

論文2001-38SD-1-4

# AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT를 이용한 MIMIC Power Amplifier 제작 연구

(Studies on the MIMIC Power Amplifier using the AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT)

李聖大\*, 蔡然植\*, 尹容淳\*, 尹鎮燮\*, 李應鎬\*, 李鎮九\*

(Seong-Dae Lee, Yeon-Sik Chae, Yong-Soon Yoon, Jin-Seub Yoon, Eung-Ho Rhee, and Jin-Koo Rhee)

## 요약

본 논문에서는 전자선 묘화 방법을 이용하여 게이트 길이가 0.35  $\mu\text{m}$ 인 AlGaAs/InGaAs PHEMT를 제작하였다. 다른 게이트 폭과 게이트 핑거 수를 갖도록 제작된 PHEMT의 DC 및 AC 특성은 여러 가지의 바이어스 조건에서 측정하였다. 또한, 제작된 PHEMT와 수동 소자의 라이브러리를 이용하여 35 GHz에서 동작 가능한 MIMIC 전력증폭기를 설계 및 제작하였다. 제작된 MIMIC 전력증폭기는 27.6 GHz에서 7.9 dB의 이득과 -15 dB의 입력 반사 계수를 나타내었다.

## Abstract

0.35  $\mu\text{m}$ -gate AlGaAs/InGaAs PHEMTs have been fabricated using electron beam lithography. DC and AC characteristics of PHEMTs having different gate widths and number of fingers were measured at various bias conditions. An MIMIC power amplifier operating at 35 GHz has been designed and fabricated using passive element library. The power amplifier showed gain and input reflection coefficient of 7.9 dB and -15 dB, respectively, at 27.6 GHz.

## I. 서론

이동 주파수 및 대역폭의 증가에 따라 30 GHz 이상의 밀리미터파 대역은 차세대 초고속 무선 정보 통신의 중요 주파수 대역으로 인식되고 있으며, 현재 포화 고신뢰도, 저전력 및 고효율 특성을 갖는 AlGaAs/InGaAs/GaAs계의 이중접합 구조를 이용한 PHEMT (Pseudomorphic HEMT)의 제작과 이를 이용한

MIMIC 전력증폭기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 반도체 소자 및 집적회로 구현 기술의 축적을 통해 밀리미터파 대역의 각종 센서, 초고속 광대역 무선 통신 시스템, 무선 LAN(Wireless Local Area Network) 등은 물론, 군사용 고성능 장비에 응용하기 위한 연구도 활발하게 진행되고 있다<sup>[1-6]</sup>.

본 논문에서는 밀리미터파 대역의 소자 및 집적회로의 개발을 위한 필요한 제반 단위 공정에 대해 연구하였으며, 밀리미터파 대역의 전력용 PHEMT와 회로 정합을 위한 직사각형 나선인덕터, MIM(Metal Insulator Metal) 캐패시터, 저항 및 마이크로 스트립 라인 등의 수동소자를 직접 설계·제작하여 MIMIC을 위한 설계 라이브러리를 독자적으로 구축한 후 이를 이용하여 MIMIC 2단 전력증폭기를 설계하고 제작하였다.

\* 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:2000年12月14日

II. PHEMT 설계 및 제작

개발된 제반 단위 공정을 이용하여 밀리미터파 대역의 전력용 PHEMT를 제작하였다. 그림 1은 PHEMT 및 MIMIC 전력증폭기 제작에 사용된 에피층 구조로 소자의 항복전압을 증가시키고, 2DEG (2 Dimensional Electron Gas)층의 전자 밀도를 높이기 위하여 Si delta doping이 삽입된 구조를 설계한 후 동일한 구조를 지닌 웨이퍼를 구매하였다<sup>[7]</sup>.

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

그림 1. 에피층 구조  
Fig. 1. Epitaxial layer structure.

본 논문에서는 전체 게이트 폭에 따른 전력용 PHEMT의 특성 변화를 관찰하기 위하여 40 μm, 60 μm 및 80 μm의 단위 게이트 폭과 2, 4, 6, 8, 12 및 16개의 게이트 핑거 수를 갖는 PHEMT를 설계하고, PMMA/P(MMA-MAA)/PMMA 레지스트를 이용한 전자선 묘화 공정을 활용하여 제작하였다<sup>[8]</sup>.

