

## 초고주파 집적회로를 위한 Pseudomorphic HEMT소자의 연구 동향

### Research Trends of Pseudomorphic-High Electron Mobility Transistor(P-HEMT) for Microwave Integrated Circuits

조신희, 김남영  
(Shin-Hee Cho, Nam-Young Kim)

**Key Words(중요단어)** : P-HEMT(비정규형 고속 전자 이동 트랜지스터), 2DEG(2차원 전자 개스)  
MMIC(단일칩 마이크로파 집적 회로)

#### 1. 서 론

최근 개인용 이동 통신의 발달과 더불어 마이크로파 집적 회로에 대한 연구가 활발해지면서 마이크로파 기술과 반도체 공정기술이 혼합된 단일칩 마이크로파 집적회로(monolithic microwave integrated circuits, MMIC)의 중요성이 부각되고 있다. 또한 상용화되고 있는 기존의 주파수대역의 문제점을 해결하고자 높은 주파수대역과 고속 처리를 이용한 새로운 통신 서비스에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 더욱이 점차 증가하는 초고속 통신 시스템의 요구와 마이크로파 및 밀리미터 파와 같은 고주파 대역의 응용은 초고속소자를 필요로 하게 되었다.

현재 초고속소자로서 화합물반도체인 갈륨비소(GaAs)가 갖고 있는 반부도체(semi-insulating) 특성 및 빠른 전자이동도(electron mobility)를 이용하여 제작된 GaAs FET가 상용화되고 있다. 대표적으로 GaAs MESFET, 이중 접합 쌍극자 트랜지스터(heterojunction bipolar transistor, HBT), 고속 전자 이동 트랜지스터(high electron mobility transistor, HEMT)가 주종을 이루어 사용되고 있다. 특히 고속 전자 이동 트랜지스터(HEMT)는 전자들의 이동 속도를 향상시키고 동작주파수 영역을 100GHz까지 연장시켜서 초고주파 공학의 여러 응용 분야에 적용되고 있다. HEMT는 AlGaAs와 GaAs의 이중접합에서 생성되는 2차원 전자 개스(2-dimensional electron gas, 2-DEG)에 의하여 매우 빠른 스위칭 속도, 매우 낮은 전력 소모 그리고 비교적 간단한 제작 기술로 만들어질 수 있다는

장점을 갖고 있다. 1986년 이후에 AlGaAs/GaAs HEMT보다 더 우수한 잡음과 전력특성을 갖고 있는 부정규형 고속 전자 이동 트랜지스터(pseudomorphic high electron mobility transistor, P-HEMT)가 등장하였다. 이러한 초고속소자는 밀리미터파 및 마이크로파 집적 회로에 있어서 매우 적합한 소자로 채택되어 사용되고 있다.

P-HEMT 소자의 대표적인 응용 분야로는 전력 증폭기, 저잡음 증폭기, 광대역 증폭기, 혼합기, 주파수 체배기, 발진기 등이다. 본 해설에서 P-HEMT의 구조 및 기본 동작 원리, 그리고 이 소자를 이용한 여러 응용 분야를 소개하고자 한다.<sup>1,2)</sup>

#### 2. P-HEMT의 구조와 기본동작원리

P-HEMT는 선형성이 우수한 소자로 AlGaAs/InGaAs 계면의 에너지 밴드의 차를 이용하는 이중 접합 구조를 갖는다. P-HEMT는 전자 이동도가 높은 InGaAs층을 채널층으로 사용하고, AlGaAs층과 InGaAs층 사이에 에너지 밴드 차이를 이용하여 InGaAs 채널층에 2차 전자층을 형성함으로써 전력이득을 높일 수 있고 Si planar 도핑 농도를 조절함으로써 선형성을 좋게 할 수 있다. 여기서 전력이득과 관련이 큰 전달컨덕턴스(transconductance,  $g_m$ )를 증가시키기 위해서는 높은 In 몰비를 갖는 InGaAs 채널층을 얇게하고 짧은 게이트 길이를 갖도록 제작하여야 한다.

