

ECR 플라즈마와 습식 식각으로 게이트 리세스한 AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT 소자의 전기적 특성연구

논문
11-5-5

A Study of Electrical Properties for AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT's Recessed by ECR Plasma and Wet Etching

이철욱*, 배인호*, 최현태**, 이진희**, 윤형섭**, 박병선**, 박철순**

(Chul-Wook Lee, In-Ho Bae, Hyun-Tae Choi, Jin-Hee Lee, Hyung-Sup Yoon, Byung-Sun Park, Chul-Soon Park)

Abstract

We studied a electrical properties in GaAs/AlGaAs/InGaAs pseudomorphic high electron mobility transistors(PHEMT's) recessed by electron cyclotron resonance(ECR) plasma and wet etching. Using the NH₄OH solution, a nonvolatile AlF₃ layer formed on AlGaAs surface after selective gate recess is effectively eliminated. Also, we controlled threshold voltage(V_{th}) using H₃PO₄ etchant. We have fabricated a device with 540 mS/mm maximum transconductance and -0.2 V threshold voltage by using NH₄OH and H₃PO₄ dip after ECR gate recessing. In a 2-finger GaAs PHEMT with a gate length of 0.2 μm and width of 100 μm, a currnt gain of 15 dB at 10 GHz and a maximum cutoff frequency of 58.9 GHz have been obtained from the measurement of current gain as a function of frequency at 12 mA I_{ds} and 2 V souce-drain voltage.

Key words(중요용어) : HEMT(고전자 이동도 트랜지스터), ECR(전자사이클로트론 공명), Recess(리세스), Selective(식각 선택비)

1. 서 론

High electron mobility transistor(HEMT)는 높은 주파수에서 저 잡음 특성과 동작속도 특성이 우수하여 monolithic microwave integrated circuit(MMIC) 제작에 각광을 받고 있는 소자이다.^{1,2)} 이러한 HEMT 소자의 특성을 향상시키기 위해서는 정확한 게이트 리세스 공정이 필수적이다. 최근에는 낮은 self-bias에서 높은 농도의 플라즈마를 이용한 여러 가지 방전들이 고안되었으며³⁻⁵⁾ 이들 중에서 두드러진 방법 중의 하나가 플라즈마 내의 자유전자가 마이크로 파의 에너지를 흡수하는 동안 자기력선 부근의 궤도를 돌게하는 electron cyclotron resonance(ECR) 방전을 이용하는 것이다. 일반적으로

로 ECR에서는 식각되는 시료에 도달하는 이온들에너지는 일반적으로 15 eV 이하이고, 이 값은 대부분의 반도체에서 격자 손상을 가져올 수 있는 임계값 이하이기 때문에 ECR에 의한 건식 식각은 일반적인 RIE에 의한 식각보다 훨씬 적은 격자손상을 가져올 수 있다. ECR 플라즈마에 의한 HEMT 소자의 게이트 리세스 식각시 가장 중요하게 고려할 점은 소자 표면의 손상을 최소화 하면서 AlGaAs에 대한 GaAs의 식각률을 최대로 얻는 것이다. 즉 HEMT 소자의 웨이퍼 내에서의 균일도를 개선하기 위하여 GaAs 층을 선택적으로 식각하는 것이다. HEMT 소자의 선택적 게이트 리세스 공정에 사용된 가스는 주로 CCl₂F₂이었으나 최근에는 BCl₃/SF₆ 또는 SiCl₄/SF₆를 주로 사용한다. BCl₃/SF₆ 또는 SiCl₄/SF₆를 사용할 경우 첫째는 F와 Cl의 비를 임의로 조절할 수 있고, 둘째로 지구 오존층에 대한 영향을 줄일 수 있다는 장점이 있다. BCl₃/SF₆를 사용하는 경우 높은 선택적 식각 비를 얻을 수 있지만 쇼트키 층인 AlGaAs의 표면에 비휘발성 물질인

* : 영남대학교

** : 한국전자통신연구원

(대전시 유성우체국 사서함 106호, Fax: 053-814-6141)

E-mail : cwlee@physics.yeungnam.ac.kr)

1998년 2월 6일 접수, 1998년 4월 3일 심사완료

AlF₃ 층이 형성되는 것으로 알려져 있다.^{8,9)} 이렇게 형성된 AlF₃ 층 위에 게이트가 만들어지면 소스드레인 전류가 감소될 뿐만 아니라, 게이트의 누설 전류가 증가되므로 AlF₃ 층을 제거 시켜주어야 한다.

