밀리미터파 응용을 위한 우수한 성능의 50 nm Metamorphic HEMTs High Performance 50 nm Metamorphic HEMTs for Millimeter-wave Applications

류근관*, 김성찬**

Keun-Kwan Ryu*, Sung-Chan Kim**

Abstract

We reported on a high performance InGaAs/InAlAs metamorphic HEMT with 50 nm gate length on a GaAs substrate. The fabricated 50 nm $\times$ 60 μ m MHEMT showed good DC and RF characteristics. Typical drain current density of 740 mA/mm and extrinsic transconductance(gm) of 1.02 S/mm were obtained with our devices. The current gain cut-off frequency(fT) and maximum oscillation frequency(fmax) obtained for the fabricated MHEMT device were 430 GHz and 406 GHz, respectively.)

요약

본 논문에서는 밀리미터파 응용에 사용 가능한 우수한 성능의 50 nm InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT를 구현하였다. 게이트 길이가 50 nm이며 단위 게이트 폭이 30 μ m인 2개의 게이트를 가지고 있는 MHEMT의 측정결과, 740 mA/mm의 드레인 포화 전류밀도와 1.02 S/mm의 상호전달 전도도를 얻었으며 전류이득차단주파수와 최대공진주파수는 각각 430 GHz와 406 GHz의 특성을 나타내었다.

Key words : Metamorphic HEMT, 50 nm, current gain cut-off frequency, millimeter-wave

1. 서론

최근 들어 정보량의 폭발적인 증가로 인한 주파수 자원의 고갈과 초고속·광대역 정보통신서비스에 대한 사회적 수요가 커짐에 따라 밀리미터파 대역의 주파수 자원을 이용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 밀리미터파 대역 기술은 전통적으로 군사용으로 사용되었으나 28 GHz LMDS (local multipoint distribution service), 60 GHz WLAN (wireless local area network) 등의 상업용 목적으로 확대되고 있어 대표적인 민군 겸용기술(dual-use technology)로 떠오르고 있다. 특히

W-band(75 GHz ~ 110 GHz) 대역은 신호 흡수 감쇠가 적어 77 GHz 자동차 충돌방지 시스템, 94 GHz FMCW (frequency modulation continuous wave) 레이더 시스템 등의 응용을 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 향후에는 W-band 및 D-band(110 GHz ~ 170 GHz) 대역에서의 통신 수요도 급증할 것으로 예측된다.

기존의 마이크로파 통신용 부품은 주로 GaAs 기술을 이용한 hybrid 형태였으나 최근에는 소형화, 경량화, 고 신뢰성 및 대량생산을 통한 저가격화 등의 장점 때문에 밀리미터파 단일 집적 회로(Millimeter Monolithic Integrated Circuit, MIMIC)가 핵심기술로 자리매김하고 있다. 이러한 MIMIC 소자의 핵심 능동소자로 Si계 MOSFET과 화합물 반도체 계열의 hetero-junction bipolar transistor(HBT) 및 high electron mobility transistor(HEMT)등이 활발하게 연구되고 있는데, 특히 HEMT 소자는 저 잡음성 및 우수한 초고주파 특성과 제작 공정의 상대적인 단순성에 기인하여 가장 강력한

* 국립한밭대학교 전자·제어공학과

★ 교신저자 : 김성찬, skim@hanbat.ac.kr

* 接受日:2012年 05月 21日, 修正完了日: 2012年 06月 11日
掲載確定日: 2012年 06月 12日

미래의 대안으로 부상되고 있다.

