

# 레이더 응용을 위한 X-대역 40W AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 전력 증폭기 MMIC

## A X-band 40W AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Power Amplifier MMIC for Radar Applications

임 병 옥\*, 고 주 석\*, 류 근 관\*\*, 김 성 찬\*\*★

Byeong-Ok Lim\*, Joo-Seoc Go\*, Keun-Kwan Ryu\*\* and Sung-Chan Kim\*\*★

### Abstract

In this paper, we present the design and characterization of a power amplifier (PA) monolithic microwave integrated circuit (MMIC) in the X-band. The device is designed using a 0.25  $\mu\text{m}$  gate length AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistor (HEMT) on SiC process. The developed X-band AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> power amplifier MMIC achieves small signal gain of over 21.6 dB and output power more than 46.11 dBm (40.83 W) in the entire band of 9 GHz to 10 GHz. Its power added efficiency (PAE) is 43.09% ~ 44.47% and the chip dimensions are 3.6 mm  $\times$  4.3 mm. The generated output power density is 2.69 W/mm<sup>2</sup>. It seems that the developed AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> power amplifier MMIC could be applicable to various X-band radar systems operating X-band.

### 요 약

본 논문에서는 0.25  $\mu\text{m}$ 의 게이트를 갖는 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT를 기반으로 개발된 X-대역 전력 증폭기 MMIC의 특성을 기술한다. 개발된 X-대역 전력 증폭기 MMIC는 9 GHz~10 GHz의 주파수 대역에서 21.6 dB 이상의 소신호 이득과 46.11dBm(40.83 W) 이상의 출력 전력을 가진다. 전력 부가 효율 특성은 43.09%~44.47%이며 칩의 크기는 3.6 mm $\times$ 4.3 mm이다. 출력 전력 밀도는 2.69 W/mm<sup>2</sup>를 나타내었다. 개발된 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 전력 증폭기 MMIC는 다양한 X-대역 레이더 응용에 적용 가능하다.

*Key words* : Power amplifier, MMIC, GaN, HEMT, X-band

### 1. 서론

위상 배열 시스템(phased array system)은 배열 안테나마다 위상을 다르게 제어하고 간섭을 이용하여 방위각을 조절한다. 위상 배열 시스템은 크게 안테나 내부의

전력증폭 소자 포함 여부에 따라 수동 위상 배열 시스템과 능동 위상 배열 시스템 형태로 구분되는데, 근래 전통적인 수동 위상 배열 시스템과 비교하여 시스템의 소형화 및 신뢰성, 유지보수 용이성 등의 장점으로 인하여 능동 위상 배열 시스템의 연구가 활발하게 진행되고 있다.

\* R&D Division, Electronic Device Solution Inc., Daejeon 34127, Korea

\*\*★ Department of Electronic Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, Korea

★ Corresponding author

E-mail : sckim@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-821-1130

※ Acknowledgment

This work was supported by a research fund of Hanbat National University in 2021.

Manuscript received December 1, 2022; revised December 21, 2022; accepted December 27, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

능동 위상 배열 시스템은 각 안테나 소자에 각기 자체 송수신기 모듈 (TRM)을 추가하고 각각의 모듈이 송수신하는 전파 위상을 개별 제어하여 지향성을 획득한다. 능동 위상 배열 시스템은 군사용 응용을 위해 처음 개발되었으나, 최근 다양한 지능형 레이더 시스템 등과 같은 민수용 응용에도 널리 활용되고 있다.

높은 출력 전력 특성을 갖는 반도체 전력 증폭기(SSPA)는 능동 위상 배열 시스템 구현을 위한 송수신 모듈의 핵심 구성 요소이다. 특히 GaN(gallium nitride) 기반 고출력 전력 증폭기는 기존 GaAs(gallium arsenide) 기반 소자와 비교하여 넓은 에너지 밴드 갭에 의한 재료적 특성에 기인하는 월등히 높은 출력 전력 특성으로 인해 기존 수동 위상 배열 시스템 응용에서 널리 사용되는 진공관 형태 증폭기를 대체할 수 있어 많은 주목을 받고 있다[1-4].

