

밀리미터파 대역 단일 집적 증폭기

지흥구^{1*}, 오승엽²

¹한국전자통신연구원 무선RF탑재기술연구팀, ²충남대학교 전자공학과

Monolithic Integrated Amplifier for Millimeter Wave Band

Hong-Gu Ji^{1*} and Seung-Hyeub Oh²

¹Wireless & Payload Research Team, Electronics and Telecommunications Research Institute,

²Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

요약 본 논문은 U-band(40 ~ 60 GHz)대역에 최적화된 epitaxial로 pHEMT(Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor)을 제작, 대신호 모델링하여 특성분석 및 60 GHz 대역의 3단 증폭기를 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)로 설계 제작하였다. 본 논문에 사용된 pHEMT는 0.12 μm 의 게이트 길이와 총 게이트 면적 100 μm , 200 μm 를 사용하여 대신호 모델링하였으며 설계시 안정도의 향상을 위하여 부궤환회로와 함께 MIM(Metal-Insulator-Metal) 커패시터 대신 MCLF(Microstriop Coupled Line Filter)를 사용하여 안정도를 향상시켰다. 제작결과 크기가 $2.5 \times 1.5 \text{mm}^2$ 이고 소모된 전류는 약 40 mA, 동작주파수 59.5 ~ 60.5 GHz에서 이득 19.9 dB ~ 18.6 dB, 입력정합특성 -14.6 dB ~ -14.7 dB, 출력정합 특성 -11.9 dB ~ -16.3 dB와 출력 -5 dBm의 특성을 얻었다.

Abstract In this paper, 3 stage amplifier MMIC was designed and fabricated with U-band optimized epitaxial pHEMT that produced by large signal characterization and modeling for 60 GHz band. The pHEMT used in this paper, the gate 0.12 μm length and total gate width of 100 μm , 200 μm has been modeled using the large signal designed with negative feedback and MCLF instead of MIM capacitor for improving stability. Fabricated MMIC $2.5 \times 1.5 \text{mm}^2$ size, current about 40 mA, operating frequency 59.5 ~ 60.5 GHz, gain 19.9 ~ 18.6 dB, input matching characteristics -14.6 ~ -14.7 dB, output matching characteristics -11.9 ~ -16.3 dB and output -5 dBm characteristics were obtained.

Key Words : pHEMT, MMIC, Amplifier, 60 GHz

1. 서론

향후 정보통신망의 통합은 데이터 전송속도 및 이동성을 높이는 방향으로 발전하며, 초고속, 대용량, 무선 멀티미디어 통신에 대한 가입자의 수요증가에 부응하기 위하여 Tbps(Terra bit per second)급 서비스가 가능한 정보통신 기술로 발전될 전망이다. 이미 선진국들은 이와 같은 차세대 서비스인 WPAN(Wireless Personal Area Network), 무선 전송방식의 Kios등의 서비스를 준비 중에 있으며 이러한 서비스에 가장 적합한 60 GHz 대역의 주파수 활용에 박차를 가하고 있다. 또한 60 GHz 대역은 반송파 주파수가 높기 때문에 허용주파수 대역폭이 수GHz까지

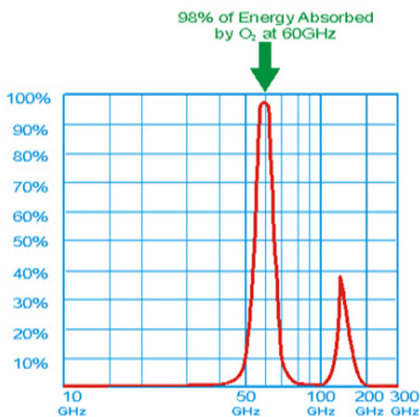
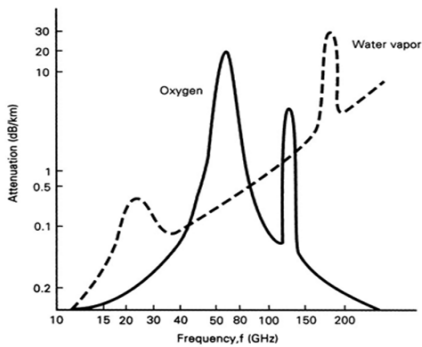
도 가능함으로 초고속 데이터 통신이나 멀티미디어 데이터 전송에 적합하다. 그림 1에서 보는 바와 같이 주파수 특성 또한 산소분자에 의한 신호의 98%는 대기중 산소분자에 흡수되는 현상 때문에 동일 채널의 간섭확률이 작아짐으로 주파수 재사용으로 인한 경제적인 시스템의 구성이 가능하고 밀리미터파 대역의 파장은 아주 작기 때문에 안테나 및 송수신기의 소형화가 가능함과 동시에 기본적으로 저전력을 사용하게 되어 있어 인체에 미치는 영향이 작다.

