

고속 전자 이동 트랜지스터(HEMT)와 그 응용

High-Electron-Mobility-Transistor(HEMT) and its Applications

이관호, 김종헌

(Kwan-Ho Lee, Jong-Heon Kim)

Key Words(중요어) : HEMT(고속전자이동 트랜지스터), MIC(초고주파 집적회로), 2-DEG(2차원 전자 가스), Shottky barrier(쇼트키 장벽), Potential Well(전위우물)

1. 서 론

초고주파 공학은 지난 40년에 걸쳐 새로운 고체 상태 소자와 회로들의 개발과 더불어 급속도로 발전되고 있으며 현재 사용되고 있는 소자들은 현대 초고주파 공학에 있어서 더욱더 중요한 역할을 담당하고 있다. 최초의 초고주파용 반도체는 크리스탈 이었고 2차세계 대전 당시 레이더 응용 분야에 크리스탈 감지기를 개발하기 위해 무수한 노력과 연구가 있었다. 그 당시 실리콘(Si)과 갈륨비소(GaAs)가 사용되었으며 1947년의 쌍극성 트랜지스터의 발명으로 인해 반도체 산업은 가속화 되었다. p-n 접합을 이용하는 소자들이 1950년대와 60년대 널리 이용되었는데 그 응용분야는 증폭기, 주파수혼합기, 주파수 변조기, 발진기 등이 있다. 이런 발전과 더불어서 AlGaAs와 GaAs의 Hetero 접합에서 비롯되어 생성되는 2차원 전자가스(2 Dimensional Electron Gas)의 발견(1978)은 고속 전자 이동 트랜지스터(HEMT)의 발전을 가져왔다. 초기의 고주파회로는 도차관과 동축케이블로 구현될 수 있었으나 1952년 평면 마이크로스트립라인의 도입과 더불어 초고주파 집적회로(MIC)가 가능해졌다.¹⁾ 이 마이크로스트립라인과 HEMT의 만남은 전자들의 이동속도의 증가와 더불어 동작주파수 역시 100GHz 이상의 영역으로 연장됨에 따라 초고주파 공학(Microwave Engineering)뿐만 아니라 광학(Optic Engineering)쪽의 응용 분야에도 적용이 되어오고 있다. 그리고 주파수대가 낮은 경우는 실리콘(Si) 반도체 만으로도 그 동작특성을 만족시킬 수 있었으나 주파수 자원의 폭 넓은 사용으로 인해 점점 더 높은 주파수 대역을 필요로 함에 따라 화합물 반도체의 이용이 필수적이 되었다. 이러한 수요증가 추세와 함께 다량의 데이터의 처리를 위한 고속 컴퓨터나 실시간 신호처리, remote imaging이 필수화 되어가고 있고 소자의

경량화, 소형화에 따른 초고주파 집적회로(MIC)가 지속적으로 연구개발되고 있으며 많은 전계효과 트랜지스터(FET) 소자들 중에서도 잡음에 강하고 전자의 이동도가 향상된 HEMT의 장점을 이용하여 여러 응용 시스템이 개발되고 있다. 따라서 본 해설에서는 여러가지 면에서 다른 소자들보다 우수한 특성을 지닌 HEMT의 동작원리와 이 소자들의 응용 분야를 소개하고자 한다.

2. HEMT의 기본 원리

2-1. HEMT의 기본 구조

HEMT는 구조적인 면으로 볼 때 실리콘 n형 금속 산화 반도체 전계효과 트랜지스터(MOSFET)와 비슷 하지만 실리콘의 사용 대신에 화합물 반도체로 구성되어 있는 점이 가장 큰 차이점이다. 기본적인 HEMT의 단면도를 나타내면 그림 1과 같다.

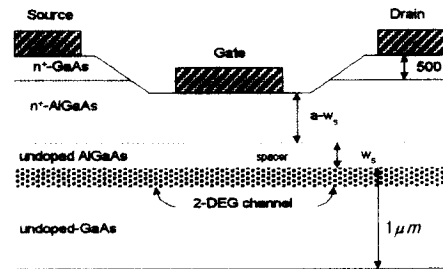


그림 1. 일반적인 HEMT 구조

Fig. 1. Typical Structure of HEMT.

