THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2016 Feb.; 27(2), 108～114.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2016.27.2.108
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

Small-Cell 기지국 시스템을 위한 2.6 GHz GaN-HEMT Doherty 전력증폭기 집적회로 설계

Design of a 2.6 GHz GaN-HEMT Doherty Power Amplifier IC for Small-Cell Base Station Systems

이휘섭 · 임원섭 · 강현욱 · 이우석 · 이형준* · 윤정상* · 이동우* · 양영구

Hwiseob Lee · Wonseob Lim · Hyunuk Kang · Wooseok Lee · Hyoungjun Lee* · Jeongsang Yoon* · Dongwoo Lee* · Youngoo Yang

요 약

본 논문에서는 2.6 GHz에서 동작하는 Doherty 전력증폭기 집적회로를 설계 및 제작하여 평균 전력에서의 효율을 개선하였다. Small-cell 기지국 시스템에 적합하도록 전력 밀도가 높은 GaN-HEMT 공정을 사용하여 설계하였으며, 제작된 Doherty 전력증폭기 집적회로를 QFN 패키지 내부에 수용하여 시스템 적용에 용이하도록 하였다. 제작된 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기 집적회로는 10 MHz의 대역폭 및 6.5 dB의 PAPR 특성을 갖는 2.6 GHz LTE 신호에 대하여 평균 전력 33.9 dBm에서 15.8 dB의 전력 이득, 43.0%의 효율 및 −30.0 dBc의 ACLR 특성을 나타낸다.

Abstract

This paper presents a 2.6 GHz Doherty power amplifier IC to enhance the back-off efficiency. In order to apply to small-cell base stations, the Doherty power amplifier was fabricated using GaN-HEMT process for high power density. In addition, the implemented Doherty power amplifier was mounted on a QFN package. The implemented GaN-HEMT Doherty power amplifier was measured using LTE downlink signal with 10 MHz bandwidth and 6.5 dB PAPR for verification. A power gain of 15.8 dB, a drain efficiency of 43.0 %, and an ACLR of −30.0 dBc were obtained at an average output power level of 33.9 dBm.

Key words: GaN-HEMT, Doherty Power Amplifier, Small-Cell Base Station, LTE

Ⅰ. 서 론

LTE(Long Term Evolution)와 같은 최근의 무선 통신 시스템에서 pico-cell 혹은 femto-cell과 같은 small-cell 기지국의 수요가 증가하고 있다. 일반적으로 small-cell 기지국 전력증폭기는 평균 전력 기준으로 최대 약 2 W를 만족해야 하며, 전력증폭기의 고효율 특성과 더불어 소형화가 중요한 설계 주안점이라고 할 수 있다. GaN-HEMT(Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor) 공정은 타 공정에 비해 전력 밀도가 높아 전력증폭기의 소형화에 적합하다. 더불어 주파수 특성 및 효율 면에서도 우수하기 때문에 여러 가지로 장점을 갖는다[1]~[6]. 표 1은 기지국 전

「This work was supported by the Technology Innovation Program(10045892) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy(MI, Korea).」
성균관대학교 정보통신대학(School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University)
*(주)웨이브일렉트로닉스(Wave Electronics Co., Ltd.)
· Manuscript received September 24, 2015 ; Revised January 11, 2016 ; Accepted January 11, 2016. (ID No. 20150924-07S)
· Corresponding Author: Youngoo Yang (e-mail: yang09@skku.edu)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

표 1. Silicon LDMOS FET와 GaN-HEMT의 비교
Table 1. Comparison of silicon LDMOS FET and GaN-HEMT.

	Silicon LDMOS FET	GaN-HEMT
Bandgap	1.1 eV	3.4 eV
항복 전압	75 V	175 V
전력 밀도	1 W/mm	4 ~ 8 W/mm
최대 동작 주파수	3.8 GHz	> 12 GHz
온도 특성	225 ℃	250 ℃

력증폭기에 대표적으로 사용되는 silicon LDMOS(Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor) FET(field effect transistor)와 GaN-HEMT의 기본적인 특성에 대한 비교를 나타낸다.