P-HEMT로는 AlGaAs/GaAs 이중 접합을 갖는 GaAs-based P-HEMT와 InAlAs/InGaAs 이중 접합을 갖는 InP-based P-HEMT가 있다.

2-1. GaAs-Based P-HEMT

P-HEMT 동작을 향상시키기 위해서 GaAs 대신에 InGaAs를 2-DEG 채널층으로 사용하였다. GaAs-based P-HEMT는 AlGaAs 배리어층과 GaAs 버퍼 사이에  $In_xGa_{1-x}As$  ( $x=0.15\sim0.35$ )의 얇은 층이 첨가된다는 점에서 전형적인 AlGaAs/GaAs HEMT와 다르다.

InGaAs 채널층과 AlGaAs 도너와 GaAs 버퍼층 사이의 격자상수 부정합이 그림 1에서 나타났다. P-HEMT에 InGaAs층이 들어가면서 더 많은 캐리어들이 채널안에 갇힘(confinement)되는 것이 그림 2에 보여진다. 즉,  $\Delta E_c$ 가 증가하면서 캐리어의 갇힘과 운송특성이 좋아진다.

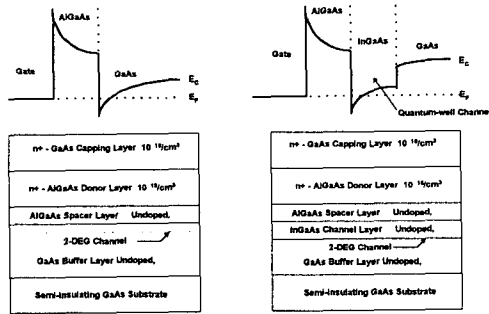


그림 1. 전형적인 HEMT와 P-HEMT의 비교 (격자상수 대 밴드갭)

Fig. 1. Comparison of conventional and Pseudomorphic HEMTs (lattice constant versus bandgap)

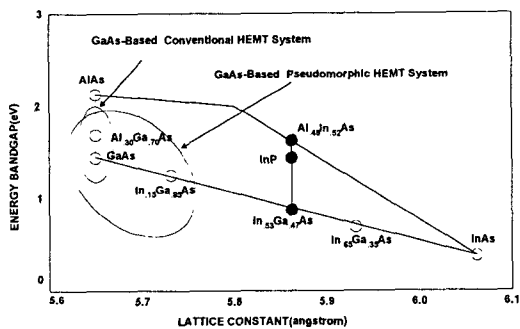


그림 2. 전형적인 HEMT와 P-HEMT의 비교 (에너지밴드 다이어그램과 소자 층구조)

Fig. 2. Comparison of conventional and Pseudomorphic HEMTs. (energy diagrams and device layer structures.)

P-HEMT 구조는 표면 전하 밀도(sheet charge

density)와 이동도가 스페이서(spacer) 두께의 변화에 의존하는데 표면 전하 밀도(sheet charge density)에 따른 이동도를 나타내는데 P HEMT 구조의 표면 전하 밀도가 일반 HEMT보다 항상 높음을 그림 3으로 알 수 있다.

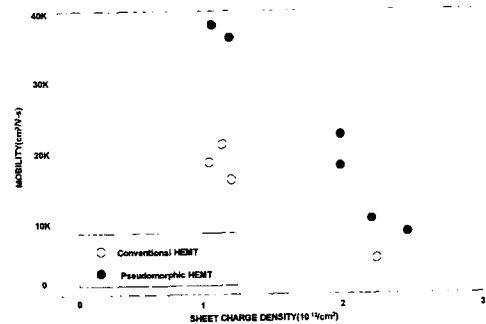


그림 3. 전형적인 HEMT와 P-HEMT의 77K 전자 표면 전하 밀도 대 이동도.

Fig. 3. 77K electron sheet charge density versus mobility for conventional and pseudomorphic HEMTs.

