

GaAs 및 AlGaAs 완충층을 이용한 GaAs MESFET 제작

(GaAs MESFETs Using GaAs and AlGaAs Buffer Layers)

郭東華*, 李熙哲*

(Dong Hwa Kwak and Hee Chul Lee)

要約

고성능 GaAs MESFET을 제작하기 위하여, 분자선 박막 성장법에 의해 GaAs 및 AlGaAs 박막을 성장하였다. Hall 측정법에 의한 결과로부터 GaAs 박막 및 AlGaAs 박막의 최적 성장온도는 600°C 로 측정되었다. i-GaAs를 완충층으로 하는 $L_g = 1\mu\text{m}$, $W = 100\mu\text{m}$ 의 MESFET을 제작하여 1V의 낮은 무릎 전압과 224 mS/mm의 최대변환컨덕턴스(maximum transconductance), on-wafer 측정이 가능한 MESFET에서 차단주파수가 18 GHz 인 고주파 특성을 얻었다. 또한, i-GaAs 완충층으로 흐르는 누설 전류성분을 감소시키기 위하여, n형 활성층과 i-GaAs층 사이에 약 $1\mu\text{m}$ 의 $i\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 층을 삽입하여 제작한 MESFET에서 출력저항 r_{out} 값은 2.26 k Ω .mm 로 i-GaAs 를 완충층으로 사용한 MESFET의 그것보다 15배 정도 증가되었다.

Abstract

GaAs and AlGaAs layers were grown by Molecular Beam Epitaxy(MBE) to fabricate high performance GaAs MESFETs. Optimum growth temperatures were found to be 600°C from their Hall measurement data. MESFETs with the gate length of $1\mu\text{m}$ and the gate width of $100\mu\text{m}$ were fabricated on the MBE-grown GaAs layers which has i-GaAs buffer layer and characterized. Knee voltage and maximum transconductance of the devices were 1V, 224mS/mm, respectively. Cut-off frequency at on-wafer measuring pattern was measured to be 18 GHz. The MESFET with the $1\mu\text{m}$ -thick $i\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ buffer layer between n-active and i-GaAs was fabricated in order to reduce the leakage current which flows through the i-GaAs buffer layer. Its output resistance was 2.26 k Ω .mm which increased by a factor of 15 compared with the MESFET without $i\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ buffer layer.

1. 서론

*正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(KAIST)

接受日字 : 1993年 12月 11日

GaAs MESFET(Metal Semiconductor Field
Effect Transistor)은 전력이나 속도면에서 Si-

MOSFET보다도 우수한 특성을 지니고 있어 저잡음 및 전력용 초고주파 전자 소자로써 많이 이용된다. 이 GaAs MESFET 소자의 형성법은 이온을 주입하여 제작하는 방법과, MBE(Molecular Beam Epitaxy), MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 박막을 형성한뒤 식각공정을 이용하여 소자를 제작하는 두 방법이 있으며, 초고주파 전자 소자는 우수한 계면 특성을 가지는 후자의 방법에 의해 제작된다.¹⁾ 그 중 MBE는 초고진공에서의 분자선 증착으로 불순물이 거의 없는 박막을 형성하며, 고에너지 전자 에너지 회절(RHEED : Reflection High Energy Electron Diffraction)과 같은 in-situ monitoring 장비를 이용하여 성장중에 박막의 상태를 확인할 수 있고, 성장중의 기판 회전을 이용하여 두께를 균일하게 할 수 있다는 장점을 가지므로, 전자 소자 및 광소자의 박막구조 형성에 널리 이용된다. 이러한 양질의 MBE박막위에 형성된 GaAs MESFET은 우수한 농도 및 변환컨덕턴스의 균일성을 가지므로 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)의 제작에 있어 높은 신뢰도를 갖는다.²⁾

본 논문에서는 이러한 MBE법을 이용하여 GaAs 및 AlGaAs 에피박막을 형성하여 최적의 성장조건을 구하였다. 이 조건하에서 i-GaAs 층을 완충층으로 하는 MESFET 층을 형성하고 소자를 제작하여 D.C. 및 R.F. 특성을 측정하였다.³⁾ 또한, 포화영역에서 i-GaAs 완충층으로 흐르는 누설전류성분을 감소시키기 위하여, hot carrier의 전위장벽층으로서 i-AlGaAs 완충층을 이용하여 출력저항 r_{DS} 특성을 개선시켰다.

