

웨이퍼상 D-대역 회로의 3차 상호 변조 왜곡 측정

On-Wafer 3rd-Order Intermodulation Distortion Measurement of a D-Band Circuit

장 정 호 · 김 재 관 · 서 문 교

Jeongho Jang · Jaegwan Kim · Munkyo Seo

요 약

본 논문은 웨이퍼상의 D-대역(110~170 GHz) 회로의 3차 상호 변조 왜곡(IMD3: 3rd-order intermodulation distortion) 성분의 측정법에 대해 제안한다. 독립된 두 개의 D-대역 신호원을 도파관 방향성 결합기로 결합하여 2-tone을 생성하고, 주파수 하향 변환 혼합기와 감쇠기를 이용하여 셋업이 DUT(device under test)의 IMD3 측정에 미치는 영향을 최소화하였다. D-대역 시제품 전력 증폭기 칩의 기본 주파수 성분과 IMD3 성분의 전력을 측정하였으며, 셋업에서 생성된 IMD3의 크기와 비교하여 신뢰성을 높였다.

Abstract

In this paper, we propose a method for measuring the third-order intermodulation distortion (IMD3) components of circuits in the D-band (110~170 GHz) on wafers. Two independent D-band signal sources were combined using a directional coupler to generate a two-tone signal. Frequency downconversion mixers and attenuators were used to minimize the impact of the setup on IMD3 measurements of the device under test. The powers of both the fundamental frequency and IMD3 components of a D-band prototype power amplifier chip were measured which enhanced the reliability by comparing with the magnitude of the IMD3 generated in the setup.

Key words: IMD3, IP3, D-Band Measurement, 2-Tone Test, Linearity

I. 서 론

D-대역(110~170 GHz)은 사용 가능한 넓은 주파수 대역으로 무선통신의 요구 전송률이 증가함에 따라 6G 통신의 강력한 주파수 후보로 떠오르고 있다^[1].

높은 데이터 전송률을 위해서는 대역폭이 넓은 고차 변조 신호들의 사용이 요구된다. 고차 변조 신호들은 최

대전력 대 평균전력 비(PAPR, peak-to-average power ratio)가 높으며, 해당 전력 구간에서 높은 선형성을 충족해야 통신 성능을 만족할 수 있다. 비선형성으로 인한 상호 변조 왜곡 성분 중 3차 항에 의해 주로 발생하는 IMD3(3rd-order intermodulation distortion) 성분들은 여과기로 제거되기 쉽지 않고, 본 신호 및 다른 채널로의 잡음이 된다^{[2]~[4]}. 이러한 IMD3 성분은 일반적인 2-tone 테스트로 측정이

「본 연구는 IDEC에서 EDA Tool을 지원받아 수행하였음.

「본 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021-0-00198, 저전력 MIMO 및 고효율 공강합성 QAM 기반 6G RF 전단 핵심기술개발).

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

· Manuscript received March 22, 2024 ; Revised April 4, 2024 ; Accepted April 15, 2024. (ID No. 20240322-028)

· Corresponding Author: Munkyo Seo (e-mail: mkseo@skku.edu)

가능하다. 2-tone 신호 발생이 가능한 상용 장비로는 Keysight사의 AWG M8199B(최대주파수 80 GHz), Tektronix사의 AWG70001B(최대주파수 20 GHz), Rohde & Schwarz사의 SMW200A(최대주파수 67 GHz) 등이 있다. 하지만 D-대역은 상용 장비의 부재로 인한 별도 측정 셋업의 구성이 필수적이다. D-대역 전력증폭기와 관련된 대부분의 논문들에서는 IMD3 측정을 하지 않거나^{[5]~[19]}, 저주파에서 생성된 2-tone 신호를 주파수 혼합기로 상향 변환하는 방식을 이용하거나^{[20],[21]}, 저주파의 변조 신호를 주파수 혼합기로 상향 변환하여 EVM(error vector magnitude) 등의 다른 지표로 선형성을 평가한다^{[22]~[24]}. 그림 1은 D-대역 2-tone 신호 생성을 위해 가능한 셋업 방식이다. 그림 1(a)는 저주파의 2-tone 신호를 주파수 혼합기로 상향 변환하여 D-대역 신호를 생성하는 방식으로 앞서 발표된 논문들^{[20]~[24]}이 이에 해당한다. 이 방법은 저주파 신호