P-HEMT에서 게이트 리세스(recess) 방법이 사용된다면 높은 AlGaAs 도핑으로 소자의 핀치 오프(pinch-off) 전압을 조절하는 것이 어렵고 쇼트-채널(short channel) 소자들이 갖는 다른 문제점은 드레인 출력 콘덕턴스(drain output conductance)가 실제 게이트 길이(effective gate length)의 감소에 따라 증가한다는 것이다. 출력 콘덕턴스의 증가는 소자의 전력효율의 감소와 2-DEG에 있는 캐리어가 채널에 효과적으로 갇힘(confinement)이 되지 않는 결과를 낳는다. 이러한 문제점들을

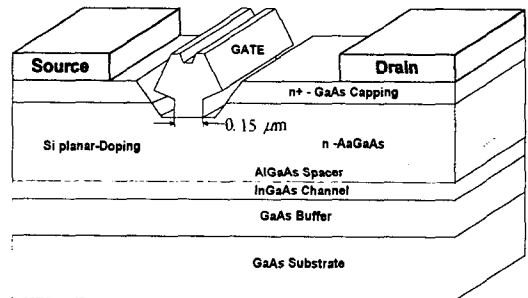


그림 4. 평면 도핑된 P-HEMT의 층 구조.

Fig. 4. The layer structure of the planar-doped P-HEMT

최소화하기 위하여 AlGaAs/InGaAs/GaAs으로 평면 도핑(planar-doped)된 P-HEMT를 사용한다. (그림 4)

양자 우물(quantum well) 채널 구조 때문에 InGaAs P-HEMT가 전형적인 HE-MT보다 캐리어 감금(carrier confinement)효과가 크고, 쇼트 채널 효과(short channel effect)로 생기는 문제점을 보상한다. 그리고 평면 도핑 구조를 사용하여 게이트 누설전류와 항복전압의 향상을 가능하게 하였다. 이러한 평면 도핑 구조는 넓은 게이트 전압 범위를 통하여 높은 전달콘덕턴스를 얻을 수 있었고 균일하게 도핑된 HEMT 구조보다 더 우수한 특성을 보였다.

### 2-2. InP-Based P-HEMT

InGaAs/InGaAs/InP P-HEMT 구조는 InP기판 위에 이 물질의 격자상수(lattice constant)와 일치하는  $In_{0.52}Al_{0.48}As$ 와  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 의 물질을 성장하여 이용하고 있다. 여기서 성장되는 InAlAs 및 InGaAs 물질의 격자상수는 In의 조성이 변한다면 InP기판의 격자상수와 달라져서 격자간의 변형(strain)이 일어난다. 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.<sup>8)</sup>

InP-based P-HEMT의 단면도를 그림 5에서 나타내었다.<sup>10)</sup> 여기서 InP기판을 사용하며 이 기판은 50%의 GaAs와 50%의 InAs의 합금이 갖는 격자상수를 갖고 AlInAs는 HEMT 구조에서 큰 밴드

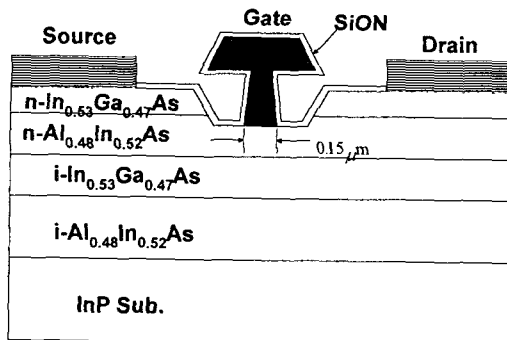


그림 5. 격자정합된 InP-based P-HEMT의 단면도  
Fig. 5. Cross-sectional schemes of lattice-matched InP-based P-HEMT

갭(high band-gap) 물질로 사용된다. 도핑을 변화시키면서 만들어낸 InGaAs/AlInAs 구조로부터 만들어진 소자는 최대 전류이득 차단주파수  $f_T$ 가 0.1  $\mu m$  게이트 길이를 갖는 소자에 대하여 250GHz이며, 최대 잡음지수(60GHz에서 0.8dB)와 매우 빠른 스위칭속도(300K에서 4ps)를 나타낸다.