대부분의 무선 통신을 위한 변조 신호들은 높은 PAPR (Peak-To-Average Power Ratio)을 요구하기 때문에 전력증폭기의 평균 전력에서의 효율 개선이 매우 중요하다. 하지만 일반적으로 출력 전력이 낮아질수록 전력증폭기의 효율은 급격히 감소하는 문제점이 있다. Doherty 전력증폭기는 기지국 전력증폭기에서 평균 전력의 효율 개선을 위해 가장 널리 사용되는 방식이다. 타 방식들에 비해 비교적 회로 구조가 단순하며, 간단한 부하 변조 방식을 이용하므로 구현이 용이하다는 장점이 있다[7]~[12].

본 논문에서는 GaN-HEMT 공정을 이용하여 2.6 GHz에서 동작하는 Doherty 전력증폭기 집적회로를 설계 및 제작하였다. 더불어 QFN 패키지 내부에 수용하여 실제 시스템 적용에 용이하도록 제작하였다. 제작된 Doherty 전력증폭기는 기지국용 LTE 신호를 사용하여 검증하고, 실험 결과를 바탕으로 이전의 연구결과들과 비교하였다.

Ⅱ. 설계 및 시뮬레이션

그림 1은 설계된 Doherty 전력증폭기의 전체 회로도를 나타낸다. 수동 소자들을 이용하여 carrier 및 peaking 증폭기의 입력 정합 네트워크를 집적화 하였다. 동일한 크기의 cell을 사용하였으며, 각각의 총 gate length는 720 μm 이다. 입력 전력 분배회로는 Cemax사의 CMX25Q03 90° 하이브리드 소자를 사용하였으며, 출력 결합 회로는 RN2

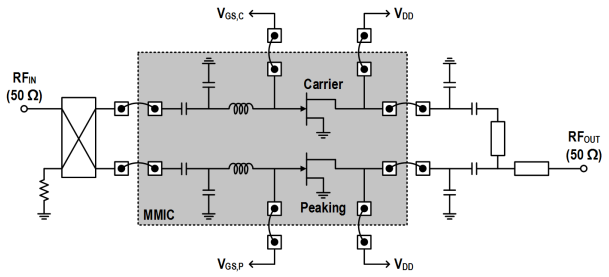


그림 1. GaN-HEMT Doherty 전력증폭기의 전체 회로도
Fig. 1. Overall schematic diagram of the GaN-HEMT Doherty power amplifier.

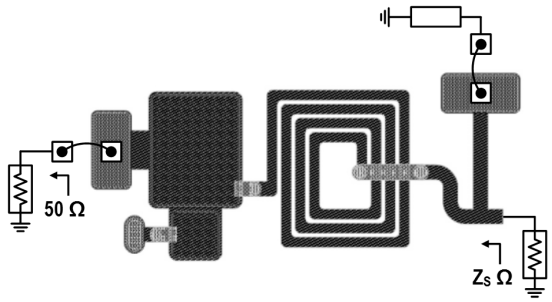
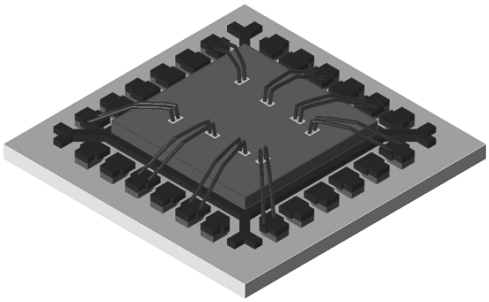


그림 2. 입력 정합 네트워크
Fig. 2. Input matching network.