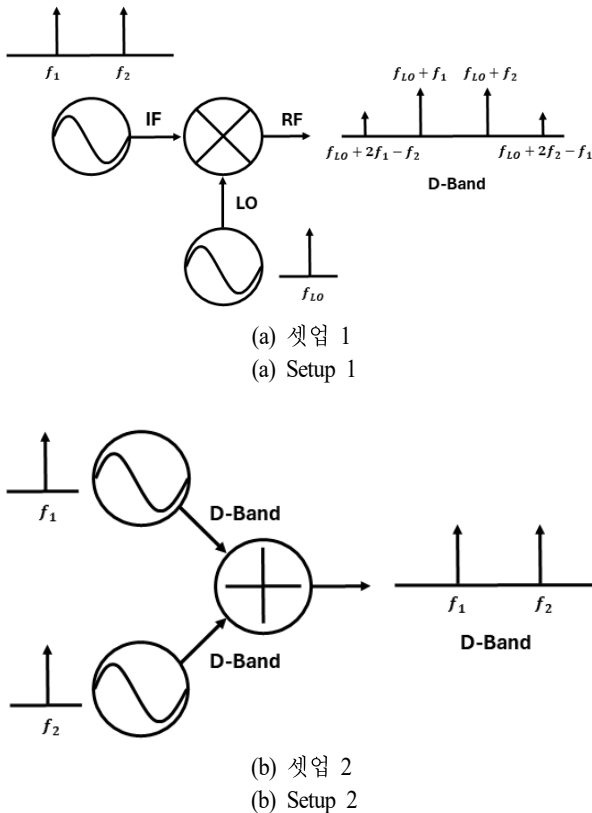


그림 1. D-대역 2-tone 신호 생성 셋업
Fig. 1. Setup to generate D-band 2-tone signal.

생성에 상용 장비를 사용할 수 있다는 장점이 있으나, 주파수 상향을 위한 혼합기에서 발생하는 IMD3 성분이 DUT(device under test)의 선형성 평가에 영향을 미칠 수 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 그림 1(b)와 같이 2개의 D-대역 단일 주파수 신호를 각각 생성하여 방향성 결합기로 합성하는 방식을 사용하였는데, 측정시스템 자체에서 발생하는 IMD3 성분이 주파수 혼합기 사용 대비 낮은 장점이 있다.

본 논문에서는 D-대역 증폭기의 웨이퍼상 IMD3 측정시스템의 구성 및 고려 사항에 대해 다루고, 제안한 셋업을 이용해 D-대역 전력증폭기 시제품 칩의 IMD3 성분을 측정하였다.

II. D-대역 IMD3 측정시스템 구성

D-대역의 IMD3 측정을 위해서는 DUT 입력에 인가할 D-대역 2-tone 신호 발생부와 DUT 출력을 스펙트럼 측정이 가능한 낮은 주파수로 변환하는 하향 변환부가 필요하다. 각 구성 부에 대해 다음 절에 상세히 서술한다.

