

III-V족 화합물 반도체 P-HEMT소자의 연구 동향



1. 서론

III-V족 화합물 반도체는 원소 주기율표 상의 III족과 V족 원소들이 3원계(ternary)와 5원계(pentad)등의 화합물 형태로 이루어진 반도체이다. 화합물 반도체를 구성하는 주요 III족 및 V족 원소들을 표 1에 나타내었다.

표 1. III-V족 화합물 반도체의 주요 구성원소

III	V
B	N
Al	P
Ga	As
In	Sb
Tl	Bi

III-V족 화합물 반도체인 GaAs는 Silicon이 지니고 있는 장점으로 인해서 오랜 기간동안 제 역할을 못해왔지만, 최근 고순도의 Semi-Insulating(SI) 재료를 성장시킬 수 있는 기술의 발전으로 인하여 그 응용분야가 현저히 상승되고 있다. 현재 GaAs 반도체는 장점인 높은 전자 이동도, radiation hardness, 큰 에너지 밴드갭과 direct 밴드갭의 특성을 이용하여 2GHz 이상의 주파수 대역에서 동작할 수 있는 마이크로파용 소자, 초고속 논리 회로, 광집적회로와 단일칩 마이크로파 집적회로(monolithic micr

-owave integrated circuits, MMIC)등에 이용되며 새로운 소자와 공정기술이 끊임없이 개발되고 있다. III-V족 화합물로 제조된 소자로는 GaAs MESFET, 이중 접합 쌍극자 트랜지스터(hetrojunction bipolar transistor, HBT), 고속 전자 이동 트랜지스터(high electron mobility transistor, HEMT)가 주종을 이루고 있다. 특히 HEMT는 전자들의 이동 속도를 향상시키고 동작주파수 영역을 100GHz까지 확장시켜서 초고주파 공학에 많이 응용되고 있다.

그림 1(a)에서 보여주는 바와 같이 HEMT는 AlGaAs와 GaAs의 이중접합에서 생기는 2차원 전자 개스(2-dimensional electron gas, 2-DEG)에 의하여 스위칭 속도가 빠르고 낮은 전력 소모되며, 비교적 제작이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 1986년 이후에는 AlGaAs/GaAs HEMT보다 더 우수한 잡음과 전력특성을 지니고 있는 부정규형 고속 전자 이동 트랜지스터(pseudomorphic high electron mobility transistor, P-HEMT)가 등장하였으며, 이러한 P-HEMT와 같은 초고속소자는 밀리미터파 및 마이크로파 집적 회로에 매우 적합한 소자로 채택되어 사용되고있다.



조신희

광운대학교 전자공학과 대학원 RFIC 센터 연구원



김남영

광운대학교 전자공학과 조교수 RFIC센터 센터장



김복기

광운대학교 전자공학과 전임강사 RFIC 센터 운영위원

P-HEMT 소자의 대표적인 응용 분야로는 전력증폭기(power amplifier), 저잡음 증폭기(low noise amplifier), 광대역 증폭기(wideband amplifier), 혼합기(mixer), 주파수 체배기(frequency doubler), 발진기(oscillator) 등이다.

본 해설에서 III-V족 화합물 반도체 P-HEMT의 구조 및 기본 동작 원리, 그리고 이 소자를 이용한 여러 응용 분야를 소개하고자 한다.^{[1][2]}

2. P-HEMT의 기본구조와 특성

P-HEMT는 선형성이 우수한 소자로 AlGaAs/InGaAs 계면의 에너지 밴드의 차를 이용하는 이중 접합 구조를 갖는다.

