

논문 2010-47SD-10-1

고온 종속 RF MOSFET 캐패시턴스-전압 곡선 추출 및 모델링

(Extraction and Modeling of High-Temperature Dependent Capacitance-Voltage Curve for RF MOSFETs)

고 봉 혁*, 이 성 현**

(BongHyuk Ko and Seonghearn Lee)

요 약

본 연구에서는 S-파라미터 측정 데이터를 사용하는 RF 측정방법으로 short-channel MOSFET의 RF 캐패시턴스-전압(C-V) 곡선을 상온에서 225°C까지 추출하였으며, 추출된 고온 종속 특성을 эм피리컬하게 모델링하였다. RF C-V 특성곡선의 weak inversion영역에서 온도 변화에 따른 voltage shift가 threshold voltage shift보다 적은 현상이 관찰되었지만, 기존 long-channel C-V 이론 방정식으로 설명할 수 없는 현상이 입증되었다. 이러한 short-channel C-V 곡선의 고온 종속 모델링을 위해서 새로운 эм피리컬 방정식이 개발되었다. 이 방정식의 정확도는 모델된 C-V곡선과 측정 데이터가 넓은 온도범위에서 잘 일치하는 결과를 관찰함으로써 입증되었다. 또한, 높은 게이트 전압에서는 온도가 증가함에 따라 채널 캐패시턴스 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, RF Capacitance-Voltage(C-V) curve of short-channel MOSFET has been extracted from the room temperature to 225°C using a RF method based on measured S-parameter data, and its high-temperature dependent characteristics are empirically modeled. It is observed that the voltage shift according to the variation of temperature in the weak inversion region of RF C-V curves is lower than the threshold voltage shift, but it is confirmed that this phenomenon is unexplainable with a long-channel theoretical C-V equation. The new empirical equation is developed for high-temperature dependent modeling of short-channel MOSFET C-V curves. The accuracy of this equation is demonstrated by observing good agreements between the modeled and measured C-V data in the wide range of temperature. It is also confirmed that the channel capacitance decreases with increasing temperature at high gate voltage.

Keywords: MOSFET, RF C-V, high-temperature, modeling

I. 서 론

일반적으로 MOSFET의 Capacitance-Voltage (C-V) 특성 곡선은 MOSFET interface trap charge나 fixed oxide charge를 분석하는 소자 특성화나

MOSFET의 AC 모델링을 위해서 중요하게 사용되어 왔다. 특히, weak inversion영역의 C-V특성은 fast switching behavior를 결정한다. MHz의 저주파 영역에서 측정되는 C-V 곡선을 얻기 위해서는 일반적으로 큰 테스트 소자가 필요하지만, 실제 short-channel MOSFET과의 불일치에 의해 모델링 오차가 발생해왔다. 이를 극복하기 위해 최근에는 GHz 영역에서 측정된 S-parameter를 사용한 RF 측정방법이 실제 MOSFET의 적은 C-V 데이터를 측정하는데 사용되고 있다^[1-2]. 최근에 body-tied 소스를 가진 deep n-well

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

※ 이 연구는 2010학년도 한국외국어대학교 교내학술 연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

접수일자: 2010년7월20일, 수정완료일: 2010년9월16일

isolated 벌크 N-MOSFET이 Partially-Depleted SOI N-MOSFET에 비해 누설전류가 더 적고 RF특성의 온도 종속성이 더 낮아진다는 연구가 발표되어 고온 RF IC 응용분야에 매우 각광받고 있다^[3]. 하지만 RF C-V 특성의 고온 종속특성 분석에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 지금까지 고온에서의 MOSFET C-V 특성 측정은 주로 120°C 이하에서 수행되어 왔다^[4]. 하지만 고온의 MOSFET 특성을 분석하기 위해서는 더 높은 온도에서의 RF C-V 측정이 필수적이다.

