

고주파통신회로 설계를 위한 CMOS RF 모델 파라미터[†]

(The CMOS RF model parameter for high frequency
communication circuit design)

여 지 환*
(Ji-Hwan Ryeo)

요 약 CMOS 트랜지스터의 등가회로모델 파라미터 C_{gs} 의 예측방법이 CMOS 트랜지스터의 반전층내의 유동전하량 계산과 전하유도 특성에 의해 제안되었다. 이 C_{gs} 파라미터는 MOS 트랜지스터의 RF대역의 차단주파수를 결정하고 또한 입력과 출력을 커플링 시키는 중요한 파라미터이다. 이 제안된 방법은 등가회로 모델에서 파라미터 값을 예측하고 파라미터 값을 추출하는 소프트웨어 개발에 기여할 것이다

Abstract The prediction method of the parameter C_{gs} of CMOS transistor is proposed by calculating the mobil charge in inversion layer of CMOS transistor. This parameter C_{gs} decided on the cutoff frequency in MOS transistor in RF range and coupled input and output. This parameter C_{gs} in RF range is very important parameter in small signal circuit model. This proposed method is contributed to developing software of extracting parameter value in equivalent circuit model. The method provide the important information to construct a RF nonlinear model for multifinger gate MOSFET. This method will be very valuable to develop a large signal MOSFET model for nonlinear RF IC design.

1. 서 론

최근에 MOS 트랜지스터의 차단주파수 및 최소잡음지수 등 고주파 특성의 향상으로 CMOS소자 기술이 RF용 집적회로에 적합한 성능을 보인다.[1]

즉 CMOS를 이동통신 및 무선통신 시스템과 같은 RF 응용인 LNA(저잡음 증폭기), IMT-2000, 근접무선통신 시스템인 블루투스 (Bluetooth)등의 집적회로에 연구가 활발히 진행되고 있고 RF통신시스템은 더욱더 광대역과 고주파 영역으로 접근이동하고 있으며, RF IC제조에서 저렴한 실리콘 MOSFET가 RF 및 마이크로웨이브 IC응용에서 코아소자로 되고 있다.[1-4]

통신용 IC의 디지털부분 거의 대부분이 CMOS로 구현되고 있다.

아날로그 RF IC소자기술로서 CMOS는 MESFET나 HEMT, HBT에 비해 가격이 저렴하고 잘 발달된 공정기술과 집적도면에서 아주 우수하다.

CMOS기술이 RF대역에 적용되기 시작하면서 높은 동작 주파수에서의 MOSFET특성을 정확하게 예측할 수 있는 모델에 대한 요구가 필수적이다.[5]

또한 RF회로를 설계하고 최적화를 위해서는 MOSFET 모델의 정확성과 모델 파라미터 추출의 효율성이 가장 중요하다.

2. 고주파(RF) MOS트랜지스터의 소신호 등가회로 모델

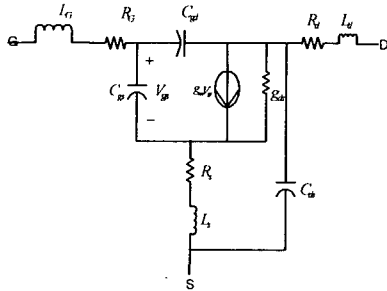
정확한 비선형 RF MOSFET모델을 개발하기 위해 고주파 영역에서 측정된 바이어스 의존의 진성 모델 파라미터를 구하는 것이 매우 중요하다. [4]

<그림1>은 물리적으로 타당성이 증명된 외부 소스에

* 대구대 정보통신공학부 교수

† 본 논문은 2000년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임

C_{ds} 가 직접 연결된 RF MOSFET 등가회로 모델을 나타낸 것이다.