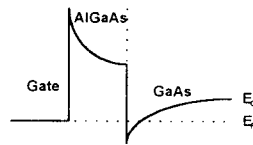
1985년에 부정규형 InGaAs를 n-AlGaAs/GaAs 사이에 채널층으로 추가하기 위해 일반적인 n-AlGaAs/GaAs 이중구조가 수정되었다. 여기에서 n-AlGaAs층에 높게 Si 도핑한 AlGaAs에서의 DX defect center concentration을 최소화하기 위해 0.2 μm이하로 줄였다. 그 결과로 낮은 온도에서 HEMT의 불안정한 I-V특성을 막을 수 있었다. 또한 부정규형 InGaAs층에서의 빠른 전자 이동도와 포화속도 때문에 고주파에서 GaAs층에서보다 우수한 전력 이득과 저잡음 특성을 가질 수 있게 되었다. P-HEMT는 이밖에도 DX center와 다른 결점들을 줄임으로써 1/f 잡음과 generation-recombination 잡음을 줄이는 특성을 갖는다.

P-HEMT는 AlGaAs층과 InGaAs층 사이에 에너지 밴드 차이를 이용하여 InGaAs 채널층

에 2차 전자층을 형성함으로써 전력이득을 높일 수 있고 Si planar 도핑 농도를 조절함으로써 선형성을 좋게 할 수 있다. 여기서 전력이득과 관련이 큰 전달코덕턴스(g_m)를 증가시키기 위해서는 높은 In 물비를 갖는 InGaAs 채널층을 얇게하고 짧은 게이트 길이를 갖도록 제작하여야 한다.

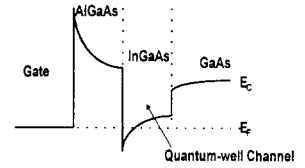
P-HEMT의 발달로 인해서 많은 연구기관에서 InP기판위에 AlInAs/InGaAs 구조안으로 격자 정합된(lattice-matched) InGaAs 양자 우물을 사용하기 시작하였다. 그 효과는 바로 III-V족을 포함하는 고속력 HEMT 기술을 낳게 되었다.

P-HEMT의 구조는 일반 HEMT와 차이가 있다. 즉, AlGaAs/GaAs사이에 InGaAs층이 첨가된다는 점이다(그림 1). 그 결과로 더 많은 캐리어들이 채널안에 감금되는 것이 그림 2에서 보여진다. 또한 P-HEMT 구조는 표면 전하 밀도(sheet charge density)와 이동도가 스페이서(spacer) 두께의 변화에 의존하는데, 표면 전하 밀도(sheet charge density)에 따른



n+ - GaAs Capping Layer	$10^{19}/\text{cm}^3$
n+ - AlGaAs Donor Layer	$10^{18}/\text{cm}^3$
AlGaAs Spacer Layer	Undoped,
InGaAs Channel Layer	Undoped,
2-DEG Channel	
GaAs Buffer Layer	Undoped,
Semi-insulating GaAs Substrate	

(a)



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

(b)

그림 1. 일반 HEMT와 P-HEMT의 비교 (격자상수 대 밴드갭)
(a) 일반 HEMT
(b) P-HEMT

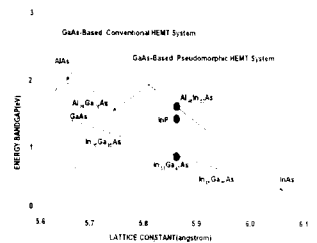


그림 2. 일반 HEMT와 P-HEMT의 비교 (에너지 밴드 다이어그램과 소자층구조)

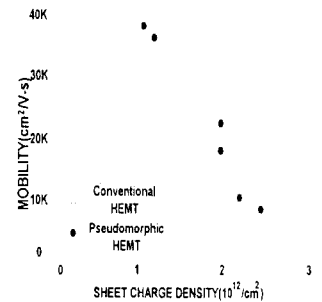


그림 3. 일반 HEMT와 P-HEMT의 77K 전자 표면 전하 밀도 대 이동도.

이동도를 보면 P HEMT 구조의 표면 전하 밀도가 일반 HEMT 보다 항상 높음을 그림 3으로 알 수 있다.

