

0.25 μm GaN HEMT 기술을 이용한 우수한 성능의 X-대역 전력 증폭기

High performance X-band power amplifier MMIC using a 0.25 μm GaN HEMT technology

이복형*, 박병준*, 최선열*, 임병옥**, 고주석**, 김성찬***★

Bok-Hyung Lee*, Byung-Jun Park*, Sun-Youl Choi*, Byeong-Ok Lim**,
Joo-Seoc Go**, and Sung-Chan Kim***★

Abstract

This work describes the design and characterization of a X-band power amplifier (PA) monolithic microwave integrated circuit (MMIC) using a 0.25 μm gate length gallium nitride (GaN) high electron mobility transistor (HEMT) technology. The developed X-band power amplifier MMIC has small signal gain of over 22.7 dB and saturated output power of 43.02 dBm (20.04 W) over the entire band of 9 to 10 GHz. Maximum saturated output power is a 43.84 dBm (24.21 W) at 9.5 GHz. Its power added efficiency (PAE) is 41.0~51.24% and the chip dimensions are 3.7 mm \times 2.3 mm, generating the output power density of 2.84 W/mm². The developed GaN power amplifier MMIC is expected to be applied in a variety of X-band radar applications.

요약

본 논문에서는 게이트 길이가 0.25 μm 인 GaN HEMT 기술을 사용하여 개발된 X-대역 전력 증폭기의 특성을 기술한다. 개발된 X-대역 전력 증폭기는 9~10 GHz의 대역에서 22.7 dB 이상의 소신호 이득과 43.02 dBm(20.04 W) 이상의 포화 출력 전력을 가진다. 최대 포화 출력 전력은 9.5 GHz에서 43.84 dBm (24.21 W)이었다. 전력 부가 효율은 41.0~51.24%의 특성을 얻었으며 칩의 크기는 3.7 mm \times 2.3 mm이다. 출력 전력 밀도는 2.84 W/mm²를 나타내었다. 개발된 GaN 전력 증폭기는 다양한 X-대역 레이더 응용에 적용 가능할 것으로 예상된다.

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

* AESA Radar R&D Center, Hanwha Systems, Geonggi-do 17121, Korea

** R&D Division, GP Inc., Daejeon 34036, 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 grant-in-aid of HANWHA SYSTEMS.

Manuscript received Jun 5, 2019; revised June 17, 2019; accepted June. 18, 2019.

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.

1. 서론

위상 배열 시스템(phased array system)은 항공기와 미사일을 탐지하기 위한 군사용 레이더 응용을 위해 처음 개발되었으나, 근래 들어 의료 이미징 스캐너, 기상 레이더 시스템 등과 같은 다양한 민간용 레이더 응용에도 널리 사용되고 있다. 위상 배열 시스템의 형태는 크게 수동 위상 배열과 능동 위상 배열 형태로 구분되는데, 빔 민첩성, 효과적인 레이더 소스 관리 및 시스템 모듈 오류로 인한 보수 용이성 등이 대두되면서 수동 위상 배열에서 능동 위상 배열 형태로 발전되고 있다. 능동 위상

배열 시스템은 일반적으로 능동 전자 주사식 배열(AESA : active electronically scanned array)이며, 이것은 각 안테나 소자가 각기 자체 송수신기 모듈(TRM : transmitter receiver module)을 갖는 위상 배열이다.

고출력 특성을 갖는 전력 증폭기는 능동 전자 주사식 배열 시스템을 위한 송수신 모듈에서 가장 중요한 구성 요소 중 하나이다. 특히 반도체 전력 증폭기(SSPA : solid state power amplifier)는 기존의 레이더 응용에서 널리 사용되는 진행파관 증폭기(TWTA : traveling wave tube amplifier)를 대체할 수 있기 때문에 많은 주목을 받고 있다. 반도체 전력 증폭기는 진공소자 기반 전력 증폭기와 비교하여 우수한 MTBF(mean time between failure), 낮은 전압 사용, 소형화 및 경량화 등 많은 장점을 가진다.

