THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2025 March; 36(3), 236～242.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2025.36.3.236
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

Hermetic Package 기반 우주항공용 45 W Ku-대역 GaN HPA MMIC

Hermetic Package-Based 45 W Ku-Band GaN HPA MMIC for Aerospace Applications

김 창 민 · 이 영 완 · 강 현 철

Changmin Kim · Youngwan Lee · Hyuncheol Kang

요 약

본 논문에서는 0.15 μm GaN on SiC 공정을 이용한 우주항공용 45 W 고출력증폭기 집적회로(HPA MMIC, high power amplifier monolithic microwave integrated circuit) 설계 및 시험 결과와 메탈-세라믹 소재 기반 hermetic package를 적용한 시험 결과에 대해 기술한다. 제작된 MMIC는 소신호 및 대신호 성능에서 높은 이득을 달성하기 위해 3 단 캐스케이드 구조를 적용하여 설계되었다. 100 μs 펄스폭 및 10 % duty cycle의 RF Pulse 신호 조건으로 MMIC 단품과 hermetic package가 적용된 MMIC를 측정하였다. MMIC 단품은 14～16 GHz 대역에서 46.7 dBm의 출력 전력과 35.6 %의 (PAE, power added efficiency) 그리고 23.7 dB의 전력이득 성능으로 동작한다. hermetic package가 적용된 MMIC는 45 W의 출력 전력과 30 %의 PAE, 그리고 24.3 dB의 전력이득 성능으로 동작한다. 제작된 MMIC의 Chip 크기는 4.5×4.5 mm^{2}이고 hermetic package의 크기는 10×12 mm^{2}로 시스템의 경량화와 고신뢰성 기반의 고출력 특성이 필요한 우주항공용 무선 시스템 모듈의 송신부에 사용하기 적합하다.

Abstract

This paper presents the design and test results of a 45 W high-power amplifier monolithic-microwave integrated circuit (HPA MMIC) for aerospace applications utilizing a 0.15μmGaN on SiC process, as well as the test results after applying a metal-ceramic-based hermetic package. The fabricated MMIC was designed with a three-stage cascade structure to achieve a high gain in both small- and large-signal performances. Measurements were conducted under radio-frequency pulse signal conditions with a 100μs pulse width and 10 %duty cycle for both the MMIC die and hermetically packaged MMIC. The MMIC die operates in the 14～16 GHz band, delivering an output power of 46.7 dBm, a power-added efficiency (PAE) of 35.6 %, and a power gain of 23.7 dB. The hermetically packaged MMIC exhibited an output power of 45 W, a PAE of 30 %, and a power gain of 24.3 dB. The chip size of the fabricated MMIC was 4.5 × 4.5 mm^2, and the size of the hermetic package was 10 × 12 mm^2, making it suitable for use in the transmitter modules of aerospace wireless systems that require high power, light weight, and high reliability.

Key words: MMIC, GaN, Ku-Band, Aerospace, Hermetic

「이 연구는 2024학년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(C220011, 부품국산화지업원사업).」
RFHIC(주)(RFHIC Co., Ltd)

· Manuscript received January 3, 2025 ; Revised February 11, 2025 ; Accepted February 11, 2025. (ID No. 20250103-008S)

· Corresponding Author: Changmin Kim (e-mail: cmkim@rfhic.com)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서 론

최근 우주항공용 무선시스템은 극한 온도 및 진공과 방사선 등 외부 환경에 대해 높은 내성을 가지는 소자 및 패키징 기술을 요구하고 있다[1]. 질화갈륨(GaN) 기반 고출력전력증폭기 집적회로(MMIC)는 실리콘(Si) 및 갈륨비소(GaAs) 대비 높은 전력 밀도와 고효율 특성을 통해 고신뢰도 기반의 시스템 경량화가 가능하여 우주항공용 무선시스템에 많이 적용되고 있다[2]. 극한 환경에서 MMIC를 보호하기 위한 hermetic package 기술은 우수한 열전도성을 가진 소재를 적용하고 외부 습기 및 오염과 방사선 등 외부 영향을 완벽히 차단하여 집적회로의 소자 수명을 연장하고 안정적인 성능을 유지할 수 있도록 하여 필수적으로 적용되고 있다.

