

광대역 X-대역 15 W급 전력증폭기 설계 및 구현

Design and Implementation of a 15 W Broadband X-Band Power Amplifier

신재이¹ · 이영완² · 최규석³

Jae-I Shin¹ · Young-Wan Lee² · Kyu-Seok Choi³

요약

본 논문에서는 X-대역에서 동작하는 광대역 15 W급 고출력 전력증폭기의 설계 및 제작 결과에 대해 기술하였다. 제안된 전력증폭기는 0.15 μm GaN 공정을 이용하여 설계되었으며, 5 \times 5 QFN(quad flat no-lead) 패키지를 적용하여 제작함으로써 15 W급 성능을 확보하였다. 제작된 전력증폭기는 8.5~12.5 GHz의 주파수 대역에서 안정적인 이득과 출력 전력을 제공한다. 소신호 이득은 20.5 dB 이상을 나타내며, 펄스 입력 신호 인가 시 최대 출력 전력은 41.2~43.0 dBm 이상, 전력 이득은 16.3~19.2 dB, 최대 전력부가효율은 37.5~47.0 %의 성능 결과를 보였다. 설계된 전력증폭기 MMIC(monolithic microwave integrated circuit)의 크기는 3.0 \times 1.6 mm²이며, 구현된 전력증폭기(패키지)의 크기는 5.0 \times 5.0 mm²이다.

Abstract

This paper presents the design and implementation of a broadband high-power power amplifier operating in the X-band with an output power of 15 W. The proposed power amplifier was designed using a 0.15 μm GaN process and fabricated in a 5 \times 5 QFN (quad flat no-lead) package, achieving 15 W-class performance. The fabricated power amplifier provides stable gain and output power over the frequency range of 8.5~12.5 GHz. The measured small-signal gain exceeds 20.5 dB across the operating band. Under pulsed input signal conditions, the power amplifier exhibits a maximum output power of 41.2~43.0 dBm, a power gain of 16.3~19.2 dB, and a peak power-added efficiency (PAE) of 37.5~47.0 %. The size of the designed power amplifier MMIC(monolithic microwave integrated circuit) is 3.0 \times 1.6 mm², while the implemented packaged power amplifier measures 5.0 \times 5.0 mm².

Key words: X-Band, Power Amplifier, Wideband, GaN HEMT, Radar

I. 서론

X-대역(8~12 GHz)은 항공, 해상, 기상 레이더를 비롯한 다양한 통신 시스템에서 널리 활용되고 있다. 특히 강우 및 대기 감쇠가 타 주파수 대역보다 상대적으로 낮아

안정적인 링크 확보가 용이하다는 장점으로 인해 군용 위성 단말 시스템에 적합한 주파수 대역으로 알려져 있다. 그러나 기존 X-대역 전력증폭기 연구에서는 출력전력이 제한적이거나 주파수 대역폭이 좁아 광대역 레이더 및 위성 통신 시스템에 적용하는 데 한계가 있었다. 또한 전력

「이 연구는 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(C250001, 부품국산화지원사업).」
알에프에이치아이씨(주)(RFHIC Corporation)

1: 전문연구원(<https://orcid.org/0009-0008-6339-0444>), 2: 전문연구원(<https://orcid.org/0009-0009-5145-8314>), 3: 연구위원(<https://orcid.org/0009-0000-5507-2317>)
· Manuscript received January 7, 2026 ; Revised April 20, 2026 ; Accepted April 30, 2026. (ID No. 20260107-21S)
· Corresponding Author: Jae-I Shin (e-mail: jishin@rfhic.com)

증폭기를 MMIC(monolithic microwave integrated circuit) 형태로 구현할 경우 칩 면적, 열 방출, 패키징 문제 등 여러 기술적 요소는 증폭기 성능과 밀접한 관련이 있어 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다^{[1],[2]}.

본 논문에서는 8.5~12.5 GHz의 광대역에서 안정적인 동작을 보이는 15 W급 X-대역 전력증폭기를 설계 및 제작하였다. 제안된 전력증폭기는 0.15 μm GaN 공정을 이용하여 MMIC로 설계되었으며, 5×5 QFN(quad flat no-lead) 패키지를 적용하여 실제 시스템에서 활용할 수 있는 수준의 출력 성능을 확보하였다. 제작된 전력증폭기는 전 주파수 대역에서 안정적인 이득과 높은 출력전력을 제공하며, 최대 전력 부가 효율 또한 우수한 성능을 나타내었다.

