

## 중고도 무인기용 Ku-대역 50 W급 GaN 고출력 전력증폭기 구현

## Implementation of a Ku-Band 50 W GaN High Power Amplifier for MUAV Applications

신 재 이<sup>1</sup> · 이 영 완<sup>2</sup> · 강 현 철<sup>3</sup>Jae-I Shin<sup>1</sup> · Young-Wan Lee<sup>2</sup> · Hyun-Chul Kang<sup>3</sup>

## 요 약

본 논문에서는 중고도 정찰 무인기(MUAV, medium altitude unmanned aerial vehicle)용 Ku-대역 50 W급 고출력 전력증폭기 설계 및 제작 결과에 대해 기술하였다. 개발된 MMIC 고출력 전력증폭기는 0.15  $\mu\text{m}$  GaN on SiC 공정을 이용하여 설계되었으며, 높은 열전도 특성을 얻기 위하여 CPC(cu-cumo-cu) 기반의 패키지에 공융 접합(eutectic bond) 공정으로 제작하여 50 W급 성능을 확보하였다. 제작된 고출력 전력증폭기는 13.5~16.5 GHz 대역 내에서 소신호 이득은 25.6 dB 이상을 나타내며, CW(continuous wave) RF 입력 신호 인가 시 47.2 dBm 이상의 최대 출력 전력, 21.6 dB 이상의 전력 이득과 25.6 % 이상의 최대 전력 부가 효율 등의 성능 결과를 보였다. 설계된 고출력 전력 증폭기(MMIC)의 크기는 4.5×4.5 mm<sup>2</sup>이며, 구현된 고출력 전력 증폭기(package)의 크기는 10.0×16.0 mm<sup>2</sup>이다.

## Abstract

In this study, we present the design and fabrication of a Ku-band 50-W high-power amplifier for micro unmanned aerial vehicles (MUAVs). The developed monolithic microwave integrated circuit (MMIC) high-power amplifier was designed using a 0.15  $\mu\text{m}$  GaN-on-SiC process. To ensure effective thermal conductivity, the MMIC was mounted onto a cu-cumo-cu (CPC) package using eutectic bonding, thereby achieving the desired 50-W output performance. The fabricated high-power amplifier demonstrated a small-signal gain exceeding 25.6 dB across the 13.5~16.5 GHz frequency band. When a continuous wave (CW) RF input signal was applied, the amplifier achieved a maximum output power greater than 47.2 dBm, a power gain exceeding 21.6 dB, and a maximum power-added efficiency of more than 25.6 %. The chip area of the MMIC high-power amplifier is 4.5×4.5 mm<sup>2</sup>, while the overall size of the packaged amplifier is 10.0×16.0 mm<sup>2</sup>.

Key words: Ku-Band, Power Amplifier, GaN, MMIC, MUAV

## I. 서 론

UAV(unmanned aerial vehicle)는 비행 중에 조종사가 탑

승하지 않고 원격으로 제어되거나 자율적으로 비행하는 항공기 시스템을 의미한다. UAV 개발은 미국에서 군사 용으로 개발이 시작되었으며 정찰, 감시, 그리고 타격 임

「이 논문은 2024년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(C230022).」

알에프에이치아이씨(주) (RFHIC Corporation)

1: 전문연구원(<https://orcid.org/0009-0008-6339-0444>), 2: 전문연구원(<https://orcid.org/0009-0009-5145-8314>),

3: 본부장(<https://orcid.org/0009-0004-2110-6223>)

· Manuscript received January 5, 2025 ; Revised February 8, 2025 ; Accepted April 16, 2025. (ID No. 20250105-013S)

· Corresponding Author: Jae-I Shin (e-mail: [jishin@rfhic.com](mailto:jishin@rfhic.com))

무를 수행하였다. 초기의 UAV는 군사적인 용도로 제한되었지만 전자 기술이 발달함에 따라 군사 분야에 국한되지 않고 상업, 민간, 농업 분야 등 다양한 분야에서 활용되고 있다<sup>[1]</sup>. 이 중 MUAV는 중고도에서 비행하는 무인기로 주로 정찰, 감시, 전자전과 같은 군사적 임무를 수행하고 있으며 MUAV에서 전력 효율성과 무게는 비행 성능과 밀접한 관련이 있어 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>[2]</sup>.

