

밀리미터파 고출력 HEMT 소자 기술



박현창

동국대학교 전자공학과 조교수

1. 머리말

고도 정보시대의 도래로 말미암아 정보통신시장은 폭발적인 증가세를 보이고 있으며, 특히 무선정보통신은 “언제, 어디서나, 누구에게나”라는 큰 장점을 지니고 있어 그 수요가 날로 커져가고 있다. 이와 같은 정보량의 폭주로 인하여 기존의 마이크로파(microwave) 대역의 주파수 자원이 점차 고갈되고 있으며, 특히 원격진료, 전자신문, 전자미술관, 주문형 비디오 등 초고속·광대역 정보통신서비스에 대한 사회적 수요가 커짐에 따라 30 GHz 이상의 밀리미터파(millimeter wave) 대역 주파수 자원을 이용하기 위한 연구와 개발이 활기를 띠고 있다. 밀리미터파 대역은 전통적으로 레이더, 전자전 무기, 미사일 추적장치, 방사능 측정기술 등 군사용으로 연구되어 왔는데, 최근 상업적 수요가 대두되면서, 30 GHz 대역의 LMDS(Local Multipoint Distribution Service), 40 GHz 대역의 MVDS(Microwave Video Distribution Service), 60 GHz 대역의 무선 LAN(Wireless Local Area Network)과 60~77 GHz 대역의 차량 충돌방지 시스템(automobile collision avoidance system) 등 여러 가지 민수 응용

기술이 보급되어, 오늘날에는 민군 겸용기술(dual-use technology)로 자리잡아 가고 있다.

전력증폭은 무선통신 기기의 가장 중요한 핵심기술 중 하나로, 주로 소형·경량이며 효율이 높고, 설계 및 운용상 flexibility가 높은 트랜지스터가 능동소자로 사용된다. 특히 1 GHz 이상의 주파수 대역에서는 Si(silicon)에 비하여 전하이동도, 전자 포화속도 및 기관의 비저항 등에서 월등한 특성을 가지는 III-V족 화합물 반도체가 사용되고 있으며, 그 중에서도 GaAs(gallium arsenide)가 가장 널리 채택되고 있다. 대표적인 화합물 반도체 트랜지스터로는 HBT(Heterojunction Bipolar Transistor), HEMT(High Electron Mobility Transistor), MESFET(Metal Semiconductor Field Effect Transistor) 등이 있는데 이중 MESFET이 현재 마이크로파 대역의 전력증폭 소자로 널리 사용되고 있다. 그러나 밀리미터파 대역에서는 MESFET보다 동작주파수가 높고 전력이득과 효율 및 잡음지수 특성이 좋으면서도 공정이 상대적으로 간단한 HEMT 계열이 전력증폭 소자로 가장 유망하다. 향후에는 소형화, 경량화, 고신뢰성, 재현성, 대량생산을 통한 저가격화 등의 장점 때문에 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 혹은

MIMIC(Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit) 기반의 전력모듈이 통신기기의 핵심 부품이 될 것으로 전망되는데, MMIC 혹은 MIMIC의 성능은 사용되는 능동소자의 성능에 가장 크게 좌우되므로 결국 우수한 고효율 HEMT의 개발이 관건이 된다.

일반적으로 밀리미터파 대역과 같이 매우 높은 주파수에서는 HEMT 개별소자가 출력할 수 있는 전력과 이득에 제한이 있기 때문에 시스템이 필요로 하는 전력과 이득을 생성하기 위하여 전력결합(power combining)과 다단(multi-stage) 증폭 기법을 사용하게 된다. 그러나 결합하는 소자와 단의 수를 늘릴수록 회로에서 초래되는 신호손실이 커져 전체적인 효율과 대역폭이 급감하게 되므로, 결국 개별 HEMT의 출력전력과 이득을 높여 요구되는 결합 및 단의 수를 줄이는 것이 최선책이라 볼 수 있다. 이런 측면에서도 밀리미터 대역에서의 전력밀도와 이득이 획기적으로 개선된 고효율 HEMT를 개발하는 것이 중요하다.

2. HEMT 개요

HEMT 혹은 MODFET(Modulation-Doped Field Effect Transistor)은, modulation 도핑(doping)된 이종접합(heterojunction)에서 전하이동도(mobility)가 향상됨을 이용한 소자이다. Modulation 도핑의 개념은 1969년 Esaki와 Tsu에 의해 제안되었고[1], 1978년 Dingle 등에 의해 전하이동도의 향상이 처음으로 관측되었으며[2], 1980년 Mimura 등이 이 개념을 이용한 HEMT 소자의 동작을 처음으로 발표하였다[3]. 그림 1은 AlGaAs/GaAs HEMT의 전도대(conduction band) 구조를 개략적으로 나타낸다. 밴드갭(band-gap)이 넓은 AlGaAs를 Si 등으로 도핑하면 자유전자들이 창출되는데, 이 전자들이 이종접합을 가로질러 밴드갭이 좁은 GaAs쪽으로 확산되고, 이종접합 인근의 GaAs에 형성되는 potential 우물에 의하여 속박된다. 이때 우물내의 전자들은 이종접합면과 수평방향으로만 자유롭게 움직일 수 있는 소위 2DEG(two-dimensional electron gas)를 형성하게 된다. MESFET과는 달리 HEMT에서는 전자에 의한 전도가 도핑되지 않은 GaAs에서만 일어나므로 불순물 산란이 감소하여 결과적으로 전자의 이동도가 커진다. 더구나 도핑된 AlGaAs와 이종접합면 사이에 30~50 Å 정도의 도핑되지 않은 AlGaAs spacer층을 삽입함으로써 불순물 산란을 더욱 감소시킬

수 있다. 그러나 AlGaAs/GaAs HEMT의 경우에는 전도대 불연속도 ΔE_c 가 작아 modulation efficiency가 감소하며, 이는 특히 전류량이 커질 경우 소자의 동작속도를 크게 감소시키게 된다.