본 논문에서는 최근 우주항공용 위성 통신 및 레이다 시스템과 항공 통신 등에 핵심적으로 사용되고 있는 Ku-대역의 hermetic package 기반 45 W급 GaN HPA MMIC에 대한 설계 및 구현에 대해 기술한다. 제안된 hermetic package 기반 MMIC는 14~16 GHz 대역에서 45 W의 출력전력과 30 %의 전력부가효율 그리고 24.3 dB의 전력이득 성능을 통해 10 × 12 mm^2의 경량화 된 크기로 고출력 및 고효율의 고성능으로 동작한 결과를 기술한다.

Ⅱ. GaN HEMT 공정 및 Hermetic Package 분석

Ku-대역 고출력증폭기 집적회로는 대만의 Win Semiconductor 사의 0.15 μm GaN HEMT(high electron mobility transistor) 공정을 사용하여 설계되었다. 표 1은 해당 공정의 주요 특성이며 120 V 이상의 항복전압(breakdown voltage)와 4 W/mm의 최대 출력전력밀도로 구성되어있다.

PDK의 라이브러리는 수동 소자인 저항 및 커패시터와 인덕터 등을 제공하며 접지를 위한 소스 백-비아를 제공한다. 능동 소자는 ISV(inner side via) 및 OSV(outer side via) 등 두 가지의 트랜지스터 모델을 제공한다. ISV는 트랜지스터 내부의 게이트 사이에 소스 백-비아를 이용하여 인덕턴스를 줄인 구조로 구성이 되어있고 OSV는 단위 소자의 최상단과 하단에만 소스 백-비아가 적용되어 ISV 대비 작은 트랜지스터 면적에서 큰 출력을 얻기 적합하다. 그림 1은 높은 열전도성을 갖는 CPC141(Cu/PCM/Cu, copper-polymer composite) 소재를 이용하여 제작된 hermetic package의 사진이다. hermetic package는 6개의 리드(lead)로 구성되어있고 좌우 중앙은 RF 입출력 포트로 사용되고 좌측과 우측의 상하 부분은 게이트 전원 및 드레인 전원의 포트로 사용된다. 그림 1과 같이 hermetic package는 접착체로 체결이 가능한 필(Pill) 형태와 나사로 체결이 가능한 볼트-인(bolt-in) 형태로 구성되어 있고 상단에는 세라믹과 메탈 소재로 이루어진 Lid를 선택적으로 사용가능하다. hermetic package 내부에는 좌우측 RF 입출력과 게이트 및 드레인 전원 간 연결을 위한 세라믹 패턴이 있어 wire로 연결된다.

표 1. NP15-00 공정의 주요 성능
Table 1. Main Performances of NP15-00 process.

Parameter	Performance
Breakdown voltage	> 120 V
Cutoff frequency	34.5 GHz
Maximum stable gain	18.2 dB @10 GHz
Output power density	4 W/mm @29 GHz
Threshold voltage(Vto)	−2 V

표 2는 고출력 전력증폭기의 package에 주로 적용되는 소재 별 열전도성을 나타낸 표이며 표와 같이 CPC141은 높은 열전도성을 갖고 있어 고출력 어플리케이션에 적합한 특성을 가지고 있다. package는 10×12 mm^2의 소형화된 크기를 가지고 있어 경량화 된 우주항공용 무선시스템 송신단 배치에 유리하다. hermetic 동작을 위해 package의 lid는 kovar 소재로 제작되었으며

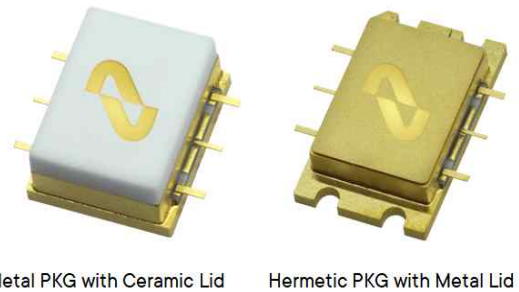

그림 1. Hermetic package 사진
Fig. 1. Hermetic package photograph.

