

요 약

밀리미터파 회로 제작에 필수적인 능동소자인 고속 Transistor 기술은 반도체 설계 및 공정기술의 발전으로 급격히 발달하고 있다. 주로 GaAs계나 InP계 III-V 화합물 반도체를 이용한 고주파 transistor는 FET기반의 MODFET과 BJT기반의 HBT가 밀리미터파 대역에서 응용된다. 전통적인 III-V족 반도체 이외에 SiGe와 GaN 소자 기술 역시 급속한 발전을 이루고 있다. 본 논문에서는 밀리미터파 transistor 기술에 대한 기본적인 내용과 응용 예를 소개한다.

Abstract

Technologies for high-speed transistors, active devices essential to the fabrication of millimeter-wave circuits have developed drastically with the design and processing techniques. The high-frequency transistors, made of GaAs or InP related compound semiconductors mainly, are in the form of MODFETs and HBTs. Other than traditional III-V compound semiconductor materials, SiGe and GaN technologies are emerging as viable candidates of millimeter-wave devices. In this paper, basics and applications of millimeter-wave transistors are introduced.

I. 서 론

밀리미터파 대역에서 전통적으로 군용 및 위성 통신에 응용을 위한 44 GHz 및 96 GHz 주변 대역을 중심으로 하여 각종 응용 회로가 제작되어 왔으나, 최근에는 WLAN(Wireless Local Area Network), LMDS(Local Multiple Distribution Service) 및 ITS(Intelligent Transportation System) 등의 무선 통신 및 그 응용 분야의 급격한 발달로 상업적 이용이 증가하고 있다. 전파의 파장이 대기 중에서 1 cm 이하가 되는 밀리미터파 대역(> 30 GHz)의 이용은 이 대역에서 효과적으로 사용할 수 있는 능동소자를 찾기 어려운 기술적인 문제점 때문에 밀리미터파 능동소자 기술을 확보한 몇 개의 회사에 의해 주도되어 왔다.

밀리미터파 대역의 응용을 위해 확보되어야 할 가장 중요한 부분이 능동소자이다. 능동소자의 경우 oscillator 등에 Gunn이나 IMPATT diode 등이 사용되기는 하나 transistor가 그 주요한 부분이 된다. 보통 마이크로파나 밀리미터파 증폭기의 제작시 증폭소자인 transistor의 전력증폭한계 주파수(maximum oscillation frequency: f_{max})가 설계주파수의 3~4배 이상 되어야 한다는 점을 고려하면 밀리미터파 응용을 위한 transistor의 f_{max} 는 대략 100 GHz 이상이 되어야 한다는 것을 알 수 있다. 이 같은 요구조건을 만족하는 transistor의 제작하기 위해 III-V족이나 SiGe 등의 화합물 반도체를 이용한 소자가 사용되어야 하고 공정시에도 까다로운 과정을 거치게 된다.

본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의하여 수행되었습니다.

전술한 고주파 특성 이외에도 전력증폭회로를 위해 항복전압과 전류가 충분히 커야 하며, 저잡음 회로 응용을 위해 잡음지수 역시 작아야 한다. MODFET가 잡음지수면에서는 HBT보다 유리하기는 하나 고주파에서 거의 주파수에 비례하여 증가하므로 사용 주파수가 높아질수록 잡음특성은 저하되게 된다.

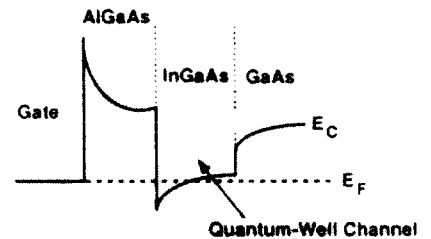
주로 화합물 반도체로 구현되어 밀리미터파 대역에서 주로 쓰이는 전자소자는 HEMT(High Electron Mobility Transistor)라고도 불리는 MODFET(Modulation Doped FET)와 HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)이다. 고주파 특성을 구현을 도핑층과 채널을 분리시킨 MODFET은 전자가 이동하는 채널과 도핑층을 포함하는 barrier로 이루어진다^[1]. HBT는 BJT를 화합물 반도체를 이용하여 구현한 소자로 이미터와 베이스가 이종접합을 형성한다^[2]. 신호의 주파수가 증가함에 따라 파장이 짧아지고 회로의 크기가 감소하게 되고 기생성분의 영향도 역시 증가하므로 밀리미터파 대역의 응용을 위해서는 hybrid 회로보다는 monolithic회로로 제작되는 것이 보통이다. monolithic 회로의 제작은 능동소자의 제작과 함께 일괄적으로 공정된다. 본 논문에서는 밀리미터파 회로응용에 필수적인 능동소자의 주가 되는 MODFET 및 HBT와 그 응용에 대해 다루고자 한다.

