

主題

## GaAs RFIC 기술동향

서울대학교 김정현, 권영우

차례

- I. 서론
- II. Device Technologies
- III. Performance Comparison
- IV. Applications of GaAs PHEMT MMIC
- V. Conclusion

## I. 서론

GaAs 소자는 최근 요구되어지는 높은 주파수와 큰 전력적인 측면에서 여러 제품들과 시스템에 널리 이용되고 있는 소자이다. 수십 Mhz에서 밀리미터 파 영역까지 사용되어지고 있고, 다른 소자들과 비교해서 여러 측면에서 월등한 특성을 보이고 있다. 물론 여러 다른 소자들로부터 뛰어난 RF 특성을 얻기 위해 많은 연구들이 진행되고 있고, 특히 Si based device중에서 우수한 RF 특성을 보이는 소자들도 있으나, 이런 값비싼 소자들이 GaAs소자에 비해 과연 얼마나 우수하며 또한 기존 시스템에 적절히 대처되어 질 수 있을지는 의문이다.

일반적으로 GaAs 소자는 MESFETs, PHEMTs, 그리고 HBTs로 나눌 수 있는데, 이들 소자들 중 어느 소자를 선택하느냐는 제조 및 기본적인 동작 메커니즘 그리고 어떠한 특성을 위해 어디에 사용할 것인가에 따라 결정될 수 있다. MESFET

이 가장 안정되고 오래된 기술이지만, PHEMT와 HBT는 여러 측면에서 MESFET보다 우위적인 특성을 지닌다.

본 칼럼에서는 위의 여러 GaAs소자들의 특성을 간단히 정리 비교해 보고, 서울대학교 밀리미터파 집적시스템 연구실등에서 GaAs소자를 이용하여 실제 설계 제작된 회로들을 살펴볼 것이다.

## II. Device Technologies

GaAs 소자들을 간단히 설명하면 다음과 같다.

MESFET은 여전히 GaAs 기술의 일반적인 소자이다. 물론 오늘날 요구되어지는 높은 주파수와 큰 전력적인 면에서 다른 소자들에 비해 특성이 우수하지 못하지만, 대부분 semi insulating substrates에 ion을 주입해서 생성하여 epitaxial layers가 필요하지 않기 때문에 material cost가

가장 저렴하다.

HEMT 소자는 기본적으로 그 구조가 MESFET과 유사하나, 이 경우 epitaxial wafer가 active layer로 사용된다. EPI는 대부분 MBE로 생성되지만, 몇몇 fab에서는 MOCVD가 사용되어지고 있다. 이 HEMT 소자는 0.12um 이하의 gate length에서는 100GHz이상의 fT를 얻을 수 있어서 높은 주파수까지 gain을 얻을 수 있을 뿐 아니라 낮은 noise 특성 또한 얻을 수 있다[1].

HBT 소자는 emitter 와 base layer가 서로 다른 band gap material로 형성되어 있는데, 이로부터 넓은 band gap을 가지는 emitter가 hole injection을 막아 homojunction BJT에 비하여 우수한 특성을 가지게 된다. 이 소자의 경우 대부분의 EPI는 MOCVD로 생성되고 일부 MBE도 사용된다. HBT 소자는 단일 전압으로 동작 가능하며, 수직적인 전류 흐름으로 인하여 뛰어난 RF 전력 밀도를 가질 수 있으나, 열 문제 (thermal run-away)가 가장 큰 단점 중 하나이다. 또한 뛰어난 phase noise 특성 때문에 GaAs HBT는 밀리미터파 발진기에 널리 이용되어지고 있다.

### III. Performance Comparison

앞서 소개한 GaAs 소자들을 noise특성과 power 그리고 주파수 특성 등의 측면에서 간단히 비교해 보고, 다른 소자들과의 비교 자료를 간단히 제시하였다.

**LOW- NOISE OPERATION** Low-noise 특성에 있어서, GaAs PHEMT는 우수한 특성을 보인다. 물론 2 GHz이하의 주파수 영역에서는 Si 과 GaAs가 모두 사용 되지만, 뛰어난 IIP3특성을 요구하는 mixer의 경우 GaAs소자가 이용된다. Si-base 소자들과의 주파수에 따른 noise 특성은 표1에 비교 정리되어 있다[2].

