

100 nm T-gate의 InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT 소자 제작 및 특성에 관한 연구

김형상^{1*} · 신동훈² · 김순구² · 김형배¹ · 임현식³ · 김현정³

¹동국대학교 물리학과, 서울 100-715

²동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터, 서울 100-715

³동국대학교 반도체과학과, 서울 100-715

(2006년 10월 30일 받음)

본 논문에서는 100 nm 게이트 길이를 갖는 InGaAs/InAlAs/GaAs MHEMT(metamorphic high electron mobility transistors)의 DC와 RF 특성을 분석 하였다. 이중 노광 방법으로 ZEP520/P(MMA-MAA)/PMMA 3층 구조의 레지스터와 게이트 길이 100 nm인 T-게이트를 제작하였다. 게이트의 단위 폭이 70 μm 인 2개의 게이트와 길이가 100 nm로 제작된 MHEMT를 DC 및 RF특성을 조사하였다. 최대 드레인 전류 밀도는 465 mA/mm, 상호전달 컨덕턴스는 844 mS/mm이, RF 측정으로부터 전류 이득 차단 주파수는 192 GHz와 최대 진동주파수 310 GHz인 특성을 보였다

주제어 : MHEMT, T-게이트, e-beam 장치, ZEP520, 차단주파수

I. 서 론

InP 기판위에 InAlAs/InGaAs를 사용하는 고전자 이동도 트랜지스터 (HEMT: High Electron Mobility Transistor)는 300 GHz 이상의 차단 주파수를 갖는 우수한 초고주파 특성을 보여 주고 있다[1]. 우수한 소자 특성을 갖는 InP 기반의 HEMT 구조는 마이크로파나 밀리미터파를 이용하는 위성 방송 수신 장치 등에 응용되고 있다[2]-[5]. 그러나 InP 기반의 웨이퍼는 GaAs 기반의 웨이퍼와 비교하여 보면 역학적으로 부서지기 쉬운 성질과 높은 재료비용과 같은 결정적인 단점을 가지고 있어, 기존의 GaAs 기판위에 성장시킬 수 있는 metamorphic HEMT가 최근 활발히 연구되고 있다[6]. 또 MHEMT의 경우 버퍼 층에 40% 이상 인듐의 mole fraction을 주어 성장시켜 기존의 GaAs 기판위에서 InP 계열과 같은 InGaAs/InAlAs 부정합 구조를 성장시킬 수 있다. MHEMT의 장점은 GaAs 기판에서 성장이 가능하기 때문에 InP HEMT에 비해 상대적으로 가격이 저렴하고, InP와 같은 부정합 구조를 갖기 때문에 대등한 성능을 갖는 결과들이 발표되고 있으며[7], 높은 온도에서 동작하는 특성 [8], surface passivation [9]과 inversion-step InAlAs metamorphic buffer를 가진 $\text{In}_{0.45}\text{Al}_{0.55}\text{As}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ MHEMT의 특성에 관

하여 발표 되었다[10].

본 논문에서는 100 nm길이의 T-게이트를 갖는 GaAs 기반의 InGaAs/InAlAs MHEMT를 제작하여 특성에 관하여 조사하였다.

II. MHEMT 구조와 제작

이중 실리콘 델타 도핑을 한 GaAs 기반의 에피 구조는 4 인치 semi-insulating GaAs(100) 기판위에 molecular beam epitaxy에 의하여 성장 하였다. 본 연구에서 사용한 MHEMT의 구조는 그림 1에서 보여 주고 있다. 소스-드레인 간의 ohmic 접촉을 위해 15 nm 두께의 $n^+\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 레이어를 성장시켰다. 활성 층은 15 nm 두께의 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 채널 층과 Si로 도핑된 이중 델타 도핑 층으로 구성되어 있으며, 버퍼 층은 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 버퍼 레이어를 0에서 50 %까지 indium의 mole fraction을 변화시키며 semi-insulating GaAs 기판위에 1 μm 의 두께로 성장시켰다. 또한 400 nm 두께의 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 버퍼를 활성 층을 보호하기 위하여 성장시켰다. 설계된 에피 층은 측정 결과 $3.4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 의 electron sheet density와 9700 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ 를 나타내었다.