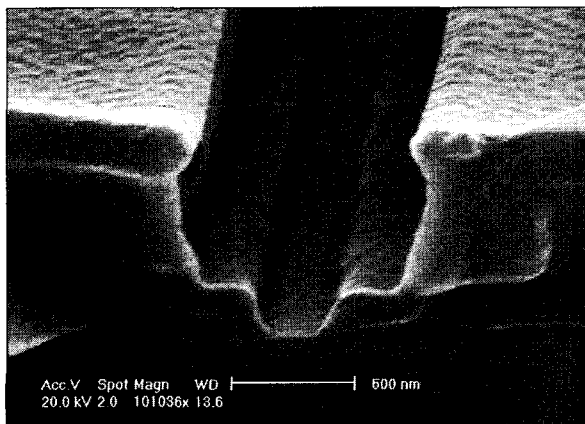


그림 2. 0.35 μm T-게이트 패턴의 단면 SEM 사진  
Fig. 2. Cross-sectional SEM image of 0.35 μm T-gate pattern.

다수의 핑거를 갖기 때문에 격리된 소오스 전극을 효과적으로 연결하기 위하여 금속 증착 방법을 이용한 에어 브리지 공정을 개발하고 적용하였다<sup>[9]</sup>. 그림 3과 4에 적용된 에어 브리지 공정 순서와 제작된 에어 브리지의 SEM 사진을 나타내었다.

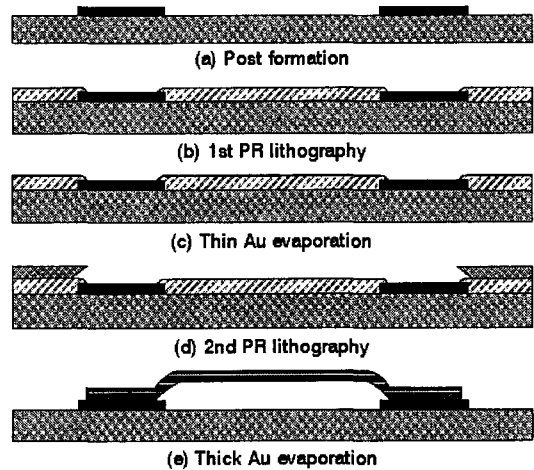


그림 3. 에어 브리지 공정 순서  
Fig. 3. Procedure of Air-bridge process.

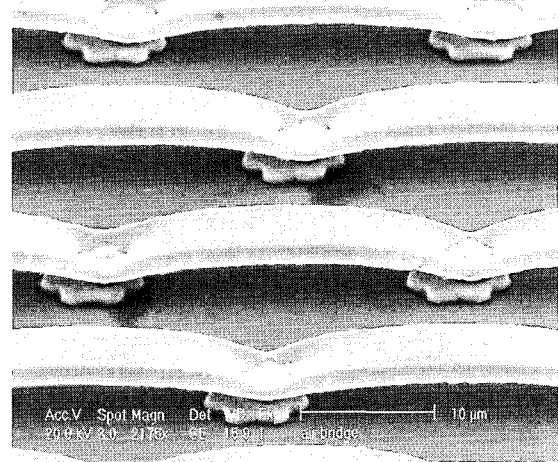
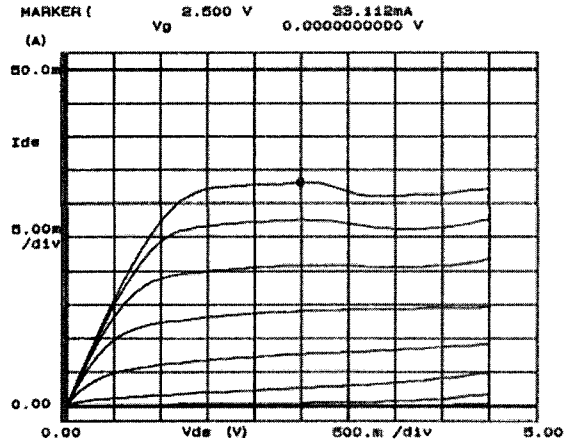