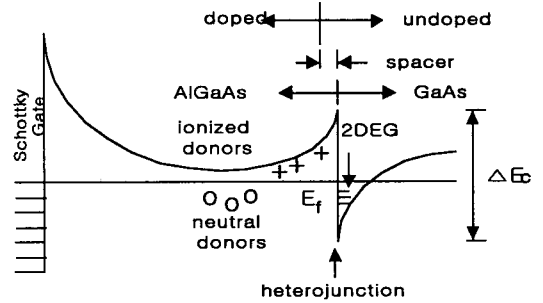


그림 1. AlGaAs/GaAs HEMT의 전도대 구조

AlGaAs에서 AlAs가 차지하는 몰분률(mole fraction)을 증가시키면 AlGaAs의 밴드갭이 커지고, 결과적으로 ΔE_c 를 증가시킬 수 있으나, 몰분률이 약 23%를 초과하면, Si 도너(donor)들이 deep level을 형성하여 특히 저온 및 고주파 동작시 여러 가지 바람직하지 못한 현상들을 초래할 수 있는 것으로 알려져있다. 한편 GaAs 채널에 InAs를 첨가하여 InGaAs를 형성하게 되면 밴드갭이 작아져 ΔE_c 를 증가시킬 수 있다. 단 InGaAs의 격자상수가 GaAs의 격자상수보다 크기 때문에 격자부정합에 의한 dislocation이 일어날 가능성이 있지만, InGaAs의 두께가 어떤 임계두께(critical thickness)보다 작으면 두 격자층간의 부정합이 전적으로 탄성(elastic) strain의 형태로 수용되어 dislocation을 발생시키지 않음이 알려졌는데, 이러한 상태를 pseudomorphic이라고 하며[4], 이를 이용한 HEMT를 PHEMT(Pseudomorphic HEMT)라고 칭한다. Rosenberg 등이 GaAs/InGaAs/GaAs 계열로 최초의 PHEMT를 구현했으며[5], Ketterson 등이 오늘날 널리 사용되고 있는 AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT의 동작을 최초로 발표하였다[6]. 그림 2는 AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT의 전도대 구조를 개략적으로 나타낸다. PHEMT는 그림 1의 AlGaAs/GaAs HEMT에 비하여 ΔE_c 가 증가되어 같은 도핑농도에 대해서도 더욱 큰 2DEG 밀도를 얻을 수 있을 뿐 아니라, ΔE_c 의 증가와 함께 InGaAs/GaAs 이종접합면에 형성되는 $\Delta E_c'$ 에 의

해 2DEG의 채널구속도가 증가하여 소자 특성이 크게 향상된다.

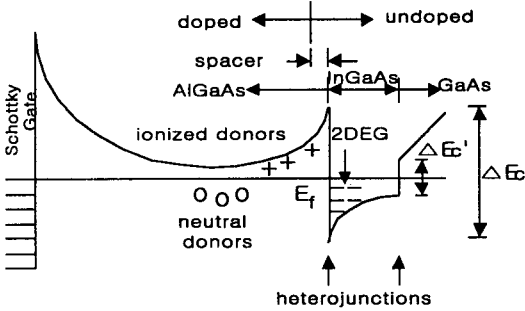


그림 2. AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT의 전대 구조

그림 3은 AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT의 개략적인 단면도이다. GaAs 캡(cap)층은 옴릭(ohmic) 접합저항을 감소시키고 surface potential에 의해 도너층이 공핍되는 것을 방지하기 위하여 보통 높은 농도로 균일도핑(uniform-doping)된다. AlGaAs 장벽(barrier)층은 2DEG를 공급하는 도핑층과, 불순물 산란을 감소시키기 위한 spacer층을 포함한다. 최근에는 기존의 균일도핑 방법보다 높은 항복전압과 2DEG 밀도를 초래하는 것으로 알려진 평면도핑(atomic planar-doping)[7] 혹은 δ -doping [8] 이 주로 사용되고 있다. InGaAs 채널(channel)층은 소자의 특성을 결정하는 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다. 채널의 InAs 물분율을 증가시키면 ΔE_c 가 증가되나, InGaAs의 임계두께가 감소하여 전자의 에너지 준위가 상승하고 전자의 파동함수가 이웃 층으로 투과되는 비율이 증가하는 등, ΔE_c 의 증가에 따른 이득을 상쇄하는 효과가 발생하며, 또한 strain이 커져 재료 성장상의 재현성이 나빠지게 된다. 따라서 InAs의 물분율은 20% 이내로 제한하는 것이 일반적이며, 이 경우 임계두께는 약 150 Å이 된다. GaAs 버퍼(buffer)층은 재료 성장 중 기관의 불순물이 채널층으로 확산되는 것을 방지하는 역할을 하며, 2DEG의 채널구속도를 증가시키기 위하여 AlGaAs/GaAs 등의 초격자구조(superlattice)를 사용하기도 한다.

