

論文 92-29A-4-6

저압 유기금속기상 성장법에 의한 AlGaAs/GaAs 양자 우물에 델타 도우핑된 채널 FET 특성

(Characteristics of AlGaAs/GaAs Quantum-Well Delta-Doped Channel
FET's by Low Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposition)

張景植*, 鄭東皓*, 李正守**, 丁潤夏*

(Kyeong Sik Jang, Dong Ho Jeong, Jeong Soo Lee, and Yoon Ha Jeong)

要 約

저압 유기금속기상 성장법을 이용하여 AlGaAs/GaAs 양자우물에 델타 도우핑된 채널을 가진 전계 효과 트랜지스터(FET)를 만들었다. $1.8\mu\text{m}$ 의 게이트 길이와 $100\mu\text{m}$ 의 게이트 폭을 가진 이들 FET들은 190mS/mm 의 최대 외인성 전달 컨덕턴스(maximum extrinsic transconductance)와 425mA/mm 의 최대 드레인 전류밀도의 특성을 나타내었다. 특히 이들 소자들은 2.4V 의 매우 넓은 게이트 전압 스윙범위에서 평탄한 전달 컨덕턴스(transconductance)를 가지고 있었다. 그리고, S-parameter 측정에서는 7GHz 와 15GHz 의 전류 이득과 전력 이득의 차단 주파수를 얻었다. 이들 값들은 이들과 유사한 소자 구조를 가진 GaAs계 이종접합 FET에 대한 다른 연구결과의 보고값들과 비교하여 볼때 가장 성능이 우수한 특성들을 나타내었다.

Abstract

AlGaAs/GaAs quantum well delta-doped channel FET's have been successfully fabricated using by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition(LP-MOCVD). The FET's with a gate dimension of $1.8\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ have a maximum transconductance of 190mS/mm and a maximum current density of 425mA/mm . The devices show extremely broad transconductances with a large voltage swing of 2.4V . The S-parameter measurements have indicated that the current gain and power gain cutoff frequencies of the device were 7 and 15GHz , respectively. These values are among the best performance reported for GaAs based heterojunction FET's with a similar device geometry.

I. 서 론

최근 에피층속에 단원자 정도로 불순물을 도우핑하여, V자형 전위우물에 전자를 2차원적으로 모아 전자의 수송을 보다 가속화시키는 방법인 델타 도우

핑기술에 많은 관심이 집중되고 있다.^[1-3] 이와같은 GaAs계 화합물 반도체의 새로운 소자 제조기술은 고속소자, 저잡음 소자 연구등에 그 응용이 크게 기대되고 있다.^[4-10]

한편 고속소자 중에서 HEMT(high electron mobility transistor)는 높은 전계에서 2차원 채널의 이동도의 감소, 높은 캐리어 농도를 얻는데의 제한성, 소자 제작시 발생하는 드레인 전류(drain current) 직선성 결여나 문턱전압(threshold voltage)의 제어가

*正會員, **準會員, 浦項工科大学 電子電氣工學科
(Dept. of Electron. and Elec. Eng., POSTECH)
接受日字: 1992年 1月 7日

매우 어려운 점 등이 단점으로 지적되어 왔다.¹⁵⁾ 따라서 최근 MBE(molecular beam epitaxy)를 이용하여 이들 문제점을 해결하고자 AlGaAs/GaAs 양자우물에 델타 도우핑을 하여 캐리어를 더욱 많이 구속(confinement)시킨 에피층을 채널로 이용함으로써, 수송도(transport)를 향상시키고, 또한 높은 캐리어 농도를 얻어, 우수한 소자 특성을 갖는 결과가 보고된 바 있다.¹⁶⁾ 그러나 MOCVD(metalorganic chemical vapor deposition)를 이용한 연구는 A. Ishibashi 등¹²⁾과 N. Pan 등¹³⁾에 의한 GaAs에 델타 도우핑된 채널을 가진 전계효과 트랜지스터와 Y. H. Jeong 등¹⁴⁾에 의한 InP에 델타 도우핑된 채널을 가진 전계효과 트랜지스터의 연구 결과가 보고 되었으나 AlGaAs/GaAs 양자우물 구조에 대한 연구결과는 보고된 바 없다.

본 연구에서는 저압 유기금속기상 성장법(low pressure metalorganic chemical vapor deposition; LP-MOCVD)을 이용하여 AlGaAs/GaAs 양자 우물속에 델타 도우핑된 채널을 갖는 FET(quantum-well delta doped channel FET)를 처음으로 제작하여, 그 소자의 전기적 특성에 관하여 고찰하고자 한다.