본 연구에서는 BCl₃/SF₆를 사용하여 AlGaAs에 대한 GaAs의 선택적 식각비를 100 이상의 조건을 추출하였다. ECR에 의해 게이트 리세스된 pseudomorphic HEMT(PHEMT) 소자를 NH₄OH:10H₂O와 4H₃PO₄:1H₂O₂:180H₂O 용액에 담근 뒤 시간 변화에 따른 누설 전류, 상호 전달 전도도(g_m), 문턱 전압(V_{th}), 드레인 포화 전류(I_{ds})를 조사함으로써 건식식각 후 습식식각을 다시 하였을 때 HEMT 소자의 전기적 특성에 대한 영향을 조사하였다.

2. 실험

에피층 구조의 성장은 분자선 에피택시법으로 우선 반질연성 GaAs 기판 위에 6000 Å 두께의 undoped GaAs 완충층과 130 Å의 strained InGaAs 채널 층을 성장하고, 캐리어 공급원으로는 면도핑된 2DEG 층을 사용하였다. 쇼트키 게이트 층은 undoped AlGaAs 층을 사용하였고 오믹 접촉저항을 낮추기 위해서 5.0×10¹⁸/cm³으로 높게 도핑한 GaAs cap 층을 차례로 성장하였다. 그림 1은 PHEMT 에피 구조를 나타낸다. Hall 측정 결과 상온에서 2DEG 층의 캐리어 농도는 2.21×10¹²/cm²이고 전자의 이동도는 6100 cm²/V·sec이었다. 본 연구에서 제작한 PHEMT는 게이트 길이가 0.2 μm이고 폭이 100 μm(50 μm×2)인 P-형으로 구성되었고 소스와 드레인 사이의 간격은 3 μm이고 소스와 게이트 사이의 간격은 1 μm이다. PHEMT 소자의 제작은 소자 격리, 오믹 접촉 전극 형성, 게이트 패턴 형성, 쇼트키 게이트 전극 형성 등의 공정 순서로 진행하였다. 활성 영역을 정의한 후 GaAs cap 층과 2DEG 층 아래까지 메사 식각하였고 오믹 접촉 공정은 Ni/Ge/Au/Ti/Au계 오믹 금속을 전자빔 증착기에 의해 증착하고 RTA로 N₂ 분위기에서 390 °C에서 열처리하였다.

게이트 리세스 식각은 electron cyclotron resonance(ECR, IPL 3000 D/L) 장치를 사용하여 수행하였다. BCl₃/SF₆가스의 유량비를 조절하여 ECR 플라즈마로 에칭한 결과 GaAs의 경우는 에칭률은 약 290 Å/min.이고 AlGaAs의 경우는 <2.5 Å/min.으로서 AlGaAs에 대한 GaAs의 선택적 식

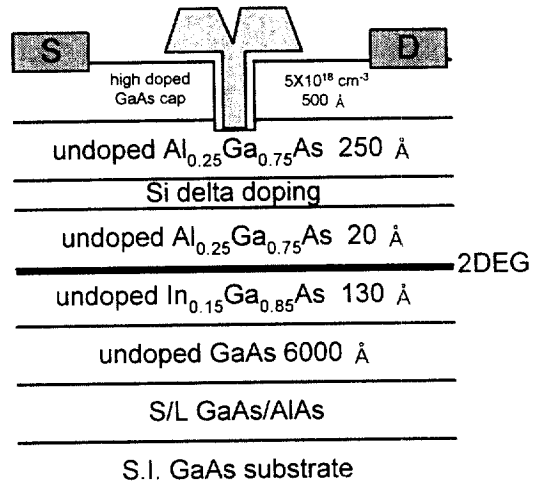


그림 1. PHEMT 소자의 단면 구조

Fig. 1. Cross sectional structure of PHEMT.

각비가 100 이상의 값을 얻었다. 게이트 리세스 후 AlGaAs 표면에 남아 있는 잔유물에 의한 누설전류를 줄이기 위해 NH₄OH와 H₃PO₄ 용액에 각각 담근 시간을 변화시키고 난 후 전자빔 증착기를 사용하여 Ti/Pt/Au를 증착한 후 리프트 오프하여 Schottky 전극을 형성하였다. DC 측정은 HP 4145 semiconductor parameter analyzer를 사용하여 상호 전달 전도도(g_m), 문턱 전압(V_{th}), 드레인 포화 전류(I_{ds}) 등을 측정하였고, HEMT 소자에서 게이트와 드레인 전극 사이에 5V의 역바이어스 전압을 가하여 게이트 누설전류를 측정하였다. 또한HP8510B network analyzer를 사용하여 측정한 S파라미터로부터 차단 주파수를 구하였다.

