
MOSFET의 특성변화에 따른 RF 전력증폭기의 신뢰성 특성 분석

최진호*

Reliability Characteristics of RF Power Amplifier with MOSFET Degradation

Jin Ho Choi*

요약

MOSFET 트랜지스터의 전기적인 특성 변화에 따른 Class-E RF 전력 증폭기의 신뢰성 특성을 분석하였다. Class-E 전력증폭기에서 MOSFET는 높은 효율을 얻기 위해 스위치로 동작하며, 이로 인해 MOSFET가 off 되었을 때 드레인 단자에 높은 전압 신호가 발생한다. 회로가 동작함에 따라 높은 전압의 스트레스로 인하여 MOSFET의 문턱전압은 증가하고 전자의 이동도는 감소하여 MOSFET의 드레인 전류는 감소하게 된다. Class-E 전력 증폭기에서 MOSFET의 전류가 감소하면 전력 효율 및 출력 전력은 감소하게 된다. 그러나 class-E 전력증폭기에서 작은 부하 인덕터를 사용할 경우 큰 인덕터를 사용하는 경우에 비해 신뢰성 특성을 향상시킬 수 있다. 1mH의 부하 인덕터를 사용한 경우 10^7 초 후에 드레인 전류는 46.3%가 감소하였으며, 전력 효율은 58%에서 36%로 감소하였다. 그러나 1nH의 부하 인덕터를 사용한 경우 드레인 전류는 8.89%, 전력 효율 59%에서 55%로 감소하여 우수한 신뢰성 특성을 보여주었다.

ABSTRACT

The reliability characteristics of class-E RF power amplifier are studied, based on the degradation of MOSFET electrical characteristics. The class-E power amplifier operates as a switch mode operation to achieve high efficiency. This operation leads to high voltage stress when MOSFET switch is turned-off. The increase in threshold voltage and decrease in mobility caused by high voltage stress leads to a drop in the drain current. In the class-E power amplifier the effects caused by the degradation of MOSFET drain current is a drop of the power efficiency and output power. But the small inductor in the class-E load network allows the reliability to be improved. After 10^7 sec. the drain current decreases 46.3% and the PAE(Power Added Efficiency) decreases from 58% to 36% when the load inductor is 1mH. But when the load inductor is 1nH the drain current decreases 8.89% and the PAE decreases from 59% to 55%.

키워드

Class-E, RF power amplifier, Reliability, Voltage stress

I. 서론

RF(Radio Frequency) 부품은 저전력화, 경량화 그리고

저비용 등의 방향으로 연구가 진행되고 있다. RF 부품 개발의 재료로 많이 사용되는 GaAs는 높은 동작 속도 및 저잡음 특성 등으로 RF 부품을 구성하기에 적합한 장점

을 가지고 있으나, CMOS에 비하여 단가가 높은 단점이 있다. 그러나 최근 CMOS 공정 기술의 발달과 더불어 CMOS를 이용한 RF 전력 증폭기, LNA(Low Noise Amplifier), Mixer, 전압제어발진기 등과 같은 RF 부품에 관한 연구가 많이 진행되고 있다[1-4].

RF 전력 증폭기에서 class-E 증폭기는 비선형 증폭기로서 다른 타입의 증폭기에 비해 높은 효율을 얻을 수 있을 뿐 아니라 큰 출력 전력을 공급하는 장점이 있다. Class-E 전력 증폭기에 사용되는 MOSFET는 입력신호에 따라 on과 off 동작을 하는 스위치로 동작한다. MOSFET의 스위칭 동작에 따라 드레인 단자에는 공급 전압의 약 3.57배 크기의 큰 전압 신호가 발생한다[5]. 높은 드레인 전압으로 인하여 MOSFET에는 전기적인 스트레스가 인가되고, 이로 인하여 문턱전압이 증가하고 이동도가 감소하여 MOSFET의 구동능력은 감소하게 된다. MOSFET의 구동능력 감소는 class-E 전력 증폭기의 신뢰성 특성에 직접적인 영향을 미치게 된다. 그러나 class-E 전력 증폭기에서 load 구성에 따라 드레인 단자의 전압을 감소시킬 수 있으며, 신뢰성 특성 또한 충분히 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 class-E 전력 증폭기의 MOSFET에 인가되는 스트레스 특성을 load 구성에 따라 살펴본다. 스트레스에 따른 MOSFET의 특성 변화로부터 class-E 전력 증폭기의 특성변화를 분석하고, MOSFET의 특성 변화와 전력 효율 및 출력 전력의 관계를 살펴보고자 한다.