그림 1에서 첫번째로 동작층은 준-부도체기판 위에 도핑 되지 않은 GaAs층으로 형성되어 있다. 일반적으로 이층의 두께는 1 μm이다. 동작 채널의 스페이서라고 불리는 최상층은 도핑되지 않은 AlGaAs 성장으로 그 두께는 20-60Å 정도이다. 금속-반도체 전계 효과 트랜지스터(MESFET)와 같

표 1. HEMT의 장점과 구조에 따른 분류

Table 1. Advantages and Variation of HEMT.

Advantages	
High electron mobility	
Small source resistance	
High f_r (cut-off frequency) due to high electron velocity in large electron field	
High transconductance due to small gate-to-channel separation	
High output resistance	
Higher Schottky barrier height due to deposition of Shottky metal on AlGaAs instead of on GaAs	
Salient Features or Name	Description
Graded (Al, Ga)As layer	(Al, Ga)As donor layer graded in composition from (Al, Ga)As at 2-DEG interface to GaAs at cap interface to facilitate ohmic contact formation
Inverted HEMT structure	Undoped GaAs drift layer grown on top of doped (Al, Ga)As layer
Multiple-heterojunction HEMT	Epitaxial layer structure with more than one heterointerface providing electrons to the 2-DEG
Planar doped layer	Doping of the donor layer confined to a single atomic layer
Quantum well drift layer	Thin (300 - 400 Å) low band-gap drift region confined on both sides by potential barrier formed by hetero-junction with higher band-gap materials
Superlattice buffer layer	Buffer layer composed of undoped (Al, Ga)As/ GaAs layers [e.g. 30 periods of AlAs (15Å) / GaAs (25Å)]
Superlattice donor layer	Superlattice donor layer [e.g., (Al, Ga)As/GaAs] with doping confined to GaAs
Pseudomorphic HEMT	Drift region comprising low-band-gap, high mobility layer, not lattice matched to donor layer (e.g., $Al_{0.25}Ga_{0.75}As / In_{0.53}Ga_{0.47}As / GaAs$ layers)
(Al, In)As/(Ga, In)As/InP HEMT	Lattice matched HEMT epitaxial layer with (Al, In)As donor layer and (Ga, In)As drift layer on semi-insulating InP substrate
HEMT on Si substrate	HEMT epitaxial layer grown on a silicon substrate
Hetero structure insulated gate FET(HIGFET)	No donor layer, 2-DEG induced in channel by varying gate electrode potential, similar to MOSFET
p-channel HEMT	Donor layer dope with Be to provide a 2-DEG hole gas at interface

이 게이트 단 바이어스의 조절로 전류 흐름을 조절할 수 있으며 소스단은 그라운드되어 있으며 드레인단으로 양전하가 입력되었을 때 전자의 흐름이 발생하게 된다. HEMT의 동작 특성의 이해를 위해 GaAs층과 AlGaAs의 Hetero 접합 층의 에너지 밴드 다이어그램을 그림 2에 나타내었다.

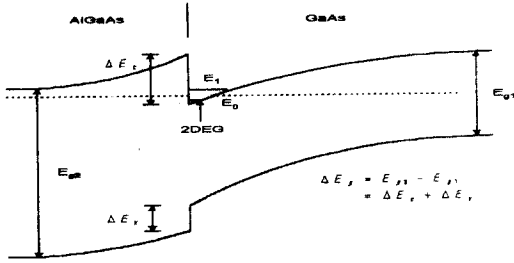


그림 2. GaAs와 AlGaAs층의 밴드 다이어그램.
Fig. 2. Band diagram of a GaAs/AlGaAs.