II. 밀리미터파 응용을 위한 MODFET

MODFET은 전자가 이동하는 채널과 도핑층을 포함하는 barrier로 이루어지는데, 도핑에 의해 전자의 이동속도가 급격히 감소하기 때문에 도핑이 없는 전자 이동통로인 채널을 따로 두면 전자이동속도를 높일 수 있는 장점이 있다. 기본적으로 energy bandgap이 큰 barrier와 energy bandgap이 작은 채널을 사용하여 energy bandgap이 큰 barrier쪽에 도핑을 하면 이 곳에서 도핑에 의해 공급된 전자가 자

연히 energy bandgap이 작은 채널로 옮겨와 분포하게 된다. 그 결과 채널에 도핑이 없어도 자유전자를 얻을 수 있으며 전자속도가 빠른 물질을 채널에 채용할 경우 이미 dopant가 없어 높아져 있는 전자 이동속도를 더 높일 수 있게 된다. 게이트 전압에 의해 채널을 지나는 전자 수를 조절할 수 있어 전류를 조절하게 된다. 도핑 영역과 채널 사이에 일종의 완충 지역을 두기도 하는데 이를 spacer라고 한다. spacer의 두께가 두꺼운 경우 채널에서의 전자밀도가 감소하고 또 얇은 경우 도핑층과의 경계면에서 전자 산란으로 인해 전자이동속도가 감소하므로 대략 3 nm의 정도의 두께가 사용된다^[1]. AlGaAs barrier와 InGaAs채널을 갖는 MODFET의 경우 적층구조와 conduction-band diagram은 [그림 1]과 같다. 적절한 반도체 물질을 barrier와 채널에 채용함으로써 소자의 특성을 향상시킬 수 있다.

주로 MBE(Molecular Beam Epitaxy)에 의해 성



n^+ - GaAs Capping Layer	$10^{18}/\text{cm}^3$, 500Å
n^+ - AlGaAs Donor Layer	$10^{18}/\text{cm}^3$, 500Å
AlGaAs Spacer Layer	Undoped, 50Å
InGaAs Channel Layer	Undoped, 200Å
2-DEG Channel	
GaAs Buffer Layer	Undoped, 1 μm
Semi-insulating GaAs Substrate	

[그림 1] AlGaAs/InGaAs MODFET의 단면 conduction-band diagram (위)과 적층구조 (아래)^[1]

장되는 MODFET은 결정성장 뒤 isolation, 오믹접촉 형성, 게이트의 형성의 공정과정을 거친다. MODFET을 포함한 일반 FET의 단위 전류이득 주파수(unity current gain frequency: f_T)는 전자의 포화 속도를 v_{sat} , 게이트의 길이를 L_g 라고 할 때

$$f_T = \frac{v_{sat}}{2\pi L_g} \quad (1)$$

의 식으로 표현되어 고주파 특성을 얻기 위해서 게이트의 길이를 줄이는 것이 중요함을 알 수 있다. 그러므로 게이트의 형성이 가장 어렵고 중요한 과정인데 게이트 제작을 위해 미세 게이트 패턴 형성과 recess-etch 및 게이트 금속 증착 과정을 거치게 된다. Electron beam lithography에 의해 형성되는 초미세 gate의 제작 기술 수준은 $0.1 \mu\text{m}$ 을 일상적으로 만들며 수십 nm의 gate까지도 제작이 가능한 정도로 발전하였다^[3]. Electron-beam lithography가 미세 gate를 형성하는데는 많은 장점이 있으나 대량생산은 어려운데 이러한 문제점은 위상천이(phase shift) mask와 side wall 공정을 사용한 optical lithography를 사용함으로써 해결하여 이 방법을 이용한 $0.12 \mu\text{m}$ gate의 형성이 보고되었다^[4]. Recess-etch공정은 threshold 전압의 결정 및 MODFET의 특성에 크게 좌우하므로 공정의 재현성을 위해 선택적 식각법을 사용한다.

GaAs계 MODFET을 밀리미터 대역에서 사용하기 위해서 InGaAs pseudomorphic 채널과 AlGaAs barrier를 이용하는 pseudomorphic MODFET(PMODFET)이 보편적이다. 채널로 사용되는 InGaAs는 GaAs에서 보다 높은 전자이동도와 전자속도를 보유하여 고주파 동작 소자에 적합하다. 채널에 사용 가능한 InGaAs의 In 농도는 보통 20% 이하를 사용하는데 이는 120 \AA 내외의 채널을 결함 없이 결정 성장시키기 위해 필요한 제약조건이다^[5]. 밀리미터 파 응용을 위해 대략 $0.2 \mu\text{m}$ 이하의 미세 gate이 electron beam을 이용하여 형성된다. GaAs계 PMO-

DFET을 이용하여 구현된 회로는 다양한데 optical lithography를 이용한 W-band(94 GHz)에서 $P_{1\text{dB}}$ 가 9 dBm, gain이 14.7 dB인 증폭기^[4] 등이 제작되었다.