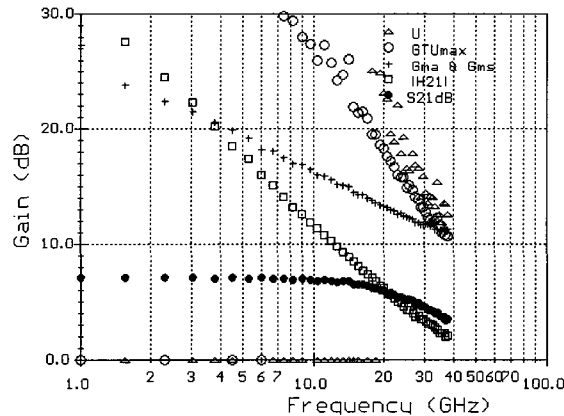
그림 4. 제작된 에어 브리지의 SEM 사진  
Fig. 4. SEM photograph of air-bridge.

게이트 길이가 0.35 μm이고 단위 게이트 폭이 60 μm이며, 핑거 수가 2개인 PHEMT의 DC 및 RF 특성을 그림 5에 나타내었다. 그림으로부터 무릎전압은 1.2 V, 핀치오프 전압은 -1.5V, 포화전류는 Vgs = 0 V에서 33.11 mA 로 드레인 전류 밀도는 275 mA/mm이며, 최대 전달컨덕턴스는 Vds = 2.75 V 및 Vgs = -0.592 V

에서 260.17 mS/mm의 DC 특성을 얻었다. 또한 RF 특성은 35 GHz에서 S21 이득은 3.6 dB, MAG는 11.15 dB, 전류이득차단주파수는 45 GHz 그리고 최대 공진주파수는 100 GHz 이상을 얻었다.



(a) 제작된 PHEMT의 I-V 특성  
(a) I-V characteristics of PHEMT



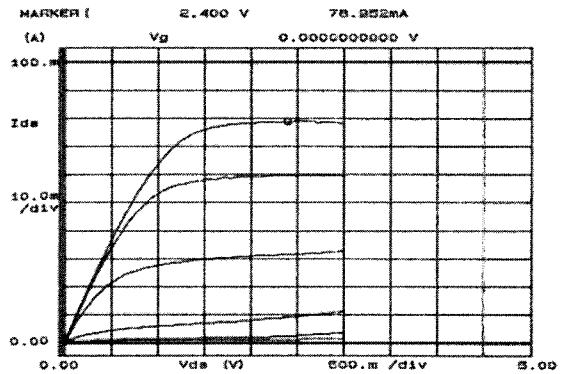
(b) 제작된 PHEMT의 이득 특성  
(b) Gain characteristics of PHEMT

그림 5. 60 μm × 2 finger PHEMT 특성  
Fig. 5. Characteristics of 60 μm × 2 fingers PHEMT.

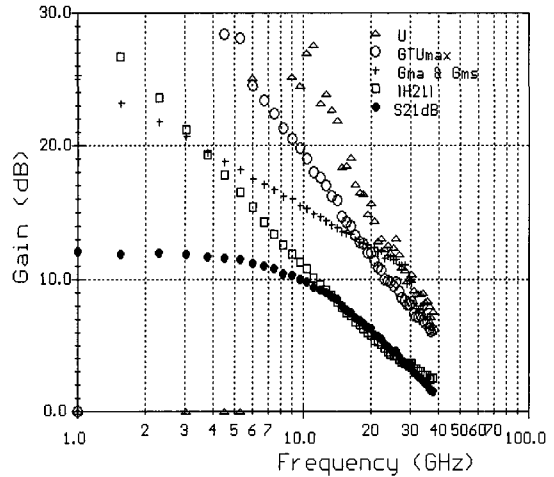
그림 6에 게이트 길이가 0.35 μm이고 단위 게이트 폭이 80 μm이며, 핑거 수가 4개인 PHEMT의 DC 및 RF 특성을 나타내었다. 그림에서 무류전압은 1.2 V, 편치 오프 전압은 -1.5V, 포화전류는 Vgs = 0 V에서 78 mA(드레인 전류 밀도 : 244 mA/mm)이며, 최대 전달 컨덕턴스는 Vds = 2.25 V 및 Vgs = -0.535 V에서 199 mS/mm의 DC 특성을 얻었다. 또한, 35 GHz에서 S21

이득은 2.01 dB, MAG는 7.03 dB, 전류이득차단주파수는 44 GHz 및 최대 공진주파수는 70 GHz 이상을 얻었다.