II. 본 론

RF 전력 증폭기에서 일반적인 class-E 증폭기의 구성은 그림 1과 같다. Class-E 증폭기는 부하 인덕터 L_D , 스위치로 동작하는 MOSFET M1, MOSFET과 병렬로 연결된 커패시터 C_p , 공진회로 Lo-Co 그리고 부하저항 R_L 로 구성된다. 공진회로의 공진주파수는 입력주파수이며, V_{DD} 는 공급전압이다. 그림 1에서 MOSFET가 off 되면, I_c 전류에 의해 커패시터 C_p 는 충전된다. 그리고 M1이 off 되었을 때 I_{out} 은 Lo와 Co로 구성된 공진 회로를 거쳐 출력으로 전달된다. MOSFET M1의 드레인 단자의 전압은 MOSFET가 on 되었을 때는 거의 0V이며, off 되었을 때는 약 $3.57V_{DD}$ 가 된다[5].

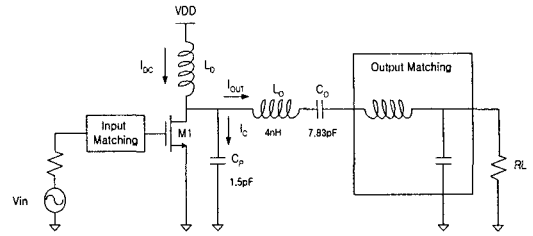


그림 1. Class-E 전력 증폭기 회로도
Fig. 1. Schematic of class-E power amplifier

설계되어진 class-E 전력 증폭기의 MOSFET M1의 채널 길이는 $0.25\mu\text{m}$ 이며, 채널 폭은 $2.5\mu\text{m}$ 인 MOSFET 400 개를 병렬로 연결하였다. 공급 전압 및 입력 전압의 크기는 1.8V이며, 입력 주파수는 900MHz이다. 그리고 L_D 는 1mH이며, 공진회로 Lo과 Co의 값은 각각 4nH와 7.93pF이다.

그림 2는 그림 1의 class-E 전력 증폭기를 시뮬레이션한 결과이다. 입력전압이 0V일 때 MOSFET는 off 되며, 이때 드레인 단자의 전압은 $3.57V_{DD}$ 인 약 6.4V임을 알 수 있다. 드레인 단자의 높은 전압은 회로의 동작에 따라 MOSFET의 전기적인 특성을 저하시키고, 이로 인하여 회로의 수명은 감소된다.

그림 3은 RF 회로에서 사용되는 MOSFET 트랜지스터의 스트레스에 따른 모델회로이다[4]. 그림 3에서 R_{SS} 와 R_{GD} 는 DC 파라미터이며, C_{DB} 와 R_{DB} 는 AC 파라미터이다. 저항 R_{SS} 는 스트레스에 따른 이동도 감소로 인한 드레인 전류의 감소를 나타내며, R_{GD} 는 게이트와 드레인 사이의 누설전류를 나타낸다. 그리고 AC 파라미터 C_{DB} 와 R_{DB} 는 스트레스 시간에 따른 출력 저항의 감소를 나타낸다. 스트레스에 따른 R_{SS} , R_{GD} , R_{DB} , C_{DB} 크기의 변화는 회로의 동작시간, 기판 전류 그리고 게이트전압의 함수로 표현되어진다.

MOSFET에서 드레인 전압이 증가하면 드레인 전류가 증가하고, 드레인 전류와 기판 전류는 비례하므로 기판 전류도 증가한다[6]. 그러므로 class-E 전력 증폭기에서 MOSFET가 off 되었을 때 높은 드레인 전압으로 인하여 큰 기판 전류가 발생하고 이로 인하여 동작시간에 따른 MOSFET의 전기적인 특성은 변화하게 된다.