그림 2에서 보듯이 AlGaAs의 에너지 밴드 갭이 1.72eV이고 GaAs의 에너지 밴드 갭이 1.42eV 이므로 0.3eV의 전위차가 에너지 장벽에 발생하게 된다. 이때 이 에너지 밴드 갭의 차이가 전위 우물을 생성시키는데 이 전위 우물이 conduction 에너지 준위의 최소 단위가 된다. 전자들이 소스에서 들어오기 시작하면 대부분의 전자들은 hetero 접합 부분의 전위 우물로 들어오게 된다. 그리고 이 우물의 장벽이 가파르기 때문에 전자들은 전하의 좁은 통로로만 이동하게 된다. 이 좁은 통로를 2차원 전자-개스(2DEG)라 부르는데 소자의 표면과는 평행하고 폭으로는 가로지르는 방향이기 때문이다. 그 결과로 HEMT는 MESFET보다 전자들의 이동도가 2배 이상 향상 되었다. 이러한 이동도 때문에 생기는 MESFET에 대한 대표적인 장점으로는 저잡음과 속도 증가가 있다. 그리고 널리 알려진 HEMT의 장점과 그 구조의 차이에 따른 분류를 표 1에 나타내었다.

2-2. 소신호 해석을 위한 등가회로 구현

소자의 동작 특성을 이해하기 쉽게 구현하는 접근 방법 중에서 중요한 방법 중 하나는 그 소자가 갖고있는 파라미터 값들을 등가 회로로 구현하는 방법이 있다. 소신호 해석은 능동 소자를 이용한 초고주파 회로 설계에 있어 중요한 의미를 지니는데 이 모델은 S-parameters값과 소자 내의 전기적 특성 관계를 상호 관련 짓는데 중요한 역할을 한다. 이러한 각 성분들에 대한 적절한 값을 찾게 되면 원하는 주파수 대역에서의 특성 뿐만 아니라

나아가서 소자에 대한 주파수 대역 밖의 특성 값을 유추해 낼 수도 있다.²¹⁾ 또한 이 등가회로의 각 성분 값들은 게이트 크기를 정하는데 있어서 중요하기 때문에 MMIC 설계에 중요한 역할을 한다. HEMT의 해석을 위하여 기본 구조상에서 등가회로를 나타내면 그림 3과 같다.

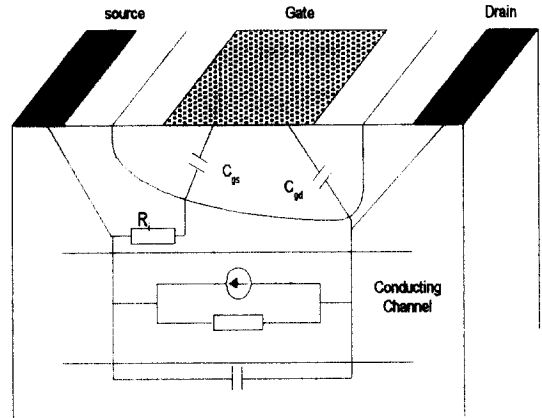


그림 3. 물리적 측면에서의 HEMT에 대한 소신호 회로 모델

Fig. 3. Physical basis of HEMT small signal model.

그림 3에서 conductive channel은 게이트 전위의 쇼트키(shottky) 장벽을 이용하여 제어할 수 있고 순수 이득은 소자의 transconductance g_m 에 의해 알 수 있다.³¹⁾ 그리고 게이트 전압의 변화는 전자 이동 특성이 다른 각각의 서로 다른 지역에서 carrier농도를 동시에 변화시킨다. 그리고 게이트, 소스, 드레인 단에 접하는 기생 임피던스가 회로에 더해지게 되면 그림 4와 같이 표현되어진다.

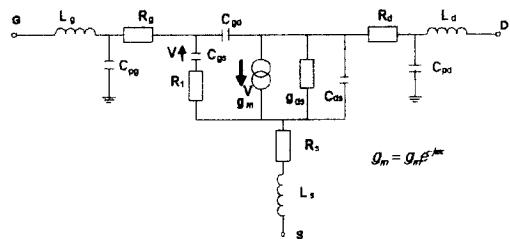


그림 4. 기생 소자 값을 첨가한 소신호 회로 모델

Fig. 4. Topology of small signal circuit with parasitics.