전력용 PHEMT의 단위 게이트 폭과 게이트 핑거 수에 따른 35 GHz에서의 MAG (Maximum Available Gain)의 특성 변화를 그림7에 나타내었다. 동일한 게이트 핑거 수에 대하여 단위 게이트 폭이 증가할수록 MAG는 감소하였으며, 또한 동일한 단위 게이트 폭에 대하여 게이트 핑거 수가 증가할수록 MAG가 감소되는 특성을 얻었다.



(a) 제작된 PHEMT의 I-V 특성  
(a) I-V characteristics of PHEMT



(b) 제작된 PHEMT의 이득 특성  
(b) Gain characteristics of PHEMT

그림 6. 80 μm × 4 finger PHEMT 특성  
Fig. 6. Characteristics of 80 μm × 4 fingers PHEMT.

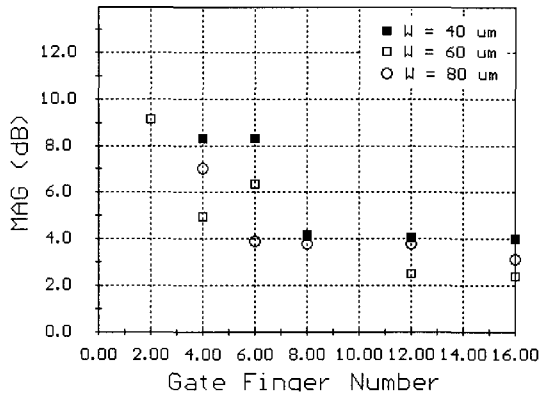


그림 7. PHEMT의 MAG 변화 특성 (@ 35 GHz)  
Fig. 7. MAG characteristics of PHEMT (@ 35 GHz).

### III. MIMIC 전력증폭기의 설계

상기에서 설계 제작된 전력용 PHEMT, 직사각형 나선 인덕터, MIM 캐패시터, 저항 및 마이크로 스트립 라인등의 수동소자 라이브러리를 이용하여 35 GHz에서 동작하는 MIMIC 전력증폭기를 설계하였다.

입력단에는 게이트 길이가 0.35  $\mu\text{m}$ 이고 단위 게이트 폭이 60  $\mu\text{m}$ 이며, 2개의 게이트 핑거를 갖는 PHEMT를 사용하였다. 또한 입력단에서 정합회로의 구현을 위해 공액 정합 방법을 사용하여 정합 회로를 구현하였으며, 출력단에는 게이트 길이가 0.35  $\mu\text{m}$ 이고 단위 게이트 폭 및 핑거 수가 각각 80  $\mu\text{m}$ 와 4개인 PHEMT를 사용하였으며, 입력단 정합 회로와 같이 공액 정합 방법을 이용하여 설계하였다. 또한, 입력단과 출력단을 연결하기 위한 중간단 정합 회로로 병렬 L(0.41 nH, 0.1 nH), 직렬 L(0.55 nH), 직렬 C(0.26 pF)을 사용하였으며 직렬 캐패시터는 정합과 함께 DC blocking 기능도 포함하도록

설계하였다. 그림 8은 설계된 MIMIC 전력증폭기의 회로도를 나타낸 것이다.

설계된 MIMIC 전력증폭기는 Libra를 이용한 시뮬레이션 을 통하여 35 GHz에서 10.82 dB의 S21이득과 -16.27 dB의 입력반사계수를 얻었고 그림 9에 나타내었다.