T 형태의 게이트는 짧은 게이트 길이를 가지는 소자

* [전자우편] hskim@dongguk.edu

In _{0.53} Ga _{0.47} As	Capping layer	15 nm
In _{0.52} Al _{0.48} As	Schottky layer	10 nm
Si Δ doping 4.5×10 ¹² /cm ²		
In _{0.52} Al _{0.48} As	space layer	3 nm
In _{0.53} Al _{0.47} As	channel layer	15 nm
In _{0.52} Al _{0.48} As	space layer	4 nm
Si Δ doping 4.5×10 ¹² /cm ²		
In _{0.52} Al _{0.48} As	Buffer layer	400 nm
In _x Al _{1-x} As _(x=0-0.5)	Schottky layer	1000 nm
Semi-insulating GaAs substrate		

그림 1. InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT (MHEMT) 에피 구조의 개략적인 단면도

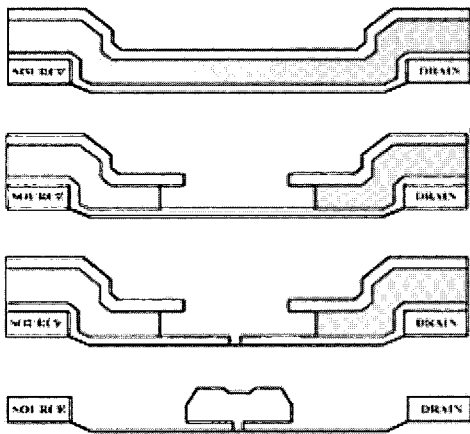


그림 2. T 게이트 제작을 위한 공정 흐름도 (a) 레지스터 코팅 및 베이킹, (b) 첫 번째 노광과 현상, (c) 두 번째 노광과 현상, (d) 금속증착과 리프트 오프 과정.

를 위해 게이트 저항을 최소화하기 위하여 요구된다. 재현성 있는 100 nm T-게이트 패턴을 구현하기 위하여(ZEP 520 : DCB = 1.5 : 1)/P(MMA-MAA)/PMMA950k (1500/7000/2000 Å)의 3층 레지스트 구조를 사용하였다. ZEP520 레지스트는 PMMA 레지스트에 비하여 우수한 해상도를 제공하고 공정 허용도 특성이 우수하며 해상도의 손실 없이 직사각형 형태의 프로파일을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 3층 레지스트 구조를 사용하여 T-게이트를 형성하는 과정을 그림 2에 나타내었다[11]. T 형태의 프로파일을 형성하기 위하여 게이트

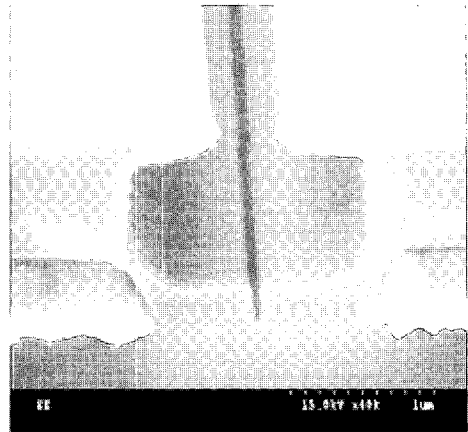


그림 3. 100 nm T-게이트 패턴의 단면 SEM 사진



그림 4. Si₃N₄로 passivation 한 후에 제작된 100 nm T-게이트 단면 SEM 사진.

