

## 2단계 게이트 리세스 방법으로 제작한 100 nm mHEMT 소자의 DC 및 RF 특성

### DC and RF Characteristics of 100-nm mHEMT Devices Fabricated with a Two-Step Gate Recess

윤형섭<sup>1</sup> · 민병규<sup>2</sup> · 장성재<sup>3</sup> · 정현욱<sup>4</sup> · 이종민<sup>5</sup> · 김성일<sup>6</sup> · 장우진<sup>7</sup> · 강동민<sup>8</sup> · 임종원<sup>9</sup> ·  
김완식<sup>\*10</sup> · 정주용<sup>\*11</sup> · 김종필<sup>\*12</sup> · 서미희<sup>\*\*13</sup> · 김소수<sup>\*\*14</sup>

Hyung Sup Yoon<sup>1</sup> · Byoung-Gue Min<sup>2</sup> · Sung-Jae Chang<sup>3</sup> · Hyun-Wook Jung<sup>4</sup> · Jong Min Lee<sup>5</sup> ·  
Seong-Il Kim<sup>6</sup> · Woo-Jin Chang<sup>7</sup> · Dong Min Kang<sup>8</sup> · Jong Won Lim<sup>9</sup> ·  
Wansik Kim<sup>\*10</sup> · Jooyong Jung<sup>\*11</sup> · Jongpil Kim<sup>\*12</sup> · Mihui Seo<sup>\*\*13</sup> · Sosu Kim<sup>\*\*14</sup>

#### 요 약

본 연구에서는 2단계 게이트 리세스 방법을 사용하여 T-형 게이트 길이가 100 nm인 mHEMT 소자를 제작하였다. 제작한 소자는 65 mA의 드레인전류( $I_{ds}$ ), 1090 mS/mm의 트랜스컨덕턴스( $g_m$ ), -0.65 V의 문턱전압( $V_{th}$ ) 등의 DC 특성을 보였다. 또한 차단주파수( $f_T$ ) 190 GHz와 최대 공진주파수( $f_{MAX}$ ) 260 GHz인 우수한 고주파 특성을 나타내었다. 제작한 mHEMT 소자는 향후에 W-대역의 MMIC 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### Abstract

A 100-nm gate-length metamorphic high electron mobility transistor(mHEMT) with a T-shaped gate was fabricated using a two-step gate recess and characterized for DC and microwave performance. The mHEMT device exhibited DC output characteristics having drain current( $I_{ds}$ ), an extrinsic transconductance( $g_m$ ) of 1,090 mS/mm and a threshold voltage( $V_{th}$ ) of -0.65 V. The  $f_T$  and  $f_{max}$  obtained for the 100-nm mHEMT device were 190 and 260 GHz, respectively. The developed mHEMT will be applied in fabricating W-band monolithic microwave integrated circuits(MMICs).

Key words: mHEMT, T-Shaped Gate, Two-Step Gate Recess, Cutoff Frequency, Maxium Oscillation Frequency

「본 연구는 국방과학연구소 계약번호 UC170028FD에 의하여 지원된 과제로 수행되었습니다.」

한국전자통신연구원 ICT 소재부품연구소 RF/전력부품연구그룹(RF/Power Components Research Group, ICT Materials & Components Research Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute)

\*LIG 넥스원(주) (LIG Nex1 Co., Ltd.)

\*\*국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

1: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-0299-0207>), 2: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-5349-2526>), 3: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-6973-8199>),  
4: 연구원(<https://orcid.org/0000-0001-5770-6387>), 5: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-0946-0615>), 6: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-5949-2447>),  
7: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-0911-3709>), 8: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-4758-3365>), 9: 그룹장(<https://orcid.org/0000-0003-0079-6718>),  
10: 수석연구원(<https://orcid.org/0000-0002-2198-8754>), 11: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-1221-173X>), 12: 수석연구원(<https://orcid.org/0000-0002-8490-3391>),  
13: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-3441-0190>), 14: 팀장(<https://orcid.org/0000-0002-1110-7896>)

· Manuscript received January 23, 2019 ; Revised April 8, 2019 ; Accepted April 16, 2019. (ID No. 20190123-002S)

· Corresponding Author: Hyung Sup Yoon (e-mail: [hsyoon@etri.re.kr](mailto:hsyoon@etri.re.kr))

## I. 서론

고속 데이터 전송, 광대역 멀티미디어 통신 서비스 및 정밀 감시 시스템 등의 구현을 위해서는 밀리미터파 대역의 초고주파 소자 및 MMIC의 확보가 필요하다. InP 기반의 InAlAs/InGaAs HEMT 소자는 높은 차단주파수 특성 (>500 GHz), 우수한 잡음특성 (<3 dB@ 95 GHz)을 보여 W-대역의 초고주파 소자 및 MMIC 제작에 널리 사용되고 있다<sup>[1][2]</sup>.