설계된 MIMIC 전력증폭기를 제작하기 위하여 7장의 마스크를 설계 및 제작하였으며, 칩의 크기는  $1.4 \times 0.8 \text{ mm}^2$ 이다.

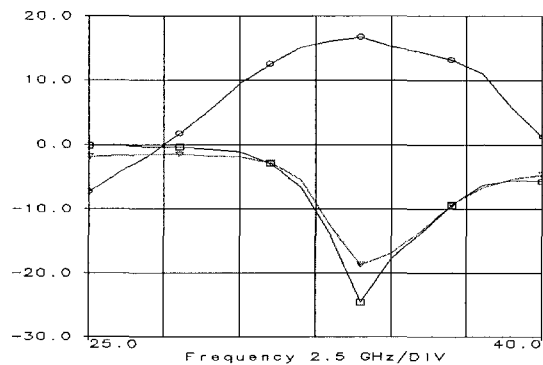


그림 9. MIMIC 전력 증폭기의 시뮬레이션 결과  
Fig. 9. Simulation results of MIMIC power amplifier.

### IV. MIMIC 전력증폭기의 제작 및 측정

설계된 MIMIC 전력증폭기를 제작하기 위한 마스크는 PHEMT 제작공정과 수동소자 제작공정을 통합한 일괄공정으로 제작할 수 있도록 3장의 PHEMT 마스크와 4장의 수동소자 마스크 등 총 7장의 마스크로 구성되어 있다. 또한, 게이트 패턴은 E-beam을 이용하여

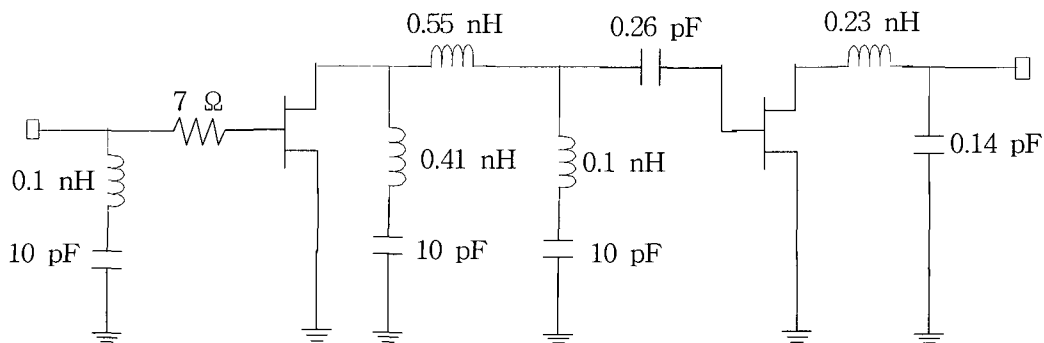


그림 8. 설계된 MIMIC 전력증폭기 회로도  
Fig. 8. Schematic of designed MIMIC power amplifier.

웨이퍼에 직접 조사하는 방식을 사용하였기 때문에 마스크를 제작하지 않았다.

그림 10은 상기의 제작된 마스크를 이용하여 제작되는 MIMIC 전력증폭기의 공정 순서를 나타낸 것으로, MESA, 오믹, 게이트 형성, 금속 박막 저항 형성, 1차 금속층 형성, 유전 박막 적층 및 식각, 에어 브리지 및 후면 공정 등 8단계로 구성되어있으며, 그림 11에 상기의 공정을 적용하여 제작된 MIMIC 전력증폭기의 표면 사진을 나타내었다.

상기의 설계 및 제작 공정을 통해 직접 제작된 MIMIC 전력 증폭기의 주파수 특성을 HP8510C 회로망 분석기(Vector Network Analyzer)로 측정하였다. 모든 측정은 Vector Network Analyzer를 TRL(Thru, Reflect, Load) on-wafer calibration kit를 이용하여 보

정한 후 microwave on-wafer probe를 이용하여 직접 측정하였으며, 전력용 PHEMT의 게이트 및 드레인 바이어스는 외부에서 칩 내부로 직접 인가하였다.