InP계 반도체를 이용한 MODFET은 InGaAs 채널과 InAlAs barrier로 구성된다. InGaAs에서는 전자가 질량이 작고 전자이동도 및 속도가 높아 고속 특성을 구현하는데 크게 도움이 된다. 실온에서 InP와 격자상수가 일치하는 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 채널에서의 전자이동도는 대략 $11000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ^[6]으로 GaAs의 $4600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이나 GaAs기판 위에 pseudomorphic 성장되는 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 의 $5800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ^[1]보다 월등히 큰 값으로 f_T , f_{max} , transconductance(g_m)값 향상과 저항을 줄여 noise figure와 전력이득 등을 개선한다. InGaAs중 In의 양이 증가할수록 성능의 개선을 기대할 수 있으나 과도한 In의 양은 격자상수의 불일치를 발생시켜 결정의 품질 및 소자의 성능을 저하시킨다. InGaAs에서의 전자포화속도는 InP에 lattice-matched된 경우 $2.4 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 로 GaAs의 약 $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 보다 2.4배나 큰 값이다. InP기판이 GaAs기판에 비해 약 1.5배 좋은 열전도도를 갖는 것도 전력소자의 제작에 도움이 되는 요소이다. Electron beam lithography에 의해 형성되는 초미세 gate을 이용하여 InP MODFET의 주파수 특성은 이미 f_T 350 GHz^[3], f_{max} 600 GHz^[7]를 넘어섰다.

고출력증폭기 응용을 위해서는 큰 전류밀도와 항복전압 필요하다. 고전류밀도를 위해서 흔히 쓰이는 방법은 InGaAs 채널 밑의 InAlAs 버퍼층에 doping을 하거나 2개 이상의 채널^[8]을 형성시켜 많은 양의 이동전하를 형성시킨다. 전류를 증대시키기 위해 전자 속도를 증가시키기도 하는데 In의 성분을 증가시켜 InAs를 포함한 채널을 사용하는 경우 $3.1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 를 얻을 수 있음이 보고되었다^[9]. InAs를 채널로 사용하는 경우 InAs와 기판으로 사용되는 InP사이의 lattice-mismatch로 인하여 보통 10 nm가 넘는 채널 전체를 InAs로 대체하는 것은 불가능하며 2~

4 nm의 InAs층을 InGaAs 채널에 삽입하는 방법으로 응용되었다.

InP계 MODFET의 항복전압은 InGaAs의 작은 energy bandgap으로 인해 GaAs계와 비교해 작는데 최근에 일반적인 InGaAs 채널을 InP와 InGaAs의 적층구조로 채널을 형성한 composite-채널 방법을 사용하여 항복전압을 높였다^[10]. 이렇게 형성된 채널은 낮은 drain bias상태에서는 InGaAs만이 전자의 이동에 관계하고 drain이 bias가 증가되면 전자가 InP채널로 이동해 항복전압 향상에 도움을 준다[그림 2].

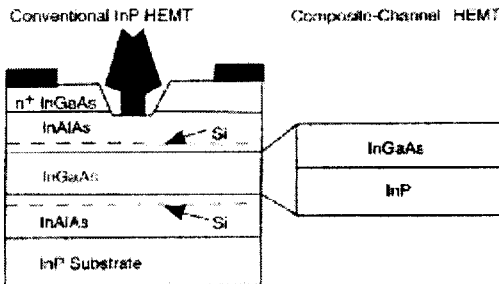
InP계 MODFET의 응용은 저잡음 증폭기(Low Noise Amplifier: LNA), 전력증폭기(Power Amplifier: PA)를 포함한 밀리미터파 회로와 10 Gbps나 40 Gbps등의 고속광통신용 디지털 및 아날로그 회로를 포함한다. InP MODFET LNA의 경우 밀리미터파 영역에서 다수의 논문이 발표되고 있어 W-band (95 GHz)에서 20 dB gain, 2.5 dB의 NF를 갖는 LNA, 3.8~4.5 dB NF와 gain 14.5 dB 이상을 갖는 118 GHz LNA 등이 보고되었다^[11].