반도체 전력 증폭기를 위한 소자 기술들은 InP, GaAs 및 GaN 물질을 포함하여 지난 수십 년간 지속적으로 개선되고 있다. 최근에는 특히 GaN (gallium nitride) 소자 기술의 발달로 인해 GaN 기반 고출력 전력 증폭기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-4]. GaN 기반 전력 증폭기는 넓은 에너지 밴드 갭으로 인한 고전압 동작, 높은 포화 캐리어 속도와 같은 고유하고 탁월한 재료적 특성으로 인하여 고출력 RF 전력 증폭기 응용에 큰 장점을 가진다.

본 논문에서는 게이트 길이가 0.25 μm 인 GaN HEMT(high electron mobility transistor) 기술을 사용하여 X-대역 레이더 응용에 활용 가능한 고출력 반도체 전력 증폭기 설계와 제작에 관한 내용을 기술한다. 주요 성능지표로서 9~10 GHz의 동작 주파수 범위에서 20 dB 이상의 소신호 이득, 42 dBm 이상의 포화 출력 전력, 40% 이상의 전력 부가 효율 등을 설정하였다.

II. 전력 증폭기 설계

X-대역에서 동작하는 전력 증폭기를 개발하기 위하여 마이크로스트립 기반 AlGaIn/GaN HEMT 소자를 사용하여 설계를 진행하였다. HEMT 공정은 대만 WIN Semi. Corp.의 NP2500 라이브러리를 사용하였다. WIN Semi. Corp.의 0.25 μm GaN HEMT는 120 V의 항복전압 특성을 가지며 28 V

의 동작전압에서 24.5 GHz의 전류 이득 차단 주파수 특성을 가진다. 10 GHz의 동작 주파수에서 19 dB의 소신호 이득 특성을 나타내며 4.7 W/mm의 전력밀도와 64%의 전력 부가 효율을 나타낸다[5].

그림 1에 X-대역에서 동작하는 GaN 전력 증폭기의 회로도를 나타내었다. 설계된 전력 증폭기는 출력전력을 위한 출력단과 소신호 이득을 위한 입력단의 2단 구조로 구성되어 있다. 단위 게이트 폭이 150 μm , 게이트 수가 8개인 GaN HEMT 단위 소자의 load-pull 시뮬레이션 결과 10 GHz에서 약 37 dBm의 출력 전력을 기대할 수 있으므로 최종 42 dBm 이상의 출력 전력을 얻기 위하여 4개의 GaN HEMT 단위 소자를 병렬로 연결하였다.

2단으로 구성된 전력 증폭기는 마이크로스트립 라인(microstrip line)을 사용하여 정합(matching) 회로를 구성하였다. 입력 정합 회로는 높은 이득 구현을 위해 공액 정합하였으며 출력 정합 회로는 높은 출력 전력 구현을 위하여 전력 정합을 실시하였다.

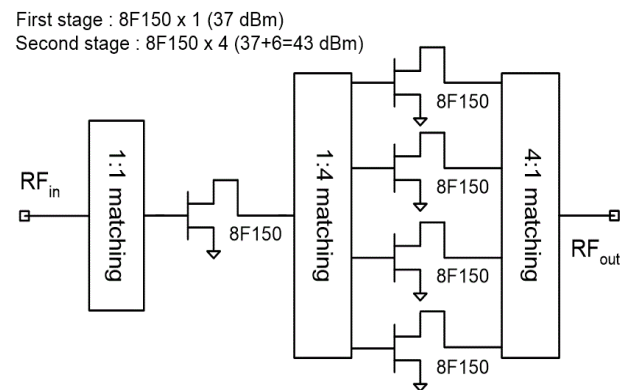


Fig. 1. Schematic diagram of the designed X-band GaN power amplifier MMIC.

