

# Metamorphic HEMT를 이용한 60 GHz 대역 고출력 Push-Push 발진기

## A High Power 60 GHz Push-Push Oscillator Using Metamorphic HEMT Technology

이 종 욱

Jong-Wook Lee

요 약

본 논문에서는 0.12  $\mu\text{m}$  게이트 전극을 가진 metamorphic InAlAs/InGaAs high electron-mobility transistors (mHEMT)를 이용하여 제작된 60 GHz push-push 발진기의 특성을 고찰하였다. 전극 길이가 0.12  $\mu\text{m}$ 인 mHEMT는 700 mA/mm의 최대 전류, 600 mS/mm의 최대 전달정수, 170 GHz의  $f_T$ , 그리고 300 GHz 이상의  $f_{MAX}$  등 우수한 특성을 나타내었다. 두 개의  $6 \times 50 \mu\text{m}$  크기를 가지는 mHEMT를 이용하여 제작된 발진기는 59.5 GHz에서 6.3 dBm의 출력 전력과 -35 dBc 이상의 기저 주파수 억압도를 나타내었다. 페이즈 노이즈(phase noise)는 발진 주파수의 1 MHz 오프셋에서 -81.2 dBc/Hz의 특성을 나타내었다. 본 연구 결과는 60 GHz 대역에서 mHEMT를 이용하여 제작된 push-push 발진기로는 최대 출력을 나타낸 결과이며, 이 연구 결과는 상용화와 저가격에 InP HEMT보다 유리한 mHEMT를 이용하여 고출력 발진기 특성을 얻을 수 있음을 보여준다.

### Abstract

This paper reports a high power 60 GHz push-push oscillator fabricated using 0.12  $\mu\text{m}$  metamorphic high electron-mobility transistors(mHEMTs). The devices with a 0.12  $\mu\text{m}$  gate-length exhibited good DC and RF characteristics such as a maximum drain current of 700 mA/mm, a peak gm of 660 mS/mm, an  $f_T$  of 170 GHz, and an  $f_{MAX}$  of more than 300 GHz. By combining two sub-oscillators having  $6 \times 50 \mu\text{m}$  periphery mHEMT, the push-push oscillator achieved a 6.3 dBm of output power at 59.5 GHz with more than -35 dBc fundamental suppression. The phase noise of -81.5 dBc/Hz at 1 MHz offset was measured. This is one of the highest output power obtained using mHEMT technology without buffer amplifier, and demonstrates the potential of mHEMT technology for cost effective millimeter-wave commercial applications.

Key words : Push-Push Oscillator, Metamorphic, High Electron-Mobility Transistor(HEMT), Millimeter-Wave Circuit

### I. 서 론

밀리미터파 대역은 단거리에서 대용량의 통신 전송에 적합하여 많은 관심을 끌고 있다. 60 GHz 대역에서는 우수한 주파수 및 노이즈 특성을 가진 InP HEMT와 SiGe HBT가 주로 사용되고 있다. 그러나

InP HEMT의 경우 작은 기판 크기 및 높은 가격 등의 문제점으로 인해 최근에는 GaAs 기판 위에  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  버퍼층을 이용하여 InGaAs 채널층을 형성한 metamorphic HEMT(mHEMT)에 대한 연구가 활발하다. InGaAs층을 채널층으로 함으로써 InP HEMT급의 주파수 특성을 얻을 수 있으며 대면적 GaAs 기판

「This work was supported by the National Program for Tera-level Nano-devices of the Ministry of Science and Technology as one of the 21-Century Frontier Programs.」

경희대학교 전자통신공학과(Department of Radio Communication Engineering, Kyung Hee University)

· 논문 번호 : 20060503-049

· 수정완료일자 : 2006년 6월 16일

을 사용할 수 있는 장점이 있다<sup>[1]</sup>. 또한 채널의 In 함량을 30~40 %로 하여 60 GHz 이상에서 향상된 전력 특성을 얻을 수 있어, 최근 우수한 mHEMT 특성을 이용한 다수의 회로가 발표되었다<sup>[2]~[4]</sup>.