2-1 신호 발생부

그림 2는 D-대역 IMD3 측정을 위한 신호 발생부의 구성도이다. 두 개의 신호 발생 모듈에서 주파수가 다른 단일 주파수 신호를 먼저 생성한 후, 도파관 방향성 결합기를 이용해 결합하는 구조이다. 각각의 신호 발생 모듈은 주파수 가변이 가능한 D-대역 신호원으로 구성할 수 있으며, 본 논문에서는 VDI사의 D-대역 6-체배 송신기 모듈 WR6.5SGX-M과 12-체배 신호원 확장 모듈 WR6.5-VNAX를 사용했다. D-대역 6-체배 송신기 모듈의 국부 발진 신호원으로는 Keysight사의 신호 발생기 MXG N5183B를 사용하였고, 모듈의 사용자 설정 가변 감쇄 기능(UCA, user control attenuator)을 사용하기 위해 Keysight사의 DC 전원 공급기 E36312A를 사용했다. D-대역 12-체배 신호원 확장 모듈의 국부 발진 신호원으로는 Keysight사의 회로망 분석기 PNA-X N5244B를 사용하였다. 그림 2의 모든 D-대역 구성 부품을 프로브 암(probe arm)에 장착하기 위해 90도 꼬인(twisted) 도파관을 사용했다. Two-tone 신호 각각의 전력은 WR6.5-VNAX에 내장된 가변 감쇠기와

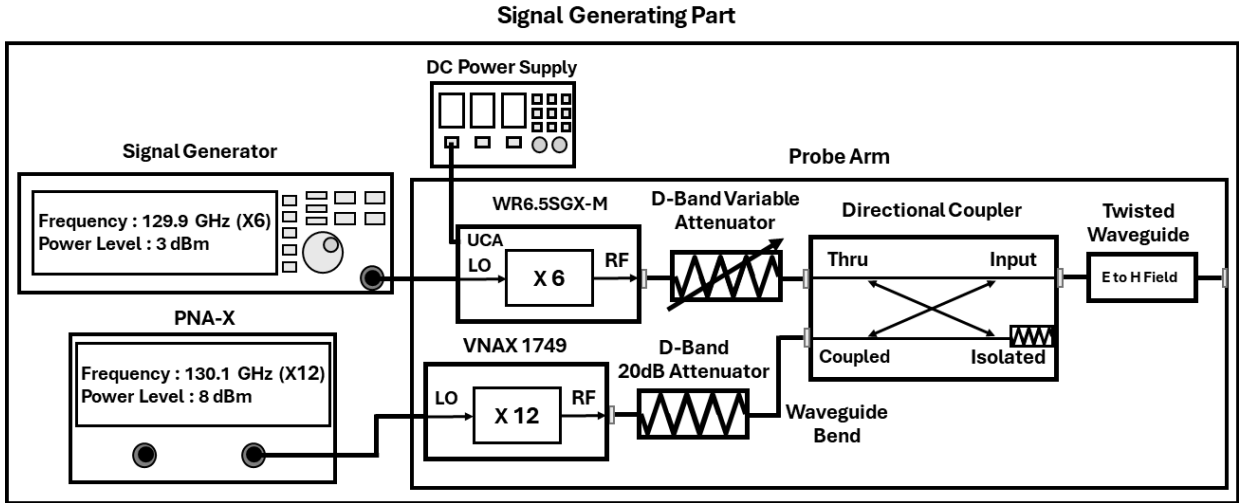


그림 2. D-대역 IMD3 측정시스템 신호 발생부 구성도

Fig. 2. Configuration of signal generating part in D-band IMD3 measurement system.

WR6.5SGX-M 출력단의 가변 감쇠기로 개별 설정이 가능하다. 또한, 각 신호원의 출력단 감쇠기는 상호간의 격리도를 증가시켜 측정시스템 자체의 IMD3 성분 발생을 최소화하는 역할도 한다. 위 셋업으로 가능한 2-tone의 전력 조절 범위는 $-37.1 \sim -11.2$ dBm이며, 이는 다음절에 설명할 신호 하향 변환부를 통해 측정되었다.

2.2 하향 변환부

그림 3은 D-대역 IMD3 측정시스템의 하향 변환부 구성도로, DUT의 출력은 VDI사의 D-대역 수신기 모듈

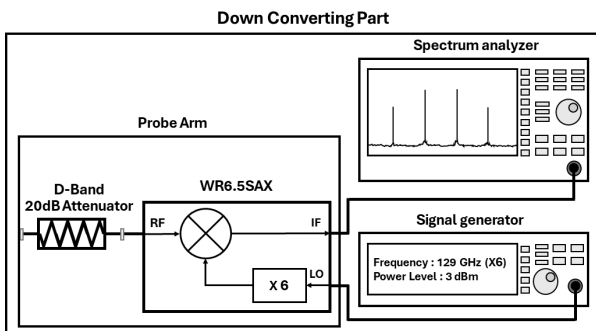


그림 3. D-대역 IMD3 측정시스템 하향 변환부 구성도

Fig. 3. Configuration of down-converting part in D-band IMD3 measurement system.

