

전력소자 응용을 위한 4H-SiC MESFET 대신호 모델링

전력소자 응용을 위한 4H-SiC MESFET 대신호 모델링

(4H-SiC MESFET Large Signal modeling for Power device application)

李秀雄, 宋南珍, 范鎮旭, 安哲

(Lee Soo Woong, Song Nam Jin, Burm Jin Wook, Ahn Chul)

서강대학교 전자공학과

Department of Electronic Engineering, Sogang University, Seoul 121-742

Tel,Fax)82-2-714-6205, E-mail)x-mas2@hanmail.net

요약

Modified Materka-Kacprzak 대신호 MESFET(Metal Semiconductor Field Effect Transistor) model 을 사용하여 4H-SiC MESFET의 대신호 모델링을 수행하였다. Silvaco사의 소자 시뮬레이터인 ATLAS를 사용하여 4H-SiC MESFET 소자 시뮬레이션을 수행하고, 이 결과를 modified Materka 대신호 모델을 사용하여 모델링 하였다. 시뮬레이션 및 모델링 결과는 -8V의 pinch off 전압과 $V_{GS}=0V$, $V_{DS}=25V$ 에서 $I_{DSS}=270mA/mm$, $G_m=45ms/mm$ 를 얻을 수 있었고, 전력 특성 시뮬레이션을 통해 2GHz, $V_{GS}=-4V$, $V_{DS}=25V$ 에서 10dB의 Gain과 34dBm(1dB compression point)의 출력전력, 7.6W/mm의 전력 밀도, 37%의 PAE(power added efficiency)를 얻을 수 있었다.

Abstract

4H-SiC(silicon carbide) MESFET large signal model was studied using modified Materka-Kacprzak large signal MESFET model. 4H-SiC MESFET device simulation have been conducted by Silvaco's 2D device simulator, ATLAS. The result is modeled using modified Materka large signal model. simulation and modeling results are -8V pinch off voltage, under $V_{GS}=0V$, $V_{DS}=25V$ conditions, $I_{DSS}=270mA/mm$, $G_m=45ms/mm$ were obtained. Through the power simulation 2GHz, at the bias of $V_{GS}=-4V$ and $V_{DS}=25V$, 10dB Gain, 34dBm(1dB compression point)/output power, 7.6W/mm power density, 37% PAE(power added efficiency) were obtained.

I. 서론

SiC는 높은 항복전계(4×10^6 V/cm), 높은 전자포화속도(2.0×10^7 cm/s), 높은 열전도성(4.9 W/cm-K)를 가지고 있으며 이는 Si, GaAs 등 기존의 반도체소자에 비해 탁월한 특성을 보이고 있다[1,2]. 특히 관심을 모으는 물질은 6H-SiC 보다는 전자와 홀의 이동도가 상대적으로 우수한 4H-SiC 이며 이러한 4H-SiC 물질 자체의 전력소자로서의 뛰어난 가능성 때문에 최근 고주파, 고출력용 소자로서 국내외적인 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다.

소자의 성능에 영향을 미치는 반도체 물질의 특성 중 SiC가 가진 대표적인 장점으로서는 큰 에너지 밴드갭 (bandgap), 낮은 유전율(dielectric constant), 높은 열전도성(thermal conductivity), 높은 항복전계(breakdown field)를 들 수 있다[3]. 먼저 큰 에너지 밴드갭은 높은 항복전계를 가능하게 하며, 4H-SiC의 에너지 밴드갭은 3.26eV로써 이는 기존의 반도체 물질에 비하여 2,3배 이상 큰 값이다. 또한 SiC의 유전율은 9.7로써 기존의 반도체 물질에 비하면 20% 가량 작다. Wide bandgap 반도체는 대개 보통의 반도체에 비해 20% 정도 낮은 유전율을 갖게 되며, 이는 동일한 기생 임피던스를 갖는 경우에 20% 면적이 클 수 있다는 것을 의미한다. 면적이 크다는 것은 더 큰 RF 전류와 RF 전력이 가능하다는 의미이다. 열전도성은 소자가 고온 동작시에 매우 중요한 파라미터가 되며, dissipated power가 얼마나 쉽게 소자로부터 추출될 수 있는가를 설명하는 고주파, 고출력 소자로 사용하기 위해서 매우 중요한 특성이다. 4H-SiC의 열전도성은 4.9 W/cm-K로써 이는 GaAs(0.54 W/cm-K), InP(0.67 W/cm-K) 등에 비교할 때 탁월한 수치이다. 마지막으로 항복 전계가 높다는 것은 고전력 동작이 가능하다는 의미이며, 보통의 반도체 물질에 비해 큰 밴드갭을 갖는 물질의 항복전계는 10배 이상 큰 것으로 알려져 있다. 이처럼 SiC는 고주파, 고출력과 관련된 물질 파라미터에서 기존의 반도체 물질에 비해 월등한 우위에 놓여 있다.