Weak inversion영역에서 RF C-V곡선의 온도 종속성은 비선형 RF특성을 결정하므로 매우 중요하다. 최근에 27°C에서 225°C까지 측정된 RF C-V데이터가 발표되었으나^[5], 고온 종속 특성에 대해 자세히 분석하고 모델링한 연구는 전혀 보고되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 27°C에서 225°C까지 측정된 고온 MOSFET RF C-V 곡선의 weak inversion영역 특성에 대해 자세히 분석하고, 정확한 C-V 특성 모델링을 위한 empirical 방정식을 새롭게 구축하고자 한다.

II. 본 론

본 연구에서는 RF C-V 측정을 위해 unit finger width(W_u)가 $1.2\mu\text{m}$ 이고 mask gate-length(L_{mask})가 $0.18\mu\text{m}$ 이며 gate finger수(NF)가 16인 multi-finger N-MOSFET들의 S-parameter를 on-wafer상에서 측정하였다. 또한 RF probe 패드 및 금속배선 패드의 기생성분을 제거하기 위해 디임페딩을 수행하였다^[6].

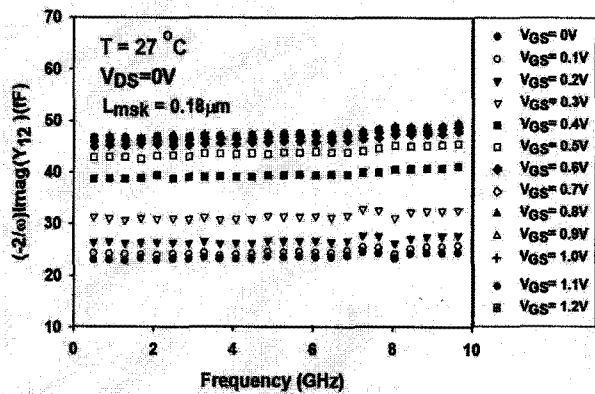


그림 1. 다양한 V_{GS} 에서 측정된 $(-2/\omega)Imag(Y_{12})$ 데이터를 27°C에서 주파수의 함수로 그린 그래프
Fig. 1. The measured data of $(-2/\omega)Imag(Y_{12})$ as a function of frequency with varying V_{GS} at 27°C.

RF C-V 특성을 관찰하기 위해 gate-to-ground capacitance(C_G)는 $V_{DS} = 0V$ 에서 $C_{gd} = C_{gs}$ 인 소스와 드레인 대칭구조라는 가정하에 저주파(LF)에서 유도된 다음 식을 사용하였다^[7].

$$C_G = (-2/\omega)Imag(Y_{12}) \quad (1)$$

그림 1과 2는 V_{GS} 를 변화시키면서 각각 27°C와 225°C에서 측정된 주파수 종속 C_G 데이터를 나타낸다.

그림 3은 이와 같은 방법으로 측정된 온도변화에 따른 C_G 대 V_{GS} 그래프인데, $V_{GS}=0.1V$ 에서 0.4V까지 weak inversion영역에서 온도가 높아질수록 곡선이 왼쪽으로 ΔV_{GS} 만큼 shift되는 것을 알 수 있다. 이때의 온도 변화에 대한 voltage shift ΔV_{GS} 가 threshold

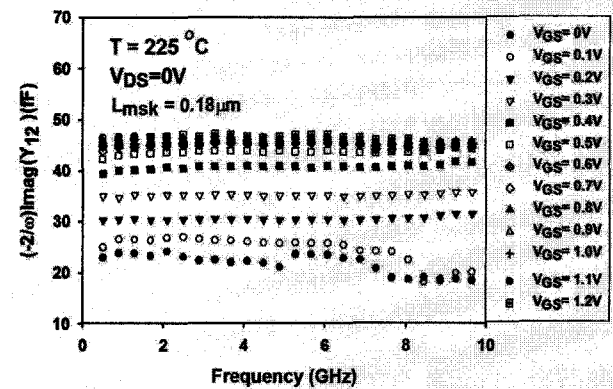


그림 2. 다양한 V_{GS} 에서 측정된 $(-2/\omega)Imag(Y_{12})$ 데이터를 225°C에서 주파수의 함수로 그린 그래프

Fig. 2. The measured data of $(-2/\omega)Imag(Y_{12})$ as a function of frequency with varying V_{GS} at 225°C.