3. 결과 및 논의

3-1 상호 전달 전도도 측정

그림 2는 BCl₃/SF₆ 가스를 사용하여 게이트 리세스 한 PHEMT 소자를 NH₄OH 용액과 H₃PO₄ 용액에 담근 시간에 따라 상호 전달 전도도를 측정하여 최대값(g_{m,max})을 나타낸 것이다. 이때 상호 전달 전도도는 드레인과 소스 사이에 3 V의 전압을 인가하고 게이트와 소스 사이의 전압을 -2 V에서 0.1 V까지 변화시켜 측정하였다. 그림에서와 같이 ECR에 의해 리세스된 소자에서 최대 상호 전달전도도의 값이 약 480 mS/mm에서 NH₄OH 용액에 20초 동안 담근 소자에서는 약 560 mS/mm 까지 증가하였

다. 이는 선택적 식각에서 AlGaAs 표면 위에 형성되는 AlF_3 층이 NH_4OH 용액에 의해 제거되었기 때문이다.⁹⁾ 상호 전달 전도도의 값은 채널과 게이트 사이의 거리에 반비례 하므로[10] AlF_3 층이 제거되면 그 두께만큼 거리가 감소하므로 상호 전달 전도도의 값이 증가하는 것이다. 한편 20초 이상 담근 소자에서 최대 상호 전달전도도의 값은 감소하는데 이것은 용액이 게이트 패턴의 photoresist 밑으로 파고 들어가 리세스된 게이트 영역을 확장시켰기 때문이며 40 초 동안 담근 소자의 경우 게이트 패턴이 심하게 손상되어 트랜지스터의 동작 특성이 나빠졌기 때문이다. 또한 H_3PO_4 용액에 담근 소자의 경우 20초까지 상호 전달 전도도의 값이 거의 변하지 않음을 알 수 있고 20초 이상에서는 급격히 값이 증가함을 볼 수 있다. 이는 H_3PO_4 용액으로는 AlGaAs 표면 위에 형성되는 AlF_3 층을 효과적으로 제거하지 못한다는 것을 나타낸다.

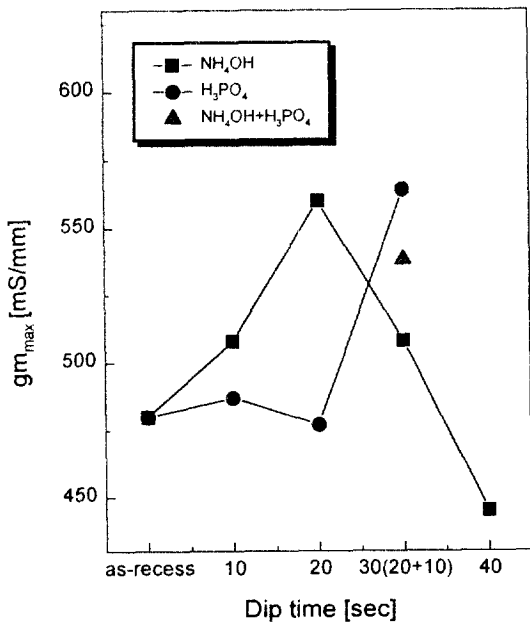


그림 2. Dip time 변화에 따른 최대 상호 전달전도도.
Fig. 2. The maximum transconductance vs dip time variation.

3-2 문턱전압 측정

그림 3은 게이트 리세스한 시료를 각 용액에 담근 뒤 시간에 따른 문턱 전압(V_{th})의 변화를 나타낸

것이다. NH_4OH 용액에 담근 시료의 경우 리세스 후 용액에 담그지 않은 시료에 비해 문턱 전압이 증가하고 담근 시간에 대해서는 거의 일정한 값을 가진다. 문턱 전압은 채널과 게이트 사이의 거리에 비례하므로[10] AlF_3 가 제거되면 그 두께 만큼 문턱 전압의 감소를 가져올 것이다. H_3PO_4 용액에 담근 시료의 경우는 문턱 전압의 값이 계속 증가하다가 20초 이상에서 급격하게 증가하여 양의 값으로 되었다. 이와같이 상호전달 전도도의 값이 급격히 증가하는 것은 채널과 게이트 사이의 거리가 줄어들었기 때문이며 문턱 전압의 값이 음에서 양으로 증가되는 것으로 보아 20초 이상 담근 소자 enhanced field effect transistor(EFET)으로 그 특성이 바뀔 수 있다.

