

역 이중채널 구조를 이용한 전력용 AlGaAs/InGaAs/GaAs P-HEMT의 특성

안 광 호[○], 정 영 한, 배 병 숙, 정 윤 하

*포항공과대학교 전자전기공학과

Characteristics of inverted AlGaAs/InGaAs/GaAs power P-HEMT's with double channel

Kwang Ho Ahn, Young Han Jeong, Byung Suk Bae, Yoon Ha Jeong
Dep. of Electronic & Electrical Engineering, POSTECH

Abstract

An inverted double channel AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructure grown by LP-MOCVD is demonstrated and discussed. Sheet carrier densities in excess of $4.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ at 300K are obtained with a hall mobility of $5010 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. The proposed device with a $1.8 \times 200 \mu\text{m}^2$ gate dimension reveals an extrinsic transconductance as high as 320 mS/mm and a saturation current density as high as 820 mA/mm at 300K. This is the highest current density ever reported for GaAs MODFET's with the same gate length. Significant improvements on gate voltage swing (up to 3.5 V) and on reverse breakdown voltage (-10V) are demonstrated due to inverted structure.

Keyword : double channel, inverted structure, LP-MOCVD, current density, breakdown voltage

1. 서 론

최근들어 P-HEMT를 이용한 고 성능의 전력용 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1] 이러한 전력용 P-HEMT의 재료로 GaAs계 물질에서 우수한 특성을 나타내는 AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic 구조가 각광을 받고 있다.^[2-4] 이러한 우수한 특성은 주로 AlGaAs/InGaAs사이의 큰 밴드갭 차이(ΔE_c), InGaAs물질의 큰 Γ -L밸리(valley) 사이의 간격과, 작은 유효질량(effective mass)값에 의존한다.^[5]

최근까지는 이러한 구조를 이용한 전력용 HEMT소자에 대한 연구가 주로 AlGaAs/InGaAs/GaAs의 정상(normal) 구조에 편중되어 왔다. 그러나 InGaAs/AlGaAs/GaAs의 역(inverted)구조를 이용해서 높은 전달특성과 동시에, 높은 항복전압을 얻을 수 있음이 보고되어 있다.^[6-8] 역 구

조의 2차원 전자가스(2-DEG)가 정상구조에 비해 게이트 쪽에 가까이 있기 때문에, 전달특성 관계식으로부터 외인성 전달 컨덕턴스(extrinsic transconductance)의 향상을 가져온다.^[9] 또한, 역 구조를 취함으로써 게이트 아래에 진성층을 두고, 도핑층을 게이트에서 떨어진 채널 아래에 두므로써, 항복전압의 향상을 가져올 수 있다. 또한, 이중 또는 다중채널의 구조를 이용하면 전류 구동능력의 향상을 통해, 소자의 전력특성과 스위칭 속도를 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 고 전류밀도와 높은 항복전압이 요구되어지는 전력용 소자의 제작을 위하여 AlGaAs/InGaAs/GaAs의 역 이중채널구조의 에피를 제안하고, 그 특성을 분석하였다.

2. 전력용 P-HEMT의 에피구조 및 제작

전력용 소자에 적합한 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 역 이중채널 구조의 에피를 저압 유기금속 기상성장법(LP-MOCVD)에 의해 반 절연성(semi-insulating)의 GaAs기판위에 76 Torr에서 성장하였다. 트리메틸갈륨(TMGa), 트리메틸알루미늄(TMA), 에틸디메틸인듐(EDMIn), 아르신(AsH_3), 사이렌(SiH_4)이 각각 Ga, Al, In, As의 원료와 n type의 도핑물질로 사용되었다. 제안된 역 이중채널의 에피구조를 그림 1에 나타내었다. 격자비정합을 수용할 수 있는 InGaAs의 임계두께(critical length)가 100Å임을 알 수 있었다. 도판트(dopant) 물질인 SiH_4 주위에 20Å의 GaAs 층을 길러 Al의 몰분율(mole fraction)이 0.2 보다 클 때 AlGaAs층과 SiH_4 이 만나서 생기는 불순물 효과(Dx trap)를 줄였다.^{[10][11]} 한편, AlGaAs 스페이스층(spacer layer)의 두께가 60Å 이하일 때 Si-델타도핑층^[12]의 이온화된 불순물에 의한 쿨롱산란(coulomb scattering)에 의해 전자이동도의 감소를 가져왔다. 또한 스페이스층의 두께가 100Å 이상일 경우는 델타

도핑층에서의 병렬전도(parallel conduction)에 의해 전자 이동도가 감소했다.