전력증폭기에서의 InP MODFET기술과 GaAs PMODFET기술을 비교하면 V 또는 W-band까지는 GaAs PMODFET이 높은 전력밀도와 전력첨가 효율(power-added efficiency: PAE)면에서 우수한데 비해 InP MODFET은 고이득면에서 우수하다^[12]. W-band이상의 주파수 대역에서는 InP MO-

DFET이 월등한 성능을 보여 95 GHz에서 427 mW, 19 % PAE 전력증폭기^[13], 140 GHz에서 30 dB의 이득을 갖는 3단 증폭기^[14], 그외 InP MODFET은 213 GHz oscillator^[15], 5 dB 이득의 1~180 GHz traveling amplifier^[16] 등이 제작되는 등 많은 예술의 경지의 제품이 개발되고 있다. InP MODFET을 이용한 디지털 회로 역시 많이 연구되는데 Source-Coupled FET Logic(SCFL)을 사용하여 기본 gate 과 flipflop을 구성하는 방식으로 49 GHz static divider^[17] 및 60 GHz 이상의 dynamic divider^[18]와 80 Gbps multiplexer^[19] 등이 보고되었다.

Metamorphic법은 GaAs기판에 약 $\sim 1 \mu\text{m}$ 정도에서 두께에서 점진적으로 격자상수를 변화시켜 InP계 반도체와 격자상수가 일치되는 물질 성장을 가능케 하는 방법이다. 이렇게 제작된 metamorphic MODFET(M-MODFET)의 장점은 GaAs기판을 사용하여 InP보다는 대형 웨이퍼(4인치)에 대량생산이 가능하다는 것과 필요에 따라 InP와 격자 일치하지 않는 물질을 성장할 수 있다는 점이다. InP MODFET의 경우 항복전압이 낮는데 항복전압 특성을 개선시키고자 할 때는 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 보다 In 적은 농도의 $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ 채널을 사용할 수 있다^[20]. InP와 격자일치된 M-MODFET의 경우 InP MODFET과 비슷한 전자이동도를 가지며 이런 소자는 $0.18 \mu\text{m}$ gate을 사용하여 $f_T=204 \text{ GHz}$ 가 보고되었다^[21]. 하지만 신뢰성에 문제가 있는 것으로 알려져 있어 아직 기술개발이 더 진행되어야 하는 상황이다^[12].

InP MODFET와 GaAs PMODFET의 특성은 소자의 구조 및 제작 공정에 따라 많이 변화하여 직접적인 비교가 어려우나 비슷한 공정 조건을 통해 제작된 소자의 잡음 특성을 비교하면 다음의 <표 1>과 같다. $0.15 \mu\text{m}$ MODFET의 경우 잡음지수와 60 GHz에서 최소잡음지수를 비교하면 각각 InP MODFET은 0.9 dB와 GaAs PMODFET은 1.6 dB가 된다^[22].



[그림 2] 일반 InP HEMT와 composite-channel HEMT^[10]

〈표 1〉 0.15 μm MODFET의 잡음 특성 비교^[22]

주파수 (GHz)	GaAs P-MODFET		InP MODFET	
	최소잡음지수 (Fmin: dB)	Associated Gain (Ga: dB)	최소잡음지수 (Fmin: dB)	Associated Gain (Ga: dB)
18	0.55	15.0	0.3	17.1
60	1.6	7.6	0.9	8.6
94	2.4	5.4	1.4	6.5

III. 밀리미터파 응용을 위한 HBT

HBT는 energy bandgap이 큰 이미터와 energy bandgap이 작은 base로 구성되는 bipolar transistor로 GaAs기판이 성장되는 AlGaAs/GaAs 및 InGaP/GaAs HBT와 InP기판에 성장되는 InP/InGaAs 및 InAlAs/InGaAs HBT, Si기반의 Si/SiGe HBT 등이 있다.

소자의 주파수 특성의 척도인 f_T 는 주로 베이스의 두께와 콜렉터 층의 두께에 의해 결정된다. f_T 를 증가시키기 위해서는 베이스와 콜렉터의 두께를 감소하는 방법이 가능하지만 베이스의 두께가 감소하는 경우 베이스 저항이 증대하게 되며 콜렉터 두께의 감소하는 경우에는 항복전압이 감소하고 베이스와 콜렉터 사이의 capacitance가 커져 출력단에서 입력단으로의 feedback이 증가하게 된다. 주어진 f_T 에 대해 HBT의 f_{max} 는 베이스 저항을 R_B , 베이스-콜렉터 capacitance를 C_{BC} 라고 할 때 대략적으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_B C_{BC}}} \quad (2)$$

