

0.2- μm GaN HEMT 공정을 이용한 고효율 10 W X-대역 MMIC 전력증폭기

High-Efficiency 10 W X-Band MMIC Power Amplifier in 0.2 μm GaN HEMT Technology

김 경 태 · 이 병 윤 · 김 준 형*

Gyeongtae Kim · Byungyoon Lee · Joonhyung Kim*

요 약

본 논문에서는 0.2 μm GaN HEMT(high electron mobility transistor) 공정을 사용하여 10 W 급 X-대역 3단 전력증폭기의 설계 및 제작 결과를 제시한다. 칩 크기 $4 \times 2 \text{ mm}^2$ 로 제작된 전력증폭기 MMIC(monolithic microwave integrated circuit)는 8~10.5 GHz 대역에서, 소신호 이득 28.5 dB, 40 dBm 이상의 최대 포화 전력과 최대 전력 부가 효율(PAE, power added efficiency) 51 %의 측정 결과를 보였다. 제작된 전력증폭기 MMIC는 항공기 탑재형 AESA(active electronically scanned array) 레이더를 포함한 고효율 X-대역 레이더 시스템의 전치단(front-end) 송신부에 적용할 수 있다.

Abstract

This study presents a 10 W-class X-band three-stage power amplifier using a 0.2 μm GaN HEMT (high electron mobility transistor) process. The power amplifier monolithic microwave integrated circuit (MMIC), fabricated with a chip size of $4 \times 2 \text{ mm}^2$, demonstrates a small-signal gain of 28.5 dB, a maximum saturated power exceeding 40 dBm, and a maximum power-added efficiency (PAE) of 51 % in the 8~10.5 GHz band. The fabricated power amplifier MMIC is applicable to the transmitter section of high-power X-band radar systems, including airborne active electronically scanned array (AESA) radars.

Key words: GaN HEMT, X-Band, Power Amplifier, MMIC, Odd-Mode Resistor

I. 서 론

X-대역은 레이더, 위성통신과 같은 고주파 응용 분야에서 널리 활용되고 있으며, 해당 대역에서 높은 출력 전력과 효율을 동시에 만족하는 전력증폭기는 시스템 성능을 결정하는 핵심적인 회로이다. 이러한 요구를 충족하기 위해 GaN HEMT(high electron mobility transistor)는 높은

항복 전압과 우수한 전력 밀도를 바탕으로 고주파·고출력 전력증폭기 설계에 적합한 소자로 주목받고 있다^[1]. X-대역과 같은 높은 주파수 영역에서 충분한 출력 전력을 확보하기 위해 X-대역 GaN HEMT MMIC 전력증폭기의 전력단은 여러 단위 셀을 전류 합성하는 구조가 일반적으로 적용된다. 이러한 전류 합성 구조에서 고효율과 고효율을 동시에 만족하기 위해 출력 매칭 네트워크는

충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University)

*충남대학교 반도체융합학과(Department of Semiconductor Convergence, Chungnam National University)

· Manuscript received December 24, 2025 ; Revised February 10, 2026 ; Accepted March 16, 2026. (ID No. 20251224-006S)

· Corresponding Author: Gyeongtae Kim (e-mail: gyytee@o.cnu.ac.kr)

각 단위 셀의 최적의 부하 임피던스를 전달하는 것은 물론, 저손실을 위하여 최소한의 집적 수동 소자로 구성되어야 한다. 본 논문에서는 최종 출력단 소자의 로드풀 데이터를 이용하여 최적 부하 임피던스를 도출하고, 단일 저역 통과 필터와 인덕터만을 이용한 고집적 출력 매칭 네트워크를 제안한다.

II. 제안하는 전력증폭기

2-1 전력증폭기의 Load-Pull Simulation

GaN HEMT는 소스 비아 형태에 따라 ISV(internal source via)과 OSV(outside source via)가 제공된다. 비아가 게이트 밖에 위치하는 OSV와 달리 ISV 구조는 소스 비아가 각 게이트 핑거 사이에 분포되어 있어, 소스 인덕턴스를 효과적으로 감소시킬 수 있으며 대면적 소자 스케일링 시에도 안정적인 고주파 특성 및 우수한 열 방출 성능을 제공한다. 이러한 ISV 구조의 스케일링 특성 및 모델링 차이에 관해서는 기존 연구에서 상세히 분석된 바 있으며, 특히 출력단과 같이 고출력 회로에서 유리하다고 검증된 바 있다^[2]. 본 논문에서는 해당 연구 결과를 바탕으로 최종 출력단 소자로 ISV 구조의 GaN HEMT를 선택하였다. 그림 1은 출력단 단위 소자의 특성을 분석하기 위한 9 GHz 대역의 로드풀 시뮬레이션 결과이다. 고출력과 고효율을 동시에 만족하기 위하여 최적 부하 임피던

