

60 GHz 대역 고출력 0.12 μ m MHEMT Push-Push 발진기

¹이종욱, *김성원, *김경운, *설경선, *권영우, *서광석
¹경희대학교 전자정보대학 전파통신전공, *서울대학교 전기공학부
e-mail : jwlee@khu.ac.kr

A High Power 60 GHz Push-Push Oscillator Using 0.12 μ m Metamorphic HEMTs

¹Jong-Wook Lee, *Sung-Won Kim, *Kyoung-Woon Kim, *Gyung-Seon Seol,
*Youngwoo Kwon, and *Kwang-Seok Seo

¹School of Electronics and Information, Kyung Hee University

*School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract

This paper reports a high power 60 GHz push-push oscillator fabricated using 0.12 μ m metamorphic high electron-mobility transistors (mHEMTs). The devices with a 0.1 μ 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, and an f_T of 170 GHz. By combining two sub-oscillators having 6 \times 50 μ 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. 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.

I. 서론

밀리미터파 대역은 단거리 대용량의 통신 전송에 적합하여 많은 관심을 끌고 있다[1]. 60 GHz 대역에서는 우수한 주파수 및 노이즈 특성을 지닌 InP HEMT 와 SiGe HBT가 주로 사용되고 있다. 반면 InP HEMT의 경우 높은 기판 가격 등의 단점이 있어 최근에는 GaAs 기판위에 InAlAs 버퍼층을

이용하여 InAlAs 채널층을 형성한 metamorphic HEMT(mHEMT)에 대한 연구가 활발하다[1]. InAlAs층을 채널 사용함으로써 InP HEMT급의 주파수 특성을 얻을 수 있으며 대면적 GaAs 기판을 사용할 수 있는 장점이 있다. 최근 우수한 mHEMT 특성을 이용한 다수의 회로도 발표되었다 [2-4].

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

비교적 간단하면서도 우수한 발진 특성을 얻을 수 있는 방법으로 push-push 방식이 많이 사용되고 있다. 이 방법은 2차 하모닉을 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 주파수(f_0)의 1/2의 주파수에 동작함으로써 공진기의 높은 Q값(quality factor)를 얻을 수 있고, 또한 기생성분의 영향이 낮은 장점이 있다. 또한 두 개의 발진기가 결합되는 점에서는 가상 접지점 (virtual ground)이 생성되며

로 부하에 의한 pulling effect가 낮은 이점이 있다. 기존에 보고된 push-push 발진기는 InP HBT, GaAs pHEMT, SiGe HBT를 사용한 결과가 발표되었으나[6-8], mHEMT를 이용한 고효율 push-push 발진기는 60 GHz 이상에서는 발표되지 않았다. 본 논문에서는 60 GHz 대역에서 mHEMT로 제작된 고효율 push-push 발진기의 특성을 조사하였다.

II. MHEMT의 에피층과 제작 공정

Push-push 발진기에 사용된 mHEMT의 에피층은 채널과 장벽층(barrier)이 35%의 In 비율을 사용하여 V-band 이상에서 밀리미터파 대역에서 고효율을 얻을 수 있도록 최적화되었다. 또한 높은 파괴전압(breakdown voltage)을 얻을 수 있도록 double recess와 dual capping 공정을 사용하였다. 게이트 전극 길이가 0.12 μm 인 mHEMT는 tri-layer resist process를 이용하여 electron beam lithography로 형성되었다. 제작된 0.1 μm mHEMT는 최대 전류 및 전달 정수가 각각 700 mA/mm, 660 mS/mm 이상의 우수한 DC 특성과 함께, f_T 는 170 GHz, 그리고 300 GHz 이상의 f_{MAX} 주파수 특성을 나타내었다[1].

