

실리콘 LDMOSFET의 실험적 온도 효과 모델링

양영구, 우영운, 김범만
포항공대 전자 전기 공학과
0562-279-5584 / 0562-279-2903

Empirically Based Thermal Effect Modeling of Silicon LDMOSFET's

Youngoo Yang, Young Yun Woo, and Bumman Kim
Department of Electronic and Electrical Engineering and Microwave Application
Research Center, Pohang University of Science and Technology
alicc@postech.ac.kr

Abstract

We present an accurate channel current model of Si LDMOSFET's with temperature dependence for both static and transient cases. Measured pulsed I-V data in different ambient temperatures are fitted to extract thermally dependent channel current parameters. Extraction of R_{th} and C_{th} is performed. Final electro-thermal model could accurately predict the DC I-V relations as well as the pulsed transient response.

I. Introduction

고출력 전력 증폭기용 전력 소자는 일반적으로 큰 온도 의존성을 가진다[1]. 이 온도 의존성은 RF 성능에 많은 영향을 미치기 때문에 이의 정확한 모델링이 반드시 필요하다. HBT의 경우에 온도 효과 모델링은 이미 많은 연구가 되어져 왔다. 그러나, 실험적 전류 모형을 가지는 FET의 경우 R_{th} 와 C_{th} 의 추출을 포함하는 정확한 모델링 방법은 많이 연구되지 않았다.

MOS 트랜지스터의 경우에 셀프 히팅은 온도의 상승에 의하여 RF 전력의 큰 저하를 가져오고 소자의 조기 breakdown을 초래할 수 있다[1],[2]. LDMOSFET의 경우 일반적인 MOS 소자와 같이 셀프 히팅은 effective mobility의 감소와 선형적으로 문턱 전압(V_T)의 감소를 초래한다. 그리하여, 드레인 전류가 낮을 때는 온도 상승으로 인하여 문턱 전압 감소가 지배적으로 영향을 미쳐 전류의 증가를 초래하고, 드레인 전류가 높은 영역에서는 effective mobility의 감소가 지배적 영향을 미쳐 전류의 감소를 초래한다[3].

이러한 온도 특성은 특히 포락선이 변하는 변조 방식의 경우 그 포락선 변위에 따라 소자의 채널 온도가 변해서 그 비선형 특성(IMD)에 많은 영향을 미칠 수 있다[4].

본 논문에서는 실험적 전류 모형을 사용하는 FET에서 이러한 온도 효과를 정확하게 모델링하는 방법을 제시하고 그것을 5 W급 LDMOSFET을 모델링함으로써 검증하였다. 펄스를 사용한 I-V 특성을 여러 실내 온도에서 측정하였으며, 이를 바탕으로 온도에 의존하는 파라메타를 추출하였다. 그리고 이것을 DC I-V와 비교하여 R_{th} 를 추출해내고 펄스를 사용하여 과도 응답 특성을 측정하여 C_{th} 를 추출하였다. 최종적으로 완성된 모델은 각 마이스 포인트에서 다른 채널 온도를 가지는 측정된 DC I-V를 잘 예측하였다.

II. Modeling

그림 1은 온도 효과를 포함하는 실리콘 LDMOSFET의 대 신호 등가 모형이다. 등가 모형은 세 개의 비선형 커패시턴스와 비선형 채널 전류를 포함하고 있으며, 온도 효과를 나타내기 위해 저역 통과 형태의 부가적 회로를 가지게 된다. 여기서 R_{th} 는 온도에 의한 static 채널 전류의 변화를 표현하고 R_{th} 와 C_{th} 의 time constant는 채널 전류의 과도 특성을 표현하게 된다.

온도 효과를 포함하는 비선형 전류를 모델링하기 위해 다음의 채널 전류 모형을 제안한다.

$$I_{ds} = I_{gm} \cdot \tanh[\alpha(dT) \cdot v_{ds}] \cdot (1 + \lambda \cdot v_{ds}) \quad (1)$$

여기서 $\alpha(dT)$ 는 채널 전류의 포화를 표현하는 파라메타이고, λ 는 채널 길이 변조 파라메타이다. dT 는 채널 온도의 상대적인 변화를 나타낸다. 식(1)의 I_{gm} 은 다음과 같이 표현된다.

$$I_{gm} = \beta(dT) \cdot [V_{gm} + \ln(e^{V_{gm}} + e^{-V_{gm}})] \quad (2)$$

$$V_{gm} = A \cdot (1 - \frac{1}{V_{GMEXP}}) - C \quad (3)$$

$$V_{gm1} = \epsilon + \frac{1}{2} [\tanh(V_{gt}/\epsilon) + 1] \cdot |V_{gt}| \quad (4)$$

$$V_{gt} = 1 + \theta \cdot (v_{gs} - V_T) \quad (5)$$

$$V_T = V_{T0}(dT) + V_{T1} \cdot v_{ds} \quad (6)$$

여기서 $\beta(dT)$ 는 전류이득을 나타내는 파라메타이고, V_T 는 문턱 전압을 나타낸다. V_{gm} 은 inversion charge를 결정하는 surface potential의 역할을 한다. A , C , $VGMEXP$ 및 θ 는 피팅 파라메타이다. ϵ 은 1.0E-2로서 고정된 값을 가지는 상수이다.

