T} \sqrt{\frac{\gamma \delta}{\kappa} (1 - |c|^2)} \quad (13)$$

와 근사가 된다.

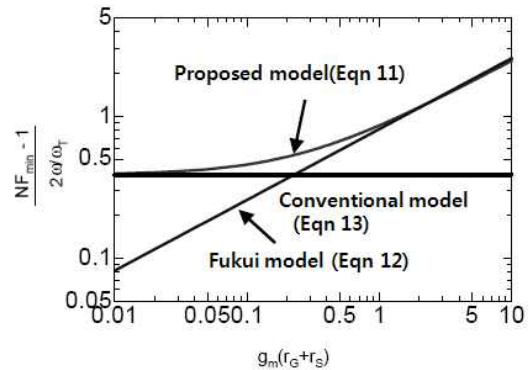


그림 2. F_{min} 의 계산결과 비교
Fig 2. Comparison of the calculated F_{min}

그림 2는 본 논문에서 제안한 식(11)과 Fukui의 식(12) 그리고 기존의 식(13)에 의한 F_{min} 의 계산결과를 나타낸다. 본 논문에서 제안한 모델식은 기생저항에서의 열잡음이 큰 경우에는 Fukui의 모델식과 일치하고 기생저항

에서의 열잡음이 작은 경우에는 종래의 식과 일치한다. 이 제안식은 Fukui의 식과 종래의 식을 보완하여 게이트 NQS저항과 기생저항이 함께 영향을 주는 RF용 단채널 MOSFET에 유용하게 사용되어진다.

III. MOSFET의 열잡음 파라미터 추출

3-1 프로브패드의 기생성분 제거

그림 3(a)는 MOSFET의 고주파특성을 측정하기 위해 DUT의 측정용 패드에 GSG(Ground- Signal-Ground)프로브를 접촉시킨 그림을 나타낸다. 그림 4는 이러한 측정 프로브의 기생성분을 포함한 등가회로를 나타낸다. 고주파 잡음측정 결과내에는 측정용 프로브패드의 기생 성분과 패드와의 연결을 위한 디바이스 외부의 기생 소자의 영향이 포함되어 있다. 이 그림에서는 고유의 잡음 파라미터를 도출해 내기 위하여 DUT내부에 존재하는 기생성분들을 프로브패드 부분과 MOSFET외부의 기생 성분으로 구분한 등가회로이다. 측정패드의 기생성분을 소거하기 위하여는 DUT더미 이외에 MOSFET가 제외된 그림 3 (b)의 OPEN 더미, 각 단자가 단락된 그림 3 (c)의 SHORT 더미로부터 S파라미터를 측정하여야 한다[7].

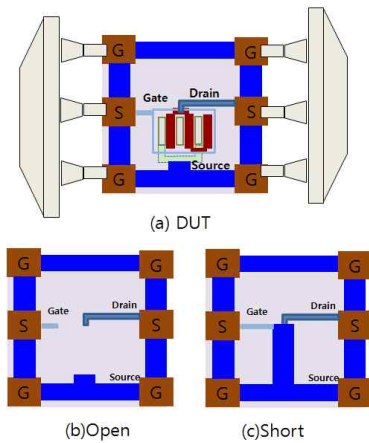


그림 3. (a) DUT와 RF 측정을 위한 GSG프로브 (b)OPEN 그리고 (c) SHORT 더미
Fig 3. (a) A DUT and GSG probe for RF measurements (b) OPEN and (c) SHORT dummy

다음은 프로브패드의 기생성분을 제거하는 방법이다. 먼저 잡음출력결과(NFmin, Rn, Yopt)를 식 (12)~(14)의 상관행렬을 이용하여 CA, CY의 형태로 변환시킨다[8].

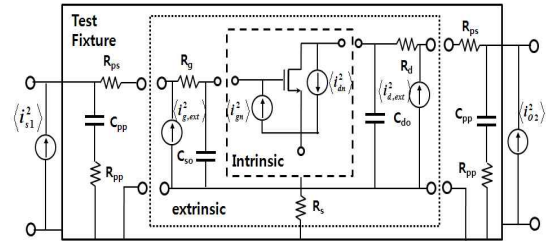


그림 4. 측정된 잡음출력으로부터 고유의 잡음 파라미터를 계산하기 위한 등가회로
Fig 4. Equivalent circuit for calculation of intrinsic noise parameters from measured output noise

$$C_A = 2kT \begin{bmatrix} R_n & \frac{NF_{min} - 1}{2} - R_n (Y_{opt})^* \\ \frac{NF_{min} - 1}{2} - R_n (Y_{opt}) & R_n |Y_{opt}|^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C_Y = \frac{1}{2\Delta f} \begin{bmatrix} \langle i_{gn}^* i_{gm} \rangle & \langle i_{gn}^* i_{dn} \rangle \\ \langle i_{dn}^* i_{gm} \rangle & \langle i_{dn}^* i_{dn} \rangle \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 변환식은 다음과 같다.