WR6.5SAX를 통해 하향 변환하여 Rohde & Schwarz사의 스펙트럼 분석기를 통해 측정된다. D-대역 20 dB 감쇠기는 하향 변환부의 가장 앞단에 위치하여 하향 변환부 자체에서의 IMD3 발생을 최소화하며, 또한 수신기 모듈이 선형 영역에서 동작할 수 있도록 한다. 별도의 셋업을 통하여 주파수에 따른 하향 변환부 전체의 변환 손실을 측정하였다.

2.3 IMD3 측정시스템 검증

그림 4는 신호 발생부와 하향 변환부를 직접 연결한 측정 셋업으로, 신호 발생부의 검증 및 측정 장비 자체에서 발생하는 IMD3 성분의 확인이 목적이다. 본 논문의 D-대역 2-tone 테스트에서는 129.1 GHz와 130.1 GHz의 기본 주파수(fundamental frequency)를 이용하였다.

신호 발생부의 가변 감쇠기를 각각 조절하며, 하향 변환부의 출력을 측정함으로써 신호 발생부의 2-tone 출력 전력을 원하는 값이 되게 설정할 수 있다. 신호 발생부 가변 감쇠기의 각 설정값에 따른 2-tone 출력 전력을 모두 측정한 후, 이를 다음 장의 DUT의 IMD3 선형성 측정 시 이용하였다.

그림 4의 셋업으로 기본 주파수 성분뿐만 아닌 IMD3 주파수 성분에 해당하는 129.7 GHz, 130.3 GHz의 출력 전

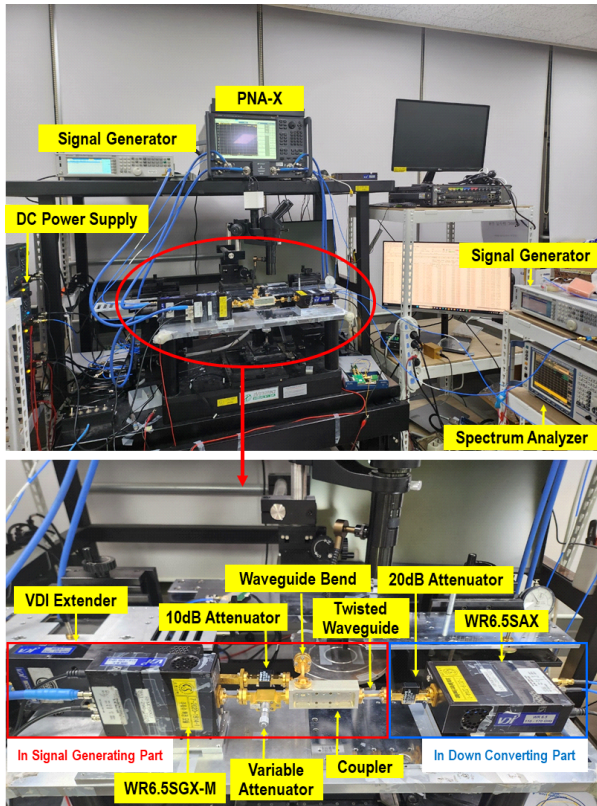


그림 4. D-대역 IMD3 측정시스템 검증 셋업
Fig. 4. Setup of D-band IMD3 measurement system certification.