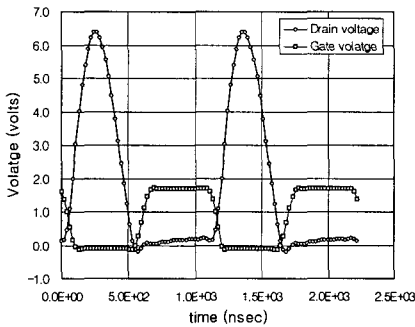


그림 2. LD가 1mH일 때 전력증폭기의 게이트와 드레인 단자 전압
Fig. 2. Gate and drain voltages in power amplifier when LD is 1mH

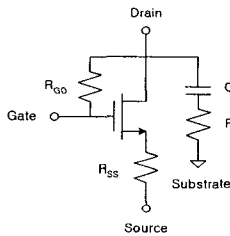


그림 3. MOSFET의 스트레스 모델 회로
Fig. 3. MOSFET degradation model circuit

그림 4는 MOSFET M1의 동작시간에 따른 드레인 포화전류($I_{DS,SAT}$), transconductance(g_m) 그리고 문턱전압(V_T)의 변화를 시뮬레이션한 결과이다. 드레인 포화 전류는 드레인과 게이트의 전압이 1.8V일 때의 전류 값이다. Transconductance g_m 은 드레인 전압이 0.1V일 때 게이트 전압의 변화에 따른 드레인 전류의 변화이다. 그림 4에서 $\Delta I_{DS,SAT}/I_{DS,SAT0}$, $\Delta g_m/g_{m0}$, $\Delta V_T/V_{T0}$ 은 식 (1), 식 (2), 식(3)을 이용하여 계산하였다[7].

$$\Delta I_{DS,SAT}/I_{DS,SAT0} = [I_{DS,SAT0} - I_{DS,SAT}(t)]/I_{DS,SAT0} \quad (1)$$

$$\Delta g_m/g_{m0} = [g_{m0} - g_m(t)]/g_{m0} \quad (2)$$

$$\Delta V_T/V_{T0} = [V_{T0} - V_T(t)]/V_{T0} \quad (3)$$

여기서 $I_{DS,SAT0}$, g_{m0} , V_{T0} 는 초기 상태의 값이며, $I_{DS,SAT}(t)$, $g_m(t)$, $V_T(t)$ 는 동작시간에 따른 값이다.

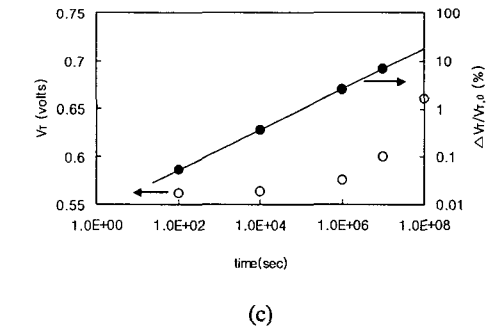
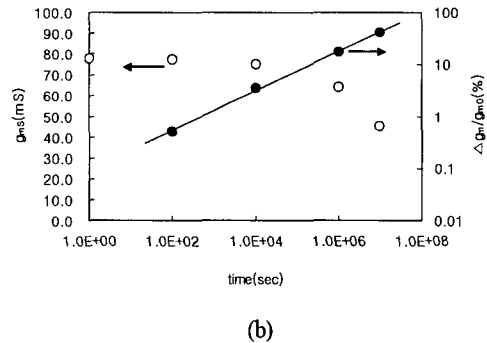
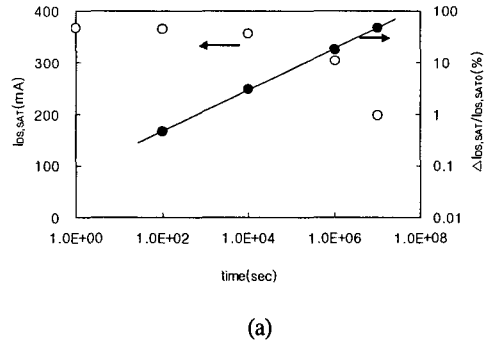


그림 4. 스트레스 인가 시간에 따른 $I_{DS,SAT}$, g_m , V_T 의 변화 (a) $I_{DS,SAT}$ (b) g_m (c) V_T
Fig. 4. Variation of the $I_{DS,SAT}$, g_m , V_T with stress time (a) $I_{DS,SAT}$ (b) g_m (c) V_T

그림 4(a)로부터 동작시간이 증가함에 따라 드레인 전류는 급격히 감소함을 알 수 있다. 그리고 동작시간이 10^7 초 일 때 드레인 전류는 초기 드레인 전류의 약 46%로 감소함을 알 수 있다. 그림 4(b)는 동작시간에 따른 g_m 의 변화를 나타낸 것이며, 그림 4(c)는 동작시간에 따른 문턱전압의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4(b)와 (c)로부터 동작시간이 증가함에 따라 이동도는 감소하고, 문

턱전압은 증가함을 알 수 있다. 그러므로 class-E 전력증폭기의 MOSFET 트랜지스터는 동작시간이 증가함에 따라 높은 드레인 단자의 전압으로 인하여 이동도가 감소하고 문턱전압은 증가하여 포화 전류는 감소하게 된다.