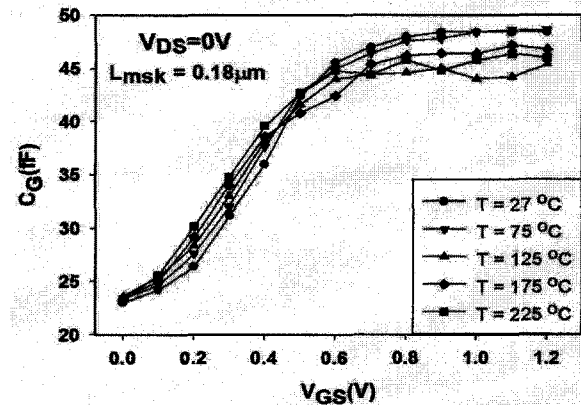


그림 3. 온도 변화에 따라 측정된 RF C-V 특성 곡선
Fig. 3. The measured RF C-V curve at various temperature.

voltage shift ΔV_{TH} 와 어떤 관련이 있는지 알아보기 위해 C_G 측정시 사용한 S-parameter를 사용하여 V_{TH} 를 추출하였다. 이와 같은 RF V_{TH} 추출을 위해 Y-파라미터의 저주파(LF)데이터를 사용한 다음 방정식으로부터 total drain-source conductance(G_{tot})를 구하였다.

$$G_{tot} \approx \text{Real}(Y_{22})|_{LF} \quad (2)$$

그림 4는 측정된 G_{tot} 데이터를 10GHz 까지의 주파수의 함수로 나타낸 그림이다. 그림 5는 G_{tot} 를 V_{GS} 의 함수로 그린 그래프이며, 낮은 V_{GS} 영역에서 직선으로 fitting한 x-절편 값으로부터 RF방법으로 추출한 V_{TH} 를 구하였다. 이 그래프는 온도가 높아질수록 기울기가 줄어드는 현상이 발생하는데, 이는 고온으로 갈수록

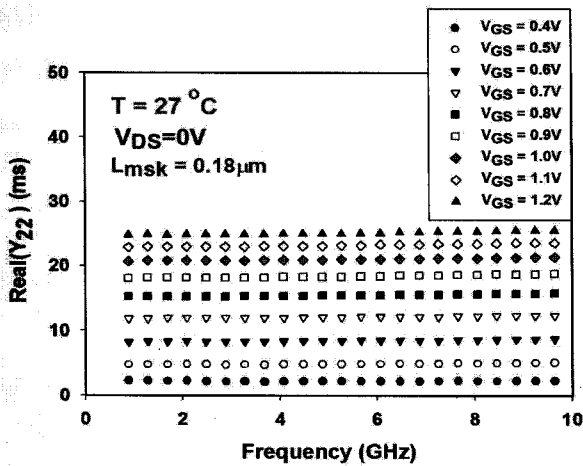


그림 4. 다양한 V_{GS} 에서 측정된 $Real(Y_{22})$ 데이터를 27°C에서 주파수의 함수로 그린 그래프

Fig. 4. The measured data of $Real(Y_{22})$ as a function of frequency with varying V_{GS} at 27°C.