*교신저자 : 지흥구(hkji@etri.re.kr)

접수일 10년 09월 02일

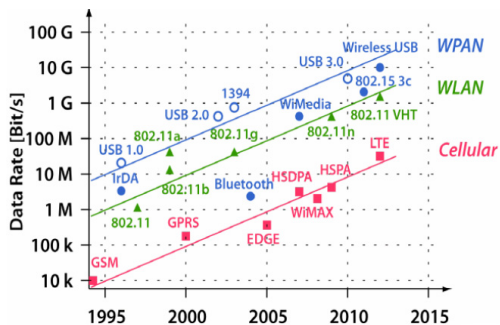
수정일 (1차 10년 09월 17일, 2차 10년 10월 11일)

게재확정일 10년 10월 15일



[그림 1] 밀리미터파대역 전파전파 특성[1]

이러한 밀리미터파에 의한 무선통신기술은 지금까지 제공되던 서비스에서 한 차원이 향상된 새로운 초고속 고품질의 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있을 뿐 아니라 다른 정보통신산업 및 의료 분야에서도 폭 넓게 활용될 예정이고 광통신 기술과 결합하여 유/무선이 통합된 초고속 광대역 RoF(Radio over Fiber) 기술로 발전되어 활발히 연구되고 있으며 이러한 60 GHz 대역은 전 세계적으로 비인가 주파수 대역으로 규정하고 있으므로 각 국가간 통신 호환성 또한 큰 장점으로 부각되고 있다.[2]



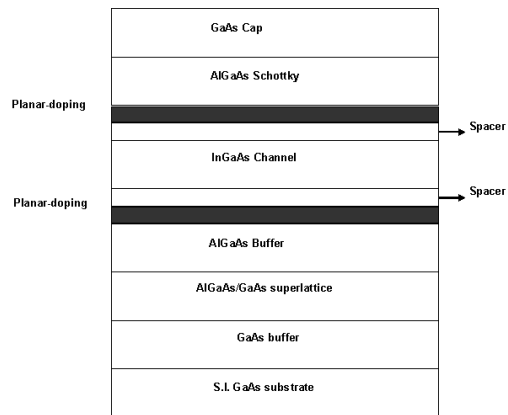
[그림 2] 데이터 전송량에 따른 발전방향^[3]

2. 본론

본 논문에서는 이러한 밀리미터파대역의 부품개발의 일환으로 밀리미터파 대역에 최적화된 GaAs기판을 성장시켜 ETRI 0.12 μm pHEMT 공정을 이용하여 소자를 만들고 이를 대신호 모델링하여 60 GHz대역의 3단 증폭기를 설계하였으며 안정도를 향상시키기 위한 부궤환 회로와 MCLF(Microstrip Coupled Line Filter)를 같이 사용하여 안정도를 개선 시켰다.