3. 밀리미터파 고출력 HEMT 기술

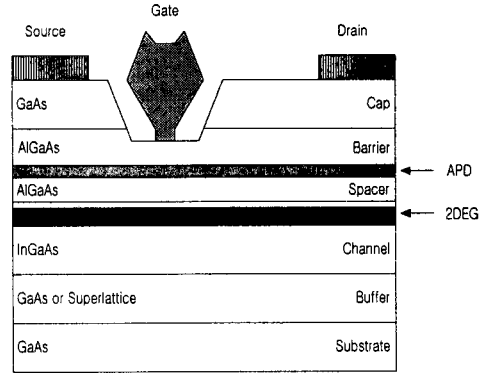


그림 3. AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT의 단면도

밀리미터파 대역에서 동작하는 FET의 전력특성을 보통 최대 출력전력 P_o , 전력이득 G 및 전력부가효율 η 로 나타내는데 그림 4는 그 특성을 개략적으로 보이고 있다. G 및 η 는 각각 식 (1)과 (2)로 정의되는데, 이때 P_i 와 P_{dc} 는 각각 입력전력 및 dc 전력을 나타낸다. 대신호 동작시 FET의 전력이득은 포화되는 경향을 보여, 입력전력이 증가함에 따라 전력이득이 감소하게 된다. 따라서 FET의 전력 특성을 표시하는데 있어서 입력전력의 크기를 밝혀주어야 하는데 일반적으로는 전력이득이 선형이득으로부터 1 dB 감소하는 점을 기준으로 삼는다. 이 조건을 1 dB 감소점(compression point)이라 하고, 이때의 P_o , G 및 η 를 각각 P_{1dB} , G_{1dB} 및 η_{1dB} 라 칭한다.

$$G(dB) = 10 \log\left(\frac{P_o}{P_i}\right) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_o - P_i}{P_{dc}} = \frac{P_o}{P_{dc}} \left(1 - \frac{1}{G}\right) \quad (2)$$

밀리미터파 대역에서 가장 중요한 부류인 A급(class A) 증폭의 경우, 최대 출력전압이 게이트(gate)-드레인(drain)간 항복현상(breakdown)에 의해 제한되며, FET가 충분한 대신호 전력이득을 가지고 이상적인 부하선(load line)을 따라 동작한다는 가정 하에, 이론적인 최대 출력전력을 DC I-V 특성으로부터 계산할 수 있다. 그림 5는 A급으로 동작하는 FET의 개략적인 동작특성이다. 여기서 I_{max} , I_{min} , V_{bds} , V_k 는 각각 최대 채널전류, 항복현상으로 인한 최소 채널누설전류, 드레인-소스(source)간 항복전압, 전류포화시 무릎전압(knee voltage)을 의미하며, 드레인-소스간 항복전압은 게이트-드레인간 항복전압 V_{bgs} 및 게이트 pinch-off 전압 V_p 에 대해 식 (3)과 같은 관계를 갖는다. 동작점 V_o 및 I_o 가 식 (4)와 같은 경우 최대 P_o 는 식 (5)과

같이 계산되며, 최대 η 는 식 (6)으로 추정할 수 있다.

$$V_{bds} = V_{bgd} - V_p \quad (3)$$

$$V_o = \frac{V_{bds} + V_k}{2}, I_o = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \quad (4)$$

$$P_o = \frac{1}{8}(I_{max} - I_{min})(V_{bds} - V_k) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_o}{P_{dc}} \left(1 - \frac{1}{G}\right) \\ &= \frac{1}{2} \frac{(I_{max} - I_{min})(V_{bds} - V_k)}{(I_{max} + I_{min})(V_{bds} + V_k)} \left(1 - \frac{1}{G}\right) \\ &\approx \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{G}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

실제로 측정되는 최대 P_o 와 최대 η 값은 특히 동작 주파수가 커질수록 식 (5) 및 (6)으로부터 계산되는 값보다 상당히 작은 경향을 보이는데, 이는 소자의 입력 및 출력단의 impedance matching이 완벽하지 못하며, 특히 약 60 μm 이상에서는 대신호 전력이득이 급격히 감소하기 때문에 출력단 matching을 최대 P_o 보다는 최대 G 조건 쪽으로 이동하여야 하고, 또한 높은 주파수에서 넓은 게이트폭을 갖는 소자를 만드는 것이 어려운 것 등이 그 이유이다.

