

# 100GHz 이상의 밀리미터파 HEMT 소 제작 및 개발을 위한 GaAs기반 0.1 $\mu$ m $\Gamma$ -게이트 MHEMT의 DC/RF 특성에 대한 calibration 연구

손명식, 이복형, 이진구

동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터  
전화: 02-2260-8699 / 핸드폰: 011-9399-0321

## A Study on the Calibration of GaAs-based 0.1- $\mu$ m $\Gamma$ -gate MHEMT DC/RF Characteristics for the Development and Fabrication of over-100-GHz Millimeter-wave HEMT devices

Myung-Sik Son, Bok-Hyoung Lee, and Jin-Koo Rhee

Millimeter-wave INnovation Technology research center (MINT), Dongguk University  
E-mail : sonms@dgu.edu

### Abstract

Metamorphic HEMTs (MHEMTs) have emerged as excellent challenges for the design and fabrication of high-speed HEMTs for millimeter-wave applications. Some of improvements result from improved mobility and larger conduction band discontinuity in the channel, leading to more efficient modulation doping, better confinement, and better device performance compared with pseudomorphic HEMTs. We have studied the calibration on the DC and RF characteristics of the MHEMT device using In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As modulation-doped heterostructure on the GaAs wafer. For the optimized device performance simulation, we calibrated the device performance of 0.1- $\mu$ m  $\Gamma$ -gate MHEMT fabricated in our research center using the 2D ISE-DESSIS device simulator. With this calibrated parameter set, we have obtained very good reproducibility. The device simulation on the DC and RF characteristics exhibits good reproducibility for our 0.1- $\mu$ m  $\Gamma$ -gate MHEMT device compared with the measurements. We expect that our calibration result can help design over-100-GHz

MHEMT devices for better device performance.

### I. 서론

최근 밀리미터파 대역이 상용목적으로 개방되면서 이에 관한 연구가 급속히 요구되고 있다. 수백 GHz에 이르는 밀리미터파 주파수 대역은 현재의 무선통신 및 미래의 광대역 무선 통신의 매체가 되는 소중한 주파수 자원이다. 따라서 차세대 밀리미터파 통신 분야 및 이동 통신 분야에서 기술 선진 제국과의 기술력 격차를 줄이고 도약을 이루기 위해서는 다양한 통신 시스템의 핵심 소자개발이 필수적이다.

현재 100GHz 이상의 주파수 대역에서는 InP기반 HEMT 소자가 우수한 특성을 나타내고 있다. InP HEMT의 주파수 특성을 나타내는  $f_T$ 의 경우 300~360 GHz의 결과들이 발표되어 왔으며 최근엔 일본 Fujitsu에서 400GHz  $f_T$ 의 InP HEMT 결과가 발표되었다. Digital application 용으로 InP HEMT는 소자의 동작 속도 면에서 다른 어떤 소자들보다 월등한 성능을 나타내고 있으며  $f_{max}$ 의 경우도 600 GHz의 동작특성을 보이고 있어 차세대 광대역 무선 및 광통신망과 millimeter-wave 통신망의 송수신단의 응용이 기대되고 있다.

그러나 InP 기반 소자의 가장 큰 문제로 아직은 비용이 GaAs 기반 소자에 비해 비싸며, 4인치 이상의 에피 웨이퍼 생산이 어렵고, MIMIC 제작시 깨지기 쉬워 취급하기 어렵다는 문제점을 안고 있다. 이에 대한 대안으로 InP 에피 구조를 GaAs 기판 위에 성장시킨 metamorphic HEMT(MHEMT)에 대한 연구가 진행되었다. 제작된 0.1 $\mu$ m 게이트 MHEMT는 PHEMT에 비해 우수한 주파수 특성( $f_T$  123GHz)을 보였으며, 위에서 언급한 InP 기반 MIMIC 제작시의 단점을 극복할 수 있으리라 여겨진다.