$$C_{gs}(\omega) = \frac{-\text{Im}[y_{12}(\omega)]}{\omega} \tag{1}$$

$$C_{gs}(\omega) = \frac{\text{Im}[Y_{11}(\omega) - \omega C_{gs}(\omega)]}{\omega} \left\{ 1 + \frac{\text{Re}[Y_{11}(\omega)]^2}{\{\text{Im}[Y_{11}(\omega) - \omega C_{gs}(\omega)]\}^2} \right\} \tag{2}$$

$$R_i(\omega) = \frac{\text{Re}[Y_{11}(\omega)]}{\{\text{Im}[Y_{11}(\omega) - \omega C_{gs}(\omega)]\}^2 - \{\text{Re}[Y_{11}(\omega)]\}^2} \tag{3}$$

$$g_m(f) = \sqrt{\{\text{Re}[Y_{21}(\omega)]\}^2 + \{\text{Re}[Y_{21}(\omega)] + \omega C_{gs}(\omega)\}^2 [1 + \omega^2 C_{gs}^2(\omega) R_i^2(\omega)]} \tag{4}$$

$$\tau(\omega) = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \{ -\text{Im}[Y_{21}(\omega)] - \omega C_{gs}(\omega) - \omega C_{gs}(\omega) R_i(\omega) \text{Re}[Y_{21}(\omega)] \} \tag{5}$$

$$C_{ds}(\omega) = \frac{\text{Im}[Y_{22}(\omega)] - \omega C_{gs}(\omega)}{\omega} \tag{6}$$

$$g_{ds}(\omega) = \text{Re}[Y_{22}(\omega)] \tag{7}$$

그림 4에서 중요하게 여겨야 할 부분은 모든 성분들이 비선형 이라는 점이다. 그리고 등가 회로 내의 모든 성분들은 주파수에 관한 Y-parameters에 의해 유도되어진다. 그래서 이 모델의 7가지 값들은 위의 식 (1)~(7)과 같이 Y-parameters로 표현되어진다.⁴⁾

이와 같이 물리적으로 정확한 등가 회로의 실현과 회로 모델로서의 시뮬레이션 역시 최근 기술로 정확하게 실현할 수가 있게 되었고 이러한 모델 기법은 multilayers의 conduction과 변위전류가 multilayers의 물리적으로 고려되는 초고주파수 부분에서 더욱 유용하게 사용되고 있다.

3. HEMT의 응용

트랜지스터나 FET와 같은 비선형 소자를 이용하여 제작할 수 있는 응용분야는 크게 증폭기, 발진기, 주파수체배기 등으로 나눌 수 있는데 현재 위성통신이나 이동통신 시스템 분야에서도 활발하게 사용되고 있다. 이러한 시스템 내의 소자를 기존의 FET 보다 HEMT를 사용하였을 경우 그에 따른 동작 특성이 우수해 질뿐만 아니라 잡음에도 강한 성질이 있는 것을 알 수 있다.⁴⁾ 그러면 응용 분야에 따른 세부적인 특성에 대해 알아보도록 하겠다.

3-1. 증폭기(Amplifiers)

증폭기란 송신단에서 부터 보낸 신호가 먼 거리를 거쳐 수신단으로 들어올때 미약해져, 이렇게 미

약한 신호를 증폭시켜 주는 역할을 한다. 증폭기의 종류에는 여러가지가 있으나 여기에서는 HEMT로 구현 하였던 저잡음 소신호 증폭기(Low-noise and small-signal Amplifier)와 전력 증폭기(Power Amplifier)를 소개하도록 하겠다.

3-1-1. 저잡음 소신호 증폭기(Low noise and small-signal Amplifiers)

소신호 증폭기는 통신 시스템 전분야에 사용되고 있으며 시스템 내에서 성형 이득블럭처럼 동작하도록 만들어 진다. 동작시의 특성이 선형적인 성질을 지니게 하는 것이 중요한 요인이 된다. 대개 이 시스템은 잡음과 공존하고 있는 신호를 원하고자하는 신호만 정확하게 증폭시켜 주어야하므로 시스템 안으로 들어오는 어떠한 잡음고 원하는 신호와 섞이지 않도록 가능한 한 낮게 유지되어야 한다. 또한 트랜지스터의 이득 역시 적절하게 고려 되어야하는데 증폭기를 연속적으로 연결했을 경우 그에 따른 잡음에 영향을 최소한으로 줄여주어야 하기 때문이다. 기본적인 저잡음 소신호 증폭기의 모델은 그림 5와 같다.

그림 5의 공통 소스 증폭기의 성능을 개선하기 위한 한가지 방법은 balancing을 시키는 방법이다. 그에 대한 회로 모델을 그림 6에 나타내었다.