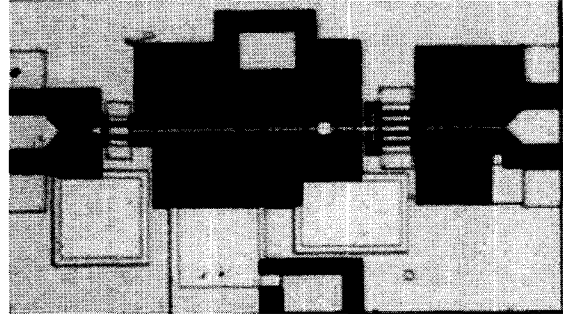


그림 11. 제작된 MIMIC 전력증폭기의 표면 사진  
Fig. 11. Photograph of fabricated MIMIC power amplifier.

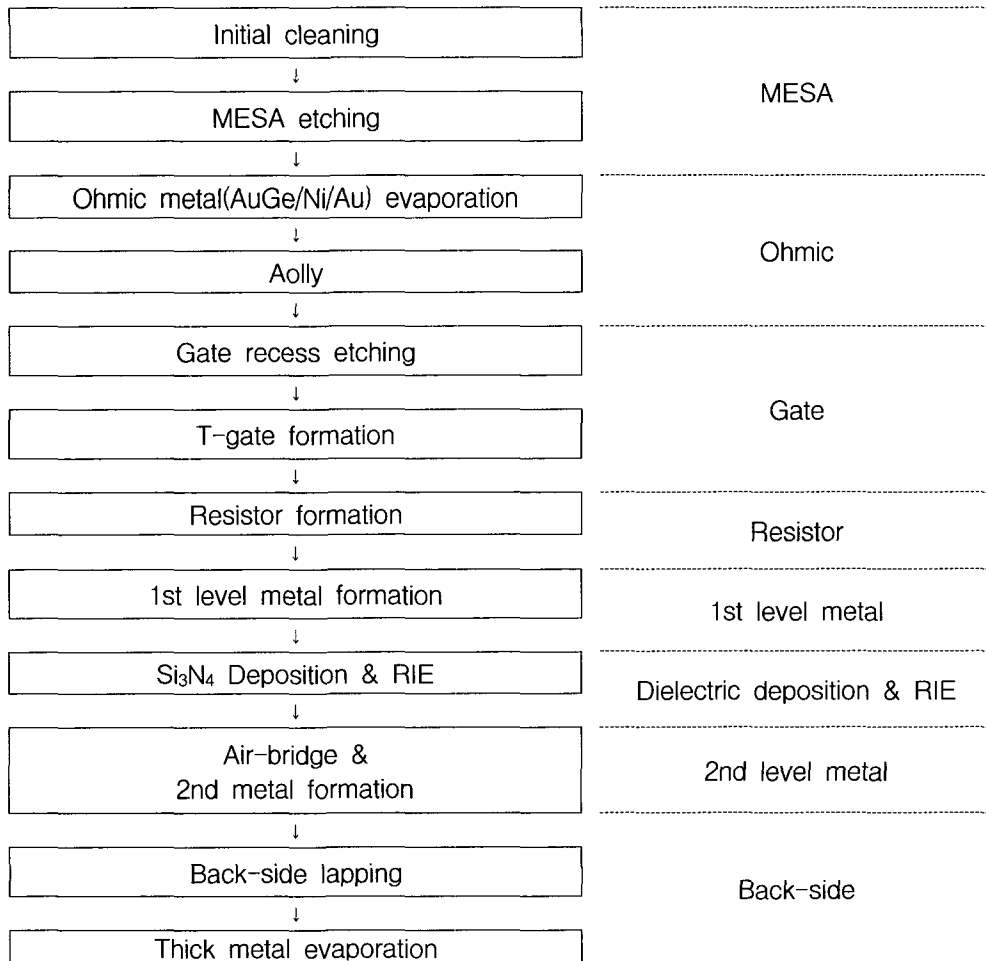


그림 10. MIMIC 전력증폭기 공정 순서  
Fig. 10. Procedure of MIMIC power amplifier processes.