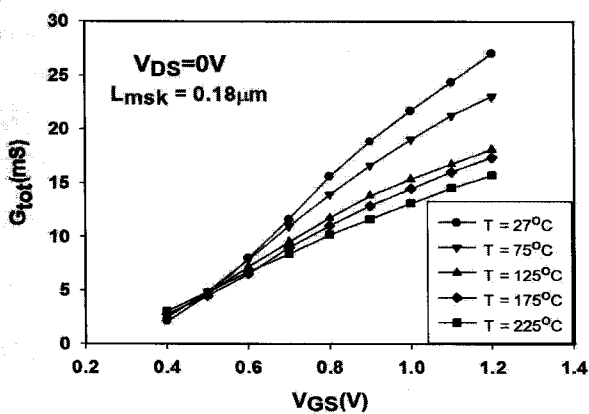


그림 5. 여러 가지 온도별로 그린 G_{tot} 대 V_{GS} 그래프

Fig. 5. The measured G_{tot} data vs. V_{GS} at various T.

mobility가 감소하기 때문이다^[7].

그림 6은 DC방법으로 추출한 V_{TH} 와 그림 4에서 RF 방법으로 추출한 V_{TH} 를 비교한 그래프로서 비교적 유사한 값이 얻어짐을 확인할 수 있다. DC방법으로 추출한 V_{TH} 는 $V_{DS}=50mV$ 일 때 $I_{DS}-V_{GS}$ 곡선의 x-절편을 사용하여 측정되었다.

그림 7은 weak inversion 영역에서 온도변화에 따른 $C_G - V_{GS}$ 곡선의 voltage shift ΔV_{GS} 와 RF방법으로 추출한 threshold voltage shift ΔV_{TH} 를 비교한 그래프이다. 이때 ΔV_{GS} 는 그림 3의 C_G 가 33fF일 때 $V_{GS}(T)$ 와 $V_{GS}(T_{nom})$ 의 차이로 정했고, ΔV_{TH} 는 그림 6의 $V_{TH}(T)$ 와 $V_{TH}(T_{nom})$ 의 차이이다. 그림 7의 온도변화에 따른 ΔV_{GS} 의 기울기가 ΔV_{TH} 보다 적게

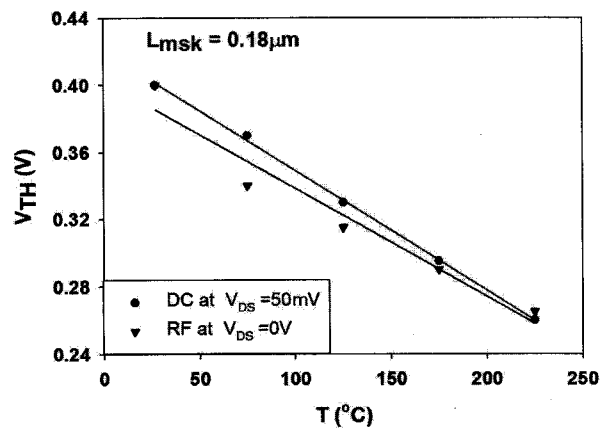


그림 6. DC와 RF방법으로 추출한 V_{TH} 를 온도의 함수로 그린 그래프

Fig. 6. V_{TH} versus T extracted by DC and RF method.

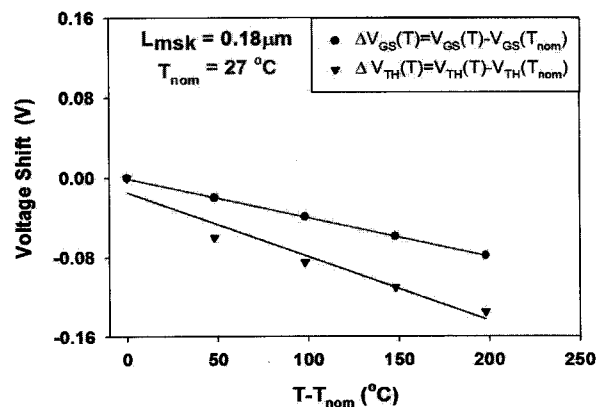


그림 7. RF방법으로 추출한 ΔV_{TH} 와 ΔV_{GS} 를 $T - T_{nom}$ 의 함수로 그린 그래프

Fig. 7. ΔV_{GS} and ΔV_{TH} extracted by RF method as a function of $T - T_{nom}$.