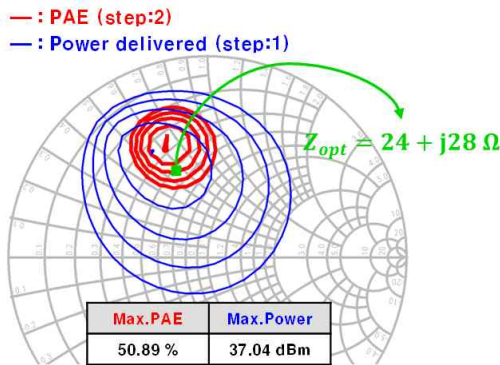


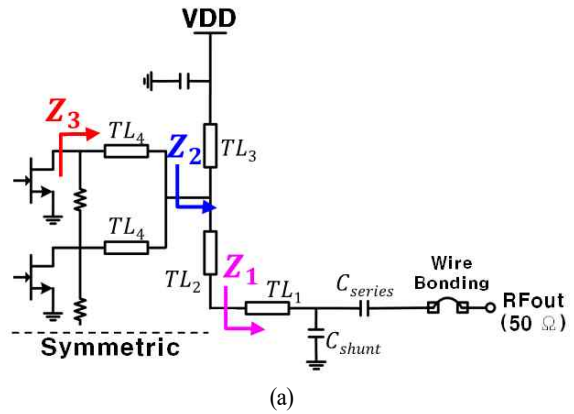
그림 1. 9 GHz에서의 8F125 μm GaN HEMT ISV 모델에 대한 로드풀 시뮬레이션 결과

Fig. 1. Load-pull simulation results of 8F125-μm GaN HEMT ISV model at 9 GHz.

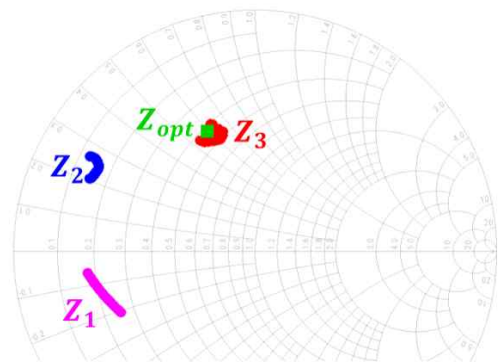
스는 $Z_{opt}=24+j28$ Ω로 선택하였으며, 이때 50.89 %의 PAE와 37.04 dBm의 출력 전력으로 얻었다.

2-2 전력증폭기의 매칭 네트워크

그림 2(a)는 제안된 출력 매칭 네트워크 회로 구조를 나타낸다. 로드풀 시뮬레이션을 통해 도출된 최적 부하 임피던스 Z_{opt} 를 기준으로 단계적인 임피던스 변환구조를 설계하였다. 그림 2(b)는 스미스 차트상에서의 임피던스 변환 경로를 나타낸다. 외부 50 Ω 부하는 wire bonding 및 직렬 커패시터(C_{series})를 거치며 1차적으로 변환되고, 이후 TL_1 와 병렬 커패시터(C_{shunt})로 구성된 저역통과필터를 통과하면서 스미스차트상에서 저임피던스 영역으로 이동



(a)



(b)

그림 2. (a) 제안된 출력 매칭 네트워크 구조 (b) 출력 임피던스 변환 경로

Fig. 2. (a) Proposed output matching network structure (b) Output impedance trajectory.