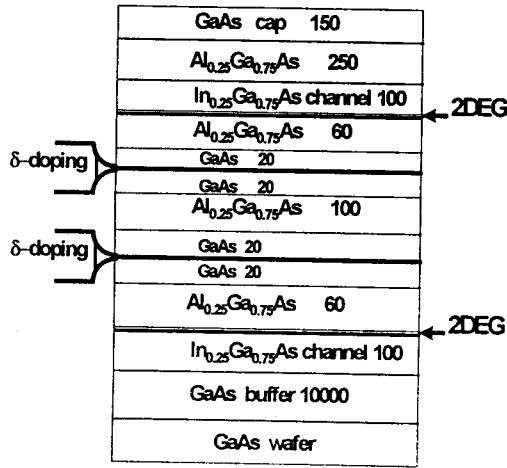


그림 1. AlGaAs/InGaAs/GaAs 역 이중채널의 결정성장 단면도(단위: Å).

Fig. 1. Schematic diagram of an inverted double channel AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic heterostructure (unit: Å).

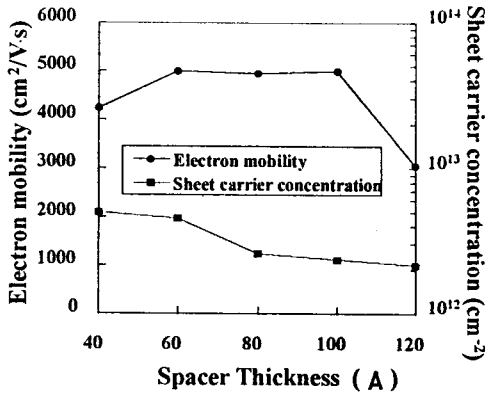


그림 2. 스페이스층의 두께에 따른 전자이동도와 면 전하농도분포.

Fig. 2. Electron mobility and sheet carrier concentration as a function of spacer thickness.

그림 2에 스페이스층의 두께에 따른 전자이동도와 면 전하농도를 나타내었다. 측정된 데이터로부터 60Å의 AlGaAs 스페이스층이 최적의 두께임을 알았다. 홀(Hall) 측정을 통해 이 조건에서 $4.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 의 면 전하농도와 $510 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 전자이동도를 얻었다.

소자제작에는 전형적인 포토리소그래피 (photolithography)와 lift-off 방법이 사용되었다. 첫 번째로 $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}(1:1:25)$ 용액으로 GaAs buffer층까지 메시에칭을 행하였다. 음성접촉(ohmic contact)을 위해 AuGe/Ni/Au 금속을 열 진공증착기로 증착한 뒤 450°C에서 30초간 annealing하였다. 게이트와 AlGaAs층 사이의 Shottky contact 금속으로 Au를 증착하였다. 제작된 소자의 게이트 면적은 $1.8 \times 200 \mu\text{m}^2$ 이다.

3. 제작된 전력용 소자의 특성분석

그림 3에 $1.8 \times 200 \mu\text{m}^2$ 의 역 이중채널 구조의 P-HEMT소자에 대한 전류-전압특성이 나타나 있다. 단일채널의 소자에 비해 향상된 전류구동 능력을 보여준다.

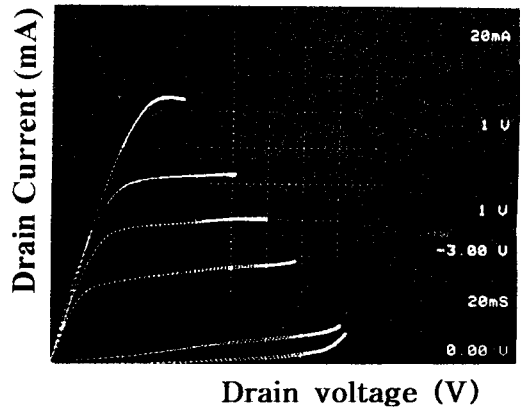


그림 3. 역 이중채널 P-HEMT 소자의 전류-전압특성 ($1.8 \times 200 \mu\text{m}^2$, $V_{gs} = -1.0 \text{V}/\text{step}$).