표 1. Performance Comparison

++ : best, + : good, O : moderate.

Parameter	GaAs based Technology			Si based Technology	
	MESFET	HEMT	HBT	Si BJT	SiGe HBT
Low Noise					
LF<100MHz	O	O	+	++	++
RF 2GHz	++	++	++	+	+
RF 10GHz	+	++	+		O
Gain	+	++	++	++	++
Power <0.5W	++	++	++	+	+
>2.0W	++	++	++		
Efficiency	+	++	+	O	O
Low Voltage	+	++	+	+	+
Integration RF func.	++	++	++	O	O
RF/digital	O	O	O	++	++
Power Supply	+	+	++	++	++

#### POWER OPERATION

전력 특성은 일반적으로 어느 주파수에서 얼마나 큰 전력을 낼 수 있는지와 효율(PAE: Power Added Efficiency) 등을 그 표준으로 들 수 있다.

그림1은 GaAs PHEMT가 큰 전력을 얻는데 탁월한 특성을 가지고 있다는 것을 보여 주고 있다. 이 특성은 double 그리고 비대칭 recess에 의해 얻을 수 있다. 흔히 noise 특성에 있어서 큰 장점을 보이고 있는 InP HEMT는 그 소자의 낮은 bandgap InGaAs channel로 인하여 breakdown이 제한되어지므로 큰 전력을 얻을 수 없다. 반면, 큰 breakdown voltage특성과 일정한 threshold 특성을 지니고 있기 때문에, GaAs HBT 또한 큰

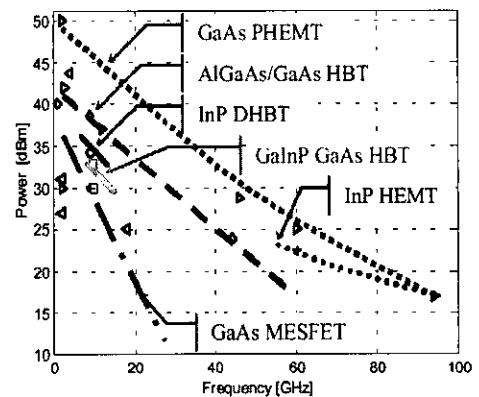


그림 1. Power performance of HEMTs, MESFETs and HBTs as a function of frequency.

전력을 낼 수 있다는 점에서 큰 장점을 지니고 있다. 그러나 이 소자는 heating 문제로 인하여 어려움을 겪고 있고, 이로 인해 heat sinking이 완벽하지 않을 경우 전력특성의 열화를 가져올 수 있다.

또한 같은 크기의 전력을 내기 위하여 Si의 경우는 package의 크기가 GaAs MESFET에 비해 4배나 된다(3). GaAs device들과 Si-based device들간의 power 특성을 표1에서 비교하였다.

#### HIGH FREQUENCY OPERATION

S-, C- and X-band 주파수에서 GaAs MESFET과 HEMT는 우수한 특성을 보이며, 더 높은 주파수를 요구하는 Short Distance Radio, SATCOM, Car Radar System 등에서는 앞서 잠시 언급한 바와 같이 100 GHz의 높은 주파수까지 gain과 noise 특성이 우수하기 때문에 GaAs PHEMT가 가장 적합한 소자라 할 수 있다.

#### COST

Chip 당 원가는 공정의 복잡성 및 수율 등에 의해 크게 좌우되나, 궁극적으로는 wafer의 크기에 의해 결정된다. 그러므로, wafer size가 큰 silicon 소자가 같은 특성을 가질 경우, 양산 시 저가로 제작이 가능하다.

## IV. Applications of GaAs PHEMT

### MMIC

앞서 언급되었듯이 높은 주파수에서 얻을 수 있는 pHEMT의 우수한 소자 특성은 마이크로파 및 밀리미터파 대역을 사용한 통신 서비스나 군용 무선 통신장비에 크게 이용되고 있다. 이러한 응용들을 위한 시스템에 사용되는 부품들 중에 대표적인 마이크로파 회로들로는 발진기(Oscillator), 혼합기(Mixer), 전력증폭기(Power amplifier), 저잡음 증폭기(Low-noise amplifier) 등을 예로 들 수 있다.