그림 1. 설계된 X-대역 GaN 전력 증폭기의 회로도

각 단 HEMT 단위 소자의 입력/출력 임피던스를 추출하여 단간 정합을 수행하였다. 회로 안정화를 위하여 각각 HEMT 단위 소자의 입력에 저항-커패시터(RC) 병렬 회로를 추가하였으며, 게이트 바이어스 라인에 직렬 저항을 삽입하였다. 기수 모드 발진(odd mode oscillation)을 방지하기 위하여 인접한 HEMT 단위 소자 사이에 직렬 저항을 삽입하였다.

설계된 20 W(43 dBm) 전력 증폭기의 전체 회로 패턴은 NI/AWR's AXIEM 전자기 시뮬레이션 툴

을 통하여 최적화를 수행하였다. 전자기 시뮬레이션을 통하여 최적화된 전력 증폭기는 9~10 GHz의 동작 주파수에서 22 dB 이상의 소신호 이득과 42.4 dBm 이상의 출력 전력 및 42% 이상의 전력 부가 효율 특성을 나타내었다.

III. 전력 증폭기 측정 결과

제작된 X-대역 전력 증폭기의 사진을 그림 2에 나타내었다. 전력 증폭기의 크기는 3.7 mm × 2.3 mm이다.

제작된 전력 증폭기의 성능 검증을 위해 측정 치구(test fixture)를 제작하였다. 먼저 40 mil 두께의 CuMo carrier plate에 전력 증폭기 칩을 AuSn을 사용하여 접착하고, 이를 알루미늄 실험 치구에 조립하였다. 전력 증폭기의 입력과 출력 단자는 Au 와이어 본딩(wire bonding)을 사용하여 10 mil 두

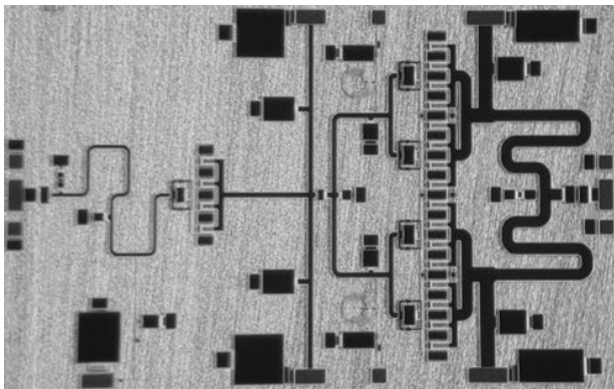


Fig. 2. Chip photograph of the fabricated two-stage GaN power amplifier MMIC.

그림 2. 제작된 2단 GaN 전력 증폭기의 칩 사진

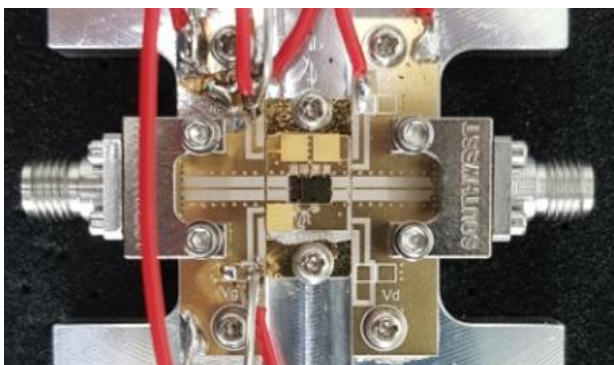


Fig. 3. Photograph of the test fixture for the fabricated two-stage GaN power amplifier MMIC.