그러나, InP 기반의 HEMT 소자는 기판이 고가이고, 상대적으로 깨어지기 쉬워 4인치 이상의 InP wafer를 사용하기가 어렵다. 이러한 문제를 해결할 목적으로 GaAs 기판위에 metamorphic buffer층을 성장하고, InAlAs/InGaAs HEMT 구조(mHEMT)를 형성한 구조가 제안되었다<sup>[3][4]</sup>. GaAs 기반의 mHEMT 소자는 4인치 이상의 GaAs 기판을 사용할 수 있기 때문에 소자의 제작 단가 절감과 더불어 W-대역 MMIC를 안정적으로 제작할 수 있다. 또한, mHEMT 소자의 특성을 개선하고, 소자의 문턱전압( $V_{th}$ )을 제어하기 위해서는 게이트 리세스 공정 개발이 필요하다<sup>[5]</sup>.

본 연구에서는 2단계 게이트 리세스 식각 공정을 개발하여 T-형 게이트 길이가 100 nm인 GaAs 기반의 mHEMT 소자를 제작하였으며, 소자의 DC와 RF 특성을 측정 분석하였다.

## II. 소자 제작 공정

그림 1은 본 연구에서 사용한 GaAs 기반의 mHEMT 에피탁셀 구조를 나타낸 것이다. mHEMT 에피탁셀 구조는 MBE 장치를 사용하여 성장하였고, 반절연성 GaAs 기판 위에 graded-InAlAs 완충층, InAlAs 완충층,  $In_{0.6}Ga_{0.4}As$  채널층, InAlAs spacer층, planar 도핑층, InAlAs Schottky층, InGaAs cap 층의 구조로 되어 있다.

본 연구에서 제작한 mHEMT 소자는 T-형 게이트 길이가 100 nm이고, 게이트 폭은 100  $\mu m$ (50  $\mu m \times 2$ -finger gate)이다. 소스와 드레인 전극의 간격( $L_{sd}$ )은 2  $\mu m$ , 소스와 게이트 전극의 간격( $L_{sg}$ )은 0.5  $\mu m$ 이다. mHEMT 소자 제작은 소자격리, 오믹전극 형성, 배선전극형성, T-게이트 패턴 형성, 게이트 리세스식각 공정, Schottky 게이트 전극 형성 공정 및 소자를 보호하기 위한 SiN 보호막 공정순서로

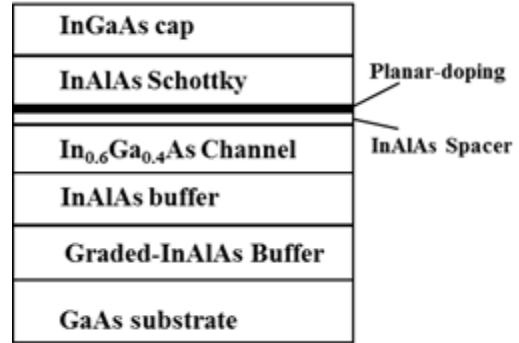


그림 1. GaAs 기반의 mHEMT 에피탁셀 구조  
Fig. 1. Epitaxial structure of GaAs-based mHEMT.

진행되었다. 게이트 길이가 100 nm인 T-게이트 패턴은 electron-beam lithography 장비를 사용하여 형성하였다.

T-게이트 패턴을 형성한 후 2단계 게이트 리세스 식각 방법을 개발하여 진행되었다. 1차 게이트 리세스 식각 공정은 succinic acid/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 혼합 용액을 이용하여 InGaAs cap 층을 선택적으로 식각하는 방법으로 진행되었고, 이어서 진행되는 2차 게이트 리세스 식각 공정은 citric acid 습식 용액을 사용하여 InAlAs Schottky 층을 다시 식각하는 방법으로 진행되었다.

게이트 리세스 공정이 진행된 후 전자선 진공 증착방비로 Ti/Au금속을 증착하고 리프트오프하여 mHEMT 소자의 T-형 게이트 전극을 형성하였다. 마지막으로 소자를 보호하기 위하여 50 nm SiN 박막을 증착하였다. 그림 2는 제작한 2-finger 게이트를 갖는 100 nm mHEMT 소자의 평면도를 나타낸 것이고, 그림 3은 100 nm T-gate 전극을 갖는 mHEMT 소자의 단면도이다.