본 논문에서는 0.25 $\mu\text{m}$ 의 게이트를 갖는 AlGaN /GaN HEMT 기술을 사용하여 X-대역에서 동작하는 능동 위상 배열 시스템에 응용 가능한 전력 증폭기 MMIC 개발에 관한 내용을 기술한다.

## II. 전력 증폭기 MMIC 설계

전력 증폭기 MMIC는 9 GHz~10 GHz의 동작 주파수 대역에서 46 dBm(40 W) 이상의 출력 전력 특성과 20 dB 이상의 이득 특성 및 40% 이상의 전력 부가 효율 특성을 주요 성능 지표로 설정하고 개발되었다. 전력 증폭기 MMIC는 WIN Semi. Corp. NP2500 라이브러리의 마이크로스트립 기반 AlGaN/GaN HEMT 소자를 사용하여 설계를 진행하였다. 표 1에 NP2500 HEMT 소자의 주요 특성을 요약하였다. 게이트 길이가 0.25  $\mu\text{m}$ 인

Table 1. Summary of typical device parameters in NP2500 technology.

표 1. NP2500 HEMT 소자의 주요 특성 요약

Parameter	Unit	Typ. value
Gate length	$\mu\text{m}$	0.25
Operating voltage	V	28
Breakdown voltage	V	> 120
$I_{DSS}$ (@ $V_{GS}=0$ )	mA/mm	810
$G_{M,MAX}$	mS/mm	370
MAG (@ $I_{DS}=100$ mA/mm,10GHz)	dB	19.2
$f_T$ (@ $I_{DS}=100$ mA/mm)	GHz	24.5
$f_{MAX}$ (@ $I_{DS}=100$ mA/mm)	GHz	86

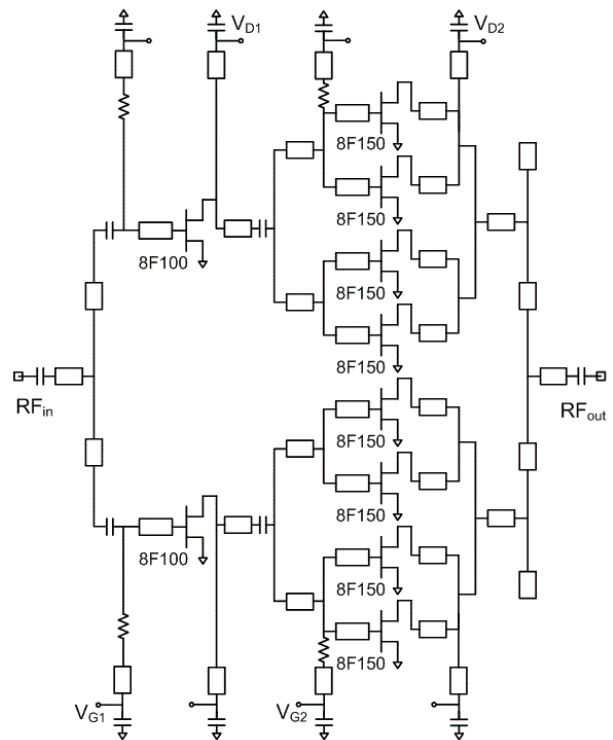


Fig. 1. Schematic diagram of the designed X-band AlGaN/ GaN power amplifier MMIC.

그림 1. X-대역 AlGaN/GaN 전력 증폭기 MMIC의 회로도

AlGaN/ GaN HEMT는 10 GHz의 동작 주파수에서 4.7 W/mm의 전력 밀도 특성과 64%의 전력 부가 효율 특성 및 19 dB의 이득 특성을 나타낸다[5].

