

PCS용 전력 AlGaAs/InGaAs 이중 채널 P-HEMTs의 제작과 특성

이진혁, 김우석, 정윤하

포항공과대학교 전자전기공학과 전자파특화센터

Tel: (0562)279-2897/Fax : (0562)279-2903

Fabrication and Characterization of Power AlGaAs/InGaAs double channel P-HEMTs for PCS applications

Jin Hyuk Lee, Woo Seok Kim, Yoon Ha Jeong

Pohang University of Science and Technology(POSTECH), Dept. of Electrical Engineering

Microwave Application Research Center(MARC)

gombau@postech.ac.kr

Abstract

AlGaAs/InGaAs/GaAs power P-HEMTs (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistors) with 1.0- μm gate length for PCS applications have been fabricated. We adopted single heterojunction P-HEMT structure with two Si-delta doped layer to obtain higher current density. It exhibits a maximum current density of 512 mA/mm, an extrinsic transconductance of 259 mS/mm, and a gate to drain breakdown voltage of 12.0 V, respectively. The device exhibits a power density of 657 mW/mm, a maximum power added efficiency of 42.1 %, a linear power gain of 9.85 dB respectively at a drain bias of 6.0 V, gate bias of 0.6 V and an operation frequency of 1.765 GHz.

I. 서론

최근 들어 PCS(Personal Communication System) 단말기의 수요가 늘면서 전력용 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)에서 사용하는 능동 소자의 개발이 중요한 과제로 되고 있다.

전력 증폭 소자 중 본 연구진에 의해 제안된 바 있는 역 이중 채널 구조 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 의 이중 이종 접합 구조(double hetero-

structure) P-HEMT(Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor)는 우수한 전류 전압 특성을 나타냈다^[1-2]. 또한 Si-델타 도핑 구조는 단 채널 효과(short channel effect)를 감소시킬 수 있기 때문에 서브 마이크론 이하의 게이트를 갖는 소자의 제작을 위해 필요한 핵심 기술이며^[3-6], 델타 도핑된 P-HEMT는 종래의 HEMT 구조와 비교하여 문턱 전압(threshold voltage)의 의존성이 매우 적고, 선형성이 우수하여 초고주파 소자로 주목받고 있다^[1-6].

따라서 본 연구에서는 이 두 가지 장점을 동시에 이용하여 단일 이종 접합 구조(single heterostructure)에 Si-델타 도핑층을 InGaAs 채널의 양쪽에 형성하고 P-HEMT를 설계 제작하여, 그 DC 및 RF특성을 바이어스 조건에 따라 조사하였고, 고전류밀도, 고 전력 부가 효율을 가지는 우수한 P-HEMT를 얻을 수 있었다.

II. 실험

본 연구에서 사용된 에피 구조는 그림 1에서 보는 바와 같이 InGaAs 채널의 양쪽에 실리콘 델타 도핑층을 갖는다. 본 실험에서 사용한 에피는 오믹 접촉 저항을 작게 하기 위해 GaAs층을 $5.0 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 으로 높게 도핑하였고, 게이트를 쇼트키로 하기 위해 undoped AlGaAs층을 두었고, 전자의 구속이 잘 되도록 InGaAs pseudomorphic 채널을 이용했으며, 전류 밀도를 높이기 위하여 InGaAs 위 아래에 두 개의 도핑층을

n+ GaAs Si($5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)	50 Å	Si-δ doping $4.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
Undoped Al _{0.25} Ga _{0.75} As	300 Å	
Undoped Al _{0.25} Ga _{0.75} As	45 Å	Si-δ doping $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
Undoped In _{0.25} Ga _{0.75} As	80 Å	
Undoped GaAs Spacer	60 Å	
Undoped GaAs	1000 Å	
S/L Buffer	5000 Å	
S. I. GaAs	Substrate	

그림 1. 두 개의 도핑층을 갖는 전력용 AlGaAs/InGaAs/GaAs P-HEMT 구조

넣었다. 사용한 에피의 300K에서 전자의 이동도는 $5500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 이상이었으며 전하 밀도는 $(3.8 \pm 0.2) \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 이었다.

