

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.6.127>

IIBC 2018-6-16

0.1- μ m GaAs pHEMT 공정을 이용한 높은 변환이득을 가지는 W-대역 캐스코드 혼합기 설계

Design of W-band Cascode Mixer with High Conversion Gain using 0.1- μ m GaAs pHEMT Process

최원석*, 김형진*, 김완식**, 김종필**, 정진호***

Wonseok Choe*, HyeongJin Kim*, Wansik Kim**, Jongpil Kim**, and Jinho Jeong***

요약 본 논문에서는 W-대역에서 동작하는 고이득 캐스코드 혼합기를 설계 및 제작하였다. W-대역과 같이 높은 주파수 대역에서는 소자의 성능저하로 인해 혼합기의 변환손실이 커지게 된다. 이는 송수신단 구성 시 RF 버퍼 증폭기와 같은 추가적인 이득을 줄 수 있는 회로의 추가로 이어지고 이는 시스템 전체의 선형성 및 안정성에 영향을 미친다. 따라서 혼합기 설계 시 변환이득을 최대화하는 설계가 필요하다. 본 논문에서는 혼합기의 변환이득을 최대화하는 것에 초점을 두고 높은 변환이득을 얻기 위해 혼합기의 바이어스를 최적화하였고, 로드-풀 시뮬레이션을 이용하여 출력 정합회로를 최적화하였다. 설계된 회로는 0.1- μ m GaAs pHEMT 공정을 이용하여 제작하였고, 측정을 통해 성능을 검증하였다. 제작된 회로는 W-대역에서 -4.7 dB의 최대 변환이득과 2.5 dBm의 입력 1-dB 감쇄 전력이 측정되었다.

Abstract In this paper, a high conversion gain cascode mixer was designed in W-band and verified by the fabrication and measurements. In the high frequency band such as a W-band, the conversion loss of a mixer is increased because of the poor performance of transistors. This high conversion loss of the mixer requires additional circuits which can give an extra gain such as an RF buffer amplifier, and this can affect the linearity and stability of the overall systems. Therefore, it is necessary to maximize the conversion gain of the mixer. To maximize the conversion gain of the mixer, biases of the transistor were optimized, and output load impedance was optimized by the load-pull simulations. The designed mixer was fabricated in 0.1- μ m GaAs pHEMT technology and verified by the measurements. The measurement results shows a maximum conversion gain of -4.7 dB at W-band and an input 1-dB compression point of 2.5 dBm.

Key Words : Cascode mixer, W-band, high conversion gain

1. 서 론

혼합기는 송수신기 구성에 있어서 필수적인 회로이다. 혼합기는 중간 주파수 (IF)와 RF 주파수 사이의 주파수 변환을 위해 사용되며, 혼합기의 변환이득 및 잡음 특성

은 송수신단 전체의 이득 및 잡음 특성에 영향을 미칠 수 있다.

혼합기의 구조는 사용된 소자의 종류에 따라 크게 수동 혼합기와 능동 혼합기로 구분된다. 수동 혼합기의 종류에는 다이오드 혼합기, 저항성 혼합기 등이 있으며, 수