P-HEMT에서도 문제점은 있게 마련이다. 게이트 리세스(recess) 방법이 사용된다면 높은 AlGaAs 도핑으로 소자의 핀치 오프(pinch-off) 전압을 조절하는 것이 어렵게 된다. 또한 쇼트 채널(short channel) 소자들은 드레인 출력 컨덕턴스(drain output conductance)가 실제 게이트 길이(effective gate length)와 감소에 따라 증가한다는 문제점이 있다. 출력 컨덕턴스의 증가는 소자의 전력이득의 감소와 2-DEG에 있는 캐리어가 채널에 효과적으로 갇힘(confinement)이 되지 않는 결과를 낳는다. 이러한 문제점들을 최소화하기 위하여 AlGaAs/InGaAs/GaAs 으로 평면 도핑(planar-doped)된 P-HEMT를 사용한다(그림 4).

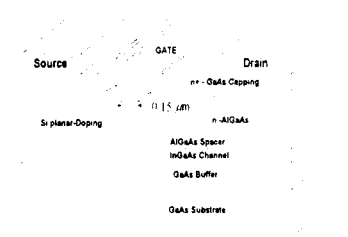


그림 4. 평면 도핑된 P-HEMT의 층 구조.

양자 우물(quantum well) 채널 구조 때문에 InGaAs P-HEMT가 전형적인 HEMT보다 캐리어 갇힘(carrier confinement)효과가 크고, 쇼트 채널 효과(short channel effect)로 생기는 문제점을 보상한다. 그리고 평면 도핑 구조를 사용하여 게이

트 누설전류와 항복전압의 향상을 가능하게 하였다. 이러한 평면 도핑 구조는 넓은 게이트 전압 범위를 통하여 높은 전달컨덕턴스를 얻을 수 있었고 균일하게 도핑된 HEMT 구조보다 더 우수한 특성을 보였다.

P-HEMT는 크게 AlGaAs/GaAs 이종접합을 갖는 GaAs-based P-HEMT와 InAlAs/InGaAs 이종 접합을 갖는 InP-based P-HEMT가 있다. GaInAs/AlInAs 물질구조는 향상된 HEMT 동작을 야기시키는 여러 가지 잇점을 제공한다. 가장 중요한 잇점은 GaInAs/AlInAs 이종 접합 면에서 나타나는 전도 대역 불연속성(conduction band discontinuity)이다. GaAs/AlGaAs는 0.25eV인데 반해 GaInAs/AlInAs는 0.5eV이고 부정규형 구조에 대해서는 0.4eV의 값을 갖는다. ΔE_c 가 크면 캐리어의 2-DEG 갇힘이 용이하다는 특징이 있다. 그러나, InP-based P-HEMT의 문제점은 격자 정합(lattice matching)과 InP기판의 안정화(stabilization)이다. 이 문제의 해결을 위해서는 격자상수의 조정이 필요하게 된다. 여기서 성장되는 InAlAs 및 InGaAs 물질의 격자상수는 In의 조성이 변한다면 InP기판의 격자상수와 달라져서 격자간의 변형(strain)이 일어나는데 이러한 변형은 물질의 전기적 특성을 변화시키므로 이 현상을 이용하면 초고속 및 초저잡음 특성을 갖는 소자를 개발할 수 있다. 하지만 변형의 정도가 심하다면 구조내 결함의 원인이 되며 전기적 특성에도 많은 영향을 미치게 된다.^[15] InP based P-HEMT의 단

면도를 그림 5에서 나타내었다.^[10] AlInAs는 HEMT 구조에서 큰 밴드갭(high band-gap) 물질로 사용된다. 도핑을 변화시키면서 만든 InGaAs/AlInAs 구조로부터 만들어진 소자는 최대 전류이득 차단주파수 f_T 가 0.1 μ m 게이트 길이를 갖는 소자에 대하여 250GHz이며, 최대 잡음지수(60GHz에서 0.8dB)와 매우 빠른 스위칭속도(300K에서 4ps)를 나타낸다.