4H-SiC를 기반으로 한 MESFET 소자 제작을 위해서는 소자 특성에 대한 정확한 시뮬레이션과 모델링이 필수적이다. 정확한 모델링을 위하여는 알맞은 모델을 선택하는 작업 또한 중요한데 본 논문에서는 대신호 모델에서 정확성이 꾸준히 검증되어온 modified Materka 대신호 모델[4,7]을 사용하여 대신호 모델링을 수행하였다. modified Materka 대신호 모델이 갖는 장점으로는 포화영역과 선형영역, 핀치오프 부근의 전류 특성이 비교적 정확한 것으로 알려져 있으며, 뿐만 아니라 추출해야 하는 파라미터가 비교적 작고, 각 파라미터의 역할이 수학적으로 잘 분리되어 있으므로 모델사

용의 편이성 또한 우수하다 하겠다.

본 논문에서는 먼저 4H-SiC MESFET의 2차원 소자 시뮬레이션을 수행하고, DC 및 소신호 모델링을 통하여 최종적으로 대신호 모델 파라미터를 추출하였다. 추출된 대신호 모델 파라미터는 다음의 두가지 방법으로 모델의 정확성을 검증하였다. 첫째 시뮬레이션된 소자의 DC특성과 모델링된 소자의 DC특성을 비교하였고, 둘째, 시뮬레이션된 소신호 특성과 모델에서 예측한 소신호 특성을 비교하였다. 마지막으로 대신호 모델파라미터를 사용하여 소자를 구성하고 초고주파 회로설계용 CAD인 ADS (advanced design system)를 사용하여 구성된 소자의 전력특성 시뮬레이션을 통해 4H-SiC MESFET의 전력소자로서의 가능성을 증명하였다.

II. 본론

1. Device simulation

Silvaco사의 2차원 소자 시뮬레이터인 ATLAS 를 이용하여 4H-SiC MESFET의 소자 시뮬레이션을 수행하였다. 2차원 소자 시뮬레이터는 전하의 이동을 고려하는 Poisson 방정식과 전자,정공에 대한 각각의 연속 (continuity)방정식 등 기본적으로 3가지 방정식을 계산하므로 시뮬레이션을 수행하게 되며, 따라서 정확한 2차원 소자 시뮬레이션을 위해서는 반도체 물질에 따른 정확한 물리적인 모델과 모델 파라미터 사용이 매우 중요하다. 본 논문에서는 low field와 high field로 나누어 각각의 경우에 다른 모델을 사용하여 시뮬레이션 하였으며, 모델 파라미터는 최근의 논문결과를 참조하였다.

Breakdown voltage와 gate와 source 사이의 capacitance 문제를 고려하여 gate-source와의 거리는 0.3 μ m, gate-drain과의 거리는 0.8 μ m로 하였으며, gate length는 0.7 μ m, gate width는 332 μ m이다. 시뮬레이션된 소자의 구조[5]는 그림 1과 같다.