표 2. Package 주요 소재 열전도성
Table 2. Thermal conductivity of package materials.

Material	Thermal Conductivity [W/(m×K)]	
	@25 ℃	@100 ℃
CPC141	200	195
Tungsten	167	159
Molybdenum	142	138
Cu-W (85W-15Cu)	184	178

laser welding 등 package와 완벽한 접합을 통해 기압 변화 등 외부 환경에 영향을 받지 않도록 hermetic 구조로 구성되었다.

Ⅲ. Ku-대역 HPA MMIC 설계 및 단품 MMIC 측정

그림 2와 그림 3은 Ku-대역 고출력증폭기 집적회로의 회로도와 집적회로 사진이다. 고출력증폭기는 소신호 및 대신호 이득을 위해 3단 구조로 설계되었다. 8 Finger 100 μm 소자의 단위 트랜지스터를 이용하여 설계되었고 2:4:16의 트랜지스터 구성비를 이용하여 각 단별 트랜지스터 크기를 설정하였다.

1단의 전력 소자는 그림 2와 같이 저항 및 커패시터

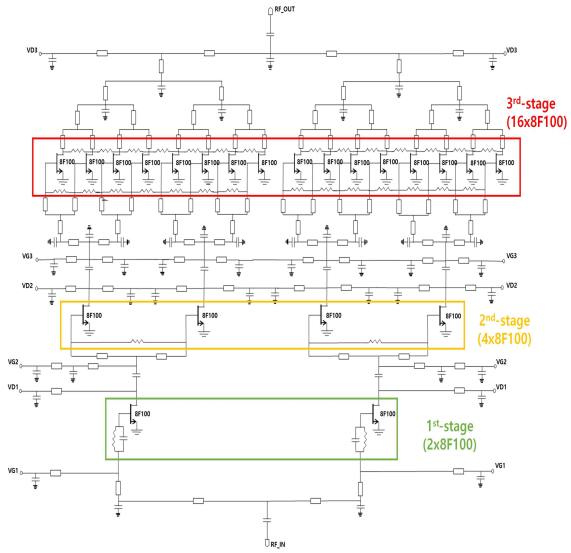

그림 2. HPA MMIC 회로도
Fig. 2. HPA MMIC configuration.

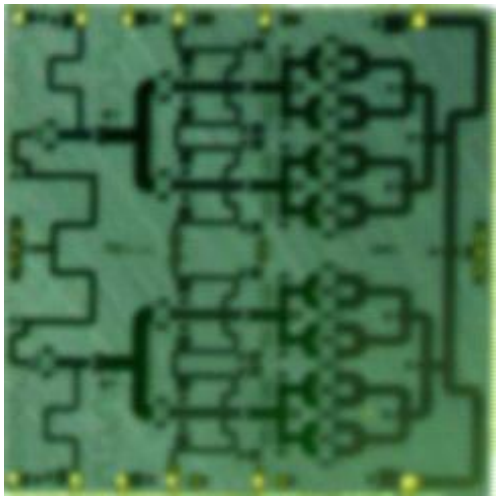

그림 3. 제작된 Ku-대역 HPA MMIC 사진
Fig. 3. Photograph of fabricated Ku-band HPA MMIC.

