

論文2001-38SD-6-1

mm-wave용 전력 PHEMT 제작 및 특성 연구

(Studies on the Fabrication and Characteristics of PHEMT for mm-wave)

李聖大*, 蔡然植*, 尹寬基*, 李應鎬*, 李鎮九*

(Seong-Dae Lee, Yeon-Sik Chae, Kwan-Ki Youn, Eung-Ho Rhee, and Jin-Koo Rhee)

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 응용 가능한 AlGaAs/InGaAs PHEMT를 제작하고 특성을 분석하였다. 제작에 사용된 PHEMT 웨이퍼는 ATLAS 시뮬레이터를 이용하여 DC 및 RF 특성을 최적화 하였다. 게이트 길이가 0.35 μm 이고 서로 다른 게이트 폭과 게이트 핑거 수를 갖는 PHEMT를 전자빔 노광장치를 이용하여 제작하였다. 제작된 소자의 게이트 길이와 핑거수에 따른 RF 특성변화를 측정 분석하였다. 게이트 핑거 수가 2개인 PHEMT의 DC 특성으로 1.2 V의 무릎 전압, -1.5 V의 핀치-오프 전압, 275 mA/mm의 드레인 전류 밀도 및 260.17 mS/mm의 최대 전달컨덕턴스를 얻었다. 또한 RF 특성으로 35 GHz에서 3.6 dB의 S_{21} 이득, 11.15 dB의 MAG와 약 45 GHz의 전류 이득 차단 주파수 그리고 약 100 GHz의 최대 공진주파수를 얻었다.

Abstract

We report on the design, fabrication, and characterization of 0.35 μm -gate AlGaAs/InGaAs PHEMTs for millimeter-wave applications. The epi-wafer structures were designed using ATLAS for optimum DC and AC characteristics, 0.35 μm -gate AlGaAs/InGaAs PHEMTs having different gate widths and number of fingers were fabricated using electron beam lithography. Dependence of RF characteristics of PHEMT on gate finger with and number of gate fingers have been investigated. PHEMT having two 0.35 \times 60 μm^2 gate fingers showed the knee voltage, pinch-off voltage, drain saturation current density, and maximum transconductance of 1.2V, -1.5V, 275mA/mm, and 260.17mS/mm, respectively. The PHEMT showed f_T (current gain cut-off frequency) of 45GHz and f_{max} (maximum oscillation frequency) of 100GHz. S_{21} and MAG of the PHEMT were 3.6dB and 11.15dB, respectively, at 35GHz

I. 서론

미래의 지식·정보사회는 정보량의 증가와 초고속·

* 正會員, 東國大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Eng., Dongguk Univ.)

※ 본 연구는 98년도 교육부 반도체 분야 학술 연구

조성비 (ISRC 98-E-3102)에 의하여 연구되었습.

接受日字:2000年5月17日, 수정완료일:2001年5月28日

고품질의 정보교환 시대로 급속한 발전을 요구할 것이다. 이러한 요구를 충족시키기 위해서는 현재 사용중인 마이크로파 대역에서 밀리미터파 대역으로의 이용 주파수는 높아지고 대역은 광 대역화가 필요하다. 무선 통신기술의 발전 추세는 국내에서 현재 사용중인 800 MHz 대역의 셀룰라 및 1.8 GHz 대역의 PCS(Personal Communication Service)에서 2 GHz 대역의 IMT 2000, 2.45 GHz 대역의 WLL(Wireless Local Loop) 및 27 GHz 대역의 B-WLL(Broadband-WLL)로의 주파수