II. 실험 방법

양자우물에 델타 도우핑된 소자구조를 성장시키는데 사용한 장치는 일본 산소(Nippon Sanso K.K)의 저압 유기금속기상 성장법 장치를 사용하였다. 이때 에피 성장된 구조 단면을 그림1에 나타내었다. GaAs의 면 방위가 (100)인 반절연 기판위에 1.0 μ m의 도우핑하지 않은 AlGaAs 완충층을 성장시킨 후 다시 75Å의 도우핑하지 않은 GaAs층을 성장시켰다. 그 후 AsH₃은 그대로 흘려주고 트리메틸 갈륨(trimethylgallium; TMG)은 멈춘다음, 수소에 100ppm 으로 희석된 도우핑 소스 가스인 모노실란(monosilane; SiH₄)을 흘려주어 실리콘(Si) 델타 도우핑을 약 90초간 행하였다. 다시 그 위에 75Å의 도우핑하지 않은 GaAs층과 200Å의 도우핑하지 않은 AlGaAs 장벽층 그리고 20Å의 도우핑하지 않은 GaAs 캡 층을 성장시켰다. 이때 성장온도는 양질의 AlGaAs 버퍼층을 얻기 위하여 맨처음에는 750°C로 하다가 완충층 성장 후 델타 도우핑시 Si 도판트들의 확산을 최소로 하기 위해 700°C로 낮추어 행하였다. 그리고 성장 압력은 76Torr였고 트리메틸 갈륨(trimethylgallium; TMG)과 트리메틸 알루미늄(trimethylaluminum TMA) 그리고 수소에 10%로 혼합된 아르신 가스(AsH₃)를 반응 소스로, SiH₄를 Si델타 도우핑을 위

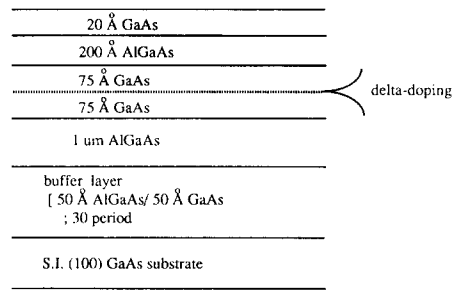


그림 1. 소자 제작을 위해 성장한 에피택셜층의 단면도
Fig. 1. Cross section of epitaxial layer for device.

한 도우핑 가스로 각각 사용하였다. 성장 후 델타 도우핑된 채널의 도우핑 농도분포를 1MHz MDC(RM-1600) System으로 정전용량-전압(capacitance-voltage; C-V) 측정을 통해 1 \times 10¹⁹cm⁻³의 최대치와 43Å의 반치폭(full width at half maximum; FWHM)의 양호한 농도분포를 얻었으며 이를 그림2에 나타내었다. 이때 사용된 시료는 n형 기판위에 버퍼층으로 1 μ m AlGaAs를 성장하고, 150Å의 GaAs 우물층 가운데에 델타 도우핑을 행한후 500Å의 AlGaAs층과 50Å의 GaAs 캡층을 성장시킨 것을 이용하였다. 또 Hall 측정(Hall measurement)을 통해 상온에서 4.9 \times 10¹²cm⁻²의 면 캐리어 밀도와 이동도 2000cm²/V·s를 얻었다. 이들 값들은 양자우물내에서 캐리어의 구속효과에 의하여 델타 도우핑된 GaAs층을 전자 이동도가 향상되었음을 나타내 준다.

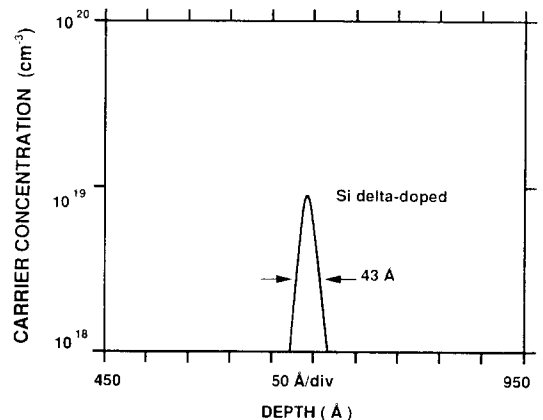


그림 2. 정전용량-전압 방법에 의한 캐리어 농도분포 특성
Fig. 2. Depth profile by capacitance-voltage.