전력 P-HEMT 소자는 먼저 소자간의 격리를 위해 활성화 층(n+ GaAs에서 Undoped GaAs층까지)을 에칭한다. 에칭은 인산(H_3PO_4) : 과산화수소(H_2O_2) : 탈이온화수(H_2O) 혼합 용액을 이용해 65초 동안 1535Å 을 메사 에칭 하였다.

오믹 금속은 AuGe/Ni/Au를 각각 1000Å, 280Å, 1500Å씩 열 진공 증착기(Thermal Evaporator)를 이용해 올렸다. 지금까지의 모든 공정에서 PR(Photo Resist)은 AZ5214를 이용했고, 5000 rpm에 노광 시간은 25초이고 현상 시간은 20초였다. 오믹 메탈을 올린 후에 430°C에서 30초 동안 N_2 분위기에서 RTA(Rapid Thermal Annealing)를 하였다. 이 공정이 끝난 후에 TLM(Transmission Line Method) 패턴을 이용해 측정, 계산된 접촉 저항은 8~10Ω이었다.

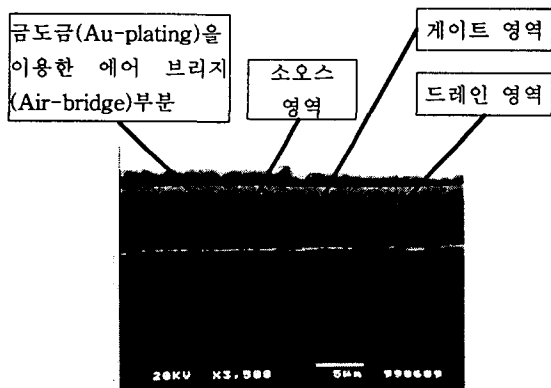


그림 2. 본 논문의 소자 단면 및 게이트

본 실험에서 제작한 전력 P-HEMT의 단면 사진은 그림 2와 같다. 다음으로 3 μm의 소오스-드레인 간격 안에 1 μm 게이트 패턴을 만들고 리세스를 하였다. 이때 리세스 용액은 인산(H_3PO_4):과산화수소(H_2O_2):탈이온화수(H_2O) 혼합액을 이용했다. 리세스는 RTA 후 포화 전류의 80%가 될 때까지 실시했다.

리세스가 끝난 후, 수산화 질소(NH_4OH):탈이온화수(H_2O) 혼합액에 담가 undoped AlGaAs층 위의 산화막을 제거했다. 다음으로 전자빔 증착기(E-Beam Evaporator)를 이용해서 Ti, Pt, Au를 각각 300Å, 100Å, 1100Å씩 올렸다. 게이트 1 μm 패턴은 7000rpm에 31초 노광, 25초 현상으로 얻었다.

다음으로 본 실험에서는 에어 브리지 공정을 하였다. 이 공정에서는 두 번의 사진 작업을 이용했다. 첫 번째 사진 작업에서 PR은 AZ 1350으로 2500rpm, 노광 시간은 40초, 현상은 30초로 하였다. 이 후 O_2 분위기에서 잔여 PR 제거 작업(ashing)을 행하고, 110°C에 열처리 하였다. 다음으로 이온 도포기(Ion coater)를 이용해서 얇은 금막을 올렸다. 여기에 다시 AZ 1350 PR을 2500rpm으로 입히고 두 번째 사진 작업을 행하고 역시 같은 방법으로 노광, 현상, 잔여 PR 제거를 행한다. 뒷면에 PR을 바르고 5분간 90°C에 열처리 한다. 이 단계가 끝난 후에 금 도금(Au-plating)을 하고 PR을 아세톤으로 제거했다. 본 실험에서는 각 공정 단계를 시작할 때 트리클로로에틸렌, 아세톤, 메탄올로 유기 세척을 하였다.

III. 결과 및 고찰

제작된 P-HEMT의 게이트-드레인 다이오드 특성은 이상 계수 n은 1.143이고, 역방향 항복전압은 -12 V이며, 순방향 턴 온 전압은 0.75 V였다. 측정된 드레인 소오스 전압에 대한 드레인 전류 곡선($V_{ds}-I_d$)을 그림 3에 나타내었다.