위에서 언급한 채널 전류의 식은 $\alpha(dT)$, $\beta(dT)$, 및 $V_{T0}(dT)$ 의 세 개의 온도 의존 파라메타를 가진다.

$$dT = R_{th} \cdot I_{th} + dTa \quad (7)$$

$$I_{th} = I_{ds} \cdot v_{ds} \quad (8)$$

여기서 dTa 는 $Ta - Ta0$ 로서 현재 실내온도에서 기준이 되는 실내 온도의 차를 나타낸다. I_{th} 는 소자의 전력 소모를 나타낸다.

이 파라메타들의 온도 의존성을 추출하기 위해 23도, 43도, 62도, 83도, 104도 등 5군데의 각각 다른 실내 온도에서 펄스를 사용한 I-V를 측정하였다. 먼저 기준이 되는 실내 온도 23도에서 측정된 I-V를 온도에 의존하는 파라메타뿐만 아니라 온도에 독립적인 파라메타를 추출하기 위해 위의 채널 전류 모형으로 모델링하였다. 표 1은 위에서

표 1 온도 의존성이 없는 채널 전류 모형 파라메타들

파라메타	값
V_{T1}	-0.0177
θ	0.7035
$VGMEXP$	1.0416
λ	3.8369E-3
A	2.4267
C	0.5734

표 2 추출된 Rth와 Cth

파라메타	값
Rth	7.659
Cth	2.589E-5

추출한 온도 독립 파라메타들의 값을 나타낸다. 그리고 나서 각각 다른 온도에서 그 온도 변화에 따라 변하는 온도 의존 파라메타들을 추출하고 연속적인 실험적 함수로 피팅을 하였다. 이때 각 온도에서 모델링된 채널 전류와 측정된 I-V의 비교가 그림 2(a), (b), (c), (d), (e)에서 보여지고 있다. 이렇게 추출된 값은 23도를 기준으로 하여 상대적 온도 변화의 함수로 피팅된다 피팅된 결과는 그림 3에 나타나 있다. 하이퍼볼릭 함수를 사용하여 연속적인 값을 가지도록 하였다. 모델링된 채널 전류의 함수와 측정된 DC I-V 특성을 비교하면 Rth를 얻어 낼 수가 있다. 실내 온도 변화에 따른 채널 전류의 변화는 모델이 되어 있으므로 전력 소모와 채널 온도 변화사이에서 그 양을 결정 짓는 Rth는 DC I-V의 각 포인트마다 추출된다.

$$dT_{data,DC} = dTa + R_{th} \cdot I_{th,data,DC} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_{ds,data,DC} &= I_{ds,model}(dT_{data,DC}) \\ &= I_{ds,model}(R_{th}, I_{th,data,DC}) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 Rth에 대한 식으로 유도해 내기는 어려우므로 식 (10)을 iteration 방법이나 trial and error 같은 간단한 방법을 쓰면 측정된 DC I-V 데이터를 모델의 DC I-V와 맞춰 가면서 Rth의 해를 손쉽게 구할 수 있다. 그림 4는 추출된 Rth를 전력 소모에 대하여 나열한 것이다. 전력 소모가 낮은 곳에서는 에러가 크고 전력 소모가 커질수록 한 값으로 수렴함을 볼 수 있다. 추출된 Rth를 모델에 넣고 측정된 과도 응답 특성을 맞추어 내도록 Cth를 최적화 하였다. 추출된 Rth와 Cth의 값들은 표 2에 나타나 있다.

III. Summary

먼저 펄스를 사용하여 각각 다른 실내 온도에서 I-V 특성을 측정하고 이것을 모델링하여 온도 변화에 따른 채널 전류 파라메타의 변화를 모델한다. 그 후 이 모델을 사용하여 측정된 DC I-V와 비교하면서 Rth를 추출하고 추출된 Rth를 모델에 포함시킨다. 측정된 과도 응답 특성에 Cth를 최적화 하여 맞추면 최종 모델을 얻을 수 있다.