소자 제작은 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O(1:1:25)$ 의 에칭용액을 사용하여 메사 에칭을 하고, AuGe/Ni/Au의 혼합금속을 이용하여 소오스-드레인 저항성 접촉(ohmic contact)을 형성했다. 그리고 고속 열처리 공정기(RTP)로 $450^\circ C$ 에서 30초간 열처리 하였다. 그리고 마지막으로 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O(3:1:50)$ 의 에칭 용액을 사용하여 게이트 리세스(gate recess) 에칭을 행한 후, 금(gold; Au)을 증착시켜 최종적으로 $1.8\mu m$ 의 게이트 길이와 $100\mu m$ 의 게이트 폭을 가진 그림 3과 같은 단면구조의 이중접합 FET를 제작하였다.

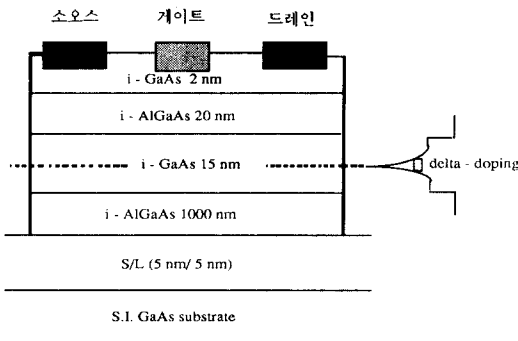


그림 3. 양자우물에 델타 도우핑된 전계효과 트랜지스터의 단면도

Fig. 3. Cross section of quantum well delta-doped channel FET.

III. 결과 및 고찰

아래 그림4는 상온에서 $1.8\mu m$ 의 게이트 길이와 $100\mu m$ 의 게이트 폭을 가진 양자우물에 델타 도우핑된 이중접합 FET의 드레인전류-전압 특성을 나타내고 있다.

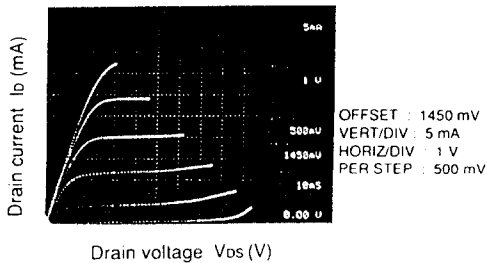


그림 4. 델타 도우핑된 양자우물 전계효과 트랜지스터의 드레인전류-전압 특성
Fig. 4. Drain current-voltage characteristics for quantum well delta-doped channel FET (T=300K).

그림4에 나타난 것과 같이 매우 좋은 핀치오프 (pinch-off) 특성과 변조(modulation) 특성을 나타내고 있으며, 이것은 도핑하지 않은 층이 아주 낮은 불순물 농도를 가진것에 기인한다. 특히 히스테리시스 특성이나 특수한 변이효과(kink effect)등이 나타나지 않는 매우 우수한 FET임을 알 수 있고, 이는 종래의 HEMT나 FET구조의 전기적 특성과는 매우 다른 점이다.¹¹⁾

그림5는 게이트 전압(V_{GS})에 대한 드레인-소오스 전압(V_{DS})이 3V일 때의 외인성 전달 컨덕턴스(extrinsic transconductance)와 드레인 전류를 나타내고 있다. 특히 본 연구에서 제작된 델타 도우핑된 양자우물 구조의 $Al_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ 이중접합 FET는 약 2.4V에 이르는 넓은 게이트 전압범위에 걸쳐 $190mS/mm$ 의 전달 컨덕턴스를 나타내고 있다. 이러한 특성은 지금까지 발표된 1.5V의 게이트 전압범위에서 $140mS/mm$ 의 전달 컨덕턴스를 가지는 최근의 결과보다 매우 우수한 값들이다.¹³⁾ 이는 안정된 게이트 전압을 넓은 범위에서 인가할 수 있으므로 저 잡음소자나, 고속 전자소자등에 매우 유효하다.

이와같은 결과들은 유사한 다른 FET나 HEMT 구조들과 비교해볼 때 매우 넓은 전달 컨덕턴스 특성과 아주 좋은 전류 선형성은 지금까지 보고된 내용 중에 가장 우수한 특성을 나타내고 있다고 볼 수 있다.

