

mm파 AlGaAs/InGaAs/GaAs Power PM-HEMT 제작 연구

이성진, 허종근, 이일형, 이진구
 동국대학교 전자공학과 반도체 및 집적회로 연구실
 E-mail : jkrhee@cakra.dongguk.ac.kr

Fabrication of AlGaAs/InGaAs/GaAs Pseudomorphic HEMT's for mm waves

S. D. Lee, J. G. Heo, I. H. Lee and J.K.Rhee
 S & IC Lab., Dept. of Elec. Eng., Dongguk Univ.

Abstract

In this study, power AlGaAs/InGaAs /GaAs PM-HEMT's for mm wave's were fabricated using Electron beam lithography and air-bridge techniques, and so on. DC and AC characteristics of the fabricated power PM-HEMTs were measured under the various bias conditions. For example, DC and RF characteristics such as S_{21} gain of 3.6 dB at 35 GHz, current gain cut-off frequencies of 45 GHz and maximum oscillation frequencies of 100 GHz were carefully analyzed for design methodology of sub-mm wave power devices.

1. 서론

AlGaAs/InGaAs 계의 wide-band gap 구조를 이용한 PM-HEMT (PseudoMorphic High Electron Mobility Transistors)는 conventional HEMT보다 주파수 특성과 저잡음·고전력 특성이 뛰어나 각광받고 있다.

본 논문에서는 E-beam을 이용한 T-gate 공정, 옴공정 및 격리 전극 상호연결을 위한 air-bridge 공정등의 제반 단위 공정을 이용하여 mm파 대역에서 응용가능한 전력용 PM-HEMT를 제작하였다.

제작된 전력용 PM-HEMT의 DC 및 RF 특성을 bias 조건, 단위 게이트폭 및 게이트핑거 수등에 따라 측정하고 후 비교·분석하였다.

2. Power PM-HEMT 제작

그림1은 전력용 PM-HEMT 제작에 사용한 PM-HEMT의 에피층 구조로 항복전압과 면전하밀도를 높이기 위하여 $5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 으로 도핑된 Si planar 도핑층을 삽입한 구조로 설계하였다.[1-2]

n+	GaAs (Si: $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)	400 Å
i	Al _{0.25} Ga _{0.75} As	250 Å
Si planar doping ($5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$)		
i	Al _{0.25} Ga _{0.75} As	50 Å
i	In _{0.2} Ga _{0.8} As	120 Å
i	GaAs	1 μm
Semi-insulating GaAs substrate		

그림 1. 전력용 PM-HEMT의 에피층 구조

본 논문에서 설계된 전력용 PM-HEMT는 단위 게이트폭이 40 μm, 60 μm 및 80 μm 각각에 대해 게이트 핑거수를 각각 4, 6, 8, 12 및 16 개로 하여 게이트 핑거수 및 총 게이트 폭에 따른 DC 및 RF 특성 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

전력용 PM-HEMT의 제작은, H₂SO₄ : H₂O₂ : H₂O 용액을 이용한 메사에칭, AuGe/Ni/Au 증착 및 Ohmic alloy, NH₄OH : H₂O₂:H₂O 용액을 이용한 리세스 에칭, T-게이트 형성 및 소오스 상호 연결을 위한 air-bridge 공정순으로 진행하였다.[3, 4]

특히, 본 논문에서 사용된 T-gate 제작 방식은 PMMA/P(MMA-MAA)/PMMA의 3층 레지스트 구조 위에 그림 2와 같이 E-beam 조사와 현상 공정을 순차적으로 반복하는 Double Exposure 방식[5]을 이용하여 T-gate의 신뢰성과 재현성이 향상되도록 하였다. 그림 3은 제작된 레지스트 패턴의 단면 SEM 사진으로 T-gate 의 Top 은 1um 이고 게이트 길이는 약 0.35 um이며 레지스트의 단면이 매우 선명함을 볼때 재현성과 신뢰성이 향상 될 수 있음을 알 수 있다.