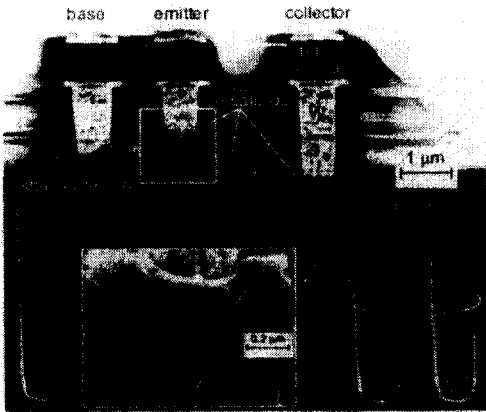
그러므로 f_T 증가를 위한 베이스와 콜렉터 두께의 감소는 f_{max} 의 급격한 감소로 이어져 RF응용에 좋지 않은 영향을 주게 된다. FET의 경우 gate 길이를 줄여 주파수 특성을 향상시키려는 노력과 유사

하게 HBT 소자 성능의 개선은 C_{BC} 를 줄여 가능하 다. C_{BC} 를 줄이는 방법으로는 regrowth법^[23], transferred substrate법^[24], side-wall 공정법^[25] 등이 있다. 이 중 transferred substrate법은 이미터와 베이스 공정 후 웨이퍼 전면을 GaAs 등 다른 기계적 기판(mechanical substrate)에 붙여 InP기판을 제거하고 InP기판과 접해 있는 콜렉터를 공정하는 방법이다.

베이스를 SiGe으로한 Si/SiGe HBT는 Si기반의 공정과 호환된다는 점에 많은 관심의 대상이다. 지금 현재 이동통신 대역의 증폭기와 고속 디지털회로에 중점적으로 이용이 되고 있어 밀리미터파 회로의 응용은 현재 구현되고 있지 않으나 이 분야의 연구도 지속되리라 예상한다. 지금 현재 f_T 130 GHz^[26], f_{max} 107 GHz HBT 및 ECL(Emitter Coupled Logic) gate delay를 6.7 ps까지 줄여놓았다^[27]. [그림 3]

GaAs계 HBT인 AlGaAs/GaAs 및 InGaP/GaAs HBT/의 경우 f_T 와 f_{max} 가 100 GHz를 크게 넘지 못하는 이유로 증폭기 면에서의 응용은 InP계 소자에 비해 상대적으로 낮은 주파수 대역에 머물고 있다. 하지만 위상잡음면에서 1/f 잡음의 corner frequency가 낮아 MODFET 보다 우수한 성능을 얻을 수 있어 oscillator등에 응용된다. 73.5 GHz에서 93 μW 출력의 oscillator 등이 보고되었다^[28].

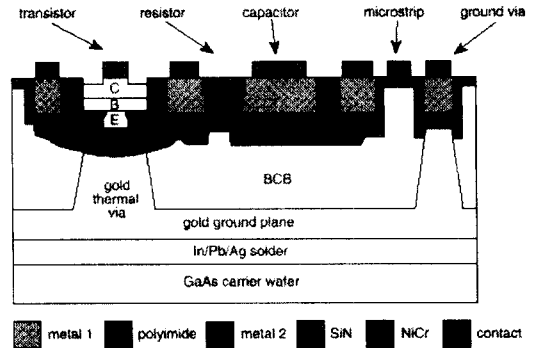
InP HBT는 RF회로의 여러 부분에서 응용이 가능하겠으나 가장 큰 시장이 되리라 예측되는 곳은



[그림 3] $0.2\mu\text{m}$ SiGe HBT^[26]

이동통신용 전력증폭기이다. 이는 turn-on voltage가 낮고 RF power gain이 크기 때문에 GaAs HBT에 비해 유리하다. InP HBT는 고선형성, 높은 PAE와 전력밀도로 현재 GaAs MODFET 정도의 가격으로 소형 전력증폭기로 만들어질 수 있다^[29]. InP계 반도체로 만들어지는 HBT는 이미터가 energy bandgap이 큰 InAlAs 또는 InP로 이루어지며 베이스는 InGaAs, 콜렉터는 InGaAs를 사용하거나(single heterojunction) 항복전압을 높이고자할 때 energy bandgap이 큰 InAlAs나 InP 같은 물질이 사용된다(double heterojunction).

C_{BC} 를 줄이는 방법 중 transferred substrate법이 성능면에서 좋은 결과를 얻고 있는데, 이 방법을 이용해 베이스-콜렉터 접합 영역을 $0.4\mu\text{m}$ 로 하여 C_{BC} 를 최소화함으로써 f_{max} 를 증진시켜 f_T 162 GHz, f_{max} 800 GHz 이상인 소자를 제작하였다^[24] [그림 4]. 고속 HBT의 경우 대부분이 작은 베이스-콜렉터 접합 영역 이외에도 emitter width가 $1\mu\text{m}$ 이하인데 이는 distributed base 저항을 줄여 RF특성을 향상시키고 작은 전류로 shot 잡음을 줄이면서도 HBT가 좋은 주파수 특성을 유지하게 하기 위해서이다. 이 같은 특성의 HBT를 이용하여 300 GHz



[그림 4] Transferred-substrate법에 의한 HBT의 단면^[24].