를 병렬로 구성하여 저주파 대역의 안정도가 높아 질 수 있도록 회로를 설계하였다. 3단의 전력소자는 기수 모드 발진을 방지하기 위해 게이트 및 드레인 간 저항을 각각 연결하여 설계하였다. 3단의 임피던스 정합회로는 각 단의 트랜지스터 비에 맞추어 삽입 손실을 최소화하도록 설계하였으며 Keysight 사의 ADS 설계 자동화 프로그램(EDA tool)을 이용하여 전자기 시뮬레이션 (EM, electro magnetic, simulation)으로 성능을 검증하였다. 설계된 Ku-대역 HPA MMIC 사이즈는 4.5×4.5 mm^2이다. 그림 4는 HPA MMIC의 대신호 성능에 관한 설계 결과이다. 15~16.5 GHz 대역에서 출력전력은 46.5~47.6 dBm, PAE는 30.7~41 %, 전력이득은 25.4~26.6 dB의 설계 결과를 가진다.

그림 5는 설계된 MMIC의 단품 검증을 위해 조립한 테스트 개발보드(Test EVB, test evaluation board) 사진이다. 설계된 MMIC는 단품 검증을 위해 hermetic package에서 동일하게 적용하는 CPC141 소재의 Chip Carrier에 실장하여 시험하였다. 그림 6은 MMIC 단품 시험 결과이다. DC 인가 조건은 낮은 동작 점의 전류에서 입력전력 레벨이 증가함에 따라 드레인 전류가 커지게 되는 Class AB급 동작 점으로 동작하도록 28 V의 드레인 전압과 780 mA의 드레인 전류로 설정하였다. 대신호 시험 결과는 그림 5와 같다. 펄스폭 100 μs, Duty Cy

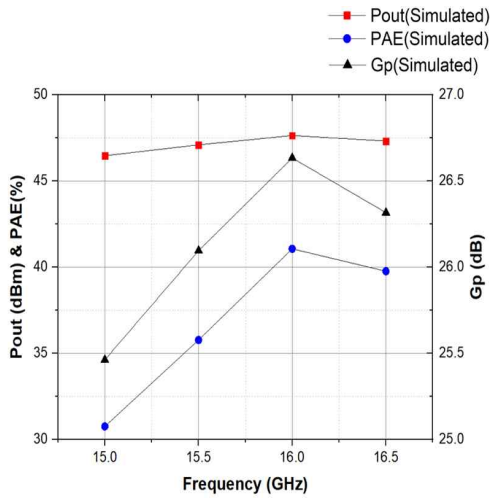

그림 4. HPA MMIC 대신호 설계 결과
Fig. 4. Photograph of MMIC EVB for validation.

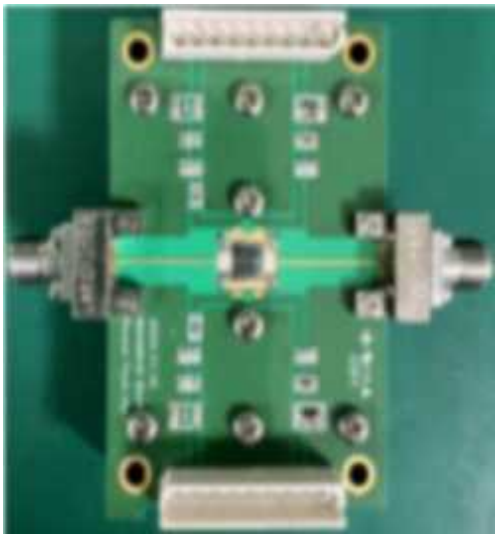

그림 5. 단품 MMIC 검증용 EVB 사진
Fig. 5. Photograph of MMIC EVB for validation.

cle 10 %의 RF pulse 신호 조건으로 14.5～16 GHz 대역에서 45.7～47.4 dBm의 출력전력과 31.2.4～39.1 %의 전력부가효율, 22.6～24.4 dB의 전력 이득 성능이 측정되었다. 그림4의 HPA MMIC 설계 결과 대비 그림 5의 단품 MMIC 대신호 측정 결과는 약 500 MHz 주파수 대역이 하향 이동하였다. 편차 발생 원인은 트랜지스터 및 커패시터 등 능동과 수동 소자의 공정 편차로 인