GaN 반도체 소자는 넓은 에너지 밴드 갭 특성으로 고온 및 고전압 환경에서 우수한 성능을 나타내며, 높은 전자 이동 특성으로 고주파수 대역에서도 안정적으로 동작한다. 또한, 전력 밀도가 높아 MMIC의 소형화가 가능해 MUAV와 같은 무인 항공기 시스템에 사용되는 반도체 소자로 유리한 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 GaN HEMT 0.15  $\mu\text{m}$  공정을 이용하여 MUAV용 Ku-대역 MMIC를 설계 및 제작한 후 우수한 열전도 특성의 패키지에 조립하여 최종적으로 고출력 전력 증폭기를 구현한 결과에 관해 기술 하였다.

## II. 전력증폭기 설계

고출력 전력증폭기를 설계하기 위하여 GaN HEMT 공정을 사용하였다. 개발된 MMIC 전력증폭기는 충분한 전력 이득을 얻기 위해 3단으로 설계되었으며, 출력전력을 고려하여 출력단에는  $8 \times 150 \mu\text{m}$  (gate finger  $\times$  length) 크기의 트랜지스터 16개를 선정하였다. 첫 번째 구동 단계는  $8 \times 100 \mu\text{m}$  트랜지스터 2개를 선정하였으며, 두 번째 구동 단계는  $8 \times 125 \mu\text{m}$  트랜지스터 8개를 선정하여 그림 1

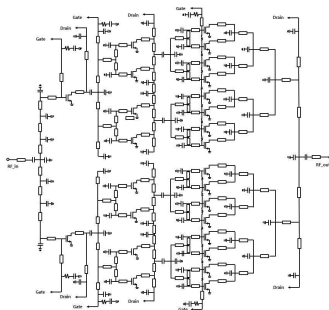


그림 1. 제안된 전력증폭기 회로도

Fig. 1. Schematic of the proposed power amplifier.

과 같이 각 단의 트랜지스터 크기 비율이 1:5:12인 3단 구성의 전력 증폭기를 설계하였다.

그림 2는 출력단에서 사용되는  $8 \times 150 \mu\text{m}$  트랜지스터에 대한 최대 이득(MAG/MSG) 모사 해석 결과 11.1~31.8 GHz 대역에서 K factor가 1 이상으로 조건부 안정(conditionally stable)을 확인하였으며, 14.0~16.5 GHz 대역 내에서 MSG(maximum stable gain)는 15 dB 이상임을 확인하였다. 트랜지스터의 기본적인 특성을 확인한 후, 로드-풀과 소스-풀 모사 해석을 통해 최대 출력을 가지면서 최대 효율 특성을 가질 수 있는 최적의 임피던스를 찾아 임피던스 정합회로를 설계하였다. 또한 트랜지스터 간 기수모드(odd-mode) 발진 방지를 위한 저항과 각 단의 게이트 바이어스 라인 저항을 사용함으로써 전력증폭기 회로의 안정도를 확보하였다. 설계된 고출력 전력 증폭기 모사 해석 결과 13.5~16.5 GHz 대역에서 소신호 이득은 30.9~32.2 dB, 출력 전력은 47.3~48.9 dBm, 전력 이득 24.3~25.9 dB 그리고 최대 전력부가효율은 26.6~35.6 %를 나타냈다.

## III. 전력증폭기 제작 및 시험

개발된 고출력 전력증폭기를 패키지에 조립 시험이전에 MMIC(monolithic microwave integrated circuit) 자체 특성을 확인하기 위하여 그림 3과 같이 프로브용 시험치구를 이용하여 on-wafer 시험을 진행하였다. 프로브용 시험치구는 고주파 신호에서의 성능이 뛰어나면서 높은 열안정성을 가진 Rogers사의 RO4003C 기판과 열전도도가 높은 CPC 캐리어 위에 eutectic 공정을 이용하여 조립되

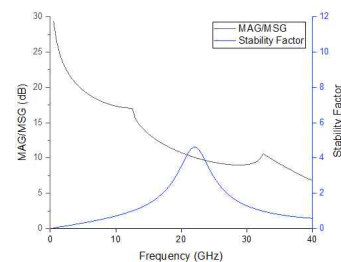


그림 2.  $8 \times 150 \mu\text{m}$  트랜지스터의 MAG/MAS와 K-factor

Fig. 2. MAG/MAS and K-factor of the  $8 \times 150 \mu\text{m}$  transistor.