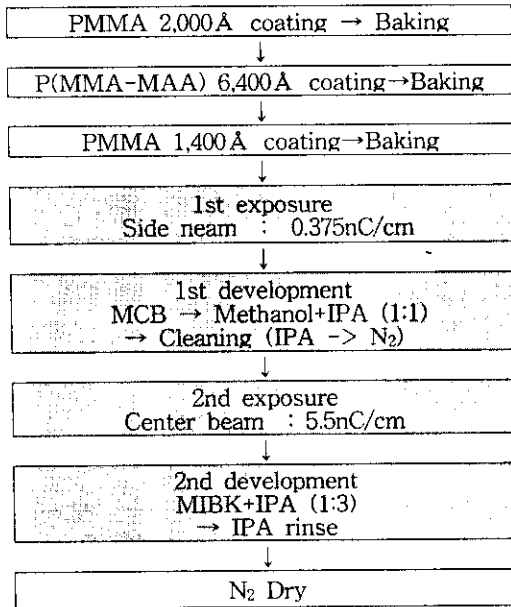


그림 2. E-beam lithography 공정 순서

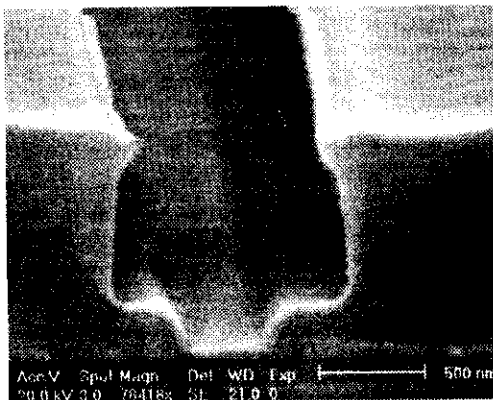
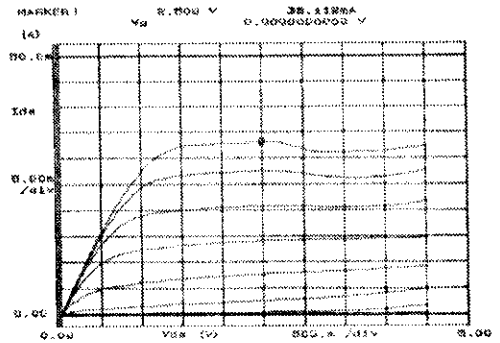


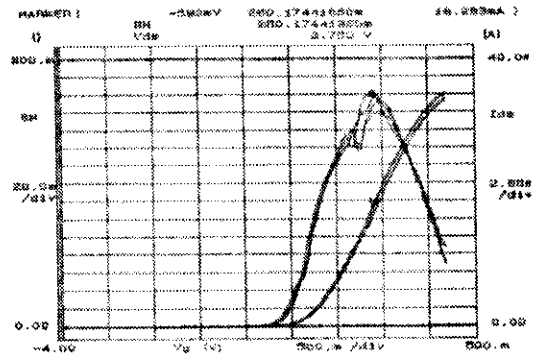
그림 3. Double exposure 방식으로 제작된 레지스트 패턴의 단면 SEM 사진

3. DC 특성 측정 및 분석

상기의 공정으로 제작된 전력용 PM-HEMT의 전류-전압 및 전달컨덕턴스 특성을 HP사의 4156A DC 파라미터 분석기로 측정하였다. 그림 4는 단위 게이트폭이 60 μm이고 핑거수가 2개인 소자의 I-V 및 전달컨덕턴스 특성으로 그림 4(a)에서 무류전압은 1.2 V, 핀치-오프 전압은 -1.5 V, Idss는 33.11mA 로 드레인 전류 밀도는 275mA/mm이다. 그림 4(b)에서 최대 전달컨덕턴스는 Vds = 2.75 V 및 Vgs = -0.592 V에서 260.17mS/mm 임을 알 수 있다.



(a) I-V 특성 (Vgs = -0.25 V/step)



(b) 전달컨덕턴스 특성

그림 4. PM-HEMT의 DC 특성

4. RF 특성 측정 및 분석

제작된 전력용 PM-HEMT의 S-파라미터를 HP 8722A vector network analyzer를 이용하여 측정하였다. 측정 바이어스 조건은 Vds = 2.5V, Ids = 1/2 Idss이고, 주파수는 1~38 GHz 범위에서 S-파라미터를 측정하였다.

그림 5는 게이트 폭이 60 um x 2 인

PM-HEMT의 이득 특성으로, 35 GHz 에서의 S_{21} dB는 3.6 dB, MAG는 11.15dB, 전류이득차 단주파수는 45 GHz 이상 및 최대 공진주파수는 100 GHz 이상을 얻었다.

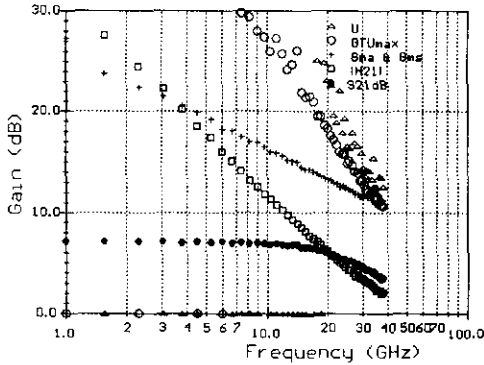
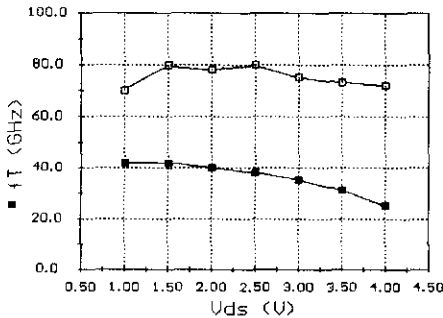
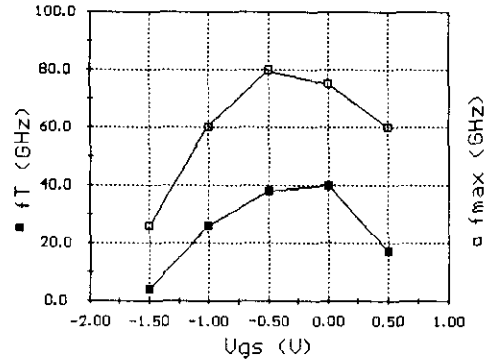