III. Push-Push 발진기 설계

DC 전류 특성과 50 GHz까지 측정된 S-parameter를 바탕으로 mHEMT의 경우 EEHEMT 모델에 필요한 파라미터를 추출하였다. 그 외 CPW(coplanar waveguide) 전송선로, MIM(metal-insulator-metal) 커패시터, 그리고 TFR (thin film resistor)의 모델을 Agilent Advance Design System (ADS)용으로 추출하였다[9].

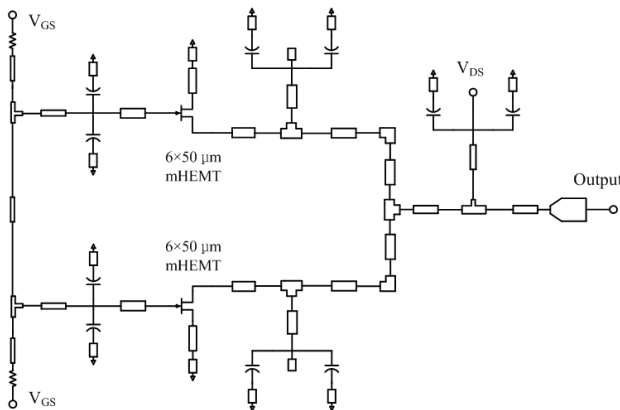


그림 1. Push-push 발진기의 회로도.

Push-push 발진기는 두 개의 하위 발진기가 서로 위상이 반대로 출력 주파수의 1/2로 동작하여 기저주파수

(fundamental)와 기수차 주파수는 서로 상쇄되고 우수차 주파수 성분은 더해지며, 2차 고조파 성분을 출력으로 사용한다. 먼저, 하위 발진기의 정합회로를 $f_0/2$ 주파수에서 $6 \times 50 \mu\text{m}$ mHEMT의 소신호 모델을 이용하여 발진조건으로 설계하였다. 설계된 두 개의 하위 발진기는 효과적인 출력 결합을 위해서 드레인 연결 방식을 이용하였다[7]. 설계된 push-push 발진기의 회로도를 그림 1에 나타내었다.

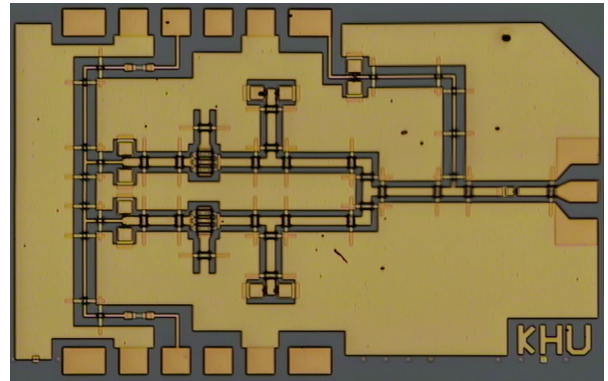


그림 2. 제작된 60 GHz push-push 발진기 사진.

결합된 발진기는 출력부의 정합회로를 조절하여 기수모드(odd mode)의 부하조건에서 발진이 일어나고, 우수모드(even mode)의 부하조건에서는 발진이 일어나지 않도록 설계하였다. Agilent ADS의 대신으로 하모닉 평형(harmonic balance) 시뮬레이션을 이용하여 두 개의 하위 발진기간 180도 위상차와 발진주파수를 확인하였다. 또한, 발진주파수 60 GHz에서 출력을 증가시키도록 정합회로를 최적화하였다. 제작된 60 GHz push-push 발진기의 사진을 그림 2에 나타내었다. 크기는 $2.0 \times 1.4 \text{ mm}^2$ 이다.

IV. 측정 및 결과

그림 3에 push-push 발진기 측정을 위한 V-대역 측정 시스템을 나타내었다.