력도 함께 측정하였는데, 이는 측정시스템에서 자체 발생하는 IMD3 성분으로 실제 DUT 측정 시 일종의 배경잡음 (background noise)과 유사한 역할을 한다. 하향 변환부의 입력 전력은 -14.3 dBm, -11.1 dBm일 때 측정시스템에서 발생한 IMD3는 각각 -88.3 dBm, -78.4 dBm으로 측정되었고, 이는 실제 DUT의 2-tone 테스트 시 측정 가능한 최소 IMD3로 볼 수 있다.

III. D-대역 전력 증폭기 측정 결과

II 장의 IMD3 측정시스템을 이용하여 그림 5 및 그림 6의 CMOS 기반 D-대역 4단 전력 증폭기^[25]의 선형성을 측정하였다. 해당 증폭기는 교차 결합 커패시터를 사용한 4단 차동 공통 소스 구조로 설계되었고, 모든 임피던스 정합은 트랜스포머와 트랜스포머 기반 발룬을 사용하여

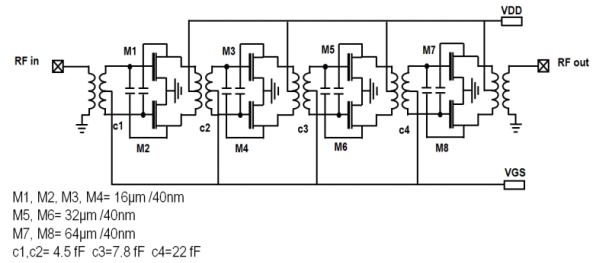


그림 5. 130 GHz 전력 증폭기 회로도
Fig. 5. Schematic of the 130 GHz power amplifier.

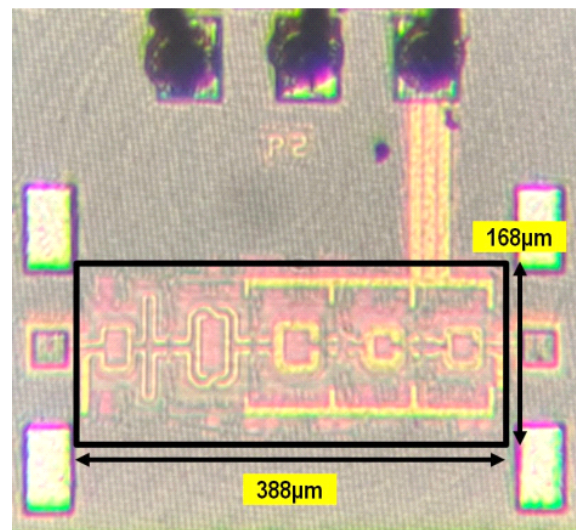


그림 6. 130 GHz 전력 증폭기의 칩 사진
Fig. 6. Chip micrograph of the 130 GHz power amplifier.

구현되었다. DUT는 그림 7의 셋업을 이용하여 129.9 GHz, 130.1 GHz에서의 2-tone 테스트를 진행하였다. 프로브는 Infinity사의 I170-T-GSG-100-BT가 사용되었다.

그림 8은 하향 변환부 출력에서 측정한 스펙트럼인데, 0.2 GHz 간격의 두 기본 주파수 성분 및 0.6 GHz 간격의 IMD3 성분을 확인할 수 있다. 신호 발생부의 전력을 가변하며 2-tone 테스트를 진행하였고, 그 측정 결과를 그림 9에 시뮬레이션과 같이 비교하였다. 측정 결과는 시뮬레이션 결과에 비해 기본 주파수의 경우 평균적으로 약 2.3 dB 높게, IMD3의 경우 약 10.4 dB 높게 측정되었는데, 그 차이는 레이아웃 기생성분의 모델링 오차, 트랜지스터의 비선형성 모델링 오차, 공정 편차 등에 기인한 것으로 여겨진다. 그림 9에서 보듯이 DUT의 측정된 IMD3는 셋업