<그림> RF MOS 트랜지스터의 소신호 등가회로 모델
<Fig1> Small Signal equivalent circuit model of RF MOSFET

CMOS 소자의 RF특성은 게이트 저항 (R_g), 소스 저항 (R_s), 게이트-소스용량 (C_{gs}) 게이트-드레인용량 (C_{gd}), 드레인-벌크용량 (C_{db})들의 파라미터값에 많은 영향을 받는데 CMOS 소자의 RF특성을 예측하기 위해 이 파라미터값을 예측할 수 있는 방법을 구현하고 측정된 값과 비교 검토를 본 논문에서 했다. 게이트 저항은 최대공진주파수와 잡음특성에 매우 중요한 파라미터이므로 최소화 하기위해 다중핑거 구조를 이용했다.[1-4] RF특성에서 차단주파수는 아래식으로 표현된다.[1][2]

$$\frac{g_m}{2(C_{gs} + C_{gd})} \text{ ----- (1)}$$

RF 직접회로용 트랜지스터의 고주파 특성을 나타내는 데는 차단주파수, 최대공진주파수 및 잡음파라미터등이 중요한 변수이다.

RF특성에서 g_m 과 C_{gs} 는 중요한 소신호 등가회로의 파라미터로써 본 논문에서는[4]에서 측정된 파라미터값을 본 연구에서 제안된 방법으로 구한 C_{gs} 값과 비교 검토 했다.

또한 트랜스컨덕턴스 (g_m)과 게이트-소스 (C_{gs}), 및 게이트-드레인 (C_{gd}), 커패시턴스는 트랜지스터 채널폭 (W)에 비례한다.[1] g_m 은 채널길이 (L)에 반비례하며 커패시턴스 C_{gs} , C_{gd} 는 비례한다.

이런 위의 관계를 이용해서 파라미터 추출방법을 제안 하여 궁극적으로 파라미터 추출 프로그램 개발에 있다. 또

한 (1)식에서도 알 수 있듯이 RF모델에서 차단주파수는 g_m 과 C_{gs} 가 결정한다는 것을 볼 수 있다.

본 논문은 C_{gs} 를 구하는 방법을 제시하고 그 값을 측정값[4]과 비교 검토하였다. C_{gs} 파라미터는 RF영역에서 매우 중요한 파라미터로 트랜지스터의 차단주파수를 결정하고 또한 RF신호의 입력과 출력을 coupling 시키는 역할을 함으로써 이 파라미터값을 예측할 수 있는 방법을 제안하고 실제 파라미터 측정값과 비교 검토하였다. 본 연구는 C_{gs} 의 예측방법을 채널에 유도되는 유도전하의 게이트 전압 변화와 또한 유도전하의 유도되는 특성을 이용했다. 물론 단채널 효과로써 채널길이 변화는 고려되지 않았다. C_{gs} 가 매우 작은 값이라도 주파수가 매우큰 RF영역에서는 임피던스가 작아져서 입력과 출력이 coupling 되는 문제가 발생하여 매우 큰 영향을 주게된다. 따라서 C_{gs} 의 예측 모델이 필요하다.

3. RF등가회로 모델파라미터 C_{gs} 의 예측 및 측정값 비교

CMOS트랜지스터의 RF 모델에서 파라미터값 C_{gs} 는 매우 중요한 값이다. 차단주파수를 결정하고 입력 출력을 coupling 시키는 역할 등이다.

본 논문에서는 C_{gs} 를 게이트 아래 반도체표면에 유도되는 반전층내의 이동전하 (Q_i)의 게이트 전압에 대한 변화 및 그 유도되는 특성을 고려하여 모델을 제안했다.

$$C_{gs} = \frac{dQ_i}{dV_{GS}} \text{ ----- (2)}$$

Q_i : 게이트 아래 반전층내의 이동전하의 총량 (기판 bias고려)

V_{GS} : 게이트 전압

NMOSFET에서 단위면적당 움직이는 전하 $Q_e(y)$ 는 간략화한 아래식(3)에 의해 표현된다.