및 대역의 광대역화가 진행되고 있다. 또한, MVDS(Multi-point Video Distribution Service) 및 초고속 광대역 무선 통신을 위한 실내 무선 LAN(Local Area Network)의 경우에는 38 GHz 대 및 60 GHz 대를 사용하기 위한 연구도 진행되고 있다^[1-3]. 본 논문에서는 통신서비스의 주파수가 점점 높아짐에 따라 밀리미터파 대역에서 사용 가능한 AlGaAs/InGaAs/GaAs계 PHEMT(Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor)를 제작하였다. 에피층 구조에 대한 전류 밀도 및 전계분포를 2차원적으로 시뮬레이션이 가능하고 소자의 구조에 따른 RF특성을 분석할 수 있는 ATLAS 시뮬레이터를 이용하여 DC 및 RF 시뮬레이션을 통하여 PHEMT 웨이퍼의 에피층 구조를 설계하였으며, 설계된 에피 구조와 동일하게 MOCVD로 성장되어진 웨이퍼를 기반으로 하여 저 저항 오믹접촉 공정, 전자선 묘화 공정을 이용한 T-게이트 공정 그리고 격리된 전극의 상호연결을 위한 열적 증착 air-bridge 공정 등을 이용하여 PHEMT를 제작하였다. 밀리미터파 대역에서 사용되는 소자의 특성은 게이트의 길이를 짧게하여 높은 주파수에서 높은 전달컨덕턴스를 갖도록 해야 한다. 본 논문에서는 게이트 길이를 짧게 하면서도 게이트 저항을 줄이는 방법으로 Double-expose 방법을 이용하여 게이트의 머리부분을 증가시켜 게이트 저항을 줄일 수 있도록 제작하였다. 제작된 PHEMT의 DC 및 RF 특성 측정은 바이어스 조건, 단위 게이트 폭 및 게이트 핑거 수 등에 따라 실시하였고, 단위 게이트 폭과 게이트 핑거 수에 따른 특성을 분석하였다.

II. PHEMT의 DC 및 RF 시뮬레이션

그림 1은 PHEMT 시뮬레이션에 사용된 PHEMT의 에피층 구조로 항복전압과 2DEG(2 Dimensional Electron Gas) 층의 전하밀도를 높이기 위하여 $5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 으로 도핑된 Si planar 도핑 층을 삽입한 구조로 설계하였다.^[4-5] 그림 2는 본 논문의 시뮬레이션에 사용된 PHEMT의 단면 구조를 나타낸 것이며, PHEMT의 DC 및 RF 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 표 1에 나타내었다.

PHEMT의 DC 특성 시뮬레이션 결과 0.6 V의 무류 전압과 -1.5 V의 핀치-오프 전압을 얻었고, V_{gs} 는 0 V 와 V_{ds} 는 2.5V에서 280mA/mm의 드레인 전류 밀도 특성을 얻었다.

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

그림 1. PHEMT의 에피층 구조

Fig. 1. Epi structure of PHEMT.

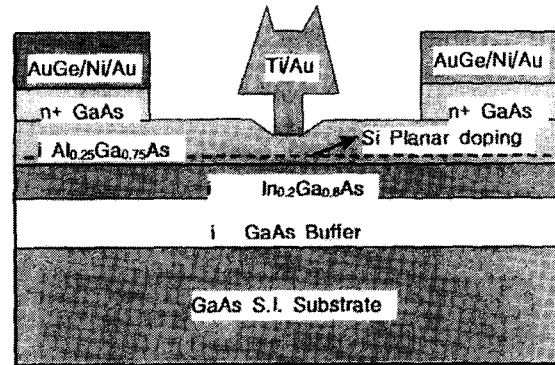


그림 2. PHEMT의 단면구조

Fig. 2. Cross sectional of PHEMT structure.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

source to drain space	3 μm
gate length	0.35 μm
gate width	60 $\mu\text{m} \times 2$ finger
frequency range	1 ~ 38 GHz
condition	$V_{ds} = 2.5 \text{ V}$ $I_{ds} = 0.5 I_{dss}$

III. PHEMT의 제작

본 논문에서 제작된 PHEMT는 단위 게이트 폭 40 μm , 60 μm , 80 μm 각각에 대하여 게이트 핑거 수를 각각 4, 6, 8, 12, 16 개로 하여 게이트 핑거 수 및 총 게이트 폭에 따른 DC, RF 특성 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