그림 12는 측정된 소신호 이득 특성을 나타낸 것으로, 27.6 GHz에서 7.9 dB의 최대 이득 특성과 -15 dB의 입력 반사계수 특성을 나타내고 있다. 이득은 설계 값에 비해 전체적으로 감소하였으며, 입력 반사계수는 25 GHz~35 GHz 전 대역에서 -10 dB 이하를 나타내어 설계 값보다 광대역 특성을 갖는 것을 볼 수 있다. MIMIC 전력증폭기의 이득 감소는 전력용 PHEMT의 특성 변화 때문에 정합 조건이 변화하여 이득이 감소한 것으로 사료된다. 이러한 원인으로는 MIMIC 전력증폭기의 입·출력단 PHEMT의 포화 전류 증가, 핀치 오프 전압 및 무릎전압의 증가로 이득 특성이 변화되었기 때문이고, 채널포화전류, gm 및 핀치 오프 전압 등의 변화는 게이트 금속 증착 직전의 채널 포화전류가 설계 값과 정확하게 일치하지 않기 때문이다. 본 논문을 통하여 MIMIC 전력증폭기의 성능을 개선할 수 있는 재현성 있는 공정의 확립이 필수적임을 알 수 있었다.

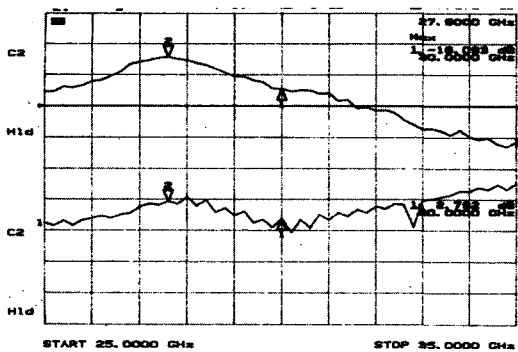


그림 12. MIMIC 전력증폭기의 소신호 이득특성  
Fig. 12. Small signal gain characteristics of MIMIC power amplifier.

### V. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역의 단일칩 집적회로 개발을 위해 제반 단위 공정을 바탕으로 전력용 PHEMT와 회로 정합에 필요한 수동소자를 설계·제작하였으며, 이를 이용하여 30 GHz 이상에서 동작하는 MIMIC 2단 전력증폭기를 설계·제작하였다.

MIMIC 전력증폭기에 사용한 PHEMT의 특성은 게이트 길이가 0.35  $\mu\text{m}$ 이고, 단위 게이트 폭이 60  $\mu\text{m}$ 이며, 핑거 수가 2개인 경우, 무릎전압은 1.2 V, 핀치 오프 전압은 -1.5 V,  $I_{dss}$ 는 33.11 mA (275 mA/mm), 최

대 gm은 260.17 mS/mm를 얻었으며, 35 GHz에서의 S21 이득은 3.6 dB, MAG는 11.15 dB, fT는 45 GHz 및 fmax는 100 GHz 이상을 얻었다. 0.35  $\mu\text{m}$ 의 게이트 길이를 갖고 단위 게이트 폭이 80  $\mu\text{m}$ 이고 핑거 수가 4개인 PHEMT의 경우, 무릎전압은 1.2 V, 핀치 오프 전압은 -1.5 V,  $I_{dss}$ 는 78 mA (244 mA/mm), gm은 199 mS/mm를 얻었으며, 35 GHz에서 S21 이득은 2.01 dB, MAG는 7.03 dB, fT는 44 GHz 및 fmax는 70 GHz 이상을 얻었다. 또한, 제작된 PHEMT의 게이트 핑거 수 및 단위 게이트 폭에 따른 35 GHz에서의 MAG를 분석한 결과, 단위 게이트 폭이 증가하거나 게이트 핑거 수가 증가할수록 MAG가 감소함을 확인하였다. MIMIC 2단 전력증폭기의 입력단에는 60  $\mu\text{m} \times 2$  PHEMT 사용하고, 출력단은 80  $\mu\text{m} \times 4$  인 PHEMT를 각각 이용하여 설계하였으며, 회로 정합을 위한 직사각형 나선인덕터, MIM 캐패시터 및 Ti 금속저항 및 마이크로 스트립 라인 등의 직접 제작하여 측정된 데이터를 이용하였다. 설계된 MIMIC 전력증폭기는 시뮬레이션 결과, 35 GHz에서 10.82 dB의 S21 이득과 -16.27 dB의 입력 반사계수 특성을 얻었다. 또한 안정도 K는 5.4와 잡음 지수는 2.07 dB의 결과를 얻었다.