그림 3. 제작된 2단 GaN 전력 증폭기 성능 검증을 위한 측정 치구 사진

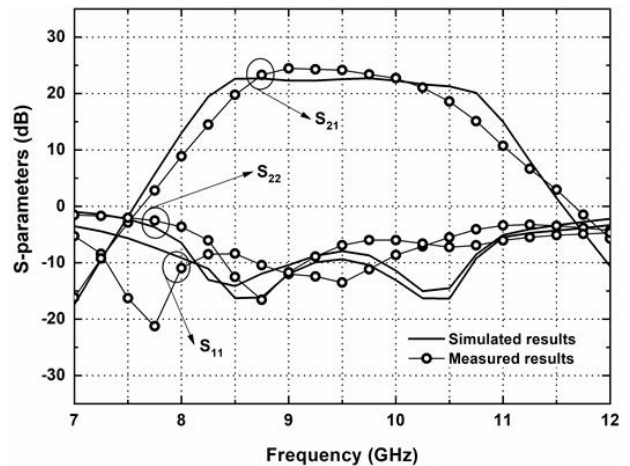
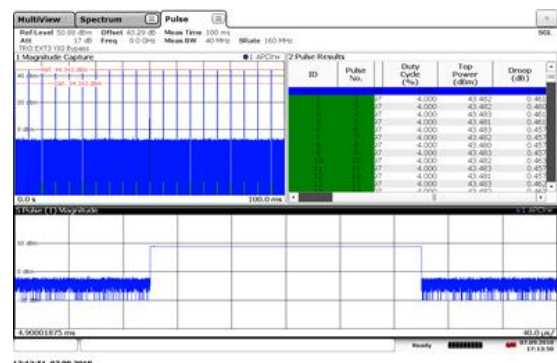


Fig. 4. Measured S-parameters characteristics of the fabricated two-stage GaN power amplifier MMIC.

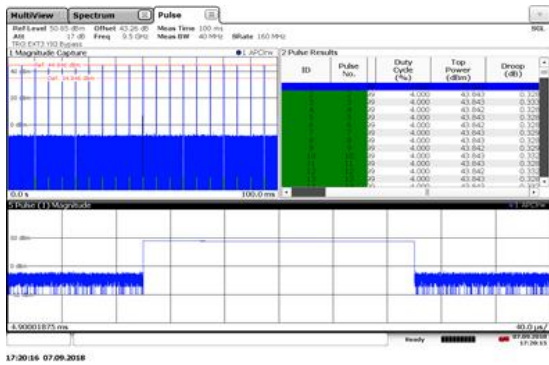
그림 4. 제작된 2단 GaN 전력 증폭기의 S-parameters 특성 측정 결과

께 알루미늄 기판의 50 Ω 마이크로스트립 라인에 연결하였다. 입력 및 출력 단자에서의 와이어 인덕턴스(inductance)는 회로 시뮬레이션에서 미리 고려되어 설계에 반영하였으며 50 Ω 마이크로스트립 라인의 반대 영역은 SMA 커넥터에 연결되어 있다. 100 pF의 바이패스 커패시터를 DC 바이어스 패드에 연결하였다. 그림 3에 제작된 실험 치구를 나타내었다. 실험 치구를 사용하는 전력 증폭기의 측정은 200 μs의 펄스 폭(pulse width)과 4%의 듀티 사이클(duty cycle)의 펄스 모드에서 진행되었다.

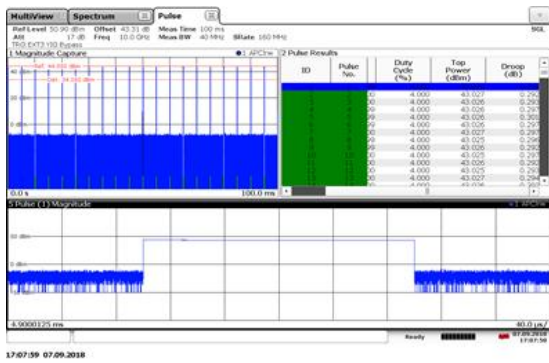
제작된 2단 GaN 전력 증폭기의 S-parameters 측정 결과를 그림 4에 나타내었다. 28 V의 드레인 전압을 사용하였으며 이 때 전류 값은 0.3 A이었다. 9~10 GHz의 동작주파수 대역에서 22.72~24.45 dB의 소신호 이득, -8.7~-12.1 dB의 입력 반사 손실과 -6.1~-11.7 dB의 출력 반사 손실 특성을 얻었다.