오랫동안 연구되어 왔던 GaAs 기반의 pseudomorphic HEMT는 strained nGaAs 채널(channel)층과 AlGaAs (또는 GaAs) 층과의 격자 부정합(lattice mismatch)에 기인하는 indium 농도의 제약과, 이로 인하여 채널층에서 전자 이동도(mobility)가 저하되는 문제점을 수반한다. 이를 위한 대안으로 InP 기반의 격자 정합된 (lattice-matched) HEMT가 지속적으로 연구되어 왔으며, GaAs 기반의 PHEMT와 비교하여 높은 이득 특성과 낮은 잡음 특성 및 우수한 초고주파 특성 등의 여러 장점으로 각광받고 있다. 그러나 GaAs 기반의 웨이퍼와 비교하면, InP 기반의 웨이퍼는 역학적으로 부서지기 쉽고, 재료비용이 비싸며 공정하기에 어려워 대량생산이 어렵다는 결정적 단점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위하여 GaAs 기판위에 metamorphic 버퍼(buffer)층을 적용하여 InP의 에피층을 사용하는 InGaAs/InAlAs/GaAs MHEMT가 제안되었다^[1-2]. 최근 들어 InP 기반 HEMT의 우수한 소자특성과 GaAs 기반 HEMT의 공정 용이성 등 각기 소자들의 장점만을 취하는 MHEMT에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 밀리미터파 응용에 사용 가능한 GaAs 기반의 InGaAs/InAlAs MHEMT를 구현하고 그 특성에 관하여 제시한다.

II. MHEMT 설계 및 제작

50 nm 길이의 게이트를 갖는 MHEMT를 제작하기 위하여 반절연성(semi-insulating) GaAs 기판위에 분자선 에피택시(MBE, molecular beam epitaxy) 방식으로 성장된 이중 이중접합(double heterojunction) 구조를 갖는 에피 구조를 사용하였다. 고농도 InGaAs 채널층과 정합 상태를 갖는 에피를 GaAs 기판에 형성시키고 버퍼층에서 발생하는 전위결함(dislocation)이 소자 층까지 전파되는 것을 방지하기 위하여, InAlAs를 사용하며 indium 비율이 0.01부터 0.5까지 변화하는 inverse step graded metamorphic 버퍼층을 적용하였다. 채널층에서의 indium 비율은 0.53 이다. 상온에서의 2-DEG층의 carrier 농도는 $3.36 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 이고 이동도는 9070 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이었다. 그림 1에 MHEMT 제작에 사용된 에피층의 구조를 나타내었다.

MHEMT의 제작은 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터의 50nm-standard-process를 사용하였다. 소자의 제작은 메사(mesa) 공정, 소스/드레인 오믹(ohmic) 공정,

In_{0.53}Ga_{0.47}As	Capping layer	15 nm
In_{0.52}Al_{0.48}As	Schottky layer	10 nm
Si planar doping $4.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$		
In_{0.52}Al_{0.48}As	Spacer layer	3 nm
In_{0.53}Ga_{0.47}As	Channel layer	15 nm
In_{0.52}Al_{0.48}As	Spacer layer	4 nm
Si planar doping $1.3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$		
In_{0.52}Al_{0.48}As	Buffer layer	400 nm
In_xAl_{1-x}As (x=0~0.5)	Grade Buffer layer	1000 nm
Semi-insulating GaAs substrate		

Fig. 1. Schematic cross-section of InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT(MHEMT) epitaxial structure

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

게이트 공정, Si₃N₄ 적층 공정 순으로 진행되었다. 소자 사이를 전기적으로 분리시키기 위한 메사공정은 인산계열의 식각용액(H₃PO₄/H₂O₂/H₂O)을 사용하였으며 소스와 드레인 전극의 접촉저항을 감소시키기 위한 오믹공정은 AuGe/Ni/Au를 1350/280/1600 Å 증착하고 300°C에서 120초 동안 열처리하였다. TLM(transmission line method) 방법을 사용하여 측정된 일반적인 접촉 비저항은 $2 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$ 이었다. 게이트 패턴의 형성은 일반적으로 많이 사용되는 이중 전자빔 노광방법을 사용하였다. 재현성 있는 50 nm T-게이트 패턴을 구현하기 위하여 감광도가 서로 다른 ZEP520(P(MMA-MAA)/PMMA950k(1500/7000/2000 Å)의 3층 레지스트 구조를 사용하였다. 게이트 리세스(recess) 공정은 PH가 5로

