

# 밀리미터파 PHEMT의 도핑층 설계에 따른 특성 변화

박훈/ 박진국/ 정지학/ 박현창  
동국대학교 전자공학과 반도체 설계 연구실  
전 화: (02) 2260-3713/ 팩스: (02) 2275-1436

## The Effect of Doping Layer Structures on the Performance of Millimeter-wave PHEMT's

Hoon Park/ Jin-Kuk Park/ Ji-Hak Jung/ Hyun-Chang Park  
Semiconductor Design Lab, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

e-mail: 98fronti@netian.com

### Abstract

PHEMT's with three different doping structures, -SH(single-heterojunction), DH(double-heterojunction), and DC(doped-channel)-, were designed, fabricated and characterized to study the effect of doping layer structures on the performance of millimeter-wave PHEMT's.

0.25 $\mu$ m DH-PHEMT with below-channel doping of  $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$  was superior to SH-PHEMT by 40% in  $I_{\text{dss}}$ , 20% in  $f_{\text{T}}$  and  $f_{\text{max}}$ , and showed broader  $g_m$ - $I_D$  characteristics which is advantageous to power applications.

DH-PHEMT showed similar DC and small-signal performance compared with DC-PHEMT. Taking the much higher carrier mobility into considerations, DH-PHEMT is believed to be the best candidate for millimeter-wave, low-noise and/or power applications.

### I. 서론

정보량의 폭주로 인하여 기존의 마이크로파 대역의 주파수 자원이 점차 고갈되고 있으며, 특히 고속·광대역 정보통신서비스에 대한 사회적 수요를 충족시키기 위하여 밀리미터파 대역의 주파수 자원을 이용하기

위한 연구와 개발이 활기를 띠고 있다.

본 연구에서는 밀리미터 대역용 능동소자로 가장 많이 사용되는 PHEMT의 도핑층 설계가 소자 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 주도핑층만 가지는 단일-이종접합(single-heterojunction) 구조, 주도핑층과 더불어 채널 아래에 부도핑층을 갖는 이중-이종접합(double-heterojunction) 구조 [1-2], 그리고 주도핑층과 더불어 채널 내부에 부도핑층을 갖는 채널도핑(doped-channel) 구조 [3-4]들을 설계하고, 설계된 구조들의 PHEMT를 제작하여 그 특성을 비교·분석하였다.

### II. PHEMT의 에피층 구조

단일-이종접합 구조는 반절연성 GaAs 기판 위에 7500Å의 GaAs 버퍼층, 1000Å의 AlGaAs/GaAs 초격자 버퍼층, 70Å의  $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$  스페이서층, 135Å의  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  채널층, 50Å의  $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$  스페이서층,  $6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 의 델타(delta) 도핑 [5], 250Å의  $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$  장벽층 및 400Å의  $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 으로 도핑된 GaAs 캡층으로 구성되었다.

이중-이종접합 구조a는 단일-이종접합 구조의 채널층 아래에  $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 의 델타 도핑이 첨가되었다. 이중-이종접합 구조b의 경우 이중-이종접합 구조a의 주도핑층의 도핑 농도를  $4 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 으로 감소시켰다. 이중-이종접합 구조에서 추가되는 부도핑이 소자의 항

복특성을 감소시키지 않으면서도 전류구동능력을 증가시키는 장점이 있다. 채널도핑 구조는 이중-이종접합 구조b의 부도핑층을 채널 아래에서 채널 가운데로 이동시킨 구조이다. 이 구조의 경우 전자이동도  $\mu_n$  은 감소하나 전력이득의 선형특성이 개선된다고 보고된 바 있다 [6].

설계된 구조들은 MBE로 성장되었으며, Hall 측정 결과 양호한 특성을 보였다.

### III. PHEMT의 제작 및 특성

PHEMT 소자의 제작은 메사 식각, 오믹 공정, 전자선 묘화 장치를 이용한 0.25 $\mu$ m T형 게이트 형성, 게이트 리세스 식각, 게이트 금속증착의 순서로 진행하였다.