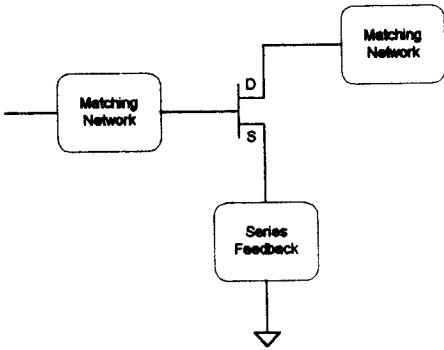


그림 5. 공통 소스 증폭기 구성도
 Fig. 5. Simplified schematic of a common amplifier

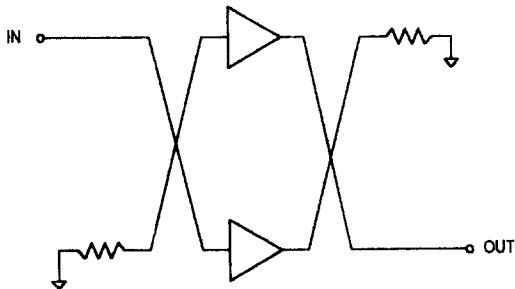


그림 6. 균형 증폭기 모델
 Fig. 6. Balanced amplifier configuration.

이 HEMT-balanced 증폭기는 8.5-16 GHz 대에서 9.7dB의 이득, 3.5dB의 잡음, 20dB의 return loss를 보여줌으로서 다른 소자를 사용하는 것보다 더 효율적이다.⁵⁾ 또한 그림 7에 나타나 있는 병력 feedback 소신호 증폭기도 종종 사용되는데 장점으로서는 트랜지스터와 feedback조합에서의 입력 임피던스가 감소하여 입력 정합이 용이하다. 그러나 잡음 지수면에서 효율이 떨어지기 때문에 모든 응용분야에 적용시키지 못하는 단점이 있다.

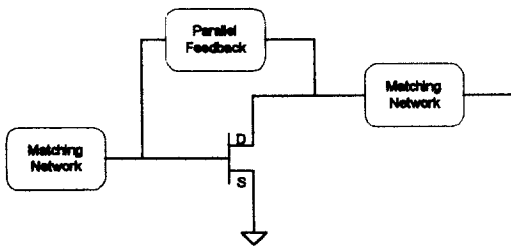


그림 7. 병력 feedback을 이용한 공통 소스 증폭기
 Fig. 7. Parallel feedback in common source amplifier.

3-1-2. 전력 증폭기(Power Amplifiers)

Solid-state 전력 증폭기는 통신 시스템 내에서는 한 곳에서 다른 곳으로의 신호전송을 가능하게끔 충분한 힘을 전달하게끔 하는 역할을 한다. 최근의 이동 전화기나 이동용 통신 장비들의 수요 증가로 많은 전력 증폭기들의 소형화 및 효율증대가 이루어지고 있다. 여기서는 선형성을 중시하는 소신호 증폭기와는 달리 설계시 최대 효율을 고려하여야 하는데 많은 소자들 중 HEMT가 잡음에 강한 특성을 가지고 있어서 이 소자를 사용하는데 44GHz에서 출력파워 250 mW의 저 잡음용 장비에 이용하고 있다.⁶⁾ 출력 파워를 높이기 위해서는 능동 소자의 게이트 표면적을 늘려야 하는데 광대역 전력 증폭기를 제작하는 한가지 방법은 전력 조합 기술을 이용하는 것으로 그림 8에서 보여주듯이 입력된 신호가 여러 갈래로 나뉘는 후 작은 능동 소자(HEMT)에서 증폭된 다음 고풍출력 레벨을 얻기 위해 재 조합하는 기술이다.

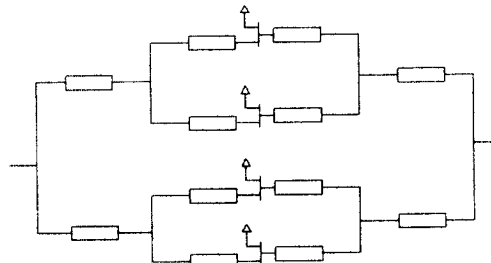


그림 8. 전력 조합 증폭기
 Fig. 8. Power-combining amplifier

이때 총 게이트 표면적은 커질 수 있으나 광대역에서의 임피던스 정합 문제를 간단히 해결할 수 있어 각각의 임피던스 정합을 용이하게 시킬 수 있는 장점이 있다.