PHEMT의 제작을 위한 단위 공정은 $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ (1 : 8 : 160)용액을 이용한 메사 에칭, AuGe/Ni/Au의 금속 층 증착 공정 및 오믹 열처리를 이용한 저 저항 오믹접촉 공정, $NH_4OH : H_2O_2 : H_2O$ (1 : 1 : 2000)용액을 이용한 게이트 리세스 에칭 공정, 전자선 묘화 공정을 이용한 T-게이트 형성 공정 그리고 소오스를 상호 연결하기 위한 air-bridge 공정 등이다.

미세 게이트 패턴을 형성하기 위하여 전자선 묘화 공정을 사용하였으며, 게이트의 저항을 감소시키기 위하여 게이트이 단면적을 증가시킬 수 있는 T-게이트 공정 기술을 적용하였다. 적용된 T-게이트 제작 방식은 PMMA/P(MMA-MAA)/PMMA의 3층 레지스트 구조 위에 그림 3과 같이 전자선의 조사와 현상 공정을 순차적으로 반복하는 이중 노출방식을 이용하여 T-게이트의 신뢰성과 재현성이 향상되도록 하였다. 그림 4는 제작된 레지스트 패턴의 단면 SEM 사진으로 T-게이트의 머리 부분은 $1\mu m$ 이고 게이트 길이는 약 $0.35\mu m$ 이며, 레지스트의 단면 형상은 매우 선명함을 알 수 있다^[6].

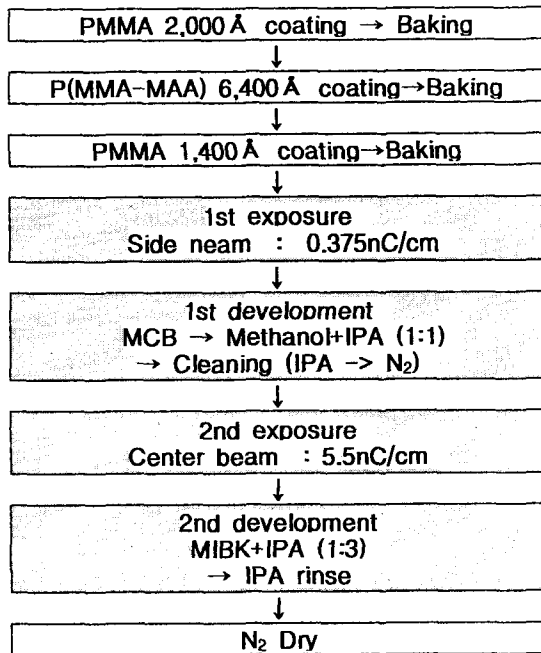


그림 3. E-beam lithography 공정 순서
Fig. 3. Procedure of E-Beam lithography process.

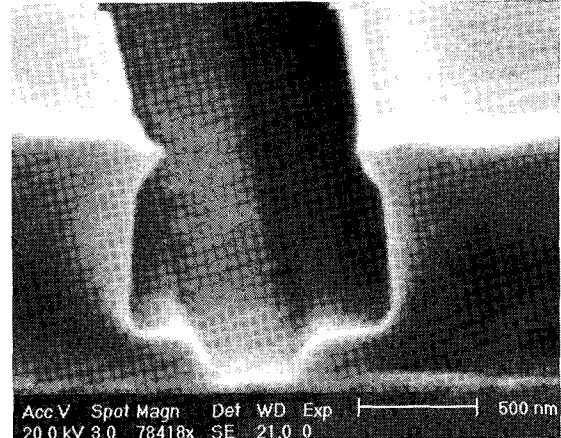


그림 4. 레지스트 패턴의 단면 SEM 사진
Fig. 4. Photomicrograph of the resist pattern.