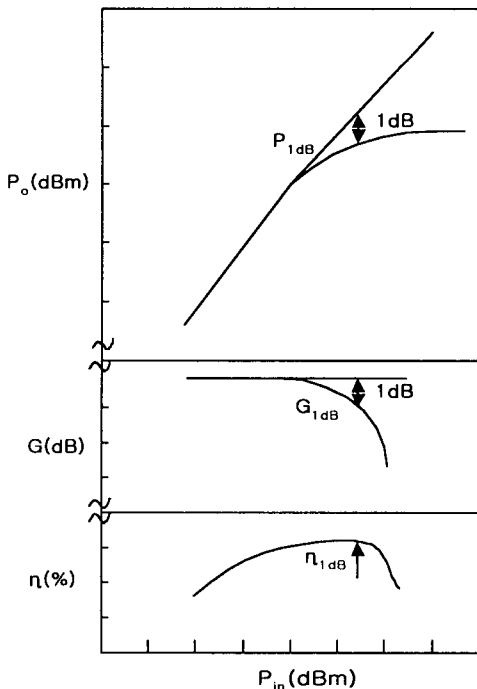


그림 4. FET의 전형적인 전력특성

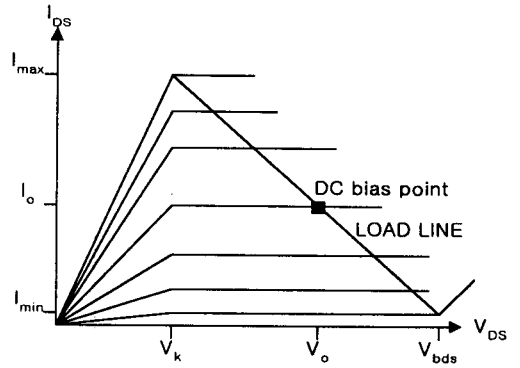


그림 5. A급으로 동작하는 FET의 동작 특성

우수한 밀리미터파 고출력 HEMT를 구현하기 위해서는 기판의 선택, 에피층 설계 및 성장, 소자의 layout 설계, 그리고 소자 공정이 모두 최적화되어야 한다.

3.1 기판의 선택

밀리미터파 고출력 HEMT 소자로는 현재 반절연 GaAs 기판에 성장된 AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT가 주종을 이루고 있다. GaAs는 재료 및 공정 측면에서 모든 화합물 반도체중 기술적으로 가장 성숙되어 있으며, 적어도 60 μm 대 시스템 구현에 필요한 출력 전력과 이득을 공급할 수 있을 것으로 판단된다. InP 기판에 성장되는 AlInAs/InGaAs/InP HEMT 혹은 PHEMT는 InGaAs 채널의 항복 전압과 AlInAs 상의 Schottky 장벽높이가 낮아 고출력 소자로 널리 쓰이고 있지는 않으나, GaAs 계열에 비하여 2DEG 밀도와 전자의 포화속도가 월등히 우수하여, 향후 100 μm 대 시스템을 구현하는데 가장 유망한 소자로 전망되고 있다. 한편 주로 sapphire 기판에 성장되고 있는 AlGaN/GaN HEMT는 아직까지 재료 및 공정 측면에서 성숙되지 못하여 밀리미터파에서 안정적으로 동작하는 소자는 발표되지 않았으나, 항복전계와 전자의 포화속도가 다른 계열보다 월등하여, 향후 대출력 전력소자로 유망하리라 기대되고 있다.

3.2 에피층 설계 기술

고출력 HEMT를 구현하기 위한 에피층 설계의 기본 목표는 2DEG 밀도를 최대화하여 전류구동능력을 개선하면서도, 항복전압을 가능한 높게 유지하는데 있으며, 이러한 측면에서 도핑층 설계가 가장 중요한

고려 요소라고 볼 수 있다. 일반적으로, 목표하는 문턱전압(threshold voltage)에 대하여, 장벽층내의 도핑농도가 높을수록 2DEG 밀도와 aspect ratio를 향상시키는 장점이 있는 반면, 게이트의 누설전류가 커지고 항복전압이 감소하는 단점이 있다. 평면도핑을 사용하는 경우 이러한 단점을 어느 정도 극복할 수 있지만, 도핑농도가 $5\sim 6\times 10^{12}/\text{cm}^2$ 이상이면, 장벽층에서의 병렬전도(parallel conduction)가 발생하여 항복전압이 감소하고, pinch-off가 어렵게 된다. 따라서 항복전압을 저하시키지 않으면서도 전류 구동능력을 더욱 증가시키기 위해서는 장벽층 이외의 곳에 부가적인 도핑을 첨가해야 하는데, 대표적인 방법으로는 버퍼층 도핑을 이용하는 이중이종접합(double-heterojunction) HEMT 계열과 [9, 10], 채널 도핑을 이용하는 doped-channel HFET 계열을 들 수 있다[11~12].

이중이종접합 구조는 장벽층 내의 주도핑층과 더불어 채널 아래쪽에 부도핑층을 추가하는 방법으로, 부도핑층이 2DEG 밀도는 증가시키면서도, 게이트로부터 멀리 위치하여 항복전압은 감소시키지 않는 장점이 있다. 그림 6은 주도핑 도스가 $4\times 10^{12}/\text{cm}^2$ 이고 부도핑 도스가 $2\times 10^{12}/\text{cm}^2$ 인 이중이종접합 PHEMT의 전도대와 전자분포 특성을 나타낸다. 단일 도핑된 PHEMT에 비하여 채널내의 전자농도가 크게 증가하는데, 이는 버퍼층에 가한 추가 도핑에 의한 것이므로 게이트 누설전류를 증가시키지 않는다. 또한 부가적인 도핑에 의해 채널의 모양이 대칭적이고 사각형에 가까워져서 결과적으로 유효채널폭이 증가하는데, 이는 채널 전자의 에너지 준위를 낮추어 채널의 전자구속도를 향상시킨다. Doped-channel 구조는 장벽층 내의 주도핑층과 더불어 채널에도 직접 도핑하는 방법으로서 엄밀한 의미에서 HEMT 계열은