head와 게이트 foot을 형성하기 위한 큰 sensitivity비를 가지고 있는 레지스트를 사용해야 한다. 우리는 실험적으로 50 kV에서는 게이트 head를 위해 50 μC/cm²과 게이트 foot를 위해 도즈량은 550 μC/cm² 정도가 적당하다는 결과를 얻었다. 게이트 head의 형성을 위한 첫 번째 노광 후에 PMMA950k 층은 MCB(monochlorobenzene)를 사용하여 15초 동안 현상하였고, 다음으로 P(MMA-MAA) 층은 methanol과 IPA을 1 : 1로 혼합한 용액을 사용하여 28초 동안 현상 하였다. 게이트 foot 패턴을 위한 두 번째 노광 후에 맨 아래 ZEP520 레지스터 층은 MIBK와 IPA을 1 : 3으로 혼합한 용액을 사용하여 2분 동안 현상하였다. 그림 3은 100 nm 게이트 길이를 갖는 T 형태의 profile을 보여 주고 있다. 소자 사이를 전기적으로 분리하기 위하여 인산계열의 식각 용액 (H₃PO₄/H₂O₂/H₂O = 1 : 1 : 60)을 사용하여

2000 Å 식각하였다. 소스와 드레인 전극의 접촉저항을 감소시키기 위한 오믹 공정은 AuGe/Ni/Au를 1350/280/1600 Å 증착하고 RTP 장비를 사용하여 300°C에서 120초 동안 열처리하였다. 이때의 비저항은 $1 \sim 2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 이다.

게이트 리세스 식각은 PH가 조정된 호박산과 과산화수소의 혼합 용액을 사용하였다. 이 때 InAlAs에 대한 InGaAs의 선택적 식각 비율은 100 이상이다. 게이트 recess 식각 후에 100 nm T-게이트 패턴을 앞부분에서 묘사한 방법을 사용하여 형성하였다. Ti/Au (500/4500 Å) 게이트 금속을 형성한 후에 PECVD를 사용하여 소자의 passivation을 위하여 800 Å Si_3N_4 을 증착하였다. 그림 4에 passivation 한 후에 제작된 T-게이트의 단면 SEM 사진을 나타내었다.

III. 소자의 측정 및 특성

100 nm의 게이트 길이를 갖는 $70 \times 2\text{-}\mu\text{m}$ MHEMT는 DC, RF 측정에 의해서 소자의 특성을 조사 하였다. I-V와 g_m 과 같은 DC 특성은 HP4156A DC parameter analyzer를 사용하여 측정 하였다. 제작된 MHEMT의 특성 측정 결과 단위 게이트 폭이 $70 \mu\text{m}$ 이고 핑거수가 2개인 소자의 전류 전압 특성 및 전달 컨덕턴스 특성으로 핀치 오프 전압은 -0.8V , 드레인 전류밀도는 $V_{gs} = 0\text{V}$ 에서 465 mA/mm 이며, 최대 전달컨덕턴스는 $V_{ds} = 1.4\text{ V}$ 및 $V_{gs} = -0.1\text{ V}$ 에서 844 mS/mm 를 얻었으며, 이를 그림 5와 6에 나타내었다.

RF측정은 HP 8510C vector network analyzer를 이용하여 $0.5 \sim 50\text{ GHz}$ 의 주파수 범위에서 측정 하였다. RF 측정에 적용된 드레인과 게이트 바이어스 조건은 $V_{ds} = 1.4\text{V}$ 와 $V_{gs} = -0.1\text{ V}$ 이다.

그림 7은 100 nm T 게이트 MHEMT의 RF 특성, maximum stable gain (MSG)와 전류 이득 $|h_{21}|$ 의 측정 결과를 보여 주고 있다. 최대 전달컨덕턴스에서 바이어스 된 소자에서 측정된 MSG와 전류 이득의 외삽법(extrapolation)으로부터 얻어진 f_T 는 192 GHz 이며 f_{max} 는 310 GHz 를 얻었다.