II. n-GaAs/undoped GaAs 구조의 MESFET

1. GaAs 박막형성

본 연구에서는 분자선 박막 형성법을 이용하여 박막을 형성하고 최적의 성장조건을 구하였다. 먼저 500 μ m 두께의 Cr-doped S.I.-GaAs (100) 기판을 유기세척하고 60 $^{\circ}$ C 의 4H₂SO₄ : 1H₂O₂ : 1H₂O 용액에서 30초간 에칭한후 D.I.-water로 3분 이상 초음파 세척을 한 다음, N₂ 가스로 건조시켰다. 이렇게 처리된 기판을 초고진공에서 As-flux 를 공급하며 약 580 $^{\circ}$ C에서 10분이상 가열하여, S.I.-GaAs 기판위에 형성되어있는 산화막을 제거하였다. 박막성장시 Ga cell은 1 μ m/hr 의 성장율을 갖는 온도로 했으며, As cell의 온도는 박막표면이 As 안정화면이 되도록 조절하였다. Si cell의 온도는 n-GaAs 층이 약

$3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 농도를 갖는 1150 $^{\circ}$ C 로 고정시키고, 기판의 온도를 500 $^{\circ}$ C 에서 650 $^{\circ}$ C 까지 변화시키면서 박막의 도핑(doping)특성을 알아보았다. 이 조건에서 undoped-GaAs 완충층 및 n-GaAs 층을 각각 1 μ m 씩 형성하여 van der Pauw Hall 측정을 하였다. (그림 1) 기판의 온도가 저온일때는 전자 농도 및 Hall 이동도가 아주 작게 나왔고, 점차 온도를 증가시키기에 따라 전자 농도는 증가 후 점점 포화하게 되어 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 근처의 값을 가졌다. 기판 온도가 625 $^{\circ}$ C 에서 최대의 Hall 이동도 값을 얻었는데 전자 농도는 예상포화값에서 다소 감소되었다. 또한, 기판온도가 625 $^{\circ}$ C 보다 큰 경우 전자의 Hall 이동도가 상당히 낮은 값을 갖게 되어 박막의 성장이 바람직하지 않음을 알 수 있다. 그 이유는, 기판 온도가 너무 높을때는 기판표면에 있던 흡착계수가 낮은 비소가 많이 증발되기 때문이라 생각된다. 기판온도가 아주 낮은 400 $^{\circ}$ C 에서는 전혀 GaAs 단결정 박막이 형성되지 않았으며 표면의 상태는 극히 나빴다. 이 시편의 저항은 20 M Ω 이었고 Hall 측정이 불가능하였다. 이 실험에서 기판온도가 600 $^{\circ}$ C 근처에서 전자의 도핑 특성이 가장 좋다는 것을 알 수 있었고 이 최적조건하에서 다음과 같이 MESFET 층을 형성하였다. i-GaAs 버퍼층을 2 μ m, Si로 도우핑한 n-GaAs 활성층($n = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)을 1500 \AA , 옴 접촉용 n-GaAs 층($n = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)을 500 \AA 두께로 차례로 성장하였다.

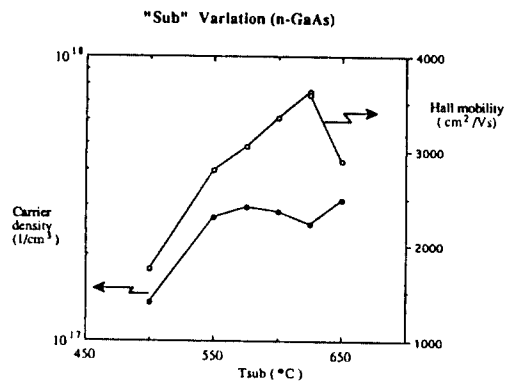


그림 1. 기판온도에 따른 n-GaAs 박막특성
Fig. 1. n-GaAs Characteristics.
(T_{sub} variation)

2. 소자제작공정

앞에서 형성된 MESFET 박막상에 게이트 길이가 1mm 인 MESFET을 제작하였다. (그림 2) 소자의

제작순서는 다음과 같다. 먼저, 소오스와 드레인에 오믹(ohmic) 형성을 위해 AuGe/Ni/Au 금속을 각각 1000Å, 300Å, 1500Å 두께로 엮고 430 °C 에서 20초간 열처리하였다. 그 다음, 소자간 격리를 위해 1NH₄OH : 1H₂O₂ : 100H₂O 용액으로 i-GaAs 층이 드러나게 mesa 식각을 하였다. 이때, i-GaAs 완충층의 항복전압은 100V 이상 (100μm 이하의 전류 유지)으로 좋은 절연 특성을 가짐을 알 수 있었다. 마지막으로, ungated I_{DSS}값이 25mA가 될 때까지 1NH₄OH : 1H₂O₂ : 500H₂O 용액으로 1분 50초간 게이트 recess 식각을 한 후, 게이트 금속용으로 알루미늄을 3000Å 엮고 lift-off 하여 MESFET을 완성하였다.