*정회원, 서강대학교 전자공학과

**정회원, LIG NEX1

***정회원, 서강대학교 전자공학과 (교신저자)

접수일자: 2018년 10월 15일, 수정완료: 2018년 11월 15일

게재확정일자: 2018년 12월 7일

Received: 15 October, 2018 / Revised: 15 November, 2018 /

Accepted: 7 December, 2018

***Corresponding Author: jjeong@sogang.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Sogang University, Korea

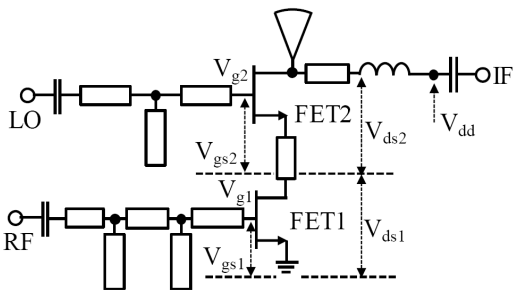


그림 1. 설계된 캐스코드 혼합기 회로도
Fig. 1. Schematic of the designed cascode mixer

동 혼합기의 경우 선형성이 우수하고 전력 소모가 작은 장점이 있지만, 변환이득을 얻을 수 없고 오직 변환 손실만 가지는 단점이 있다. 반면 능동 혼합기는 트랜지스터를 사용하여 설계된다. 혼합기에 인가되는 LO 신호가 트랜지스터의 어느 단자에 입력되느냐에 따라 게이트 혼합기, 드레인 혼합기, 소스 혼합기 등으로 구분되며, 캐스코드 혼합기, 듀얼 게이트 혼합기 등도 능동 혼합기로 분류된다. 능동 혼합기의 경우 소자의 주파수 특성에 따라 높은 변환이득을 얻을 수 있는 장점이 있지만, 수동 혼합기에 비해 비교적 대역폭이 좁고 선형성이 낮은 단점이 있다.

W-대역과 같이 높은 주파수 대역에서는 트랜지스터의 성능이 크게 저하되기 때문에 능동 혼합기를 설계했을 때 수동 혼합기에 비해 비교적 높은 변환이득을 얻을 수 있지만 변환손실이 발생하게 된다. 따라서 많은 W-대역 송수신기에서는 저항성 혼합기와 같은 단순하고 전력 소모가 없는 수동 혼합기들이 주로 이용된다^[1-5]. 이 경우 수동 혼합기의 낮은 변환이득으로 인해 버퍼 증폭기와 같은 추가적인 회로가 필요하게 되고 이는 송수신기의 안정성이나 선형성을 저하시킬 수 있다.

본 논문에서는 0.1- μ m GaAs pHEMT 공정을 이용하여 W-대역에서 캐스코드 혼합기를 설계하였으며, 높은 변환이득을 얻는 것에 초점을 두었다. 혼합기의 변환이득 특성을 개선하기 위해 소자의 바이어스 및 정합회로를 최적화하였으며, 설계된 혼합기는 측정을 통해 검증하였다.

II. 캐스코드 혼합기 설계

1. 바이어스 최적화

그림 1은 제안된 캐스코드 혼합기의 회로도를 보여준

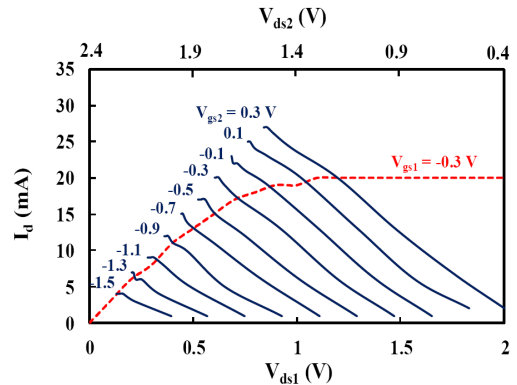


그림 2. 캐스코드 FET의 I-V 특성 (V_{gs2} 에 따른 FET2의 동작 점 변화)

Fig. 2. I-V characteristics of cascoded FETs (variation of bias point of FET2 according to V_{gs2})

다. 혼합기는 두 개의 트랜지스터 (FET1, FET2)로 이루어지며, 두 트랜지스터는 캐스코드 구조로 연결된다. RF 신호와 LO 신호는 각각 FET1과 FET2의 게이트로 각각 인가된다. 캐스코드 혼합기의 주파수 혼합은 FET1에 의해 이루어진다. FET1은 드레인 혼합기로 동작하며, FET2는 LO 소스 팔로워 (source follower) 및 IF 증폭기로 동작한다. 따라서 혼합기의 변환이득을 최대화하기 위해서는 FET1 혼합기의 변환이득과 FET2의 IF 증폭이득을 최대화해야 한다.