V. 결 론

본 논문에서는 ZEP520/P(MMA-MAA)/PMMA 3층

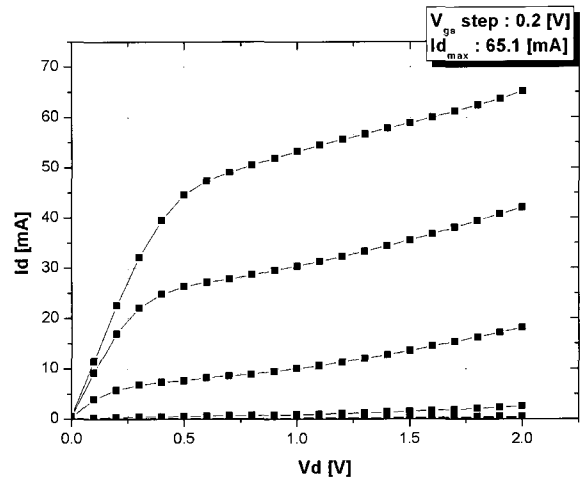


그림 5. 제작된 100 nm MHEMTs의 I-V 특성(V_{gs} @ top curve:0V bottom curve:-0.8V).

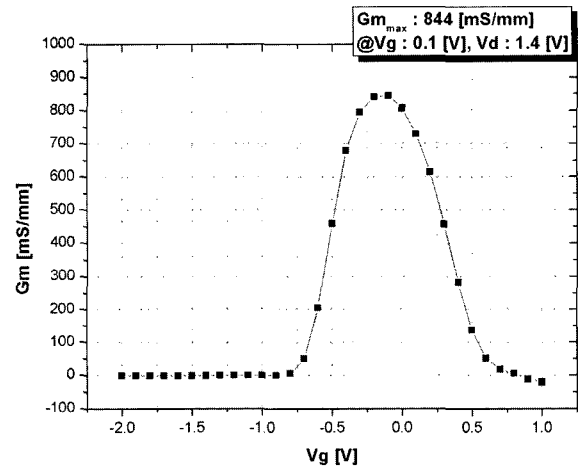


그림 6. 제작된 100 nm MHEMTs Transconductance

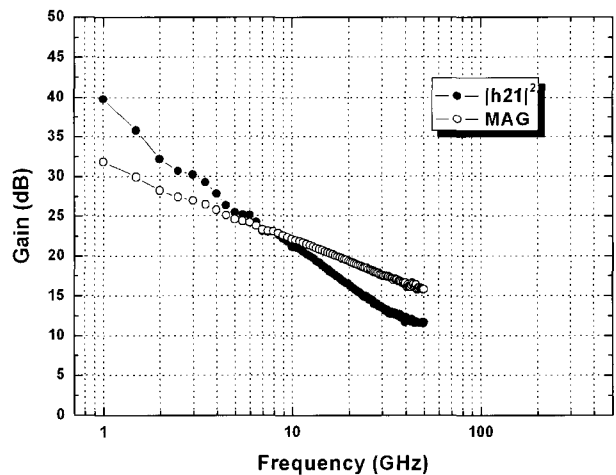


그림 7. 제작된 100 nm MHEMTs을 위한 주파수의 함수로서의 S_{21} 이득과 $|h_{21}|^2$ 특성.

레지스터 구조를 사용하여 이중 노광 방식의 전자 묘화 기술을 이용한 T-게이트 공정, 오믹 공정, air-bridge 공정 등을 이용하여 mm파 대역의 MMIC에 응용 가능한 MHEMT를 제작한 후 DC 및 RF 특성을 측정하고 분석하였다.

단위 게이트폭이 70 μm 이고 핑거수가 2개인 MHEMT의 경우, 편치오프 전압은 -0.8 V , 드레인 전류밀도는 $V_{gs} = 0\text{ V}$ 일 때 465 mA/mm와 전달 컨덕턴스는 844 mS/mm를 얻었다. MHEMT 소자의 RF 특성은 $f_T = 192\text{ GHz}$ 및 $f_{max} = 310\text{ GHz}$ 의 매우 우수한 결과를 얻었다.