(a) 43.48 dBm @9 GHz



(b) 43.84 dBm @9.5 GHz



(c) 43.02 dBm @10 GHz

Fig. 5. Measured output power characteristics of the fabricated two-stage GaN power amplifier MMIC. 그림 5. 제작된 2단 GaN 전력 증폭기의 출력 전력 특성 측정 결과

출력 전력 특성은 28 V의 드레인 전압 및 -2.4 V의 게이트 전압 조건 아래에서 입력 전력이 30 dBm인 경우 동작주파수 전 대역에서 43 dBm (20.04 W) 이상의 포화 출력 전력 특성을 얻었으며,

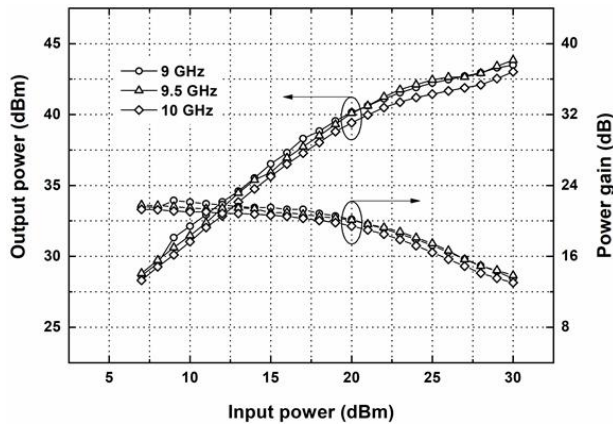


Fig. 6. Measured output power and power gain characteristics of the fabricated two-stage GaN power amplifier MMIC. 그림 6. 제작된 2단 GaN 전력 증폭기의 출력 전력 특성과 전력 이득 측정 결과

최대 포화 출력 전력은 9.5 GHz에서 43.84 dBm (24.21 W)이었다. 그림 5에 제작된 2단 GaN 전력 증폭기의 출력 전력 특성을 나타내었다.

입력 전력 특성에 대한 출력 전력 특성과 전력 이득 특성을 그림 6에 나타내었다. 입력 전력이 30 dBm인 경우, 전 대역에서 43 dBm 이상의 출력 전력 특성과 13 dB 이상의 전력 이득 특성을 나타내었다.

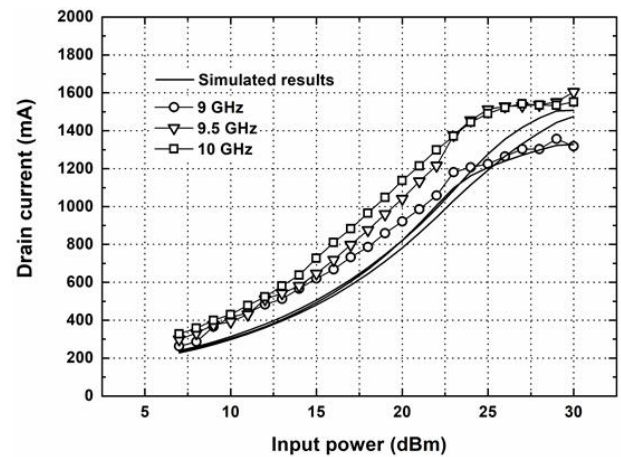


Fig. 7. Measured drain current characteristics of the fabricated two-stage GaN power amplifier MMIC. 그림 7. 제작된 2단 GaN 전력 증폭기의 드레인 전류 특성 측정 결과

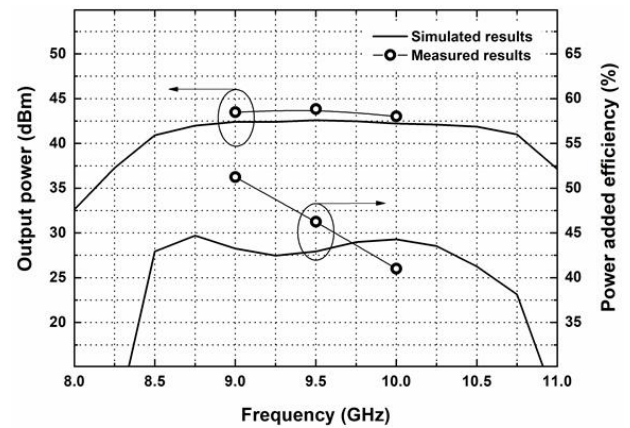


Fig. 8. Measured output power and power gain characteristics of the fabricated two-stage GaN power amplifier MMIC. 그림 8. 제작된 2단 GaN 전력 증폭기의 출력 전력 특성과 전력 이득 측정 결과