드레인 혼합기의 동작 원리는 여러 문헌을 통해 보고된 바 있다^{[6][7]}. 드레인 혼합기의 비선형 특성은 트랜지스터의 드레인에 인가되는 큰 LO 신호에 의해 결정된다. 드레인 전압의 변화에 따른 트랜지스터의 전류 (I_d)의 변화가 큰 바이어스 조건, 즉 출력 컨덕턴스 (G_m)가 가장 큰 바이어스에서 동작할 때 가장 큰 변환이득을 얻을 수 있다. 따라서 FET1의 드레인은 G_m 이 가장 큰 선형 영역에 바이어스되어야 한다. FET1과 FET2의 동작지점은 FET2의 게이트 바이어스 V_{gs2} 에 의해 결정된다. 그림 2는 V_{gs2} 에 따른 FET1의 동작 바이어스를 보여준다. 이때 FET1의 게이트 바이어스 V_{gs1} 은 -0.3 V로 설정하였고 V_{dd} = 2.4 V이다. 그림에서 볼 수 있듯이, V_{gs2} 가 증가할수록 FET2는 포화영역에서 동작하게 된다. 따라서 V_{gs2} 를 낮추어 FET2를 선형영역에서 동작시켜야 한다. FET2는 LO 소스팔로워로 동작하기 때문에 포화영역에서 동작해야 하며, 최대 변환이득을 얻을 수 있는 지점으로 V_{gs1} 을 설정해야 한다. 하지만 V_{gs1} , V_{gs2} 는 캐스코드

구조의 안정성에도 큰 영향을 주므로 신중히 선정해야 한다. 특히, V_{gs1} 와 V_{gs2} 모두 최대 이득지점에 바이어스 되어 있을 때는 회로가 불안정해지는데, 시뮬레이션을 통해 V_{gs1} 을 가장 큰 변환이득 지점에 바이어스하면 혼합기의 불안정 동작하는 것이 확인되어 V_{gs1} 은 최대 이득 지점 보다 조금 낮은 지점인 -0.3 V로 설정하였다. 최종적으로 $V_{dd} = 2.4$ V, $V_{gs1} = -0.3$ V, $V_{gs2} = -0.3$ V로 결정되었고, 이 때의 $V_{ds1} = 0.8$ V, $V_{ds2} = 1.6$ V 이다.

2. 정합회로 구성

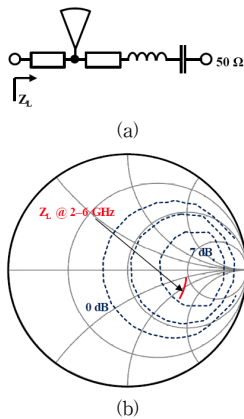
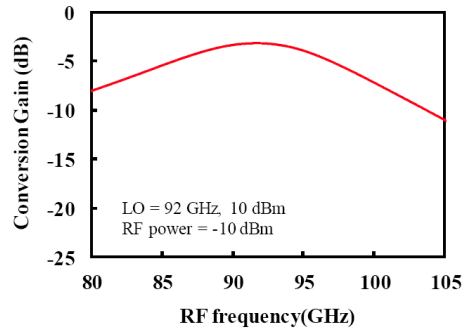


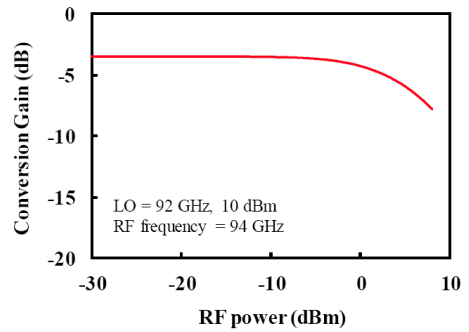
그림 3. (a) 출력정합회로, (b) IF 주파수에서의 변환이득의 로드-풀 시뮬레이션(점선)과 정합회로의 출력임피던스(실선)

Fig. 3. (a) Schematic of output matching network, (b) load-pull simulation of conversion gain (slotted lines) and output impedance of the designed output matching network (solid line) at IF

