

위성 통신 응용을 위한 Ku-대역 3 Watt PHEMT MMIC 전력 증폭기

A Ku-band 3 Watt PHEMT MMIC Power Amplifier for satellite communication applications

엄 원 영*, 임 병 옥**, 김 성 찬***★

Won-Young Uhm*, Byeong-Ok Lim** and Sung-Chan Kim***★

Abstract

This work describes the design and characterization of a Ku-band monolithic microwave integrated circuit (MMIC) power amplifier (PA) for satellite communication applications. The device technology used relies on 0.25 μm gate length gallium arsenide (GaAs) pseudomorphic high electron mobility transistor (PHEMT) of wireless information networking (WIN) semiconductor foundry. The developed Ku-band PHEMT MMIC power amplifier has a small-signal gain of 22.2 ~23.1 dB and saturated output power of 34.8~35.4 dBm over the entire band of 13.75 to 14.5 GHz. Maximum saturated output power is a 35.4 dBm (3.47 W) at 13.75 GHz. Its power added efficiency (PAE) is 30.6~37.83% and the chip dimensions are 4.4 mm \times 1.9 mm. The developed 3 W PHEMT MMIC power amplifier is expected to be applied in a variety of Ku-band satellite communication applications.

요 약

본 논문에서는 위성 통신 시스템 응용을 위하여 Ku-대역에서 동작하는 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 특성을 기술한다. 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기는 WIN(wireless information networking) semiconductor Corp.에서 제공하는 게이트 길이가 0.25 μm 인 GaAs 기반 PHEMT (pseudomorphic high electron mobility transistor) 공정을 사용하여 개발되었다. 개발된 Ku-대역 PHEMT MMIC 전력 증폭기는 13.75 GHz에서부터 14.5 GHz까지의 동작주파수 범위에서 22.2~23.1 dB의 소신호 이득과 34.8~35.4 dBm의 포화 출력 전력을 가진다. 최대 포화 출력 전력은 13.75 GHz에서 35.4 dBm (3.47 W)이었다. 전력 부가 효율은 30.8~37.83%의 특성을 얻었으며 칩의 크기는 4.4 mm \times 1.9 mm이다. 개발된 PHEMT MMIC 전력 증폭기는 다양한 Ku-대역 위성 통신 시스템 응용에 적용 가능할 것으로 예상된다.

Key words : Power amplifier, MMIC, GaAs, PHEMT, Ku-band.

* Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

** R&D Division, Electron Device Solution 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

Manuscript received Nov. 25, 2020; revised Dec. 23, 2020; accepted Dec. 28, 2020.

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

위성 통신은 광역성, 동보성과 멀티액세스, 회선 설정의 신속성과 유연성, 그리고 전송 비용이 통신 거리와 관계가 없다는 장점을 가지고 있다. 초기 위성 통신은 비용이 높았던 대륙 간 통신이었으나 점차 위성이 대형화되고 위성 회선 비용이 저렴해지면서 방송용, 이동통신 및 데이터통신 등의 다양한 응용으로 발전 되어왔다. 2010년대 들어서 멀티 빔과 대용량 중계기를 탑재한 정지궤도 위성과 저궤도 위성에 의한 광대역 위성 통신 사업 기반이

전 세계적으로 구축되고 있으며, 최근에는 다양한 통신 기술 간 연계를 가속화하기 위해 5G, IoT와 광대역 위성통신 네트워크와의 연계에 관한 기술 개발 및 상용화 연구가 활발하게 진행 중이다.