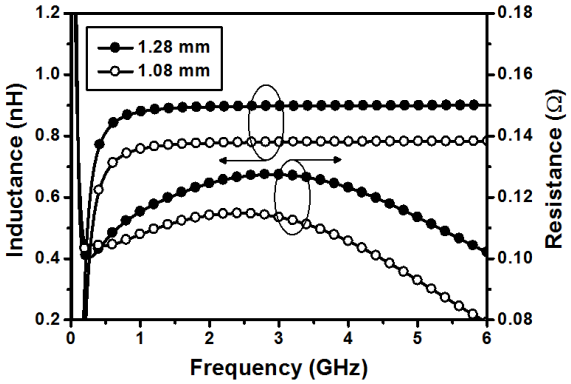
테크놀로지사의 RDO2650Q03 소형 Doherty 결합 소자를 적용하여 간단하게 구성하였다. 집적화된 모든 정합 네트워크와 bond-wire 및 패키지 성분은 Keysight사의 ADS (Advanced Design System) Momentum tool을 이용한 EM 시뮬레이션을 통해 최적화되었다.

그림 2는 설계된 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기의 입력 정합 네트워크를 나타낸다. 설계된 정합 네트워크를 통하여 50 Ω의 임피던스를 트랜지스터의 source 임피던스(Z_S)로 정합시켜준다. 설계된 정합 네트워크는 EM 시뮬레이션에 의해 최적화되어 33 dB의 반사 손실 및 1.1 dB의 삽입 손실 특성을 보인다.

제작된 전력증폭기를 패키지에 적용하기 위해서는 bond-wire 및 패키지 lead 성분에 대한 정확한 예측이 필요하다. 이를 위해 QFN 패키지에 대한 EM 시뮬레이션 모습을 그림 3(a)에 나타내었다. 실제 전력증폭기의 bonding pad의 위치와 패키지 lead의 위치를 예측하여 지름 1 mil의 bond-wire 2개를 각각의 pad마다 적용하였다. 그림



(a) EM 시뮬레이션을 위한 패키지의 3D 형상
(a) 3D view of the package for EM simulation



(b) Bond-wire 시뮬레이션 결과
(b) Simulated results of the bond-wires

그림 3. QFN 패키지 적용을 위한 EM 시뮬레이션
Fig. 3. EM simulation for the QFN package.

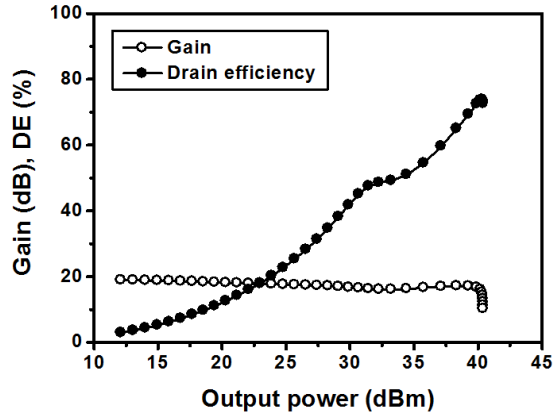


그림 4. 설계된 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기의 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulated performances of the designed GaN-HEMT Doherty power amplifier.

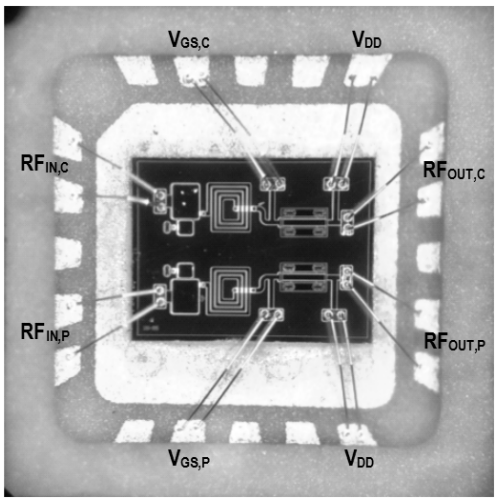
3(b)는 패키지 내부에 적용된 bond-wire의 길이에 따른 inductance와 resistance에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 설계 주파수 2.6 GHz에 대하여 1.28 mm에서는 0.89 nH의 inductance와 0.13 Ω의 resistance를 나타내며, 1.08 mm에서는 0.78 nH의 inductance와 0.11 Ω의 resistance를 나타냄을 알 수 있다.