$$Q_e(y) = C_{ox}[(V_{GS} - V_T) - V(y)] \text{ --- (3)}$$

C_{ox} : 단위면적당 산화막용량
 V_{GS} : 게이트-소스 전압
 V_T : 문턱전압
 $V(y)$: 채널길이에 따른 전위

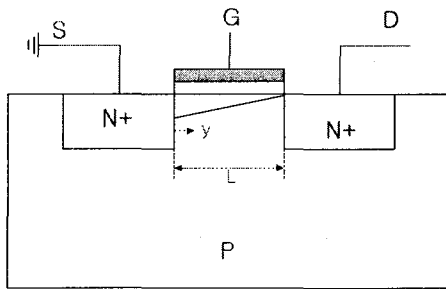
채널길이에 따른 전위를 고려한 전류식은 (4)와 같다.

$$I_{DS} = -\frac{W\mu_e C_{ox}}{y} [(V_{GS} - V_T) \times V(y) - \frac{V^2(y)}{2}] \quad (4)$$

위 (4)에서 $V(y)$ 를 구해 (3)식에 대입하여 $Q_e(y)$ 를 구하고 그 값에 면적을 곱하여 총 유동전하를 구해서 V_{gs} 로 미분하여 C_{gs} 를 구할 수 있다.

다음 과제로 채널길이의 변화효과 및 드레인전압 의존, 벌크 바이어스의존 등을 고려하여 정확한 예측모델을 구해야 한다.

아래 <그림2>는 C_{gs} 를 예측하기 위한 NMOS트랜지스터의 동작 그림이다.

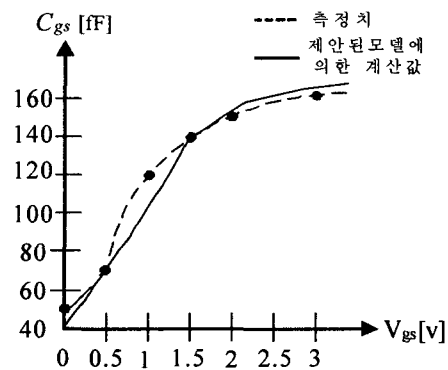


<그림 2> nMOS 트랜지스터의 반전층
<Fig 2> Inversion layer of nMOS Transistor

C_{gs} 는 반전층에 유기되는 이동전하를 게이트 전압으로 미분하여 구한다. 여기서 유기되는 이동전하를 구하기 위해 게이트 길이의 축소는 고려되지 않았다. 더욱 정확한 모델을 구하기 위해 게이트길이 축소 및 여러효과를 고려하여야 한다.

<그림3>은 [4]에서 측정된 $V_{gs} - C_{gs}$ 관계를 보여주

고 있다. 여기서 X축은 V_{gs} 게이트 전압이며 Y축은 C_{gs} 값이다. 이 MOSFET는 $W=10\mu m \times 10\mu m$, $L=0.8\mu m$, $V_{ds}=3V$ 인 경우에 대한 C_{gs} 값을 측정한 그림이다. 이 그림에서 보면 V_{gs} 증가에 따라서 C_{gs} 도 증가하다가 높은 V_{gs} 에서 일정해진다. C_{gs} 의 이와 같은 특성은 짧은 채널 소자에서 천이영역의 변화에 기인한다.