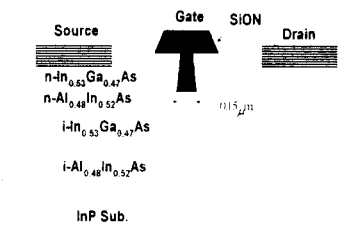


그림 5. Lattice-matched InP-based P-HEMT의 단면도.

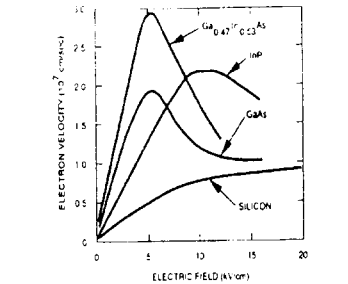


그림 6. GaInAs, InP, GaAs와 Si의 속도계 특성.

소자의 채널내에 전자들이 충분히 집중되었을 때, 채널물질의 속도계(velocity field) 특성은 최대 주파수와 잡음 동작 한계를 결정한다. GaAs와 GaInAs의 속도계 특성을 그림 6에 나타내었다.

GaNAs가 높은 전자첨두속도를 나타내고 있다. 게이트하에서 전자들의 평균 속도가 첨두속도와 근접한 짧은 게이트 길이를 갖는 디바이스에 있어서는 GaInAs안의 전자 운송 시간이 상당히 짧아질 것이다.

3. P-HEMT의 비선형 모델

고전력 증폭기와 혼합기를 설계하는 것은 능동소자의 정확한 비선형 특성을 요구한다. 여러 모델들이 제시되어왔지만 여기서는 간단한 모델을 소개하겠다. $I_{ds}[V_{gs}, V_{ds}]$ 와 $g_m[V_{gs}]$ 의 dc특성을 실험을 통해 파라미터 추출을 하는 방법이다. 이 모델은 AlGaAs/GaAs, pseudomorphic AlGaAs/InGaAs/GaAs, InP에 적자 정합시킨 AlInAs/GaInAs/InP와 GaAs MESFET를 기초로 하는 FET의 응용에도 좋은 결과를 나타내었다^{11,12}. 이 모델은 소자의 dc와 s-파라미터를 예측하는 것과 혼합기나 배율기를 정확성을 갖고 비선형 회로를 시뮬레이션하는 데에 사용되고 있다. PM2 HEMT의 추출-파라미터를 표 2에서 보였고 이 모델로 구한 파라미터와 측정값을 통해 얻은 파라미터를 그림 7과 그림 8에서 비교하였다.

표 2. PM2 HEMT의 추출 파라미터

R_g	R_d	R	R_m	C_{gd}	C_{gs}	C_{int}
4m Ω	3.5 Ω	3	6	60	0.28	35
I_{pk}	P ₁	P ₂	V_{pk}	λ	α	
26.3	3.35	7	0.55	0.02	3	

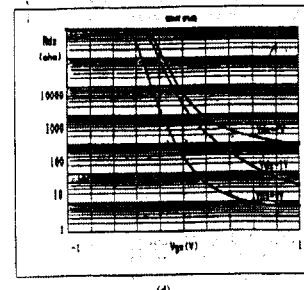
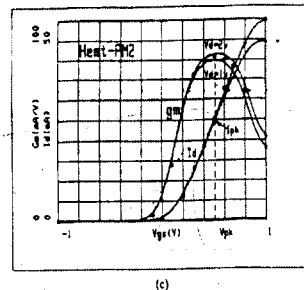
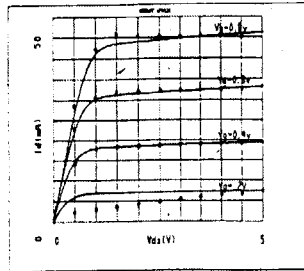
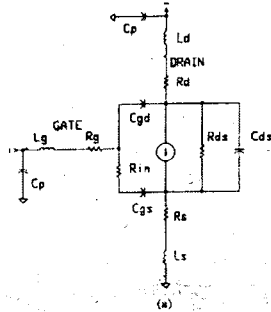