이러한 소자의 가장 중요한 잇점은 GaInAs/AlInAs 이종접합면에서의 콘덕션밴드의 불연속성(discontinuity)이 매우 크다는 점이다. 전형적인 GaAs/AlGaAs HEMT는 0.25eV이고 GaInAs/AlGaAs P-HEMT는 0.4eV이지만 이 물질에서는  $\Delta E_c$ 가 0.5eV이다.  $\Delta E_c$ 가 크면 캐리어의 2-DEG 감금이 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.

전형적인 InGaAs-AlInAs 도핑된 P-HEMT의 구조(그림 6)를 보면 AlInAs 버퍼층은 소자가 우수한 핀치-오프 전압 특성을 갖게하고 superlattice 버퍼층은 Ga-InAs 채널의 스캐터링(scattering)을 줄이기 위해 AlInAs표면에 성장하게 되며, 이 층은 기판으로부터 에피층으로 확산하는 원하지 않는 불순물을 trap하는 역할을 한다.

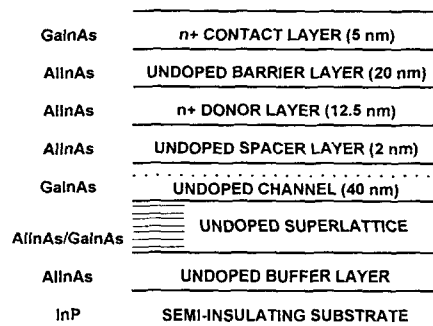


그림 6. 전형적인 GaInAs-AlInAs 변형 도핑된 구조  
Fig. 6. Typical GaInAs-AlInAs modulation doped structure.

### 3. P-HEMT의 대신호 등가모델

현재 가장 적합한 P-HEMT 등가모델은 대신호 GaAs MESFET모델로 알려져 있다. GaAs MESFET모델과 HEMT모델을 그림 7과 8에 나타내었으며 P-HEMT 등가모델은 GaAs MESFET모델을 그대로 사용하고 있다.<sup>6)13)14)</sup>

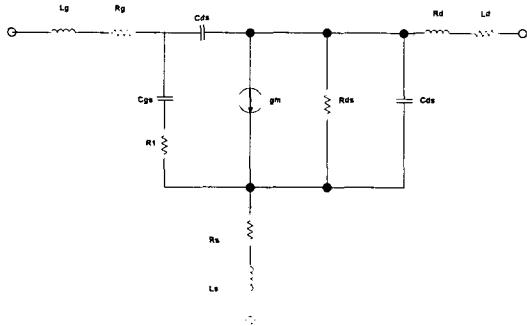


그림 7. GaAs MESFET 또는 P-HEMT 등가 회로  
Fig. 7. Equivalent circuit of GaAs MESFET or P-HEMT.

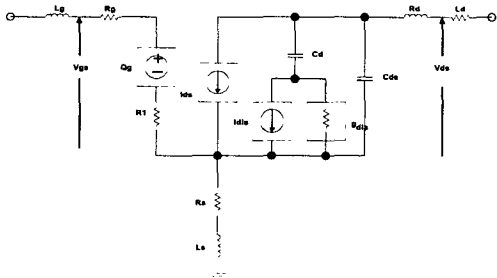


그림 8. 대신호 HEMT 모델  
Fig. 8. Large-signal HEMT model.

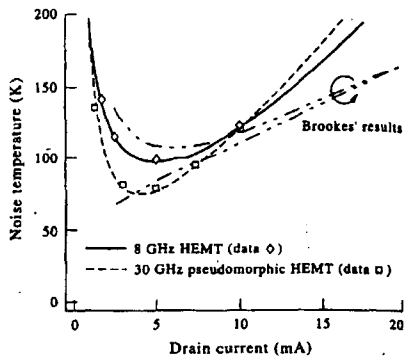


그림 9. AlGaAs/GaAs HEMT와 P-HEMT의 드레인 전류 대 잡음 온도.  
Fig. 9. Noise temperature is plotted as a function of drain current for AlGaAs/GaAs HEMT and P-HEMTs.