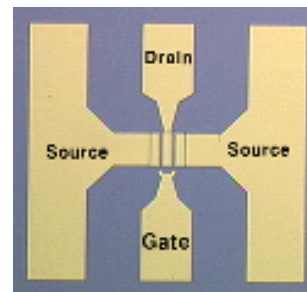


그림 2. 2-Finger 게이트(50  $\mu m \times 2$ ) 100 nm mHEMT.  
Fig. 2. 100 nm mHEMT with 2-finger gates(50  $\mu m \times 2$ ).

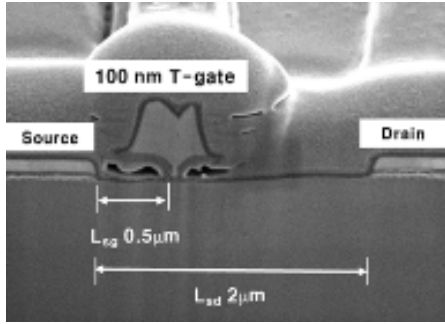


그림 3. 100 nm T-gate mHEMT 소자의 단면도  
Fig. 3. Cross-sectional view of 100nm T-gate mHEMT.

### III. 소자 측정 및 특성

본 연구에서는 Keysight semiconductor parameter analyzer와 Cascade on-wafer probe station를 이용하여 100 nm mHEMT 소자의 DC 특성을 측정하였다. 그림 4는 게이트 길이가 100 nm이고, 폭이 100 μm인 mHEMT 소자에 대해서 1 V의 드레인 전압( $V_{ds}$ )을 인가하고 게이트 전압( $V_{gs}$ )을 0.2V에서 -1.4 V까지 -0.2 V 단계로 변화시키면서 측정한 I-V 특성을 나타낸 것이다. 100 nm mHEMT 소자는 좋은 핀치오프 특성을 보여주고 있고, 게이트 전압( $V_{gs}$ )이 0.2 V일 때 최대 드레인 포화전류( $I_{dss}$ )는 65 mA이다.

그림 5는 게이트 길이가 100 nm이고, 폭이 100 μmm인 mHEMT 소자에서 측정한 게이트 전압( $V_{gs}$ )의 변화에 따른 mHEMT 소자의 트랜스컨덕턴스( $g_m$ )와 드레인 전류( $I_{ds}$ )의 변화를 보여주고 있고,  $V_{gs}$ 이 0 V일 때 1,090 mS/mm의  $g_m$

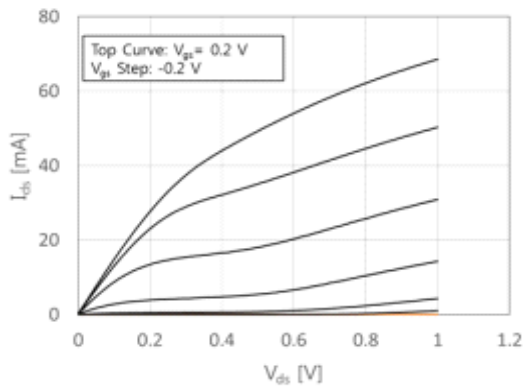


그림 4. 100 nm mHEMT 소자의 I-V 특성  
Fig. 4. I-V characteristics of 100 nm mHEMT.

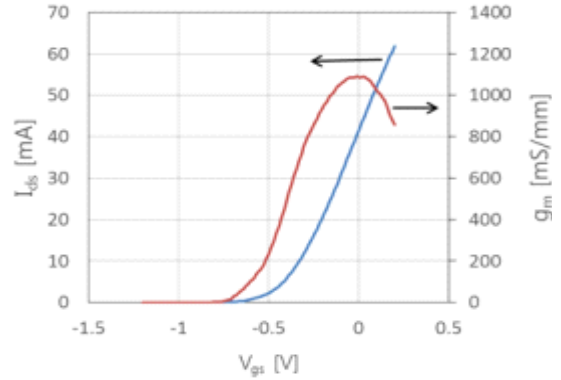


그림 5. 100 nm mHEMT 소자의 transfer 특성  
Fig. 5. Transfer characteristics of 100 nm mHEMT.

값을 보였다. 또한 mHEMT 소자의 문턱전압( $V_{th}$ )은 -0.65 V이다. 본 연구에서 개발한 2단계 게이트 식각 방법은 선택적으로 InGaAs cap 층을 제거한 후 InAlAs Schottky 층을 추가 식각함으로써 안정적으로  $V_{gs}$ 를 제어할 수 있고, 좋은 핀치오프 특성을 갖는 소자를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 Keysight network analyzer와 Cascade on-wafer probe station를 이용하여 제작한 100 nm 게이트 길이를 갖는 mHEMT 소자의 RF 특성을 조사하였다.

