

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.4.67
JIIBC 2022-4-10

GaN/Si 기반 60nm 공정을 이용한 고출력 W대역 전력증폭기

High Power W-band Power Amplifier using GaN/Si-based 60nm process

황지혜*, 김기진*, 김완식**, 한재섭**, 김민기**, 강봉모**, 김기철***, 최증원***, 박주만***

Ji-Hye Hwang*, Ki-Jin Kim*, Wan-Sik Kim**, Jae-Sub Han**, Min-Gi Kim**,
Bong-Mo Kang**, Ki-chul Kim***, Jeung-Won Choi***, Ju-man Park***

요약 본 논문에서는 60 nm GaN/Si HEMT 공정을 사용하여 전력증폭기(Power Amplifier)의 설계를 제시하였다. 고주파 설계를 위하여 맞춤형 트랜지스터 모델을 구성하였다. Output stage는 저손실 설계를 위해 마이크로스트립 라인을 사용하여 회로를 구성하였다. 또한 RC 네트워크로 구성된 Bias Feeding Line과 Input bypass 회로의 AC Ground(ACGND) 회로를 각각 적용하여 DC 소스에 연결된 노드의 최소임피던스가 RF회로에 영향을 미치지 않도록 하였다. 이득과 출력을 고려하여 3단의 구조로 설계되었다. 설계된 전력증폭기의 최종 사이즈는 $3900 \mu\text{m} \times 2300 \mu\text{m}$ 이다. 중심 주파수에서 설계된 결과는 12 V의 공급 전압에서 15.9 dB의 소 신호 이득, 29.9 dBm의 포화 출력(Psat), 24.2 %의 PAE를 달성하였다.

Abstract This study presents the design of power amplifier (PA) in 60 nm GaN/Si HEMT technology. A customized transistor model enables the designing circuits operating at W-band. The all matching network of the PA was composed of equivalent transformer circuit to reduce matching loss. And then, equivalent transformer is several advantages without any additional inductive devices so that a wideband power characteristic can be achieved. The designed die area is $3900 \mu\text{m} \times 2300 \mu\text{m}$. The designed results at center frequency achieved the small signal gain of 15.9 dB, the saturated output power (Psat) of 29.9 dBm, and the power added efficiency (PAE) of 24.2% at the supply voltage of 12 V.

Key Works : GaN, HEMT, Power, Amplifier, W-Band

1. 서 론

현재 연방통신위원회(FCC)는 71-76GHz, 81-86GHz 및 92-95GHz 대역의 스펙트럼을 미국의 고밀도 고정

무선 서비스에 사용할 수 있다고 규정하였다. 13GHz의 주파수는 FCC가 승인한 주파수 대역의 양을 20% 증가 시키며 전체 셀룰러 주파수의 50배에 해당한다. 70GHz 와 80GHz에서 5GHz의 대역폭을 사용할 수 있고

*정희원, 한국전자기술연구원

**정희원, IIG넥스원(주)

***정희원, 국방과학연구소

접수일자 2022년 6월 16일, 수정완료 2022년 7월 16일
게재확정일자 2022년 8월 5일

Received: 16 June, 2022 / Revised: 16 July, 2022 /

Accepted: 5 August, 2022

*Corresponding Author: jh93322@keti.re.kr

Korea Electronics Technology Institute, Korea.

90GHz에서 3GHz의 대역폭을 사용할 수 있기 때문에 기가비트 및 더 큰 데이터 속도는 상당히 간단한 무선 아키텍처로 쉽게 수용할 수 있게 된다. 널리 사용되는 마이크로파 대역의 전파 특성보다 약간 더 나쁘고, 강우 페이드를 이해할 수 있는 잘 특성화된 날씨 특성으로, 수 마일의 링크 거리를 보다 확실하게 실현할 수 있다. 또한 FCC는 새로운 면허 제도를 허용하여 잠재 사용자에게 저렴하고 빠른 할당을 허용할 수 있도록 규정하였다^[1]. 본 논문에서는 화합물 반도체인 GaN 공정을 이용하여 고효율 전력 증폭기를 설계하였다.