또한, 격리된 소오스 전극을 상호 연결하기 위하여 air-bridge 공정을 사용하였으며, 그림 5는 열적 증착법을 이용한 air-bridge 공정의 순서를 나타낸 것이다^[7]. 그림 6은 상기의 단위 공정들을 이용하여 PHEMT를 제작하는 공정 순서를 나타낸 것이며, 오믹 금속을 Lift-off 한 후에 오믹성 접촉이 되도록 열처리 과정 (Alloy)을 하였다, 그림 7은 제작된 PHEMT의 표면 SEM 사진이다. 그림으로부터 소오스 전극과 패드가 air-bridge 형태로 상호 양호하게 연결되어 있음을 알 수 있다.

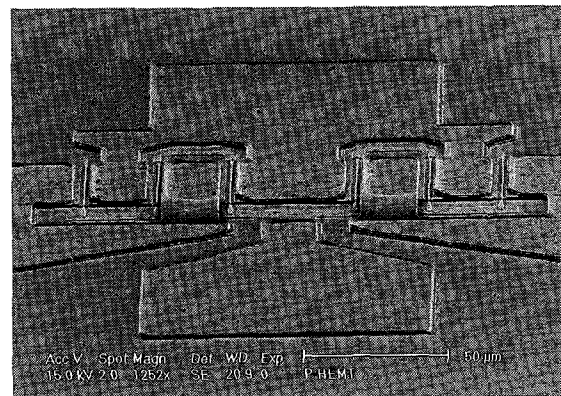


그림 7. 제작된 PHEMT의 표면 SEM 사진
Fig. 7. Photomicrograph of the fabricated PHEMT.

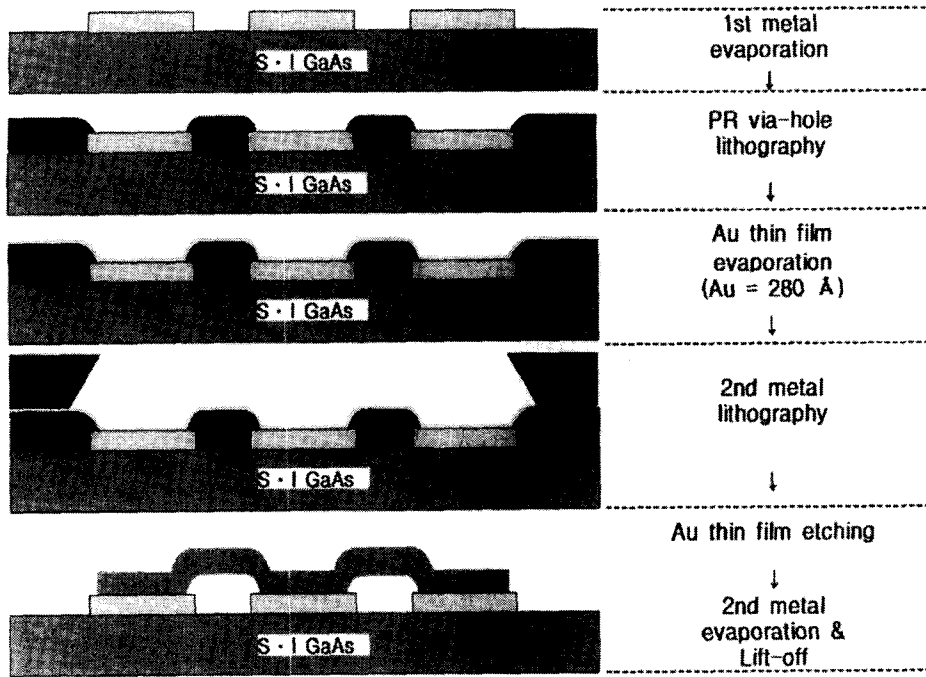
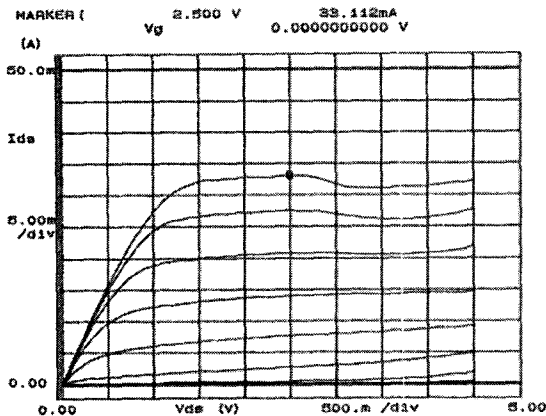