고출력 특성을 갖는 RF 전력 증폭기는 위성 통신 응용 관련 송수신 모듈에서 가장 중요한 구성 요소 중 하나이다. 특히 반도체 RF 전력 증폭기(SSPA: solid state power amplifier)는 우수한 MTBF(mean time between failure), 낮은 전압 사용, 소형화 및 경량화 등 많은 장점으로 주목 받아 왔다. 반도체 RF 전력 증폭기에 사용되는 전력 증폭 소자는 실리콘 기반의 LD-MOS(laterally diffused metal oxide semiconductor) 소자, III-V 화합물 반도체 기반의 GaAs(gallium arsenide)나 GaN(gallium nitride) 기반의 HEMT(high electron mobility transistor) 소자가 주로 사용된다. 근래 들어 GaN 관련 공정 기술이 상당한 정도로 안정화되면서 GaN 기반 전력 증폭 소자는 넓은 에너지 밴드 갭과 빠른 포화 캐리어 속도와 같은 재료적 특성에 기인하여 오랫동안 사용되어져 왔던 GaAs 기반 전력 증폭 소자를 대체하고 있다[1]-[2]. GaAs 기반 전력 증폭 소자는 GaN 기반의 전력 증폭 소자와 비교하여 전력 밀도 특성이 부족하며, 이는 매우 높은 출력 전력을 필요로 하는 응용에 사용이 제한되는 이유가 된다. 그러나 그럼에도 불구하고 GaAs 기반 전력 증폭기는 GaN 기반의 전력 증폭기와 비교하여 RF 특성이 매우 우수하며 상대적으로 높은 공정 성숙도와 저렴한 생산 단가로 인하여 아직도 많은 응용에서 사용되고 있다[3]-[6].

위성 통신 응용을 위한 주파수 대역으로 전통적 상업 위성용인 C-대역(4~8 GHz), 소형 지구국 안테나 응용을 위한 Ku-대역(12~18 GHz)과 Ka-대역(27~40 GHz)에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔으며 최근에는 주파수 자원 고갈과 초고속 정보 전송을 위한 광대역폭의 필요성으로 X-대역(8~12 GHz)과 V-대역(40~75 GHz)으로 연구가 확대되고 있다. 이런 초고주파에서 동작 가능한 부품 기술은 소수 선진국에서만 개발하여 판매하는 고부가가치 산업 분야이며, 각국의 기술 보호가 심하여 부품의 국산화는 물론 더 나아가 기술경쟁력 제고가 필요한 분야이다.

따라서 본 논문에서는 게이트 길이가 0.25 μm 인 GaAs PHEMT 기술을 사용하여 Ku-대역 위성 통

신용 안테나 시스템의 BUC (block-up converter)에 활용 가능한 반도체 RF MMIC 전력 증폭기를 개발하였다. 주요 성능지표로서 13.75~14.50 GHz의 동작 주파수 범위에서 20 dB 이상의 소신호 이득, 34 dBm 이상의 포화 출력 전력, 25% 이상의 전력 부가 효율 등을 설정하였다.

II. 전력 증폭기 설계

Ku-대역에서 동작하는 3 W MMIC 전력 증폭기를 개발하기 위하여 마이크로스트립 기반 AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT(pseudomorphic high electron mobility transistor) 소자를 사용하여 설계를 진행하였다. PHEMT 공정은 대만 WIN Semi. Corp.의 PP2521 라이브러리를 사용하였다. PP2521 라이브러리는 0.25 μm 의 게이트 길이와 100 μm 두께의 GaAs 기판(substrate)을 사용한다.

그림 1에 Ku-대역에서 동작하는 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 회로도를 나타내었다. 설계된 PHEMT MMIC 전력 증폭기는 출력전력을 위한 출력단, 출력단을 구동하기 위한 중간단과 소신호 이득을 위한 입력단의 3단 구조로 구성되어 있다.