II. 회로설계 및 성능

1. 설계

본 논문에서는 Ommic의 GaN 공정을 이용하여 고효율 전력증폭기를 설계하였다. 최종 Transistor 사이즈는 Thermal degradation을 고려하여 $160\ \mu\text{m} \times 2$ 로 선정하였으며, 레이아웃 형태는 이득 및 출력을 고려한 3단 캐스케이드 구조로 그림 1. 과 그림 2.에 나타내었다. 최종단계의 출력 특성과 입출력 임피던스 특성을 확인하기 위한 로드-풀(Load-pull) 시뮬레이션 결과에서 출력은 25.46 dBm, PAE (Power-additive efficiency)는 33.05 %의 값을 갖는 것을 확인하였다. Output Stage는 저손실 설계를 위해 마이크로스트립 라인을 사용하여 회로를 구성되었다. 또한 RC 네트워크로 구성된 Bias Feeding Line과 Input bypass 회로의 ACGND 회로를 각각 적용하여 DC 소스에 연결된 노드의 최소 임피던스가 RF 회로에 영향을 미치지 않도록 하였다.

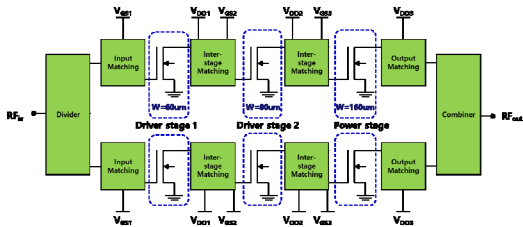


그림 1. W-대역 전력 증폭기 구조
Fig. 1. The Structure of W-Band Power Amplifier

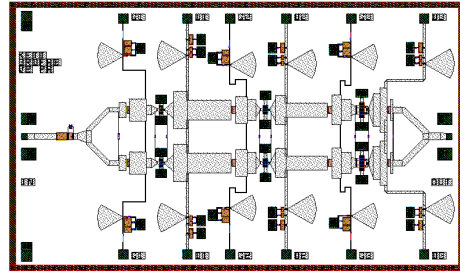


그림 2. W-대역 전력 증폭기 레이아웃 TOP View
Fig. 2. The TOP view of W-Band Power Amplifier Layout

2. 시뮬레이션 결과

설계된 전력증폭기의 최대출력전력과 효율특성은 중심주파수에서 각각 27.8 dBm과 22.4 %로 확인되었다. 이는 그림 3. 과 그림 4.에서 확인할 수 있다. 전력증폭기의 설계된 대역폭은 78GHz부터 80GHz이다.

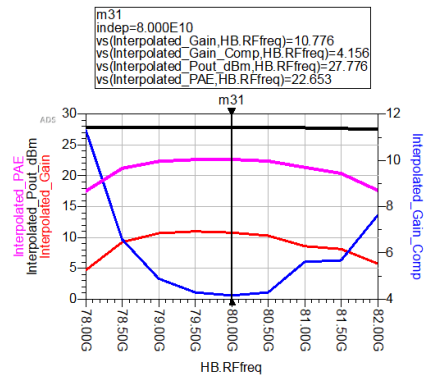


그림 3. 제안하는 전력 증폭기의 Interpolated characteristics

Fig. 3. Interpolated Characteristics of proposed power amplifier

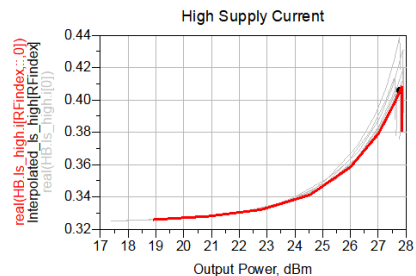


그림 4. 출력전력에 따른 PAE (Power-Added Efficiency) 특성

Fig. 4. The PAE according to output Power.

설계된 전력 증폭기의 소신호 응답 특성은 10-dB Impedance 이하로 매칭되었다. 증폭기의 소신호 이득 특성은 13.4 dB 이상, 반사 계수는 S11, S22 각각 -18.5 dB, -12.5dB 이상으로 그림 5.에서 볼 수 있다.

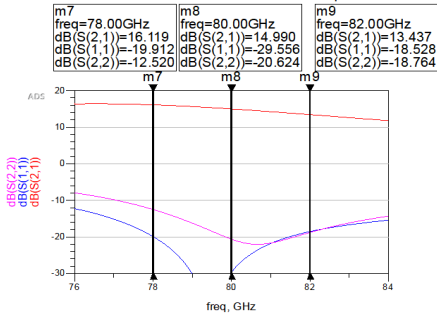


그림 5. 제안하는 전력 증폭기의 소신호 이득 특성
 Fig. 5. Small Signal Characteristics of proposed power amplifier.