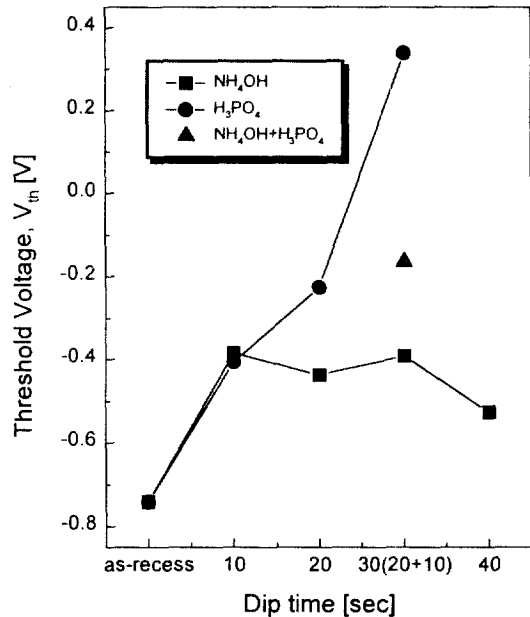


그림 3. Dip time 변화에 따른 V_{th} .
Fig. 3. Threshold voltage vs dip time variation.

그림 2와 3에서 삼각형으로 나타낸 값은 리세스한 시료를 AlF_3 층을 제거 시키기 위해서 NH_4OH 용액에 20초간 담근 뒤 문턱 전압 조정을 위해 H_3PO_4 용액에 10초간 담근 뒤 제작한 소자의 상호 전달 전도도와 문턱 전압을 측정된 결과이다. 상호 전달 전도도의 값은 NH_4OH 용액에 20초간 담근 시료보다는 다소 감소하였으나 H_3PO_4 용액에 20초간 담근 시료보다는 상당히 증가되었고, 문턱전압은

NH₄OH 용액에 20초간 담근 시료보다는 증가되었고 H₃PO₄ 용액에 20초간 담근 시료와 비슷한 값을 보였다. 따라서 게이트 리세스 후 NH₄OH 용액에 20초간 담그고 다시 H₃PO₄에 10초간 담근 소자의 경우 HEMT 소자의 특성을 유지하면서 최대 상호 전달전도도가 약 540 mS/mm이고 문턱전압이 약 -0.2 V인 값을 얻을 수 있었다.

3-3 게이트 누설전류 측정

그림 4는 BCl₃/SF₆ 가스를 사용하여 게이트 리세스 한 PHEMT 소자를 NH₄OH 용액과 H₃PO₄ 용액에 담근 시간에 따라 게이트의 누설 전류를 측정 한 것이다. 그림에서와 같이 NH₄OH 용액에 담근 시료의 경우 누설 전류의 변화가 거의 없는 반면, H₃PO₄ 용액에 담근 시료의 경우 시간에 따라 누설 전류가 증가하고 있다. 이것은 앞의 결과와 마찬가지로 H₃PO₄ 용액은 쇼트키 층에 형성된 AlF₃를 제거 시키지 못한다는 것을 확인시켜 준 것이다. 이러한 누설 전류는 FET의 상호 전달 전도도를 감소시키고 noise 동작 특성을 나쁘게 한다고 알려져 있다.[11] 또한 NH₄OH 용액에 20초간 담근 뒤 H₃PO₄ 용액으로 10초간 에칭한 시료의 경우 누설 전류가 가장 적은 값을 보였다.

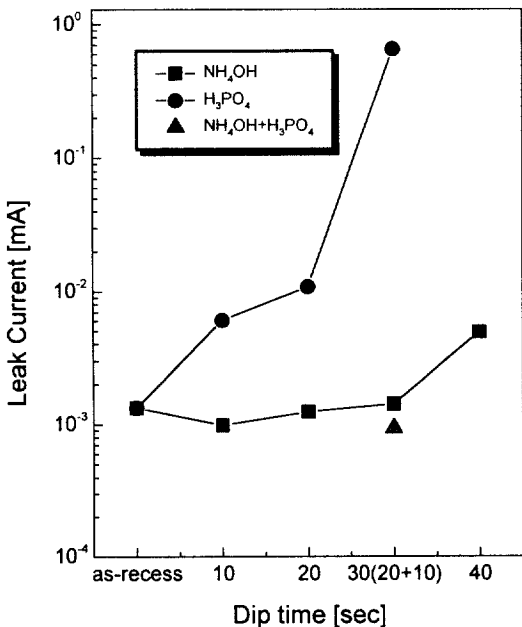


그림 4. Dip time 변화에 따른 누설전류.
Fig. 4. The leakage current vs dip time variation.

