논문 2016-53-12-2

Multi-Finger MOSFET의 바이어스 종속 S₁₁-파라미터 분석

(An Analysis of Bias-Dependent S₁₁-Parameter in Multi-Finger MOSFETs)

안 자 현*, 이 성 현**

(Jahyun Ahn and Seonghearn Lee[©])

요 약

매우 큰 사이즈를 가진 multi-finger RF MOSFET의 S_{11} -parameter에서 스미스차트의 저항 circle 라인을 벗어나는 kink 현상의 게이트 바이어스 종속 특성이 관찰되었다. 이러한 바이어스 종속성은 S_{11} -parameter의 크기와 위상, 입력저항, 입력 커패시턴스의 주파수 응답곡선을 측정하여 최초로 분석되었다. 그 결과 입력 커패시턴스의 크기와 입력저항의 dominant pole과 zero 주파수에 의해 V_{gs} 종속 kink 현상이 크게 변하는 것을 알 수 있다. V_{gs} -OV일 때 매우 적은 S_{11} -parameter 위상 차와 입력저항의 높은 pole 주파수에 의해 고주파영역에서 kink 현상이 나타난다. 하지만 V_{gs} 가 높아지면 S_{11} -parameter 위상 차가 크게 증가하고 pole 주파수가 낮아져 저주파영역에서 kink 현상이 발생하게 된다.

Abstract

The gate bias dependence of kink phenomenon with a large deviation from the resistance circle in Smith chart is observed in the frequency response of S_{11} -parameter for large multi-finger RF MOSFETs. For the first time, this bias dependence is analyzed by measuring magnitude and phase of S_{11} -parameter, input resistance and input capacitance. As a result, V_{gs} dependent S_{11} -parameter is largely changed by the magnitude of input capacitance as well as dominant pole and zero frequencies of input resistance. At V_{gs} =0V, the kink phenomenon occurs in the high frequency region because of very small phase difference of S_{11} -parameter and high pole frequency of input resistance. However, the kink phenomenon at higher V_{gs} is generated in the low frequency region owing to large phase difference and low pole frequency.

Keywords: RF, MOSFET, S₁₁-parameter, Kink phenomenon, Bias dependence

I. 서 론

MOSFET은 공정상 안정도가 높고 고집적화가 가능하며 가격 경쟁력이 탁월하여 RF IC 설계에 기본 소자로 널리 사용되고 있다. 이러한 MOSFET의 등가회로모델을 구축하고 RF IC 설계를 하는데 S-parameter 데이터가 주로 사용되지만 스미스차트의 주파수 응답 특성과 전압 종속성을 분석하는 것은 매우 어렵다. 특히,

대신호 RF 모델링을 위해서는 S-parameter의 전압 종속성에 대한 물리적 분석이 매우 중요하다.

 S_{11} -parameter와 S_{22} -parameter의 고주파 영역에서 스미스차트의 저항 circle 라인을 벗어나는 kink 현상이 많이 보고되고 분석되어 왔다 $^{[1\sim 4]}$. 하지만, 이러한 연구들은 게이트와 드레인 사이의 space offset이나 소스와 벌크 사이의 간격을 증가시키는 비표준형 CMOS 공정으로 MOSFET을 제작하여 분석하였다 $^{[1\sim 2]}$.

최근에 표준 CMOS 공정을 사용한 게이트 길이 L_g 가 0.18μ m이고 전체 게이트 finger 폭 W_t 가 640μ m인 multi-finger RF N-MOSFET에서 1GHz의 저주파 영역에서 S_{11} -parameter의 kink 현상이 최초로 관찰되었다^[3]. 이는 저주파에서 입력저항 R_{IN} 의 감소에 의해 발생되며 큰 입력 커패시턴스 C_{IN} 에 의해 급격히 위상이 증가하여 스미스차트의 저항 circle 라인 사이의 간격이

Received; October 10, 2016 Revised; November 10, 2016

Accepted; November 25, 2016

^{*} 학생회원, ** 정회원, 한국외국어대학교 전자공학과 (Department of Electronics Engineering, Hankuk University of Foreign Studies)

[©] Corresponding Author (E-mail: shlee@hufs.ac.kr)

[※] 이 연구는 2016학년도 한국외국어대학교 교내학술 연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

넓어지기 때문에 생기는 현상임이 밝혀졌다^[3].