나오는 것을 관찰할 수 있다. 이는 short-channel MOSFET의 RF C-V곡선에서 $\Delta V_{GS}/\Delta T$ 가 $\Delta V_{TH}/\Delta T$ 보다 적다는 것을 보여준다.

Weak inversion 영역에서 RF C-V곡선의 온도종속성은 비선형 RF특성을 결정하는 중요한 요소이다. Weak inversion 영역에서의 source charge Q_S 값은 지수함수 특성을 갖는 diffusion process에 의해 $V_{DS}=0V$ 일 때 다음과 같이 표현된다^[8].

$$Q_S = -\frac{1}{2} WLC_{ox}(\eta-1)V_t \exp\left(\frac{V_{GS}-V_{TH}}{\eta V_t}\right) \quad (3)$$

여기서 $\eta = 1 + \frac{C}{C_{ox}} + \frac{C_d}{C_{ox}}$ 와 $V_t = \frac{kT}{q}$ 으로 표현된다. 식 (3)에서, W는 effective channel width, L은 effective channel length, C_{it} 은 interface trap capacitance, C_{ox} 는 게이트 oxide capacitance, C_d 는 depletion layer capacitance이다.

C_G 는 소스와 드레인 대칭구조라는 가정하에 reciprocity원리를 이용하면 다음과 같이 정의된다^[8].

$$C_G = 2C_{gs} = 2\frac{dQ_G}{dV_{GS}} = -2\frac{dQ_S}{dV_{GS}} \quad (4)$$

식(4)에 식(3)을 대입하면 다음 식으로 표현된다.

$$C_G = A \exp\left(\frac{V_{GS}-V_{TH}}{\eta V_t}\right) \quad (5)$$

여기서 $A = WLC_{ox}\left(\frac{\eta-1}{\eta}\right)$ 이다.

Threshold voltage의 온도 종속성은 다음과 같다.

$$V_{TH} = V_{TH}(T_{nom}) - a(T - T_{nom}) \quad (6)$$

여기서 T_{nom} 은 27°C이다.

식 (6)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 상수의 C_G 가 측정되는 VGS를 다음과 같은 온도의 함수로 구해진다.

$$V_{GS} = V_{TH}(T_{nom}) - Y(T - T_{nom}) \quad (7)$$

여기서

$$Y = a - \frac{\eta k}{q} \ln \frac{C_G}{A} \quad (8)$$

그림 7의 ΔV_{GS} 는 식(7)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\Delta V_{GS} = V_{GS}(T) - V_{GS}(T_{nom}) = -Y(T - T_{nom}) \quad (9)$$

식 (6)에 의해 ΔV_{TH} 도 다음과 같이 유도된다.

$$\Delta V_{TH} = V_{TH}(T) - V_{TH}(T_{nom}) = -a(T - T_{nom}) \quad (10)$$

하지만 weak inversion 영역에서는 $V_{GS} < V_{TH}$ 이므로 식 (5)에서 $C_G < A$ 가 된다. 그러면 식 (8)에서 $Y > a$ 가 되어 $\Delta V_{GS} > \Delta V_{TH}$ 가 되므로, long-channel 이론 방정식 (5)으로는 온도변화에 따른 ΔV_{GS} 의 기울기가 ΔV_{TH} 보다 적게 나오는 그림 7의 short-channel 현상을 모델링을 할 수 없게 된다.

또한, 그림 3의 C_G 대 V_{GS} 곡선에서 상승되는 기울기가 식(5)의 지수 함수보다 훨씬 적은 것을 관찰할 수 있다. 이는 weak inversion과 strong inversion 동작 영역 사이에서 발생하는 gradual transition 현상으로 short-channel일수록 더 심해지기 때문이다^[9].