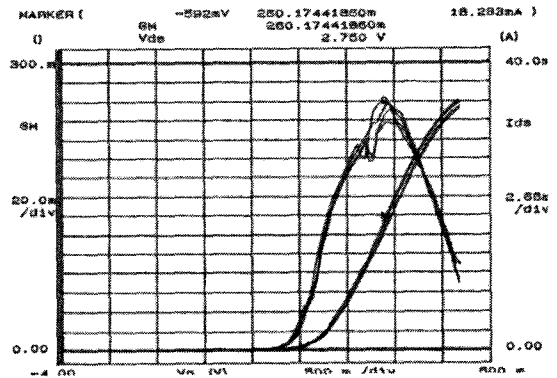
그림 5. Air-bridge 공정 순서
Fig. 5. Procedure of air-bridge process.

IV. DC 특성 측정 및 분석

제작된 PHEMT의 전류-전압 및 전달컨덕턴스 특성을 HP사의 4156A DC 파라미터 분석기로 측정하였다. 그림 8은 게이트의 길이가 0.35 μ m이고 단위 게이트 폭이 60 μ m이며, 핑거 수가 2개인 소자의 전류-전압 특성 및 전달컨덕턴스 특성으로, 그림 8(a)에서 무문전압은



(a) 전류-전압 특성
(a) I-V characteristics



(b) 전달컨덕턴스 특성
(b) Transconductance characteristics

그림 8. PHEMT의 DC 특성
Fig. 8. DC characteristics of fabricated PHEMT.

1.2V, 핀치-오프 전압은 -1.5V를 얻었고, Vgs는 0V와 Vds는 2.5V 조건에서 Idss는 33.11mA(드레인 전류 밀도 : 275 mA/mm)이다. 그림 8(b)에서 최대 전달컨덕턴스는 2.75V의 Vds와 -0.592V의 Vgs조건에서 260.17 mS/mm를 얻었다. 얻어진 특성은 시뮬레이션 결과와