하지만 이러한 S_{11} -parameter kink 현상의 발생 유무 및 강도는 다양한 bias 조건에 따라 변하는 동작영역에 따라 달라지므로, 전압종속 현상을 파악하고 강도를 분석하는 것이 S_{11} -parameter의 bias 종속성을 예측하는 대신호 모델 구축 연구에 매우 중요하다.

따라서, 본 논문에서는 매우 큰 W_t 를 갖는 multi finger MOSFET에서 S_{11} -parameter kink 현상의 전압 종속 특성을 발견하였고, S_{11} -parameter의 magnitude, phase, R_{IN} , 및 C_{IN} 의 주파수 응답 곡선을 통해 최초로 전압 종속 원인을 분석하였다.

II. 전압종속 Kink 현상 및 원인 분석

본 연구에서는 multi-finger 게이트 형태(단위 게이트 finger 길이 L_g =0.18 μ m, 단위 게이트 finger 폭 W_u =10 μ m, 게이트 finger 수 Nf=64)의 N-MOSFET에 다양한 V_g s를 가한 후 on-wafer RF probe로 40GHz까지 S-parameter를 측정하였다.

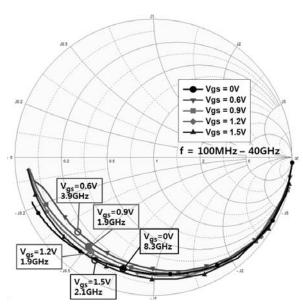


그림 1. V_{gs} 변화에 따른 표준형 N-MOSFET(L_g =0.18 μ m, W_u =10 μ m, Nf=64)의 S_{11} -parameter (V_{ds} =1.5V). 각 전압마다 최소 $Mag(S_{11})$ 의 주파수가 표시됨.

Fig. 1. S_{11} -parameters of a standard N-MOSFET $(L_g$ =0.18 μ m, W_u =10 μ m, Nf=64) with various V_{gs} at V_{ds} =1.5V. The frequencies at the minimum value of Mag(S_{11}) are marked at each V_{gs} curves.

이렇게 측정된 S-parameter로부터 RF probe 측정용 패드 및 금속 배선 패턴의 기생성분을 제거하기 위하여 정확성이 이미 증명된 open-short de-embedding 방법 이 사용되었다^[5]. 이를 통해 MOSFET이 연결되지 않은 open 테스트 패턴을 사용하여 패드의 병렬 어드미턴스 요소들을 제거하고 모든 금속배선들 끝이 단락된 short 테스트 패턴들을 사용하여 금속배선에 존재하는 직렬 임피던스 요소들을 제거하였다.

그림 1에서 사용된 소자는 $W_t=64 \times 10 \mu c$ 때우 넓기 때문에 S_{11} -parameter 데이터에서 주파수가 중가하면서 저항 circle 라인을 벗어나는 kink 현상이 나타나지만^[3] V_{gs} 에 따라 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 여기서 V_{gs} =0V일 때 8.3 GHz이상의 고주파에서 kink 현상이 가장 두드러지고 V_{gs} = $0.6 V \sim 0.9 V$ 에서는 저주파 영역에서 kink 현상이 나타난다. V_{gs} =0.6 V에서 0.9 V로 증가할 때 kink 현상이 커지지만 V_{gs} =0.9 V $\sim 1.5 V$ 에서는 kink 현상이 점차 감소하여 서로의 간격이줄어드는 것을 알 수 있다.

이렇게 관찰된 전압 종속 S_{11} -parameter의 kink 현상의 정확한 분석을 위하여 V_{gs} 의 증가에 따른 S_{11} -parameter 크기의 주파수 응답곡선이 사용되었다.