전력 증폭기의 출력단 설계를 위해 단위 게이트 폭이 150 μm , 게이트 수가 8개인 GaAs PHEMT 단위 소자를 사용하였다. 단위 소자의 load-pull 시뮬레이션 결과 14 GHz에서 약 29 dBm의 출력 전력을 기대할 수 있어 최종 35 dBm 이상의 출력 전력을 얻기 위하여 4개의 GaAs PHEMT 단위 소자를 병렬로 연결하였다. 회로 안정화를 위하여 각각 PHEMT 단위 소자의 입력에 저항-커패시터(RC) 병렬 회로를 추가하였으며, 기수 모드 발진(odd mode oscillation)을 방지하기 위하여 인접한 PHEMT 단위 소자 사이에 저항을 삽입하였다. 입력단은 높은 소신호 이득 특성을 위해 공액 정합하였으며 출력단은 높은 출력 전력 특성을 위해 전력 정합을 수행하였다. 중간단은 출력단 구동을 위한 충분한 전력 공급과 높은 효율 특성을 동시에 얻기 위한 임피던스를 추출하여 각 단 사이 정합을 수행하였다. 측정을 위한 실험 치구의 패키지 수행 시 입력단과 출력단에 연결되는 본딩 와이어(bonding wire)의 인덕턴스(inductance)를 미리 고려하여 설계하였으며 정전압 공급을 위한 바이어스 회로는 전력 증폭기 소자의 소형화를 위해 패키지 수행 시 소자

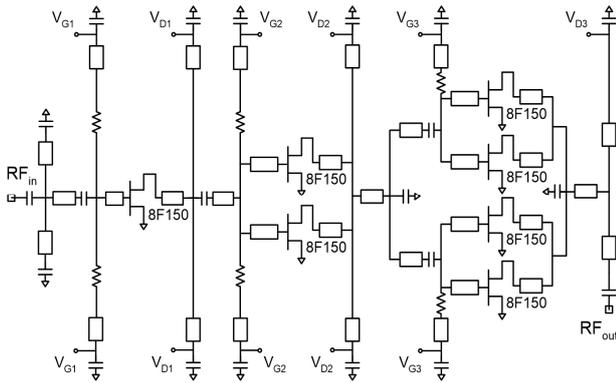


Fig. 1. Schematic diagram of the designed Ku-band 3 W PHEMT MMIC power amplifier.

그림 1. 설계된 Ku-대역 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 회로도

외부에 구현하였다. 각 단의 바이어스 라인들은 정합 회로의 역할을 동시에 수행하며 고주파 신호 손실 방지를 위하여 $\lambda/4$ 단락 스텐브 (short stub)와 바이패스(bypass) 커패시터를 포함한다.

설계된 Ku-대역 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 전체 회로 패턴은 Agilent사의 Momentum 전자기 (EM) 시뮬레이션 툴을 통하여 최적화를 수행하였다. 전자기 시뮬레이션을 통하여 최적화된 MMIC 전력 증폭기는 13.75~14.50 GHz의 동작 주파수에서 22 dB 이상의 소신호 이득과 35 dBm 이상의 출력 전력 및 30% 이상의 전력 부가 효율 특성을 나타내었다.

III. 전력 증폭기 측정 결과

WIN Semi. Corp.의 마이크로스트립 라인 기반 standard 0.25 μm GaAs PHEMT 공정을 사용하여 제작된 Ku-대역 3 W MMIC 전력 증폭기의 사진을

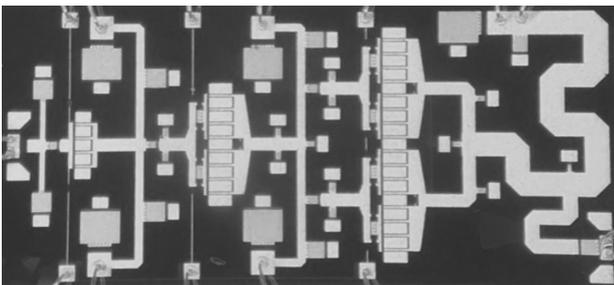


Fig. 2. Chip photograph of the fabricated Ku-band 3 W PHEMT MMIC power amplifier.

그림 2. 제작된 Ku-대역 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 사진

그림 2에 나타내었다. 제작된 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 칩 크기는 4.4 mm×1.9 mm이다.