$$C_Y = T C_A T^+ \quad T = \begin{bmatrix} -Y_{11} & 1 \\ -Y_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

DUT와 OPEN 그리고 SHORT 더미의 Y파라미터 (Y_{dut}, Y_{open}, Y_{short})로 다음의 식을 계산한다.

$$C_Y^{open} = 2kT Re(Y_{open}), \quad C_Y^{tr} = C_Y^{dut} - C_Y^{open} \quad (15)$$

여기서 C_Y^{tr}은 프로브패드에 병렬로 연결되어있는 C_{pp}와 R_{pp}의 영향을 제거한 결과이다. 그리고 다음의 식을 이용하여 계산한다.

$$C_Y^{short} = 2kT Re(Y_{short}) \quad (16)$$

$$C_Y^I = C_Y^{dut} - C_Y^{open}, \quad C_Y^{II} = C_Y^{short} - C_Y^{open} \quad (17)$$

$$C_Z = VC_A V^+ \quad V = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$C_Z^{tr} = C_Z^I - C_Z^{II} \quad (19)$$

여기서 C_Z^{tr} 이 프로브패드에 직렬로 연결되어있는 R_{ps} 까지 제거한 결과이다.

3-2 MOSFET의 외부의 기생성분 제거

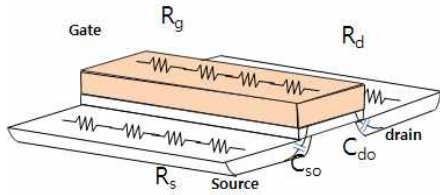


그림 5. 단채널 MOSFET의 외부 기생소자
Fig 5. Extrinsic parasitic elements of short channel MOSFET

그림 5는 MOSFET의 각 단자에 직렬로 연결되어있는 기생저항과 소스와 게이트 그리고 드레인과 게이트 사이에 존재하는 오버랩용량을 나타낸다[1]. MOSFET의 채널 길이가 긴 경우에는 게이트저항이 작아지고 오버랩용량이 채널용량에 비해 작지만 MOSFET의 미세화에 의하여 단채널에서의 기생성분의 영향은 무시할 수 없을 만큼 커진다. 기생성분에 의한 열잡음을 제거하기 위해선 먼저 MOSFET의 S파라미터 측정을 통해 R_g R_d R_s 의 값을 정확히 도출해 내야한다.

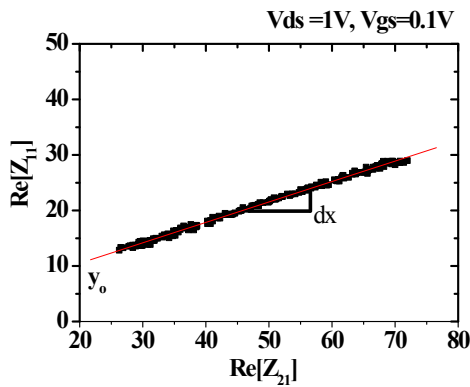


그림 6. 기생저항의 추출(W/L= 120/0.14μm)
Fig 6. Extraction of the parasitic resistance

이러한 기생성분은 바이어스에 의해서 변동하지 않기 때문에 채널이 형성되어 있지 않은 바이어스 조건하에서 측정하여 추출할 수 있다[9]. 그림 6은 기생저항 R_g 의 측정결과를 나타낸 것이며 소스측과 드레인측 기생저항 R_s 그리고 R_d 도 다음의 식에 의해 구해질 수 있다.

$$y_0 = Re(Z_{aki}) - dxRe(Z_{aij}) \quad (20)$$

오버랩용량 C_{so} 와 C_{do} 도 마찬가지로 같은 영 바이어스 조건에서 $C_{so} = (Im[Y_{11}] + Im[Y_{12}]) / \omega$ $C_{do} = -Im[Y_{12}] / \omega$ 에 의하여 구해진다.