60 GHz 이상의 대역에서 사용되는 주파수원의 경우 크게 fundamental 발진기, 주파수 체배 방식을 이용한 발진기, 그리고 push-push 발진기 등의 방법이 주로 사용되고 있다. 주파수 체배 방식은 페이즈 노이즈(phase noise) 특성이 우수한 DR(Dielectric Resonator) 발진기를 이용할 수 있는 낮은 주파수를 체배하여 사용하는 방법으로 우수한 특성을 얻을 수 있으나 시스템이 복잡한 단점이 있다. Fundamental 발진기의 경우 발진 주파수에서 소자의 주파수 특성에 의존하는 자체 발진(free-running) 방식보다 페이즈 노이즈와 안정도 특성이 보다 우수한 주입 발진(injection locking) 등의 방법이 소개되었다<sup>[5]</sup>.

비교적 간단하면서도 우수한 발진 특성을 얻을 수 있는 방법으로 push-push 방식이 많이 사용되고 있다. 이 방법은 2차 하모닉(harmonic)을 이용하는 방법으로 주파수 체배 방식과 유사하나 두 개의 하위 발진기의 전력이 결합된다는 점에서 고출력을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 push-push 발진기에서는 하위 발진기가 출력 주파수의 1/2의 주파수에 동작함으로써 공진기의 높은 Q 값(Quality factor)을 얻을 수 있고, 또한 기생 성분의 영향이 낮은 장점이 있다. 또한 두 개의 발진기가 결합되는 점에서는 가상 접지(virtual ground)가 생성되므로 부하 변화에 의한 pulling effect가 낮은 이점이 있다. Push-push 발진기는 InP HBT, GaAs pHEMT, SiGe HBT를 사용한 결과가 다수 보고되었으나<sup>[6]~[8]</sup>, mHEMT를 이용한 고출력 push-push 발진기는 60 GHz 이상의 주파수에서는 발표되지 않았다. 본 논문에서는 60 GHz 대역에서 mHEMT로 제작된 push-push 발진기의 설계, 측정 및 출력 특성을 조사하였다.

## II. Metamorphic HEMT의 에피층과 제작 공정

그림 1에 push-push 발진기에 사용된 mHEMT의 에피층 구조를 나타내었다. 채널과 장벽층(barrier)은 35~40 %의 In 비율을 사용하여 V-band 이상의 밀리미터파 대역에서 고출력을 얻을 수 있도록 최적화되

In <sub>0.35</sub> GaAs	cap
In <sub>0.35</sub> GaAs	cap
In <sub>0.40</sub> AlAs	strained barrier (14 nm)
δ-doping	
In <sub>0.40</sub> AlAs	spacer (4 nm)
In <sub>0.35</sub> GaAs	channel (15 nm)
In <sub>0.35</sub> AlAs	barrier/buffer
In <sub>x</sub> Al <sub>1-x</sub> As	buffer
GaAs substrate	

그림 1. Metamorphic HEMT의 에피층 구조  
Fig. 1. Schematic of metamorphic HEMT epitaxial layer.

었다. 또한 높은 파괴 전압(breakdown voltage)을 얻을 수 있도록 double recess와 dual capping 공정을 사용하였다. 게이트 전극은 tri-layer resist process를 이용하여 electron beam lithography로 형성되었다. 전극 길이가 0.12 μm mHEMT의 경우 최대 전류 밀도 전달 정수가 각각 700 mA/mm, 600 mS/mm 이상의 우수한 DC 특성과 함께,  $f_T$ 는 170 GHz 이상의 주파수 특성을 나타내었다<sup>[1]</sup>.

## III. Push-Push 발진기 설계

발진기에 사용된 0.12 μm mHEMT의 DC 전류 특성과 50 GHz까지 측정된 S-parameter를 바탕으로 Agilent Advanced Design System(ADS) EEHEMT 모델에 필요한 파라미터를 추출하였다<sup>[9]</sup>. 그 외 회로 제작에 필요한 CPW 전송 선로(Coplanar Waveguide transmission line), MIM(Metal-Insulator-Metal) 커패시터, 그리고 TFR(Thin Film Resistor)의 모델을 측정된 데이터를 바탕으로 ADS용으로 추출하였다.