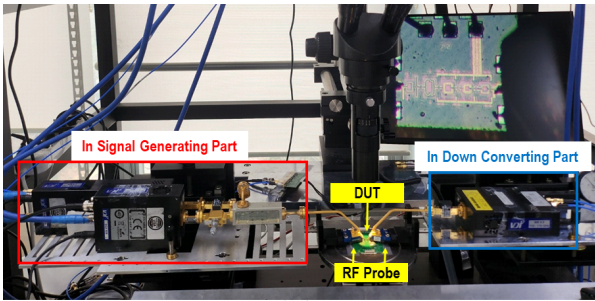
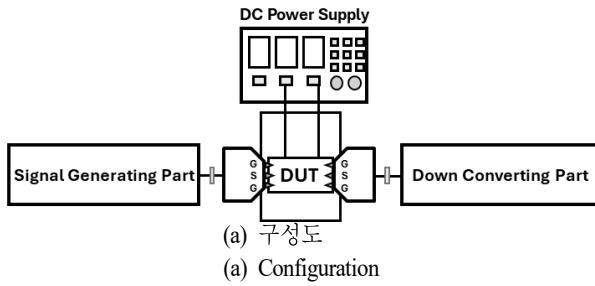


그림 7. D-대역 전력 증폭기의 IMD3 측정 셋업
Fig. 7. IMD3 test-setup for D-band power amplifier.

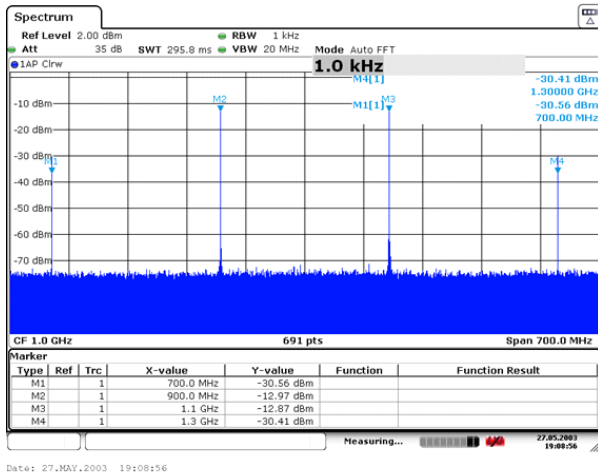


그림 8. 하향변환부 출력 스펙트럼 측정 결과(입력전력=-20.9 dBm)
Fig. 8. Measured spectrum at the down-converter output (Input power=-20.9 dBm).

자체의 배경 IMD3보다 약 20 dB 높아서 선형성 측정 결과의 정확성을 유추할 수 있다(예상 오차 약 0.07 dB).

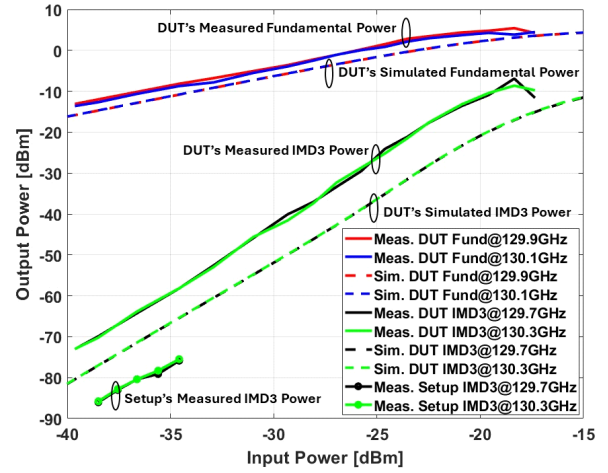


그림 9. D-대역 전력 증폭기 2-tone 측정 결과
Fig. 9. Measured 2-tone test results of D-band power amplifier.

IV. 결 론

본 논문에서는 D-대역 능동회로의 웨이퍼상 IMD3 측정을 위한 테스트 셋업을 제안하고, D-대역 전력 증폭기 시제품 칩의 130 GHz 2-tone 테스트에 사용하였다.