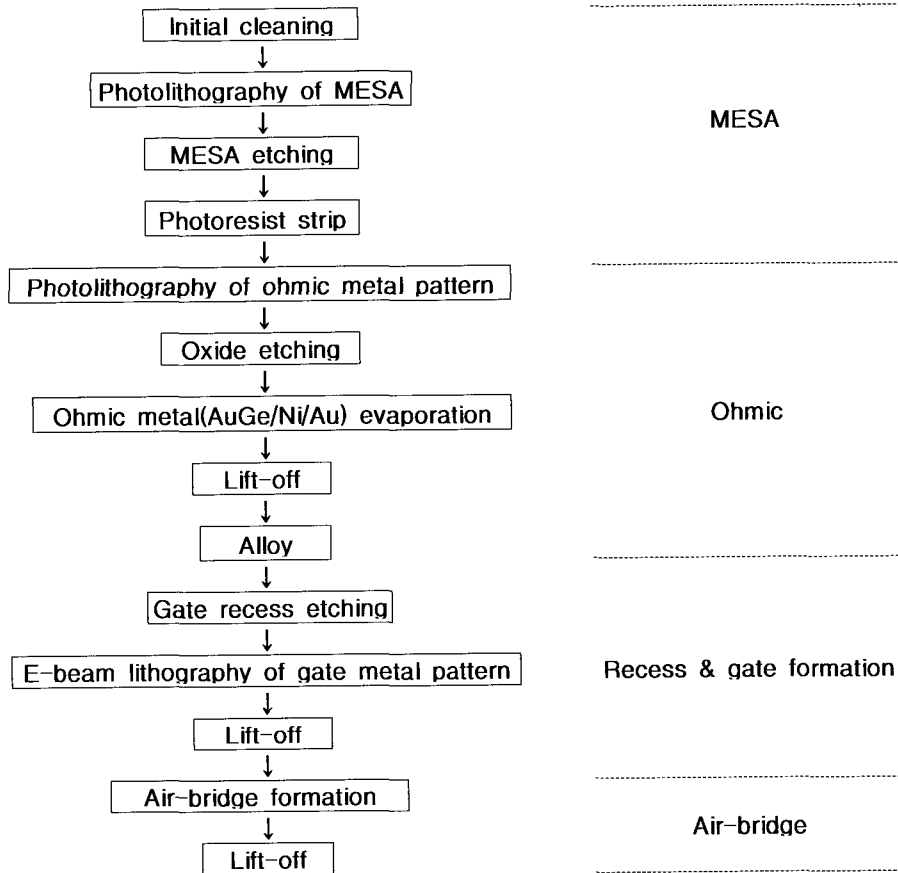


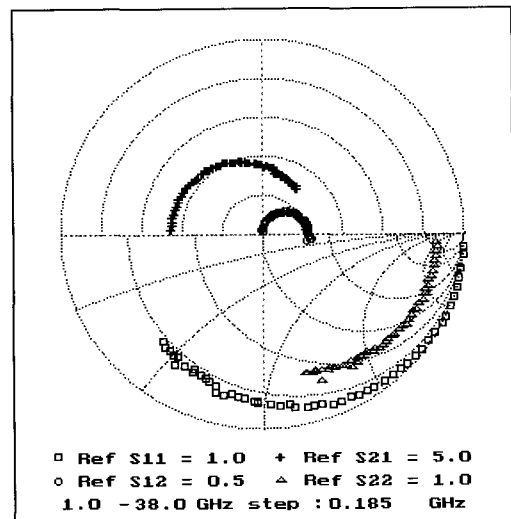
그림 6. 전력용 PHEMT의 제작 공정 순서
 Fig. 6. Procedure of the fabrication of power HEMT

유사하였으나, 무릎 전압 측정결과는 시뮬레이션 결과와 0.6V의 차이를 나타내었다. 이는 시뮬레이션에 적용된 오믹 접촉저항보다 제작된 소자의 접촉 저항이 더 크게 제작되어 무릎 전압의 차이를 나타낸 것으로 분석된다.

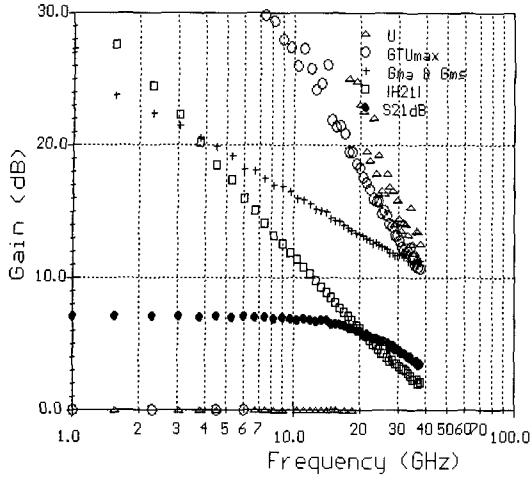
V. RF 특성 측정 및 분석

제작된 PHEMT의 S-파라미터를 HP 8722A vector network analyzer를 이용한 DC~38GHz 범위에서, Vds는 2.5V, Ids는 0.5 Idss 조건으로 측정하였다. 게이트 길이가 0.35 μm이고 게이트 폭이 60 μm이며, 게이트 핑거 수가 2개인 PHEMT의 측정된 S-파라미터와 이득 특성을 그림 9(a)에 나타내었다. 그림 9(b)로 부터 중심 주파수 35 GHz에서의 S21 이득은 3.6 dB, MAG (Maximum Available Gain)는 11.15 dB를 얻었다. 외삽된 전류이득 차단주파수(fT)와 최대 공진주파수(fmax)

는 45GHz와 100GHz를 각각 얻었다.