그림 7. PM2 HEMT의 모델 파라미터와 측정 파라미터 비교

- (a) 등가회로
- (b) 드레인 전압 대 드레인 전압
- (c) 드레인 전압과 전압보강팩터 대

게이트 전압
(d) 드레인-소스 저항 대 게이트 전압

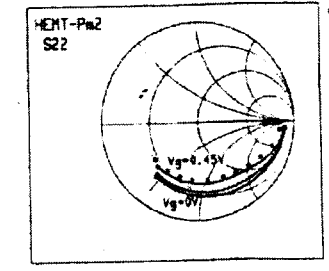
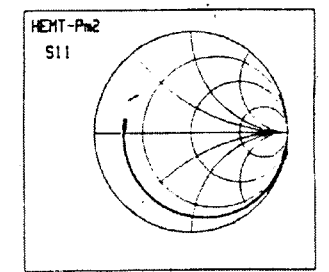
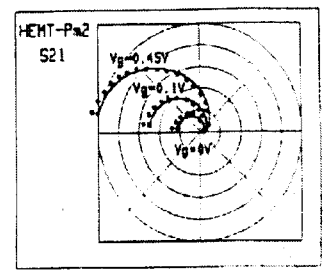
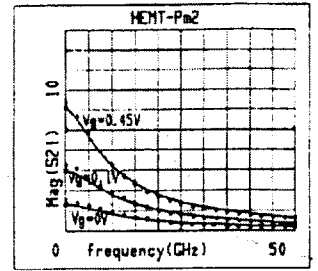


그림 8. PM2 HEMT의 모델 s-파라미터와 측정 s-파라미터의 비교

- (a) S21의 크기 (b) S21 (c) S11
- (d) S22

4. P-HEMTs의 성능비교

일반 HEMT와 GaAs-based P-HEMT, 그리고 GaAs-based P-HEMT와 InP-based P-HEMT의 잡음특성 비교를 표 3와 표 4에서 각각 나타내었다.

표 3. GaAs-based P-HEMT와 일반 HEMT의 60GHz 잡음 특성 비교.

Device Type	Gate Length (μm)	F_{min} (dB)	G_n (dB)	F_N (dB)
P-HEMT	0.25	1.8	7.2	2.13
	0.15	1.6	7.6	1.87
	0.08	1.9	9.2	2.11
Conventional HEMT	0.25	1.8	6.0	2.27

F_{min} = minimum noise figure, G_n =associated gain, F_N =noise figure of an infinite-stage lossless amplifier

표 4. 0.15 μm gate-length GaAs based P-HEMT와 InP based P-HEMT의 잡음 특성 비교.

Device Type	frequency (GHz)	F_{min} (dB)	G_n (dB)	F_N (dB)
GaAs-based PHEMT	18	0.55	15.0	0.57
	60	1.6	7.6	1.87
InP-based PHEMT	18	0.3	17.1	0.31
	60	0.9	8.6	1.03
PHEMT	94	2.4	5.4	3.09
	94	1.4	6.5	1.73

5. P-HEMT의 응용 분야

P-HEMT는 채널내의 표면 전하 밀도가 크기 때문에 전달코터

턴스(g_m)의 값도 크게 된다. 이렇게 큰 g_m 값은 큰 전력이득 및 이득대역폭을 보장하기 때문에 P-HEMT는 고주파용과 광대역용으로 적합하다. P-HEMT 기술의 가장 중요한 응용분야는 마이크로파와 밀리미터파 소자이다. 이러한 P-HEMT는 빠른 속도 성능을 보이지만, 일반적인 HEMT와 상응하는 잡음지수를 갖는다.