그림 5. 제작된 PM-HEMT의 이득 특성

제작된 PM-HEMT의 동작 전압에 따른 주파수 특성의 변화를 측정하였다. 측정에 사용된 소자는 단위게이트폭×게이트 핑거수가 $40\mu\text{m} \times 4$ 개인 소자이며, V_{ds} 와 V_{gs} 에 따른 차단주파수(f_T) 및 최대공진주파수(f_{max})의 변화를 측정하였다. 그림 6 (a)는 $V_{gs} = -0.5\text{V}$ 로 고정하고 V_{ds} 를 1~4V까지 변화시키면서 측정된 V_{ds} 에 따른 f_T 및 f_{max} 의 특성이다. $V_{ds} = 1\sim 1.5\text{V}$ 에서 차단주파수는 최대치인 44GHz를 나타내었으며, 최대공진주파수는 V_{ds} 가 1.5V~2.5V 범위에서는 80 GHz 정도로 일정하다가 3 V 이상에서는 72 GHz 정도로 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 그림 6 (b)는 V_{gs} 의 변화에 따른 f_T 및 f_{max} 의 특성변화 측정한 결과로 측정시 $V_{ds} = 2.5\text{V}$ 로 고정하였다. V_{gs} 를 -1.5V~0.5V까지 변화시켰을 때 $V_{gs} = 0.0\text{V}$ 에서 차단주파수는 40 GHz를 최대공진주파수는 $V_{gs} = -0.5\text{V}$ 에서 80 GHz의 최대치를 나타내었다.



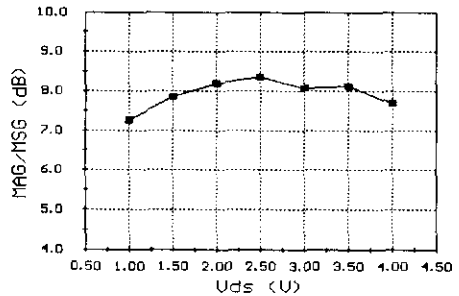
(a) V_{ds} 에 따른 f_T 및 f_{max} 의 변화



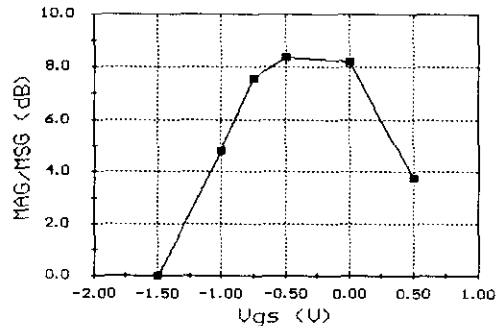
(b) V_{gs} 에 따른 f_T 및 f_{max} 의 변화

그림 6. V_{ds} 및 V_{gs} 에 따른 차단주파수와 최대 공진주파수의 변화

그림 7은 동작 전압에 따른 35 GHz 에서의 MAG의 변화를 측정한 결과이다. 그림 7(a)는 $V_{gs} = -0.5\text{V}$ 로 고정하고 V_{ds} 를 1.0~4.0V까지 변화시키면서 측정한 V_{ds} 에 따른 MAG의 특성이다. 그림에서 MAG의 최대치는 $V_{ds} = 2.5\text{V}$ 에서 8.3dB 이상이며, $V_{ds} = 1\sim 4\text{V}$ 범위에서 7.2dB 이상의 값을 나타냄을 알 수 있다. 또한 그림 7(b)는 $V_{ds} = 2.5\text{V}$ 로 고정하고 V_{gs} 를 편치 오프 전압인 -1.5 V에서 0.5 V까지 변화시켰을 때의 MAG로 $V_{gs} = -0.5\text{V}$ 에서 8.3dB의 최대치를 나타내었다.