이와 같이 기존 long-channel weak inversion 이론 방정식으로는 모델화할 수 없는 short-channel 소자의 고온 종속 RF C-V 모델링을 위해서는 새로운 empirical 방정식을 구축하는 것이 가장 편리하다.

따라서 본 연구에서는 비선형 RF 특성을 결정하는 weak inversion영역에서 short-channel RF C-V 곡선의 온도종속 모델링을 위해 다음과 같이 일반적으로 많이 사용되는 empirical 함수인 hyperbolic tangent 함수를 사용하였다.

$$C_G = a + b[1 + \tanh[c(V_{GS} - d)]] \quad (11)$$

여기에서 a, b, c 및 d는 다음과 같이 선형 온도종속 방정식으로 empirical하게 표현하였다.

$$a=e+fT, b=g+hT, c=i+jT, d=k-lT \quad (12)$$

위의 empirical 방정식의 파라미터 추출을 위해 각 온도마다 CG의 VGS 종속 데이터와 일치되도록 curve-fitting을 수행하여 식 (11)의 온도 종속 a, b, c, d 데이터를 추출하였다. 이와 같이 추출된 a, b, c, d 대 T 그래프의 기울기와 y-절편을 사용하여 식 (12)의 선형함수 파라미터 값들을 추출하였다. 그림 8에서 보여주는 것처럼 225°C까지의 넓은 온도영역에서 RF C-V 곡선의 weak inversion 영역에서 측정치와 모델 결과가 잘 일치함을 보여주고 있으며, 이는 새로운 empirical 모델과 추출된 파라미터들의 정확도를 증명한다.

높은 V_{GS} 에서 C_G 의 최대값이 온도 증가에 따라 조금씩 감소되는 것을 그림 3에서 관찰할 수 있다. 이러한

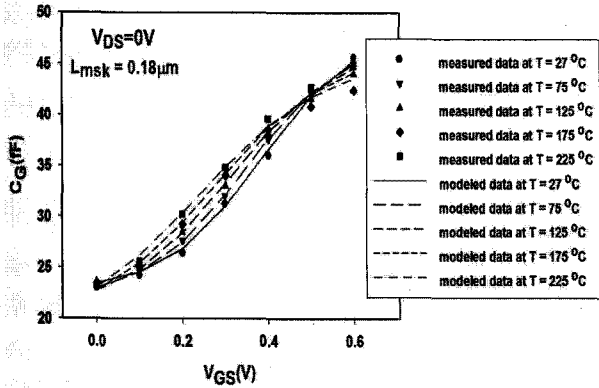


그림 8. 온도 변화에 따라 RF C-V곡선의 측정치와 모델 결과를 비교한 그래프
 Fig. 8. Comparison of modeled RF C-V curves with measured data at various temperature

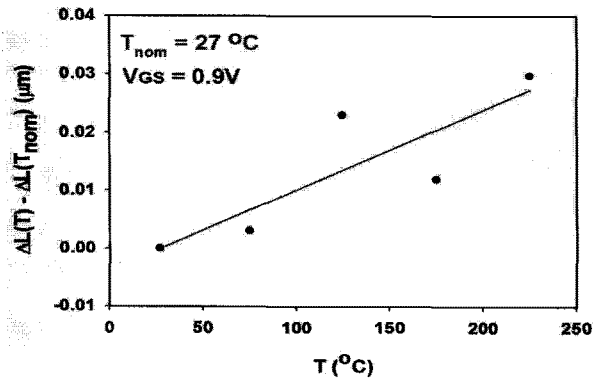


그림 9. $\Delta L(T) - \Delta L(T_{nom})$ 을 온도의 함수로 그린 그래프
 Fig. 9. $\Delta L(T) - \Delta L(T_{nom})$ as a function of temperature.