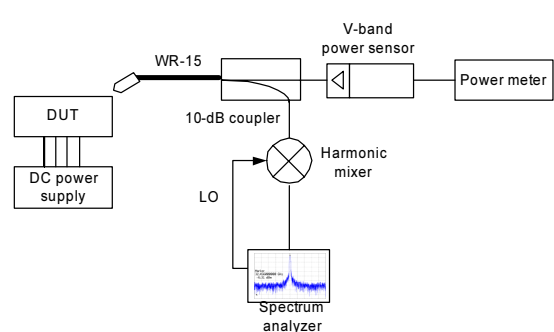


그림 3. Push-push 발진기 측정을 위한 V-band test setup.

발진기의 출력은 GSG(ground-signal-ground) RF probe로 on-wafer 상에서 측정하고, DC 바이어스는 PGPPGP 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.

출력 전력 측정은 Agilent V8486A power sensor (50-75 GHz)와 HP 438A power meter를 이용하였다. 발진 주파수는 변환 손실(conversion loss)이 20-30 dB인 50-75 GHz 하모닉 믹서를 통해 하향 주파수 변환된 신호를 Agilent E4448A 스펙트럼 분석기를 이용해 확인하였다.

그림 4에 스펙트럼 분석기로 측정된 발진기의 특성을 나타내었다. 바이어스 조건 $V_{DS}=1.9$ V, $V_{GS} = -0.45$ V일 때 중심 주파수는 59.464 GHz이고 -45.04 dBm의 출력을 나타내었다.

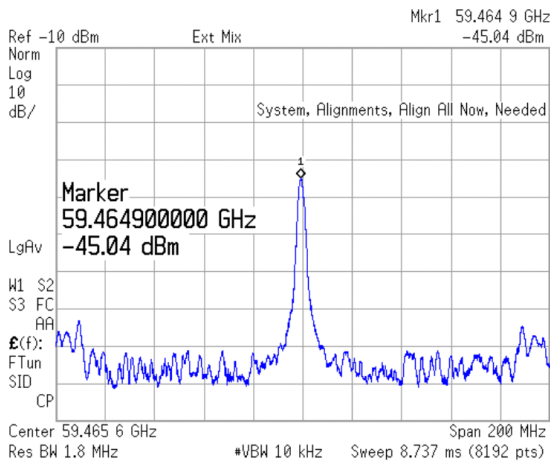


그림 4. 60 GHz push-push 발진기의 주파수 출력 특성. $V_{DS} = 1.9$ V, $V_{GS} = -0.45$ V.

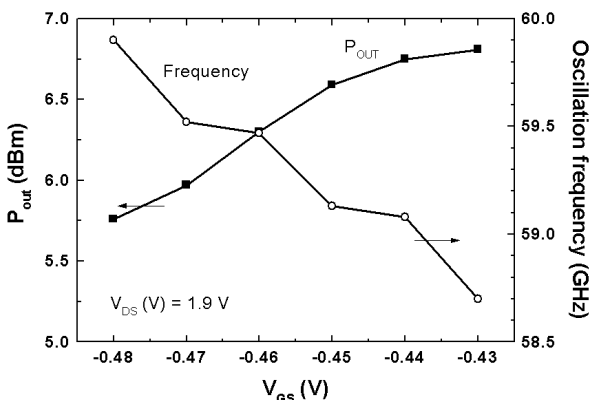


그림 5. 게이트 전압(V_{GS})에 따른 push-push 발진기의 출력 및 발진 주파수 특성. $V_{DS} = 1.9$ V.

실제 push-push 발진기의 출력을 측정된 결과를 게이트 전압에 따른 함수로 발진 주파수 특성 변화와 함께 그림 5에

나타내었다. RF probe, 도파관, 그리고 커플러의 V-band 대역 손실은 약 3.5 dB 인데, power meter로 출력한 전력은 이 손실을 보상하여 나타내었다. 게이트 전압 V_{GS} 가 -0.48에서 -0.43 V까지 변할 때 출력은 6.8 dBm에서 5.8 dBm으로 감소하고 발진 주파수는 58.7 GHz에서 59.9 GHz까지 변화하여 tuning range 는 2.0 % 를 얻었다.