현재 국내에서도 이러한 회로들의 개발이 기업, 연구소 및 대학 등에서 활발히 진행되어 지고 있다. 다음의 내용은 서울대학교 본 연구실에서 개발한 pHEMT를 사용한 회로들을 분야별로 나눈 몇 가지 예들이 되겠다.

### 1. 발진기

시스템에서 안정적인 동작을 하기 위해서는 좋은 성능의 신호원을 얻는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 발진기(Oscillator)라 불리는 마이크로파 회로를 통해서 시스템에 필요한 신호원을 얻게 되는데, 요구되는 신호원의 동작주파수가 마이크로파/밀리미터파 대역의 높은 주파수가 되면, 작은 위상잡음을 갖는 발진기를 만들기가 매우 어렵게 된다. 그래서 이렇게 높은 주파수에서 작은 위상잡음을 갖는 발진기에 pHEMT가 이용된다.

그림 2는 1999년에 개발된 Ka-band에서 동작하는 발진기의 Layout이다. 측정된 발진기의 동작주파수는 29.2GHz 이고, 위상잡음은 1MHz 오프셋에서 107dBc/Hz의 좋은 특성을 보였다(4). 이 발진기는 서울대학교 반도체 공동연구소의 pHEMT 표준 공정을 통해서 제작되었다.

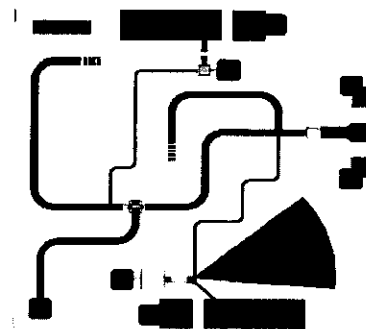


그림 2. Ka-band 발진기의 Layout

그림 3은 2000년에 개발된 Ka-band 능동 병렬 되먹임을 이용한 발진기 칩 사진이다. 앞선 예와 달

리 단일평면구조를 사용하여 제작된 발진기이다. 그림 4는 제작된 발진기의 측정결과로, 27.2GHz의 동작 주파수와 1MHz 옵셋에서 110dBc/Hz의 위상잡음 특성을 보여준다(5).

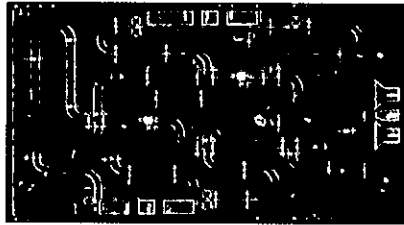


그림 3. Ka-band 능동 되먹임 발진기 사진

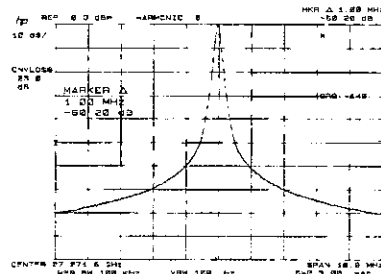


그림 4. 능동 되먹임 발진기 측정결과

## 2. 혼합기

통신에서 일반적으로 보내고자 하는 유용한 정보의 신호를 높은 주파수에 변조하여 원하는 지점으로 송수신하게 된다. 이 때 주파수 변조를 할 수 있는 혼합기(Mixer)가 필요한데, FET로 구현할 수 있는 혼합기는 크게 게이트 혼합기, 저항성 혼합기 그리고 dual-gate 혼합기로 구분할 수 있다.

게이트 혼합기는 트랜지스터의 트랜스컨덕턴스 성분을 이용하여 동작하는데, 변환 이득을 갖는 장점이 있다. 그러나 잡음지수와 inter-modulation 특성이 좋지 않고, 커플러(coupler)를 사용해야 한다는 단점이 있다.

저항성 혼합기는 트랜지스터를 저항과 같이 동작하도록 하여 혼합기 특성을 얻는데, 잡음지수와

intermodulation 특성이 매우 우수한 장점이 있으나, 변환 손실이 있으며 커플러를 사용해야 한다는 단점이 있다.