다음은 측정되어진 기생성분을 이용하여 진성 파라미터를 추출하는 방법이다.

$$Z_r = \begin{bmatrix} R_g + R_s & R_s \\ R_s & R_g + R_s \end{bmatrix}, Y_c = \begin{bmatrix} j\omega(C_{so} + C_{do}) & -j\omega C_{do} \\ -j\omega C_{do} & j\omega(C_{so} + C_{do}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$Y_{INT} = Y[Z_{tr} - Z_r] - Y_c \quad (22)$$

구하여진 Y_{INT} 와 식(14)를 이용하여 C_A^{INT} 를 구하면 측정프로브와 기생소자를 소거한 잡음 파라미터를 얻어낼 수 있다.

V. 측정 및 파라미터 도출

그림 7은 잡음파라미터를 측정하기 위한 잡음지수 측정장비의 구성을 나타낸다.

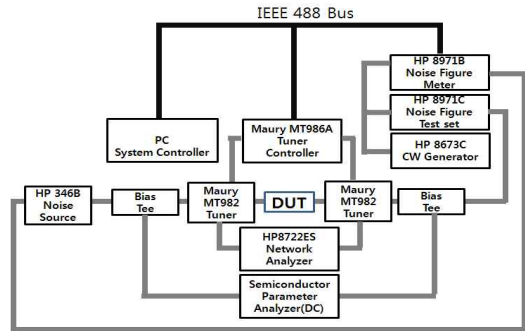


그림 7. 잡음파라미터 자동측정을 위한 장비의구성
Fig. 7 Test setup for automated measurement of noise parameter

잡음 파라미터의 측정은 잡음지수측정기와 자동튜너시스템을 이용하여 신호원측 임피던스를 변화시켜가며 잡음신호를 DUT에 인가한 후 출력측에서 얻어낸 잡음지수가 최소가 될 때의 값을 계산하여 각각의 파라미터를 출력한다.

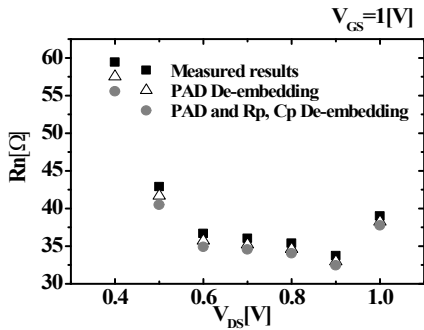


그림 8. 잡음저항에서의 패드와 기생성분의 영향
Fig 8. Effect of the PAD and parasitic elements in noise resistance

그림 8은 측정된 잡음 파라미터중 Rn을 나타내며, 프로브패드의 영향 및 기생소자의 영향을 제거한 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 바이어스가 낮은 경우 기생성분의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 전압이 낮은 경우 오버랩용량이 전압이 높은 경우에 비해 더 크기 때문이다. 이러한 추출방법의 실효성을 확인하기 위해서 그림 8에서 추출한 잡음저항으로부터 식(8)을 이용하여 잡음요소인 γ 를 도출한 결과를 그림 9에 나타내었다.

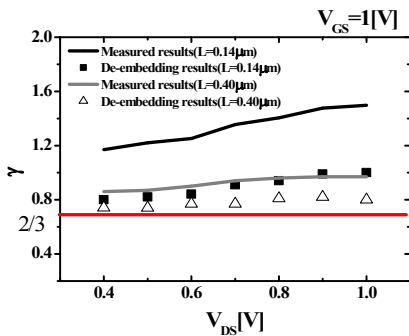
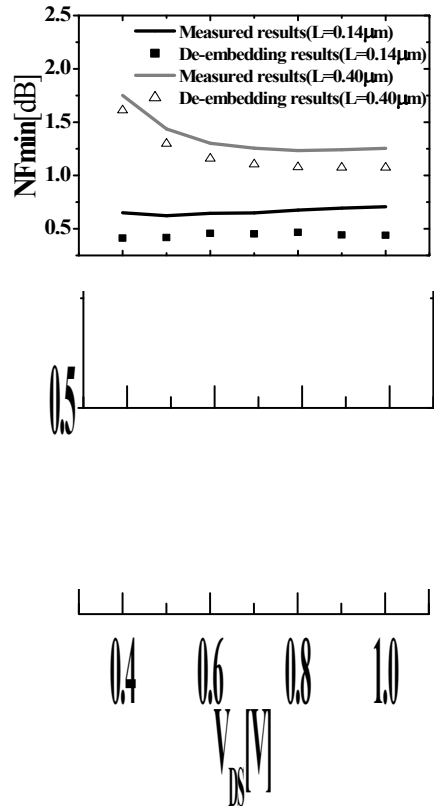


그림 9. 기생요소를 제거하여 추출된 γ 값
Fig 9. Extracted value γ by de-embedding parasitic elements

γ 는 단채널인 경우 V_{DS} 가 낮은 경우 2/3에 가깝다가 V_{DS} 증가할수록 속도 포화에 의해 증가하며 장채널인 경우 2/3에 가깝다[2, 7]. 기생요소를 제거한 결과 이론치에 가까운 결과를 얻을 수 있었다.