그림 4는 설계된 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 40.4 dBm의 최대 출력 전력과 6.5 dB back-off된 33.9 dBm에서 16.1 dB의 전력 이득 및 50.1%의 높은 효율을 보인다.

Ⅲ. 제작 및 측정 결과

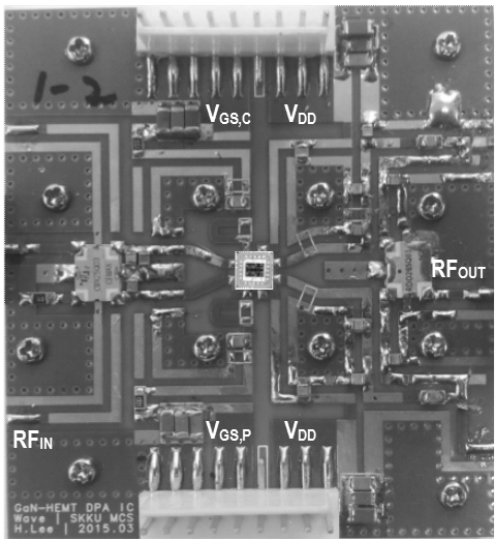
제작된 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기 집적회로를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)에서 알 수 있듯이, 제작된 Doherty 전력증폭기는 Cree사의 0.4-μm GaN-HEMT 공정을 이용하였으며, 전체적인 집적회로의 크기는 2.06×1.59 mm^{2}이다. 더불어 4.0×4.0 mm^{2}의 QFN 패키지 내부에 수용하여 실제 시스템에 적용하기 용이하도록 제작되었다. 그림 5(b)는 제안된 Doherty 전력증폭기의 성능 검증을 위한 evaluation module을 나타내며, module의 전체 크기는 57×61 mm^{2}이다. 제작된 evaluation module은 두께 0.5 mm의 Rogers RO4350B 기판을 이용한 PCB(Printed Circuit Board)을 이용하여 제작되었으며, 외부 PCB 상에 구현된 출력 정합 네트워크는 향후 집적화가 가능하다.

제작된 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기를 변조 신호에 대하여 측정된 결과를 그림 6에 나타내었다. 측정에 사용된 변조 신호는 10 MHz의 대역폭 및 6.5 dB의 PAPR 특성을 갖는 2.6 GHz LTE downlink 신호이며, 48 V의 동작 전압을 인가하여 측정하였다. Carrier 증폭기는 정지 전류 11 mA의 Class-AB 조건의 바이어스로, peaking 증폭기는 −4.6 V의 Class-C 바이어스 조건에서 동작시켰다. 측정된 전력 이득 및 효율을 그림 6(a)에, ACLR(Adjecent Channel Leakage Ratio)을 그림 6(b)에 각각 나타내었다. 평균 전력 33.9 dBm에서 15.8의 전력 이득 및 43.0%의 효율을 나타내며, 이때의 ACLR 특성은 −30.0 dBc를 만족함을 알 수 있다. 더불어 측정 결과에 대하여 이전의 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기 집적회로들과의 성능 비교를



(a) QFN 패키지 내부에 수용된 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기 집적회로 사진

(a) A photograph of the fabricated GaN-HEMT Doherty power amplifier IC mounted in QFN package



(b) Evaluation module 사진

(b) A photograph of the evaluation module

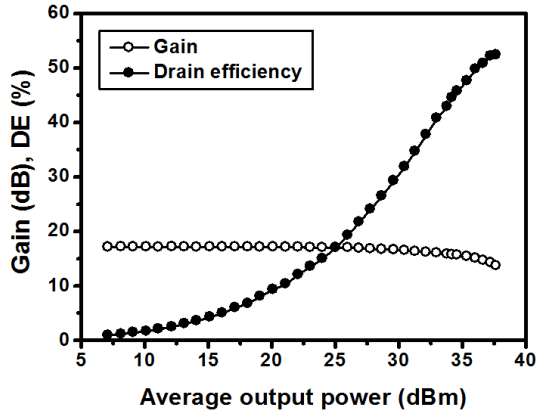
그림 5. 제작된 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기

Fig. 5. Implemented GaN-HEMT Doherty power amplifier.