5-1. 저잡음용 P-HEMT의 응용

P-HEMT는 일반적인 HEMT와 상응하는 잡음 지수를 갖지만 밀리미터파 대역에서는 1~2dB 정도의 더 높은 이득을 제공한다. P-HEMT에 있어서의 고이득은 높은 전달 코터턴스와 양자우물 채널내에서의 우수한 캐리어 감응력의 결과이며, 이는 물체내에 위치하는 증폭기의 잡음 지수를 줄임으로써 고주파수에서 확실한 이득을 갖게한다. 게이트 길이 0.15 μm 의 AlGaAs/InGaAs/GaAs P-HEMT를 사용하여 Ka 밴드 단일칩 저잡음 2단 증폭기를 그림 9에 나타내었다. 이 증폭기는 32GHz에서 18dB의 이득을 가졌고 1dB의 잡음 지수를 가졌다. 저잡음 증폭기의 설계 데이터와 측정 데이터

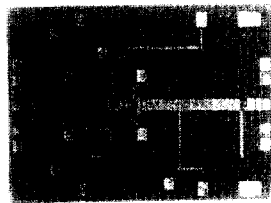


그림 9. P-HEMT 저잡음 2단 증폭기의 사진

를 그림 10에 나타내었고 25GHz에서 45GHz 주파수 범위에서의 HEMT LNA MMIC의 잡음 동작을 그림 11에 나타내었다[17].

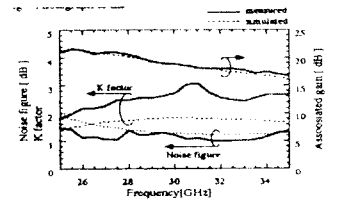


그림 10. P-HEMT LNA의 측정결과 (주파수 대 잡음지수)

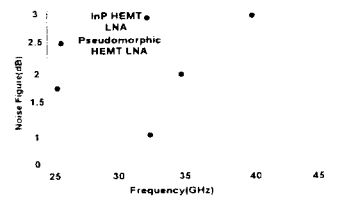


그림 11. P-HEMT LNA MMIC의 잡음 동작 (주파수 대 잡음지수)

5-2. 전력용 P-HEMT의 응용

P-HEMT는 높은 전달코터턴스, 낮은 게이트 누설 전류, 높은 항복전압, 우수한 원치 오프 특성, 그리고 낮은 출력코터턴스를 갖기 때문에 고주파대역에서 우수한 전력 특성을 나타낸다.

전력응용에 있어서 작은 게이트 누설 전류와 우수한 디바이스 항복전압이 필요하다. 이를 위하여 게이트 아래에 위치한 AlGaAs의 도너층의 도핑레벨은 낮아야한다. 그러나, 낮은 도핑레벨은 디바이스 채널에 관한하는 전하 표면 전하 밀도(sheet charge density)를 감소시킨다.

이 문제를 해결하려면 도핑된 채널(doped channel) 또는 이중-이종접합 채널 구조를 사용한다.

Fully selective double recess 0.25 μ m 전력 P-HEMT를 이용하여 전력 증폭기를 설계한 것을 그림 12에 나타내었다. 이 증폭기는 3~6GHz에서 17dB의 전력 이득과 42%의 PAE(power available efficiency)에서 11W로 측정되었고, 최대 PAE 54.5%에서 17W가 측정되었다. 측정된 출력 전력과 PAE를 그림 13과 그림 14에서 각각 나타내었다.

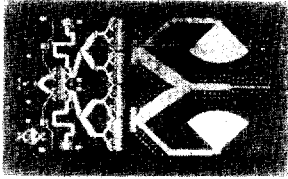


그림 12. P-HEMT 고전력 증폭기의 사진.