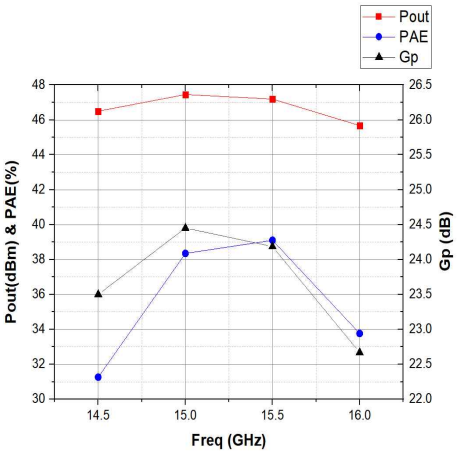

그림 6. MMIC 단품 대신호 측정결과
Fig. 6. Large signal measurement results of MMIC.

해 발생한 것으로 판단하였다. 추후 2차 설계 시 중요한 설계 고려 사항으로 적용하려고 한다.

Ⅳ. Hermetic PKG 기반 Ku-대역 HPA MMIC 측정결과

측정된 단품 MMIC는 hermetic package에 실장하여 RF 성능을 측정하였다. 그림 7은 hermetic package가 적용된 Test EVB에 대한 사진이다. hermetic package는 kovar 소재로 이루어진 메탈 lid와 세라믹 소재로 이루어진 lid 등 두 가지로 test를 진행하였다. kovar는 높은 전기전도성과 안정적인 열팽창 계수(CTE)로 hermetic에 적합한 특성을 가지고 있다. 세라믹 소재는 우수한

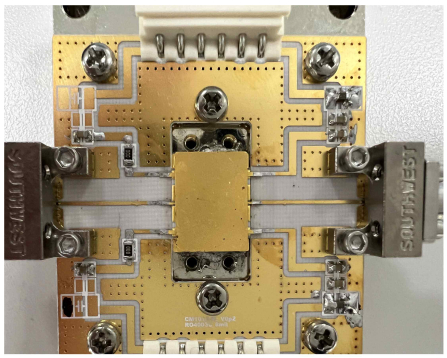

그림 7. Hermetic Package MMIC EVB 사진
Fig. 7. Photograph of hermetic packaged MMIC EVB.

전기 절연 특성을 통해 신호 간섭이나 누설을 방지하고 가벼운 무게로 경량화가 필요한 시스템에 적합한 특성을 가지고 있다. 두 가지의 lid는 모두 epoxy로 조립되었고 추후 필요 시 kovar 소재가 적용된 메탈 Lid는 laser welding과 seam sealing 작업이 가능하다.

그림 8~그림 10은 hermetic package 기반 Ku대역 HPA MMIC의 lid 종류에 따른 소신호 및 대신호 측정결과이다. 소신호 측정 결과, 메탈 lid와 세라믹 lid가 적용된 입력반사계수는 14~16 GHz 대역에서 7~21 dB로 Lid 별 약 1~1.7 dB 성능 편차가 확인되었다. 소신호 이득은 30~33.8 dB로 lid 별 0.1~0.7 dB의 성능 편차가 확인되었다. 대신호 측정은 펄스폭 100 μs와 10 % duty cycle의 RF pulse 신호 조건으로 측정하였다. 측정 결과는 세라믹 lid 적용 시 14 GHz 대역에서 45.8~47.2 dBm의 출력 전력과 25.6~32.4 % 전력 부가효율 그리고 21.8~23.2 dB의 전력이득 성능이 측정되었고 kovar lid 적용 시 45.6~47 dBm의 출력 전력과 25.9~31.4 % 전력 부가효율 그리고 23.6~25 dB의 전력이득 성능이 측정되었다. 측정 결과를 통해 소폭의 차이지만 hermetic이 가능한메탈 lid가 높은 열전도성 등의 소재 특성을 통해 대신호 및 소신호 성능에 유리 한 것이 확인되었다.