본 논문은 II장에서는 제안된 전력증폭기의 설계에 대해 설명하고, III장에서는 제작된 증폭기의 제작과 측정 결과를 제시하며, IV장에서는 결론을 서술하였다.

II. 전력증폭기 설계

제안된 MMIC 전력증폭기는 2단으로 설계되었으며, 출력전력을 고려하여 출력 단에는 8 finger 165 μm 크기의 트랜지스터 4개를 선정하였다. 구동 단에는 8 finger 165 μm 크기의 트랜지스터 1개를 선정하여 각 단의 트랜지스터 비율이 1:4인 전력증폭기를 그림 2과 같이 설계하였다. 8×165 μm 트랜지스터는 일부 X-대역에서 불안정 영역이 확인되어, 게이트 단에 병렬 저항-커패시터 회로를 추가하여 그림 1과 같이 동작 대역 내 안정도를 확보하였다. 이때 안정도 개선과 동시에 MSG(maximum stable gain) 특성의 열화를 최소화하기 위해 저항 및 커패시터 값을 최적화하였다. 최적화된 결과, 안정화된 트랜지스터

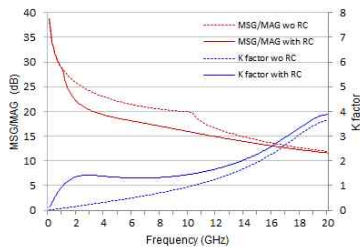


그림 1. 8F165 트랜지스터의 MSG/MAG와 K factor
Fig. 1. MSG/MAG and K factor of 8F165 transistor.

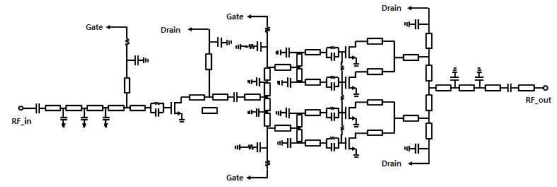


그림 2. 제안된 전력증폭기 회로도
Fig. 2. Schematic of the proposed power amplifier.

는 동작 대역 전반에서 K-factor가 1.3 이상을 유지하여 조건부 안정 조건을 만족하며, MSG 또한 14.6 dB 이상으로 유지됨을 확인하였다. 이는 저항-커패시터 네트워크가 고주파 이득을 적절히 감쇠시키면서도 이득 열화를 최소화하는 방향으로 동작하였음을 의미한다. 안정도가 확보된 트랜지스터의 출력전력 및 효율 특성을 확인하기 위하여 소스-풀과 로드-풀 모사 해석을 수행하였다. 최대의 출력전력을 갖는 임피던스와 최대의 효율 특성을 갖는 임피던스가 서로 상이하므로 적절한 출력과 효율 특성을 갖는 최적의 임피던스를 찾아야 한다. 광대역 특성을 확보하기 위해 단일 주파수에서의 임피던스 최적화가 아닌, 동작 대역 내 저주파, 중심 주파수 및 고주파 지점에서 각각 소스-풀 및 로드-풀 모사 해석을 수행하여 주파수에 따른 최적 임피던스를 도출하였다. 도출된 임피던스 값은 주파수에 따른 변화 경향을 반영하여 연속적인 함수 형태로 근사화하였으며, 이를 기반으로 주파수 의존적인 가변 임피던스를 정합회로 설계에 반영하였다. 이를 통해 특정 주파수에 국한되지 않고 대역 전반에 걸쳐 임피던스 정합 특성이 유지되도록 하였다.

해당 임피던스를 적용한 트랜지스터의 모사 해석 결과, 동작 대역 내에서 출력 전력은 36.18~36.30 dBm, 효율은 52.3~58.2 %로 나타나, 주파수 전반에 걸쳐 균일한 성능이 유지됨을 확인하였다. 또한, 도출된 임피던스를 입력단, 중간단 및 출력단의 정합회로에 일관되게 적용함으로써 증폭기의 광대역 특성을 유지함을 확인하였다. 주파수 대역은 8.0~12.5 GHz 기준으로 설계하였는데 이는 설계 결과와 제작 후 측정 사이에 존재할 수 있는 오차를 고려하여 상향 주파수 대역을 확장하였기 때문이다. 출력단에서는 4개의 트랜지스터를 병렬 연결하여 배치하였는데 이런 경우 다수의 트랜지스터가 상반된 위상 신호로

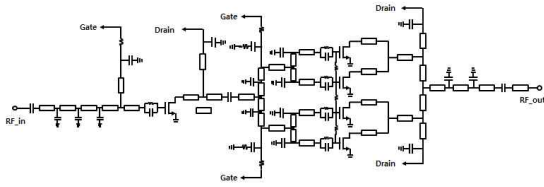


그림 3. 제작된 전력증폭기 MMIC 사진
Fig. 3. Photograph of the fabricated power amplifier MMIC.