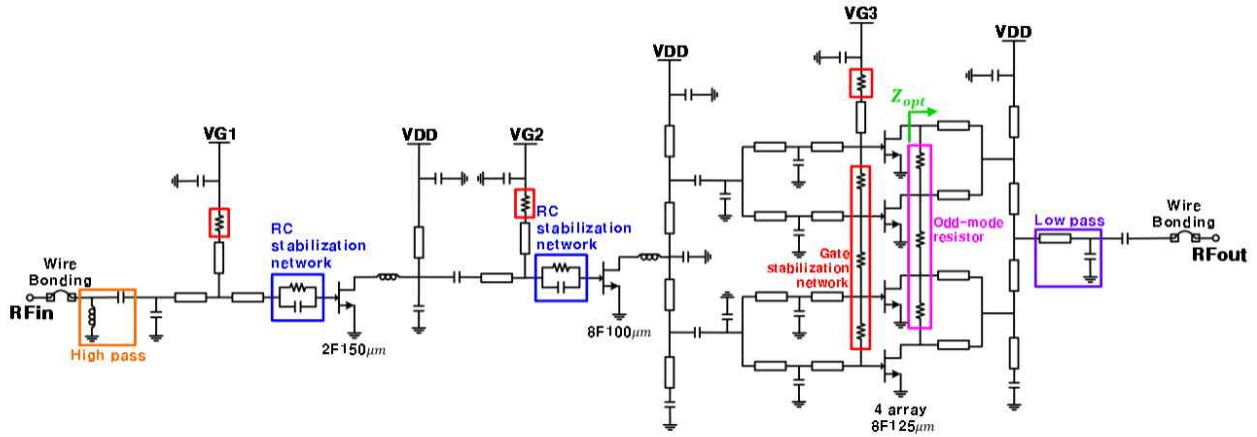


그림 3. 제안된 X-대역 GaN HEMT MMIC 전력증폭기의 회로도

Fig. 3. Schematic of the proposed X-band GaN HEMT MMIC power amplifier.

하여 Z_1 를 형성한다. 이때 형성된 Z_1 는 고주파 성분을 억제하면서 동시에 기본파에서 필요한 임피던스 크기와 위상을 조절하기 위한 중간 변환 지점이다. 이후 TL_2 및 TL_3 를 거치며 임피던스는 점진적으로 Z_2 를 형성하고, 최종적으로 TL_3 를 통해 1.2에서 도출된 Z_{opt} 근처의 Z_3 에 도달하도록 설계되었다. 이를 통해 제안된 출력 매칭 네트워크가 단계적으로 임피던스를 변환하여 최적 부하 조건을 구현함을 알 수 있다. 그림 3에 제안하는 X-대역 GaN HEMT MMIC 전력증폭기의 회로를 도시하였다. 출력 매칭 네트워크의 1 dB의 손실을 고려하여 출력 전력이 42 dBm@9 GHz 이상이 되도록 4개의 단위 소자가 출력단에 사용되었다. 본 설계에서는 출력단의 드레인 바이어스 라인의 인덕턴스를 출력 매칭 네트워크에 이용하여 단일 저역 통과 필터와 마이크로 스트립 라인으로 이루어진 간단한 출력 구조를 제안하여 단위 소자에 최적 부하 임피던스를 제공할 뿐 아니라 저손실 특성을 제공한다. 병렬로 연결된 출력 소자 간의 기생 모드 발생을 억제하기 위해 odd-mode 저항을 출력단에 삽입하였으며, 이를 통해 고출력 동작 시 안정도를 향상시켰다. 또한 와이어 본딩에 의해 발생하는 기생 인덕턴스를 직렬 커패시터를 이용하여 보상함으로써, 고주파 대역에서의 임피던스 변화를 최소화하였다. 입력단 및 중간단 매칭 네트워크에는 RC 회로를 적용하고 게이트 바이어스 노드에 직렬 저항을 사용하여 회로 안정도를 증가시켰다. 출력단의 저역 통과

주파수 특성과 반대되는 고역 통과 필터를 입력단 매칭 회로에 적용하여 제안된 전력증폭기는 8~10.5 GHz 균일한 이득 평탄도를 갖는 밴드 패스 주파수 특성을 제공한다.

III. 제작 및 측정 결과

그림 4(a)는 본 논문에서 설계한 X-대역 GaN HEMT MMIC 전력증폭기의 칩 사진을 나타내며, 제작된 칩의 크기는 4×2 mm이다. 제안된 전력증폭기는 Wavice 0.2- μm GaN HEMT 공정을 이용하여 제작되었으며, 측정을 위한 EVB는 그림 4(b)에 도시하였다. 제작된 시험 기판은 RO4350B를 이용하였으며 MMIC는 유테틱(cutetic) 공정

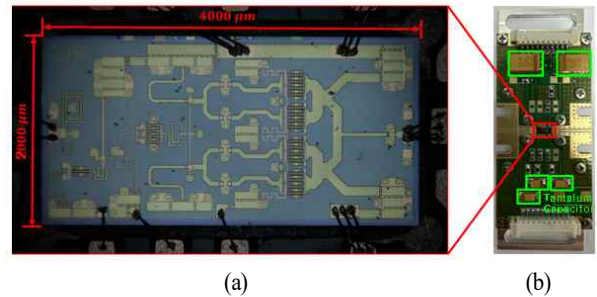


그림 4. (a) 제작된 전력증폭기 칩 사진 (b) 평가용 기판 (EVB) 및 시험 기구

Fig. 4. (a) Photograph of the fabricated power amplifier (b) Evaluation board (EVB) and test jig.