Push-push 발진기는 두 개의 하위 발진기가 출력 주파수( $f_{out}$ )의 1/2의 주파수에서 서로 위상이 반대로 동작하여, 출력단에서 기저 주파수(fundamental)와 기수차 주파수(odd harmonic)는 서로 상쇄되고 우수차 주파수 성분(even harmonic)은 더해진다. 출력으로는 두 개의 하위 발진기의 2차 하모닉(harmonic)성분의 합이 사용된다. 먼저, 하위 발진기의 정합회로

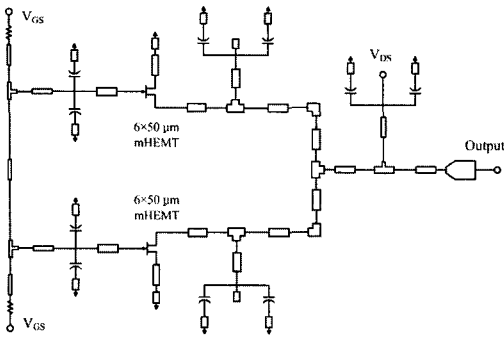


그림 2. 60 GHz push-push 발진기 회로도  
Fig. 2. Circuit schematic of the 60 GHz push-push oscillator.

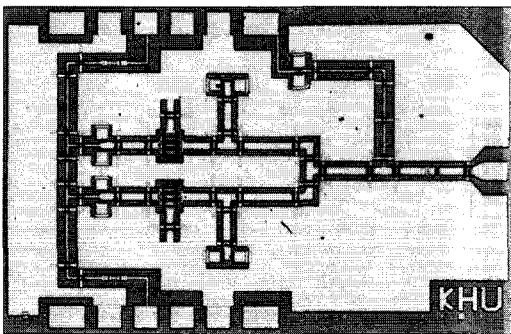


그림 3. 제작된 60 GHz push-push 발진기 사진  
Fig. 3. Photograph of the fabricated 60 GHz push-push oscillator(chip size: 2×1.4 mm<sup>2</sup>).

를  $f_{out}/2$  주파수에서 6×50 μm mHEMT의 소 신호 모델을 이용하여 발진 조건으로 설계하였다. 설계된 두 개의 하위 발진기는 효과적인 출력 결합을 위해서 드레인 결합 방식을 이용하였다<sup>[7]</sup>. 설계된 push-push 발진기의 회로도를 그림 2에 나타내었다.

결합된 발진기는 드레인단 출력부의 부하 조건에 의해 두 개의 하위 발진기는 180°의 위상차를 가지도록 강제(enforce)된다<sup>[10]</sup>. 즉, 기수 모드(odd mode)의 부하 조건에서 발진이 일어나고, 우수 모드(even mode)의 부하 조건에서는 발진이 일어나지 않도록 설계되었다. Agilent ADS의 대 신호 하모닉 평형(harmonic balance) 시뮬레이션을 이용하여 두 개의 하위 발진기 간의 180° 위상차, 그리고 발진 주파수 및 출력을 확인하였다. 또한, 발진 주파수 60 GHz에서 고출력을 얻을 수 있도록 정합회로를 최적화하였다. 제작된 60 GHz push-push 발진기의 사진을 그림

3에 나타내었다. 발진기는 바이어스 회로를 내장하고 있으며, 크기는 2.0×1.4 mm<sup>2</sup>이다. 두 개의 게이트 바이어스는 측정의 편의상 한 쪽에서만 인가될 수 있도록 연결하였다. 이 연결부는 발진 조건에는 영향을 주지 않으며, 두 개의 하위 발진기는 드레인 연결부의 부하 조건에 의해서 위상차가 발생하도록 설계되었다.

#### IV. Push-Push 발진기 측정 및 결과

그림 4에 push-push 발진기 측정을 위한 V-대역 측정 시스템을 나타내었다. 발진기의 출력과 발진 주파수는 GSG(Ground-Signal-Ground) RF probe로 on-wafer 상에서 측정하고, DC 바이어스는 multi-contact DC probe를 사용하여 공급하였다.