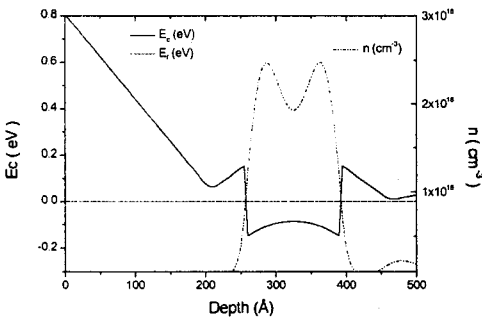


그림 6. 이중이종접합 PHEMT의 전도대 및 전자 분포 특성

아니며, 보다 넓은 개념의 이종접합 구조인 HFET (Heterojunction Field Effect Transistor) 계열이라고 할 수 있다. 이 구조는 채널 내에 형성된 부도핑층의 2DEG 전이효율(transfer efficiency)이 높은 장점이 있는 반면 전자이동도가 매우 저하되는 단점이 있으나, 고출력 동작에는 큰 영향을 미치지 않으며, 특히 선형이득특성이 향상된다는 보고도 발표된 바 있다[13].

3.3 layout 설계 기술

소자의 layout 최적화는 최적 단위 게이트 폭 결정, 기생(parasitic) 성분의 최소화, 효율적인 전극의 배치 및 격리된 전극들(소스 혹은 드레인)의 결합, 소자간의 전력결합 등이 주요 고려 사항이다. 그림 7은 격리된 소스 전극들이 air-bridge 형태로 결합된 HEMT의 layout을 보이고 있다.

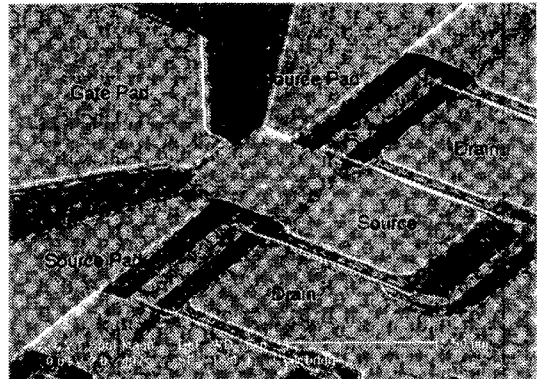


그림 7. 격리된 소스 전극들이 air-bridge 형태로 결합된 HEMT의 layout

3.4 공정 기술

고주파 전력용 소자 구현에 중요한 공정으로는 안정적인 저저항 오믹공정, 초미세, 저저항 T형 게이트 공정, 재현성 있는 double recess 공정, 기판 두께를 감소시켜 열 방출을 용이하게 하는 lapping 공정, 기생인덕턴스를 최소화하는 via-hole 공정, 고주파 특성을 감소시키지 않는 passivation 공정 등을 들 수 있다.

4. 고출력 HEMT 현황

국외의 경우 GaAs계열의 고출력 HEMT 대한 연

구가 활발히 진행되어 왔다. 단일 HEMT의 특성을 살펴보면 60 GHz에서 출력전력밀도 $P_o=0.84$ W/mm, 전력이득 $G=5.9$ dB가, 94 GHz에서는 $P_o=0.43$ W/mm, $G=3.2$ dB가 발표된 바 있다[9]. 한편 100 GHz 이상의 주파수 대역에서는 열전도도, 채널의 전자밀도와 전자 포화속도 등에서 GaAs 계열보다 우월한 InP 계열의 HEMT가 증폭소자로서 가장 유망하다고 판단된다. 현재 모든 트랜지스터 중에서 가장 높은 차단주파수를 보이고 있는 InP계 단일 HEMT로부터 94 GHz에서는 $P_o=0.19$ W/mm, $G=9$ dB가 발표되었으며[14], 140 GHz에서 $G=7.3$ dB가 보고된바 있다[15]. 한편 최근 GaN 계열에 대한 관심과 연구가 확산되고 있다. 특히 광밴드갭(wide bandgap) 반도체인 GaN은 GaAs에 비하여 항복전계가 10배 이상, 열전도도가 3배 이상 크며, 특히 FET의 경우 전력증폭기가 동작하는 높은 전계에서의 전자 이동속도가 훨씬 커서 높은 바이어스전압 하에서 고속, 광대역증폭이 가능할 것이다. 아직은 재료성장 기술이 성숙되지 않아 밀리미터 파에서의 MIMIC용 증폭소자로 단기간 내에 응용될 것으로는 보이지 않으나, 향후 안정된 재료가 공급되는 경우 파급효과가 클 것으로 판단된다. 현재 외국에서는 AlGaIn/GaN HEMT로부터 18 GHz에서 $P_o=3.3$ W/mm, $G=2.4$ dB가 발표된 바 있다[16].