표3은 제안된 hermetic package 기반의 Ku 대역 45 W급 고출력증폭기 집적회로의 성능과 참고문헌 [3]~참고문헌 [5]와 비교하여 정리한 표이다. 본 연구의 MMIC

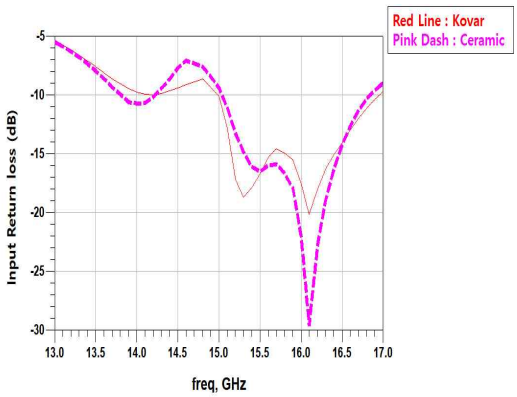

그림 8. PKG Lid 별 입력 반사계수 측정 결과
Fig. 8. Small & Large-signal measurement results for each PKG lid.

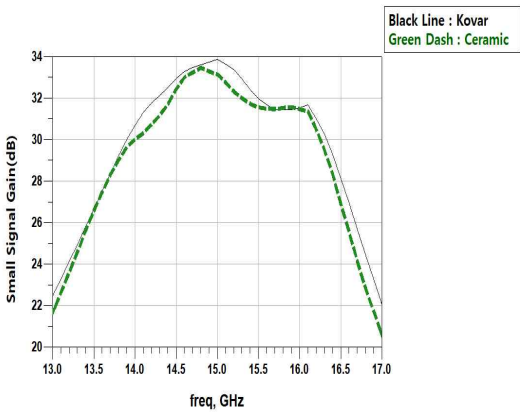

그림 9. PKG Lid 별 소신호 이득 측정 결과
Fig. 9. Small signal gain measurement results for each PKG lid.

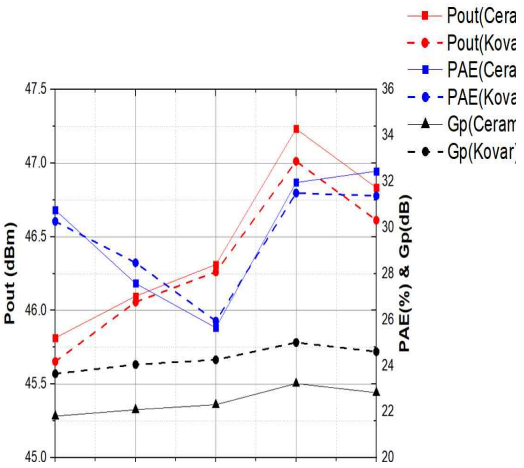

그림 10. PKG Lid 별 대신호 측정 결과
Fig. 10. Large-signal measurement results for each PKG lid.

성능 결과는 참고 문헌 [3] 및 참고문헌 [4]와 비교하여 package가 된 상태임에도 높은 전력부가효율과 출력전력 성능으로 동작하고 높은 소신호 이득을 통해 간소화 된 시스템을 구성할 수 있도록 동작한다. 또한 hermetic package가 적용된 HPA MMIC는 우수한 대신호 및 소신호 특성을 기반으로 극한 환경에서 고신뢰성 및 안정적 동작이 필요한 우주항공용 무선시스템 등에 적용이 가능한 이점을 가진다.

표 3. Ku대역 GaN 고출력증폭기 집적회로 성능비교
Table 3. Performance comparison of Ku-band GaN high power amplifier MMIC.