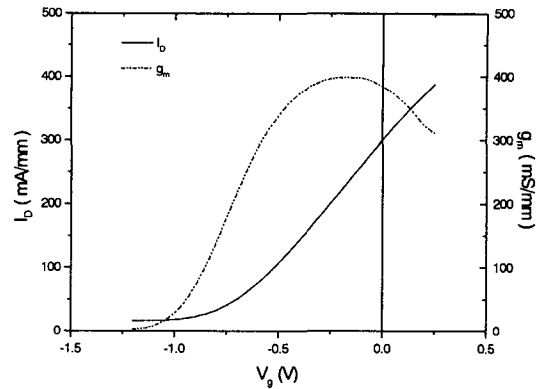
메사 식각은 황산계 용액을 이용하여 4000Å의 에피층을 제거하였다. 오믹 접촉은 AuGe/Ni/Au 구조의 금속을 전자 빔 증착기를 사용하여 각각 1000Å/250Å/1750Å의 두께로 증착한 후, H<sub>2</sub> 분위기의 RTA로 270°C에서 30초, 430°C에서 20초의 2단계 열처리를 하였다.

밀리미터파 대역용 소자에는 0.3 $\mu$ m 이하의 게이트 길이가 필수적이어서 전자선 묘화공정이 주로 사용되며, 특히 게이트의 하단부는 되도록 작게 하면서 게이트 상단부는 크게 하여 전체 단면적을 늘려 게이트의 저항을 감소시키는 소위 T-gate 공정이 선호된다 [7-8]. 본 연구에서는 PMMA/P(MMA-MAA)/PMMA의 3층 레지스트를 도포하고 [9], Cambridge Instruments EBMF10.5 전자선 묘화 장치를 사용하여 0.25 $\mu$ m급의 게이트를 형성하였다. 게이트 금속을 증착하기 전에 높은 농도로 도핑된 GaAs 캡층을 제거하여 게이트 특성을 향상시키는 리세스 공정은 구연산 계열의 용액을 사용하여 원하는 전류량에서 식각을 종료하는 방식을 사용하였다. 리세스 공정 후 전자 빔 증착기를 사용하여 500Å/3500Å 두께의 Ti/Au를 증착하여 게이트를 형성하였다.

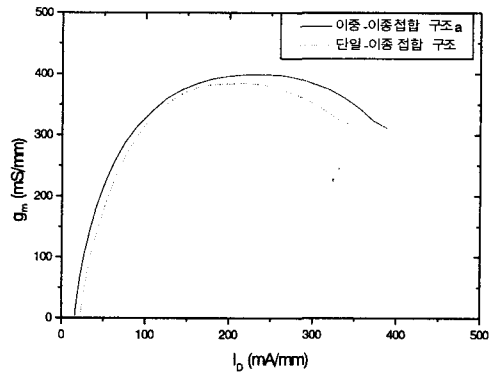
이중-이종접합 구조a는  $I_{dss}=470\text{mA/mm}$ ,  $g_m=400\text{mS/mm}$ ,  $f_T=83\text{GHz}$ ,  $f_{max}=103\text{GHz}$ 의 특성을 보였다. 단일-이종접합 구조의 경우 그 특성들은 각각 335mA/mm, 385mS/mm, 70GHz 및 86GHz 이었다.

그림 1은  $V_D$ 가 1V일 때 측정된 이중-이종접합 구조a의 transconductance( $g_m$ ) 특성을 나타내었고, 그림 2는 이중-이종접합 구조a와 단일-이종접합 구조의  $g_m$  특성을 전류밀도  $I_D$ 에 대하여 비교하였다.

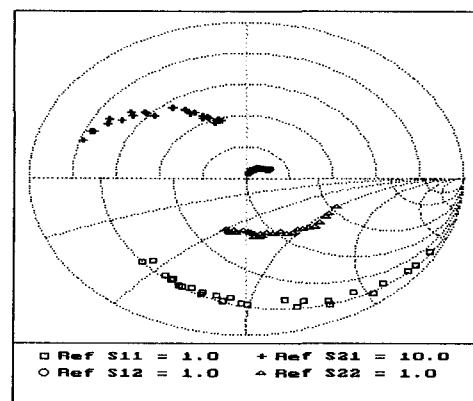
이중-이종접합 구조의 경우  $I_D$ 가 큰 경우에도 높은  $g_m$  값을 유지하여 고이득 선형증폭에 유리할 것으로 판단된다.



[그림 1] 이중-이종접합 구조a의  $g_m$  특성.  $V_D$ 는 1V임.



[그림 2] 이중-이종접합 구조a와 단일-이종접합 구조의  $g_m$  특성 비교.  $V_D$ 는 1V임.