입력 전력 특성에 대한 드레인 전류 특성과 동작 주파수 대역에 대한 출력 전력 및 전력 부가 효율 특성을 그림 7과 그림 8에 각각 나타내었다. 포화 출력 전력 상태에서 1318~1605 mA의 드레인 전

류 특성을 얻었으며, 전력 부가 효율 특성은 41.0~51.24%를 나타내었다.

표 1에 개발된 X-대역 GaN 전력 증폭기의 측정 결과를 요약하고, 해외 유수의 반도체 업체에서 개발한 X-대역 GaN 전력 증폭기의 특성과 비교하였다. 본 논문에서 개발된 X-대역 GaN 전력 증폭기는 전력 부가 효율과 전력 밀도 특성을 포함하는 주요 성능 지표에서 우수한 경쟁력을 가지며 다양한 X-대역 레이더 응용에 충분히 적용 가능할 것으로 예상된다.

Table 1. The comparison of the developed X-band GaN power amplifier MMICs with other reported data.

표 1. 개발된 X-band GaN 전력 증폭기의 특성 비교

| Reference | [6] | [7] | [8] | [9] | This work |
|------------------------------------|-------|-------|------|-------|-----------|
| Frequency (GHz) | 9-10 | 8-11 | 9-10 | 9-10 | 9-10 |
| VDRAIN (V) | 30 | 28 | 28 | 30 | 28 |
| POUT, SAT (dBm) | 44.77 | 45.44 | 42.5 | 41.76 | 43.84 |
| Linear gain (dB) | 20 | 28 | 35 | 24 | 24 |
| PAE (%) | 36 | 40 | 40 | 40 | 41-51.2 |
| MMIC area (mm ²) | 9.8 | 17.28 | 13.1 | 13.97 | 8.51 |
| Power density (W/mm ²) | 3.06 | 2.02 | 1.35 | 1.07 | 2.84 |

IV. 결론

본 논문에서는 게이트 길이가 0.25 μm 인 GaN HEMT 기술을 사용하여 개발된 X-대역 전력 증폭기의 특성을 기술한다. 개발된 X-대역 전력 증폭기는 9~10 GHz의 대역에서 22.7 dB 이상의 소신호 이득과 43.02 dBm(20.04 W) 이상의 포화 출력 전력을 가진다. 최대 포화 출력 전력은 9.5 GHz에서 43.84 dBm(24.21 W)이었다. 전력 부가 효율은 41.0~51.24%의 특성을 얻었으며 칩의 크기는 3.7 mm \times 2.3 mm이다. 출력 전력 밀도는 2.84 W/mm²를 나타내었다. 개발된 GaN 전력 증폭기는 다양한 X-대역 레이더 응용에 적용 가능할 것으로 예상된다.

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

Bok-Hyung Lee (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 : Research Engineer, Hanwha Systems.

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, Hanbat National University.

Byung-Jun Park (Member)

2009 : BS degree in Electronic Engineering, Kwangwoon University.
 2011 : MS degree in Electronic Engineering, Kwangwoon University.
 2011~present : Research Engineer, Hanwha Systems.

Sun-Youl Choi (Member)

2013 : BS degree in Electronic Engineering, Chonbuk University.
 2016 : MS degree in Electronic Engineering, Kyungpook University.
 2016~present : Research Engineer, Hanwha Systems.

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~present : Research Engineer, GP Inc.

Joo-Seoc Go (Member)

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