제작된 MIMIC 2단 전력증폭기는 27.6 GHz에서 7.9 dB의 최대 S21이득과 -15 dB의 입력 반사계수 특성을 얻었다. 측정된 결과와 설계 값의 차는 MIMIC 전력증폭기의 제작 공정 과정이 오차와 측정 손실 그리고 열 특성에 의한 것으로 판단된다. 따라서, 설계 값과 일치하는 특성을 얻을 수 있도록 공정의 재현성과 측정기술의 개발이 필요함을 알 수 있었다.

본 논문에서 수행된 밀리미터파 대역의 전력용 PHEMT 및 MIMIC 전력증폭기의 설계 및 제작에 관한 연구결과는 점차 막대한 시장이 형성될 것으로 예측되는 MIMIC 분야의 기반기술이 될 것으로 판단된다.

### Reference

- [1] Dwight C. Streit, et. al., "High-Gain W-Band Pseudomorphic InGaAs Power HEMT's," IEEE Electron Devices Letters, Vol. 12, NO. 4, pp. 149-150. April 1991.
- [2] John C. Huang, et. al., "A double-recessed

- Al<sub>0.24</sub>GaAs/In<sub>0.16</sub>GaAs Pseudomorphic HEMT for Ka- and Q-band Power Applications," IEEE Electron Devices Letters, VOL. 14, NO. 9, pp. 456-458. September 1993.
- [3] P. Bourne, et. al., "35 GHz And 60 GHz Low Noise HEMT MIMIC amplifiers For Civil Applications," IEEE MTT-S Digest, pp. 1613-1616.1992.
- [4] S. Weinreb, et. al., "W-Band 0.3 W PHEMT MIMIC Power Amplifier Module," IEEE 1995 Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits symposium, 1995.
- [5] T. H. Chen, et. al., "0.1 Watt Q-band Class A Pseudomorphic HEMT MMIC Amplifier", IEEE MTT-S Digest, pp. 805-808. 1994.
- [6] A. K. Sharma, et. al., "MILLIMETER-WAVE HIGH POWER AMPLIFIERS USING PSEUDOMORPHIC HEMTS", IEEE MTT-S Digest. pp. 813-816. 1994.
- [7] Dong-Ho Jeong, et. al., "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.
- [8] 전병철, 이진구의, "전자산 묘화를 이용한 0.2um의 게이트 갖는 MMIC용 wide-head T-gate 제작," 전자공학회 추계학술대회 논문집, pp. 187, 1999년 11월
- [9] 이진구 외, "열적 증착법을 이용한 Air-Bridge 제작과 그 응용에 관한 연구", 대한전자공학회지 제 33권 A편, PP. 53-58, 1996년 12월

---

 저 자 소 개
 

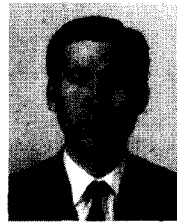
---

## 李 聖 大(正會員)

1971년 6월생. 1998년 2월 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2000년 2월 동국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 2000년 3월~현재 동국대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관심 분야는 화합물 반도체 소자 및 초고주파 집적회로 설계 및 제작 등

蔡 然 植(正會員) 第 35卷 D編 第 9號 參照

尹 鎮 燮(正會員) 第 32卷 A編 第 12號 參照



## 尹 容 淳(正會員)

1957년 2월생. 1988년 2월 서울산업대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1990년 8월 동국대학교 정보산업대학원 정보통신과 정보통신 전공(공학석사). 1997년 3월~현재 동국대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관심 분야는 RFIC 및 밀리미터파 무선전송 시스템, MIMIC 설계 등

李 應 鎬(正會員) 第 32卷 A編 第 12號 參照

李 鎮 九(正會員) 第 32卷 A編 第 12號 參照