3-4 드레인 포화전류 측정

그림 5는 게이트 리세스 한 시료를 NH₄OH와 H₃PO₄ 용액에 담근 뒤 제작한 소자의 드레인 포화 전류를 측정 한 것이다. NH₄OH 용액에만 담근 소자의 경우 ECR에 의해 리세스된 값 보다 조금 증가하고, 담근 시간에 따라서는 거의 변화가 없었다. 이것으로 보아 리세스 후 표면에 형성된 AlF₃는 NH₄OH 용액에 의해 효과적으로 제거되어 진다고 생각된다. H₃PO₄ 용액에 담근 시료의 경우 20초 이상에서 드레인 포화 전류의 값이 크게 감소함을 보였다. 이것은 앞에서 설명한 것과 같이 소자의 특성이 EFET으로 바뀌었다는 것을 뒷받침하고 있다.

이상과 같은 실험 결과로부터 ECR 플라즈마에 의한 선택적 게이트 리세스 후 쇼트키 층에 형성되는 AlF₃를 제거하는 과정은 NH₄OH 용액으로 수행하고, H₃PO₄ 용액으로는 문턱 전압을 미세하게 조정하는 공정에 적용하는 것이 바람직하다.

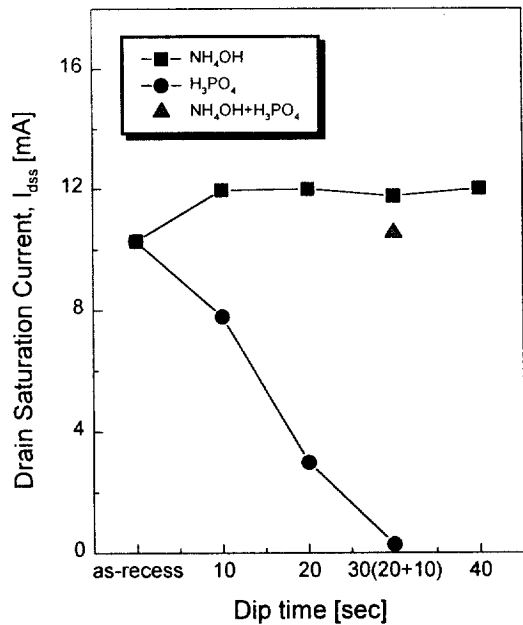


그림 5. Dip time 변화에 따른 드레인 포화 전류.
Fig. 5. Drain saturation current vs dip time variation.

3-5 차단 주파수 측정

그림 6은 게이트 길이가 0.2 μm이고 폭이 100 μm 인 2-finger GaAs PHEMT 소자를 ECR 플라즈마를 이용하여 게이트 리세스를 수행하고 NH₄OH 용

액에 20초 동안 담근 뒤 다시 H_3PO_4 용액에 10초 동안 담구어 제작한 소자의 12 mA의 I_{dss} 와 2V의 소스드레인 전압의 조건에서 측정된 주파수에 따른 전류 이득 h21곡선을 나타낸 것이다. 이 그림에서 h21을 20 dB/decade 기울기로 외삽하여 구한 차단 주파수는 58.9 GHz으로 나타났다.

다. 또한 게이트 길이가 0.2 μm 이고 폭이 100 μm 인 2-finger GaAs PHEMT 소자의 경우 12 mA의 I_{dss} 와 2V의 소스드레인 전압의 조건에서 측정된 주파수에 따른 전류 이득 곡선으로부터 10 GHz에서 구한 전류 이득이 15 dB이고 차단 주파수가 58.9 GHz이다.