RF probe에서 나온 출력은 50~75 GHz 대역의 WR-15 V-대역 도파관(waveguide)에 연결되고, 10 dB WR-15 커플러(coupler)를 이용하여 발진 주파수와 출력 전력을 동시에 측정하였다. 발진 주파수는 변환 손실(conversion loss)이 20~30 dB인 50~75 GHz Agilent 11,970 V 하모닉 믹서(harmonic mixer)를 통해 하향 주파수 변환된 신호를 Agilent E4448A 스펙트럼 분석기를 이용해 확인하였다. 발진기의 출력 측정에는 V8486A 전력 측정 센서(50~75 GHz)와 HP 438A 전력 측정기(power meter)를 이용하였다.

그림 5에 스펙트럼 분석기로 측정된 발진기의 특성을 나타내었다. 바이어스 조건  $V_{DS}=1.9$  V,  $V_{GS}=-0.45$  V일 때 중심 주파수는 59.464 GHz에서 -45 dBm의 출력을 나타내었다.

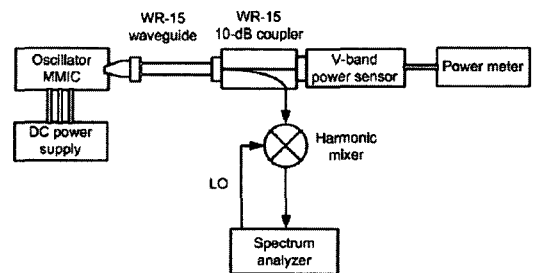


그림 4. Push-push 발진기 측정을 위한 V-band 측정 시스템  
Fig. 4. V-band microwave test setup to used to measured the push-push oscillator performance.

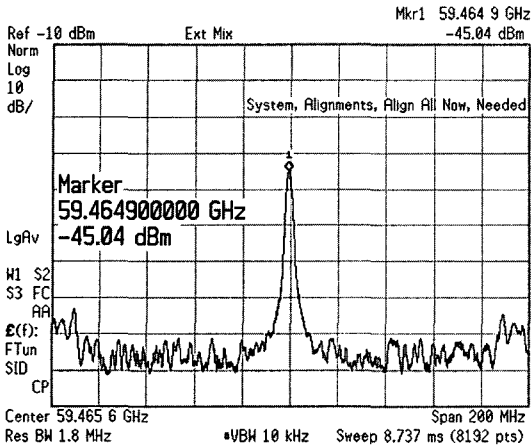


그림 5. 측정된 push-push 발진기의 주파수 출력 특성.  $V_{DS}=1.9$  V,  $V_{GS}=-0.45$  V  
 Fig. 5. Measured output spectrum of the push-push oscillator.  $V_{DS}=1.9$  V,  $V_{GS}=-0.45$  V.

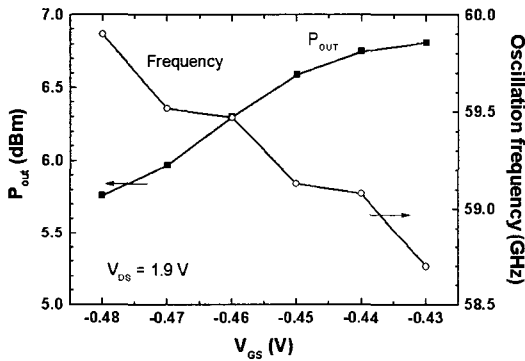


그림 6. 게이트 전압( $V_{GS}$ )에 따른 push-push 발진기의 출력 및 발진 주파수 특성.  $V_{DS}=1.9$  V  
 Fig. 6. Tuning characteristics of the push-push oscillator as a function of  $V_{GS}$ ,  $V_{DS}=1.9$  V.