을 이용하여 시험 zig에 접합되어 시험 기관과 체결하여 측정되었다. 측정은 드레인 전압 28 V와 250 mA 동작 전류(I_{DQ})의 DC 바이어스 조건에서 수행되었다. 대신호 입 출력 특성 측정을 위해 입력 RF 신호는 200 μ sec의 펄스 폭, 20 %의 듀티비의 펄스 형태로 인가하였다. 그림 5는 전력증폭기의 소신호 측정 결과를 나타낸다. 측정 결과, 8~10.5 GHz 대역에서 25~28.5 dB의 소신호 이득을 확인했으며, 입력 반사계수와 출력 반사계수는 동작 대역에서 -10 dB 이하를 만족했다. 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 전반적으로 매우 유사한 경향을 보이며, 설계된 매칭 네트워크의 타당성을 확인할 수 있다. 그림 6은 9 GHz에서 측정된 전력 이득(power gain) 및 PAE를 출력 전력

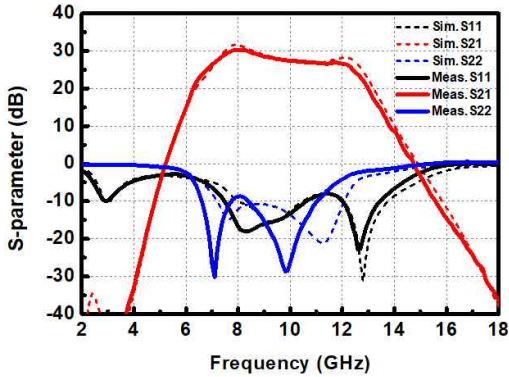


그림 5. 전력증폭기의 소신호 측정 결과
Fig. 5. Small-signal measurement results of MMIC PA.

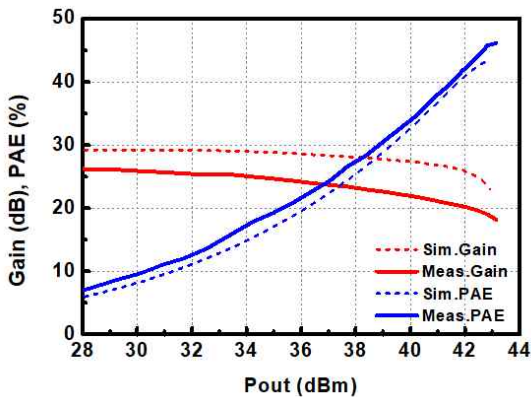


그림 6. 9 GHz에서 측정된 출력 전력에 따른 전력 이득 및 PAE
Fig. 6. Measured power gain and PAE versus output power at 9 GHz.

에 따라 결과를 나타내었다. 측정 결과, 증폭기의 전력 이득은 26 dB, 최대 PAE는 46 %로 측정되었다. 그림 7은 주파수에 따른 출력 전력 및 PAE 특성을 나타낸다. 측정 결과, 8~10.5 GHz 전 대역에서 40 dBm 이상의 출력 전력을 유지하였으며, 대역 전반에 걸쳐 40 % 이상의 효율 특성을 확인하였다. 그림 8은 제안된 전력증폭기의 안정성 계수를 주파수에 따라 나타낸 결과이다. 측정 결과, 동작 대역 주파수에서 K와 μ 가 모두 1 이상을 유지하는 것을 확인하였다. 이는 제안된 증폭기가 해당 대역에서 발진 가능성이 억제되었음을 의미한다. 특히, 중심 주파수 부근에서 충분한 안정도를 확보함으로써 고출력 동작 시에도 안정적인 동작이 가능함을 확인하였다. 표 1은 본 논문의 전력증폭기와 이전에 보고된 X-대역 GaN HEMT

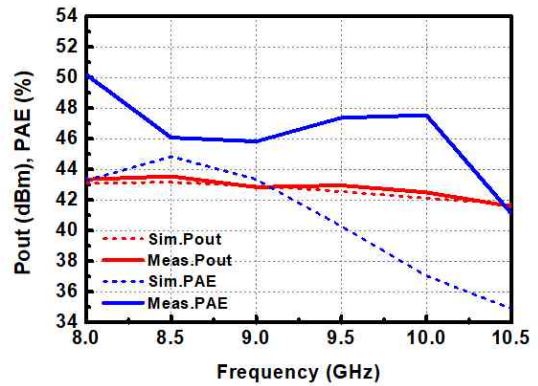


그림 7. 측정된 주파수에 따른 출력 전력 및 PAE
Fig. 7. Measured output power and PAE versus frequency.