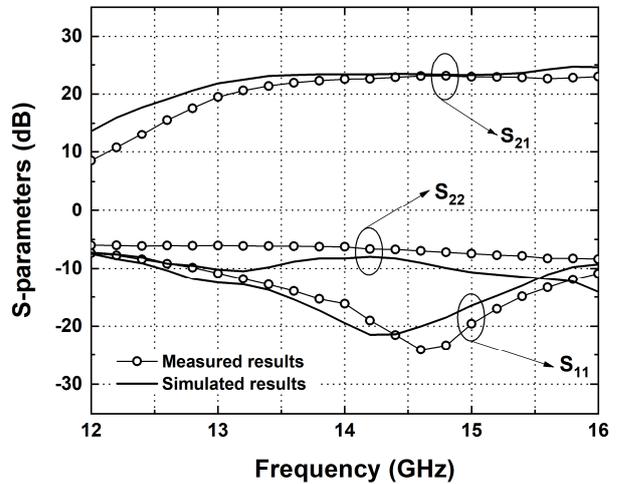


Fig. 3. Measured S-parameters characteristics of the fabricated Ku-band 3 W PHEMT MMIC power amplifier.

그림 3. 제작된 Ku-대역 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 S-parameters 특성 측정 결과

제작된 전력 증폭기의 성능 검증을 위해 측정 치구(test fixture)를 제작하였다. 측정 치구의 입출력 포트는 Ku-대역에서의 손실을 최소화하기 위하여 K-type 커넥터를 사용하였다. Rogers사의 12 mil 두께를 갖는 RO4003 기판에 전력 증폭기 칩을 AuSn을 사용하여 접착하고, 이를 알루미늄 실험 치구에 조립하였다. 100 pF의 바이패스 커패시터를 DC 바이어스 패드에 연결하였으며 본딩 와이어의 길이와 수량을 조절하면서 최종 측정 결과를 얻었다.

그림 3에 제작된 Ku-대역 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 S-parameters 특성을 나타내었다. S-parameters 측정은 8 V의 드레인 전압과 -1.2 V의 게이트 전압 조건에서 수행되었다. 13.75~14.50 GHz의 동작주파수 대역에서 22.2~23.1 dB의 소신호 이득, -15.1~-22.8 dB의 입력 반사 손실과 -6.3~-7.2 dB의 출력 반사 손실 특성을 얻었다.

출력 전력 특성은 8 V의 드레인 전압 및 -1.24 V의 게이트 전압 조건 아래에서 입력 전력이 15.5 dBm인 경우 동작주파수 전 대역에서 34.8 dBm(3 W) 이상의 포화 출력 전력 특성을 얻었으며, 최대 포화 출력 전력은 13.75 GHz에서 35.4 dBm(3.47 W)이었다. 그림 4에 제작된 Ku-대역 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 출력 전력 특성을 나타내었다.

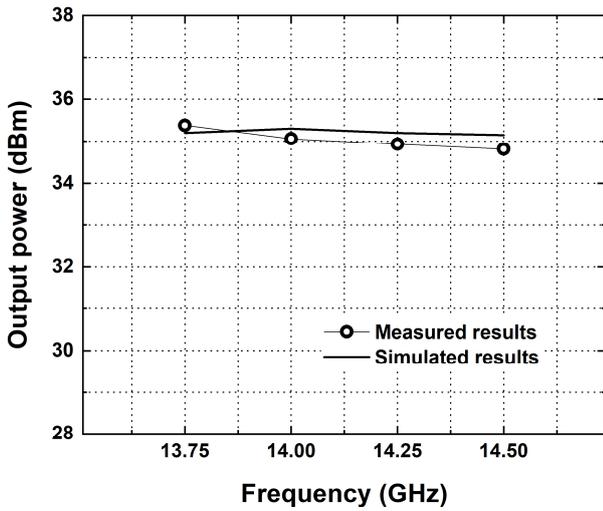


Fig. 4. Measured output power characteristics of the fabricated Ku-band 3 W PHEMT MMIC power amplifier.