(a) V_{ds} 에 따른 MAG의 변화



(b) V_{gs} 에 따른 MAG의 변화

그림 6. V_{ds} 및 V_{gs} 에 따른 35GHz 에서의 MAG의 변화

그림 7은 측정된 전력용 PM-HEMT의 35 GHz에서의 MAG를 단위게이트폭과 게이트 핑거수 별로 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림 7에 나타낸 소자는 단위 게이트폭이 40 μ m, 60 μ m 및 80 μ m 이고 게이트 핑거수는 2, 4, 6, 8, 12 및 16개이다. 그래프로부터 핑거수가 2개에서 16개로 증가함에 따라 MAG는 9dB에서 3 dB로 감소됨을 알 수 있다.

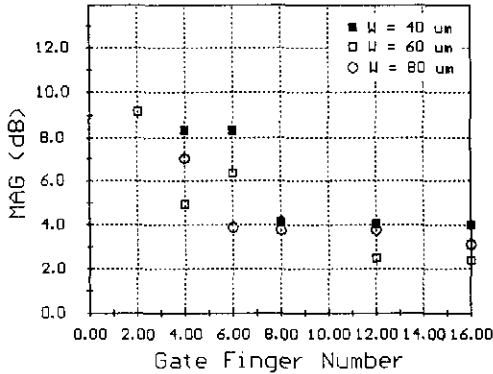


그림 7. 단위 게이트폭 및 게이트 핑거수에 따른 35 GHz 에서의 MAG 변화

5. 결론

본 논문에서는 Double exposure 방식의 전자선 묘화기술을 이용한 T-게이트 공정, 오믹 공정, air-bridge 공정등을 이용하여 mm 파 대역의 MMIC에 응용가능한 PM-HEMT를 제작한 후 DC 및 RF 특성을 측정하고 분석하였다.

단위 게이트폭이 60 μ m이고 핑거수가 2개인 PM-HEMT의 경우, 무릎전압은 1.2 V, 핀치-오프 전압 -1.5 V, $I_{dss} = 33.11\text{mA}$ (275mA/mm), 최대 $g_m = 260.17\text{mS/mm}$ 를 얻었으며, 35 GHz 에서의 S_{21} dB는 3.6 dB, MAG는 11.15dB, $f_T = 45$ GHz 이상 및 $f_{max} = 100$ GHz 이상을 얻었다. 제작된 전력용 PM-HEMT중에서 단위게이트폭 \times 게이트 핑거수가 40 μ m \times 4인 소자의 V_{ds} 및 V_{gs} 에 따른 차단주파수, 최대 공진주파수 및 35 GHz 에서의 MAG를 측정된 결과 $V_{ds} = 2.5\text{V}$ 및 $V_{gs} = -0.5\text{V}$ ($\sim 0.5 I_{dss}$)가 MMIC 구현시 최적의 동작점임을 알 수 있었다. 또한, 제작된 전력용 PM-HEMT의 게이트 핑거수 및 단위게이트폭에 따른 35 GHz 에서의 MAG를 분석한 결과, 단위 게이트폭이 증가하거나 게이트 핑거수가 증가할수록 MAG가 감소됨도 확인할 수 있었다. 따라서, 초고주파 특성은 그대로 유지하면서 출력을 높이기 위해서는 손실이 적은 전력 결합기/분배기의 연구도 필요하다.

상기와 같은 전력용 PM-HEMT의 제작 및 특성 분석과 관련된 제반 정보는 mm파 대역의 전력용 PM-HEMT의 최적화 설계·제작은 물론, MMIC 설계·제작에 직접 응용 가능하다.

(* 본 연구는 97년도 교육부 반도체 분야 학술연구 조성비 (ISRC 97-E-3102)에 의하여 연구되었음.)

參 考 文 獻

- 1] P. M. Smith, W. F. Kopp, et al., "Ku-band high efficiency high gain pseudomorphic HEMT," Electron Letter., vol. 27, no 3, pp. 270~271, 1991.
- 2] Dong-Ho Jeong, "DC and AC characteristics of AlGaAs/GaAs quantum-well delta-doped channel FET grown by LP-MOCVD," IEEE Electron Devices Letters, vol. 13, no. 5, May, 1992.
- 3] 이진구의 4명, "0.35 μ m T-gate Pseudomorphic HEMT 제작 연구", 대한전자공학회 추계종합 학술대회 논문집(B), wp19권 제2호, pp. 1245-1248, 1996. 11.
- 4] 이일형, 김상명, 윤관기, 신석현, 김영민, 우종천, 이진구, "Air-Bridge 공정을 이용한 C-band 전력용 GaAs MESFET의 제작 및 특성에 관한 연구," 제 1회 한국반도체 학술대회 논문집, 한국 물리학회, 대한전기학회, 대한 전기학회, 대한 전자공학회, pp. 283~284, 1992. 2
- 5] Y. Jin, "Ohmic Contact To n-Type Heterostructures And It's Application", Solid-State Electronics Vol. 34, No. 2, pp. 117-121, 1991