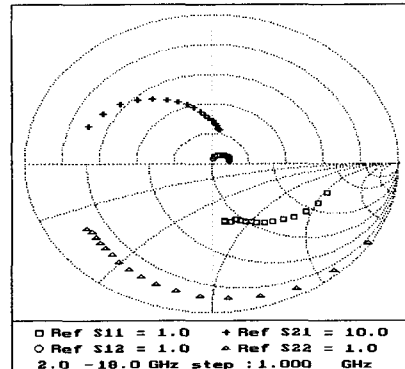


[그림 3] 20GHz에서 18GHz까지 측정된 이중-이종접합 구조a의 s-parameter 특성.  $V_D$ 는 2.5V,  $V_G$ 는 -0.2V 임.

그림 3은 이중-이종접합 구조a의 S-parameter를 2GHz에서 18GHz까지 측정된 결과이고 동작점(bias point)은  $V_D=2.5V$ 이고  $V_G=-0.2V$  (최대  $g_m$  동작점) 이었다.

이중-이종접합 구조b는  $I_{dss}=275mA/mm$ ,  $g_m=415mS/mm$ ,  $f_T=79GHz$ ,  $f_{max}=100GHz$ 의 특성을 보였으며, 채널도핑 구조의 경우 그 특성들은 각각  $204mA/mm$ ,  $395mS/mm$ ,  $77GHz$  및  $99GHz$  이었다.

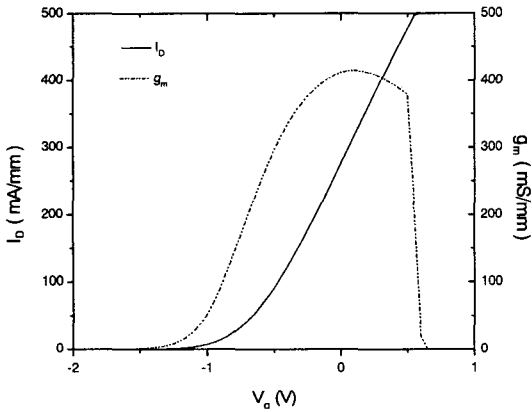
그림 4는  $V_D$ 가 2V일 때 측정된 이중-이종접합 구조 b의  $g_m$  특성을 나타내었고, 그림 5는 이중-이종접합 구조b와 채널도핑 구조의  $g_m$  특성을 전류밀도  $I_D$ 에 대하여 비교하였다. 그림 6은 이중-이종접합 구조b의 S-parameter를 측정된 결과이다.



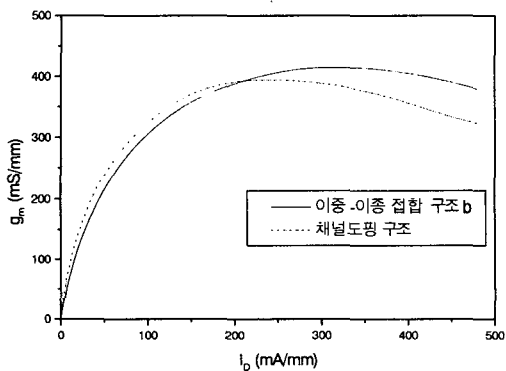
[그림 6] 2GHz에서 18GHz까지 측정된 소자b의 S-parameter 특성.  $V_D$ 는 2V,  $V_G$ 는 0.1V 임.

이중-이종접합 구조와 채널도핑 구조가 단일-이종접합 구조에 비하여 더 좋은 특성을 보인 것은 추가적인 도핑에 의해 채널 전자가 증가하는 효과 외에도, 채널의 우물구조 모양을 변화시켜 상단 주도평층의 전이효율도 증가시키는 효과가 있는 것으로 분석되었다.

각 소자들의 DC 및 RF 특성들을 표1 및 표2에 정리하였다.



[그림 4] 이중-이종접합 구조a의  $g_m$  특성.  $V_D$ 는 2 V임.