Dual-gate 혼합기는 비교적 우수한 잡음지수와 inter-modulation 특성과 변환이득을 얻을 수 있으며, 앞선 혼합기들과는 달리 커플러를 사용하지 않는 장점이 있다. 그러나 구조가 복잡하여 이론적으로 크게 정리되어 있지 못하여 그의 유용성에 비해 많이 사용되지 않고 있는 구조이다.

그림 5는 1999년에 개발된 Ka-band에서 동작하는 게이트 혼합기의 레이아웃(Layout)이다. 개발된 게이트 혼합기는 27GHz RF 신호를 수신하여 500MHz로 하향 변환하도록 동작한다. 이 게이트 혼합기는 2dB의 변환이득 특성을 보였다(6).

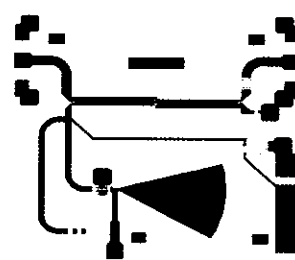


그림 5. 게이트 혼합기의 Layout

그림 6과 7은 2000년에 개발된 Ka-band 단일 평면 구조의 캐스코드(Cascode) 혼합기 칩 사진과 측정 결과이다. 이 혼합기는 두 단일 TR이 cascode connection된 구조로, dual-gate 혼합기와 같은 원리로 동작하며, 26GHz RF 신호를 수신하여

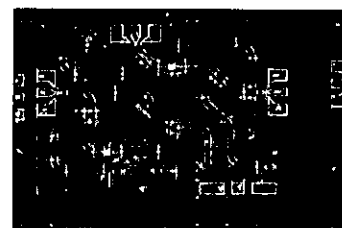


그림 6. Ka-band Cascode 혼합기 사진

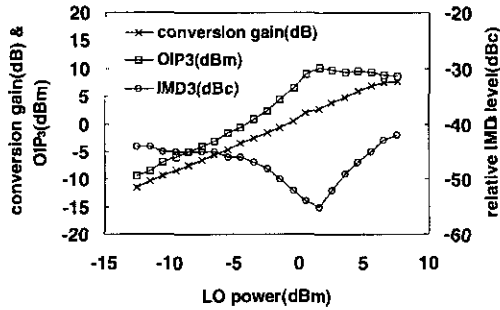


그림 7. Ka-band Cascode 혼합기 측정 결과

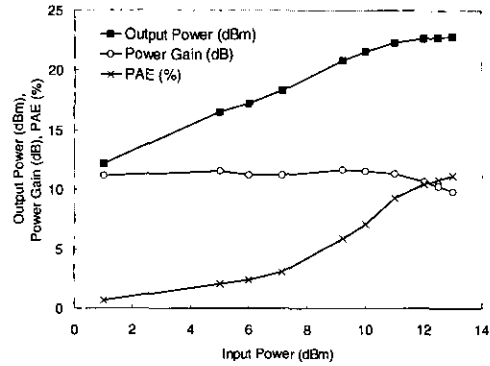


그림 9. Ka-band 0.1W 전력증폭기 측정결과

500MHz로 하향 변환하도록 설계되었다. 이 변환기를 통해서 26GHz 신호를 하향 변환할 때, 2.7dB의 변환이득과 RF가 -20 dBm일 때 -55dBc의 IMD3 특성을 함께 얻을 수 있다[7].

### 3. 전력증폭기

일반적으로 MESFET, HBT, LDMOS등의 소자들을 사용하여 전력증폭기를 구현할 수 있으나, 이들은 pHEMT와 같이 좋은 주파수 특성을 갖지 못하거나, 또는 전력 소자로서의 특성면에서 좋지 않기 때문에, 현재 높은 주파수에서 전력을 얻는 가장 대표적인 응용이 pHEMT를 사용하는 것이다.

그림 8과 9는 1998년에 개발된 Ka-band 0.1W 급 전력증폭기의 칩 사진과 측정결과를 보여주고 있다. 제작된 전력증폭기는 동작주파수 29-32GHz, 23.3dBm의 최대 출력과 13%의 PAE(Power-added efficiency)를 갖는다[8].