이상의 IC제작이 가능하게 되어 여러 가지 마이크로파 및 밀리미터파 회로와 더불어 특히 고속 광통신 회로와 같은 광대역 회로에 많이 쓰이고 있다.

HBT를 이용한 디지털회로는 current mode logic (CML)과 emitter coupled logic(ECL)의 master-slave flip flop으로 만들어져 약 50 GHz 정도나 그 이상 작동하여^{[24],[30]} 40 Gbps 고속광통신은 물론 그 이상의 신호처리용 회로까지 제작이 가능하게 되었다. 이러한 고속 HBT 디지털 회로는 대량생산이 가능한 상태여서 이 분야의 기술이 급속도 발전할 것이라 예상된다.

HBT의 아날로그 및 RF회로 역시 밀리미터 대역에서 광대역 증폭기, oscillator, 전력증폭기 등의 여러 분야에서 사용된다. 광대역 증폭기의 경우 분산형 설계를 사용하기도 하나^[31] 주로 feedback을 많이 사용하여 bandwidth를 늘이는 형태가 많이 사용되는데 50 GHz differential input amplifier, 50 GHz bandwidth broadband Darlington amplifier^[32] 등이 있다. 50 GHz 광대역 증폭기의 경우^[33] 10 dB gain에 약 8 dB의 noise figure를 보였다.

InP계 HBT를 oscillator로 사용할 때 특히 유리한데 이는 1/f 잡음의 corner frequency가 수 kHz로 MODFET에 비해 월등히 작고 동급의 AlGaAs/

GaAs계 HBT와 비교할 때도 약 1/3 정도 밖에 되지 않는다^[33]. HBT의 저잡음 증폭기 응용의 경우 일반적으로 MODFET보다 진폭잡음(amplitude noise) 특성이 열악한데 이는 HBT소자 크기의 축소와 base저항의 개선할 수 있다. 이러한 개선 가능성에도 불구하고 HBT는 저잡음 회로에는 거의 사용되고 있지 않다.

InAlAs/InGaAs HBT와 AlGaAs/GaAs HBT의 밀리미터파 대역에 대한 선형성에 대한 결과 보고는 흔하지 않은데 두 종류의 HBT에 대해 IP3와 LFOM(linearity figure of merits : $IP3/P_{dc}$)을 Q-band에서 비교하면 다음의 <표 2>와 같다. 표에서 보여진 바와 같이 두 소자가 거의 비슷한 특성을 나타내고 있다^{[34],[35]}. HBT와 MODFET의 선형성을 비교하면 일반적으로 HBT가 선형성 면에서 우수하다.

<표 2> GaAs계 HBT 및 InP계 HBT의 Q band에서의 선형성

	AlGaAs/GaAs HBT	InAlAs/InGaAs HBT
주파수(GHz)	38~44	44
IP3(dBm)	24~30	28.3
LFOM(IP3/P _{dc})	3~11.6	5.3
참고문헌	[34, 35]	[35]

<표 3> 밀리미터파 HBT와 MODFET의 특성 비교

	GaAs PMODFET	InP MODFET	GaAs HBT	InP HBT
주파수특성	우수	매우 우수	보통	우수
잡음특성	우수	매우 우수	보통	보통
위상잡음 특성	보통	보통	우수	매우 우수
선형성	보통	보통	우수	우수

IV. 결론

밀리미터파 응용을 위한 transistor는 MODFET과 HBT가 있는데 GaAs계 및 InP계가 주로 사용된다. MODFET은 HBT에 비해 잡음특성이 우수한 반면 선형성과 집적도, 공정의 용이성, 위상잡음특성 면에서는 뒤지나 각각의 소자는 응용 목적에 따라 여러 방면으로 광범위하게 이용되고 있다. 위에서 소개된 MODFET과 HBT의 특성을 표로 요약하면 <표 3>과 같다. 주파수 특성면에서는 InP MODFET이 가장 우수하여 증폭기 제작에 유리하다.

SiGe을 이용한 HBT는 밀리미터파 대역의 응용을 위해 필요한 높은 f_T 및 f_{max} 등을 이미 확보하였고 여러 종류의 마이크로파 IC가 제작되고 있으나 아직까지는 밀리미터파 회로의 응용은 드물다. 그외 GaN계 MODFET의 경우 활발한 연구가 진행되고 있어 현재는 주로 소자 연구와 10 GHz 내외의 회로가 제작되고 있다. 하지만 140 GHz f_{max} 가 이미 보고되었고^[36] GaN계 물질의 고유 특성으로 항복전압이 높아 밀리미터파 대역의 고출력 회로 제작에 유망하다. InP계 소자는 웨이퍼 크기의 작고 고가이어서 GaAs계 소자보다 가격면에서 불리하다. GaAs계 MODFET은 pseudomorphic 채널을 이용한 고성능 소자가 많이 제작되고 있어 밀리미터파 대역 회로의 제작에 많이 쓰이고 있다. InP MODFET은 f_{max} 가 수백 GHz가 되어 밀리미터파 대역의 응용에 적합하며 특히 V 또는 W-band이상에서는 전력과 PAE면 등의 성능면에서 GaAs계 MODFET 보다 우세하다. InP HBT는 GaAs HBT에 비해 적은 전력소모와 높은 PAE, 기관의 열전도가 뛰어나 집적도를 높일 수 있어 유리하다.