III. 측정 및 분석

전력 증폭기를 측정하기 위해 칩을 측정 지그 위에 Eutectic Bonding 처리하였고, 칩에 바이어스를 인가해 주기 위해 DC 보드에 헤더핀과 저주파 발진 신호의 피드백을 방어하기 위한 회로를 집적하였다. 또한, 상기 전력 증폭기는 그림 6.과 같이 R&S사의 ZVA67 장비와 Z110 Frequency up-converter를 이용하여 측정되었다. P1dB와 Psat을 측정하기 위해 P1dB가 30 dBm인 Drive Amplifier를 사용하였고, 칩의 GSG 패드는 150 pitch probe를 이용하여 측정하였다. 측정된 소신호 응답 특성과 대신회 특성은 그림 7.-9.에서 확인할 수 있다.

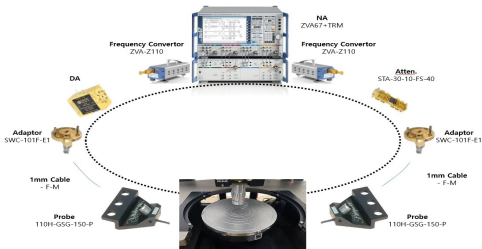


그림 6. W-대역 전력 증폭기 측정 환경
 Fig. 6. Measurement Environment of W-Band power amplifier

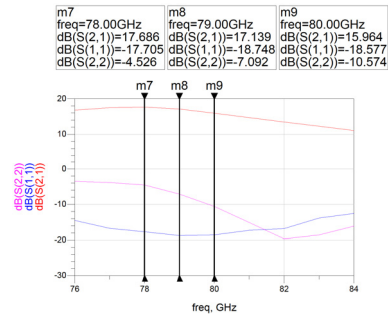


그림 7. 측정된 전력 증폭기 소신호 응답 특성
 Fig. 7. Measured small signal response characteristic of the power amplifier.

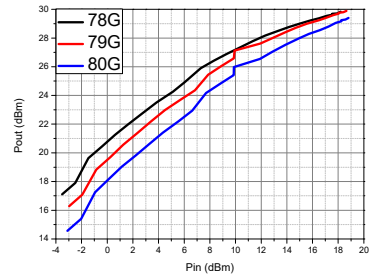


그림 8. 측정된 전력 증폭기 입-출력 특성
 Fig. 8. Measured input and output power characteristic of the power amplifier.

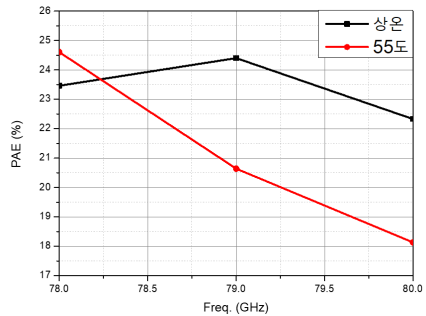


그림 9. 상온과 55°C에서 측정된 전력 증폭기의 최대 출력에서의 효율
 Fig. 9. The efficiency at the maximum output power of the power amplifier measured at room temperature and 55°C

소신호 이득 특성은 15.9dB보다 높은 특성을 보이고, 반사계수는 S11, S22 가 각각 대역내에서 -17.7 dB 와 -4.5 dB 이하로 나타낸다. 상온으로 측정된 최대출력

파워와 PAE는 중심주파수에서 각각 29.9 dBm과 24.2%로 확인되었다.

78GHz에서 80GHz까지의 측정값과 시뮬레이션값을 비교하여 표1로 작성하였다.

표 1. 측정된 전력 증폭기의 입-출력 특성 비교
Table 1. Measured And Simulation comparative table

Data	P _{SAT} (dBm)		PAE (%)		Gain (dB)		S11 (dB)		S22 (dB)	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
Freq (GHz)										
78	27.8	29.8	17.8	23.2	16.1	17.7	-20	-18	-13	-5
79	27.8	29.9	22.4	24.2	15.6	17.1	-30	-19	-15	-7
80	27.8	29.4	22.6	22.2	15.0	15.9	-30	-16	-21	-11

※ S : Simulation data, M : Measured data

IV. 결 론

본 논문에서는 Ommic사의 GaN/Si 공정을 이용하여 W대역에서의 고효율 전력 증폭기를 설계하였다. 설계된 GaN 전력증폭기는 2GHz 이상의 넓은 대역폭에서 출력 전력 29.4 dBm이상과 22.1%이상의 효율특성을 나타내며 THF(Tremendously High Frequency) 통신시스템에서 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] C. Y. Law and A. V. Pham, "A high-gain 60 GHz power amplifier with 20 dBm output power in 90 nm CMOS," 2010 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC), Vol. 23, No.2, pp. 426-427, 2010.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2010.5433882>

[2] Wu Shaobing ,Gao Jianfeng, Wang Weibo, Zhang Junyun "W-Band MMIC PA With Ultrahigh Power Density in 100-nm AlGaIn/GaN Technology," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 63, No. 10, pp. 3882-3886, 2016.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2016.2597244>