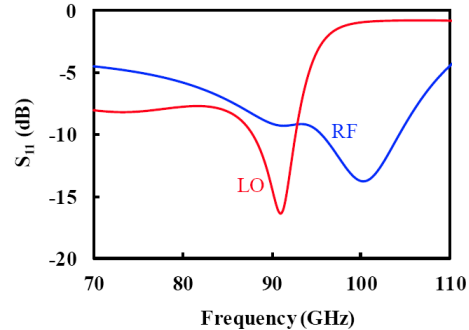
캐스코드 혼합기의 바이어스를 결정한 후에는 입출력 정합회로를 구성한다. FET1과 FET2 사이에 임피던스 정합회로를 추가하면 높은 변환이득을 얻을 수 있다. 하지만 혼합기의 대역폭이 심각하게 감소하기 때문에 짧은 라인을 통해 넓은 대역폭을 얻을 수 있게 정합하였다. FET2는 IF 증폭기로 동작하기 때문에 FET2의 출력 임피던스는 IF 주파수에서 높은 이득을 얻을 수 있는 임피던스 영역에 정합하는 것이 높은 변환이득을 얻는 데 유리하다. 그림 3 (b)는 포화 영역에서 동작하는 공통 게이트 구조 트랜지스터의 IF 주파수에서의 로드-풀 시뮬레이션 결과를 보여준다. FET2의 로드 임피던스가 약 150 Ω의 높은 임피던스 영역에 정합되어 있을 때 최대 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 혼합기의 출력 정합 특성



(a)



(b)



(c)

그림 4. 설계된 혼합기의 시뮬레이션 결과: (a) RF 주파수에 따른 변환이득, (b) RF 전력에 따른 변환이득, (c) LO, RF 포트에서의 반사 손실

Fig. 4. Simulation results of the designed mixer: (a) conversion gain according to RF frequency, (b) conversion gain according to RF power, and (c) return losses at LO and RF ports

은 혼합기의 대역폭 특성에 큰 영향을 미치므로 비교적 광대역 특성을 얻을 수 있게 정합하는 것이 필요하다. 그림 3은 혼합기의 출력 정합 회로 및 출력 임피던스를 보여준다. 설계된 정합회로는 높은 IF 이득을 얻을 수 있는 임피던스 영역에 정합되었고, IF 대역에서 이득 변화가 적은 지점에 위치할 수 있도록 조정되었다.

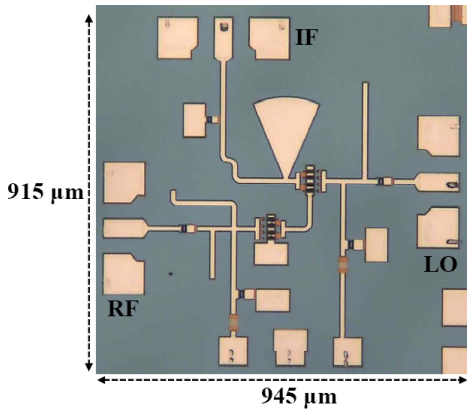


그림 5. 제작된 혼합기의 사진
Fig. 5. The photograph of the fabricated cascode mixer

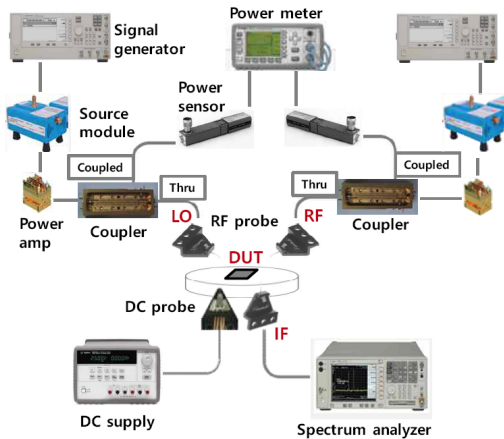
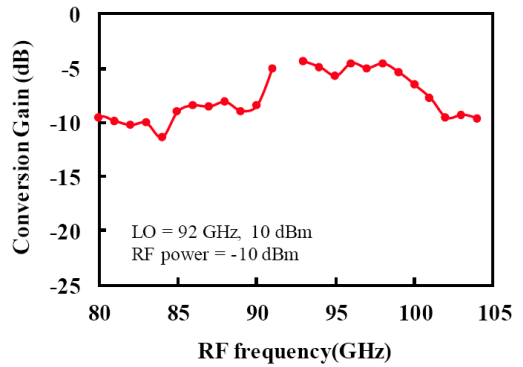