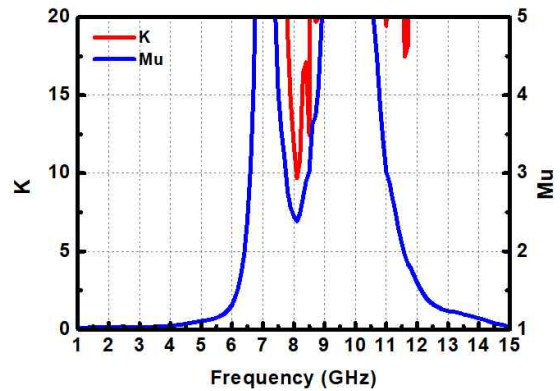


그림 8. 안정성 계수 측정결과
Fig. 8. Measurement results of stability factors.

표 1. 이전에 보고된 X-대역 GaN 전력증폭기의 성능 비교

Table 1. Performance comparison of previously reported X-band GaN power amplifiers.

Ref	Freq (GHz)	Psat (dBm)	Peak PAE (%)	Small signal gain (dB)	Chip size (mm ²)
[3]	7.9~8.4	48.8	52	37.5	33.7
[4]	8~12	41.8	53	26	6
[5]	8.5~11	45.3	47	23.5	9
This work	8~10.5	42	51	28.5	8

MMIC 전력증폭기의 성능을 비교한 결과를 나타낸다. 제안된 전력증폭기는 비교적 소형화된 칩 크기에서 높은 출력 전력과 효율을 달성하여, 기존 연구들과 비교하여 경쟁력 있는 성능을 보인다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Wavice 0.2- μm GaN HEMT 공정을 이용한 X-대역 GaN HEMT MMIC 전력증폭기를 설계 및 제작하였다. 제안된 전력증폭기는 8~10.5 GHz 대역에서 동작하며, 최적화된 매칭 네트워크와 안정화 회로를 통해 고효율 동작에서 안정성을 확보하였다. 측정 결과, 드레인 전압 28 V의 DC 바이어스 조건에서 RF 펄스 신호를 인가하였을 때 최대 출력 전력 43 dBm과 51 %의 최대 PAE를 달성하였으며, 전 주파수 대역에서 40 dBm 이상의 출력 전력을 확인하였다.

김 경 태 [충남대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0009-0005-7676-3607>



2025년 2월: 국립군산대학교 전자공학과 (공학사)
 2025년 3월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 석·박사통합과정
 [주 관심분야] RF Power Amplifier, Switch, LNA, Front-End Module 등

이 병 윤 [충남대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0005-3181-9996>



2026년 2월: 충남대학교 신소재공학과 (공학사)
 2026년 3월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF Power Amplifier

References

- [1] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, and Y. F. Wu, "GaN-based RF power devices and amplifiers," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 2, pp. 287-305, Feb. 2008.
- [2] H. Luo, J. Zheng, and Y. Guo, "Investigation and modeling of scalability in ISV and OSV GaN HEMTs," *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, vol. 34, no. 9, pp. 1087-1090, Jul. 2024.
- [3] B. Zhao, "A 3-stage, 51 % PAE, high linearity, 70W X-band GaN MMIC power amplifier," in *2024 IEEE Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems(WMCS)*, Waco, TX, Apr. 2024.
- [4] Z. D. Wang, G. D. Su, and J. Liu, "A 15-W X-band GaN MMIC power amplifier with thermal design," in *2025 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization(NEMO)*, Tianjin, Jul.-Aug. 2025.
- [5] Y. S. Noh, J. W. Lim, S. B. Bae, B. C. Jun, and J. H. Kwon, "Compact X-band 30W power amplifier MMIC using 0.2 μm GaN HEMT technology," in *2025 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications(ITC-CSCC)*, Seoul, Jul. 2025.

김 준 형 [충남대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-0642-2338>



2001년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학사)

2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2014년 9월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

2003년 3월~2012년 2월: 한국전자통신연

구원 선임연구원

2012년 2월~2013년 8월: Skyworks Solution Inc., Senior Design Engineer

2013년 8월~2017년 4월: Qorvo, Staff Design Engineer

2017년 4월~2024년 8월: 국립군산대학교 전자공학과 부교수

2024년 9월~현재: 충남대학교 반도체융합학과 부교수

[주 관심분야] RF and mmWave 회로 설계, 무선통신 송수신기 회로 설계