[3] A. Bessemoulin, M. Rodriguez, J. Tarazi, G. McCulloch, A. E. Parker, S. J. Mahon "Compact W-Band PA MMICs in Commercially Available 0.1-μm GaAs PHEMT Process," 2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), pp.1-4 2015.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/CSICS.2015.7314493>

[4] Pin-Pin Huang; Tian-Wei Huang; Huei Wang; E.W. Lin; Yonghui Shu; G.S. Dow; R. Lai; M. Biedenbender,

"A 94-GHz 0.35-W power amplifier module,"IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 45, No 12, pp. 2418-2423, 1997.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/22.643854>

[5] Zach Griffith, Miguel Urteaga, Petra Rowell, "A W-Band SSPA With 100-140-mW Pout , >20% PAE, and 26-30-dB S21 Gain Across 88-104 GHz," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol .30, No. 2, pp. 189-192, 2020.
 DOI:<https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.2964669>

[6] K. Datta and H. Hashemi, "High-breakdown, high-fmax multiport stacked-transistor topologies for the W-band power amplifiers," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 52, no. 5, pp. 1305-1319, May 2017.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/JSSC.2016.2641464>

[7] Z. Griffith, M. Urteaga, and P. Rowell, "A 140-GHz 0.25-W PA and a 55-135 mW PA: High-gain, broadband power amplifier MMICs in 250-nm InP HBT," IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Boston, MA, USA, pp.1245-1248, 2019.
 DOI:<https://doi.org/10.1109/MWSYM.2019.8701019>

[8] A. Brown, K. Brown, J. Chen, K. C. Hwang, N. Koliass, and R. Scott, "W-band GaN power amplifier MMICs," IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Baltimore, MD, USA, 2011.
 DOI:<https://doi.org/10.1109/MWSYM.2011.5972571>

[9] E. Camargo, J. Schellenberg, L. Bui, and N. Estrella, "F-band, GaN power amplifiers," IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Philadelphia, PA, USA, pp.753-756, 2018.
 DOI:<https://doi.org/10.1109/MWSYM.2018.8439280>

[10] Satoshi Masuda; Toshihiro Ohki; Kozo Makiyama; Masahito Kanamura; Naoya Okamoto; Hisao Shigematsu, "GaN MMIC amplifiers for W-band transceivers," IEEE European Microwave Integrated Circuits Conference, pp.443-446, 2009.

[11] Chandrakanth R. Chappidi; Kaushik Sengupta, "A W-band SiGe power amplifier with Psat of 23 dBm and PAE of 16.8% at 95GHz," IEEE MTT-S International Microwave Symposium, pp.1699-1702, 2017.
 DOI:<https://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8058968>

[12] S. Shopov et al., "A 19 dBm 15 Gbaud 9 bit SOI CMOS Power-DAC Cell for High-Order QAM W-Band Transmitters", IEEE Jour. Solid-State Circuits, Vol. 49, No. 7, pp. 1653-1664, 2014.
 DOI:<https://doi.org/10.1109/ESSCIRC.2013.6649074>

[13] C.R. Chappidi and K. Sengupta, "A frequency-reconfigurable mm-Wave power amplifier with active-impedance synthesis in an asymmetrical non-isolated combiner:Analysis and Design", IEEE ISSCC Dig. Tech. Papers, Feb. Vol. 52, No. 8 , pp.1990-2008, 2017.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/JSSC.2017.2686843>

[14] M. Micovic, A. Kurdoghlian, A. Margomenos, D. F. Brown, K. Shinohara, S. Burnham, I. Milosavljevic, R.

Bowen, A.J. Williams, P. Hashimoto, R. Grabar, C. Butler, A. Schmitz, P. J. Willadsen, D. H. Chow, "92-96 GHz GaN Power Amplifiers", IEEE IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2012.
 DOI:https://doi.org/10.1109/MWSYM.2012.6259572