그림 4. 제작된 Ku-대역 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 출력 전력 특성 측정 결과

입력 전력 특성에 대한 출력 전력 특성과 드레인 전류 특성을 그림 5에 나타내었다. 입력 전력이 15.5 dBm인 경우, 전 대역에서 34.8 dBm 이상의 출력 전력 특성을 얻었으며 포화 출력 전력 상태에서 1080~1130 mA의 드레인 전류 특성을 얻었다.

일반적으로 전력 증폭기는 전체 송신 시스템에서 사용되는 전력의 대부분을 소비하므로 전력 증폭기의 전력 부가 효율은 송신 시스템의 성능을 결정하는 중요한 지표로 활용된다. 개발된 Ku-대역 PHEMT MMIC 전력 증폭기는 포화 출력 전력 조건에서 30.6~37.83%의 전력 부가 효율 특성을 나타내었다. 그림 6에 개발된 PHEMT MMIC 전력 증폭기의 입력 전력 특성에 대한 전력 부가 효율 특성을 나타내었다.

표 1에 본 논문에서 개발된 PHEMT MMIC 전력 증폭기의 성능 수준을 검증하기 위하여 현재 세계적으로 판매되고 있는 Ku-대역 GaAs 기반 3 W급 MMIC 전력 증폭기들의 성능을 비교하였다. 개발된 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기는 기존에 발표된 GaAs 기반 Ku-대역 3 W급 MMIC 전력 증폭기 상용 제품들과 비교하여 전력 증폭기의 주요 성능 지표인 출력 전력 특성은 동등하며 전력 부가 효율은 더 우수한 결과를 얻었다. 향후 패키지와 신뢰성 시험 등을 거쳐 Ku-대역에서 동작 가능한 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 상용 제품화가 가능할 것으로 예상된다.

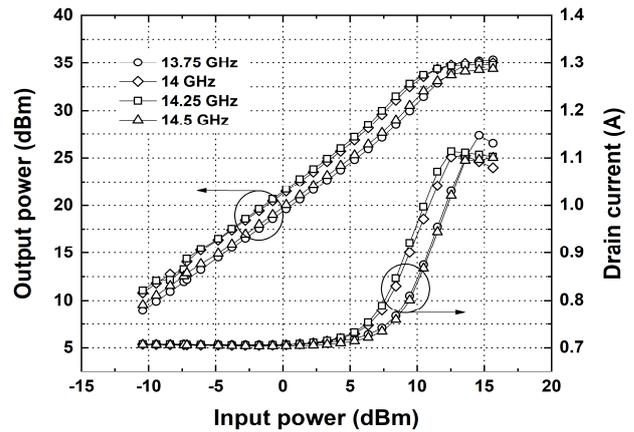


Fig. 5. Measured output power and drain current characteristics of the fabricated Ku-band 3 W PHEMT MMIC power amplifier.

그림 5. 제작된 Ku-대역 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 출력 전력과 드레인 전류 특성 측정 결과

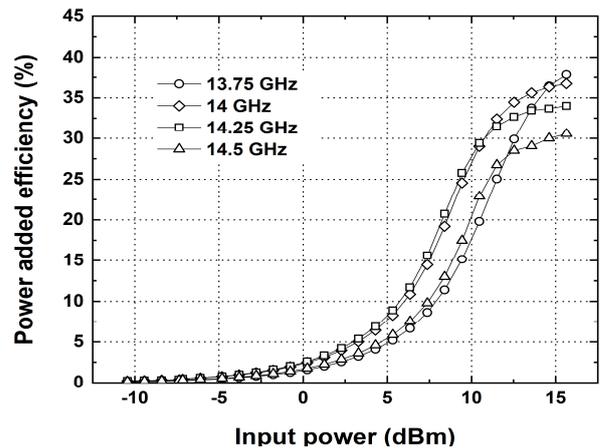


Fig. 6. Measured power added efficiency characteristics of the fabricated Ku-band 3 W PHEMT MMIC power amplifier.