본 논문에서는 100 GHz 이상에서 구동하는 MHEMT 제작 및 개발을 위한 sub-0.1 $\mu$ m 이하의 게이트를 갖는 MHEMT의 스케일링에 따른 최적 에피 구조 및 DC/RF 특성 연구를 위해 본 연구센터에서 제작된 0.1  $\mu$ m  $\Gamma$ -게이트 DC 및 RF 특성에 대해 ISE사의 DESSIS 소자 시뮬레이터의 Hydrodynamic 전송 모델을 이용하여 calibration을 수행하여 좋은 결과를 얻었으며, 이에 대한 calibration 방법에 대해 발표하고자 한다. 향후 이 연구 결과를 이용하여 sub-0.1 $\mu$ m급 게이트 MHEMT 소자 구조에 대한 scaling 최적화 연구를 수행할 수 있으리라 기대된다.

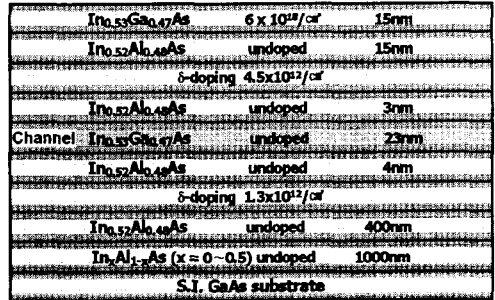
## II. 0.1- $\mu$ m $\Gamma$ -게이트 MHEMT 소자에 대한 calibration

ISE사의 소자 시뮬레이터인 DESSIS에서는 Hydrodynamic 모델 및 full-band Monte Carlo 모델 등을 사용할 수 있으나, 계산의 효율성과 정확성을 고려하여 Hydrodynamic 전송 방정식 모델을 사용하여 소자 시뮬레이션을 수행하였다. 계산에 필요한 물질 파라미터들을 결정하기 위하여 측정된 파라미터 값 및 문헌 값들[1-4]을 토대로 값을 설정하여 사용하였으며 사용된 파라미터 값들을 다음 소절에서 상술하였다.

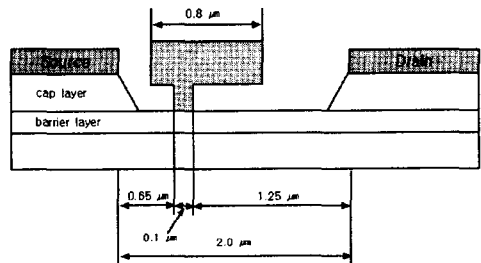
### 2.1 MHEMT 에피 구조 및 소자 layout 구조

그림 1에서 보는 바와 같이 제작된 0.1 $\mu$ m MHEMT 소자는 LNA(low noise amplifier) 및 PA(power amplifier) 용으로 동시에 사용할 수 있도록 이중 도핑된 에피 구조를 갖도록 설계되었으며, breakdown 특성을 향상시키도록 소스(source) 측으로 치우쳐진  $\Gamma$ -게이트 구조를 갖도록 설계되었다. 2 $\mu$ m의 소스-드레인 간격을 갖으며, 게이트는 소스 측에 치우쳐져 있으며, fully recessed  $\Gamma$ -게이트 구조를 갖도록 제작되었다. In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 이중 접합 구조를 갖으며, 채널 층으로는 23nm의 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 층을 사용하였다.

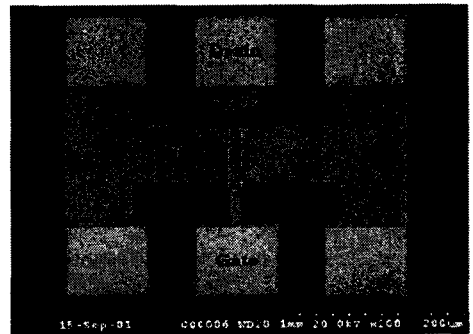
게이트와 직접 Ti/Au 층과 Schottky 접합을 이루게 되는 barrier 층은 15nm의 In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 층을 사용하였다. 충분한 ohmic 접합을 위해 양 캡(cap) 층은 6 $\times 10^{18}$ /cm<sup>3</sup>으로 도핑하였다. 제작된 소자는 그림 1(c)에서 보는 바와 같이 게이트 폭 70 $\mu$ m에 finger수 2개를 갖는 소자 layout 구조이다.