제안한 측정 셋업에서는 두 개의 별도 D-대역 신호원을 방향성 결합기로 합성하여 2-tone 신호를 생성하였는데, 낮은 주파수의 2-tone 신호를 먼저 생성하고, D-대역으로 상향 변환하는 방식에 비해 셋업 자체에서 발생하는 IMD3 성분이 상대적으로 낮은 장점이 있다.

본 논문에서 제안한 2-tone 측정 셋업은 최근 차세대 통신·레이더·센싱 등의 응용으로 매우 활발한 연구가 진행되고 있는 D-대역 회로의 선형성 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. Xing, T. S. Rappaport, "Propagation measurement system and approach at 140 GHz-moving to 6G and above 100 GHz," in *2018 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM)*, Abu Dhabi, Dec. 2018, pp. 1-6.
- [2] S. C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communi-*

- ations, 2nd ed. Boston, MA, Artech House, pp. 286-290, 2006.
- [3] S. C. Cripps, *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*, Boston, MA, Artech House Microwave Library, 2002.
- [4] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design*, 2nd ed. Bellevue, DC, Prentice-Hall, 1997.
- [5] X. Wang, Y. Li, W. Yu, and X. Lv, "A compact 4-way 4-stage 130~160 GHz D-band power amplifier in 0.5 μm InP DHBT," in *2022 IEEE MTT-S International Wireless Symposium*, Harbin, Aug. 2022, pp. 1-3.
- [6] J. S. C. Chien, J. F. Buckwalter, "A compact, 114-GHz, high-efficiency power amplifier in a 250-nm InP HBT process," in *2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, Denver, CO, Jun. 2022, pp. 452-455.
- [7] E. Lam, K. Ning, A. S. H. Ahmed, M. Rodwell, and J. F. Buckwalter, "A multi-stage 19.2-dBm, 30.4%-PAE D-band power amplifier in a 250-nm InP HBT process," in *2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, San Diego, CA, Jun. 2023, pp. 1042-1045.
- [8] Z. Yan, J. Chen, Z. Chen, D. Tang, Z. Li, and R. Zhang, et al., "A D-band power amplifier with 60-GHz large-signal bandwidth and 7.6% peak PAE in 28-nm CMOS," *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, to be published. doi: 10.1109/LMWT.2024.3380441
- [9] Z. Griffith, M. Urteaga, P. Rowell, and L. Tran, "A 15 0~175-GHz 30-dB S_{21} power amplifier with 125-mW P_{out} and 16.2 % PAE using InP HBT," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 6, pp. 559-562, Jun. 2022.
- [10] E. Lam, K. Ning, A. Ahmed, M. Rodwell, and J. Buckwalter, "A 2-stage, 140-GHz class-B power amplifier achieving 22.5 % PAE at 17.3 dBm in a 250-nm InP HBT technology," in *2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, Denver, CO, Jun. 2022, pp. 448-451.
- [11] İ. K. Aksoyak, M. Möck, M. Kaynak, and A. Ç. Ulusoy, "A-band power amplifier with four-way combining in 0.13- μm SiGe," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 11, pp. 1343-1346, Nov. 2022.
- [12] A. Moradinia, S. G. Rao, and J. D. Cressler, "A SiGe HBT D-band LNA utilizing asymmetric broadside coupled lines," *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, vol. 33, no. 6, pp. 707-710, Jun. 2023.
- [13] K. Kim, J. Kang, K. Lee, S. U. Choi, J. Kim, and H. J. Song, "A 115.7~139.7 GHz amplifier with 19.7 dB peak gain and 7.9 dB NF in 40-nm CMOS," in *2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, San Diego, CA, Jun. 2023, pp. 48-51.
- [14] L. John, T. Merkle, A. Leuther, and J. Chung, "Multi-channel PA, LNA, and switch MMICs for beam-switching applications at 160 GHz, based on an InGaAs mHEMT technology," in *2023 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium(BCICTS)*, Monterey, CA, Oct. 2023, pp. 284-287.
- [15] Z. Griffith, M. Urteaga, P. Rowell, and L. Tran, "A 15 0~175 GHz 30-dB S_{21} G-band power amplifier with 0.25-W P_{out} and 15.7% PAE in a 250-nm InP HBT technology," in *2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, Denver, CO, Jun. 2022, pp. 444-447.
- [16] J. Zhang, Y. Wang, Y. Chen, J. Ren, and S. Ma, "A 124-to-152-GHz power amplifier exploiting Chebyshev-type two-section wideband and low-loss power-combining technique in 28-nm CMOS," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, no. 5, pp. 1852-1865, May 2023.
- [17] H. R. Jeon, D. W. Park, and S. G. Lee, "A D-band differential amplifier with cross-couple of series-connected capacitor and transmission line-based dual-frequency Gmax-core," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, to be published. doi: 10.1109/TCSII.2024.3358808