- [15] Y. Nakasha, S. Masuda, K. Makiyama, T. Ohki, M. Kanamura, N. Okamoto, T. Tajima, T. Seino, K. Imanishi, T. Kikkawa and N. Hara, "E-Band 85-mW Oscillator and I.3W Amplifier IC's using 0.12- μ m GaN HEMTs for Millimeter-wave Transceivers," IEEE CSIC Symposium, 2010
 DOI: https://doi.org/10.1109/CSICS.2010.5619643
- [16] M. Micovic, A. Kurdoghlian, P. Hashimoto, M. Hu, M. Antcliffe, P. Willadsen, W. Wong, R. Bowen, I. Milosavljevic, A. Schmitz, M. Wetzel, D. H. Chow, "GaN HFET for W-band Power Applications", IEEE IEDM Dig., 2006
 DOI: https://doi.org/10.1109/IEDM.2006.346802
- [17] D.F. Brown, A. Williams, K. Shinohara, A. Kurdoghlian, I. Milosavljevic, P. Hashimoto, R. Grabar, S. Burnham, C. Butler, P. Willadsen, and M. Micovic, "W-Band Power Performance of AlGaIn/GaN DHFETs with Regrown n+ GaN Ohmic Cointacts by MBE", IEEE IEDM Dig., pp.19.3.1-19.3.4, 2011
 DOI: https://doi.org/10.1109/IEDM.2011.6131584
- [18] Joohwa Kim; Hayg Dabag; Peter Asbeck; James F. Buckwalter, "Q -Band and W -Band Power Amplifiers in 45-nm CMOS SOI", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques., Vol.60, No. 6, pp. 1870-1877, 2012
 DOI:https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2193593
- [19] Tae-Soon Yun "Compact Branch-line Power Divider Using Connected Coupled-line Structure", The Journal of The Institute of Internet, Broadcastong and Communication(IIBC), Vol.10 , No,3 , pp.109-114 , 2018
 DOI: https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.10.3.109

저 자 소 개

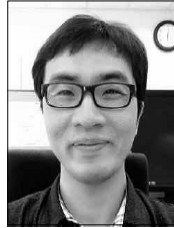
황 지 혜(정회원)



- 2018년 : 한서대학교 전자공학과 졸업
- 2021년 : 중앙대학교 전기전자공학과 석사 졸업
- 2017년 ~ 현재 : 한국전자기술연구원 (Korea Electronics Technology Institute)

- 주 관심분야 : RF circuits & communication systems, Power Amplifier Module (PAM), RFIC/MMIC, Front-Ended module(FEM).

김 기 진(정회원)



- 1996년 : 국민대학교 전자과 졸업
- 2004년 : 한국과학기술원 전기전자과 석사 졸업
- 2011년 : 한국과학기술원 전기전자과 박사 수료
- 2006년 ~ 현재 : 한국전자기술연구원 (Korea Electronics Technology Institute)

- 주 관심분야 : CMOS mm-Wave Circuit, Phase Locked Loop, RF system

김 완 식(정회원)



- 1991년 2월 : 건국대학교 전자공학 (공학사)
- 1993년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 건국대학교 정보통신공학과 (공학박사)
- 2001년 12월 : 고등기술연구원 책임연구원

- 2005년 8월 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 수석연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 회로설계, RF/밀리미터파 시스템, MMIC, 레이더 및 관련 센서 시스템

한 재 섭(정회원)



- 2005년 2월 : 숭실대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2020년 8월 : 연세대학교 통신방송공학 (공학 석사)
- 2007년 10월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야 : 레이더 시스템, RF H/W, MMIC

김 민 기(정회원)



- 2022년 2월 : 광운대학교 전자공학 (공학 석사)
- 2022년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 연구원
- 주 관심분야 : RF, MMIC, 레이더 시스템

강 봉 모(정회원)



- 2020년 2월 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 2022년 2월 : 서강대학교 전자공학과 석사
- 2022년 3월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 연구원
- 주 관심분야 : RF 집적회로 및 송수신 모듈 설계, 안테나 및 수동 회로 설계

김 기 철(정회원)



- 2011년 2월 : 광주과학기술원 (공학석사)
- 2016년 8월 : 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
- 2007년 1월 ~ 2008년 11월 : 삼성탈레스 연구원
- 2016년 10월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
- 주 관심분야 : RF 회로 및 전력증폭기, 통신용 초고주파 기술

최 증 원(정회원)



- 1989년 2월 : 충남대학교 계산통계학과 (이학사)
- 1993년 8월 : 충남대학교 계산통계학과(전산학) (이학석사)
- 1997년 8월 : 충남대학교 전산학과 (이학박사)
- 1997년 7월 ~ 현재 : 국방과학연구소 수석연구원
- 2013년 9월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 교수
- 주 관심분야 : Tactical Communications, Cognitive Radio, Satellite Communications, Datalink Systems

박 주 만(정회원)



- 2009년 2월 : 경남대학교 전자공학부 (공학사)
- 2011년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2012년 4월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
- 주 관심분야 : RF, 다중빔 안테나 시스템

※ 본 연구는 국방과학연구소 계약번호 UG200003ED에 의해서 지원된 과제로 수행되었습니다.