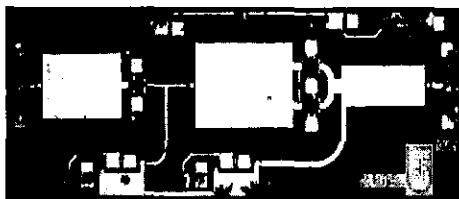


그림 8. Ka-band 0.1W 전력증폭기 칩 사진

그림 10은 2000년에 개발된 Ka-band 0.2W 급 전력증폭기의 칩 사진이다. 26-31GHz에서 출력을 얻을 수 있는 단일평면구조의 전력증폭기이다. 27GHz에서 23.4dBm의 출력과 PAE 21.7%의 특성을 갖는다[9].

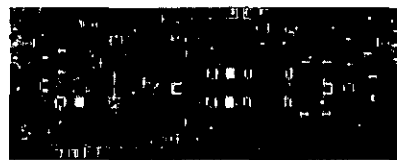


그림 10. Ka-band 0.2W급 전력증폭기 사진

그림 11은 Q-band (44GHz) 1W 급 전력증폭기를 보여주고 있다. 출력단에 pHEMT의 게이트 폭을 증가 시켜서 높은 출력을 얻는다[10].

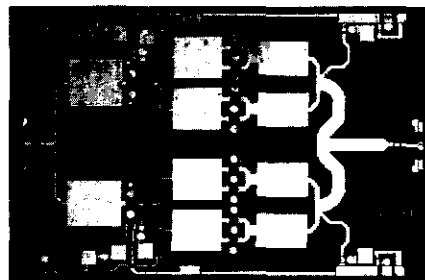


그림 11. Ka-band 1W 전력증폭기 사진

#### 4. 저잡음 증폭기

저잡음 증폭기(LNA)는 수신 시스템에서 안테나 다음에 위치하여 전체 수신 시스템의 수신 감도를 결정하는 중요한 구성 요소이다. 특히 주파수가 높아지면 수신되는 신호가 매우 작기 때문에 좋은 수신성능을 위해서는 좋은 저잡음 증폭기가 필수적이다.

마이크로파/밀리미터파 대역에서 pHEMT를 사용한 저잡음 증폭기는 낮은 잡음지수와 높은 이득 특성을 갖는다.

그림 12와 13은 X-band에서 동작하는 저잡음 증폭기의 칩 사진과 측정결과를 보여주고 있다. 제작된 저잡음 증폭기는 20dB이상의 이득과 1.5dB 이하의 잡음지수 특성을 갖는다[11].

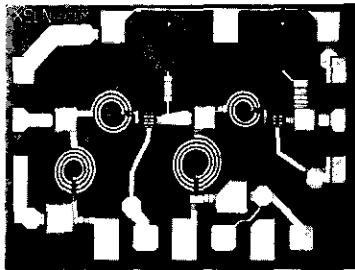


그림 12. X-band 저잡음 증폭기 사진

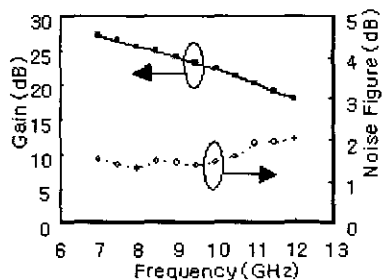


그림 13. X-band 저잡음 증폭기 측정결과

그림 14와 15는 Ka-band에서 동작하는 저잡음 증폭기의 칩 사진과 측정결과를 보여주고 있다. 측정된 Ka-band 3단 저잡음 증폭기는 22.5dB 이상

의 이득과 2.2dB이하의 잡음지수를 갖는다[12].