- [18] L. Zhang, K. Ma, H. Fu, Y. Wang, K. Wang, and F. Meng, et al., "A compact 140-GHz power amplifier with 15.4-dBm P_{sat} and 14.25% peaking PAE in 28-nm bulk CMOS process," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, to be published. doi: 10.1109/TMTT.2023.3322742
- [19] J. Kim, C. G. Choi, K. Lee, K. Kim, S. U. Choi, and H. J. Song, "A broadband D-band dual-peak Gmax-core amplifier with a T-shaped embedding network in CMOS," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, no. 5, pp. 1866-1876, May 2023.
- [20] M. Sayginer, M. Holyoak, M. Zierdt, M. Elkhoully, J. Weiner, and Y. Baeyens, et al., "A 110~170 GHz phase-invariant variable-gain power amplifier module with 20~22 dBm P_{sat} and 30 dBm OIP3 utilizing SiGe HBT RFICs," in *2023 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium(RFIC)*, San Diego, CA, Jun. 2023, pp. 305-308.
- [21] S. Li, G. M. Rebeiz, "High efficiency D-band multiway power combined amplifiers with 17.5~19-dBm P_{sat} and 14.2~12.1 % peak PAE in 45-nm CMOS RFSOI," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 57, no. 5, pp. 1332-1343, May 2022.
- [22] X. Li, W. Chen, H. Wu, S. Li, X. Yi, and R. Han, et al., "A 110-to-130 GHz SiGe BiCMOS Doherty power amplifier with a slotline-based power combiner," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 57, no. 12, pp. 3567-3581, Dec. 2022.
- [23] X. Tang, J. Nguyen, G. Mangraviti, Z. Zongm, and P. Wambacq, "Design and analysis of a 140-GHz T/R front-end module in 22-nm FD-SOI CMOS," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 57, no. 5, pp. 1300-1313, May 2022.
- [24] S. Gielen, Y. Zhang, M. Ingels, and P. Reynaert, "A D-band 20.4 dBm OP1dB transformer-based power amplifier with 23.6% PAE in A 250-nm InP HBT technology," in *2023 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium(RFIC)*, San Diego, CA, Jun. 2023, pp. 309-312.
- [25] J. Kim, C. Lee, and M. Seo, "A 130-GHz low-area power amplifier in 40-nm CMOS," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 4, Apr. 2023, pp. 310-316.

장 정 호 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0004-8268-9135>



2022년 8월: 충남대학교 전자정보통신공학과 (공학사)

2022년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정

[주 관심분야] RF, Integrated Circuit, Milimeter-Wave, Sub-THz 등

서 문 교 [성균관대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0691-1783>



1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1996년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

2007년 12월: University of California, Santa Barbara, USA (공학박사)

2009년~2013년: Teledyne Scientific Company, USA, Senior Engineer

2013년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 부교수

[주 관심분야] Milimeter-Wave & Terahertz IC Design

김 재 관 [성균관대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0009-0004-4311-6086>



2021년 2월: 순천향대학교 전자공학과 (공학사)

2023년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)

2023년 9월~현재: 성균관대학교 반도체융합공학과 박사과정

[주 관심분야] RF Integrated Circuit,

Milimeter-Wave, Power Amplifier, CMOS 등