실제 push-push 발진기의 출력을 측정한 결과를 게이트 전압에 따른 함수로 발진 주파수 특성 변화와 함께 그림 6에 나타내었다. RF probe, 도파관, 그리고 커플러의 V-band 대역 손실은 약 3.5 dB로, 전력 측정기(power meter)에 관측한 출력한 전력은 이 손실을 보상하여 나타내었다. 게이트 전압,  $V_{GS}$ 가  $-0.43$ 에서  $-0.48$  V까지 변할 때 출력은 6.8 dBm에서 5.8 dBm으로 감소하고 발진 주파수는 58.7 GHz에서 59.9 GHz까지 변화하여 주파수 튜닝 범위(tuning range)는 2.0 %를 얻었다. ADS에서의 대신 호 하모닉 평형(harmonic balance) 시뮬레이션에서는

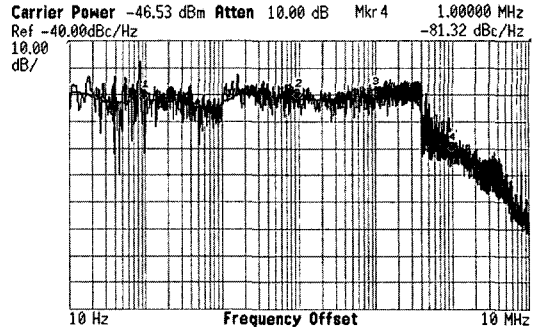


그림 7. Push-push 발진기의 phase noise 특성.  $V_{DS}=1.9$  V,  $V_{GS}=-0.45$  V  
 Fig. 7. Phase noise characteristic of the push-push oscillator.  $V_{DS}=1.9$  V,  $V_{GS}=-0.45$  V.

$V_{GS}$ 가  $-0.35$  V에서  $-0.45$  V까지 변할 때 출력 전력은 8.9 dBm에서  $-10$  dBm까지 변하고, 출력 주파수는 58.6 GHz에서 61.5 GHz까지 변화하였다. 측정된 출력 주파수와 전력은 설계값과 차이는 보이는데 이는 50 GHz까지 측정된 데이터를 바탕으로 한 능동 및 수동 소자 모델의 오차에 기인하는 것으로 사료된다.

그림 7에 push-push 발진기의 바이어스 전압  $V_{DS}=1.9$  V,  $V_{GS}=-0.45$  V일 때 phase noise 특성을 나타내었다. Phase noise는 E4448A spectrum analyzer의 자체 내장 기능(built-in utility)을 이용하여 측정하였고,

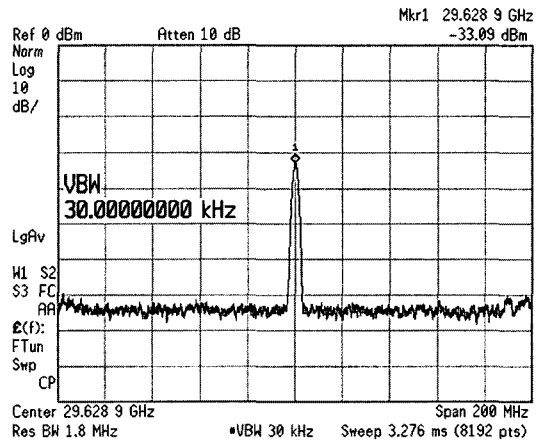


그림 8. Push-push 발진기의 fundamental frequency 출력 특성.  $V_{DS}=1.9$  V,  $V_{GS}=-0.45$  V  
 Fig. 8. Measured output spectrum of the push-push oscillator at the fundamental frequency.  $V_{DS}=1.9$  V,  $V_{GS}=-0.45$  V.

1 MHz 오프셋에서  $-81.3$  dBc/Hz 특성을 나타내었다. 출력 주파수의 1/2이 되는 기저 주파수(fundamental frequency)에서의 억압도(suppression)를 확인하기 위해서 2.4 mm 케이블을 이용하여 측정 시스템을 바꾸어 측정하였다. 측정된 결과를 그림 8에 나타내었다. 기저 주파수(fundamental frequency)는 29.628 GHz에서 35 dBc 이상의 우수한 특성을 나타내었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 최근 우수한 특성과 경제성을 갖추어 향후 밀리미터파 대역의 대용량 데이터 전송 시스템에 사용될 수 있는 mHEMT 기술을 이용하여 제작된 60 GHz 대역의 push-push 발진기의 특성을 살펴보았다. 제작된 발진기는 60 GHz 대역에서 6.8 dBm의 우수한 출력 특성과 35 dBc 이상의 기저 주파수 억압도, 그리고 1 MHz 오프셋에서  $-81.3$  dBc/Hz의 페이즈 노이즈 특성을 나타내었다. 제작된 push-push 발진기는 정합회로 수정을 통해 77 GHz 자동차용 레이다 시스템의 주파수 발진기로, 그리고 주파수 체배기를 이용하여 향후 D-대역 응용에도 사용 가능하다.