표 2에 나타내었다.

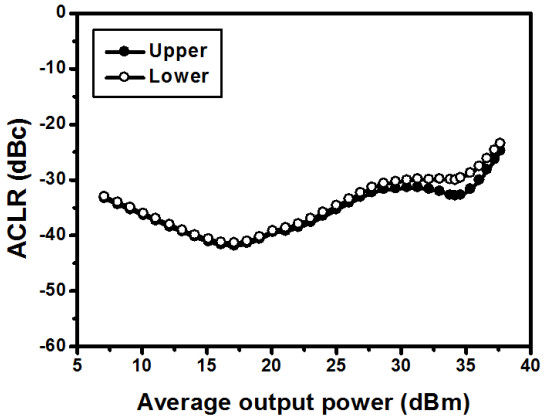
Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 0.4-μm GaN-HEMT 공정을 사용한



(a) 전력 이득 및 효율

(a) Power gain and drain efficiency



(b) 인접 채널 누설 비

(b) ACLR

그림 6. LTE 신호에 대한 측정 결과

Fig. 6. Measured performances for the LTE modulation signal.

Doherty 전력증폭기 집적회로를 설계 및 제작하였다. 모든 정합 네트워크와 bond-wire 및 패키지 lead에 대한 성분은 EM 시뮬레이션을 통해 최적화하였다. 더불어 실제 small-cell 기지국 시스템에 적용이 용이하도록 QFN 패키지 내부에 제작된 Doherty 전력증폭기 집적회로를 수용하였다.

제작된 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기 집적회로의 성능 검증을 위해 변조 신호에 대하여 측정하였다. 측정에 사용된 변조 신호는 10 MHz의 대역폭 및 6.5 dB PAPR 특성을 갖는 2.6 GHz LTE downlink 신호이며, 평균 전력

표 2. 기존의 GaN-HEMT Doherty 전력증폭기 집적회로들과의 성능 비교
Table 2. Performance comparison to the previously published GaN-HEMT Doherty power amplifier ICs.

Reference	Frequency [GHz]	Device technology	P_{OUT} [dBm]	DE [%]	ACLR [dBc]	Size [mm^2]	Package	Modulation signal
[1]	2.60	0.25-μm GaN-HEMT	33.4	41.9	N/A	3.5×1.9	COB	LTE
[2]	2.14	0.25-μm GaN-HEMT	36.5	39.7	−25.3	2.5×2.7	COB	WCDMA
[6]	2.65	0.25-μm GaN-HEMT	33.7	41.6	−34.5	2.6×2.1	COB	LTE
[11]	2.14	0.25-μm GaN-HEMT	34.2	38.8	−35.3	3.5×2.1	COB	LTE
This work	2.60	0.40-μm GaN-HEMT	33.9	43.0	−30.0	2.1×1.6	QFN	LTE

DE: drain efficiency, COB: chip on board, *w/o linearization.

33.9 dBm에 대하여 15.8 dB의 전력 이득, 43.0%의 고효율 및 −30.0 dBc의 선형적인 ACLR 특성을 보인다.

References

[1] S. Jee, J. Lee, B. Park, C. Kim, and B. Kim, "GaN MMIC broadband Doherty power amplifier", in *Asia-Pasific Microw. Conf. Dig.*, pp. 603-605, Nov. 2013.

[2] J. Lee, D. Lee, and S. Hong, "A Doherty power amplifier with a GaN MMIC for femtocell base stations", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 24, no. 3, pp. 194-196, Mar. 2014.

[3] 이휘섭, 강현욱, 함정현, 이동우, 양영구, "2.6 GHz GaN-HEMT 선형 전력증폭기 집적회로 설계", 한국전자파학회 하계종합학술대회, 2(1), p. 63, 2014년 8월.