3-3. 발진기(Oscillator)

초고주파 발진기는 DC 전력을 AC 신호로 변환시키는 장치로 초고주파 시스템에서 가장 기본적인 필수적인 장치중 하나이다. Solid-state 발진기는 p-n 다이오드나 트랜지스터 같은 능동 소자를 수동 회로와 결합한 형태로 구현이 되어 안정상태의 정현적 RF신호를 발생시킨다. 발진기는 RF 파워를 발생시키는 장치이므로 반드시 부성 저항의 특성을 가져야하고 능동 소자는 비선형 특성을 지녀야한다. 이러한 비선형 특성때문에 발진기 동작의 완벽한 해석은 매우 어렵다. 그리고 많은 시스템들이 거의 잡음이 없는 발진기를 요구하

게 되는데 위상 잡음을 극소화하기 위한 방법중의 하나가 유전체 공진기를 사용하는 것이다. 일반적인 형태의 유전체 공진기를 이용한 발진기의 모습은 그림 9와 같다.

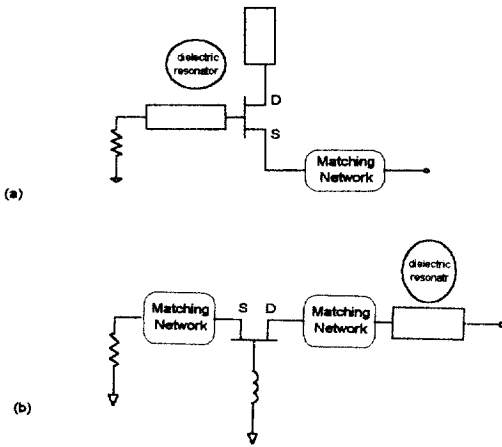


그림 9. 공진기를 사용한 발진기의 모델
 a) 병렬 feedback b) 직렬 feedback
 Fig. 9. Common dielectric resonator oscillator topology. a) shunt feedback b) series feedback

그러나 유전체 공진기를 사용한 발진기의 경우 광대역에서 이용하기 어렵기 때문에 주파수 고정식 발진기가 아닌 주파수 변환식 발진기를 사용하게 되는데 varactor-tuned 발진기와 YIG-발진기가 그 대표적 예이다.(그림 10).

최근에는 InP기판을 사용한 HEMT로 155GHz와

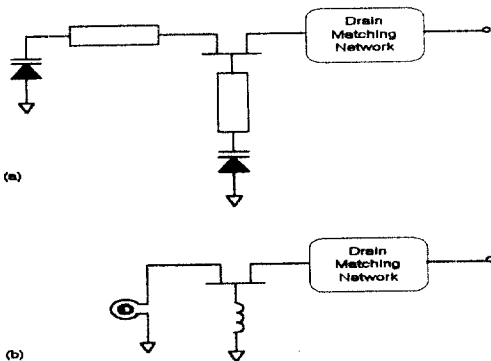


그림 10. (a) Varactor tuned 발진기,
 (b) YIG-발진기
 Fig. 10. a) Varactor tuned oscillator
 b) YIG-oscillator

213GHz에서의 발진기가 구현되었다.⁶⁾ 이와같이 HEMT를 사용하였을 경우 밀리미터 파에서도 원하는 특성을 보일 수 있는 장점을 가지고 있다.