Class-E 증폭기에서 부하 인덕터 L_D 의 값을 감소시키면 드레인 단자의 전압을 $3.57V_{DD}$ 이하로 낮출 수 있다. 그리고 L_D 의 값이 작을 경우 L_D 의 값이 큰 경우에 비해 높은 출력 효율 및 큰 출력 전력을 얻을 수 있는 장점이 있다[5]. 그림 5는 그림 1의 회로에서 L_D 의 값을 1nH로 감소시켜 시뮬레이션한 결과이다.

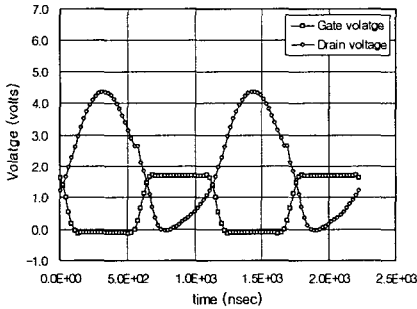
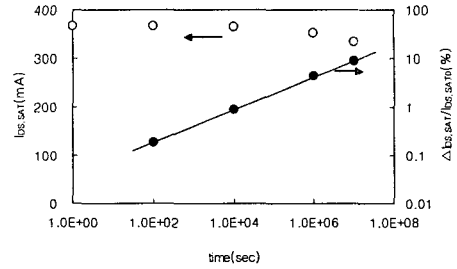


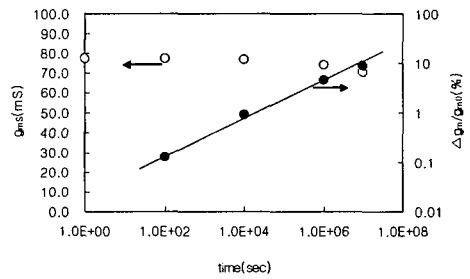
그림 5. LD가 1nH일 때 전력증폭기의 게이트와 드레인 단자의 전압

Fig. 5. Gate and drain voltage in power amplifier when LD is 1nH

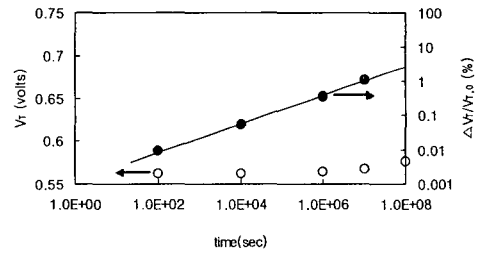
L_D 값의 감소에 따라 그림 1의 회로에서 C_P 및 입·출력 매칭을 위한 L과 C 값은 조절되었다. 시뮬레이션 결과 MOSFET가 off 되었을 때 드레인 단자의 전압은 약 $2.5V_{DD}$ 인 4.4V임을 알 수 있다. 그리고 MOSFET의 기관 전류는 드레인 전압의 감소에 따라 L_D 가 1mH인 경우의 기관 전류에 비해 약 1/3로 감소하였다. 그림 6은 부하 인덕터의 값이 1nH일 때 동작시간에 따른 MOSFET의 전기적인 특성의 변화이다. MOSFET의 동작시간이 10^7 초일 때 포화전류는 초기값에 비해 약 8.9% 정도 감소하였다. 이는 그림 6(b)와 (c)로부터 알 수 있듯이 부하 인덕터의 값이 1nH일 때 이동도의 감소량과 문턱전압의 증가량은 인덕터가 1mH일 때에 비해 현저히 줄어들었기 때문이다.