#### 4. P-HEMTs의 성능 비교

AlGaAs/GaAs HEMT와 AlGaAs/InGaAs/

GaAs P-HEMT에 대하여 잡음 온도(noise temperature) 특성을 비교하여 그림 9, 10, 11과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 드레인 전류 대 잡음 온도(그림 9), 주파수 대 잡음 온도(그림 10) 그리고 게이트 길이 대 최소 잡음 온도(그림 11)를 측정했을 때 P-HEMT가 AlGaAs HEMT보다 낮은 잡음온도를 갖는다는 것을 알 수 있었다.

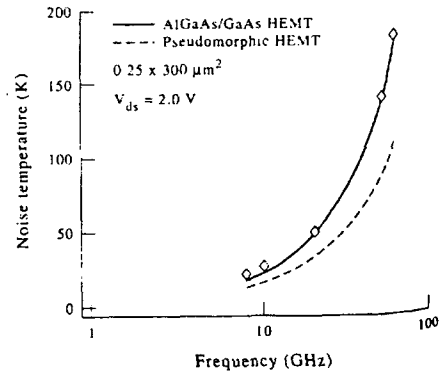


그림 10. 8~60 GHz의 범위에 걸친 주파수의 함수로서 그려진 계산된 최소 잡음 온도.  
Fig. 10. Calculated minimum noise temperature  $T_{min}$  is plotted as a function of frequency range of 8~60 GHz

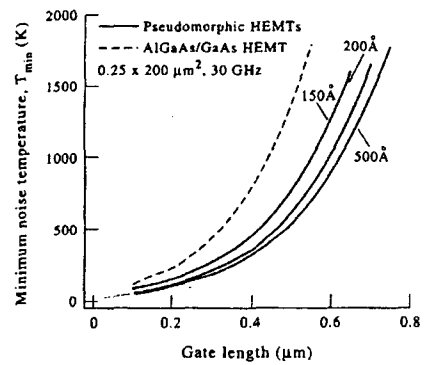


그림 11. AlGaAs/GaAs HEMT와 P-HEMT에 대한 게이트 길이의 함수로 그려진 최소 잡음 온도.  
Fig. 11. Minimum noise temperature is plotted as a function of gate length AlGaAs/GaAs and P-HEMTs.

HEMT와 P-HEMT, 그리고 GaAs-based P-HEMT와 InP-based P-HEMT의 동작특성 비교를 표. 1과 2에서 나타내었다.

표 1. GaAs-based P-HEMT와 전형적인HEMT의 60GHz 잡음 동작.

Table 1. 60GHz Noise performance of GaAs-based P-HEMT and conventional HEMT.

Device Type	Gate Length( $\mu\text{m}$ )	$F_{\text{min}}$ (dB)	$G_a$ (dB)	$F_x$ (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

$F_{\text{min}}$  = minimum noise figure,  $G_a$ =associated gain,  $F_x$ =noise figure of an infinite-stage lossless amplifier

표 2. 0.15 $\mu\text{m}$  GaAs-based P-HEMT와 InP-based P-HEMT의 잡음 비교.

Table 2. Noise comparison of 0.15 $\mu\text{m}$  GaAs-based P-HEMT and InP-based P-HEMT.

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

5. P-HEMT의 응용 분야

P-HEMT 소자를 이용한 연구 분야로서 저잡음 증폭기<sup>4)</sup>, 전력 증폭기, 광대역 증폭기, 혼합기, 주파수 체배기<sup>3)</sup>, 발진기 및 디지털 응용분야에 널리 사용되고 있다. 본 해설에서는 저잡음, 전력 및 디지털 응용에 대해서 간단히 소개하겠다.