Fig. 2. Cross-sectional SEM photograph of the 50 nm T-gate with Si₃N₄

그림 2. 50 nm T-gate 단면 SEM 사진

조정된 호박산 계열의 혼합 용액을 사용하여 cap 층을 식각하고 인산 계열의 혼합 용액을 사용하여 schottky 층을 식각하였다. 이 때 InAlAs schottky 층에 대한 InGaAs cap 층의 선택적 식각 비율은 100 이상이다. 게이트 리세스 식각 후에 Ti/Au(500/4500 Å) 사용하여 게이트 금속을 열적으로 증착하고, 소자 보호를 위해 PECVD를 사용하여 Si₃N₄을 800 Å 두께로 적층하였다. 그림 2에 제작된 T-게이트의 단면 SEM 사진을 나타내었다. 상기 방법으로 제작된 MHEMT의 게이트와 소스간의 간격은 0.75 μm 이고 드레인파 소스의 간격은 1.5 μm 이다.

III. 측정결과

제작된 MHEMT의 전압-전류 및 상호전달 전도도 (g_m , transconductance)특성을 HP사의 4156A DC parameter analyzer를 사용하여 측정하였다. 단위 게이트 폭이 30 μm 이고 핑거 수가 2개인 소자의 측정결과, 핀치오프 (pinch-off) 전압은 -1.1 V, 드레인 전류밀도는 $V_{ds}=1.3$ V 및 $V_{gs}=0$ V에서 740 mA/mm이며, 최대 상호전달 전도도는 $V_{ds} = 1.3$ V 및 $V_{gs} = -0.4$ V에서 1.02 S/mm의 우수한 특성을 얻었다. On-state 항복전압(breakdown voltage)과 off-state 항복전압은 각각 1.6V와 2.5V이었다. 게이트 전압에 따른 드레인 전류 밀도 특성 및 상호전달 전도도 특성을 그림 3에 나타내었다.

Fig. 3. I_{ds} (drain current density) and g_m characteristics as a function of V_{gs} at a V_{ds} of 1.3 V for the fabricated 30 $\mu\text{m} \times 2$ MHEMTs with 50 nm T-gates

그림 3. 제작된 30 $\mu\text{m} \times 2$ MHEMTs의 게이트 전압에 따른 드레인 전류 밀도와 상호전달 전도도 특성

제작된 MHEMT의 S-파라메타는 Anritsu ME7808A vector network analyzer를 이용하여 측정하였다. 측정

Fig. 4. Typical $|h_{21}|^2$, U_{gain} , and S_{21} characteristics as a function of frequency for the fabricated 30 $\mu\text{m} \times 2$ MHEMTs with 50 nm T-gates

그림 4. 제작된 30 $\mu\text{m} \times 2$ MHEMTs의 주파수 함수로서의 $|h_{21}|^2$, U_{gain} , S_{21} 특성

Fig. 5. Comparison of current gain cut-off frequency for InP-based HEMTs and GaAs-based MHEMTs

그림 5. InP 기반의 HEMT와 GaAs 기반의 MHEMT의 전류이득 차단주파수 특성 비교

주파수 범위는 1 GHz ~ 110 GHz이며 측정 바이어스 조건은 $V_{ds}=1.3$ V, $V_{gs}=-0.4$ V이다. 그림 4는 30 $\mu\text{m} \times 2$ MHEMT의 RF 특성으로, 430 GHz의 전류이득 차단주파수 (f_t)와 406 GHz의 최대공진 주파수 (f_{max})를 얻었다. 110 GHz에서 측정된 S_{21} 이득은 8.3 dB를 나타내었다.