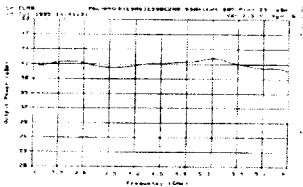


그림 13. P-HEMT 전력증폭기의 주파수 대 출력 전력

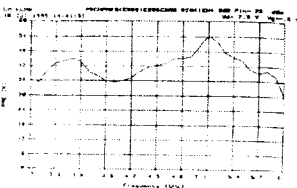


그림 14. P-HEMT 전력증폭기의 주파수 대 PAE

5-3. 디지털용 P-HEMT의 응용

부정규형 디바이스는 높은 전달관덕턴스(g_m)와 최대 전류이득 차단주파수(f_T)의 특성으로 말미암아 초고속 및 저전력 디지털 응용에 사용될 수 있다. 그리고 전도 대역(conduction band)과 가전자 대역(valence band)의 큰 불연속성(discontinuity)은 게이트의 누설전류를 줄이고 가전자대역의 strained-induced splitting으로 인하여 GaAs보다 큰 정공 이동도(hole mobility)를 갖게된다. 이러한 특성들은 P-HEMT를 능동소자로 사용한 회로 전체의 속도를 향상시킨다. P-HEMT 소자의 속도는 게이트의 폭과 길이, 전하이동도, 유전상수, 게이트와 채널 간격등에 좌우된다. 일반적으로 P-HEMT 소자는 일반 HEMT보다 약 2.5배 빠른 속도를 갖는다. 따라서 P-HEMT는 초고속 디지털 회로에 사용될 수 있다. 비록 공정상의 문제점과 비싼 가격으로 말미암아 실제적인 제품으로 상용화하기에 문제가 되고 있지만 앞으로 P-HEMT 소자는 초고속 디지털 응용 분야에서 중요한 역할을 하게 될 것이다. 최근 0.1 μ m 게이트 InAlAs/InGaAs HEMT를 사용

하여 Digital IC 칩셀을 꾸민 회로가 발표되었다^[16]. HEMT는 높은 f_T (174GHz)와 g_m (950mS)을 제공하였으며, 이렇게 꾸민 회로는 40Gbit/s 이상에서 잘 동작하였다. D-F/Fs(또는 DEC)의 최대 동작 속도 사이의 관계와 소자의 장점등을 그림 15에서 나타내었다.

6. 맺음말

P-HEMT의 기본구조, 동작원리, 비선형 모델 및 P-HEMT의 여러 응용분야에 대해서 알아보았다. 2-DEG를 이용한 HEMT는 현재의 초고속 정보처리에 대한 요구를 만족시켜주었다. 하지만, 더욱 높은 주파수 대역의 시스템에서는 HEMT만으로는 요구 사항을 충족시키지 못하기 때문에 P-HEMT가 선보이게 되었다. 특히, 저잡음 및 전력 특성이 우수하여 이러한 특징을 이용한 저잡음 증폭기나 전력 증폭기가 구현되었다. 또한 P-HEMT는 마이크로파 및 밀리미터파와 같은 고주파대역에서의 초고주파 집적 회로를 위한 많은 응용분야에서 우수한 특성을 보여주었을 뿐 아니라 무한한 잠재성을 기대하게 하였다.^{[11][12]} 또한 P-HEMT는 디지털 회로 응용과 같은 고속 스위칭 소자로서도 현재 부각되고 있는 중이다. 앞으로도 지속적으로 P-HEMT에 대해서 많은 연구가 이루어질 것이며 응용분야 또한 광범위해질 것으로 기대되고 있다.