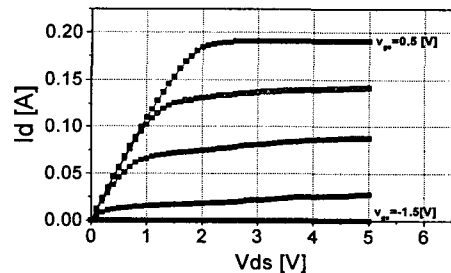


그림 3. 에어 브리지(Air-bridge)후에 드레인-소오스 전압(V_{ds})와 게이트-소오스 바이어스(V_{gs})에 따른 드레인 전류(I_d)의 변화 (게이트 길이 1 μm×게이트 폭 85 μm×게이트 8개)

그림 3은 $V_{gs} = -1.5$ V에서 0.5 V까지 0.5 V 간격으로 다섯 번 측정했으며 파형 분석기(curve tracer)장비를 이용했다. 결과 최대 전류 밀도는 512 mA/mm으로 이 값은 기존 발표된 다른 결과보다 우수하였다^[7]. 최대 전달 컨덕턴스는 259 mS/mm였다.

이 소자의 S-파라미터는 드레인-소오스 바이어스(V_{ds})는 3.5 V이고, 게이트-소오스 바이어스(V_{gs})는 게이트 바이어스를 올리면서 얻은 최대 전류(I_{max})의 22%가 되는 게이트-소오스 전압(V_{gs}) = -0.5 V에서 0.5 GHz에서 15 GHz까지 회로망 분석기(Network Analyzer: HP8510A)를 가지고 측정하였다. 측정된 데이터는 그림 4에 나타내었다. S11과 S22는 주파수가 증가함에 따라 시계방향으로 돌고 S12는 그 절대값이 증가했고 S21은 주파수가 증가함에 따라 절대값이 감소했다.

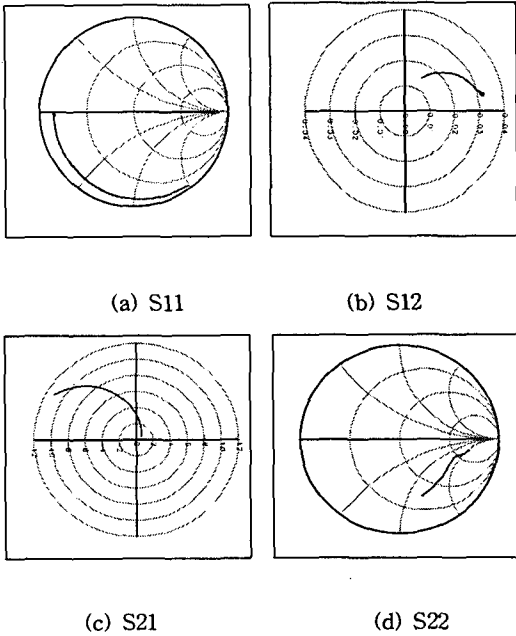


그림 4. 측정된 S-파라미터($V_{ds} = 3.5$ V, $V_{gs} = -0.5$ V)

S-파라미터로부터 얻은 최대 가용 이득(MAG, Maximum Available Gain)과 최대 안정 이득(MSG, Maximum Stable Gain), 측정된 S-파라미터를 h-파라미터로 변환 후 전류 이득(h_{21})을 제공한 것을 주파수에 따라 그림 5에 나타내었다. 본 실험에서 드레인 소오스 바이어스를 변화시키면서 살펴본 결과 f_{max} 는 바이어스가 줄어들어 따라 꾸준히 줄어들었고, f_T 는 3.5V에서 제일 높았다. 따라서, 전력 증폭기로 사용시 3.5V에서 최대 전류 이득이 얻어지리라 예상된다.