(a)



(b)



(c)

그림 6. 스트레스 인가 시간에 따른 $I_{DS,SAT}$, g_m , V_T 의 변화 (a) $I_{DS,SAT}$ (b) g_m (c) V_T

Fig. 6. Variation of the $I_{DS,SAT}$, g_m , V_T with stress time (a) $I_{DS,SAT}$ (b) g_m (c) V_T

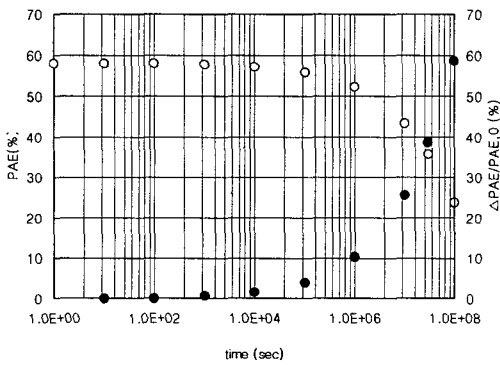
표 1은 회로의 동작시간이 10^7 초일 때 $I_{DS,SAT}$, g_m , V_T 의 변화율로서 부하 인덕터가 작을 경우 전기적인 파라미터의 변화량이 현저히 작음을 알 수 있다.

표 1. 부하 인덕터에 따른 전기적인 파라미터의 변화율

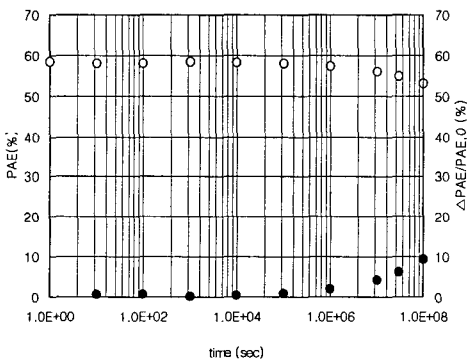
Table 1. Variation rate of electrical parameter with load inductor

L_D	I_{DSAT}	g_m	V_T
1mH	46.3%	41.6%	17.4%
1nH	8.89%	8.89%	2.49%

그림 7과 그림 8은 L_D 가 1mH와 1nH일 때 class-E 증폭기의 동작 시간에 따른 전력 효율 및 출력 전력의 변화이다.



(a)



(b)

그림 7. 동작 시간에 따른 전력 효율의 변화

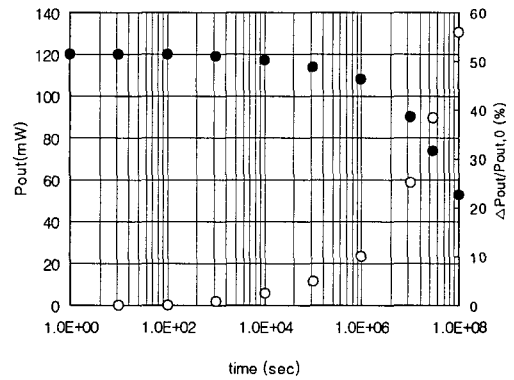
(a) $L_D=1mH$ (b) $L_D=1nH$

Fig. 7. Variation of PAE with operating time

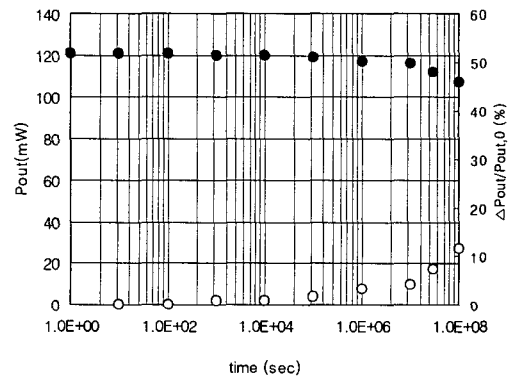
(a) $L_D=1mH$ (b) $L_D=1nH$

그림 7을 보면 L_D 가 1mH일 때 1년이 지난 후에 PAE 특성은 58.0%에서 35.7%로 감소하였으며, 출력 전력은

120mW에서 74mW로 감소하였다. 그러나 L_D 가 1nH인 경우 PAE 특성은 58.5%에서 약 54.8%로 변화하였으며, 출력 전력은 121mW에서 112mW로 감소하여 L_D 값이 작을 경우 신뢰성 측면에서 매우 우수한 특성을 보여주었다. 그러므로 class-E 전력 증폭기에서 인덕터 L_D 의 값을 감소시켜 회로를 구성할 경우 충분한 신뢰성 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 8. 동작 시간에 따른 출력 전력의 변화