참고 문헌

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

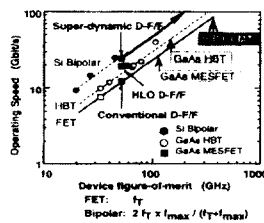


그림 15. D-F/Fs의 동작 속도 사이의 관계와 소자의 장점

- Devices, Fabrication and Circuits," Chap. 3. Artech House, Boston, London (1991).
- [2] J. Michael Golio, "Micro-wave MESFETs & HEMT," Artech House, Boston, London (1991).
- [3] Long Tran, Michael Delaney, Russ Isobe, Derek Jang, Julia Brown, "Frequency Translation MMICs Using InP HEMT Technology," 1996 IEEE MTT-S Digest
- [4] Long Tran, Michael Delaney, Russ Isobe, Derek Jang, Julia Brown, "High Performance, High Yield Millimeter-Wave MMIC LNAs Using InP HEMTs."
- [5] Phillip M. Smith, "Status of InP HEMT Technology for Microwave Receiver Applications(invited)," 1996 IEEE MTT-S Digest.
- [6] C. S. Wu, F. Ren, S. J. Pearton, M. Hu, C. K. Pao and R. F. Wang, "High Efficiency Microwave Power AlGaAs/InGaAs PHEMT's Fabricated by Dry Etch Single Gate Recess," IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. 42, NO. 8, August 1995.
- [7] J. Goel, G. Onak, D.I.Stones, D. Yamauchi, A. Sharma, K. Tan, and J. Mancini, "High Power V-Band Power Amplifier Using PHEMT Technology," 1996 IEEE MTT-S Digest.
- [8] 이해권, 노동완외 5명, "분자선 에피택션 방법으로 성장한 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$ P-HEMT 구조내의 V 및 X자형 결함에 관한 연구," 1997년 7월 전자공학회논문지, 제34권 D 편, 제7호.
- [9] A. F. M. Anwar and Kuo-Wei Liu, "Noise Temperature Modeling of AlGaAs/GaAs and AlGaAs/InGaAs/GaAs HEMTs," Solid-State Electronics Vol. 37, No. 9, pp. 1585-1588, 1994.
- [10] Saburo Takamiya, Naohito Yoshida, Norio Hayafuji, Takuji Sonoda and Shigeru Mitsui, "Overview of Recent Development of HEMTs in The mm-Wave Range," Solid-State Electronics Vol. 38, No. 9, pp. 1581-1588 1995
- [11] Loi D. Nguyen, Minh V. Le, Takyiu Liu, Mark Lui, Karen Kaneko, Eric Holzman and Michael J. Delaney, "Millimeter Wave InP HEMT Technology," Performance and Applications : Solid-State Electronics Vol. 38, No. 9, pp. 1575-1579, 1995.
- [12] Amitava Dasgupta and Nandita Dasgupta, "A Simple Analytical Model for Gate Capacitance-Voltage Characteristics of HEMTs," Solid-State Electronics Vol. 37, No. 7, pp. 1377-1381, 1994.
- [13] Kazuo Shirakawa, Masahiko Shimizu, Yoshihiro Kawasaki, Yoji Ohashi, and Nafumi Okubo, "A New Empirical Large-Signal HEMT Model," IEEE MTT, Vol. 44, NO.4, April, 1996.
- [14] Kazuo Shirakawa, Hideyuki Oikawa, Toshihiro Shima et al, "An Approach to Determining an Equivalent Circuit for HEMT's."
- [15] Ilcho Angelov, Herbert Zirath, and Niklas Rorsman, "A New Empirical Nonlinear Model for HEMT and MESFET Devices," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, pp. 2258-2266, Dec. 1992.
- [16] M. Yoneyama, A. Sano, K. Hagimoto, "A 40-Gbit/s Optical Repeater Circuits using InAlAs/InGaAs HEMT Digital IC Chip Set," IEEE MTT-S Digest, pp. 461-464, 1997.
- [17] S. Fujimoto, T. Oku, Y. Sasaki, "Ka-Band Ultra Noise MMIC Amplifier Using Pseudomorphic HEMTs," IEEE MTT-S Digest, pp. 17-20, 1997.
- [18] J. J. Komiak, S.C. Wang, T.J. Rogers "High Efficiency 11 Watt Octave S/C-Band PHEMT MMIC Power Amplifier," IEEE MTT-S Digest, pp. 1421-1424, 1997.

< 김남영 위원 >