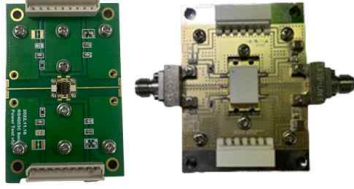


그림 3. 프로브용 시험치구와 패키지용 시험치구  
Fig. 3. Probe test fixture and package test fixture.

었다. on-wafer 시험은 Keysight사 회로망 분석기와 GSG Probe를 사용하여 진행되었으며, 드레인 전원 20 V와 드레인 전류 864 mA 조건에서 1 ms 주기의 10 % duty 펄스 신호를 사용하여 측정되었다. 전력증폭기 시험 결과는 그림 4와 같이 13.5~16.5 GHz 대역 내에서 소신호 이득은 25.7~28.3 dB, 출력 전력 47.8~48.7 dBm, 전력 이득 24.8~25.7 dB 그리고 최대전력부가효율 28.0~34.6 %를 나

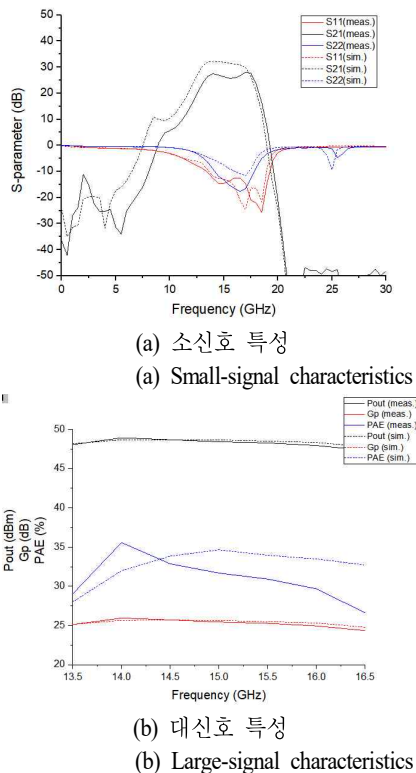


그림 4. MMIC 전력증폭기 시험 및 모사해석 결과  
Fig. 4. Test and simulation results of MMIC power amplifier.

타내어 우수한 특성을 확인할수 있었다.

최종적으로 구현된 패키지화된 고출력 증폭기는 열전달 계수가 높은 CPC(cu-mocu-cu) 141 소재의 기판을 이용하였다. CPC 141 소재는 표 1과 같이 열팽창계수가 8.5 ppm/K를 가지면서 열전도도가 약 150~250 W/m·K 에 달하는 특성을 가지기 때문에 다른 물질 대비 높은 온도에서도 우수한 안정성을 유지할 수 있다. 이로 인해 전자 및 반도체 장치에서 효율적인 열 분산이 가능하여 열 관리에 적합한 장점을 가지며, 패키지의 삽입 손실 특성을 측정한 결과 Ku-대역에서 0.3 dB 내외로 낮은 값을 갖는 것을 확인하였다.

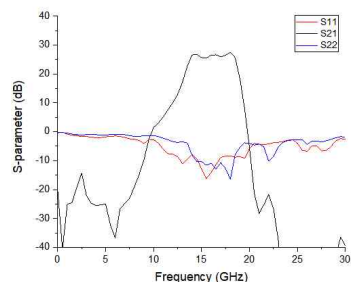
패키지 내부에는 전원 라인의 노이즈 제거와 고주파 신호 안정화를 위한 SLC(single layer capacitor), 수평방향으로의 열 방출을 위한 Ag기반의 Heat-spreader, 과전류에 의한 단선 예방을 위한 알루미늄 기판 재질의 DC line과 RF line를 bare die에 인접하게 배치하여 조립하였다. 패키지용 시험치구는 프로브용 시험치구와 동일한 Rogers사의 RO4003C 기판을 이용하였으며 RF 입출력단 은 CPWG(coplanar waveguide with ground)를 적용하였다. 이외에도 고주파수 특성이 우수한 End-Launcher와 열 방출을 위한 방열치구를 적용하여 그림 3의 오른쪽 사진과 같이 시험치구를 제작하여 시험하였다.