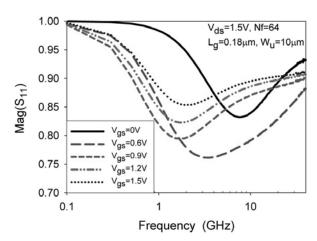


그림 2. V_{gs} 변화에 따른 $Mag(S_{11})$ 의 주파수 응답 곡선 Fig. 2. Frequency response of $Mag(S_{11})$ with varying V_{gs} .

그림 2에서 모든 $Mag(S_{11})$ 데이터는 저주파에서 감소한 후 다시 증가하기 시작하는 kink 특성을 보여준다. 이 때 $Mag(S_{11})$ 이 최소가 되는 kink 주파수는 V_{gs} =0.0V의 8.3GHz에서 V_{gs} =0.6V일때 3.9GHz로 크게 줄어들다가 1.9GHz (V_{gs} =0.9V), 1.9GHz (V_{gs} =1.2V), 2.1GHz (V_{gs} =1.5V)로 일정해지는 것을 알 수 있다. 또한, $Mag(S_{11})$ 의 감소폭은 V_{gs} =0.6V일 때 가장 크고 V_{gs} =0.9V~1.5V로 증가함에 따라 점차 줄어드는 것을 알 수 있다.

이와 같이 V_{gs} 에 따라 달라지는 kink 현상의 원인을 물리적으로 파악하기 위해 입력저항 R_{IN} = Real $[R_o(1+S_{II})/(1-S_{II})]$ 의 주파수 응답 곡선을 그림 3에서 그렸다. 이때 특성 임피던스 R_o 는 50오이다. 그림 3에서 V_{gs} 증가에 따라 저주파 R_{IN} 이 감소하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 증가하는 V_{gs} 에 따라 게이트 저항이 감소하는 non-quasi-static(NQS) 효과 $^{[6]}$ 때문에 게이트 저항을 포함하는 R_{IN} 이 V_{gs} 가 증가함에 따라 감소하기 때문이다. 따라서, V_{gs} = $0.6V\sim0.9V$ 사이의 전압 증가에 따라 R_{IN} 이 줄어들어 그림 1처럼 전 주파수 영역에서 적은 저항 circle 라인을 따라 돈다.

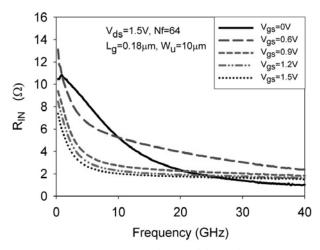


그림 3. R_{IN} 의 V_{gs} 변화에 따른 주파수 응답 곡선 Fig. 3. Frequency response of R_{IN} with varying V_{gs} .

이러한 게이트 저항 NQS 효과와 함께 V_{gs} =0V일 때 드레인과 채널 끝 사이의 pinchoff 영역에 발생하는 depletion 커패시턴스 C_{ds} 와 채널 저항 r_{ch} 가 존재하지 않기 때문에 $^{[7\sim 8]}$, 그림 3에서와 같이 R_{IN} 의 dominant pole 주파수 f_{p} 가 높은 주파수에서 생겨 그림 2처럼 저주파에서 $Mag(S_{11})$ 의 감소가 매우 적다. 한편, zero 주파수 f_{z} 는 매우 크기 때문에 주파수 증가에 따라 R_{IN} 이 saturation 되지 않고 지속적으로 감소하여 kink 주파수가 가장 높다 $^{[3]}$. 따라서, V_{gs} =0V일 때 다른 전압보다 고주파에서의 R_{IN} 감소가 훨씬 크기 때문에 스미스차트의 저항 circle 라인을 크게 벗어나 8.3GHz이상의 영역에서 가장 강한 kink 현상이 그림 1에서 나타난다.