공진하면서 불안정하게 동작할 수 있으므로, 출력단 트랜지스터 간 기수 모드(odd-mode) 발진 방지용 저항을 넣어 회로의 안정도를 확보하였다. 또한 각 단의 게이트 바이어스 라인에는 고주파 공진이 억제하기 위한 직렬 저항을 적용하여 추가적인 안정도를 확보하였다. 또한 RF 입출력단의 정전기 내성 향상을 위하여 커패시터 2개를 직렬로 배치하였으며, 각 전원단과 인접하게 그라운드 패드를 위치하여 전원의 안정성을 확보하였다. 광대역 전력증폭기를 MMIC로 구현할 경우 칩의 면적은 일반적으로 넓게 설계되는 경향이 있다. 광대역 특성을 위해 각 단의 정합회로의 라인 길이와 소자 간 간격을 주파수 전반에 걸쳐 최적화하면서 안정성을 유지하고, 동시에 열 관리 측면에서도 면적 확장이 필요하기 때문이다. 이러한 설계 요소는 전력증폭기 면적 최소화 제약이 발생하는데, 이를 보완하기 위하여 제안된 전력증폭기는 그림 3에 나타난 것처럼 RF 입출력 패드를 칩 중앙에 위치하는 것이 아닌 한쪽으로 배치하여 MMIC의 면적 활용을 극대화하였다. 설계된 MMIC 전력증폭기 모사 해석 결과 8.0~12.5 GHz 대역에서 소신호 이득은 24.0 dB 이상, 출력전력은 41.7~43.3 dBm, 전력이득은 18.7~20.3 dB, 최대 전력부가효율은 44.5~48.4 %를 나타내었으며, MMIC의 크기는 3.0×1.6 mm 이다.

III. 제작 및 시험

제작된 전력증폭기 MMIC는 그림 4와 같이 QFN 패키지를 적용하여 제작하였다. 패키지는 Berry 사 5×5 크기의 32 lead의 QFN 제품을 사용하였으며, 패키지 내부에는

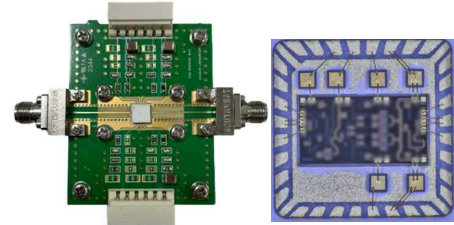
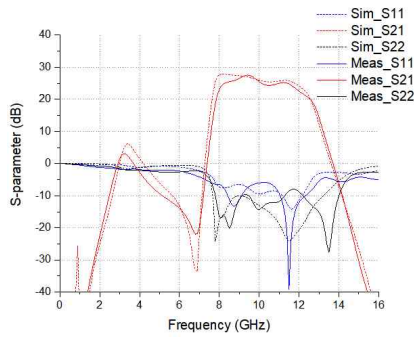


그림 4. 구현된 전력증폭기와 시험치구
Fig. 4. Photograph of implemented power amplifier and the test fixture.

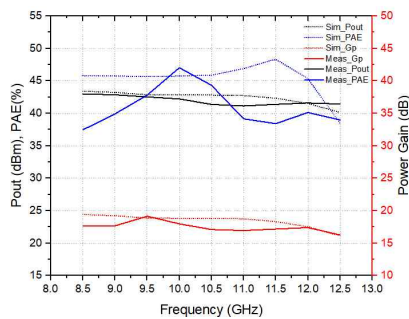
각 전원의 고주파 신호 안정화를 위한 SLC(single layer capacitor)를 적용하였다. 더불어 MMIC로와 패키지 간의 열전달을 향상하기 위해 Ag 기반 소결(epoxy) 접합제를 사용하였다. 해당 접합제는 높은 열 전도성을 갖추어 MMIC에서 발생하는 열을 효과적으로 패키지로 전달하며, 소결 공정을 통해 접합 층의 접촉 면적을 증가시켜 고출력 동작 시에도 열 축적을 방지할 수 있다.