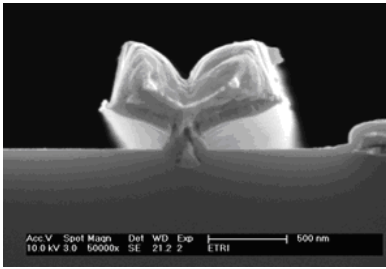
2.1 pHEMT 소자의 특성

본 논문에서 사용된 pHEMT epitaxial 구조는 MBE (Molecular Beam Epitaxy)로 semi-insulation GaAs 기판 위에 성장되었다. pHEMT 구조는 5000 \AA GaAs buffer layer, 30 periods AlGaAs/GaAs super lattice buffer, undopedAl_{0.23}Ga_{0.77}As buffer, silicon planar doping($1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$), 20 \AA Al_{0.23}Ga_{0.77}As spacer, 120 \AA In_{0.2}Ga_{0.8}As channel, 35 \AA Al_{0.23}Ga_{0.77}As Schottky contact layer를 포함하고 있으며 마지막으로 400 \AA 두께의 undoped GaAs Cap층을 가지고 있어 active 영역의 산화를 방지하여 소자의 결함을 줄일 수 있다.[4,5] 그림 3은 pHEMT epitaxial 구조이다.



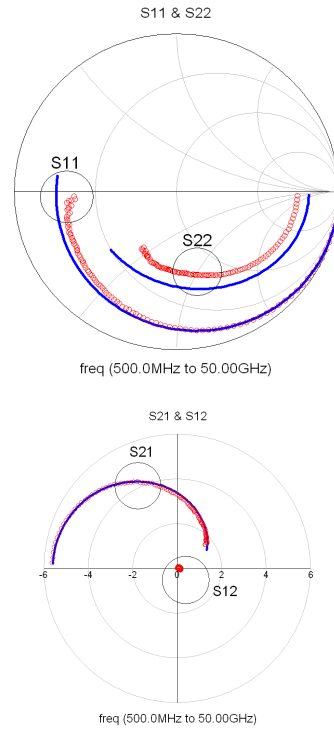
[그림 3] pHEMT 기판의 단면도

pHEMT 소자는 electron beam lithograph 방법을 이용하여 게이트 길이가 0.12 μm 의 단위 면적 50 μm 의 wide T-shaped 게이트를 형성하였으며 그림 4는 형성된 게이트의 단면사진이다.



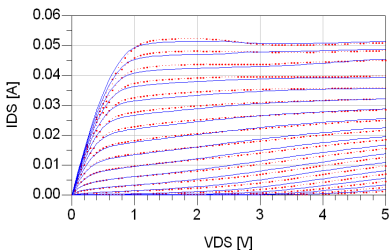
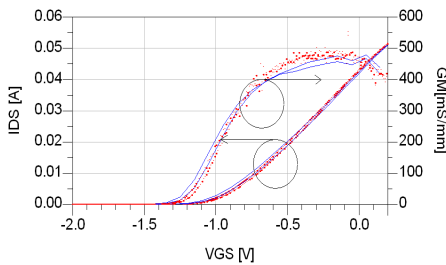
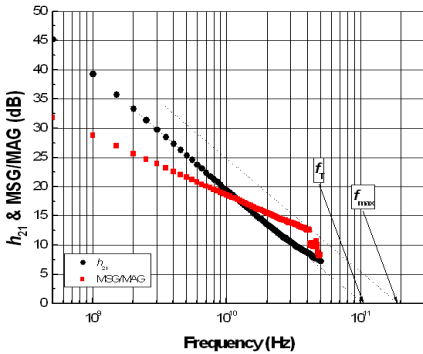
[그림 4] 형성된 게이트전극의 SEM 사진

또한 pHEMT는 2-finger 총게이트 면적 $100 \mu\text{m}^2$ 를 기본소자로하여 Table based 대신호 모델링을 하였다. 게이트-소오스 전압이 -0.2 V , 드레인-소오스 전압이 1.5 V 상태에서 V_p (Pinch-off Voltage) $-1.0(\pm 0.2) \text{ V}$, I_{dss} (Drain Source Saturation Current) $40(\pm 5\%) \text{ mA}$, g_m (Transconductance) $480(\pm 15\%) \text{ mS/mm}$, f_t (Cutoff Frequency) $100(\pm 20\%) \text{ GHz}$, 마지막으로 f_{max} (Maximum Oscillation Frequency) $240(\pm 40) \text{ GHz}$ 의 특성을 보였다. 다음 그림 5와 표 1은 모델링된 소자의 모델 값과 측정값의 비교와 대표 값이다.