X-대역에서 동작하는 AlGaN/GaN 전력 증폭기 MMIC의 회로도를 그림 1에 나타내었다. 전력 증폭기 MMIC는 높은 출력 전력 특성 구현을 위해 전력 정합이 수행된 출력단과 높은 이득 특성 구현을 위해 공액 정합이 수행된 입력단의 2단 구조로 구성되어 있다. 단간 정합 회로는 각 단 HEMT 단위 소자의 입력 및 출력 임피던스를 추출하여 단간 정합을 수행하였다.

출력단은 단위 게이트 폭이 150  $\mu\text{m}$ 이고 게이트 수가 8개인 AlGaN/GaN HEMT 단위 소자 8개로 구성하였으며, 입력단은 단위 게이트 폭이 100  $\mu\text{m}$ 이고 게이트 수가 8개인 AlGaN/GaN HEMT 단위 소자 2개로 구성하였다.

출력단에 사용된 8 $\times$ 150  $\mu\text{m}$  AlGaN/GaN HEMT 단위 소자의 load-pull 시뮬레이션 결과를 그림 2에 나타내었다. 출력 전력과 전력 부가 효율을 동시에 고려한 부하 임피던스는 8+j20 ohm이며 10 GHz에서 약 37.5 dBm의 출력 전력을 기대할 수 있으므로 최종 46 dBm 이상의 출력 전력을 얻기 위하여 8개의 단위 소자를 병렬로 연결하였다. 부하 임피던스에서 기대되는 전력 부가 효율은 55%이다.

회로 안정화를 위하여 AlGaIn/GaN HEMT 단위 소자의 입력단에 저항-커패시터 병렬 회로를 삽입하였으며, 서로 인접한 AlGaIn/GaN HEMT 단위 소자 사이에 저항을 추가적으로 삽입하여 기수 모드 발진 (odd mode oscillation)을 방지하였다.

설계된 40 W AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 전체 회로 구조는 전자기 시뮬레이션을 통하여 최적화하였다. NI/AWR's AXIEM 시뮬레이션 결과, 전력 증폭기 MMIC는 9 GHz~10 GHz의 동작 주파수에서 46.5 dBm(44.67 W) 이상의 출력 전력 특성과 42.6% 이상의 전력 부가 효율 특성 및 21 dB 이상의 이득 특성을 나타내었다.

### III. 전력 증폭기 MMIC 측정 결과

제작된 X-대역 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 사진을 그림 3에 나타내었다. 전력 증폭기 MMIC의 크기는 3.6 mm×4.3 mm이다.

제작된 전력 증폭기 MMIC는 측정 치구를 제작하여 성능 검증을 진행하였다. CuMo carrier plate에 AuSn을 사용하여 전력 증폭기 MMIC를 접착시키고, 이를 측정 치구에 조립하였다. 전력 증폭기 MMIC의 입력 단자와 출력 단자는 50 ohm 마이크로스트립 라인에 Au 와이어 본딩으로 연결되어 있으며, 마이크로스트립 라인의 반대편 영역은 SMA 커넥터에 연결되어 있다. Au 와이어 본딩에서 기인하는 와이어 인덕턴스는 미리 고려되어 설계에 반영하였다. 전력 증폭기 MMIC의 측정은 100 μs 펄스 폭과 10% 듀티 사이클 조건의 펄스 모드에서 진행되었다.

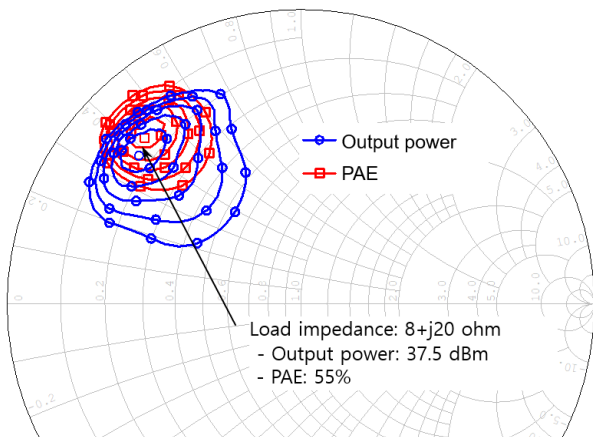


Fig. 2. Load-pull simulation results of the 8×150 μm AlGaIn/GaN HEMT at 10 GHz (@V<sub>DS</sub>=28 V, I<sub>DS</sub>=50 mA).