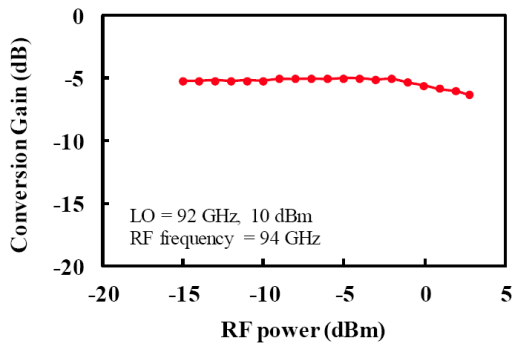
그림 6. 혼합기의 측정셋업
Fig. 6. Measurement setup of the fabricated mixer

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

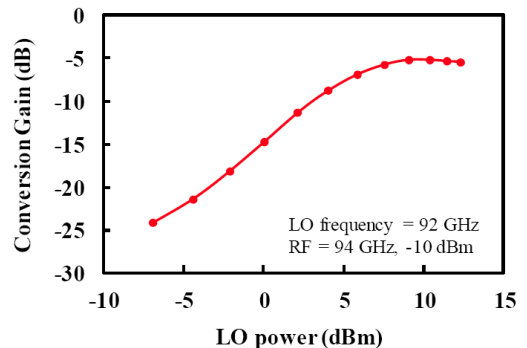
그림 4는 설계된 W-대역 캐스코드 혼합기의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 설계된 혼합기의 시뮬레이션에는 92 GHz, 10 dBm의 LO 신호와 94 GHz, -10 dBm의 RF 신호를 인가하였으며, IF 주파수는 2 GHz이다. 설계된 혼합기는 94 GHz의 RF 주파수에서 -3.5 dB의 변환이득을 보였고 변환이득의 3-dB 대역폭은 7 GHz (88.5–95.5 GHz)이다. 그림 4(b), (c)에서 볼 수 있듯이, 입력 1-dB 이득 감쇄 전력(P_{1dB})은 2.4 dBm과 10 dB 이상의 LO 및 RF 단자에서의 반사손실이 시뮬레이션을 통해 확인되었다.



(a)



(b)



(c)

그림 7. 제작된 혼합기의 측정결과: (a) RF 주파수에 따른 변환이득, (b) RF 전력에 따른 변환이득, (c) LO 전력에 따른 변환이득

Fig. 7. Measurement results of the fabricated mixer: (a) conversion gain according to RF frequency, (b) conversion gain according to RF power, and (c) conversion gain according to LO power

IV. 실험 및 결과

설계된 혼합기는 0.1- μm GaAs pHEMT 공정을 이용하여 제작되었다. 그림 5는 제작된 회로의 사진을 보여준다. 회로의 크기는 RF 및 DC 패드를 포함하여 945 μm \times 915 μm 이다.

그림 6은 제작된 캐스코드 혼합기의 측정에 사용된 셋업을 보여준다. RF 및 LO 신호는 신호발생기 및 소스 모듈을 통해 생성되어 온-웨이퍼 프로브(on-wafer probe)를 통해 회로에 인가된다. LO 및 RF 신호 경로에는 전력 증폭기 모듈과 커플러, 파워미터를 연결하여 인가되는 LO 및 RF 신호의 크기를 측정하였다. IF 신호는 프로브를 통해 스펙트럼 분석기로 연결하여 주파수 및 신호의 크기를 측정하였다. 드레인 바이어스는 바이어스 티(bias tee)를 이용해 인가된다. RF 입력 신호의 크기는 -10 dBm, LO 신호는 92 GHz에서 10 dBm을 인가하여 측정하였다.