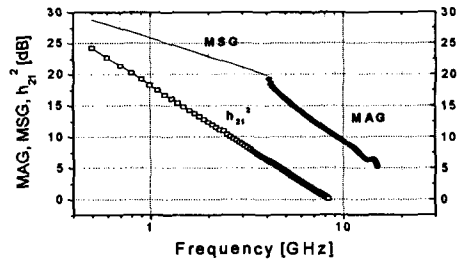


그림 5. 15 GHz까지 최대 안정 이득(MSG), 최대 가용 이득(MAG), 전류 이득(h_{21})² ($f_{max} = 30$ GHz, $f_T = 8.5$ GHz)

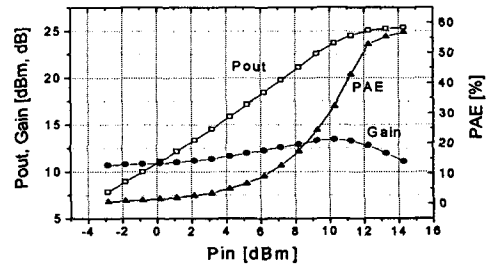


그림 6. $V_{ds} = 5.0$ V, $V_{gs} = 0$ V에서 입력 전력(P_{in})에 따른 출력 전력(P_{out}), 전력 이득(Power Gain), 전력 부가 효율(PAE, Power Added Efficiency)

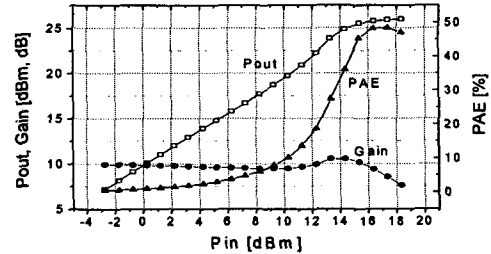


그림 7. $V_{ds} = 5.0$ V, $V_{gs} = 0.4$ V에서 입력 전력에 따른 출력 전력, 전력 이득, 전력 부가 효율

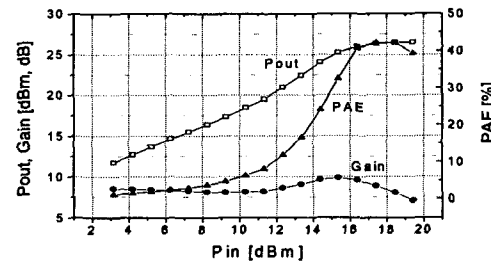


그림 8. $V_{ds} = 6.0$ V, $V_{gs} = 0.6$ V에서 입력 전력에 따른 출력 전력, 전력 이득, 전력 부가 효율

	Maximum Pout(dBm)	Power Gain(dB)	Maximum PAE(%)
그림 6	25.38	13.42	56.84
그림 7	25.89	10.51	48.36
그림 8	26.5	9.85	42.14

표 1. 최대 출력 전력과 이득, 최대 효율

제작된 소자의 Class A로의 최적인 점을 찾기 위해 각각 바이어스 포인트에 따라 출력 전력(Pout), 이득(Gain), 전력 부가 효율(PAE)를 측정하고 이의 변화를 그림 6, 그림 7, 그림 8에 각각 나타냈다. Vds=6.0 V와 Vgs=0.6 V에서 더 이상 바이어스를 Class A급으로 증가시켜도 최대 출력 전력은 변하지 않았고, 효율과 전력 이득만 떨어지는 특징을 보였다. 이로부터 최적의 바이어스 포인트는 Vds=6.0 V, Vgs=0.6 V임을 알 수 있었다. 전력 측정을 통해 얻은 최대 출력 전력(Pout), 전력 부가 효율(Power Added Efficiency), 전력 이득(Power Gain)은 기존에 발표된 Power P-HEMT의 값과 비교하여 그 특성이 우수하였다^{[8],[9]}.