(a) $L_D=1mH$ (b) $L_D=1nH$

Fig. 8 Variation of the output power with operating time

(a) $L_D=1mH$ (b) $L_D=1nH$

그림 9는 L_D 가 1mH와 1nH일 때 시간에 따른 $\Delta I_{DS,SAT}/I_{DS,SAT,0}$ 와 $\Delta PAE/PAE,0$ 의 변화를 나타낸 것이다. 그림 9에서 L_D 가 1mH일 때 1nH에 비해 시간에 따른 변화량이 큼을 알 수 있다. 이는 L_D 값이 큰 경우 스트

레스에 따른 MOSFET의 특성 변화가 증가하고 이로 인하여 전력효율의 특성이 나빠지기 때문이다.

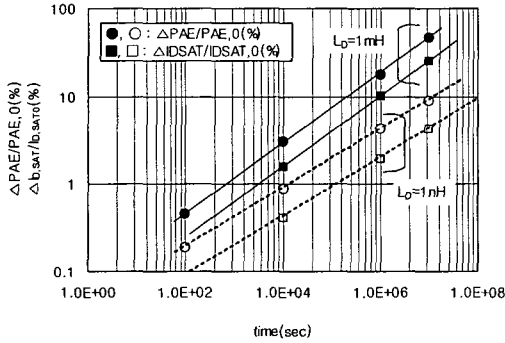


그림 9. 시간에 따른 $\Delta PAE/PAE,0$ 와 $\Delta I_{DS,SAT}/I_{DS,SAT,0}$ 의 변화
 Fig. 9. Variation of $\Delta PAE/PAE,0$ and $\Delta I_{DS,SAT}/I_{DS,SAT,0}$ with time

III. 결론

본 논문에서는 class-E 전력 증폭기의 부하 인덕터 값에 따른 신뢰성 특성을 살펴보았다. 전력 증폭기는 0.25 μm 표준 CMOS 공정을 이용하여 설계하였으며, 공급 전압은 1.8V를 사용하였다. Class-E 전력 증폭기에서 MOSFET의 드레인과 공급 전압 사이에 연결되는 부하 인덕터의 값을 감소시킬 경우 MOSFET 스위칭에 따른 드레인 단자의 전압을 3.57V_{DD}에서 2.5V_{DD}로 감소시킬 수 있다. MOSFET가 off 되었을 때 작은 드레인 전압은 회로의 동작시간에 따른 이동도 및 문턱전압과 같은 전기적인 특성 변화를 줄일 수 있다. 그러므로 부하 인덕터의 값을 감소시켜 class-E 전력 증폭기를 구성할 경우 MOSFET의 전기적인 특성변화가 감소하며, 전력 효율 및 출력 전력 측면에서 향상된 신뢰성 특성을 얻을 수 있다.

참고문헌

- [1] R. Castello, F. Sevelto, and S. Deantoni, "A 1.3 GHz low phase noise fully tuneable CMOS LC VCO," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 35, no. 3, pp. 356-361, Mar. 2000.
- [2] P. J. Sullivan, B. A. Xavier, and W. H. Ku, "Low voltage performance of a microwave CMOS Gilbert cell mixer," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 32, pp. 1151-1155, 1997.
- [3] R. A. Rafla and M. N. EL-Gamal, "Design of a 1.5V CMOS integrated 3GHz LNA," in proc. ISCAS, pp. 440-443, 1999.
- [4] W. C. Lin, T. C. Wu, Y. H. Tsai, L. J. Du, and Y. C. King, "Reliability evaluation of class-E and class-A power amplifiers with nanoscaled CMOS technology," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 52, no. 7, July 2005.
- [5] C. Yoo, and Q. Huang, "A common-gate switched 0.9W class-E power amplifier with 41% PAE in 0.25um CMOS," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 36, no. 5, pp. 823-830, May 2001.
- [6] J. E. Chung, M. C. Jeng, J. E. Moon, P. K. Ko and C. Hu, "Low-voltage hot-electron currents and degradation in deep submicrometer MOSFET's," IEEE. Trans. on Electron Devices, vol. 37, no. 7, pp. 1651-1657, July 1990.

저자소개



최 진 호 (Jin Ho Choi)

1985 부산대학교 전자공학과 공학사
 1987 KAIST 전기 및 전자공학과 공학석사
 1992 KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사
 1996~ 부산외국어대학교 근무

※ 관심분야 : VLSI 설계