그림 5에 지금까지 보고된 sub-100 nm 이하의 게이트 길이를 갖는 HEMT 소자들의 전류이득 차단주파수 특성을 게이트 길이에 대하여 비교하였다^[3-19]. GaAs 기반의 MHEMT에서 얻어진 차단주파수 특성이 InP 기반의 HEMT에서 얻어진 특성과 비교하여 전혀 뒤떨어짐이

없다는 것을 알 수 있다. 기존의 GaAs 기판을 이용하며 InP HEMT와 거의 대등한 성능이 예상되는 MHEMT의 연구 및 개발은 저가 공정 및 6 inch 이상 기판을 이용한 양산용 기술의 성숙도 측면에서 그 의미가 크다고 할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 밀리미터파 응용에 사용 가능한 우수한 성능의 50 nm InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT를 구현하였다. 게이트 길이가 50 nm이며 단위 게이트 폭이 30 μm 인 2개의 게이트를 가지고 있는 MHEMT의 측정결과, 740 mA/mm의 드레인 포화 전류 밀도와 1.02 S/mm의 상호전달 전도도를 얻었으며 전류 이득 차단주파수와 최대공진 주파수는 각각 430 GHz와 406 GHz의 우수한 특성을 나타내었다.

참고문헌

- [1] P. M. Smith, D. Dugas, K. Chu, K. Nichols, K. G. Duh, J. Fisher, L. MtPleasant, D. Xu, L. Gunter, A. Vera, R. Lender, and D. Meharry, "Progress in GaAs metamorphic HEMT technology for microwave applications," in *Proc. IEEE GaAs IC Symp.*, pp. 21-22, 2003
- [2] C. S. Whelan, P. F. Marsh, W. E. Hoke, R. A. McTaggart, C. P. McCarroll, and T. E. Kazior, "GaAs metamorphic HEMT(MHEMT): an attractive alternative to InPHEMTs for high performance low noise and power applications," in *Proc. Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 337-340, 2000
- [3] Y. Yamashita, A. Endoh, K. Shinohara, K. Hikosaka, T. Matsui, S. Hiyamizu, and T. Mimura, "Pseudomorphic $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ HEMTs with an ultra high f_T of 562 GHz," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 23, no. 10, pp. 573-575, 2002
- [4] W. R. Deal, K. Leong, V. Radisic, S. Sarkozy, B. Gorospe, J. Lee, P. H. Liu, W. Yoshida, J. Zhou, M. Lange, R. Lai, X. B. Mei, "Low Noise Amplification at 0.67 THz Using 30nm InP HEMTs," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 368-370, 2011
- [5] K. Shinohara, Y. Yamashita, A. Endoh, I. Watanabe, K. Hikosaka, T. Matsui, T. Mimura, S. Hiyamizu, "547 GHz f_T $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ HEMTs with reduced source and drain resistance," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 25, no. 5, pp. 241-243, 2004
- [6] T. Suemitsu, H. Yokoyama, T. Ishii, T. Enoki, G. Meneghesso, E. Zanoni, "30-nm two-step recess gate InP-Based InAlAs/InGaAs HEMTs," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 49, no. 10, pp. 1694-1700, 2002
- [7] X. B. Mei, W. Yoshida, W. Deal, P. H. Liu, J. Lee, J. Uyeda, L. Dang, J. Wang, W. Liu, M. Barsky, Y. M. Kim, M. Lange, T. P. Chin, V. Radisic, T. Gaier, A. Fung, R. Lai, "35nm InP HEMT for Millimeter and Sub-Millimeter Wave Applications," *Indium Phosphide & Related Materials*, pp. 59-62, 2007
- [8] K. Shinohara, Y. Yamashita, A. Endoh, K. Hikosaka, T. Matsui, T. Mimura, and S. Hiyamizu, "Ultrahigh-speed pseudomorphic InGaAs/InAlAs HEMTs with 400-GHz cutoff frequency," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 507-509, 2001
- [9] I. Thayne, K. Elgaid, M. Holland, H. McLelland, D. Moran, S. Thoms, C. Stanley, "50 nm GaAs mHEMTs and MMICs for ultra-low power distributed sensor network applications," *Indium Phosphide and Related Materials* pp. 181-184, 2006
- [10] Axel Tessmann, "220-GHz Metamorphic HEMT Amplifier MMICs for High-Resolution Imaging Applications," *IEEE Journal of Solid-state circuits*, vol. 40, no. 10, pp. 2070-2076, 2005
- [11] M. Zaknounge, B. Bonte, C. Gaquiere, Y. Cordier, Y. Druelle and Y. Crosnier, "InAlAs/InGaAs metamorphic HEMT with high current density and high breakdown voltage," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 19, pp. 345-347, 1998
- [12] K. Shinohara, T. Matsui, T. Mimura, and S. Hiyamizu, "Novel asymmetric gate- recess engineering for sub-millimeter-wave InP-based HEMTs," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 2159-2162, 2001
- [13] S. Bollaert, Y. Cordier, M. Zaknounge, T. Parenty, H. Happy, S. Lepilliet, and A. Cappy, " f_{max} of 490 GHz metamorphic $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$