그림 7은 제작된 W-대역 캐스코드 혼합기의 측정결과를 보여준다. 제작된 캐스코드 혼합기의 최대 변환이득은 RF = 94 GHz일 때 -4.4 dB가 측정되었다. 변환이득의 3 dB 대역폭은 10.0 GHz (90.5-100.5 GHz)였다. 그림 7 (b)는 94 GHz RF 입력 신호의 크기에 따른 변환이득을 보여주는데 입력 $P_{1\text{dB}}$ 가 2.5 dBm으로 측정되었다. 그림 7 (c)는 LO 전력이 증가함에 따라 변환이득이 점차 하다가 LO 전력이 약 9 dBm일 때 변환이득이 포화됨을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 W-대역에서 동작하는 높은 변환이득의 캐스코드 혼합기를 설계하였다. 혼합기의 변환이득을 최대화하기 위하여 혼합기의 바이어스를 최적화하였고, 출력 로드 임피던스를 로드-풀 시뮬레이션을 통해 최적화하였다. 설계된 혼합기는 0.1- μm GaAs pHEMT 공정을 이용해 제작되었고 측정을 통해 성능을 검증하였다. 측정된 혼합기의 성능은 시뮬레이션과 잘 일치된 결과를 보이며, W-대역에서 -4.7 dB의 높은 변환이득과 2.5 dBm의 입력 $P_{1\text{dB}}$ 가 측정되었다.

References

- [1] A. Tessmann, S. Kudszus, T. Feltgen, M. Riessle, C. Sklarczyk and W. H. Haydl, "Compact single-chip W-band FMCW radar modules for commercial high-resolution sensor applications," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 50, no. 12, pp. 2995-3001, Dec. 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2002.805162>.
- [2] Wan-sik Kim, "Development of W-band Transceiver Module using Manufactured MMIC", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 17, No. 2, pp. 233-237, Apr 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.2.233>.
- [3] C. Viallon, G. Ménéghin and T. Parra, "NMOS Device Optimization for the Design of a W-Band Double-Balanced Resistive Mixer," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 24, no. 9, pp. 637-639, Sept. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2014.2332100>
- [4] M. Kimishima, T. Ataka and H. Okabe, "A family of Q, V and W-band monolithic resistive mixers," 2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.01CH37157), Phoenix, AZ, 2001, pp. 115-118 vol.1.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2001.966852>
- [5] B. Nam, G. Chae, "Design of a K-band CW Radar Transceiver," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS), Vol. 10, No. 7, pp. 1532-1535, 2009.
- [6] S. A. Maas, "Active Mixers and FET Resistive Mixers," in Nonlinear Microwave and RF Circuits, 2nd ed., Artech House, 2003, pp.497-536.
- [7] F. Giannini and G. Leuzzi "MIXERS," in Nonlinear Microwave Circuit Design, 1st ed., Newyork, NY, USA: Wiley, 2004, pp.315-340.

저자 소개

최 원 석(정회원)



- 2012년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 - 2014년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (석사)
 - 2014년 3월 ~ 현재 : 서강대학교 전자공학과 박사과정
- <주관심분야> : 초고주파 회로 및 시스템 MMIC 설계>

김 형 진(정회원)



- 2016년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 - 2018년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (석사)
- <주관심분야> : 초고주파 회로 및 시스템 MMIC 설계>

김 완 식(정회원)



- 1991년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학사)
 - 1993년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
 - 2004년 2월 : 건국대학교 정보통신공학과 (공학박사)
 - 1992년 11월 ~ 2001년 11월 : (주)대우전자 선임연구원
 - 2001년 12월 ~ 2005년 7월 : 고등기술연구원 책임연구원
 - 2005년 8월 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 수석연구원
- <주 관심분야> : 초고주파 회로설계, RF/밀리미터파 시스템, MMIC, 레이더 및 관련 센서 시스템

김 종 필(정회원)



- 1997년 2월 : 경기대학교 전자공학과 (공학사)
 - 2011년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 - 2000년 1월~현재 : (주)LIG넥스원 수석연구원
- <주 관심분야> : 레이더 및 반도체송수신모듈>

정 진 호(정회원) 교신저자



- 1997년 2월 : 서울대학교 전기공학부 (공학사)
 - 1999년 2월 : 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
 - 2004년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 - 2004년 10월 ~ 2007년 2월 : UC San Diego, Post-doctoral researcher
 - 2007년 3월 ~ 2010년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 조교수
 - 2010년 3월 ~ 현재 : 서강대학교 전자공학과 교수
- <주요관심분야> : 마이크로파/밀리미터파/THz 집적회로 및 모듈, RF 전력증폭기, 무선전력전송, 라디오미터>
- Affiliation: Department of Electronic Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea.

이 연구는 LIG NEX1 산학협력과제 지원으로 연구되었음.