참 고 문 헌

- [1] S. J. Pearton and N. J. Shah, "Heterostructure Field-Effect Transistors," *High-Speed Semiconductor Devices*, Chapter 5, S.M. Sze, Ed, Wiley Interscience, 1990; P. C. Chao, A. Swanson, A. Brown, U. Mishra, F. Ali, and C. Yuen, "HEMT Devices and Circuit Applications," *HEMTs and HBTs: Devices, Fabrication, and Circuits*, Chapter 3, F. Ali, A. Gupta, Ed., Artech House, Inc., 1991.
- [2] P. M. Asbeck, "Bipolar Transistors," S.M. Sze, Ed, *High-Speed Semiconductor Devices*, Chapter 6, Wiley Interscience, 1990.
- [3] T. Suemitsu et al. "30-nm gate InAlAs/InGaAs HEMT's lattice-matched to InP substrates," *IEDM Technical Digest*, pp. 223-226, 1998.
- [4] H. J. Siweris, H. Tischer, T. Grave, W. Kellner, "A Monolithic W-Band HEMT VCO with Feedback Topology," *International Microwave Symposium Digest*, June, 1999.
- [5] J. W. Mathews, "Defects Associated with the Accommodation of Misfit between Crystals," *J. Vac. Sci. and Technol.*, vol. 12, p. 126, 1975.
- [6] Y. C. Chen, et al. "Composite-Channel InP HEMT for W-Band Power Amplifiers," *11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 305-306, Davos, Switzerland, 1999.
- [7] M. Matloubian, et al., "Submillimeter wave InP-based HEMTs with f_{max} over 600 GHz," *Ultrafast Electronics and Optoelectronics Conference*, April, 1999.
- [8] H. Maher, J. Decobert, A. Falcou, G. Post, A. Scavennec, "A 3-channel InP-HEMT with low output conductance," *11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Davos*, Switzerland, 1999.
- [9] D. Xu, H. G. Heis, S. A. Kraus, M. Sexl, G. Bohm, G. Trankle, G. Weimann, and G. Abstreiter, "Design and Fabrication of Double Modulation Doped InAlAs/InGaAs/InAs Heterojunction FET's for High-Speed and Millimeter-Wave Applications," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 45, no. 1, pp. 21-30, 1998.
- [10] Y. C. Chen, et al. "Composite-Channel InP HEMT for W-Band Power Amplifiers," *11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 305-306, Davos, Switzerland, 1999.
- [11] M. Nishimoto et al., "High Performance D-Band(118 GHz) Monolithic Low Noise Amplifier," *IEEE MTT-S, MON6-5*, Anaheim, CA, June, 1999.
- [12] M. Matloubian, "Advances in Millimeter-wave FET MMIC Technology," *IEEE MTT-S, TUE3-1*, Anaheim, CA, June, 1999.
- [13] D. L. Ingram et al. "A 427 mW, 20 % Compact W-Band InP HEMT MMIC Power Amplifier," *IEEE MTT-S, MON6-4*, Anaheim, CA, June, 1999.
- [14] C. Pobanz, et al., "A High-Gain Monolithic D-Band InP HEMT Amplifier," *IEEE GaAs IC Symposium Digest*, pp. 41-44, 1998.
- [15] S. E. Rosenbaum, et al., "155 GHz and 213 GHz AlInAs/GaInAs/InP HEMT MMIC