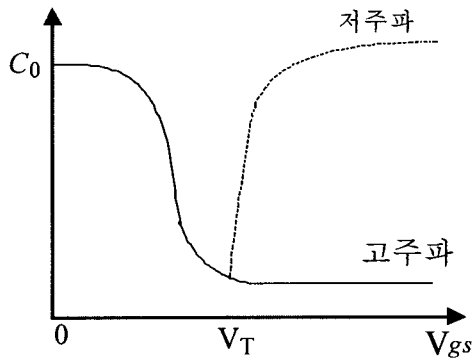


<그림 3> $V_{gs} - C_{gs}$ 관계

<Fig 3> $V_{gs} - C_{gs}$ graph

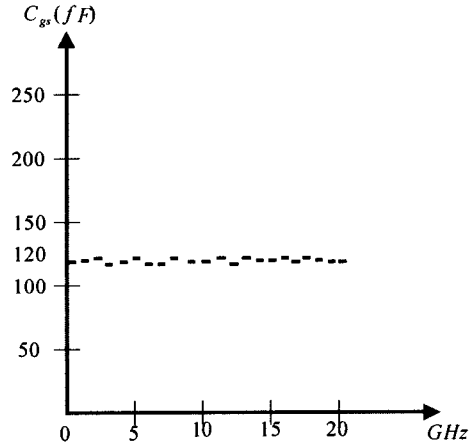
<그림3>에서 보면 고주파 영역(RF)에서 C_{gs} 는 V_{gs} 의 증가에 대해 점진적으로 증가하다가 큰 V_{gs} 에서 포화된다. C_{gs} 의 이런 특성은 단 채널 소자에서 점진적 천이 영역에 의한다. 이는 반전층 전하의 거동에 의함을 알 수 있다. 따라서 C_{gs} 는 반전층 전하로 모델링 할 수 있다. 이는 아래 그림4의 MOS커패시터의 전형적인 주파수 및 전압 특성을 나타낸 그림이다. 그림5는 고주파영역에서의 C_{gs} 를 나타낸 것이다. 이는 RF영역에서는 주파수와 무관하게 C_{gs} 는 포화된 것을 보여준다. 그림3과 그림5를 보면 RF영역에서의 C_{gs} 는 V_{gs} 가 증가하면 용량도 증가하다가 큰 값의 V_{gs} 에서는 포화됨을 볼 수 있다. 이는 반전층 전하와 연관시켜보면 RF영역에서의 C_{gs} 를 모델링 할 수 있다. <그림3>에서 높은 V_{gs} 에서 C_{gs} 가 일정함을 보여주는데 이는 반전층 전하가 초기에는 지수 함수적으로 증가하다가 문턱전압 보다 큰 V_{gs} 에서는 V_{gs} 에 대해 선형적으로 증가하는 것으로 생각된다. 이는 전형적인 <그림 4>의 MOS커패시터의 RF영역에서의 V_{gs} 와 C_f 관계를

보면 유추할 수 있다. 산화막 용량 C_o 와 공핍층용량 C_d 와 직렬 연결된 총 용량은 V_{gs} 가 증가 함으로 C_d 가 감소함으로써 전체용량 C_t 는 감소한다. 이는 반전층 전하가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 또한 더욱 큰 V_{gs} 에서 강한 반전시 공핍층 폭이 일정하여 C_d 는 일정해진다. 따라서 반전층 전하는 V_{gs} 에 선형적으로 증가한다. 이로써 공핍층 용량은 V_{gs} 가 작은 영역에서 증가에 따라 지수 함수적으로 감소하다가 V_{gs} 가 큰 영역에서는 일정해진다. 그림4로부터 고주파영역(RF)에서는 반전층내의 전하이동은 작은 V_{gs} 에서는 지수 함수적으로 증가하고 큰 V_{gs} 에서는 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

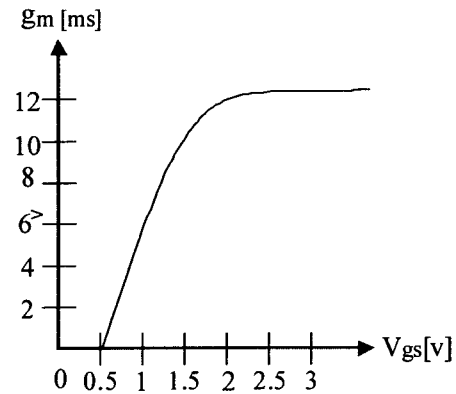


<그림4> MOS 커패시터에서의 C-V 특성
<Fig4> C-V graph at MOS capacitor

따라서 RF영역에서의 반전층 전하는 다음과 같은 모델을 제안한다 초기치 값 반전층 전하에 $CV_g/A + \exp(-V_{gs}/B)$ 로 모델링을 하고 $C = dQ/dV$ 이므로 이 반전층내의 전하이동 특성으로부터 C_{gs} 의 예측모델을 초기값에다 $f/d + \exp(-V_{gs}/e)$ 로 제안하고 이는 실험치 <그림 3>을 잘 만족 시켜준다. 여기서 A, B, C, d, f는 조절 상수이며 e는전압단위이다. 그림5는 RF영역에서의 주파수에 대한 C_{gs} 값을 측정된 것이다. 포화됨을 볼 수 있다. <그림6>은 V_{gs} 와 g_m 관계의 측정값을 나타낸 것으로[4] 이것도 전하의 이동특성을 잘 설명하고 있다.