(a) MHEMT 에피 구조



(b) 0.1- $\mu$ m  $\Gamma$ -게이트를 갖는 MHEMT 구조



(c) 제작된 CPW형 MHEMT 소자 평면 사진

그림 1. CPW형 0.1 $\mu$ m  $\Gamma$ -게이트 MHEMT 소자구조

그림 2에서는 소자 시뮬레이션을 위한 도핑 분포 및 mesh 구조를 나타내었다. 소스와 드레인의 ohmic 접촉을 위하여 Gaussian 분포의 도핑된 분포를 이용하여 접촉 저항을 모델링하였다. 또한, 게이트와 소스, 게이트와 드레인 사이에는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 사용한 passivation 층을 고려하였다.

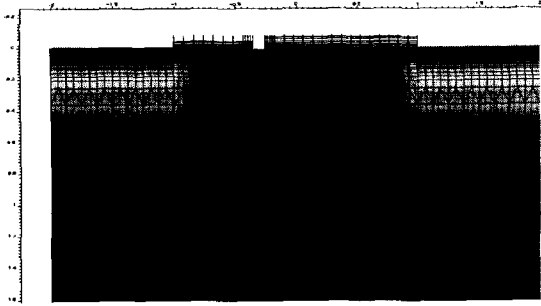


그림 2. 소자 시뮬레이션을 위한 도핑 및 mesh 구조

### 2.2 DC 특성 calibration

소자 시뮬레이션을 위한 중요한 물질 파라미터들은 이동도(mobility), 캐리어 포화 속도 및 소자 DC 특성에서 초기 선형 영역에서의 포화 속도 기울기 값  $\beta$  이다. 캐리어 전송에서의 이동도를 결정하기 위해서 ISE-DESSIS에서 제공하는 이동도 모델들[1] 중에서 격자 산란에 의한 constant 이동도 모델, 도핑에 의한 이동도 감소 모델 및 물질 층 경계면에서의 이동도 감소 모델을 고려하였다.

표 1에 constant low-field 이동도, 캐리어 포화 속도(saturation velocity) 및  $\beta$  값을 정리하여 나타내었으며, constant low-field 이동도는 측정된 Hall 측정값을 사용하였다.

표 2에서는 도핑에 의한 이동도 감소 모델(Masetti 모델[1])에 대한 파라미터들을 정리하여 나타내었다. 표 2에서의 파라미터들은 ohmic 접합 특성을 나타내기 위한 중요한 파라미터들로서 위에서 언급된 드레인 단자와 소스 단자의 ohmic 접합 특성을 정확히 모델링하기 위한 파라미터들이다.

캐리어를 공급하는 델타 도핑 층의 두께는 20Å으로 가정하여 면 농도(sheet density)를 체적 농도(volume density)로 변환하였으며, Schottky 접합에 사용된 Ti/Au 금속에 의한 Schottky Barrier는 접촉면을 이루는 Ti 금속의 일함수 값인 4.33 eV와 Au의 일함수 5.1 eV 값의 중간 값을 고려하여 변환시키면서 DC 특성에 대해 calibration을 수행하였으며, 이중 4.33 eV일 때 가장 좋은 calibration 결과를 얻을 수 있었다.

또한, 에너지 밴드 모델은 디폴트 에너지 밴드 모델을 사용하였으며 정확하게 물분율에 따른 에너지 밴드를 계산함을 확인하였다.

게이트의 Schottky 접합 특성 중에서 게이트에 가해지는 전계에 의한 barrier lowering 현상을 모델링하기 위하여 게이트와 barrier 층인  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  접합 면 사이에 2Å의 산화층을 고려하였다. 이 얇은 산화층을 삽입함으로써 게이트 전계에 따른 Schottky 접합의

barrier lowering 현상을 모델링할 수가 있었다.