-
- Oscillators," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 43, no. 4, pp. 927-932, 1995.
- [16] B. Agarwal et al., "112-GHz, 157 GHz, and 180 GHz InP HEMT traveling-wave amplifiers," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, no. 12, pp. 2553-2559, 1998.
- [17] Y. Umeda, et al., "SCFL static frequency divider using InAlAs/InGaAs/InP HEMTs," *Proc. 25th European Microw. Conf.*, Bologna, pp. 222-228, Sep., 1995.
- [18] Y. Umeda, K. Osafune, T. Enoki, H. Yokoyama, Y. Ishii, and Y. Imanura, "Over-60-GHz Design Technology for an SCFL Dynamic Frequency Divider Using InP-Based HEMTs," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, no. 9, p. 1209, 1998.
- [19] T. Otsuji, et al., "An 80-Gbit/s multiplexer IC using InAlAs/InGaAs/InP HEMTs," 1997 *IEEE GaAs IC Symp. Tech. Dig.*, pp. 183-186, Oct., 1997.
- [20] C. S. Whelan, et al. "High Breakdown Voltage InAlGaAs/In_{0.32}Ga_{0.68}As Metamorphic HEMT for Microwave and mm-wave Power Applications," *IEEE MTT-S, WE4E-2*, Anaheim, CA, June, 1999.
- [21] D. C. Durnka, W. E. Hoke, P. J. Lemonias, G. Cueva, and I. Adesida, "Metamorphic In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As HEMTs on GaAs Substrate with f_T over 200 GHz," *IEDM Technical Digest*, pp. 783-6, 1999.
- [22] P. C. Chao, A. Tessmer, K. H. G. Duh, M. Y. Kao, P. Ho, P. M. Smith, J. M. Ballingall, S. M. Liu, and A. A. Jabra, "W-band low-noise InAlAs/InGaAs lattice matched HEMTs's," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 11, pp. 59-62, 1990.
- [23] T. Nomura, et al., "Novel InP/InGaAs D-HBTs with selective multisteps MOCVD regrowth techniques for high-speed application," *IEDM Technical Digest*, 30_3, 1997.
- [24] M. Rodwell et al., "Transferred-Substrate Heterojunction Bipolar Transistor Integrated Circuit Technology," *11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Davos*, Switzerland, 1999. B. Agarwal, et al., "A 50 GHz Feedback Amplifier with AlInAs/GaInAs Transferred-Substrate HBT," *IEDM Technical Digest*, 30_2, 1997.
- [25] Tohru Oka, et al., "InGaP/GaAs HBT's with High-Speed and Low-Current Operation Fabricated Using WSi/Ti as the Base Electrode and Burying SiO₂ in the Extrinsic Collector," *IEDM Technical Digest*, 30_1, 1997.
- [26] K. Oda, E. Ohue, M. Tanabe, H. Shimamoto, T. Onai, and K. Washio, "130-GHz f_T SiGe HBT Technology," *IEDM Tech. Digest*, Dec., 1997.
- [27] K. Washio, M. Kondo, E. Ohue, K. Oda, R. Hayami, M. Tanabe, H. Shimamoto, and T. Harada, "A 0.2- μ m Self-Aligned SiGe HBT Featuring 107-GHz f_{max} and 6.7-ps ECL," *IEDM Tech. Digest*, pp. 557-60, Dec., 1999.
- [28] M. S. Heins, T. Juneja, J. A. Fendrich, J. Mu, D. Scott, Q. Yang, M. Hattendorf, G. E. Stillman, and M. Feng, "W-band InGaP/GaAs HBT MMIC Frequency Sources" *IEEE MTT-S, MO3C-2*, Anaheim, CA, June, 1999.
- [29] A. K. Oki, et al., "Future Technologies for Commercial and Defense Telecommunication

-
- Electronics," *IEEE MTT-S, WE2E-1*, Anaheim, CA, June, 1999.
- [30] Sokolich et al., "Optimizing InP HBT-Technology for 50 GHz Clock-rate MSI Circuits," *11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 195-198, Davos, Switzerland, 1999.
- [31] S. Mohammadi et al., "Optimal Design and Experimental Characterization of High-Gain GaInP/GaAs HBT Distributed Amplifiers," *IEEE MTT-S, TU4C-3*, Anaheim, CA, June 1999.
- [32] A. Huber et al. "Design and Characterization of a 50 GHz InP/InGaAs HBT amplifier," *11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 191-194, Davos, Switzerland, 1999.
- [33] U. Gütich, et al., "24-27 GHz dielectrically stabilized oscillators with excellent phase noise properties utilizing InP/InGaAs HBTs," *IEEE MTT-S, TU2F-2*, Anaheim, CA, June 1999.
- [34] Y. Kwon, W.-J. Ho, and J. A. Higgins, "A Q-band monolithic linear amplifier using AlGaAs/GaAs HBT's," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 6, pp. 180-182, 1996.
- [35] K. Kobayashi, M. Nishimoto, L. T. Tran, H. Wang, J. C. Cowles, T. R. Block, J. H. Elliott, B. R. Allen, A. K. Oki, and D. C. Streit, "A 44-GHz High IP3 InP-HBT Amplifier with Practical Current Reuse Biasing," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, no. 12, pp. 2541-2552, 1998.
- [36] K. Chu, B. Green, and L. F. Eastman, *To be published*.

≡필자소개≡

범진욱

현재 서강대학교 전자공학과 교수