하지만, V_{gs} =0.6V \sim 1.5V의 R_{IN} 은 f_p 에 의하여 저주파에서 급격하게 감소한 후 f_z 에 의하여 saturation 되는 형태를 갖는다. 이때, V_{gs} =0.6V \sim 1.5V의 R_{IN} 에 발생하는 f_p 과 f_z 의 값들이 bias에 거의 무관하고 특히, V_{gs} =0.9V \sim 1.5V의 R_{IN} 주파수 감소 형태가 매우 흡사하기 때문에 kink 현상에 대한 정확한 분석이 어렵다.

따라서, 더욱 정확한 분석을 위하여 V_{gs} 에 따른

phase(S_{11})의 주파수 응답 그래프를 그림 4와 같이 그렸다. V_{gs} =0V~0.9V로 증가되면서 phase(S_{11})가 크게 증가되다가 V_{gs} =1.2V~1.5V로 증가함에 따라 phase(S_{11})이 조금씩 감소하게 된다.

이와 같이 V_{gs} =0.6V \sim 0.9V에서 phase(S_{11})이 크게 중가하여 스미스차트의 저항 circle 라인 사이의 간격이 넓어지기 때문에, R_{IN} 이 저주파에서 감소할 때 $Mag(S_{11})$ 이 더욱 크게 증가하여 V_{gs} =0.9V일 때 큰 저주파 kink 현상이 1.9GHz이상에서 발생하게 된다. 하지만 V_{gs} =0.9V \sim 1.5V로 증가함에 따라 조금씩 감소된 phase(S_{11})에 의해 스미스차트의 저항 circle 라인 사이의 간격이 약간 줄어들기 때문에 kink 현상이 그림 1처럼 미세하게 줄어드는 것을 알 수 있다.

이러한 전압 종속 $phase(S_{11})$ 의 정확한 분석을 위해 V_{gs} 변화에 따른 C_{IN} = $-1/[\omega Imag\{R_o(1+S_{11})/(1-S_{11})\}]$ 의 주파수 응답 그래프를 그림 5에서 그렸다. 저주파(LF)

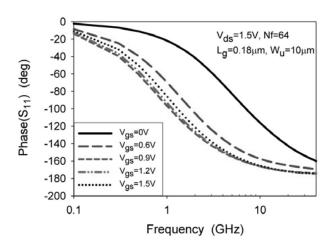


그림 4. V_{gs} 변화에 따른 Phase(S_{11})의 주파수 응답 곡선 Fig. 4. Frequency response of Phase(S_{11}) with varying V_{gs} .

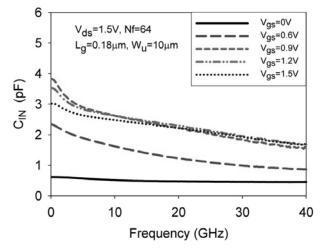


그림 5. V_{gs} 변화에 따른 C_{IN} 의 주파수 응답 곡선 Fig. 5. Frequency response of C_{IN} with varying V_{gs} .

영역의 C_{IN}은 단순화된 다음 식으로 모델화된다^[3].

$$C_{IN(LF)} = C'_{qs} + C_{qd}(1 + g'_{m}R_{L})$$
 (1)

여기서 R_L 은 드레인-소스 저항 r'_{ds} 와 드레인 저항 R_d + 특성 임피던스 R_o 의 병렬저항이고 게이트-소스 커패시턴스 C'_{gs} , 드레인-소스 커패시턴스 C'_{ds} , 전달 컨덕턴스 g'_{m} 은 다음 식으로 정의된다 $^{[1\sim2]}$.

$$C'_{ds} = C_{ds}/(1 + g_m R_s)$$
 (2)

$$g'_{m} = g_{m}/(1 + g_{m}R_{s}) \tag{3}$$

$$C'_{as} = C_{as}/(1 + g_m R_s)$$
 (4)

$$r'_{ds} = r_{ds} (1 + g_m R_s) \tag{5}$$

이때 R_d 와 소스 저항 R_s 의 bias 종속성이 매우 적어 zero bias $(V_{gs}=V_{ds}=0V)$ 에서 $R_d=5\Omega$ 과 $R_s=0.2\Omega$ 이 추출되었다.