표 1. constant 이동도, 포화 속도 및  $\beta$  값[1-3]

Parameters/ Materials	$In_{0.53}Ga_{0.47}As$		$In_{0.52}Al_{0.48}As$	
	electron	hole	electron	hole
low-field mobility ( $cm^2/V-sec$ )	9710	331	4226	75
saturation velocity ( $cm/sec$ )	$2.0 \times 10^7$	$8.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^7$	$3.0 \times 10^6$
$\beta$ for saturation velocity (1)	1.3	1.3	1.5	1.5

표 2. Doping-dependent mobility degradation 모델 (Masetti 모델[1]) 파라미터[4]

Parameters/ Materials	$In_{0.53}Ga_{0.47}As$		$In_{0.52}Al_{0.48}As$	
	electron	hole	electron	hole
$min1$	3372	75	220	40
$min2$	3372	75	220	40
$i$	0	0	0	0
$P_c$	$6.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^7$	0	0
$C_r$	$8.9 \times 10^{16}$	$1.0 \times 10^{17}$	$1.5 \times 10^{14}$	$3.8 \times 10^{17}$
$C_s$	$3.34 \times 10^{20}$	$6.1 \times 10^{20}$	$3.34 \times 10^{20}$	$6.1 \times 10^{20}$
	0.76	1.37	0.27	0.79
	2.0	2.0	2.0	2.0

Barrier 층( $In_{0.52}Al_{0.48}As$ )과  $Si_3N_4$  passivation 계면 ( $Si_3N_4/In_{0.52}Al_{0.48}As$ )에서의 trap에 의한 이동도 감소 효과 및 trap 계면 효과를 모델링하기 위하여  $Si_3N_4/In_{0.52}Al_{0.48}As$  계면에 deep-level trap 모델을 사용하였으며, 계면 trap 에너지 레벨은  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  에너지 밴드 갭의 중간 위치에 acceptor 형태로 존재하는 것으로 가정하여 DC 특성을 모델링하였다. Passivation에 의한 trap 계면 효과는 작은 게이트 바이어스 전압  $V_{gs}=0 \sim -0.5V$  구간에서 계면 trap 모델을 사용하지 않은 것에 비해 계면 trap 농도의 증가에 따라서 전류 레벨이 감소되는 현상으로 나타났으며, calibration된 최종 passivation 계면 trap 농도는  $6.3 \times 10^{11}/cm^2$ 이었다.

### 2.3 RF 특성 시뮬레이션

ISE-DESSIS 소자 시뮬레이션에서는 DC 바이어스 조건에 대하여 소신호(small signal) 입력에 대한 AC 시뮬레이션을 수행하여  $C_{gs}$  및  $C_{gd}$ 를 계산하고 전달전도도(transconductance)  $g_m$  값을 이용하여 차단 주파수를 결정하는 식 [5]을 이용하여 차단 주파수  $f_T$ 를 계산하게 되며, 최대 공진 주파수  $f_{max}$  또한 소신호 파라미터들에 의한 결정식 [6]을 통해 결정된다. RF 특성은 차단 주파수  $f_T$  및 최대 공진 주파수  $f_{max}$ 를 고려하

여 동일 바이어스 조건에서 실험 데이터와 비교하여 나타내었다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 논의

본 연구의 소자 시뮬레이션에서는 breakdown 특성을 예측하기 위한 impact ionization 효과는 고려하지 않았으며, 격자 온도 효과 또한 배제하였다. 그림 1(c)에서의 게이트 폭  $70\mu\text{m} \times 2$  fingers 소자 구조에 대해 2차원 ISE-DESSIS 소자 시뮬레이터의 Hydrodynamic 전송 모델을 사용하여 DC에 대한 calibration을 수행한 후 결정된 파라미터들을 이용하여 RF 특성을 시뮬레이션하여 아래와 같은 시뮬레이션 결과를 얻었다.

그림 3에  $I_{ds}-V_{ds}$  및  $I_{ds}-V_{gs}$  DC 특성 시뮬레이션에 대한 calibration 결과를 나타내었다.  $I_{ds}-V_{ds}$  특성 시뮬레이션에서  $V_{gs}=0\text{V}$ 부터  $V_{gs}=-2.5\text{V}$ 까지 게이트 스텝 간격  $\Delta V_{gs}=-0.25\text{V}$ 로 수행된 calibration 결과를 보였으며, 기호-실선은 시뮬레이션 결과를 나타내고 파선은 측정치를 나타낸다.  $I_{ds}-V_{gs}$  특성 곡선에 의한  $G_m$  결과에서는  $V_{gs}=-0.8\text{V}$ 에서 측정치  $G_{m,max}=390\text{mS/mm}$ 에 대해  $V_{gs}=-0.7$ 에서  $G_{m,max}=344.67\text{ mS/mm}$ 를 얻었다(기호-실선은 측정치이며, 파선은 시뮬레이션 결과).