(a) S-파라미터
 (a) S-parameters



(b) 제작된 PHEMT의 이득 특성

(b) Gain of the fabricated PHEMT

그림 9. 제작된 PHEMT의 RF 특성

Fig. 9. RF characteristics of the fabricated PHEMT.

또한, 제작된 PHEMT의 단위 게이트 폭과 게이트 핑거 수에 따른 RF 특성 변화를 관찰하였다. 그림 10은 35 GHz에서 측정된 PHEMT의 MAG을 단위 게이트 폭과 게이트 핑거 수에 따라 측정한 결과이다. 그림 10에 나타난 소자의 단위 게이트 폭은 40 μ m, 60 μ m, 80 μ m 이고, 게이트 핑거 수는 2, 4, 6, 8, 12, 16개이다. 그림으로부터 단위 게이트 폭 또는 게이트 핑거 수가 증가함에 따라 MAG는 감소됨을 알 수 있다.

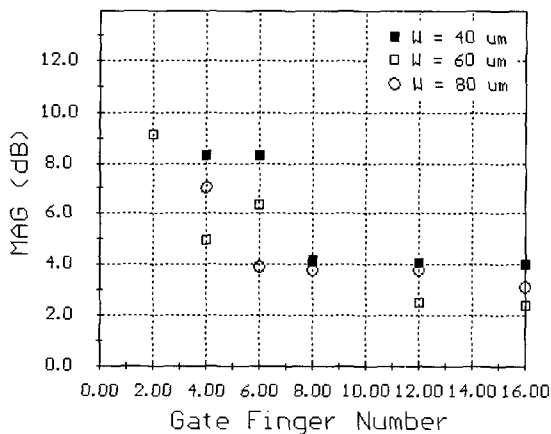


그림 10. 단위 게이트 폭 및 게이트 핑거 수에 따른 MAG 특성

Fig. 10. MAG variation as the unit gate-width and number of gate-fingers.

그림 11은 단위 게이트 폭과 게이트 핑거 수에 따른 35 GHz 중심주파수에서 RF 출력전력 특성 변화를 나타낸 것으로 단위 게이트 폭 또는 게이트 핑거 수가 증가할수록 RF 출력전력은 선형적으로 증가함을 알 수 있다^[8].

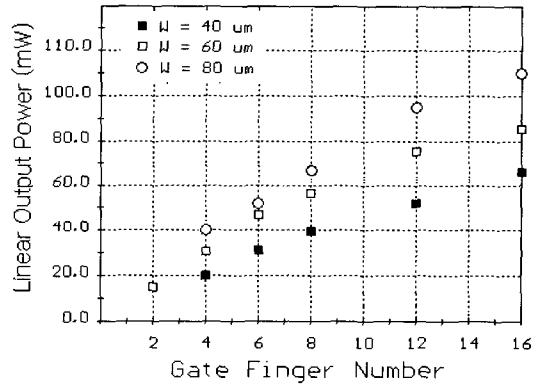


그림 11. 단위 게이트 폭 및 게이트 핑거 수에 따른 RF 출력 전력 특성

Fig. 11. RF output power as the unit gate-width and number of gate-fingers.

VI. 결 론

본 논문에서는 ATLAS 시뮬레이터를 이용한 DC 및 RF 특성 시뮬레이션을 통하여 밀리미터파 대역에서 사용 가능한 PHEMT의 에피층 구조를 설계하였다. 또한, 저 저항 오믹접촉 공정, 이중노출 방식의 전자선 묘화 기술을 이용한 T-게이트 공정 및 열적 증착 기술을 이용한 air-bridge 공정 등을 이용하여 밀리미터파 대역의 MMIC에 응용 가능한 PHEMT를 제작한 후 DC 및 RF 특성을 측정하고 분석하였다.