## 감사의 글

MHEMT 이용한 MPW(Multi-Project Wafer) 제작 지원을 해주신 서울대학교 서광석 교수님 및 연구실 학생(김성원, 설경선), 그리고 측정을 지원해 주신 서울대학교 권영우 교수님 및 연구실 학생(최우열, 김경운)에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. -W. Kim, K. -M. Lee, J. -H. Lee, and K. -S. Seo, "High-performance 0.1- $\mu$ m In<sub>0.4</sub>AlAs/In<sub>0.35</sub>GaAs MHEMTs with Ar plasma treatment", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 26, no. 11, pp. 787-789, Nov. 2005.
- [2] J. Jeong, S. Kim, W. Choi, H. Noh, K. Lee, K. -S. Seo, and Y. Kwon, "W-band divide-by-3 frequency divider using 0.1  $\mu$ m InAlAs/InGaAs metamorphic HEMT technology", *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 18, pp. 1005-1006, Sep. 2005.
- [3] Y. Campos-Roca, C. Schwoer, A. Leuther, M. Seelmann-Eggebert, and H. Massler, "A D-band frequency doubler MMIC based on a 100-nm metamorphic HEMT technology", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no. 7, pp. 466-468, Jul. 2005.
- [4] D. An, B. -H. Lee, B. -O. Lim, M. -K. Lee, S. -C. Kim, J. -H. Oh, S. -D. Kim, H. -M. Park, D. -H. Shin, and J. -K. Rhee, "High switching performance 0.1- $\mu$ m metamorphic HEMTs for low conversion loss 94-GHz resistive mixers", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 26, no. 10, pp. 707-701, Oct. 2005.
- [5] S. Kudszus, T. Berceli, A. Tessmann, M. Neumann, and W. H. Haydl, "W-band HEMT-oscillator MMICs using subharmonic injection locking", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2526-2532, Dec. 2000.
- [6] K. Kobayashi, A. Oki, L. Tran, J. Cowles, A. Gutierrez-Aitken, F. Yamada, T. Block, and D. Streit, "A 108-GHz InP-HBT monolithic push-push VCO with low phase noise and wide tuning bandwidth", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 34, no. 9, pp. 1225-1232, Sep. 1999.
- [7] S. Kudszus, W. H. Haydl, A. Tessmann, W. Bronner, and M. Schlechtweg, "Push-push oscillators for 94 and 140 GHz applications using standard pseudomorphic GaAs HEMTs", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 1571-1574, 2001.
- [8] R. Wanner, R. Lachner, and G. R. Olbrich, "A monolithically integrated 190-GHz SiGe push-push oscillator", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no. 12, pp. 862-864, Dec. 2005.
- [9] Agilent Technologies, Advanced Design System, 2004.
- [10] F. X. Sinnesbichler, "Hybrid millimeter-wave push-push oscillators using silicon-germanium HBTs", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 51, no. 2, pp. 422-430, Feb. 2003.

이 중 욱



1993년 2월: 서울대학교 전기공학  
과 (공학사)

1997년 2월: 서울대학교 전기공학  
과 (공학석사)

2003년 1월: Purdue University at  
West Lafayette (공학박사)

2003년 1월~2004년 2월: University  
of Illinois at Urbana-Champaign (Postdoc research asso-  
ciate)

2004년 3월~2006년 2월: 경희대학교 전자통신공학과 전  
임강사

2006년 3월~현재: 경희대학교 전자통신공학과 조교수  
[주 관심분야] RF 소자 모델링, RFID, CMOS RFIC 설계