<그림 5> RF영역에서 주파수-Cgs관계
<Fig5> Frequency-Cgs at RF frequency



<그림 6> V_{gs} - g_m 관계
<Fig 6> V_{gs} - g_m graph

4. 결 론

CMOS RF 모델에서 트랜지스터의 차단주파수를 결정하고 입력 및 출력을 coupling시키는 역할을 하는 C_{gs} 과 라미터를 예측할 수 있는 방법을 제안하고 발표된 실제 C_{gs} 측정 파라미터 값과 비교 검토하였다. 예측할 수 있는 방법은 게이트아래 채널층의 유동전하량의 게이트 전압 변화율과 특히 작은 게이트 전압에서는 반전층 전하는 지수 함수적으로 증가하고 큰 게이트 전압에서는 유동전하는 선

형적으로 증가하는 특성을 이용하여 RF영역에서 C_{gs} 값을 예측할 수 있는 초기값 C_{gs0} 에 $f/d + \exp(-V_{gs}/e)$ 이라는 모델을 제안 했다. 이 모델은 실험치를 잘 설명 했다. 특히 MOS이론 및 C-V특성으로부터 RF영역에서 반전층 전하의 이동특성도 이 모델의 유효성을 증명하며 이를 이용하여 C_{gs} 값을 구했다. 제안된 방법에 의한 계산값은 측정된 값을 잘 설명할 수 있었다.

C_{gs} 의 V_{gs} , V_{ds} , 벌크 바이어스 의존에 대한 모델도 연구할 것이다. 따라서 제안된 방법은 고주파 등가회로 모델의 파라미터 값을 예측할 수 있는 파라미터 추출 소프트웨어 개발에 기여하리라 생각된다. 또한 파라미터의 드레인 전압의존, 벌크 전압의존 등을 포함한 모델 방법을 연구하여 소프트웨어적으로 비선형 고주파 등가회로 모델 파라미터를 추출하여 대신호 MOSFET 모델 개발하므로써 비선형 RF IC 설계에 기여하고자 한다.



여 지 환 (Ji-Hwan Ryeo)

1975년 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

1977년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사)

1992년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학박사)

1982년 ~ 현재 대구대학교 정보통신공학부 교수

관심분야 : 반도체소자 및 회로설계, 카오스 및 퍼지회로 신경회로망 설계

참 고 문 헌

[1] 최정기, 이상국, 송원철 "CMOS트랜지스터의 채널폭 길이변화에 따른 RF특성분석 및 최적화", 전자공학회논문집 제37권 제7호 SD편 PP 9-15, 2000

[2] S.P.Voinigescu, S.W.Tarasewicz, "An Assessment of the state_of_the_Art 0.5 μm Bulk CMOS Technology for RF Applications", IEDM 95. PP 721-724-1995

[3] Cheon Soo Kim, Hyun Kyu Yu "CMOS Layout and bias optimization for RFIC Design Applications" IEEE MTT_S Digest, PP 945-948 1997

[4] Seonghearn Lee, Hyun Kyu Yu "High-frequency data Extraction of bias-dependent intrinsic model parameter for silicon MOSFETs" IEEK JEEIS Vol5, no.2 PP 122-126 2000

[5] 신형철 "CMOS RF 소자 모델링" IDEC 기술동향칼럼, [Http://idec.kaist.ac.kr/newsletter](http://idec.kaist.ac.kr/newsletter)