그림 6에 push-push 발진기의 바이어스 전압 $V_{DS}=1.9$ V, $V_{GS} = -0.45$ V일 때 측정된 phase noise 특성을 나타내었다. Phase noise는 E4448A spectrum analyzer의 자체 내장기능(built-in utility)을 이용하여 측정하였고, 1 MHz 오프셋에서 -81.3 dBc/Hz 특성을 나타내었다.

출력 주파수의 1/2이 되는 기저주파수(fundamental frequency)에서의 억압도(suppression)을 확인하기 위해서 2.4 mm 케이블을 이용하여 측정 시스템을 바꾸어 측정하였다. 측정된 결과를 그림 4에 결과를 나타내었다. 기저주파수는 29.628 GHz에서 약 -40 dB의 우수한 억압도를 나타내었다.

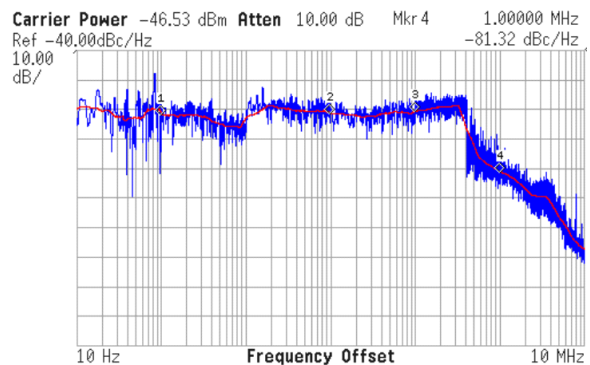


그림 6. Push-push 발진기의 phase noise 특성. $V_{DS} = 1.9$ V, $V_{GS} = -0.45$ V.

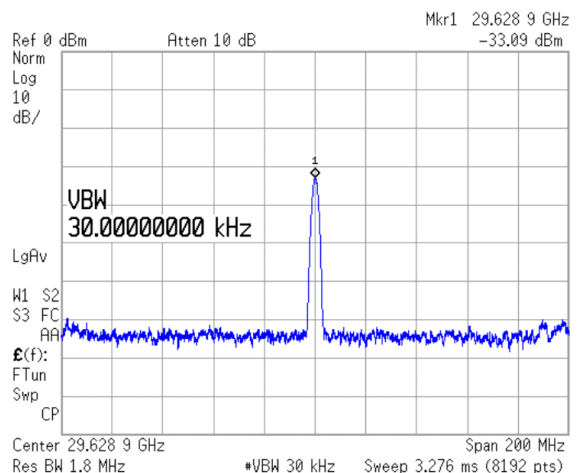


그림 7. Push-push 발진기의 fundamental frequency

출력특성. $V_{DS} = 1.9$ V, $V_{GS} = -0.45$ V.

V. 결론

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 약 -40 dB의 기저주파수 억압도, 그리고 1 MHz 오프셋에서 -81.3 dBc/Hz의 페이즈 노이즈 특성을 나타내었다. 설계된 push-push 발진기는 정합회로 수정을 통해 77 GHz 자동차용 레이더 시스템의 주파수 발진기로, 그리고 주파수 체배기를 이용하여 향후 D-대역 응용에도 사용 가능하다.

Acknowledgments: 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.

참고 문헌

[1] S.-W. Kim, K.-M. Lee, J.-H. Lee, and K.-S. Seo, "High-performance 0.1- μ m In_{0.4}AlAs/In_{0.35}GaAs MHEMTs with Ar plasma treatment," *IEEE Electron Device Lett.* vol. 26, no. 11, Nov., 2005, pp. 787-789.

[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 μ m InAlAs/InGaAs metamorphic HEMT technology," *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 18, pp. 1005-1006, Sept., 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, July, 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- μ 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, 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, 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.