그림 2. 8×150 μm AlGaIn/GaN HEMT 소자의 10 GHz load-pull 시뮬레이션 결과 (@V<sub>DS</sub>=28 V, I<sub>DS</sub>=50 mA)

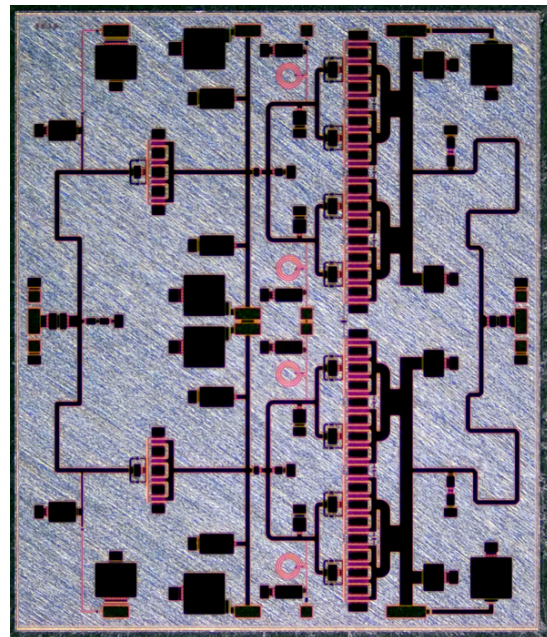


Fig. 3. Chip photograph of the fabricated X-band AlGaIn/GaN power amplifier MMIC.

그림 3. 제작된 X-band AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 칩 사진

제작된 X-대역 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 S-parameters 측정 결과를 설계 결과와 비교하여 그림 4에 나타내었다. 측정에 사용된 드레인 전압은 28 V이고 게이트 전압은 -2.4 V이다. 측정 결과, 9 GHz~10 GHz의 동작 주파수 대역에서 21.6 dB~22.9 dB의 소신호 이득 특성과 -8.9 dB~-16.3 dB의 입력 반사 손실 특성 및 -6.1 dB~-10.2 dB의 출력 반사 손실 특성을 얻었다.

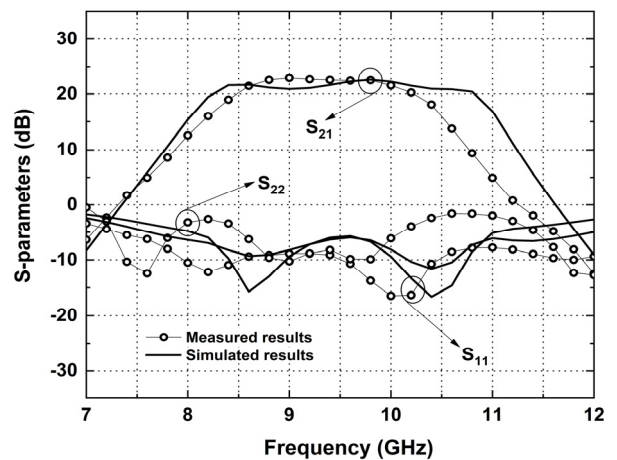
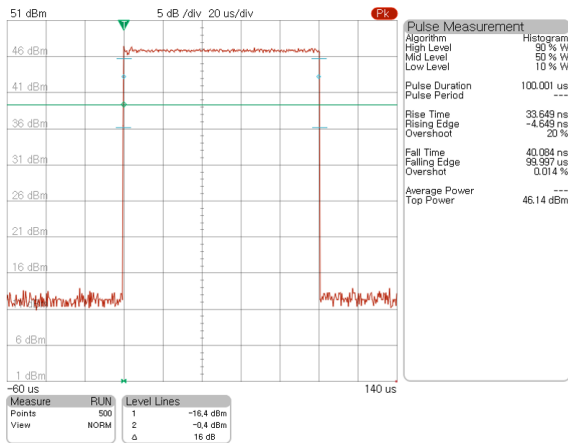
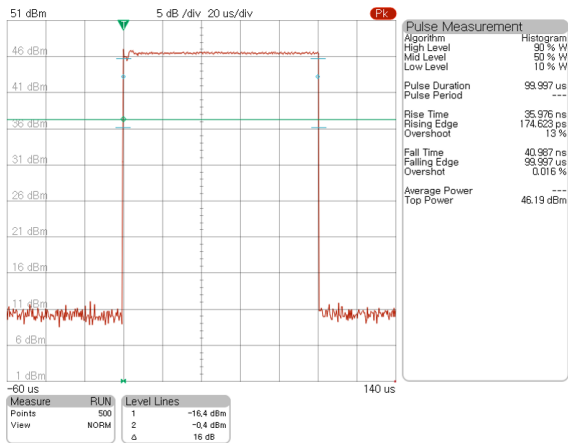