그림 6은  $V_{ds}=1$  V,  $V_{gs}=0.1$  V과 주파수를 1 GHz에서 50 GHz까지 변화시키면서 측정한 전류이득(h<sub>21</sub>)과 MSG/MAG 곡선을 나타낸 것으로, h<sub>21</sub>을 -20 dB/decade로 외삽하여 구한 차단주파수( $f_T$ ) 190 GHz와 MSG/MAG 곡선

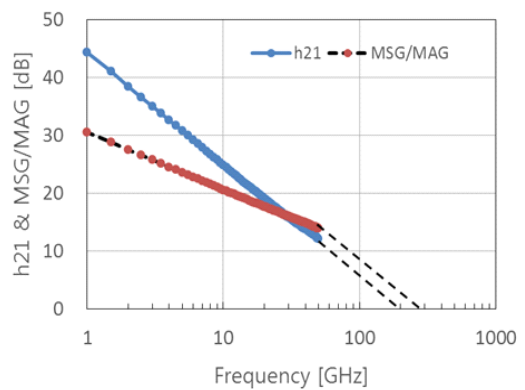


그림 6. 100 nm mHEMT 소자의 RF 특성  
Fig. 6. RF characteristics of 100 nm mHEMT devices.

표 1. 100 nm mHEMT 소자의 DC 및 RF 특성의 비교  
Table 1. Comparisons of DC/RF characteristics for 100 nm mHEMT devices.

Parameters[unit]	This work	Reference[6]
$I_{ds}$ [mA/mm]	650	550
$g_m$ [mS/mm]	1,090	1,000
$f_T$ [GHz]	190	220
$f_{MAX}$ [GHz]	260	200

에서 구한 최대 공진주파수( $f_{MAX}$ ) 260 GHz의 우수한 고주파 특성을 보였다.

표 1은 동일한 100 nm 게이트 길이를 갖는 mHEMT 소자의 DC와 RF 특성을 비교한 것으로 본 연구에서 제작한 mHEMT 소자는 Ref. [6]과 비교될 만한 우수한 소자 특성을 보였다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 2단계 게이트 리세스 식각 공정을 개발하여 T-형 게이트 길이가 100 nm인 GaAs 기반의 mHEMT 소자를 제작하였으며 소자의 DC와 RF 특성을 조사 분석하였다. 게이트 길이가 100 nm인 mHEMT 소자는 65 mA의  $I_{ds}$ , 1,090 mS/mm의  $g_m$ , -0.65 V의  $V_{th}$  등의 DC 특성을 보였다. 또한 차단주파수( $f_T$ ) 190 GHz와 최대 공진주파수( $f_{MAX}$ ) 260 GHz인 우수한 고주파 특성을 나타내었다. 본 연구에서 제작한 mHEMT 소자는 향후에 W-대역의 MMIC 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

[1] Y. Yamashita, A. Endoh, K. Sinohara, K. Hikosaka, T.

Matsui, and S. Hiyamizu, et al., "Pseudomorphic In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As/In<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As HEMTs with an ultrahigh  $f_T$  of 562 GHz," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 573-575, Oct. 2002.

[2] W. R. Deal, K. Leong, V. Radisic, S. Sarkozy, B. Gorospe, and J. Lee, et al., "Low noise amplification at 0.67 THz using 30 nm InP HEMTs," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 368-370, Jul. 2011.

[3] A. Leuther, A. Tessmann, M. Dammann, W. Reinert, M. Schlechtweg, and M. Mikulla, et al., "70 nm low-noise metamorphic HEMT technology on 4 inch GaAs wafers," in *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, Santa Barbara, 2003, pp. 215-218.

[4] H. S. Yoon, J. Y. Shim, D. M. Kang, J. Y. Hong, and K. H. Lee, "Characteristics of 80 nm T-gate metamorphic HEMTs with 60% indium channel," in *2007 IEEE 19th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials*, Matsue, 2007, pp. 110-113.

[5] H. Fourre, F. Diette, and A. Cappy, "Selective wet etching of lattice-matched InGaAs/InAlAs and metamorphic InGaAs/InAlAs on GaAs substrate using succinic Aic/Hydrogen peroxide solution," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 14, no. 5, pp. 3400-3402, Sep./Oct. 1996.

[6] K. Yaohui, W. Weibo, G. Jianfeng, and C. Chen, "100 nm MHEMT transistor technology for W-band amplifier," in *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, Harbin, 2014, pp. 1339-1341.