그림 5는 패키지화 된 50 W급 전력증폭기의 소신호 및 대신호 시험 결과를 나타내고 있다. 13.5~16.5 GHz 대역 내에서 소신호 이득은 25.3~27.7 dB, RF 입력 신호를 CW로 인가 시 출력 전력 47.2~47.8 dBm, 전력 이득은 21.6~22.4 dB 과 최대 전력부가효율은 25.6~31.1 %로 측정되었다. 이러한 특성은 패키지화된 전력증폭기의 성능은 On-wafer 측정 결과와 유사함을 확인할 수 있다.

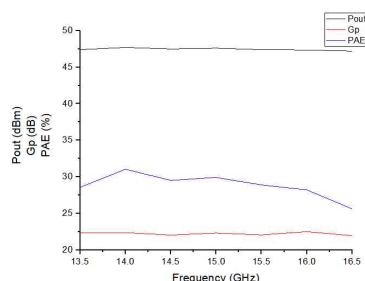
표 1. 소재에 따른 열전도도와 열팽창계수

Table. 1. Thermal conductivity and coefficient of thermal expansion based on materials.

Material	Thermal conductivity [W/m · K]	C.T.E. [ppm/K]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15 ~ 30	6.7
CPC141	150 ~ 250	8.5
Al6061	151 ~ 202	23
Silver	400 ~ 450	19



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



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

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

표 2. Ku-대역 전력증폭기 비교  
Table. 2. Comparison of Ku-band power amplifier.

	Ref [3]	Ref [4]	Ref[5]	This work
Process [ $\mu\text{m}$ ]	0.15	0.25	0.15	0.15
Freq [GHz]	13.0~15.0	15.5~17.5	13.0~15.5	13.5~16.5
Pout [dBm]	45~46.1	46.1	46.5~47.0	47.2~47.8
Gp [dB]	N/A	26.3	24.5~25.0	21.6~22.4
PAE [%]	29.2~39.0	20.8	30.0~33.0	25.6~31.1
Type	Bare die	Bare die	Package	Package

본 논문의 Ku-대역 50 W급 전력증폭기 성능과 이미 발표된 연구 결과를 비교하여 표 2에 정리하였다. 본 논문의 전력증폭기는 동작 대역과 전력이득은 이전 연구결과와 유사하나 높은 출력 전력과 높은 최대 전력부가효율 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 중고도 정찰 무인기에 적용 가능한 Ku-대역 50 W급 전력증폭기 설계 및 구현에 대해 기술하였다. 개발된 50 W급 전력증폭기는 GaN HEMT 0.15 $\mu\text{m}$  공정을 이용하여 MMIC 제작된 후, 높은 열전도도 특성을 갖는 CPC 기반 패키지를 적용하여 최종 구현되었다. 정결과 RF 신호 CW 인가 시에도 안정적으로 동작함을 확인하였다. 본 연구를 통해 구현된 50 W급 전력증폭기 크기는 10.0 $\times$ 16.0 mm<sup>2</sup>이며 향후 개발되는 중고도 정찰 무인기 송신장치 및 다양한 응용 시스템에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] A. M. Samad, N. Kamarulzaman, M. A. Hamdani, T. A. Mastor, and K. A. Hashim, "The potential of unmanned aerial vehicle(UAV) for civilian and mapping application," in *IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology*, Shah Alam, Aug. 2013, pp. 313-318.
- [2] M. Schiestl, F. Marcolini, M. Incurvati, F. G. Capponi, R. Stärz, and F. Caricchi, et al, "Development of a high power density drive system for unmanned aerial vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 36, no. 3, pp. 3159-3171, Mar. 2020.
- [3] Y. S. Noh, H. W. Jung, "Ku-band 35W power amplifier MMIC using 0.15  $\mu\text{m}$  GaN HEMT technology," In *2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Prague, Jul. 2023, pp. 794-797.
- [4] 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.
- [5] Qorvo, "TGA2239-CP, 13.4-15.5 GHz 50 Watt GaN power amplifier," 2023. Available: <https://www.qorvo.com/products/p/TGA2239-CP>