현상은 온도가 증가하면 channel length reduction ΔL 이 증가하기 때문에 발생하는 것으로 보인다^[10]. 이와 같이 온도 상승에 따른 ΔL 의 증가는 C_G 대 L_{msk} 그래프의 x절편을 사용하여 얻어진 그림 9에서 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 연구에서는 S-파라미터 측정 데이터로부터 유도된 Y-파라미터 방정식을 사용하여 상온에서 225°C까지 추출된 고온 종속 short-channel MOSFET C-V 특성을 자세히 분석하고 모델링을 수행하였다. 이러한 분석 결과 weak inversion 영역에서 온도변화에 따른 C-V 곡선의 voltage shift ΔV_{GS} 가 threshold voltage shift

ΔV_{TH} 보다 적은 현상이 관찰되었으나, 기존 long-channel weak inversion 이론 방정식으로는 설명할 수 없는 short-channel 온도 종속 현상임이 입증되었다. 이러한 온도 종속 RF C-V 모델링을 위해서 hyperbolic tangent 함수를 사용한 새로운 empirical 비선형 방정식이 구축되었으며, 온도변화에 따른 RF C-V 측정곡선과의 비교를 통해 정확도가 검증되었다. 또한 높은 V_{GS} 에서 C_G 의 최대값이 온도가 증가함에 따라 조금씩 감소되는 현상이 관찰되었으며, 이는 channel length reduction의 증가 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Schmitz, F. N. Cubaynes, R. de Kort, A. J. Scholten, and L. F. Tiemeijer, "RF capacitance-voltage characterization of MOSFETs with high leakage dielectrics," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.24, pp.37-39, 2003.
- [2] E. San Andrés, L. Pantisano, J. Ramos, S. Severi, L. Trojman, S. De Gendt, and G. Groeseneken, "RF split capacitance-voltage measurements of short-channel and leaky MOSFET devices," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.27, pp.772-774, 2006.
- [3] M. Emam, D. Vanhoenacker-Janvier and J.-P. Raskin, "High temperature DC and RF behavior of partially-depleted SOI versus deep n-well protected bulk MOSFETs," in *Proc. IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems*, pp.1-4, 2009.
- [4] J. Kim, J. Lee, Y. Yun, B. Park, J. Lee, and H. Shin, "Temperature dependence of effective channel length, source/drain resistance, and electron mobility in sub-50 nm MOSFETs," *IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop*, pp.1-2, 2008.
- [5] 고봉혁, 김주영, 최민권, 이성현, "Analysis of high-temperature dependence for RF capacitance-voltage curve," *대한전자공학회 하계학술대회*, 제 33권 1호, 479쪽-480쪽, 2010년.
- [6] J. Cha, J. Cha, and S. Lee, "Uncertainty analysis of two-step and three-step methods for deembedding on-wafer RF transistor measurements," *IEEE Trans. Electron Device*, vol. 55, p. 2195-2201, 2008.
- [7] B. Ko, D. Jung, and S. Lee, "Accurate extraction and modeling of high-temperature-dependent

channel mobility in metal-oxide-semiconductor field-effect transistors using measured s-parameters," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 49, 04DC22, 2010.

- [8] Narain Arora, "MOSFET modeling for VLSI simulation: Theory and practice," World scientific, 2007.
- [9] Y. P. Tsividis, "Operation and Modeling of the MOS Transistor," 2nd Edition, WCB/McGraw-Hill, p. 404, 1999.
- [10] A. Kamgar, "Miniaturization of Si MOSFET's at 77k," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-29, pp. 1226-1228, 1982.

저 자 소 개



고 봉 혁(학생회원)
 2009년 한국외국어대학교 전자
 정보공학부 학사 졸업.
 2009년~현재 한국외국어대학교
 전자정보공학과 석사과정.
 <주관심분야 : RF CMOS 소자
 모델링>



이 성 현(정회원)
 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>