Fig. 4. Measured S-parameters characteristics of the fabricated X-band AlGaIn/GaN power amplifier MMIC.

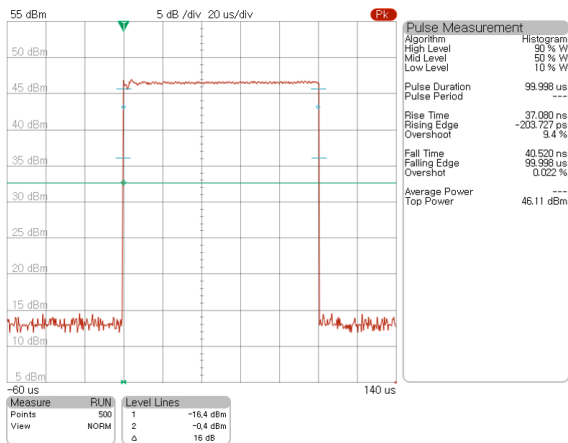
그림 4. 제작된 X-band AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 S-parameters 특성 측정 결과



(a) 46.14 dBm @9 GHz



(b) 46.19 dBm @9.5 GHz



(c) 46.11 dBm @10 GHz

Fig. 5. Measured output power characteristics of the fabricated AlGaIn/GaN power amplifier MMIC. 그림 5. 제작된 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 출력 전력 특성 측정 결과

제작된 X-대역 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 출력 전력 특성은 드레인 전압과 게이트 전압이 각각 28 V, -2.4 V 조건 아래에서 입력 전력을 30 dBm으로 설정하고 측정하였다. 측정 결과, 전체 동작 주파수 대역에

서 40 W 이상의 높은 출력 전력 특성을 얻었음을 확인하였다. 9 GHz 동작 주파수에서 46.14 dBm, 9.5 GHz 동작 주파수에서 46.19 dBm, 10 GHz 동작 주파수에서 46.11 dBm의 출력 전력 특성을 얻었으며, 최대 출력 전력 특성은 9.5 GHz의 동작 주파수에서 46.19 dBm (41.59 W)을 나타내었다. 그림 5에 제작된 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 출력 전력 특성을 나타내었다.

그림 6에 제작된 X-대역 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 입력 전력 변화에 따른 출력 전력 특성과 전력 이득 특성 변화를 나타내었다. 드레인 전압과 게이트 전압이 각각 28 V, -2.4 V 조건 아래에서 입력 전력을 30

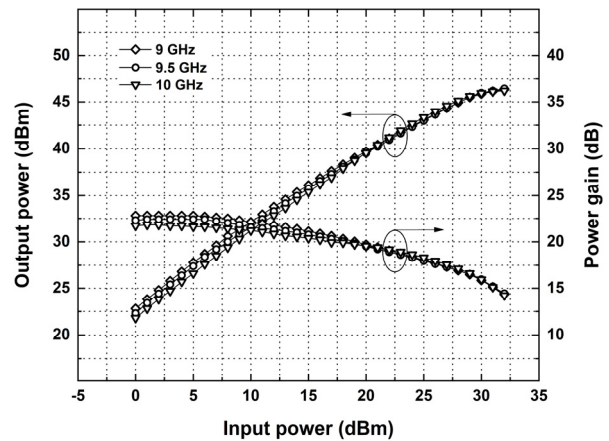


Fig. 6. Measured output power and power gain characteristics of the fabricated AlGaIn/GaN power amplifier MMIC.