그림 6. 제작된 Ku-대역 GaAs 기반 3 W 전력 증폭기 MMIC의 출력 전력 부가 효율 특성 측정 결과

Table 1. The comparison of the characteristics for Ku-band 3 W PHEMT MMIC power amplifiers.

표 1. Ku-대역 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 특성 비교

Ref.	Frequency (GHz)	POUT,SAT (dBm)	Linear gain (dB)	PAE (%)
[7]	10~15.35	36	27	-
[8]	14~18	35	24	35
[9]	13.75~14.5	35	33	28
[10]	12~16	35.5	31	26
[11]	13~17	34	25	-
This work	13.75~14.5	34.8~35.38	23	30.6~37.83

IV. 결론

본 논문에서는 위성 통신 시스템 응용을 위하여 Ku-대역에서 동작하는 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기의 특성을 기술하였다. MMIC 전력 증폭기는 WIN Semi. Corp.에서 제공하는 게이트 길이가 $0.25\ \mu\text{m}$ 인 마이크로스트립 기반 GaAs PHEMT 공정을 사용하여 개발되었다. 개발된 Ku-대역 PHEMT MMIC 전력 증폭기는 13.75 GHz에서부터 14.5 GHz까지의 동작주파수 범위에서 22.2~23.1 dB의 소신호 이득과 34.8~35.4 dBm의 포화 출력 전력을 가진다. 최대 포화 출력 전력은 13.75 GHz에서 35.4 dBm(3.47 W)이었다. 전력 부가 효율은 30.8~37.83%의 특성을 얻었으며 칩의 크기는 $4.4\ \text{mm} \times 1.9\ \text{mm}$ 이다. 개발된 3 W PHEMT MMIC 전력 증폭기는 다양한 Ku-대역 위성 통신 시스템 응용에 적용 가능할 것으로 판단된다.

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.82-93, 2013. DOI: 10.1109/MMM.2013.2240853
- [2] 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
- [3] K. Ryu, et al., "A 4W GaAs Power Amplifier MMIC for Ku-band Satellite Communication Applications," *Journal of Semiconductor Technology and Science*, vol.15, no.4, pp.501-505, 2015. DOI: 10.5573/JSTS.2015.15.4.501
- [4] J. R. Powell, et al., "GaAs X-Band High Efficiency (>65%) Broadband (>30%) amplifier MMIC Based on the Class B to Class J Continuum," in *Proc. of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp.903-906, 2011. DOI: 10.1109/MWSYM.2011.5972786
- [5] I. Ju, et al., "Ku-Band GaAs MMIC High

Power Amplifier with High Efficiency and Broadband," in *Proc. of Conference on Microwave Techniques*, pp.100-103, 2015.

DOI: 10.1109/COMITE.2015.7120324

[6] E. Babakrpur, et al., "Wideband GaAs MMIC Driver Power Amplifiers for X and Ku Bands," in *Proc. of IEEE Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and System*, pp.85-88, 2017. DOI:10.1109/WMCaS.2017.8070690

[7] "MAAP-010150," <http://www.macom.com>

[8] "NDAC01038," <http://www.neditek.com>

[9] "FMM5059VF," <http://www.sedi.co.jp>

[10] "HMC949," <http://www.analog.com>

[11] "TGA2505," <http://www.qorvo.com>

BIOGRAPHY

Won-Young Uhm (Member)



2002 : BS degree in Electronic Engineering, Dongguk University.
2004 : MS degree in Electronic Engineering, Dongguk University.
2004~present : Research Engineer, Agency for Defense Development (ADD).

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.

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.