HEMTs on GaAs substrate," *IEE Electron. Lett.*, vol. 38, no. 8, pp. 389-391, 2002

- [14] S. C. Kim, D. An, B. O. Lim, T. Jg Baek, D. H. Shin, J. K. Rhee, "High-Performance 94-GHz Single Balanced Mixer Using 70-nm MHEMTs and Surface Micromachined Technology," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 28-30, 2006
- [15] A. Leuther, A. Tessmann, M. Dammann, W. Reinert, M. Schlechtweg, M. Mikulla, M. Walther, G. Weimann, "70 nm low-noise metamorphic HEMT technology on 4 inch GaAs wafers," *Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 215-218, 2003
- [16] A. Tessmann, A. huther, C. Schwoerer, H. Massler, S. Kudzus, W. Reinert, M. Schlechtweg, "A Coplanr 94 GHz lo-noise amplifier MMIC using 0.07 um metamorphic cascode HEMTs," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1581-1584, 2003
- [17] T. Parenty, S. Bollaert, J. Mateos, X. Wallart, A. Cappy, "Design and realization of sub 100 nm gate length HEMTs," *Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 626-629, 2001
- [18] H. Wang, T. N. Ton, R. Lai, D. C. W. Lo, S. Chen, D. Streit, G. S. Dow, K. L. Tan, and J. Berenz, "Low noise and high gain 94 GHz monolithic InP-based HEMT amplifiers," *IEEE IEDM Dig.*, pp. 239-242, 1993
- [19] Y. C. Lien, E. Y. Chang, H. C. Chang, L. H. Chu, G. W. Huang, H. M. Lee, C. S. Lee, S. H. Chen, P. T. Shen, and C. Y. Chang, "Low-noise metamorphic HEMTs with reflowed 0.1-um T-gate," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 25, no. 6, pp. 348-350, 2004

저 자 소 개

류 근 관 (정회원)

1992년 광운대학교 전자통신공학과 공학사
 1994년 광운대학교 전자통신공학과 공학석사
 2000년 광운대학교 전자통신공학과 공학박사
 2000년 3월 ~ 2003년 1월 한국 전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원
 2003년 ~ 현재 국립한밭대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야> 초고주파용 능동/수동 회로 설계

김 성 찬 (정회원)

1999년 동국대학교 전자공학과 공학사
 2001년 동국대학교 전자공학과 공학석사
 2006년 동국대학교 전자공학과 공학박사
 2006년 ~ 2007년 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 박사후연구원
 2007년 ~ 현재 국립한밭대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야> 밀리미터파 소자 및 회로설계, 제작