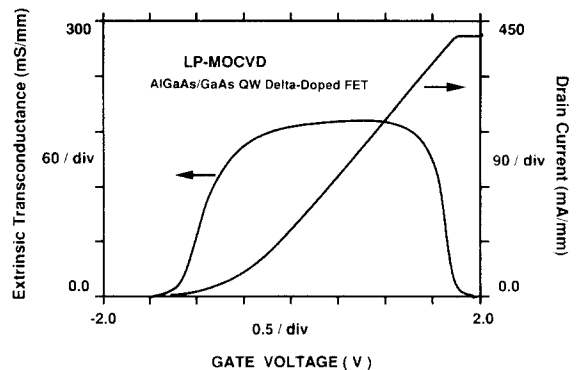


그림 5. 게이트 전압에 대한 전달 컨덕턴스와 드레인전류 특성
Fig. 5. Extrinsic transconductance and drain current versus gate voltage.

그림6은 고주파 특성 분석에 관한 결과로서 전류이득 차단주파수(current gain cutoff frequency)와 전력이득 차단주파수(power gain cutoff frequency)는 각각 7GHz와 15GHz등을 얻었다. 본 연구에서

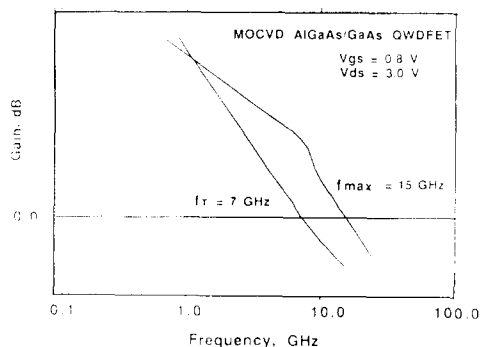


그림 6. 델타 도우핑된 양자우물 전계효과 트랜지스터의 고주파 특성

Fig. 6. High frequency characteristics of quantum well delta-doped channel FET.

얻은 결과를 지금까지 보고된 GaAs MESFET의 전류이득 차단 주파수의 실험 결과치와 비교하였을 때⁽¹¹⁻¹⁴⁾ 더 높은 전류이득 차단 주파수를 얻었다. 그리고 전류이득 차단 주파수는 게이트 길이에 역비례 하므로 게이트 길이가 짧을수록 더 높은 차단 주파수를 얻을 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 저압 유기금속 기상 성장법을 이용한 AlGaAs/GaAs 양자우물에 델타 도우핑된 채널을 가진 FET(quantum well delta-doped FET) 소자에 대해 고찰하였다.

저압 유기금속 기상 성장법에 의하여 성장된 에피층의 특성 평가를 위하여 정전용량-전압 측정과 Hall 측정을 하였다. 정전용량-전압 분포 특성에서는 약 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 의 도우핑 농도와 매우 급준한 43 Å의 반치폭(full width at half maximum: FWHM)의 결과를 얻었으며, Hall 측정에서는 상온에서 $4.9 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 의 2차원 캐리어 농도와 이동도 $2000 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 를 얻었다. 정전용량-전압 분포의 결과로 캐리어들이 잘 구속되었음을 알 수 있고, 양자우물 내에서 캐리어들의 구속효과에 의한 델타 도우핑층의 도우핑 농도와 전자 이동도가 향상되었음을 알 수 있었다. 그리고 이 에피층으로 FET를 제작하여 약 190mS/mm의 최대 전달 컨덕턴스와 넓은 게이트전압 변화에 대하여 일정한 전달 컨덕턴스를 나타내었고, 최대 드레인전류는 약 425mA/mm를 얻었다. 또 전류와 전력 이득 차단 주파수는 각각 7GHz와 15GHz를 얻었다. 이들 결과는 보고된 다른 결과치와 비교해서 보

다 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 다른 유사한 소자구조에서 보인 전류 비선형(current non-linearity)의 단점도 없고 높은 도우핑 농도에 의한 우수한 전류 선형성을 얻었다. 또한 높은 불순물 농도에 의한 양호한 채널의 핀치 오프(pinch-off) 특성을 나타내고 있었다. 이들 결과들로부터 양자 우물속에 델타 도우핑된 채널을 가진 FET구조가 고속 디지털 소자와 초고주파 전자소자 응용 등에 사용될 수 있음을 확인하였다.