[4] J. Komiak, "GaN HEMT: Dominant force in high-frequency solid-stage power amplifiers", *IEEE Microw. Mag.*, vol. 16, pp. 97-105, Apr. 2015.

[5] Y. Park, J. Lee, S. Jee, S. Kim, C. Kim. B. Park, and B. Kim, "GaN HEMT MMIC Doherty power amplifier with high gain and high PAE", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 25, no. 3, pp. 187-189, Mar. 2015.

[6] S. Jee, Y. Park, Y. Cho, J. Lee, S. Kim, and B. Kim, "A highly linear dual-band Doherty power amplifier for femto-cell base stations", in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1-4, May 2013.

[7] Y. Yang, J. Cha, B. Shin, and B. Kim, "A fully matched *N*-way Doherty amplifier with optimized linearity", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 51, no. 3, pp. 986-993, Mar. 2003.

[8] D. Kang, J. Choi, D. Kim, and B. Kim, "Design of Doherty power amplifiers for handset applications", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 58, no. 8, pp. 2134-2142, Aug. 2010.

[9] J. Park, D. Kim, C. Yoo, W. Lee, J. Yook, S. Chun, J. Kim, and C. Hahn, "GaN HEMT based high power and high efficiency Doherty amplifiers with digital pre-distortion correction for WiBro applications", *J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci.*, vol. 11, no. 1, pp. 16-26, Mar. 2011.

[10] 지승훈, 이주연, 손정환, 김정준, 김석현, 김범만, "GaN HEMT 소자를 이용한 광대역 고효율 도허티 전력증폭기", 대한전자공학회 하계학술대회, 35(1), pp. 485-488, 2012년 6월.

[11] S. Jee, J. Lee, S. Kem, Y. Park, and B. Kim, "Highly linear 2-stage Doherty power amplifier using GaN MM-

IC", *J. Electronagn. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 4, pp. 399-404, Dec. 2014.

[12] V. Camarchia, M. Pirola, R. Quaglia, S. Jee, Y. Cho, and B. Kim, "The Doherty power amplifier: review of recent solutions and trends", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 63, no. 2, pp. 559-571, Feb. 2015.

이 휘 섭

2012년 2월: 한양대학교 전자 및 통신공학과 (공학사)
2014년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2014년 3월～현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정
[주 관심분야] High-Efficiency RF Power Amplifier IC, Broadband Power Amplifier and Passive Circuit, Wireless Power Transfer

임 원 섭

2012년 2월: 한양대학교 전자 및 통신공학과 (공학사)
2013년 3월～현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정
[주 관심분야] High-Efficiency RF Power Amplifier IC, Analog/Mixed-Signal IC, High-Speed DC-DC Converter

강 현 욱

2014년 2월: 목포해양대학교 전자공학과 (공학사)
2014년 3월～현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] High-Efficiency RF Power Amplifier, Broadband and Linearization Techniques

이 우 석

2014년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
2014년 3월～현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] High-Efficiency RF Power Amplifier, Broadband Power Amplifier and Passive Circuit

이 형 준

2002년 11월～2013년 2월: 피플웍스 생산기술연구소 주임연구원
2013년 3월～현재: 웨이브일렉트로닉스 선임연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 무선통신 시스템 설계

윤 정 상

1991년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
1993년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
1993년 3월～1999년 9월: 삼성전자개발 전임연구원
1999년 10월～현재: 웨이브일렉트로닉스 연구위원
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 무선통신 시스템 설계

이 동 우

1989년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
1991년 3월～1998년 10월: 삼성전자 선임연구원
1998년 11월～1999년 6월: 아미텔 선임연구원
1999년 10월～현재: 웨이브일렉트로닉스 연구위원
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 무선통신 시스템 설계

양 영 구

1997년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월～2002년 7월: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사후 연구원
2002년 8월～2005년 2월: Skyworks Solutions Inc. Senior Electronic Engineer
2005년 3월～현재: 성균관대학교 정보통신공학부 교수
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 무선통신 송/수신기 시스템 설계, 비선형 회로 분석 및 시뮬레이션 기법 연구