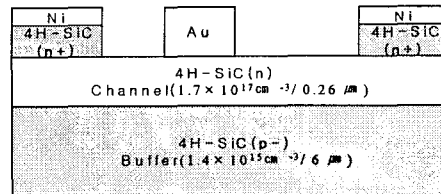


그림 1. A 4H-SiC MESFET의 단면도

2. I-V simulation and modeling

사용된 modified Materka model의 channel current(I_d) 표현식은 다음과 같이 크게 세부분으로 나누어 생각할 수 있다.

$$I_d = f(V_{GS}, V_{DS})g(V_{GS}, V_{DS})h(V_{GS}, V_{DS}) \quad (1)$$

위의 3가지 함수 각부분이 의미하는 것은 함수 $f(V_{GS}, V_{DS})$ 는 포화전류의 크기를 나타내는 함수이며, 함수 $g(V_{GS}, V_{DS})$ 는 출력전도도(output conductance)를 나타내는 함수이다. 또한 tanh형태를 포함하는 함수 $h(V_{GS}, V_{DS})$ 는 선형동작영역에서의 I-V 특성을 기술하기 위한 함수이다. Materka model의 최종적인 I-V 관계식과 정의를 식(2)와 표 1에 각각 나타내었다.

$$I_d = I_{dss} \times \left\{ 1 + SS \frac{V_{ds}}{I_{dss}} \right\} \left\{ 1 - \frac{V_{gs}}{V_{po} + GAMA V_{ds}} \right\}^{E+KEV_{gs}} \times \tanh \left(\frac{SLV_{ds}}{I_{dss}(1-KGV_{gs})} \right) \quad (2)$$

2차원 소자 시뮬레이션으로부터 얻은 IV 특성과, 추출된 파라미터를 사용하여 모델링한 IV 특성이 그림 2에 나타나며, 대부분의 영역에서 결과는 잘 일치하고 있음을 보여준다.

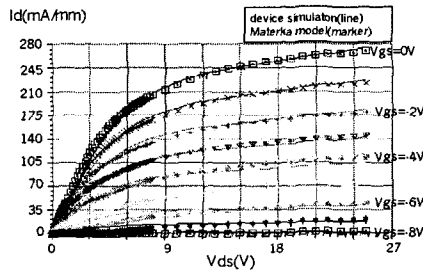


그림 2. I-V characteristics of a 4H-SiC MESFET

Model Keyword	Definition
I_{dss}	Drain saturation current at $V_{GS}=0V$
SS	Slope of the saturation region
V_{po}	Pinch off voltage
GAMA	Voltage slope parameter of pinch off voltage
E	Constant part of power law parameter
KE	Dependence of power law on V_{GS}
KG	Drain dependence on V_{GS} in the linear region

표 1. Model keyword and definition

3. S-parameter simulation and modeling

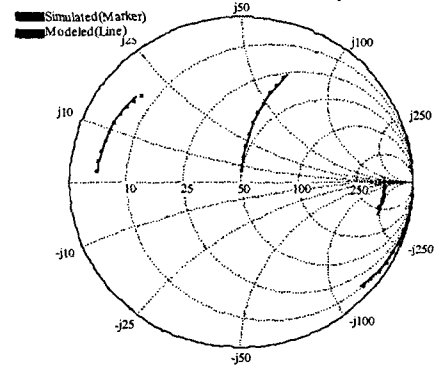


그림 3. Simulated and Modeled S-parameter at $V_{GS}=-4V, V_{DS}=25V, 10\text{GHz}-100\text{GHz}$

$V_{GS}=-4V, V_{DS}=25V$ 에서 Materka 모델을 사용한 S-parameter 시뮬레이션과 모델링 결과가 그림 3에 보여진다. 소신호 모델에서의 오차는 이를 근거로 모델링하는 대신호 모델에 절대적인 영향을 줄 수 있으므로 소신호 모델의 바이어스에 따른 정확성을 시뮬레이션 값과 비교하는 것은 대신호 모델링에서 매우 중요한 과정이다. 10GHz에서 100GHz까지 10GHz 간격으로 시뮬레이션 되었으며, 시뮬레이션과 모델링이 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타나는데, 이는 소신호 모델파라미터가 정확하게 추출되었음을 의미한다. 표 2는 그림 3에 나타난 S-파라미터의 오차율을 나타낸다.