식 (1)로부터 $C_{\text{IN(LF)}}$ 를 계산하기 위해서 S_{II} -parameter 측정을 통한 그림 6의 MOSFET 소신호 등가회로 모델이 사용되었으며, 측정된 S-parameter로부터 직접 추출방법 $^{[7\sim10]}$ 으로 모델 파라미터들을 추출하였다. 먼저, 드레인 접합 커패시턴스 C_{id} (= 279fF), 기판 커패시턴스 C_{bk} (= 400fF)와 기판 저항 R_{bk} (= 74 Ω)가 zero bias에서 추출되었다. 표 1은 각 전압마다 추출된 모델 파라미터와 이를 사용해 계산된 $C_{\text{IN(LF)}}$ 을 보여준다. 이와 같이모델된 $C_{\text{IN(LF)}}$ 는 그림 5의 측정된 저주파 C_{IN} 값과 매우잘 일치하는 것을 알 수 있다.

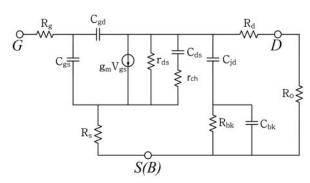


그림 6. S₁₁-parameter 측정을 통한 MOSFET 소신호 등 가회로

Fig. 6. A small-signal MOSFET equivalent circuit from S_{11} -parameter measurement.

표 1에서 V_{gs} =0.6V에서 0.9V로 증가할 때 C_{IN} 값이 증가하는 이유는 g'_{m} 이 크게 상승하기 때문이고, V_{gs} =0.9V \sim 1.5V로 증가할 때 C_{IN} 이 점차 감소하는 원인은 V_{gs} 가 증가함에 따라 saturation 영역에서 linear 영

역으로 가까워짐에 따라 C'_{gs} 가 감소하기 때문이다. 이와 같이 V_{gs} =0V에서 V_{gs} =0.9V까지 증가되다가 V_{gs} =1.2V부터 다시 감소되는 그림 5의 C_{IN} 특성 때문에 그림 4와 같은 전압 종속 phase(S_{II})특성이 나오는 것을 알 수 있다. 이와 같은 L_g =0.18 μ m MOSFET의 전압 종속 kink 현상은 scale-down된 L_g =0.13 μ m, W_u =10 μ m, Nf=64인 소자에서도 똑같이 관찰되었다. 본 연구에서 최초로 행해진 multi-finger MOSFET에 대한 전압 종속 kink 현상의 분석 결과는 S_{II} -parameter의 전압 종속 특성을 정확히 예측할 수 있기 때문에 RF MOSFET 대신호

표 1. V_{ds} =1.5V일때 추출된 V_{gs} 종속 모델 파라미터들 과 계산된 $C_{IN(LF)}$

모델링 연구에 매우 효과적으로 활용될 수 있다.

Table 1. Extracted V_{gs} dependent model parameters and calculated $C_{IN(LF)}$ at $V_{ds}{=}1.5V.$

Parameter	V _{gs} =0.6V	V _{gs} =0.9V	$V_{\rm gs}$ =1.2V	$V_{\rm gs}$ =1.5 V
C _{gs} (fF)	680.87	756.56	724.97	532.71
C _{gd} (fF)	239.82	261.37	288.32	350.85
$r_{ds}(\Omega)$	552.7	81	40	22.2
C _{ds} (fF)	170	850	1300	1380
$r_{ch}(\Omega)$	140	60	53	50
g _m (S)	0.1227	0.3451	0.3931	0.3971
C _{IN(LF)} (pF)	2.39	3.9	3.6	3.08