모델링에는 5 W 급 LDMOSFET으로 모토볼라의 MRF9382T1을 사용하였다. 앞장에서 추출된 파라메타와 Rth, Cth를 모두 포함한 electro-thermal 모델을 완성하였으며 측정된 과도 응답 특성과 모델의 과도 응답 특성이 그림 5와 같이 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 6은 DC I-V의 측정 결과와 모델의 DC 특성을 비교 한 것으로 잘 일치함을 알 수 있다.

IV. Conclusions

고출력 증폭기의 온도에 따른 확산 현상과 비선형 특성의 변화에 대한 정확한 시뮬레이션을 위한 실험적 채널 전류 모형을 제안하였다. 또한 온도에 의존하는 파라메타와 온도 파라메타인

R_{th} 와 C_{th} 를 추출하는 매우 간단하고 효율적인 방법을 제시하였다.

최종적인 모델은 측정된 과도 응답 특성과 잘 일치 할 뿐만 아니라 DC I-V 특성 또한 정확히 예측 해 내는 것을 확인하였다. 따라서 이 모델링 방법은 전력 증폭기의 특성을 정확히 시뮬레이션 할 수 있도록 하는 모형을 만드는데 매우 유용한 것이다.

참고문헌

[1] P. Perugupalli, M. Trevedi, K. Shenai, and S. K. Leon, "Modeling and Characterization of an 80 V Silicon LDMOSFET for Emerging RFIC Applications," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 45, No. 7, pp. 1468-1478, 1998.

[2] R. Versari, and A. Pieracci, "Experimental Study of Hot-Carrier Effects in LDMOS Transistors," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 46, No. 6, pp. 1228-1233, 1999.

[3] Y. P. Tzvidis, "Operation and Modeling of the MOS Transistor," McGraw Hill, 1987.

[4] K. Lu, P. M. McIntosh, C. M. Snowden, and R. Pollard, "Low-Frequency Dispersion and Its Influence on the Intermodulation Performance of AlGaAs/GaAs HBTs," IEEE MTT-S Microwave Sympo. Dig., pp. 1373-1376, 1996.

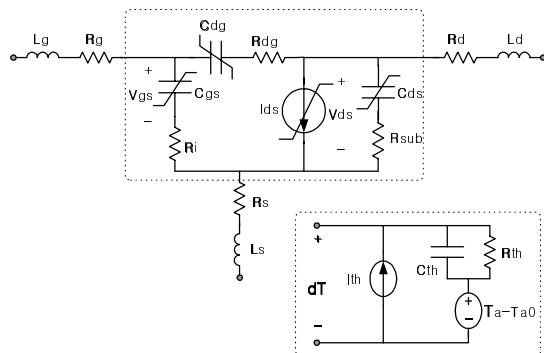
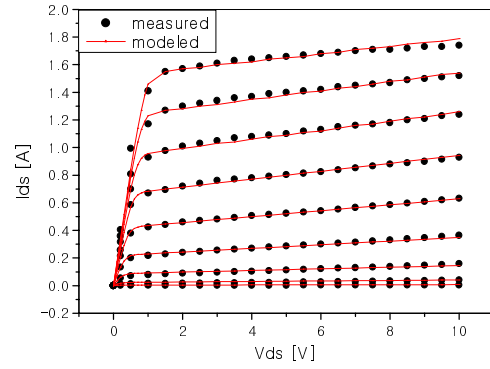
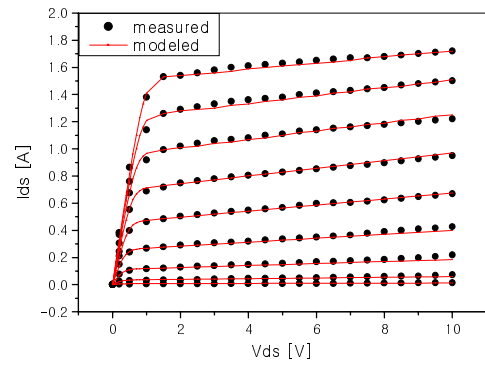


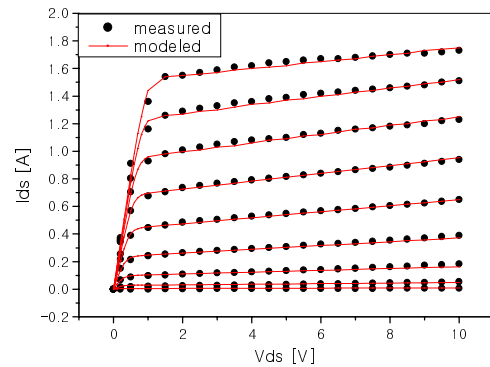
그림 1 저역 통과 구조의 thermal 회로를 포함한 실리콘 LDMOSFET의 대 신호 등가 모형