그림 6. 제작된 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 출력 전력 특성과 전력 이득 측정 결과

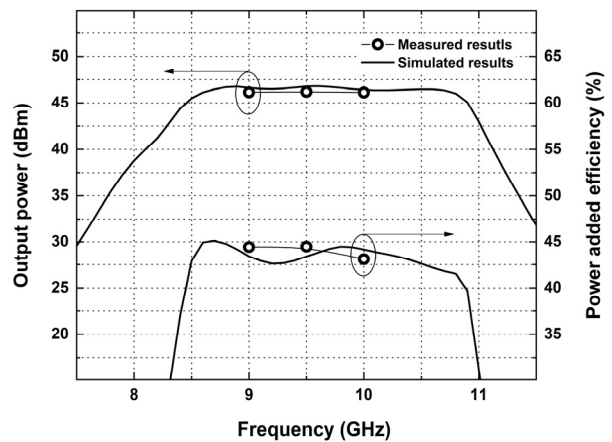


Fig. 7. Measured output power and power added efficiency characteristics of the fabricated AlGaIn/GaN power amplifier MMIC.

그림 7. 제작된 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 출력 전력 특성과 전력 부가 효율 특성 측정 결과



dBm으로 인가한 경우, 전체 동작 주파수 대역에서 46.11 dBm(40.83 W) 이상의 출력 전력 특성을 나타내었다. 전력 이득 특성은 16 dB 이상을 나타냄을 확인하였다.

그림 7에 동작 주파수에 대한 전력 부가 효율 특성과 출력 전력 특성을 나타내었다. 드레인 전압과 게이트 전압이 각각 28 V, -2.4 V 조건 아래에서 30 dBm의 입력 전력이 인가된 경우, 9 GHz~10 GHz 주파수 대역에서 출력 전력 특성은 46.11 dBm~46.19 dBm을 얻었으며 전력 부가 효율 특성은 43.09%~44.47%를 나타내었다.

표 2에 개발된 X-대역 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 측정 결과를 요약하고, 해외 유수의 반도체 기업에서 개발한 X-대역 40 W 급 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 특성과 비교하였다. 본 논문에서 개발된 전력 증폭기 MMIC는 출력 전력 특성, 이득 특성과 전력 부가 효율 특성의 주요 성능 지표에서 우수한 경쟁력을 가지며, 칩면적 대비 출력 전력 특성을 비교하는 전력 밀도 특성에서도 강점을 보여 공정 단가가 비싼 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 양산화 과정에서 우수한 경쟁력을 나타낸다. 본 논문에서 개발된 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC는 다양한 X-대역 레이더 응용에 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

Table 2. The comparison of the developed X-band AlGaIn/GaN power amplifier MMIC with other reported data.

표 2. 개발된 X-대역 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC의 특성 비교

Reference	[6]	[7]	[8]	[9]	This work
Frequency (GHz)	9-10	8-11	9-10	9-10	9-10
V <sub>DRAIN</sub> (V)	30	28	28	30	28
P <sub>OUT,SAT</sub> (dBm)	44.77	45.44	42.5	41.76	46.19
Linear gain (dB)	20	28	35	24	21.5~22.9
PAE (%)	36	40	40	40	43.1~44.5
MMIC area (mm <sup>2</sup> )	9.8	17.28	13.1	13.97	15.48
Power density (W/mm <sup>2</sup> )	3.06	2.02	1.35	1.07	2.69