[그림 5] 이중-이종접합 구조b와 채널도핑 구조의  $g_m$  특성 비교.  $V_D$ 는 1V임.

wafer	$I_{dss}$ (mA/mm)	$\eta$ dB (%)	$g_m$ (mS/mm)	$g_d$ (mS/mm)	$g_m/g_d$	$f_T$ (GHz)	$f_{max}$ (GHz)
이중-이종접합 구조a	470	26	400	15	15	83	103
단일-이종접합 구조	385	24	385	24	24	70	86

[표1] 이중-이종접합 구조a와 단일-이종접합 구조의 DC 및 RF 특성

wafer	$I_{dss}$ (mA/mm)	$\eta$ dB (%)	$g_m$ (mS/mm)	$g_d$ (mS/mm)	$g_m/g_d$	$f_T$ (GHz)	$f_{max}$ (GHz)
이중-이종접합 구조b	275	29	415	13	32	79	100
채널도핑 구조	204	27	395	15	26	77	99

[표2] 이중-이종접합 구조(b)와 채널도핑 구조의 DC 및 RF 특성

#### IV. 결 론

본 논문에서는 도핑층 설계에 따른 PHEMT 특성의 변화를 알기 위해  $0.25\mu\text{m}$  급의 게이트 길이를 갖는 단일-이종접합 구조, 주도핑층과 채널 아래에 부가적인 부도핑층을 갖는 이중-이종접합 구조, 그리고 주도핑층과 채널 내부에 부도핑층을 갖는 채널도핑 구조의 PHEMT를 설계, 제작하였다.

측정된 결과로부터 이중-이종접합 구조는 단일-이종접합 구조에 비하여  $I_{\text{dss}}$ ,  $g_m$ ,  $f_T$ ,  $f_{\text{max}}$  특성에서 각각 35%, 9%, 20% 및 20% 향상을 보였으며 특히 높은 전류밀도에서  $g_m$ 의 감소가 완만하여 전력소자로 매우 유리하고, 채널도핑 구조와는 거의 비슷한 성능을 나타내었다.

이중-이종접합 구조는 채널도핑 구조에 비하여 상기 특성들은 유사하였으나, 월등히 높은 전하이동도를 갖는 점을 추가로 고려할 때 밀리미터파 PHEMT 소자로 가장 적합한 구조로 판단된다.

\*본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(971-0914-087-2) 지원으로 수행되었음.

- [1] M.Y. Kao, P.M. Smith, P. Ho, P.C. Chao, K.H.G. Duh, A.A. Jabra, and J.M. Ballingall, "Very high power-added efficiency and low-noise  $0.15\mu\text{m}$  gate-length pseudomorphic HEMT's," IEEE Electron Device Letters, Vol. 10, No. 12, pp. 580-582, 1989.
- [2] P.M. Smith, W.F. Kopp, P. Ho, Chao, R.P. Smith, K. Nordheden, and J.M. Ballingall, "Ku-band high efficiency high gain pseudomorphic HEMT," Electronic Letters, Vol. 27, No. 3, pp. 270-271, 1991.
- [3] B. Kim, H-D Shin, M. Wuttele, and H.Q. Tserng, "Millimeter-wave GaAs power FET with a pulse-doped InGaAs channel," IEEE Electron Device Letters, Vol. 9, No. 5, pp. 203-204, 1988.
- [4] P.M. Smith, L.F. Lester, P-C Chao, P. Ho, R.P. Smith, J.M. Ballingall, and M.Y. Kao, "A  $0.25\text{-}\mu\text{m}$  gate-length pseudomorphic HFET with 32-mW output power at 94GHz," IEEE Electron Device Letters, Vol. 10, No. 10, pp. 437-439, 1989.
- [5] E.F. Schubert, A. Fischer, and K. Ploog, "The delta-doped field-effect transistors ( $\delta$ -FET)," IEEE transactions on Electron Devices, Vol. 33, No. 5, pp. 625-632, 1986.
- [6] K.L. Tan, D.C. Streit, R.M. Dia, S.K. Wang, A.C.

Han, P.D. Chow, T.Q. Trinh, P.H. Liu, J.R. Velebir, and H.C. Yen, "High-power V-band pseudomorphic InGaAs HEMT," IEEE Electron Device Letters, Vol. 12, No. 5, pp. 213-214, 1991.

[7] Kiyomitsu Onodera, "Extremely Low-Noise Performance of GaAs MESFET's with Wide-Head T-shaped Gate," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 46, No 2, pp. 310-319, 1999.

[8] 차호영, "밀리미터파용 PHEMT 소자를 위한  $0.1\mu\text{m}$  급 T 게이트 제작 및 적용에 관한 연구," 서울대학교 전기공학부 석사논문, 1999.

[9] Philp A. Lamarre, "Developer Selection for T-shaped Gate FET's using PMMA/P[MMA-Co-MAA]/PMMA," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol 39, No 8. pp. 1844-1848, 1992.