參 考 文 獻

- [1] C.E. C. Wood, G.M. Metzger, J.D. Berry, and L. F. Eastman, *J. Appl. Phys.* vol. 51, no. 5, p. 383, 1980.
- [2] M. Zachau, F. Koch, K. Ploog, P. Roentgen and H. Beneking, "Schottky barrier tunneling spectroscopy for the electronic subband of a δ -doping layer," *Solid State Comm.*, vol. 59, no. 8, p. 591, 1987.
- [3] E.F. Schubert, J.E. Cunningham, and W.T. Tsang, "Electron-mobility enhancement and electron concentration enhancement in delta-doping n-GaAs at T=300K," *Solid State Commun.*, vol. 63, no. 7, p. 591, 1987.
- [4] M. Hashemi, B. Mcdermott, Umesh K. Mishra, J. Ramdani, A. Morris, John R. Hausner, Salah M. Bedair, "DC and AC characteristics of a nonalloyed delta-doped MESFET by atomic layer epitaxy," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 12, no. 6, p. 258-, 1991.
- [5] E.F. Schubert, A. Fisher, and K. Ploog, "The delta-doped field-effect transistor," *IEEE Trans. on Electron Devices.* vol. 33, no. 5, p. 625, 1986.
- [6] E.F. Schubert, J.E. Cunningham, W.T. Tsang, and T.H. Chiu, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, no. 25, p. 292, 1986.
- [7] W.P. Hong, J. Harbison, L. Florez and J.H. Abeles, *IEEE Trans. Electron Device Lett.* vol. ED-10, no. 7, p. 301, 1989.
- [8] E.F. Schubert, J.E. Cunningham, and W.T. Tsang and G.L. Tilm, "Selectively δ -doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructures with high two dimensional electron gas concentration $n_{2\text{DEG}}=1.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ for field effect transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, no. 15, p. 1170, 1987.
- [9] K.S. Jang, D.H. Jeong, J.S. Lee, and Y.H. Jeong, "AlGaAs/GaAs quantum-well delta-doped chan-

- nel FET's grown by LP-MOCVD," ICEIC'91, Aug. 22-23, 1991, Yanji, Jilin, P.R. China.
- [10] W.P. Hong, A. Zrenner, O.H. Kim, J. Haarbison, L. Florez, and F. Derosa, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 37, no. 8, p. 1924, 1990.
- [11] D.H. Jeong, K.S. Jang, J.S. Lee, and Y.H. Jeong, ICVC'91, Oct 22-25, 1991, Seoul, Korea.
- [12] A. Ishibashi, K. Funato, and Y. Mori, *Electron Lett*, vol. 24, no. 13, p. 1034, 1988.
- [13] N. Pan, J. Carter, G.S. Jaxkson, H. Hendriks, and X.L. Zheng, *Appl. Phys. Lett.* vol. 59, no. 4, p. 458, 1991.
- [14] Y.H. Jeong, D.H. Jeong, W.P. Hong C. Caneau, R. Bhat, and J.R. Hayes, *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 31, no. 2A, 1991.
- [15] A. Belache, A. Banoverschelde, G. Salmer, and M. Wolny, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 38, no. 1, p. 3, 1991.

 著 者 紹 介

張 景 植 (正會員)

1967年 7月 5日生. 1990年 경북대 공대 전자공학과 졸업. 1992년 포항공대 대학원 전자공학과 졸업. (석사) 현재 현대전자(주) 연구원. 주관심분야는 화합물 반도체 소자제작 및 응용 등임.

李 正 守 (準會員)

1968年 9月 22日生. 1991년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 1990년~현재 포항공대 대학원 전자전기공학과 석사과정. 주관심분야는 화합물 반도체 결정성장 기술을 이용한 전자소자 제작 및 응용 등임.



鄭 東 皓 (正會員)

1960年 3月 5日生. 1983년 경북대 공대 전자공학과 졸업. 1990년 포항공대대학원 전자전기공학과 공학석사학위 취득. 1983년~1988년 한국전자통신연구소 연구원. 1990년~현재 포항공대 대학원 전자전기공학과 박사과정. 주관심분야는 III-V 화합물 반도체 결정성장 기술을 이용한 전자소자(ME-SFET, HEMT) 제조 및 OEIC와 MMIC응용 등임.



丁 潤 夏 (正會員)

1950年 6月 18日生. 1974년 2월 경북대 공대 전자공학과 졸업. 1976년 2월 경북대 대학원 전자공학과 공학석사학위 취득. 1987년 2월 일본 Univ. of Tokyo 전자공학과 공학박사학위 취득. 1987년~1991년 포항공대 전자전기공학과 조교수. 1990년 2월~1991년 1월 Bell Communication Research 연구원. 1992년~현재 포항공대 전자전기공학과 부교수. 주관심분야는 III-V 화합물 반도체 결정성장 기술개발 및 초고속, 초고주파 소자응용 등임.