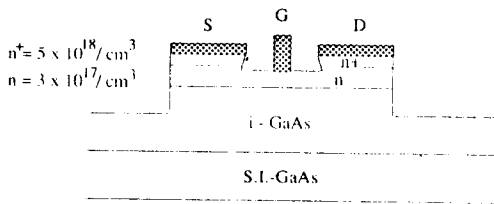


그림 2. 제작된 MESFET의 구조
Fig. 2. MESFET Structure.

3. D.C. 특성

제작된 단일 게이트 MESFET(L_g = 1μm, W = 100μm)의 전류-전압 특성(그림 3) 및 gm (변환컨덕턴스)곡선 (그림 4) 에서 V_k (무릎전압)는 약 1V로 매우 작은 소오스저항을 가짐을 알 수 있으며, 최대 변환컨덕턴스는 224 mS/mm 의 높은 값을 얻었다. 또, 100 x 100μm² 의 게이트 면적을 갖는 쇼트키 다이오우드를 C-V 측정하여 구한 전자농도 분포 (profile)가 그림 5에 나와있다. 농도분포에서 약 800Å 까지는 3.4 x 10¹⁷ cm⁻³ 의 일정한 농도를 가져 농도가 깊이 방향에 따라 균일함을 알 수 있다. 또한, 반도체내에서 도핑 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 변할 때 자유전자의 천이 거리는 드바이 길이 (Debye length)의 6~7배인 것을 고려할때 i-GaAs 완충층계면에서부터 급격히 전자농도가 감소하는 우수한 농도 특성을 가진다. 쇼트키 다이오우드를 측정한 결과 전위장벽층 및 이상 계수는 φ_{bi} = 0.770 V, η = 1.133 으로 이상적인 다이오우드에 가까운 특성을 얻었다. C-V 특성에서 구한 전자농도가 3.4 x 10¹⁷ cm⁻³ 임을 고려하면 임계(built-in)전압은 V_{bi} = 0.690 V임을 알 수 있다.

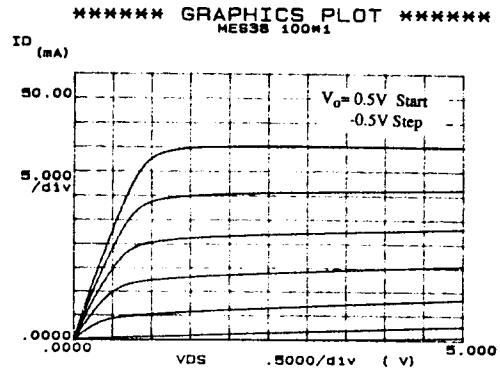


그림 3. MESFET의 전류-전압 특성
(L_g=1μm, W=100μm)

Fig. 3. I-V Characteristics.
(L_g=1μm, W=100μm)

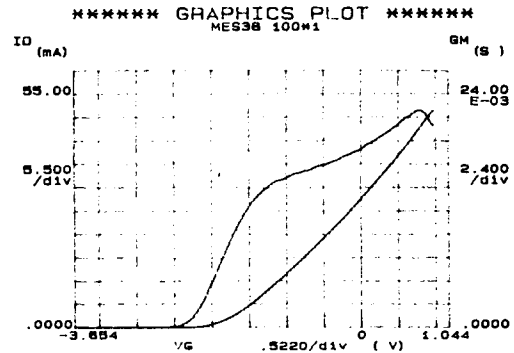


그림 4. g_m 특성 (L_g=1μm, W=100μm)
Fig. 4. Transconductance. (L_g=1μm, W=100μm)

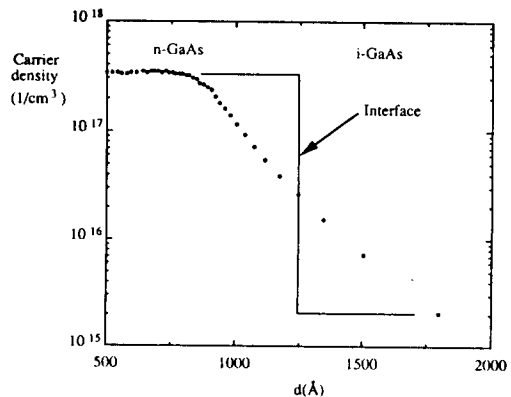


그림 5. 농도분포(n-GaAs/i-GaAs)
Fig. 5. Doping profile. (n-GaAs/i-GaAs).