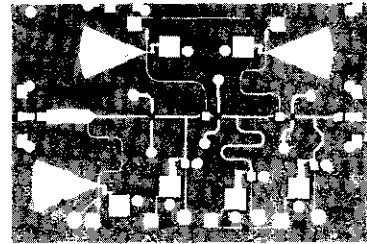


그림 14. Ka-band 저잡음 증폭기 칩 사진

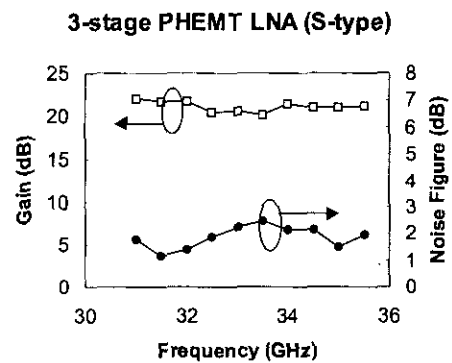


그림 15. Ka-band 저잡음 증폭기 측정결과

## V. Conclusion

GaAs소자를 이용한 MESFET, HEMT, 그리고 HBT의 device technology를 간단히 살펴보고 다른 소자들과 여러 특성면에서 비교해 가며 각각의 소자들의 전력, 저잡음, 고주파 특성, 및 cost를 비교 분석 하여, 실제 설계 제작된 GaAs HEMT소자 회로에 적용된 경우를 살펴보았다.

### ※참고문헌

[1] F. Ali, A. Gupta, HEMTs and HBTs:

- Devices, Fabrication, and Circuits, Artech House, Norwood, MA, 1991.
- [2] O. Berger, "GaAs MESFET, HEMT and HBT Competition with Advanced Si RF technologies", 1999 International Conference on Gallium-Alsenide Manufacturing Technology.
- [3] D. Pavlidis, "HBT vs. PHEMT vs. MESFET : What's best and why", 1999 International Conference on Gallium-Alsenide Manufacturing Technology.
- [4] 윤양훈, 고조파 성분을 고려한 초고주파 발진기의 위상 잡음 해석, 서울대학교 석사 학위 논문, Feb., 2000. [5] 김년대, 김대현, 조현우, 권영우, 서광석, 능동 병렬 되먹임을 이용한 CPW PHEMT MMIC Ka-band 저잡음 발진기 설계 및 제작, 2000년도 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, pp.41-44.
- [6] 김정현, 고원, 전문석, 권영우, Monolithic HEMT Mixers and their Intermodulation Characteristics, 무선통신용 MMIC 및 Module Workshop 2000.
- [7] 전문석, 김정현, 김성원, 김대현, 권영우, 서광석, Ka-band CPW Cascode Mixer의 설계 및 제작, 2000년도 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, pp.49-52.
- [8] 정진호, 이재학, 고원, 차호영, 김대현, 정연규, 권영우, 서광석,  $0.2\mu\text{m}$  AlGaAs/InGaAs 전력 PHEMT 공정을 이용한 Ka-Band MMIC 전력증폭기 모듈 설계 및 제작, 1999년도 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, pp.46-49.
- [9] 이상효, 정상화, 정진호, 홍성철, 김대현, 권영우, 서광석,  $0.25\mu\text{m}$  pHEMT 공정을 이용한 Ka-band CPW 전력증폭기의 설계 및 제작, 2000년도 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, pp.45-48.
- [10] Youngwoo Kwon, Kyungiin Kim, Emilio A. Sovero, and Don S. Deakin, "Watt-Level Ka-and Q-Band MMIC Power Amplifiers Operating at Low Voltages," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, pp.891-897, June, 2000.
- [11] Y. Kwon, E.A. Sovero, D.S. Deakin and J.A. Higgins, "High-performance X-band MMIC LNAs using dry recessed PHEMTs," *Electron. Lett.*, vol.33, pp.817-818, April, 1997.
- [12] Youngwoo Kwon, Don S. Deakin, Emilio A. Sovero, and J. Aiden Higgins, "High-Performance Ka-Band Monolithic Low-Noise Amplifiers Using  $0.2\text{-}\mu\text{m}$  Dry-Recessed GaAs PHEMTs," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol.6, pp. 253-255, July, 1996.

### 김 정 현

1998년 성균관대학교 전자공학과 학사

2000년 서울대학교 전기공학부 석사

2000년 서울대학교 3차원 밀리미터파 창의 연구단 연구원

현재 서울대학교 전기공학부 박사과정 재학중

### 권 영 우

1988년 서울대학교 전자공학과 학사

1990년 the University of Michigan, Ann Arbor 석사

1994년 the University of Michigan, Ann Arbor 박사

1994년 Rockwell Science center, Thousand Oaks, CA 연구원

현재 서울대학교 3차원 밀리미터파 창의 연구단장, 서울대학교 전기공학부 조교수