표 1. GaAs 계열의 밀리미터파 고출력 HEMT 특성

Dimension ($L_g \times W_g$, μm^2)	Freq. (GHz)	P_o (W/mm)	P_o (mW)	G (dB)	η (%)	Ref
0.5×2400	30	0.42	1000	3.1	15.7	18
0.2×600	32	0.83	498	6	35	19
0.2×1200	32	0.62	743	4.1	22	19
0.5×200	35	0.5	100	3	38	20
0.25×900	35	0.73	658	3.2	24	21
0.25×500	35	0.61	307	6.8	40	22
0.2×600	44	0.82	494	4.3	30	19
0.25×400	55	0.46	184	4.6	25	13
0.2×50	55	0.85	42.5	3.3	22.1	23
0.15×50	60	0.84	42	5.9	37	9
0.25×150	60	0.67	100	3	22	24
0.15×320	60	0.6	191	5.1	28.7	25
0.15×50	94	0.43	22	3.2	19	9
0.25×75	94	0.43	32	3	15	12
0.25×50	94	0.18	9	3.3	12	22
0.1×160	94	0.39	62.7	4	13.2	26

국내에서의 연구는 현재 GaAs 계열에 국한되어 있으며 단일 HEMT로부터 18 GHz에서 $P_o=0.33$ W/mm, $G=11$ dB가 발표되었다[17]. 현재까지 보고된 GaAs 및 InP 계열의 밀리미터파 고출력 HEMT 단위소자들의 전력특성을 표 1과 표 2에, 그리고 GaN 계열의 마이크로파 고출력 HEMT 단위소자들의 전력특성을 표 3에 정리하였다.

표 2. InP 계열의 밀리미터파 고출력 HEMT 특성

Dimension ($L_g \times W_g$, μm^2)	Freq. (GHz)	P_o (W/mm)	P_o (mW)	G (dB)	η (%)	Ref
0.25×150	35	0.2	30	6.2	43.2	27
0.25×150	35	0.33	49.5	4.1	20.6	27
0.22×450	57	0.33	150	2.6	20	28
0.22×300	57	0.4	120	3	17.8	28
0.15×448	59	0.35	155	4.9	30.1	29
0.1×150	94	0.16	24	12	23	14
0.1×250	94	0.19	47	9	17.5	14
0.15×640	94	0.2	130	4	13	30
0.15×320	94	0.25	80	4.9	20.2	30
0.15×320	94	0.13	40	4.9	23	31
0.15×320	94	0.17	54	4.3	20	31

표 3. GaN 계열의 마이크로파 고출력 HEMT 특성

Dimension ($L_g \times W_g$, μm^2)	Freq. (GHz)	P_o (W/mm)	P_o (mW)	G (dB)	η (%)	Ref
0.7×100	4	2.7	270	11.2	28	32
0.45×3000	7.4	3.03	9100	7.1	29.6	33
0.7×100	8	2.84	284	6.6	23	32
0.25×100	8.4	1.73	173	5.3	15	34
0.7×100	10	2.57	257	5.1	21	32
0.45×250	10	5.3	1325	9.2	35.4	33
0.45×1500	10	2.6	3900	10	29	33
0.45×125	10	6.96	870	9	51	33
0.7×320	10	2.81	900	6.54	17.3	35
0.7×1280	10	1.8	2300	3.6	13.3	35
0.2×100	10	1.7	170	6.3	23	36
0.45×125	16	4.40	550	6.9	27	33
0.25×76	18	3.05	232	3.1	19.2	16
0.25×76	18	3.3	251	2.4	18.2	16