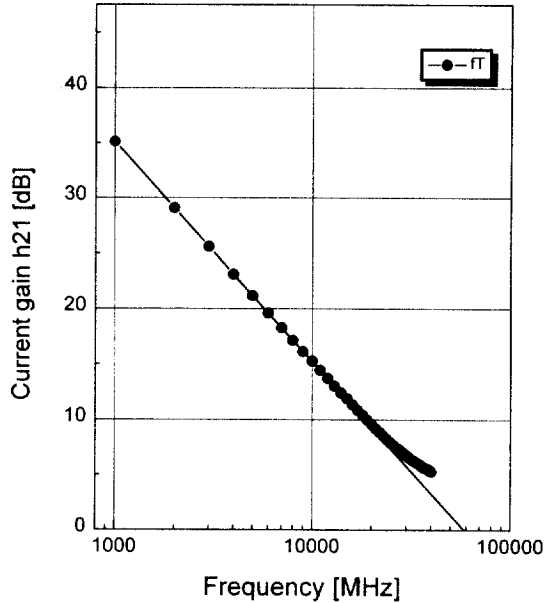


그림 6. 주파수에 따른 이득 곡선, h21.

Fig. 6. Typical current gain, h21, as a function of frequency.

4. 결 론

ECR 플라즈마와 습식 식각을 이용하여 선택적으로 게이트 리세스한 PHEMT 소자의 전기적 특성에 관한 연구를 수행하였다. ECR 게이트 리세스에 사용된 가스는 BCl_3/SF_6 이고 GaAs에 대한 AlGaAs의 선택적 식각비는 100 이상이다. 리세스 후 AlGaAs 표면에 형성되는 비휘발성 물질인 AlF_3 는 NH_4OH 용액을 이용하여 효과적으로 제거할 수 있고, H_3PO_4 용액은 문턱전압을 조절하는데 이용할 수 있다. ECR에 의해 게이트 리세스한 소자를 NH_4OH 용액에 20초간 담근 뒤 다시 H_3PO_4 용액에 10초간 담구어 제작한 소자의 경우 최대 상호 전달전도도가 약 540 mS/mm이고 문턱전압이 -0.2 V이며 비교적 누설전류가 적은 양호한 소자를 얻을 수 있었

참 고 문 헌

1. R. Plana, L. Escotte, O. Llopis, H. Amine, T. Parra, M. Gayral, and J. Graffeuil, "Noise in AlGaAs/InGaAs/GaAs Pseudomorphic HEMTs from 10 Hz to 18 GHz", *IEEE Trans. Electron Devices*, **40**, pp. 852-858, 1993.
2. F. Ren, S. J. Pearton, C. R. Abernathy, C. S. Wu, M. Hu, C. K. Pao, D. C. Wang, "0.25 μm Pseudomorphic HEMTs Processed with Damage-Free Dry-Etch Gate-Recess Technology", *IEEE Trans. Electron Devices*, **39**, pp. 2701-2706, 1992.
3. K. Suzuki, S. Okudaira, N. Sakudo, and I. Kanomaka, "Microwave Plasma Etching", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **16**, 1979, 1977.
4. M. Matsuoka and K. Ono, "Low-energy ion extended with small dispersion from an electron cyclotron resonance microwave plasma stream", *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1864, 1987.
5. Y. Arnal, J. Pelletier, C. Pomot, B. Petti, and A. Durandet, "Plasma etching in magnetic multipole microwave discharge", *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 132, 1984.
6. J. Asmussen, "Electron cyclotron resonance microwave discharges for etching and thin-film deposition", *J. Vac. Sci. Technol.*, **A 7**, 883, 1989.
7. J. W. Wu, C. Y. Chang, E. Y. Chang, S. H. Chang, and K. C. Lin, "Reactive Ion Etching of GaInP, GaAs, and AlGaAs", *J. Electrochem. Soc.*, **142**, 1340, 1995.
8. K. L. Seaward, N. J. Moll, and D. J. Coulman, "An analytical study of etch and etch-stop reactions for GaAs on AlGaAs in CCl_2F_2 plasma", *J. Appl. Phys.*, **61**, 2358, 1987.
9. D. G. Balleger, S. Agarwala, M. Tong, K.

- Nummila, A. A. Ketterson, I. Adesida, J. Griffin, and M. Spencer, "Selective reactive ion etching in $\text{SiCl}_4/\text{SiF}_4$ plasma for gate recess in GaAs/AlGaAs modulation-doped field effect transistors", *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 11**, pp. 618-627, 1993.
10. N. Moll, M. R. Hueschen, and A. F. Colbie, "Pulse-Doped AlGaAs/InGaAs Pseudomorphic MODFET's", *IEEE Trans. Electron Devices*, **35(7)**, pp. 879-886.
11. D. C. W. Lo, Y. K. Chung, and S. R. Forrest, "The tunneling current in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ junction field-effect transistors", *Appl. Phys. Lett.*, **60(13)**, pp. 1588-1590