S_{11}	S_{21}	S_{12}	S_{22}
2.2%	6.7%	3.6%	4.5%

표 2. Error rate of simulated and modeled S-parameter

4. Power simulation

Modified Materka 대신호 모델을 통하여 추출된 파라미터를 사용한 소자의 전력특성을 알아보기 위하여 Microwave CAD Tool인 ADS(advanced design system)를 사용하여 정합회로를 구성하고 이같은 정합회로를 통한 소자의 전력특성을 시뮬레이션한 결과는 $V_{GS}=-4V, V_{DS}=25V$ 의 바이어스 조건에서 HB(Harmonic Balance)시뮬레이션을 통하여 10dB의 이득과 34dBm(1dB compression point)의 output power, 7.6W/mm의 power density, 37%의 PAE(power

added efficiency)의 전력특성을 얻었다.

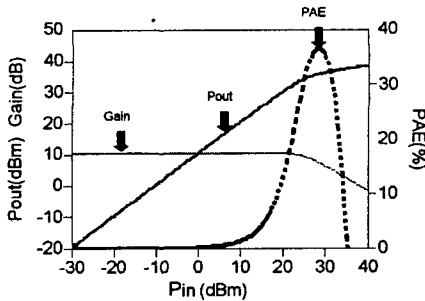


그림 4. Power simulation for a 4H-SiC MESFET at 2GHz

III. 결론

본 논문에서는 차세대 전력소자인 4H-SiC MESFET을 modified Materka 대신호 모델을 사용하여 모델링 하였다. 먼저 2차원 소자 시뮬레이터인 ATLAS를 사용하여 DC 및 S-파라미터 특성을 시뮬레이션 하였다. 정확한 소자의 특성을 시뮬레이션하기 위하여 전계에 따라 다른 이동도(mobility) 모델을 사용하였고, 추출된 소신호 파라미터를 이용하여 구성된 DC특성 및 S-파라미터가 모델링된 DC특성 및 S-파라미터와 잘 일치하고 있음을 보여서 소신호 파라미터가 정확하게 추출 되었음을 증명하였다. 최종적으로 추출된 대신호 모델 파라미터는 modified Materka 대신호 모델을 사용하여 모델링 하고 매칭 회로를 구성하여 소자의 전력특성을 나타내었다. 2GHz, $V_{gs}=-4V$, $V_{ds}=25V$, CLASS A 조건에서 10dB의 Gain과 34dBm(1dB compression point)의 output power, 7.6W/mm의 power density, 37%의 PAE(power added efficiency)를 얻을 수 있었다. 7.6W/mm의 power density는 Si, GaAs에 비해 10배 이상 큰 값[6]이므로 고효율 소자로써의 응용가능성이 충분하다 하겠다.

감사의 글

"이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음"(KRF-99-042-E00036)

참고문헌

1. Y. S. Park, *SiC Materials and Devices : Semiconductors and Semimetals*, vol. 52, Academic Press, 1998.
2. K. E. Moore et al., "4H-SiC MESFET with 65.7% Power Added Efficiency at 850MHz", IEEE Electron Device Letter, vol. 18, no. 2, pp. 69-70, 1997.

3. R. J. Trew, "wide bandgap semiconductor transistors for microwave power amplifiers", Microwave journal, pp. 47-54, march. 2000.
4. A. Materka and T. Kacprzak, "Computer calculation of large-signal GaAs FET amplifier characteristics", IEEE Transactions on Microwave Theory Tech., Vol. MTT-33, No.2, pp.129-135 Feb. 1985.
5. M. W. Shin, "High-Efficiency Performance of Microwave Power 4H-SiC Amplifiers", Proceedings of 1995 International Symposium on Power Semiconductor Device & ICs, Yokohama, pp.497-500, 1995.
6. Charles E. Weitzel, "Comparison of SiC, GaAs, and Si RF MESFET power densities", IEEE Electron Device Letters, Volume, 16 Issue, 10, pp.451-453, Oct. 1995.
7. H. K. Choi, "A study on the automated extraction of the modified Materka large signal model for GaAs FET devices", 석사학위 논문, 광운대학교, 1999