그림 4의 RF 시뮬레이션에서  $V_{ds}=1.5\text{V}$ ,  $V_{gs}=-0.7\text{V}$  바이어스 조건에서 측정치는  $f_T$  123GHz이었으며, 동일 바이어스 조건에서 시뮬레이션 결과는 113.7GHz로 10GHz 정도의 차이를 나타냈으며,  $f_{max}$ 는 MSG 곡선에서 extrapolation에 의한 계산치 433GHz에 대해 207.5GHz의 계산 값을 얻었다.  $f_{max}$ 는 MSG 곡선 끝단의 기울기 시작점을 어디에 위치시키느냐에 따라 큰 편차가 발생할 수 있으므로 계산 값과 큰 차이를 발생시켰다라고 여겨진다.

### IV. 결론

DC 시뮬레이션에서 측정치  $V_{gs}=-0.8\text{V}$ 에서  $G_{m,max}=390\text{mS/mm}$ 에 대해 시뮬레이션 수행 결과는  $V_{gs}=-0.70$ 에서  $G_{m,max}=344.67\text{mS/mm}$ 를 보였다. RF 시뮬레이션에서는  $V_{ds}=1.5\text{V}$  및  $V_{gs}=-0.7\text{V}$ 에서 측정치는  $f_T$  123GHz이었으며, 동일 바이어스 조건에서 시뮬레이션 결과는 113.7GHz로 10GHz 정도의 차이를 나타냈다. 따라서 본 연구의 calibration 결과를 이용하여 sub- $0.1\mu\text{m}$ 급 게이트를 갖는 MHEMT 최적화 scaling 연구를 수행할 수 있으리라 여겨진다.

※ 이 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터를 통한 한국과학 재단의 우수 연구센터 지원에 의하여 연구되었음.

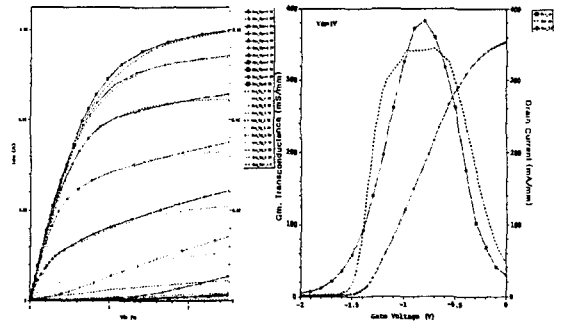


그림 3. DC 특성 시뮬레이션 결과

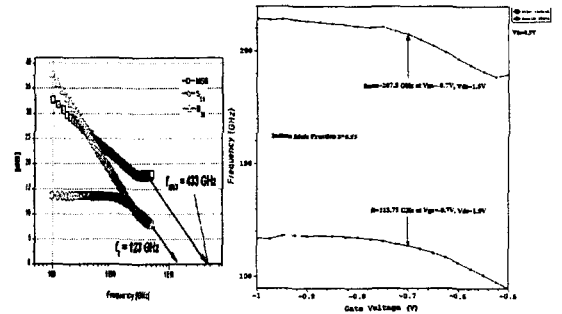


그림 4. RF 특성 시뮬레이션 결과

### 참고문헌

- [1] ISE-DESSIS manual, pp. 12-288, Ver.7.5
- [2] W.-P. Hong *et al.*, "Low- and high-field transport properties of pseudomorphic  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  (0.53 x 0.65) modulation-doped heterostructures," *J. Appl. Phys.*, vol. 64, no. 4, pp.1945-1949, 1988.
- [3] H. S. Kim *et al.*, "Electron velocity field characteristics of  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, no. 10, pp.1202-1204, 1992.
- [4] Suman Datta *et al.*, "Simulation and Design of  $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$  pnp Heterojunction Bipolar Transistors," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 45, no. 8, pp.1634-1643, 1998.
- [5] J. Michael Golio, *microwave MESFETs & HEMTs*, Artech House Inc., Boston, London, 1991.
- [6] William Liu, *Handbook of III-V Heterojunction Bipolar Transistors*, Sec. 8-11 "Maximum Oscillation Frequency", Wiley, 1998.