5. 맺는말

본고에서는 밀리미터파 고출력 HEMT 소자기술에 대하여 간략히 살펴보았다. 전력증폭은 무선통신 기기의 가장 중요한 핵심기술 중 하나로서 특히 밀리미터파 대역에서는 고출력 HEMT가 전력증폭 소자로 널리 사용될 전망이다. 밀리미터파 통신 및 멀티미디어 서비스 시장은 향후 수년 내에 폭발적인 증가가 예측되고 있으며, 이에 따라 미국, 일본, 유럽 등에서는 이미 국가 주도의 대규모 프로젝트를 통하여 전력증폭 소자 및 모듈에 대한 집중적인 연구 투자가 이루어지고 있다. 국내에서도 40 GHz 대의 2 GHz 대역폭을 WLL(Wireless Local Loop) 실험용으로 할당하는 등 밀리미터파 대역 기술 개발의 중요성을 인식하고 있으나 아직까지 고출력소자에 관한 연구 결과는 극히 미비한 실정이다. 특히 현재 RF 반도체 부품을 거의 전량 수입에 의존하고 있는 국내 실정을 감안할 때, 밀리미터파 고출력 HEMT 소자의 국내 개발이 매우 시급하다 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] L. Esaki and R. Tsu, "Superlattice and negative conductivity in semiconductors", IBM Res. Rep., RC-2418, 1969.
- [2] R. Dingle, H. L. Stromer, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, "Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices", Appl. Phys. Lett., vol. 33, no. 7, pp. 665-667, 1978.
- [3] T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, and K. Nanbu, "A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 19, no. 5, pp. L225-L227, 1980.
- [4] J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, "Defects in epitaxial multilayers", J. Cryst. Growth, vol. 32, pp. 265-273, 1976.
- [5] J. J. Rosenberg, M. Benlami, P. D. Kirchner, J. M. Woodall, and G. D. Pettit, "An In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs pseudomorphic single quantum well HEMT", IEEE Electron Device Lett., vol. 6, no. 10, pp. 491-493, 1985.
- [6] A. Ketterson, M. Moloney, W. T. Masselink, C. K. Peng, J. Klem, R. Fischer, W. Kopp, and H. Morkoc, "High transconductance InGaAs/AlGaAs pseudomorphic modulation-doped field-effect transistors", IEEE Electron Device Lett., vol. 6, no. 12, pp. 628-630, 1985.
- [7] C. E. C. Wood, G. Metzger, J. Berry, and L. F. Eastman, "Complex free-carrier profile synthesis by "atomic-plane" doping of MBE GaAs," J. Appl. Phys., vol. 51, no. 1, pp. 383-387, 1980.
- [8] E. F. Schubert, A. Fischer, and K. Ploog, "The delta-doped field-effect transistors(δ -FET)," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 33, no. 5, pp. 625-632, 1986.
- [9] M. Y. Kao, P. M. Smith, P. Ho, P. C. Chao, K. H. G. Duh, A. A. Jabra, and J. M. Ballingall, "Very high power-added efficiency and low-noise 0.15- μ m gate-length pseudomorphic HEMT's", IEEE Electron Device Lett., vol. 10, no. 12, pp. 580-582, 1989.
- [10] P. M. Smith, W. F. Kopp, P. Ho, P. C. Chao, R. P. Smith, K. Nordheden, and J. M. Ballingall, "Ku-band high efficiency high gain pseudomorphic HEMT", Electron. Lett., vol. 27, no. 3, pp. 270-271, 1991.
- [11] B. Kim, H-D Shih, M. Wurtele, and H. Q. Tserng, "Millimeter-wave GaAs power FET with a pulse-doped InGaAs channel," IEEE Electron Device Lett., vol. 9, no. 5, pp. 203-204, 1988.
- [12] P. M. Smith, L. F. Lester, P-C Chao, P. Ho, R. P. Smith, J. M. Ballingall, and M. Y. Kao, "A 0.25- μ m gate-length pseudomorphic HFET with 32- μ W output power at 94 GHz", IEEE Electron Device Lett., vol. 10, no. 10, pp. 437-439, 1989.
- [13] K. L. Tan, D. C. Streit, R. M. Dia, S. K. Wang, A. C. Han, P. D. Chow, T. Q. Trinh, P. H. Liu, J. R. Velebir, and H. C. Yen, "High-power V-band pseudomorphic InGaAs HEMT", IEEE Electron Device Lett., vol. 12, no. 5, pp. 213-214, 1991.
- [14] M. Yu, M. Matloubian, P. Petre, L.

- Hamilton, R. Bowen, M. Lui, H. C. Sun, C. Ngo, P. Janke, D. Baker, and R. Robertson, "W-band InP-based HEMT MMIC Power Amplifiers using Finite-Ground CPW Design", IEEE Proc. IEEE GaAs IC Symp., pp. 37-40, 1998.
- [15] P. D. Chow, K. Tan, D. Streit, D. Garske, P. Liu, and R. Lai, "W-band and D-band low noise amplifiers using 0.1 micron pseudomorphic InAlAs/InGaAs/InP HEMTs", IEEE MTT-S Dig., pp. 807-810, 1992.
- [16] Y. F. Wu, B. P. Keller, P. Fini, J. Pust, M. Le, N. X. Nguyen, C. Nguyen, D. Widman, S. Keller, S. P. Denbaars, and U. K. Mishra, "Short-channel $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$ MODFETs with power density $>3\text{W}/\text{mm}$ at $18\ \mu\text{m}$ ", Electron. Lett., vol. 33, no. 20, pp. 1742-1743, 1997.
- [17] 이진희, 윤형섭, 박병선, 이철욱, 맹성재, 박철순, "Noise and power characteristics of AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT with two planar doping layers", 제6회 한국반도체학술대회논문집, pp. 83-84, 1999.
- [18] K. Hikosaka, N. Hidaka, Y. Hirachi, and M. Abe, "A $30\ \mu\text{m}$ 1-W power HEMT," IEEE Electron Device Lett., vol. 8, no. 11, pp. 521-523, 1987.
- [19] J. C. Huang, P. Saledas, J. Wendler, A. Platzker, W. Boulais, S. Shanfield, W. Hoke, P. Lyman, L. Aucoin, A. Miquelarena, C. Bedard, and D. Atwood, "A double-recessed AlGaAs/InGaAs pseudomorphic HEMT for Ka-and Q-band power applications", IEEE Electron Device Lett., vol. 14, no. 9, pp. 456-458, 1993.
- [20] E. Sovero, A. K. Gupta, J. A. Higgins, and W. A. Hill, "35- μm performance of single and quadruple power heterojunction HEMT's", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 33, no. 10, pp. 217-220, 1986.
- [21] P. M. Smith, L. F. Lester, D. W. Ferguson, P. C. Chao, P. Ho, M. Kao, J. M. Ballingall, and R. P. Smith, "Ka-band high power pseudomorphic heterostructure FET", Electron. Lett., vol. 25, no. 10, pp. 639-640, 1989.
- [22] P. M. Smith, P. C. Chao, L. F. Lester, R. P. Smith, B. R. Lee, D. W. Ferguson, A. A. Jabra, J. M. Ballingall, and K. H. G. Duh, "InGaAs pseudomorphic HEMTs for mm-wave power applications", IEEE MTT-S Dig., pp. 927-930, 1988.
- [23] P. Saunier, R. J. Matyi, and K. Bradshaw, "A double-heterojunction doped-channel pseudomorphic power HEMT with a power density of $0.85\ \text{W}/\text{mm}$ at $55\ \mu\text{m}$ ", IEEE Electron Device Lett., vol. 9, no. 8, pp. 397-398, 1988.
- [24] P. Smith, L. Lester, P. Chao, B. Lee, R. Smith, J. Ballingall, and K. Duh, "Millimeter wave double heterojunction pseudomorphic power HEMTs", IEEE MTT-S Digest, pp. 854-856, 1987.
- [25] A. K. Sharma, G. P. Onak, R. Lai, and K. L. Tan, "A V-band high-efficiency pseudomorphic HEMT monolithic power amplifier", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 42, no. 12, pp. 2603-2609, 1994.
- [26] D. C. Streit, K. L. Tan, R. M. Dia, J. K. Liu, A. c. Han, J. R. Velebir, S. K. Wang, T. Q. Trinh, P. D. Chow, P. H. Liu, and H. C. Yen, "High-gain W-band pseudomorphic InGaAs power HEMTs", IEEE Electron Device Lett. vol. 12, no. 4, pp. 149-150, 1991.
- [27] C. Gaquiere, E. Bourcier, S. Piotrowicz, and Y. Crosnier, "High power added efficiency at $35\ \mu\text{m}$ on InP DH HEMTs", Electron. Lett., vol. 34, no. 25, pp. 2438-2439, 1998.
- [28] M. Matloubian, A. S. Brown, L. D. Nguyen, M. A. Melendes, L. E. Larson, M. J. Delaney, J. E. Pence, R. A. Rhodes, M. A. Thompson, and J. A. Henige, "High-power V-band AlInAs/GaInAs on InP HEMT's", IEEE Electron Device Lett. vol. 14, no. 4, pp. 188-189, 1993.
- [29] M. Matloubian, L. M. Jelloian, A. S.