5-1. 저잡음용 P-HEMT의 응용

GaAs-based P-HEMT와 InP-based P-HEMT는 현저하게 낮은 잡음지수와 더불어 1~2dB 높은 이득을 제공한다. 예를 들면, 수신기의 둘째 단(second stage)에 삽입되는 P-HEMT는 우수한 잡음 특성으로 전체 시스템의 잡음 지수를 향상시키게 된다.<sup>3)</sup>

GaAs-based P-HEMT의 경우에는 60 GHz에서 1.5dB, 94GHz에서 2.1dB의 매우 작은 잡음 지수(noise figure)를 얻었고, InP-based P-HEMT는 60GHz에서 0.8dB, 94GHz에서 1.2dB의 잡음지수를 얻었다. 이것으로 InP-based P-HEMT가 GaAs-based P-HEMT보다 더 우수한 잡음 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.<sup>1)2)</sup>

최근에 COMSAT사에서 0.35 $\times$ 60 $\mu\text{m}$ 의 AlGaAs/InGaAs P-HEMT로 단일칩 V-밴드 증폭기를 구현하였다. 2단으로 구현한 V-밴드 증폭기를 그림 12에 나타내었으며, 56~60GHz에서 5.3dB의 잡음 지수와 8.2dB의 이득을 보여주었다.<sup>1)</sup>(그림 13)

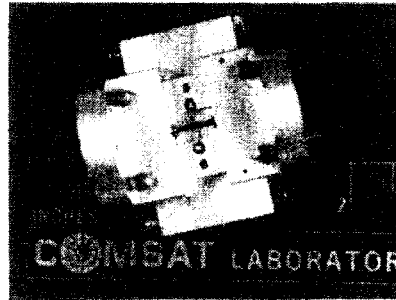


그림 12. 단일칩 V-밴드 2단 P-HEMT LNA 조립품. 칩 크기 2 $\times$ 0.75mm<sup>2</sup>. (COMSAT 제품)

Fig. 12. Monolithic V-band two-stage P-HEMT LNA assembly. chip size 2 $\times$ 0.75mm<sup>2</sup>. (courtesy of COMSAT)

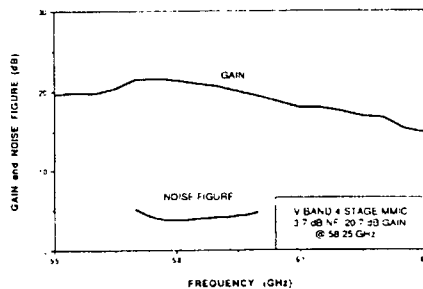


그림 13. 이중 2단 P-HEMT LNA의 이득과 잡음 지수. (COMSAT 제품)

Fig. 13. Gain and noise figure performance of the two dual stage P-HEMT LNA. (courtesy of COMSAT)

5-2. 전력용 P-HEMT의 응용

P-HEMT는 높은 전달콘덕턴스, 낮은 게이트 누

설 전류, 높은 항복전압, 우수한 핀치-오프 특성, 그리고 낮은 출력콘덕턴스를 갖기 때문에 고주파 대역에서 우수한 전력 특성을 나타낸다. 따라서 밀리미터파 전력증폭기는 0.15 마이크로 T 게이트 P-HEMT 기술을 바탕으로 한 전력 MMIC 전력 증폭기로 발전되었으며 InGaAs/GaAs P-HEMT는 높은 항복전압과 큰 전류밀도를 제공하게 되었다.<sup>7)</sup>

0.25 $\mu$ m $\times$ 900 $\mu$ m 이중-이종접합(double-heterojunction) 전력용 P-HEMT를 그림 14에 나타내었다. 전력증폭기는 35GHz에서 650mW 이상의 출력전력을 갖는다.

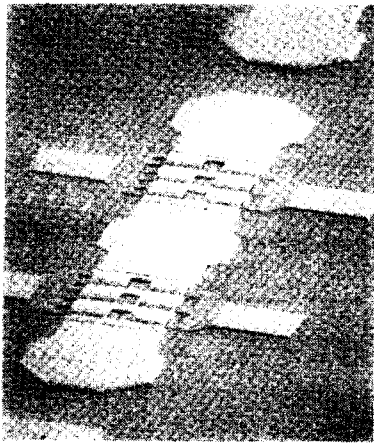


그림 14. 0.25 $\mu$ m $\times$ 900 $\mu$ m 이중-이종접합 비정규형 전력 HEMT.