Fig. 3. I-V characteristics of the proposed device ($1.8 \times 200 \mu\text{m}^2$, $V_{gs} = -1.0 \text{V}/\text{step}$).

그림 4는 소자의 게이트-드레인간의 역 방향 항복전압 (reverse breakdown voltage)을 나타낸다. 보통 항복전압은 게이트와 채널사이의 스페이스층의 농도와 두께가 가장 중요한 결정요인으로 작용하는데, 본 연구에서 사용된 소자는 역 구조를 취하여 Si-델타도핑층을 채널아래에 두고 게이트와 채널사이에 진성형의 AlGaAs층을 길러 -10V이하의 우수한 항복전압 특성을 나타내었다.

그림 5는 그림 3의 전류-전압 특성관계로부터 얻어낸 전달컨덕턴스 값과 드레인 전류를 나타낸다. 이중채널을 통한 전류구동능력의 향상으로, 최대 드레인 전류밀도 (I_{dmax})가 820 mA/mm를 나타내어 동일한 게이트 길이를 가지는 소자에 대해 우수한 특성을 나타내었다.

한편, 게이트 바이어스에 대한 전달 컨덕턴스 값도 나타내었는데, 1.5 V의 게이트 전압에 대해 320 mS/mm의 최대 외인성 전달컨덕턴스 값을 나타내어, 역 구조에서 게이트-채널 유효거리의 감소로 전달특성의 향상을 가져옴을 알았다. 정상구조의 소자는 순방향의 게이트 전압이 증가함에 따라 채널과 델타도핑층간의 병렬전도(parallel conduction)로 인하여 게이트 전압 스윙폭이 감소하지만, 역 구조에서는 병렬전도에 의한 전달특성의 감소가 없기 때문에 게이트 전압 스윙폭이 증가한다. 본 연구에 사용된 소자는 게이트 전압스윙폭이 3.5 V로 우수한 특성을 나타내었다.

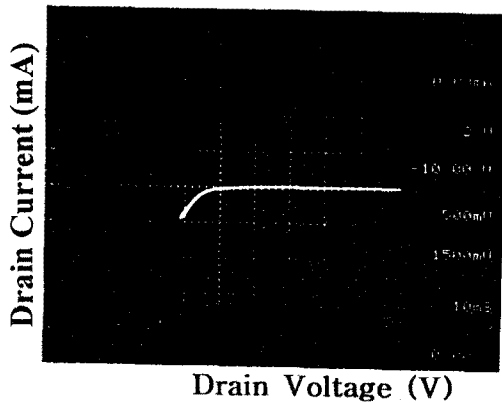


그림 4. 제안된 소자의 게이트-드레인간의 역 방향 항복 전압.

Fig. 4. Gate-drain breakdown measurement of the proposed device.

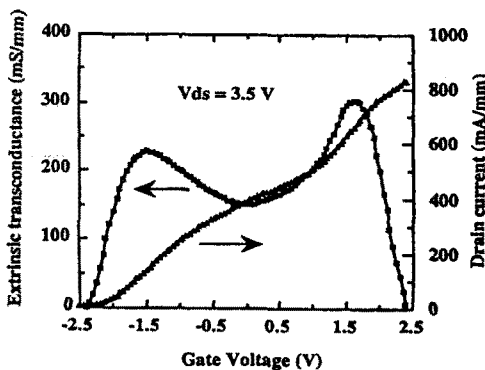


그림 5. 게이트 전압에 따른 전달특성과 전류특성 ($1.8 \times 200 \mu\text{m}^2$, $V_{ds}=3.5\text{V}$).

Fig. 5. The extrinsic transconductance and saturation current density versus gate bias ($1.8 \times 200 \mu\text{m}^2$, $V_{ds}=3.5\text{V}$).