10. 추출한 잡음파라미터(NFmin, Γ_{opt})
Fig 10. Extracted noise parameters(NFmin, Γ_{opt})

그림 10은 추출한 잡음지수와 반사계수를 나타낸다. 기생성분을 제거한 결과 $L=0.14\mu\text{m}$ 인 경우 약 33%, $L=0.4\mu\text{m}$ 인 경우 약 11%의 잡음지수가 감소하였다. 이러한 결과로 장채널 보다 단채널인 경우 기생성분의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있다. 또한 저항 뿐 아니라 용량성 성분도 제거되었기 때문에 반사계수의 크기뿐 아니라 위상도 기생성분의 영향을 받았음을 알 수 있다.

V. 결론

측정결과에 기반을 둔 잡음 파라미터를 분석하여 게이트 NQS 저항뿐 아니라 기생저항까지 고려하도록 Fukui 모델을 개선한 모델식을 제안하였다. 또한 OPEN 및 SHORT 터미의 S 파라미터를 이용하여 프로브패드의 기생성분을 제거하고 S 파라미터에서 측정된 MOSFET의 외부 기생저항 및 용량성 기생요소를 제거하여 MOSFET 고유의 잡음 파라미터를 추출하는 방법을 제시하였다. 제시한 방법에 의해 추출된 잡음 파라미터는 이론치에 근접하였고 장채널에 비해 단채널 MOSFET의 경우 기생성분에 의한 열잡음의 영향이 큰 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] C.C.Enz, and Y.Cheng, "MOS Transistor Modeling for RF IC," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 35, no.2, pp. 186-201, 2000.
- [2] G.Kim, Y.Shimizu, B.Murakami, M.Goto, K.Ueda, T.Kihara, T.Matsuoka, and K. Taniguchi, "Small-Signal and Noise Model of FD-SOI MOS Devices for Low Noise Amplifier," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 53, no.4, pp. 1-10, 2006.
- [3] A.Abide, "High-Frequency Noise Measurements on FET's with Small Dimensions," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 33, pp. 1801-1805, 1986.
- [4] I.Kwon, M.Je, K.Lee, and H.Shin "A Simple and Analytical Parameter-Extraction Method of a Microwave MOSFET," *IEEE Trans. MTT*, vol. 50, no. 6, pp. 1503-1509, 2002.
- [5] Fukui.H" Optimal noise figure of microwave GaAs MESFET," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 26, pp. 1032-1037, 1979.
- [6] C.H.Oxley," Calculation of minimum noise figure using simple Fukui equation for gallium nitride(GaN) HEMTs," *Solid-State Electronics* vol. 45, pp. 677-682, 2001.
- [7] K.Han, H.Shin, and K.Lee," Drain current thermal noise modeling for deep submicron n- and p- channel

MOSFETs," *Solid-State Elec tronics* vol. 48, pp. 2255-2262, 2004.

- [8] G.Knoblinger" RF-Noise of Deep-Submicron MOSFETs Extraction and Modeling," *Proc of the ESSDERC*, pp. 331-334, 2001.
- [9] H.Hillbrand and P.Russer," An Efficient Method for Computer Aided Noise Analysis of Linear Amplifier Networks," *IEEE Trans. on Circuit and Systems* vol. CAS-23, pp. 235-238, 1976.
- [10] J.P.Raskin, R.Gillon, J.Chen, D.V.Janiver, and J.P.Colinge, "Accurate SOI MOSFET characterization at Microwave Frequencies for Device Performance Optimization and Analog Modeling," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 45, pp. 1017-1023, 1998.

저자소개



김규철(Guechol Kim)

2000년 2월: 목포해양대학교 해양 전자통신공학과(공학사)

2003년 8월: 목포해양대학교 해양 전자통신공학과(공학석사)

2007년 3월: 오사카대학 전자정보에너지공학과 (공학박사)

2006년 11월 ~ 2008년 2월: Matsushita Electric Works 중앙연구소 연구원

2008년 3월 ~ 현재: 목포해양대학교 해양전자통신 공학부 전임강사

※ 관심분야: CMOS 소자 모델링, 집적회로 설계