dot : 측정 데이터
line : 모델링 데이터

[그림 5] pHEMT 소자의 모델과 측정값의 비교



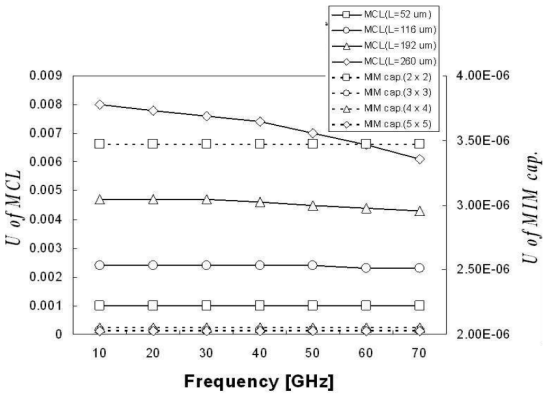
[표 1] 모델링 소자의 대표 값

| Gate Length | Item | Unit | Value |
|-------------|---------------------|-------|------------------------|
| 100 [um] | V_p | V | -1 ± 0.2 |
| | I_{dss} | mA | $40 \pm 5\%$ |
| | g_m | mS/mm | $480 \pm 15\%$ |
| | F_t | GHz | 100 ± 20 |
| | F_{max} | GHz | 240 ± 40 |
| | NF_{min} (@26GHz) | dB | 1.63 (@30% i_{dss}) |

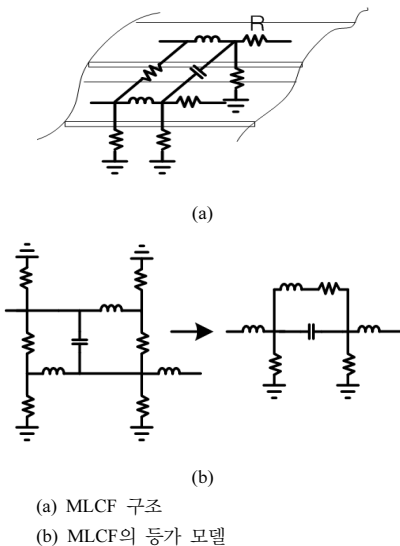
2.2 MCLF 특성

MLCF의 특성을 안정도 측면에서 분석하고자 커패시턴스가 4 fF, 9 fF, 16 fF, 25 fF를 갖는 MIM 커패시터와 MLCF를 비교하였다. MIM 커패시터는 면적을 변화 시킨 반면 MLCF는 선로 폭을 $10 \mu\text{m}$, 도체 선로간의 간격을 $10 \mu\text{m}$ 고정하여 길이를 변화 시켜 안정계수 U 값을 비교하여 그림 6에 도식 하였다.[6,7] MIM 커패시터와 MLCF는 수동소자이므로 이론상 무조건 안정하다. 그러나 그림 6에서 보듯이 안정계수 U 값이 MLCF가 MIM 커패시터

보다 300 ~ 4000배 정도 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 그림 7은 MLCF의 구조와 등가모델을 도식한 것이다. 그림7 (a)의 저항 R은 전송선의 매우 작은 저항 값이다. 따라서 그림7 (b)에 나타난바와 같이 저항 R을 무시하여 등가모델화 할 수 있으며 최종 등가 모델은 대역통과 여파기와 등가로 나타난다. 이는 원하는 주파수 대역만 통과 시키고 원하지 않는 대역은 억제하는 효과가 있으므로 증폭기의 안정도 향상에 기여할 것으로 예상된다.