4. A.C. 특성

On-wafer 측정용 MESFET ($L_g = 1\mu m$, $W = 100\mu m$, 2-finger gate)을 5~18 GHz 범위에서 network analyzer를 이용하여 측정된 S 파라미터 값이 그림 6에 나타나있는데 S_{21} 은 5배 축소하여 그림 6. 전체적으로 증폭기 특성에 알맞는 특성을 보이며, S_{21} 이 특히 큰 값을 가져 우수한 고주파 특성을 예측할 수 있다. 위에서 측정된 S 파라미터를 H 파라미터로 변환하여, 전류이득 h_{21} 의 주파수 및 직류 전압-전류 특성곡선에서의 I_{DSS} 값의 변화에 따른 경향을 그림 7에 보였다. I_{DSS} 값에 따른 전류이득의 변화가 거의 없는 안정된 이득특성을 보이며, $f_T = 18$ GHz 인 높은 차단 주파수값을 얻어 제작된 MESFET이 초고주파용 증폭기로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

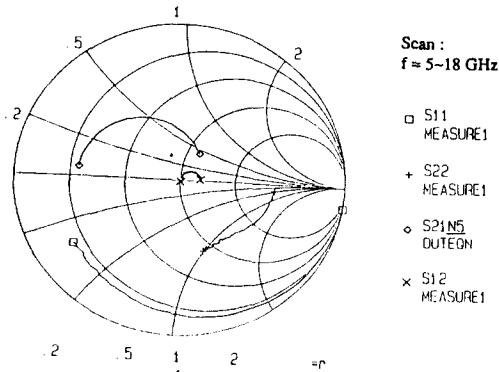


그림 6. MESFET의 S 파라미터
Fig. 6. S-parameter of MESFET.

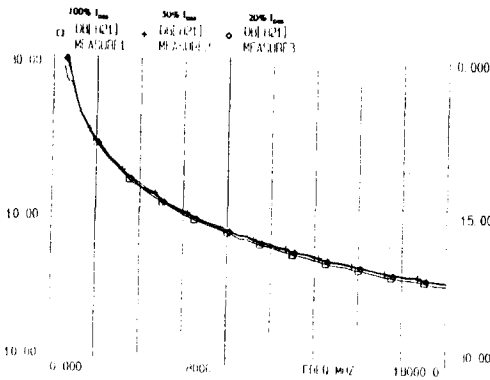


그림 7. MESFET의 전류이득
Fig. 7. Current Gain of MESFET.

III. n-GaAs/undoped AlGaAs 구조의 MESFET

1. AlGaAs 완충층의 잇점

앞서 제작된 MESFET에서 완충층으로 i-GaAs 층을 이용하였다. 그림 3에서 알 수 있듯이 포화영역에서 V_{DS} 의 증가에 따라 I_{DS} 가 조금씩 증가하는 특성을 보인다. 포화영역에서 n형 활성층은 완전히 공핍되어 있고, 게이트로의 누설전류도 없는 것으로 측정되었다. 따라서, 이 누설전류의 증가는 기판의 i-GaAs 완충층을 통한 전류성분이 주된 원인임을 알 수 있다. 이 누설전류는 출력저항 r_{DS} 값을 감소시키고 결과적으로 전력이득 및 f_{max} (unity power gain frequency)를 감소시킨다.¹⁵ 이러한 GaAs MESFET의 출력저항 특성은 AlGaAs 완충층을 사용하여 개선시킬 수 있다. AlGaAs 층은 GaAs 보다 큰 밴드 갭 (band gap) 및 높은 저항값을 가지므로 활성층과 완충층의 계면으로 흐르는 캐리어들을 억제하여 활성층내에 캐리어를 제한한다. 또, i-AlGaAs층의 낮은 이동도로 인해 누설전류가 흐르더라도 낮은 포화속도를 갖게 되므로 높은 출력 저항값을 얻을 수 있다.¹⁶