Parameter	Unit	Ref. [3]	Ref. [4]	Ref. [5]	This work	
Process	-	0.15μm GaN HEMT	0.25μm GaN HEMT	0.15μm GaN HEMT	0.15μm GaN HEMT	
Configuration	-	2-stage Cascade	4-stage Cascade	3-stage Cascade	3-stage Cascade	
Package type	-	Bare die	Bare die	Cu package	Bare die	Hermetic package
Frequency	GHz	13－15	15.25－16.25	13.75－14.5	14.5－16	14－16
Small signal gain	dB	25.2－27.5	33 @peak	29	32.1－35.0	30.6－33.8
Maximum pout	dBm	45－46.1	46	46	45.7－47.4	45.6－47
PAE	%	29.2－39	17	30	31.2－39.1	25.9－31.4
MMIC size	mm^2	15	49.7	32.07	20.25	

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 Hermetic Package 기반의 GaN HEMT 공정을 이용하여 우수한 성능을 갖는 Ku-대역 45 W급 고출력증폭기 집적회로 설계 및 구현에 대해 기술하였다. HPA MMIC 단품은 14.5～16 GHz 대역에서 출력전력 47 W급에 36 %의 전력부가효율 성능으로 동작한다. kovar Lid 기반 Hermetic Package가 적용된 HPA MMIC는 14～16 GHz 대역에서 출력전력 45 W급에 30 %의 전력부가효율로 우수한 성능으로 동작하여 방사선, 진동, 충격 및 압력 변화 등 극한 환경에서도 안정적으로 동작이 가능하여 우주항공용 고출력 무선시스템 송신단에 다양하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] I. Prajapati, R. K. Hegde, S. Pandya, and A. K. Lal, "Achieving spaceworthiness for large-size LTCC packaging of microwave MCM," in *2023 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference(MAPCON)*, Ahmedabad, Dec. 2023, p. 10464088.

[2] S. K. Garg, T. Paul, M. K. Patel, and C. V. N. Rao, "High Efficiency 70W C-band GaN MMIC PA for space-borne RADAR applications," in *2024 IEEE Space, Aerospace and Defence Conference (SPACE)*, Bangalore, Jul. 2024, pp. 725-728.

[3] Y. S. Noh, H. W. Jung, "Ku-band 35W power amplifier MMIC using 0.15 μm GaN HEMT technology," in *2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Prague, Jul. 2023, pp. 794-797.

[4] T. Sim, S. Lee, D. Lee, W. Choe, M. Kim, and S. Kim, "A Ku-band high gain 40 W GaN HPA MMIC for satellite systems in a 0.25- μm GaN technology," in *2024 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR)*, San Antonio, TX, Jan. 2024, pp. 31-34.

[5] Qorvo, "QPA1314: 13.75~14.5 GHz 40 watt GaN power amplifier," 2024. Available: https://www.qorvo.com-/products/p/QPA1314

김 창 민 [RFHIC(주)/전문연구원]
https://orcid.org/0000-0002-8095-7579

2018년 8월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
2021년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)
2021년 5월～현재: RFHIC(주) 전문연구원
[주 관심분야] MMIC, RFIC, RF Front-End Module

이 영 완 [RFHIC(주)/전문연구원]
https://orcid.org/0009-0009-5145-8314

2001년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)
2004년 8월: 국민대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2008년 4월～현재: RFHIC(주) 전문연구원
[주 관심분야] 고출력 전력증폭기, 위성통신 시스템, 레이다 시스템

강 현 철 [RFHIC(주)/방산사업본부장]
https://orcid.org/0009-0004-2110-6223

1998년 02월: 경기대학교 전자공학과 (공학사)
2023년 8월: 광운대학교 국방기술경영학과 (국방기술경영학석사)
2000년 03월～현재: RFHIC(주) 방산사업본부장
[주 관심분야] 레이다 시스템, RF 송수신 모듈, 전자전 시스템