[그림 6] MLCF와 MIM의 안정계수 U

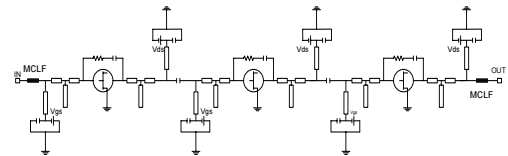


[그림 7] MLCF의 구조와 등가 모델

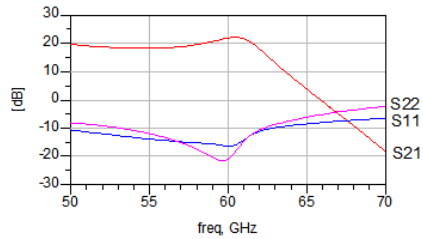
2.3 회로 설계

중심주파수 60 GHz에서 1 GHz band를 갖는 증폭기를 그림 8와 같이 3단 증폭기로 구성하였다. 각각 입 출력정

합회로와 inter-stage 정합회로를 개방형 스테브를 사용하였으며 각각의 증폭기의 안정도를 개선하기 위하여 부궤환 회로와 입력단과 종단에 MCLF(Microstrip coupled Line Filter)를 사용하여 안정도를 개선하였다. MCLF의 크기는 주파수 크기에 반비례하므로 주파수가 높으면 사용하기가 적합하고 마이크로 스트립라인으로 형성되어 있으므로 공정상 오차율이 작아 수율 향상에도 도움이 된다. MIM 커패시터는 그 공정상 유전체의 유전율의 변화나 유전체 두께의 변화율에 따라 대략 10% 정도의 공정상 오차율을 나타낸다. 그러나 단점으로 지적된 MIM(Metal Insulator Metal) 커패시터에 비해 크기가 크므로 본 논문에서는 45° 회전하여 반영함으로서 크기를 대폭 줄였다. 초단 및 두번째단 증폭기는 2 finger, 게이트 총면적 100 μm로 구성하였으며 종단 증폭기는 4 finger, 총 게이트 면적 200 μm로 설계하였다. 설계된 증폭기의 각각 게이트전극과 소오스 전극 사이의 전압은 -0.1 V, 드레인 전극과 소오스 전극 사이의 전압은 1.5 V로 차후 패키징후 각각 단일볼트로 사용이 가능하도록 설계하였으며 중심주파수 60 GHz에서 설계 후 입력정합 -16.35 dB, 출력정합 -21.022 dB의 특성을 보였으며 이득 특성 또한 21.817 dB의 특성을 보였다. 아래 그림 9은 모의실험후 산란계수의 특성이다.



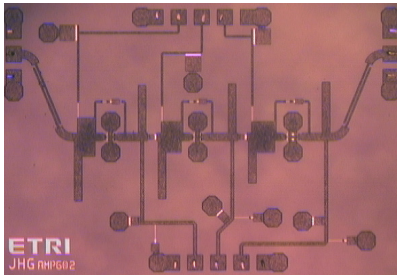
[그림 8] 60 GHz 대역 증폭기 설계도



[그림 9] 모의실험으로 설계된 증폭기의 산란계수

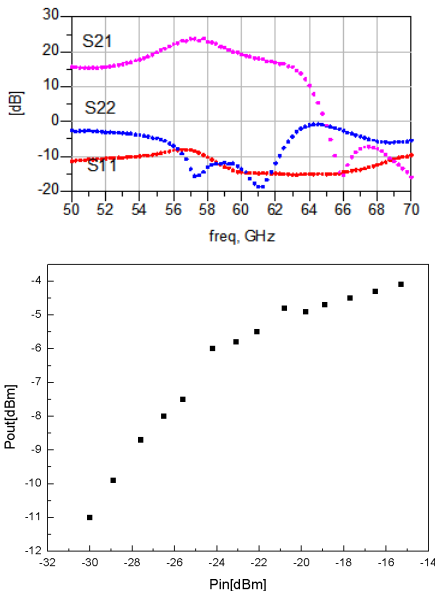
2.4 측정 및 고찰

그림 10은 실제 제작된 MMIC 회로의 사진이다. 크기는 2.5 X 1.5mm² 이며 총 소모된 전류는 40 mA로 측정되었다.