#### IV. 결론

본 논문에서는 0.25 μm 게이트를 갖는 AlGaIn/GaN HEMT를 기반으로 개발된 X-대역 전력 증폭기 MMIC

의 특성을 기술하였다. 개발된 전력 증폭기 MMIC는 9 GHz~10 GHz의 동작 주파수 대역에서 46.11 dBm (40.83 W) 이상의 출력 전력 특성과 21.6 dB 이상의 소신호 이득 특성을 나타내었다. 최대 출력 전력은 9.5 GHz 동작 주파수에서 46.19 dBm(41.59 W) 이었으며 전력 부가 효율은 43.09%~44.47%의 특성을 얻었다. 칩의 크기는 3.6 mm×4.3 mm이며 출력 전력 밀도는 2.69 W/mm<sup>2</sup>를 나타내었다. 개발된 AlGaIn/GaN 전력 증폭기 MMIC는 다양한 X-대역 레이더 시스템 응용에 적용 가능하다.

#### References

[1] D. Runton, et al., "History of GaN: High- Power RF Gallium Nitride (GaN) from Infancy to Manufacturable Process and Beyond," *IEEE Microwave Magazine*, vol.14, no.3, pp.82-466, 2013. DOI: 10.1109/MMM.2013.2240853

[2] R. Pengelly, et al., "A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.60, no.6, pp.1764-1783, 2013. DOI: 10.1109/TMTT.2012.2187535

[3] S. D'Angelo, et al., "A GaN MMIC chipset suitable for integration in future X-band space borne radar T/R module Frontends," in *Proc. of 2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, pp.1-4, 2016. DOI: 10.1109/MIKON.2016.7492014

[4] D. Shin, et al., "X-band GaN MMIC power amplifier for the SSPA of a SAR system," in *Proc. of 2017 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT)*, pp.93-95, 2017. DOI: 10.1109/RFIT.2017.8048093

[5] Y. Lien, et al., "GaN technologies for applications from L- to Ka-band," in *Proc. of 2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS)*, pp.1-5, 2017. DOI: 10.1109/COMCAS.2017.8244831

[6] "APA091030D," Ace technologies corp., [internet], <http://www.rfmiso.com>.

[7] "CMPA801B025D," Cree Inc., [internet],

<http://www.cree.com>.

[8] "TGA2624," Qorvo Inc., [internet],

<http://www.qorvo.com>.

[9] "CHA8610-99F," United Monolithic Semi., [internet],

<http://www.ums-gaas.com>

## BIOGRAPHY

### Byeong-Ok Lim (Member)



2003 : MS degree in Electronic Engineering, Dongguk University.  
2009 : Ph. D. degree in Electronic Engineering, Dongguk University.  
2010~2016 : Research Engineer, Hanwha Systems.

2017~2018 : Research Engineer, GP Inc.

2019~present : CEO, Electron Device Solution Inc.

### Joo-Seoc Go (Member)



2014 : MS degree in Electronic Communication Engineering, Hongik University.  
2016~2017 : Research Engineer, U2SR  
2018~2018 : Research Engineer, GP Inc.

2019~present : Research Engineer, Electron Device Solution Inc.

### Keun-Kwan Ryu (Member)



1992 : B.E. degree in Electronics and Communication Engineering, Kwangwoon Univ.  
1994 : M.E. degree in Electronics and Communication Engineering, Kwangwoon Univ.

2000 : Ph.D. degree in Electronics and Communication Engineering, Kwangwoon Univ.

2000~2003 : Research engineer, Electronics and Telecommunications Research Institute

2003~present : Professor in Department of electronic engineering, Hanbat National University.

### Sung-Chan Kim (Member)



1999 : BS degree in Electronic Engineering, Dongguk University.  
2001 : MS degree in Electronic Engineering, Dongguk University.  
2006 : Ph. D. degree in Electronic Engineering, Dongguk University.

2007~present : Professor in Department of electronic engineering, Hanbat National University.