2. $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 박막성장 및 소자제작

$i-Al_xGa_{1-x}As$ 박막의 최적성장조건을 간접적으로 구하기 위해 알루미늄의 몰 분율 $x=0.3$ 인 n-AlGaAs 박막의 특성을 알아보았다. n-AlGaAs 박막의 성장속도는 $0.7\mu m/hr$ 로 하였으며, GaAs 박막 성장시와 마찬가지로 As 안정화면이 되는 조건에서 성장하였다. 기판의 온도를 $600^\circ C$ 에서 $660^\circ C$ 까지 변화시켰을 때 (그림 8) n-GaAs 층과 마찬가지로 $600^\circ C$ 에서 n-AlGaAs 박막의 이동도가 가장 크게 나타나, 이 온도에서 양질의 AlGaAs박막이 형성됨을 알 수 있다. 본 연구에서 관측된 RHEED 진동 (그림 9)에서도 GaAs 박막성장후 AlGaAs 층을 성장할 때 RHEED의 강도가 일정하게 유지되며 (2x4)As 안정화 구조가 지속되는 것으로 보아, AlGaAs/GaAs 계면형성이 양호함을 예상할 수 있다.

본 연구에서는 GaAs MESFET에서의 누설전류성분을 줄이기 위하여 n-GaAs 층과 i-GaAs 층 사이에 약 $1\mu m$ 두께의 $i-Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 완충층이 들어가는 박막 구조를 형성하였다. i-AlGaAs층의 최적성장온도는 n-AlGaAs층과 동일하게 $600^\circ C$ 로 가정하여 이 온도에서 성장하였다. 다른 층들은 앞에서 제작된 MESFET 박막과 동일하게 성장하였다. 이렇게 성장

된 박막상에 앞에서와 동일한 공정을 거쳐 다시 MESFET을 제작하였다.

상당히 큰 r_{DS} 값을 갖게되어 R.F.특성도 상당히 개선되리라 생각된다.

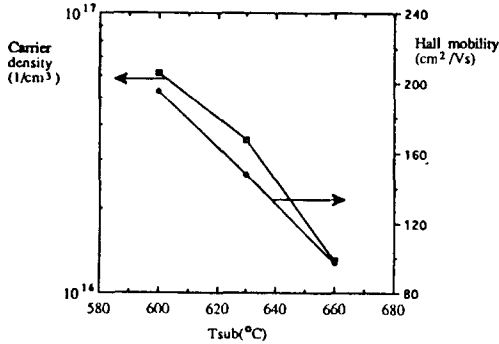


그림 8. 기판온도에 따른 n-AlGaAs박막특성
Fig. 8. n-AlGaAs Characteristics. (T_{sub} variation)

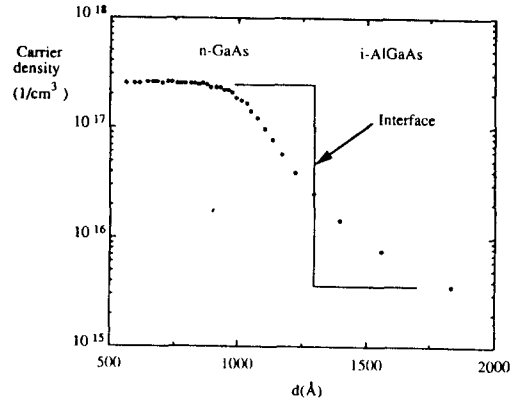


그림 10. 농도 분포(n-GaAs/i-AlGaAs)
Fig. 10. Doping profile. (n-GaAs/i-AlGaAs)

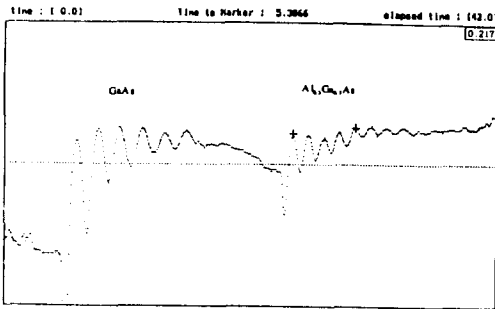


그림 9. 고전자에너지회절 진동(T_{sub} 600°C)
Fig. 9. RHEED Oscillation. (T_{sub} 600°C)