[그림 8] 실제 제작된 60 GHz 대역 증폭기

측정 결과를 고찰해 보면 주파수 59.5 GHz ~ 60.5 GHz에서 이득 19.9 dB ~ 18.6 dB, 입력정합 -14.6 dB ~ -14.7 dB, 출력정합 -11.9 dB ~ -16.3 dB의 특성을 보였으며 P1dB 또한 -5 dBm으로 고찰 되었다. 다음 그림 9는 각각 측정된 그래프이다.



[그림 9] 측정된 60 GHz 대역 증폭기의 특성

3. 결론

차세대 광대역 통신 시스템을 위한 중심주파수 60 GHz의 증폭기 MMIC를 설계 및 제작하기 위하여 밀리미터파 대역에 최적화한 epitaxial 을 성장시킨 후 ETRI GaAs 0.12 μm 공정을 이용하여 wide T shaped 게이트 전극을 형성하여 pHEMT를 만들었다. 이를 tabled based 대신과 모델링하여 설계하였으며 MMIC 설계 시에는 안정도를 개선하기 위하여 MCFL과 부궤환을 이용하여 안정

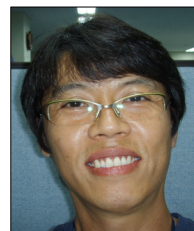
도를 향상 시켰다. 특히 MLCF는 대역통과 여파기의 특성을 등가회로를 통하여 확인하였고 이를 통한 원하지 않는 주파수를 차단함으로써 안정도를 개선하고 MIM 커패시터와 안정계수(U)를 비교한 결과 MIM 커패시터를 사용하는 것보다 약 300 ~ 4000 배 차이를 확인하였다. 제작한 결과 크기가 2.5 X 1.5 mm²이고 소모된 전류는 약 40 mA, 주파수 59.5 GHz ~ 60.5 GHz 에서 이득19.9 dB ~ 18.6 dB, 입력정합특성 -14.6 dB ~ -14.7 dB, 출력정합 -11.9 dB ~ -16.3 dB, P1dB -5 dBm의 우수한 특성을 얻었다. 또한 MCLF는 더 높은 밀리미터파 대역에 안정도 및 수율 향상에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Ernest K. smith, *Radio Science*, vol. 17, No.6, pp. 1455-1464, 1982.
- [2] IEEE 802.12 Web site:<http://www.ieee802.org/15>
- [3] G. Boeck, *EuMW workshop-WTH11-3*, 2008
- [4] Lee J L, "Improvement of break down characteristics of GaAs power field-effect transistor using(NH₄)₂S_x treatment," *J. Appl. Phys.* Vol. 73, pp. 3539-3542, 2003.
- [5] Nannichi Y, Jia-Fa Fan, Haruhiro Oigawa, Atsushi Koma, "A model to explain the effective passivation of the GaAs surface by (NH₄)₂S_x treatment," *Japan. J. Appl. Phys.* Vol. 27, pp. L2367-L2369, 1988.
- [6] David M. Pozar, *Microwave Engineering. 2nd Edition*, John Wiley and Sons, Inc., New York 1981.
- [7] Woo-Jin Chang, Hong-gu Ji, "60GHz Amplifier MMICs and Module for 60GHz WPAN System," *7th MINT Millimeter-Wave International Symposium MINT-IMS2006*, pp159-164, Feb. 2006.

지 흥 구(Hong-Gu Ji)

[정회원]



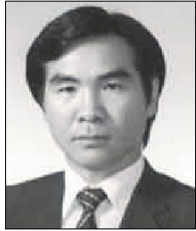
- 1998년 2월 : 광운대학교 전자공학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2008년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (박사 수료)
- 2000년 8월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원

<관심분야>

초고주파 회로, MMIC 회로등

오 승 엽(Seung-Hyeub Oh)

[정회원]



- 1971년 2월 : 연세대학교 전자공학(공학사)
- 1973년 2월 : 연세대학교 전자공학(공학 석사)
- 1982년 2월 : 연세대학교 전자공학(공학 박사)
- 1984년 ~ 현재 : 충남대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

초고주파 회로, 초고주파 system design등