제작된 PHEMT의 DC 특성으로 게이트 길이가 0.35 μ m이고 단위 게이트 폭이 60 μ m이며, 핑거 수가 2개인 PHEMT의 경우, 무릎전압은 1.2V, 핀치-오프 전압은 -1.5V, 드레인 포화전류는 33.11mA(275mA/mm)를 얻었으며, 260.17mS/mm의 최대 전달컨덕턴스를 얻었다. 또한, 35GHz에서의 S₂₁ 이득은 3.6dB, MAG는 11.15dB를 얻었고, 45GHz의 전류이득 차단주파수와 100GHz의 최대 공진주파수를 얻었다.

제작된 PHEMT의 단위 게이트 폭 및 게이트 핑거 수에 따른 MAG 특성을 35GHz에서 분석한 결과, 단위 게이트 폭이 증가하거나 게이트 핑거 수가 증가할수록

MAG가 감소하는 특성을 알 수 있었다. 또한, 단위 게이트 폭 및 게이트 핑거 수에 따른 RF 출력전력 특성은 단위 게이트 폭이 증가하거나 게이트 핑거 수가 증가할수록 RF 출력전력은 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 본 논문에서 얻어진 PHEMT의 제작 공정과 측정된 특성은 밀리미터파 대역의 전력용 PHEMT의 최적화 설계·제작은 물론, MMIC 설계 및 제작에 직접 응용이 가능할 것으로 사료되며, 밀리미터파 대역에서 단위 게이트 폭 및 총 게이트 폭이 증가할수록 MAG가 포화되는 현상이 나타나므로 높은 출력을 얻기 위해서는 주파수 특성은 그대로 유지하면서 출력을 높일 수 있는 저 손실의 전력 결합기 및 분배기의 연구 필요성을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Don Renkowitz, "Satellite Systems For Cellular Telephones," *IEEE MTT-S Digest*, pp.1619~1621, 1994.
- [2] T. Apel, E. Creviston, S. Ludvik, L. Quist, and B. Tuch, "A GaAs MMIC Transceiver for 2.45 GHz Wireless Commercial Products," *IEEE 1994 Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium*, pp.15~18, May 1994.
- [3] I.D Robertson, "MMIC Design," *IEEE circuit and system series 7*, pp.27~28, 1995.
- [4] K. B chough, C. Caneau, et al, "Al_{0.25}In_{0.75}P/AsInAs/GaInAs graded channel PHEMT's with high channel breakdown voltage," *IEEE electron device letter*, vol.15, no.1, pp.33~35, Jan. 1994.
- [5] J. B. shealy M. M. Hashemi, et al, "High breakdown vlotage AlInAs/GaInAs junction modulated HEMT's with regrown ohmic contacts by MOCVD," *IEEE electron letters*, vol.14, no.12, Dec. 1993.
- [6] 전병철, 이진구외, "전자산 묘화를 이용한 0.2um의 게이트 갖는 MMIC용 wide-head T-gate 제작," *전자공학회 추계학술대회 논문집*, pp.187, 1999년 11월
- [7] 이진구 외, "열적 증착법을 이용한 Air-Bridge 제작과 그 응용에 관한 연구," *대한전자공학회지* 제 33권 A편, pp.53~58, 1996년 12월
- [8] John L.B walker, "High Power GaAs FET amplifier," *Artech house, boston london*, pp.4~6, 1993.

저 자 소 개

李 聖 大(正會員) 第 38卷 SD編 1-4號 參照

李 應 鎬(正會員) 第 32卷 A編 12號 參照

蔡 然 植(正會員) 第 35卷 D編 9號 參照

李 鎮 九(正會員) 第 32卷 A編 12號 參照

尹 寬 基(正會員) 第 33卷 A編 9號 參照