IV. 결 론

전력용 소자에 적합한 AlGaAs/InGaAs/GaAs의 역 이중채널 에피구조를 제안하고 저압 유기금속 기상성장법(LP-MOCVD)에 의해 성장하였다. $1.8 \times 200 \mu\text{m}^2$ 의 게이트 면적을 가지는 HEMT소자를 제작하고 특성을 분석하였다. 이중채널을 사용하여 820 mA/mm의 최대 드레인 전류밀도를 얻었다. 또한 역 구조를 사용하여, 델타도핑층을 채널아래에 뒀으로써 -10 V이하의 높은 역방향 항복 전압을 얻었다. 아울러 게이트와 채널사이의 유효거리($d_{eff}=d-\Delta d$)의 감소로 320 mS/mm의 Gm값을 얻었다. 위의 결과들은 동일 게이트 길이를 갖는 다른 소자에 비해 월등히 우수한 값이다. 또한 이러한 특성값들을 통해 본 연구에서 제안한 역 이중채널 구조가 전력용에 보다 적합한 소자임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. J. Kao, W. C. Hsu, H. M. Shieh, and T. Y. Lin, "Improved mobilities and concentrations in double quantum well InGaAs/GaAs pseudomorphic HFETs using multicoupled δ -doped GaAs," *Solid-State Electronics*, vol. 38, no. 6, pp.1171-1173, 1995.
- [2] G. W. Wang, Y. K. Chen, D. C. Radulescu, and L. F. Eastman, "A high-current pseudomorphic AlGaAs/InGaAs double quantum-well MODFET," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 9, no. 1, pp.4-6, Jan., 1988.
- [3] J. C. Huang, G. S. Jackson, S. Shanfield, A. Platzker, P. K. Saledas, and C. Weichert, "An AlGaAs/InGaAs pseudomorphic high electron mobility transistor with improved breakdown voltage for X- and Ku-band power applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 41, no. 5, pp.752-759, May., 1993.
- [4] A. A. Ketterson, W. T. Masselink, J. S. Gedymin, J. Klem, Chin-Kum Peng, W. F. Kopp, H. Morkoc, and K. R. Gleason, "Characterization of InGaAs/AlGaAs pseudomorphic modulation-doped field-effect transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-33, no. 5, pp.564-571, May., 1986.
- [5] N. Moll, M. R. Hesuchen, and A. Fischer-Cobrie, "Pulse-doped AlGaAs/InGaAs pseudomorphic MODFET's," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 35, pp.879-881, May., 1988.
- [6] N. C. Cirillo, M. S. Shur, and J. K. Abrokwhah, "Inverted GaAs/AlGaAs modulation-doped field-effect transistors with extremely high transconductances,"

IEEE Electron Device Lett., vol. 7, no.2, pp.71-74, Feb., 1986.

[7] C. L. Wu, W. C. Hsu, H. M. Shieh, and M. S. Tsai, "An improved inverted δ -doped GaAs/InGaAs pseudomorphic heterostructure grown by MOCVD," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 15, no.9, pp.330-332, Sep., 1994.

[8] W. C. Hsu, C. L. Wu, M. S. Tsai, C. Y. Chang, W. C. Liu, and H. M. Shieh, "Characterization of high performance inverted delta-modulation-doped (IDMD) GaAs/InGaAs pseudomorphic heterostructure FET's," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-42, no. 5, pp.804-809, May., 1995.

[9] W. C. Hsu, H. M. Shieh, M. J. Kao, R. T. Hsu, and Y. H. Huei, "On the improvement of gate voltage swing in delta-doped GaAs/In_xGa_{1-x}As/GaAs pseudomorphic heterostructure," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-40, no. 9, pp.1630-1635, Sep., 1993.

[10] Y. J. Jeon, Y. H. Jeong, B. M. Kim, Y. G. Kim, W. P. Hong, and M. S. Lee, "DC and RF performance of LP-MOCVD grown Al_{0.25}Ga_{0.75}As/In_xGa_{1-x}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.

[11] J. S. Lee, K. H. Ahn, Y. H. Jeong, D. M. Kim, "Quantum-well hall devices in Si-delta-doped Al_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs and 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. ED-43, no. 10, Oct., 1996.

[12] D. H. Jeong, K. S. Jang, J. S. Lee, Y. H. Jeong, and B. M. 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 Device Lett.*, vol. 13, no.13, pp.270-272, May., 1992.