IV. 결론

본 연구에서 만든 Power P-HEMT는 게이트 길이가 1.0 μm이고 전체 게이트 폭이 680 μm이며 전류 밀도가 512 mA/mm였다. Class A로 동작 시킬 때 최적의 바이어스 포인트는 Vds=6.0 V와 Vgs=0.6 V이었다. 이 때 최대 출력 전력이 26.5 dBm으로 0.4467 W 이고, 전력 부가 효율은 42.14 % 이었고, 선형 전력 이득은 9.85 dB였다. 이 바이어스에서 전력 증폭기를 구동시키면 본 연구에서 제작한 P-HEMT는 최대 출력 전력과 전력 부가 효율, 전력 이득으로 PCS에 응용할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구의 측정을 도와주신 초고주파 회로 연구실의 옥성민씨, 양영구씨에게 감사드립니다. 본 연구는 현대전자(주) 단말기 사업본부와 과학재단 지원 광전자 연구센터의 부분적 지원에 의해 수행 되었습니다.

참고문헌

[1] K. H. Ahn, Y. J. Jeon, Y. H. Jeong, C. E. Yun, and H. M. Pyo, "Enhanced current-voltage characteristics of Al_{0.25}Ga_{0.75}Al/In_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs P-HEMTs using an inverted double channel structure," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37, Part 1,

no. 3B, pp. 1377-1379, March 1998.
 [2] K. H. Ahn, Y. J. Jeon, Y. H. Jeong, C. E. Yun, and H. M. Pyo, "Growth and characterization of AlGaAs/InGaAs/GaAs P-HEMTs grown by LP-MOCVD using inverted double channel structure," in Ext. Abst. 1997 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials(SSDM), Hamamatsu, Japan, Sept. 16-19, 1997, PP. 434-435.
 [3] D. H. Jeong, K. S. Jang, J. S. Lee, Y. H. Jeong, and B. Kim, "DC and ac characteristics of Al_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs quantum-well delta-doped channel FET grown by LP-MOCVD," IEEE Electron Devices Lett., vol. 13, no. 5, pp. 270-272, May 1992.
 [4] J. S. Lee, K. H. Ahn, Y. H. Jeong, and D. M. Kim, "Quantum-well Hall devices in Si-delta-doped Al_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs pseudomorphic Al_{0.25}Ga_{0.75}As/In_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs heterostructures grown by LP-MOCVD: performance comparisons," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 43, no. 10, pp. 1665-1670, Oct. 1996.
 [5] Y. J. Jeon, Y. H. Jeong, B. Kim, Y. G. Kim, W. P. Hong, M. S. Lee, "DC and rf Performance of LP-MOCVD grown Al_{0.25}Ga_{0.75}As/In_{0.25}Ga_{0.75}As (x=0.15-0.28) P-HEMT's with Si-delta doped GaAs layer," IEEE Electron Device Lett., vol. 16, no. 12, pp. 563-565, Dec. 1995.
 [6] B. G. Kim, Y. J. Jeon, and Y. H. Jeong, "Fabrication and characterization of the 0.25 μm T-shaped gate P-HEMT and its application for MMIC low noise amplifier," Journal of KITE(in Korean), vol. 36, no. 1, pp. 38-46, Jan. 1999.
 [7] Y. L. Lai, E. Y. Chang, C. Y. Chang, T. H. Liu, and S. P. Wang, "High-power-density and high-efficiency atomic-planar-doped AlGaAs/InGaAs quantum-well power high-electron-mobility transistors for 2.4V medium-power wireless communication applications," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 36, pp. 1856, 1997.
 [8] R. Lai, M. Wotjtowicz, C. H. Chen, M. Biedenbender, H. C. Yen, D. C. Streit, K. L. Tan, and P. H. Liu, "High-power 0.15-μm V-band pseudomorphic InGaAs/AlGaAs/GaAs HEMT," IEEE Microwave Guided Wave Letters, vol. 3, pp. 363-365, Oct. 1993.
 [9] M. Zaknoune, O. Schuler, S. Piotrowicz, F. Mollot, D. Theron, and Y. Crosnier, "High-power V-band Ga_{0.51}In_{0.49}P/In_{0.2}Ga_{0.8}As pseudomorphic HEMT grown by gas source molecular beam epitaxy," IEEE Microwave Guided Wave Letters, vol. 9, no. 1, pp. 28-30, Jan. 1999.