Ⅲ. 결 론

매우 큰 W_t 를 갖는 multi-finger N-MOSFET에서 S_{11} -parameter kink 현상의 V_{gs} 종속 특성을 발견하였고, S_{11} -parameter의 magnitude와 phase, R_{IN} , C_{IN} 의 주파수 응답 곡선을 사용하여 최초로 분석하였다. 분석결과 V_{gs} =0V일 때 매우 작은 C_{IN} 에 의해 고주파에서 phase(S_{11})가 증가되며 f_p 가 높아 R_{IN} 이 크게 감소하는 고주파영역에서 kink 현상이 나타난다. 하지만 V_{gs} =0.6V~0.9V로 증가할 때는 매우 커진 C_{IN} 으로 저주파에서 phase(S_{11})이 크게 증가하고 낮아진 f_p 에 의해 R_{IN} 이 크게 감소하는 저주파 영역에서 큰 kink 현상이 발생하게 되고, V_{gs} =0.9V~1.5V로 증가할 때는 조금씩 줄어드는 C_{IN} 으로 인해 phase(S_{11})이 감소하므로 저주파 kink 현상이 조금씩 줄어든다.

REFERENCES

[1] Y. Lin and S. Lu, "An analysis of small-signal source body resistance effect on

- RF MOSFETs for low-cost system-on-chip (SoC) applications, "IEEE Trans. Electron Devices, vol. 52, pp. 1442-1451, 2005.
- [2] Y. Lin and S. Lu, "An analysis of small-signal gate-drain resistance effect on RF power MOSFETs," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, pp. 525-528, 2003.
- [3] J. Ahn and S. Lee, "Analysis of kink phenomenon in S₁₁-parameter of standard MOSFETs," Electronics Letters, vol. 51, no. 18, pp. 1453-1455, 2015.
- [4] S.-S. Lu, C. Meng, T.-W. Chen and H.-C. Chen, "The origin of the kink phenomenon of transistor scattering parameter S₂₂," IEEE Transaction on Microwave Theory Techniques, vol. 49, no. 2, pp. 333–340, February 2001.
- [5] S. Lee, "Effect of pad and interconnection parasitics on forward transit time in HBTs" IEEE Trans. Electron Device, vol. 46, p. 275–280, 1999.
- [6] H. Lee and S. Lee, "Accurate non-quasi-static gate-source impedance model of RF MOSFETs," J. Semicond. Technol. Sci., vol. 13, no. 6, pp. 569-575, 2013
- [7] S. Hong and S. Lee, "Physical origin of gate voltage-dependent drain source capacitance in short-channel MOSFETs," Electronics Letters, vol. 50, no. 24, pp. 1879–1881, Nov. 2014.
- [8] S. Hong and S. Lee, "Improved high-frequency output equivalent circuit modelling for MOSFETs," Electronics Letters, vol. 51, no. 24, pp. 2045–2047, 2015.
- [9] Y. Lee, M. Choi, J. Koo, and S. Lee, "Bias and gate-length dependent data extraction of substrate circuit parameters for deep submicron MOSFETs," Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea – Semiconductor and Devices, vol. 41, no. 12, pp. 27–34, 2004.
- [10] J. Kim, Y. Lee, M. Choi, J. Koo, and S. Lee, "Gate-length dependent cutoff frequency extraction for nano-scale MOSFET," Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea - Semiconductor and Devices, vol. 42, no. 12, pp. 1-8, 2005.

저 자 소 개 -



안 자 현(학생회원) 2014년 한국외국어대학교 전자공학과 학사 졸업. 2014년∼현재 한국외국어대학교 전자정보공학과 석사과정.

<주관심분야: RF CMOS 소자 모델링>



이 성 현(정회원) - 교신저자 1985년 고려대학교 전자공학과 학사 졸업.

1989년 미국 University of Minnesota 전기공학과 석사 졸업.

1992년 미국 University of Minnesota 전기공학과 박사 졸업.

1992년~1995년 한국전자통신연구원 선임연구원 1995년~현재 한국외국어대학교 전자공학과 교수 <주관심분야: CMOS 및 바이폴라 소자 모델링>