제작된 전력증폭기는 고주파 신호에서 성능이 뛰어나면서 높은 열 안정성을 가진 Rogers 사의 RO4003C 기판을 사용하였으며 RF line은 CPWG(coplanar waveguide with ground)를 적용하였다. 이 외에도 고주파수 특성이 우수한 end-launcher를 적용하여 그림 4과 같이 시험치구를 제작하여 시험하였다. 그림 5는 제안된 전력증폭기의 소신호 및 대신호 모사 해석과 시험 결과를 나타내고 있다. 모사 해석 결과는 bare die 조건에서 수행되었으며, 측정은 패키지를 포함한 상태에서 진행되었다. 구현한 전력증폭기는 드레인 전원 20 V 인가 시 드레인 순시 전류 330 mA 기준으로 동작하며, 1 ms 주기의 10 % duty 펄스 신호 조건에서 시험하였다. 제작된 전력증폭기 시험 결과 8.5~12.5 GHz 주파수 대역에서 출력전력 41.2~43.0 dBm, 전력이득은 16.3~19.2 dB, 최대 전력부가효율은 37.5~47.0 %의 특성을 나타내었다.

본 논문의 X-대역 15 W급 전력증폭기 성능과 이미 발표된 연구 결과를 비교하여 표 1에 정리하였다. 본 논문의 전력증폭기는 출력 전력과 최대 전력부가효율은 이전 연구 결과와 유사하나 넓은 주파수 대역에서 동작하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 소신호 특성
(a) Small-signal characteristics



(b) 대신호 특성
(b) Large-signal characteristics

그림 5. 전력증폭기 시험 결과
Fig. 5. Test results of power amplifier.

표 1. X-대역 전력증폭기 비교
Table 1. Comparison of X-band power amplifier.

	Ref [3]	Ref [4]	Ref [5]	This work
Process (μm)	0.15	0.15	0.15	0.15
Freq. (GHz)	10.0~10.5	8.5~11.0	7.9~11.0	8.5~12.5
Pout (dBm)	41.4	42.5	42.0	42.0
PAE (%)	50 (typ.)	55	38	37 (typ.)
Area (mm^2)	9.2	4.91	22.5	25.0
Type	Die	Die	Package	Package

IV. 결 론

본 논문에서는 위성 단말 시스템에 적용 가능한 X-대역 15 W급 전력 증폭기 설계 및 제작에 대해 기술하였다. 개발된 15 W급 전력증폭기는 GaN HEMT 0.15 μm 공정을 이용하여 MMIC 설계한 후, QFN 패키지를 적용하여 최종 제작되었다. 제작된 전력 증폭기는 시험 결과 펄스 신호 인가 시에도 안정적으로 동작함을 확인하였으며, 전력증폭기 크기는 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 이다. 본 연구를 통해 구현된 전력증폭기는 향후 개발되는 위성 통신 및 레이더 시스템 등 다양한 응용 시스템에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. Jang, W. Choe, M. Kim, Y. Lee, and J. Jeong, "Compact GaN HEMT power amplifier MMIC delivering over 40 W for Ku-band applications," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 180415-180421, Nov. 2024.
- [2] T. W. Yoon, D. S. Kim, and J. M. Yook, "Thermally enhanced GaN hybrid-IC power amplifier using embedded IC process in a copper sheet," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 60, no. 9, pp. 2262-2267, Aug. 2018.
- [3] D. Sardin, T. Reveyrand, and Z. Popović, "X-band 10W MMIC high-gain power amplifier with up to 60% PAE," in *2014 9th European Microwave Integrated Circuit Conference (EuMIC)*, Rome, Oct. 2014, pp. 393-396.
- [4] Y. S. Noh, D. S. Kim, S. J. Chang, H. W. Jung, and J. W. Lim, "X-band GaN power amplifier MMIC design and radiation evaluations for space applications," in *2024 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)*, Danang, Nov. 2024, pp. 842-844.
- [5] Qorvo, "QPA1010: 7.9-11 GHz, 15 Watt GaN power amplifier," 2025. Available: <https://www.qorvo.com/products/p/QPA1010>