3-4. 혼합기(Mixers)

주파수 혼합기는 three-port 장치로 주파수 변환을 요하는 모든 시스템에 필수적인 장치로서 일반적으로 저잡음 증폭기(LNA) 다음에 주파수 혼합기를 위치시킨 다음 안테나에서 받은 RF 신호를 base-band 신호를 변환시켜주는 역할을 한다. HEMT를 사용하여 제작한 경우 94GHz에서 대략 6-dB정도의 변환이득을 가진 주파수 혼합기가 제작되어 있다.⁷⁾

4. 결 론

이상과 같이 HEMT를 사용하여 제작할 수 있는 여러가지 초고주파 소자들에 대하여 간략하게나마 알아 보았다. 고속 전자 이동 트랜지스터의 전위 우물이 가진 특성으로 인한 2차원 전자 개스(2DEG)의 이동을 이용한 고속 소자의 사용은 정보의 보다 빠른 전달을 가져다 주었고 현재의 데이터 처리 요구에 부응하고 있다. 최근 선진국의 초고주파 기술 동향으로 볼때 HEMT의 구조와 동작에 관한 연구가 활발히 이루어 지고있는 실정이며 그에 따른 초고주파 집적회로의 주파수 동작영역이 계속 넓어지고 있다. 하지만 현재 우리나라의 초고주파수에 대한 관심은 실로 놀라울 만큼 급부상하고는 있다고하나 그 초고주파대에 사용되는 소자는 거의 선진국으로부터 전량에 가까운 정도로 수입에 의존하고 있는 실정이다. HEMT는 FET에 대한 응용소자로서 개발의 여지가 충분한 만큼 관심을 가질 필요가 있다. 실제로 HEMT가 상업적으로 많이 이용되고 있는 분야는 저잡음 특성이 강하기 때문에 저잡음 증폭기용 소자로 사용되고 있고 제작시에 도핑되는 층의 배열을 변형하거나 첨가하여 소자내의 2차원 전자개스 층을 확장하여 더욱 빠른 소자 개발도 현재 이루어지고 있는 실정이다. 점점 더 증가하는 초고속 통신 시스템의 요구와 초고주파와 밀리미터파의 이용은 고속 전자 이동 트랜지스터의 미래를 밝게 해줄 것이다.

참 고 문 헌

1. K. Chang, Microwave Solid State Circuits and Applications, John Wiley & Sons., Inc., New

York, pp.319-327, 1994.

2. R. Singh and C.M. Snowden, Small Signal Characterization of Microwave and Millimeter wave HEMT's based on physical model. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. 44, No.1, pp.114-121, 1996.
3. C.Y. Chang, F. Kai "GaAs Highspeed Devices, Jhon Wiley & Sons, Inc. New York, Chapter 9, 1995.
4. J.M. Golio, Microwave MESFETs and HEMTs, Artech House Boston, London, Chapter 2, & Chapter 5, 1991.
5. J.J. Komiak, Wideband HEMT Balanced Amplifier, Electron. Lett., Vol. 22, No.14, pp.747-749, July 1986.
6. S.E. Rosenbaum, B.K.Kormanyos, L.M. Jelloian, M. Mailoubian, A.S. Brown, L.E. Lanson, L.D. Nguyen, M.A. Tomson, L. P.B. Katehi, G.M. Rebeiz, 155-and 213-GHz AlInAs/GalnAs/InP MEMT MMIC oscillators, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 43, No.4, pp. 927-932, 1995.
7. Y.W. Kwon, D. Pavlidis, P. Marsh, G. Ng, T.L. Block, Experimental Characteristics and Performance analysis of Monolithic InP-based HEMT Mixers at W-band, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. 41, No.1, pp.1-7, 1993.

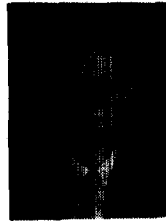
저자소개

이관호



1970년 8월 11일생. 1997년 2월 광운대학교 전자공학과 졸업예정. 현재 광운대학교 초고주파 및 광소자 연구소의 연구원.

김종현



1961년 12월 13일생. 1984년 2월 광운대학교 전자통신과 졸업. 1990년 6월 독일 Ruhr University Bochum, 전자공학 석사. 1994년 8월 독일 Dortmund University, 전자공학 박사. 1995년 3월-현재 광운대학교 전자공학과 조교수. 본 학회 편수위원.

▶ 1997년도 1월호의 기술해설 제목과 저자는 다음과 같으니 많은 참고 바랍니다. ◀

題 目	著 者 및 所 屬
고온 초전도체의 소자의 경향에 대하여	홍 진표 (삼성종합기술원)
FED 발전 경향에 대하여	홍 진표 (삼성종합기술원)