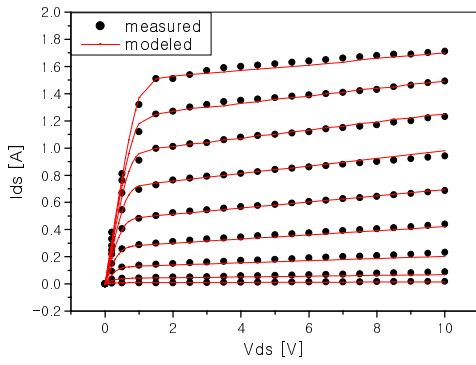
(a)



(b)



(c)



(d)

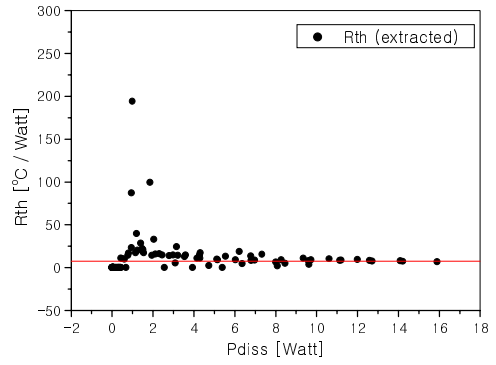
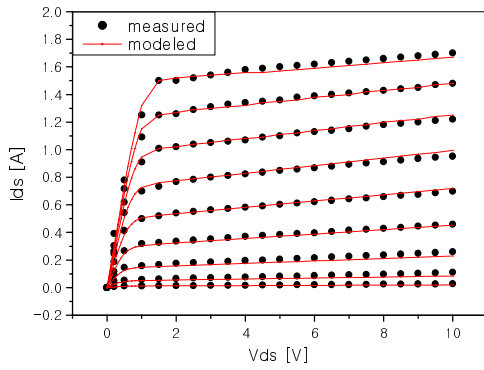


그림 4 자체 전력 소모의 파라메타로서 추출된 Rth값들



(c)

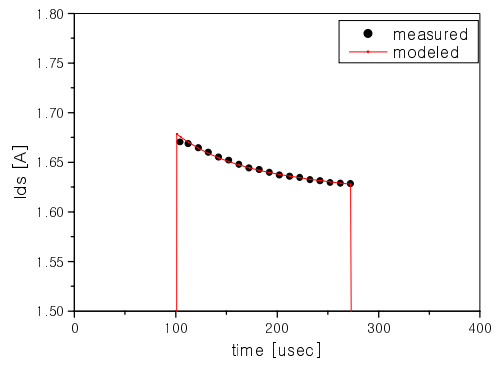


그림 2 각각 다른 온도에서 측정된 pulsed I-V 와 모델된 I-V 특성: (a)23도 (b)43도 (c)62도 (d)83도 (e)104도

그림 5 Cth를 추출하기 위한 측정값과 모델된 과도 응답 특성

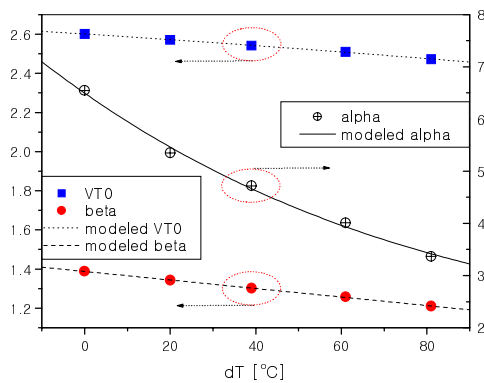


그림 3 상대적 온도 변화의 파라메타로서 추출된 온도 의존 파라메타와 모델된 파라메타의 비교

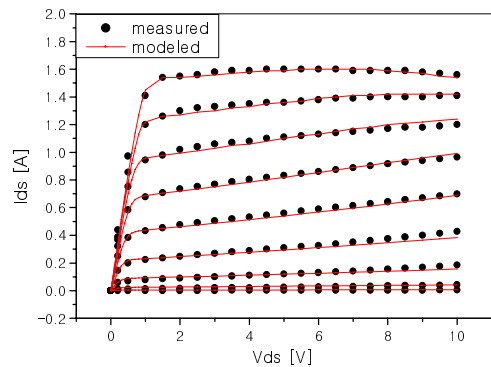


그림 6 최종 모델의 DC I-V와 측정된 DC I-V 특성