Fig. 14. A 0.25 $\mu$ m $\times$ 900 $\mu$ m double-heterojunction pseudomorphic power HEMT.

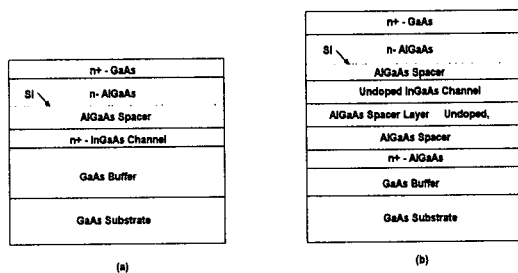


그림 15. (a) 도핑된 채널과 (b) 이중-이종접합 비정규형 전력 HEMT의 층구조

Fig. 15. The layer structures of (a)doped-channel, and (b) double-heterojunction pseudomorphic power HEMT.

전력응용에 있어서 적은 게이트 누설 전류와 우수한 디바이스 항복전압이 필요하다. 이를 위하여 게이트 아래에 위치한 AlGaAs의 도너층의 도핑레벨은 낮아야한다. 그러나, 낮은 도핑레벨은 디바이스 채널에 관한 전체 표면 전하 밀도(sheet charge density)를 감소시킨다. 이 문제를 해결하려면 도핑된 채널(doped channel) 또는 이중-이종접합 채널 구조를 사용한다.(그림 15)

### 5-3. 디지털용 P-HEMT의 응용

비정규형 디바이스는 높은 전달콘덕턴스  $g_m$ 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 정공이동도(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.

### 6. 맺음말

일반적인 GaAs-based P-HEMT 및 InP-based P-HEMT의 구조와 특성 및 응용에 대해서 알아보았다. 2DEG를 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, 저잡음과 전력 특성이 우수하여 이러한 특징을 이용한 저잡음 증폭기나 전력 증폭기가 구현되었다. P-HEMT는 마이크로파 및 밀리미터파와 같은 고주파대역에서의 초고주파 집적회로를 위한 많은 응용분야에서 우수한 특성을 보여주었다.<sup>11)12)</sup> 또한 P-HEMT는 디지털 회로 응용과 같은 고속 스위칭 소자로서 많은 잠재성을 갖고 있다. 앞으로도 P-HEMT에 대해서 많은 연구가 이루어질 것이며 응용분야 또한

광범위해질 것으로 기대되고 있다.

참 고 문 헌

1. F. Ali and A. Gupta, HEMTs and HBTs: Devices, Fabrication and Circuits, Chap. 3. Artech House, Boston, London (1991).
2. J. Michael Golio, Microwave MESFETs & HEMTs. 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 InPHEMT 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 PHETM Technology : 1996 IEEE MTT-S Digest.
8. 이해권, 노동완외 5명, 분자선 에피택 설 방법으로 성장한  $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As/InP$  P-HEMT 구조 조내의 V 및 X자형 결합에 관한 연구 : 1997년 7월 전자공학회논문지, 제34권 D편, 제 7호.
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 Shimra et al. An Approach to Determining an Equivalent Circuit for HEMT's

저자소개



조신희

1971년 서울 출생. 1997년 광운대학교 물리학과 졸업. 1997년 광운대학교 전자공학과 대학원 입학. 현재 GaAs MESFET, GaAs PHEMT를 이용한 MMIC 소자 및 회로 설계 분야 연구중.



김남영

1960년 11월 14일생. 1981년 2월 - 1987년 2월 광운대학 전자공학과 졸업. 1989년 8월 - 1991년 2월 뉴욕주립대학 전자공학과(석사). 1991년 2월 - 1994년 2월 뉴욕주립대학 전자공학과(공·박). 1993년 1월 -1994년 2월 재미과학회 서북부 뉴욕지부 간사. 1994년 2월 - 1994년 9월 뉴욕주립대학 선임연구원. 1994년 9월 - 현재 광운대학교 전자과 조교수. 광운대 신기술연구소 연구원.