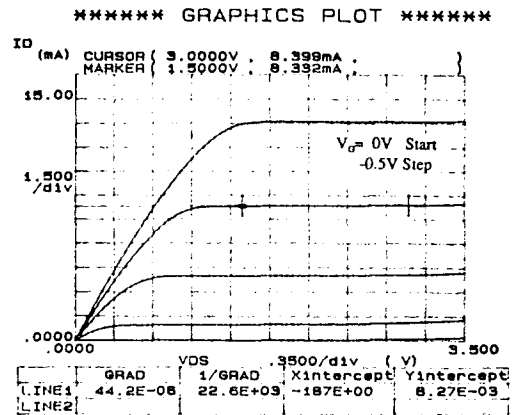


그림 11. MESFET의 전류-전압특성
(i-AlGaAs 완충층)
Fig. 11. I-V Characteristics. (i-AlGaAs buffer)

3. 소자 특성

제작된 쇼트키 다이오우드의 농도특성은 앞서 제작된 MESFET과 거의 동일한 특성을 가졌다. (그림 10) AlGaAs 전위 장벽층에 의해 자유전자의 계면확산이 감소하게 되리라는 예상과는 달리, 약간 평탄하게 나타난것은 i-AlGaAs층과 n-GaAs의 이종계면에서 생성된 결정결함에 의해 캐리어가 트랩되었기 때문이라 생각된다. MESFET(L_g = 1μm, W = 100 μm)의 D.C. 전압-전류 특성(그림 11)에서 게이트 전압이 -0.5 V일때 포화영역인 V_{DS} = 1.5 ~ 3.0 V 범위에서의 r_{DS}값은 2.26 kΩ·mm 이며, i-GaAs 완충층을 사용한 MESFET의 그것보다 약 15배가량 큰 값이다. 초고주파 대역에서의 r_{DS}값이 D.C.에서보다는 3배정도 감소된다는 것을 고려하더라도 i-GaAs 층을 완충층으로 사용하는 일반적인 MESFET보다도

IV. 결론

MESFET 박막은 MBE방법으로 최적의 성장조건 하에서 성장하였으며, 성장율은 1μm/hr 로 하였다. i-GaAs 완충층을 2μm, n형 활성층을 1500Å, n⁺ 오믹층을 500Å 을 차례로 형성한 후 MESFET을 제작하였다.

L_g = 1μm, W = 100μm인 MESFET의 I-V 특성은 V_g(부률전압) = 1 V, 224 mS/mm의 최대 변환컨덕

턴스를 가졌다. On -wafer 측정이 가능한 MESFET ($L_g = 1\mu m$, $W = 100\mu m$, 2-finger gate)의 차단 주파수가 18 GHz 로 우수한 고주파특성을 가졌다. 또한, MESFET의 출력저항 r_{DS} 특성개선을 위하여, n형 활성층과 i-GaAs층사이에 i-AlGaAs층을 삽입한 박막구조위에 MESFET을 제작한 결과, i-GaAs 완충층을 이용한 MESFET에서의 r_{DS} 값을 15배 개선시킨 $2.26 k\Omega \cdot mm$ 를 얻었다. 이러한 r_{DS} 값의 증가는 전력이득 및 f_{max} 의 증가에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

V. 감사의 글

이 연구는 과학 재단의 지원에 의해 수행되었습니다. 본 재단에 감사의 뜻을 포함합니다.

參考文獻

[1] M.Shur, "Physics of Semiconductor

Devices ", Prentice Hall, pp582-583, 1990.

[2] I.Bahl and P.Bhartia, "Microwave Solid State Circuit design", Wiley, pp883-887, 1988.

[3] 박 동화, "분자선 박막성장법을 이용한 GaAs 박막형성과 GaAs MESFET제작", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1993

[4] J.M.Golio, "Microwave MESFETs and HEMTs", Artech House, pp12, 1989.

[5] P.H.Ladbrooke, "MMIC Design GaAs FETs and HEMTs", Artech House, pp223-224, 1989.

[6] W.I.Wang, S.Judaprawira, C.E.C. Wood, and L.F.Eastman, " Molecular Beam Epitaxial GaAs- Al_xGa_{1-x}As heterostructures for MESFET applications", Appl. Phys. Lett, vol.38, pp708-710, 1981.

著 者 紹 介



郭東華(正會員)

1967年 11月 7日生. 1990年 2月 경북대학교 전자공학과 졸업(학사). 1993年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정재학중. 주관심 분야는 GaAs 고속전자소자 및 PZT, BST 고유전 박막 등임.

李熙哲(正會員) 第 31卷 A編 第 10號 參照
현재 한국과학기술원 부교수