- Brown, L. D. Nguyen, L. E. Larson, M. J. Delaney, M. A. Thompson, R. A. Rhodes, and J. E. Pence, "V-band High-efficiency High-power AlInAs/GaInAs/InP HEMTs", IEEE MTT-S Dig., pp. 535-538, 1993.
- [30] Y. C. Chen, R. Lai, E. Lin, H. Wang, T. Block, H. C. Yen, D. Streit, W. Jones, P. H. Liu, R. M. Dia, T.-W. Huang, P.-P. Huang, and K. Stamper, "A 94-dB, 130-mW InGaAs/InAlAs/InP HEMT high-power MMIC amplifier", IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 7, no. 5, pp. 133-135, 1997.
- [31] R. Lai, G.I. Ng, D. C. W. Lo, T. Block, H. Wang, M. Biedenbender, D. C. Streit, P. H. Liu, R. M. Dia, E. W. Lin, and H. C. Yen, "A high-efficiency 94-dB 0.15- μ m InGaAs/InAlAs/InP monolithic power HEMT amplifier," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 6, no. 10, pp. 366-368, 1996.
- [32] Y.-F. Wu, B. P. Keller, P. Fini, S. Keller, T. J. Jenkins, L. T. Kehias, S. P. Denbaars, and U. K. Mishra, "High Al-content AlGaIn/GaN MODFET's for ultrahigh performance", IEEE Electron Device Lett., vol. 19, no. 2, pp. 50-53, 1998.
- [33] S. T. Sheppard, K. Doverspike, W. L. Pribble, S. T. Allen, J. W. Palmour, L. T. Kehias, and T. J. Jenkins, "High-power microwave GaN/AlGaIn HEMT's on semi-insulating silicon carbide substrates", IEEE Electron Device Lett., vol. 20, no. 4, pp. 161-163, 1999.
- [34] Q. Chen, J. W. Yang, R. Gaska, M. A. Khan, M. S. Shur, G. J. Sullivan, A. L. Sailor, J. A. Higgins, A. T. Ping, and I. Adesida, "High-power microwave 0.25- μ m gate doped-channel GaN/AlGaIn heterostructure field effect transistor", IEEE Electron Device Lett., vol. 19, no. 2, pp. 44-46, 1998.
- [35] G. J. Sullivan, M. Y. Chen, J. A. Higgins, J. W. Yang, Q. Chen, R. L. Pierson, and B. T. McDermott, "High-power 10-dB operation of AlGaIn HFET's on insulating SiC", IEEE Electron Device Lett., vol. 19, no. 6, pp. 198-200, 1998.
- [36] Y.-F. Wu, B. P. Keller, S. Keller, N. X. Nguyen, M. Le, C. Nguyen, T. J. Jenkins, L. T. Kehias, S. P. Denbaars, and U. K. Mishra, "Short channel AlGaIn/GaN MODFET's with 50-dB fT and 1.7-W/mm output-power at 10 GHz," IEEE Electron Device Lett., vol. 18, no. 9, pp. 438-440, 1997.