이상의 결과로부터 GaAs에 기반을 둔 MHEMT를 제작하면 경제적 혹은 공정상으로 간편하면서도 InP를 기반의 HEMT 소자와 특성이 비슷한 소자를 얻을 수 있다는 결론을 얻었다[12].

감사의 글

“이 연구는 2006학년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌음”

참고문헌

- [1] L. D. Nguyen, A. S. Brown, M. A. Thompson, and L. M. Jelloian, *IEEE Trans. Electron Device* **ED-39**, 2007 (1992).
- [2] P. M. Smith, S.-M. J. Liu, M.-Y. Kao, P. Ho, S. C. Wang, K. H. G. Duh, S. T. Fu, and P. C. Chao, *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.* **5**, 230 (1995).
- [3] J. H. Lee, H. T. Choi, C. W. Lee, H. S. Yoon, B. S. Park, and C. S. Park, *J. Korea Phys. Soc.* **34**, 150 (1999).
- [4] T. Enoki, M. Tonizawa, Y. Umeda, and Y., Ishii, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 798 (1994).
- [5] M. Wojtowicz, R. Lai, D. C. Streit, G. I. Ng, T. R. Block, K. L. Tan, P. H. Liu, A. K. Freudenthal and R. M. Dia, *IEEE Electron Dev. Lett.* **15**, 477 (1994).
- [6] C. S. Whelan, W. E. Hoke, R. A. McTaggart, C. P. McCarroll, and T. E. Kazior, *Proc. 12th Conf. Inp and related Mater.* **337** (2000).
- [7] C. S. Whelan, W. E. Hoke, R. A. McTaggart, S. M. Lardizabal, P. S. Lyman, P. F. Marsh, and T. E. Kazior, *IEEE Elec. Device Lett.* **21**, 5 (2000).
- [8] C. S. Lee, Y. J. Chen, W. C. Hsu, K. H. Su, J. C. Huang, and D. H. Huang, and C. L. Wu, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 223506 (2006).
- [9] H. -C. Chiu, L. -B. Chang, Y. -C. Huang, C. -W Chen, Y. -J. Li, and Y. -J. Chan, *Electrochemical and Solid State Lett.* **9**, G309 (2006).
- [10] Y. -S. Lin, B. -Y. Chen, *J. of the Electrochemical Society* **153**, G1005 (2006).
- [11] S. Kim, B. O. Lim, S. C. Kim, D-H Shin and J. K. Rhee, *Microelectronic Engineering* **63**, 417 (2002).
- [12] 김성찬, 박사학위 논문 (동국대학교, 2005), p. 46.

Study on the fabrication and the characterization of 100 nm T-gate InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMTs

H. S. Kim^{1*}, D. H. Shin², S. K. Kim², H. B. Kim¹, Hyunsik Im³, and H. J. Kim³

¹*Department of Physics, Dongguk University, Seoul 100-715*

²*MINT Dongguk University, Seoul 100-715*

³*Department of Semiconductor Science, Dongguk University, 100-715*

(Received October 13, 2006)

We present the DC and RF characteristics of 100 nm gate length InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic high electron mobility transistors (MHEMTs). We fabricated the T-gate with 100 nm foot print by using a positive resist ZEP520/P (MMA-MAA)/PMMA trilayer by double exposure method. The fabricated 100 nm MHEMT with a 70 μm unit gate width and two fingers were characterized through dc and rf measurements. The maximum drain current density of 465 mA/mm and extrinsic transconductance (g_m) of 844 mS/mm were obtained with our devices. From rf measurements, we obtained the current gain cut-off frequency (f_T) of 192 GHz, and maximum oscillation frequency (f_{max}) 310 GHz.

Keywords : MHEMT, Γ -gate, e-beam lithography, ZEP520, Cut-off frequency

*[E-mail] hskim@dongguk.edu