ISSN : 1226-7244 (Print)
ISSN : 2288-243X (Online)
논문번호 22-01-11
j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.26,No.1,77~82,March 2022
https://doi.org/10.7471/ikeee.2022.26.1.77

하이브리드 바이어스 네트워크가 적용된 W대역 60-nm GaN pHEMT 전력 증폭기

W-Band Power Amplifier with Hybrid Bias Network Using 60-nm GaN pHMET Process

유 진 호*, 이 재 용*, 장 성 진*, 정 하 연*, 김 기 철**, 최 증 원**, 박 주 만**, 박 창 근*★

Jinho Yoo*, Jaeyong Lee*, Seongjin Jang*, Hayeon Jung*,
Kichul Kim**, Jeung Won Choi**, Juman Park**, Changkun Park*★

Abstract

The effect of the bias network on the performance of the W-band power amplifier(PA) was investigated. The performances of the typical RC and radial stub networks were examined, and a hybrid network was proposed for W-band application and its performance was confirmed. To verify this, a W-band PA was designed using a 60-nm GaN pHEMT process. When hybrid networks were applied, the PA had improved stability in all frequency bands, secured about 9 dB of power gain at operating frequencies 87 GHz to 93 GHz, and the maximum PAE was found to be about 12.3% at output power of 26.7 dBm.

요 약

본 논문에서는 바이어스 네트워크가 W 대역 전력증폭기의 성능에 미치는 영향을 고찰 하였다. 기존의 RC 및 방사형 스터브 네트워크의 성능을 살펴보고, W 대역 적용을 위하여 하이브리드 네트워크를 제안하고 그 성능을 확인 하였다. 이를 검증하기 위하여 60-nm GaN pHEMT 공정을 이용하여 W 대역 전력증폭기를 설계하였다. 하이브리드 네트워크를 적용 할 경우 전력증폭기는 전 주파수 대역에서 안정도가 개선되었으며, 동작 주파수 87 GHz부터 93 GHz에서 전력이득 약 9 dB를 확보하였으며, 최고 PAE는 출력전력 26.7 dBm에서 약 12.3%로 확인 되었다.

Key words : Bias network, GaN pHEMT, power amplifier, stability, W-band

* Dept. of Electronic Engineering, Soongsil University
** Agency for Defense Development
★ Corresponding author
E-mail : pck77@ssu.ac.kr, Tel : +82-2-828-7166
※ Acknowledgment
This work was supported by Agency for Defense Development(ADD) under Grant UD200018ED.
Manuscript received Feb 24, 2022; revised Mar. 23, 2022; accepted Mar. 25, 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.

Ⅰ. 서론

최근 무선통신기술의 급격한 발전에 따라, 밀리미터파 대역을 넘어 THz 대역에서 동작 하는 집적회로 설계 기술 역시 활발하게 연구 되고 있다[1-4]. 특히 W 대역의 경우, 국방 관련 분야뿐만 아니라, 자율주행자동차와 같은 민간 분야에서의 활용 범위가 확대 되고 있다. 이와 같은 W 대역의 실질적인 활용을 위해서는 송수신부의 핵심 회로의 개발이 필수적인데, 특히 높은 출력전력 특성이 요구 되는 전력증폭기 W 대역 송신부의 성능을 결정하는 주요한 요소 중 하나다[5, 6].

전력증폭기의 경우, 고주파 회로 중 가장 높은 전력을

다루는 관계로, 정합 회로 및 바이어스 네트워크에 민감한 성능 열화를 보이는 것이 일반적이다. 정합 회로의 경우, 전력증폭기를 구성하는 전력증폭단의 출력부는 전력 정합(power matching) 기술을 이용하며, 경우에 따라 전력 결합기를 포함 할 수 있다. 바이어스 네트워크의 경우, 동작 주파수가 높아질수록 전력증폭기의 전체 성능에 미치는 형향이 증가 하게 되는 것이 일반적이다.

본 논문에서는 W 대역의 높은 동작 주파수를 고려하여 바이어스 네트워크가 안정화 된 60-nm GaN pHEMT 기반의 W 대역 전력증폭기의 설계 결과를 제시하였다.

II. 전력증폭기를 위한 바이어스 네트워크

1. RC 네트워크

RC 네트워크는 일반적으로 GHz 대역의 전력증폭기에서 주로 사용되며, 그림 1(a)에서와 같이, 저항과 캐패시터를 집중소자(lumped element) 의 형태로 활용한다. 전력증폭기의 바이어스 전압 인가를 위한 RC 네트워크는 집중소자를 사용하는 관계로, 전체 집적회로의 면적을 최소화 시킬 수 있다는 장점이 있다.

하지만, RF 네트워크의 경우, 집중 소자로 구성되는 캐패시터 및 연결 선로 등에 의한 기생 성분 등으로 인하여 W 대역과 같이 높은 동작주파수를 가지는 전력증폭기에 직접적으로 적용 하는데 한계가 있다.

2. 방사형 스터브 (Radial Stub) 네트워크

RC 네트워크와는 달리 높은 동작 주파수에 적합 하게 개발 된 바이어스 네트워크의 형태는 그림 1(b)에서 보인 방사형 스터브이다. 이와 같은 방사형 스터브는 일반적으로 Ka 대역 이상의 동작 주파수를 가지는 전력증폭기에서 주로 사용되는 바이어스 네트워크이며, 넓은 면적의 방사형 금속 패턴에서 발생하는 기생 캐패시턴스 성분을 활용 한다.

하지만, 방사형 스터브의 경우, RC 네트워크와 비교하여 상대적으로 낮은 캐패시턴스 값을 가지는 관계로, 상대적으로 낮은 주파수 영역에서의 ac 접지의 형성이 어렵다는 한계가 있다.

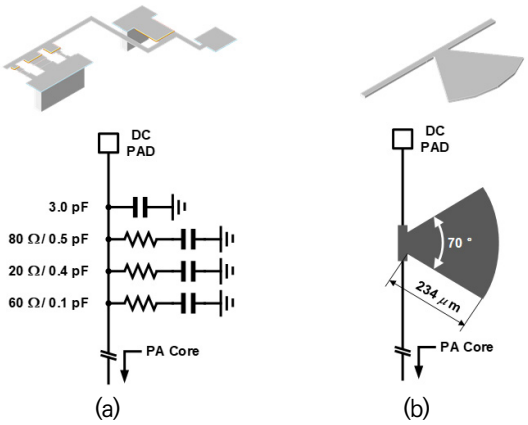


Fig. 1. Typical bias networks: (a) RC network and (b) radial stub network.
그림 1. 일반적인 바이어스 네트워크: (a) RC 네트워크, (b) 방사형 스터브 네트워크

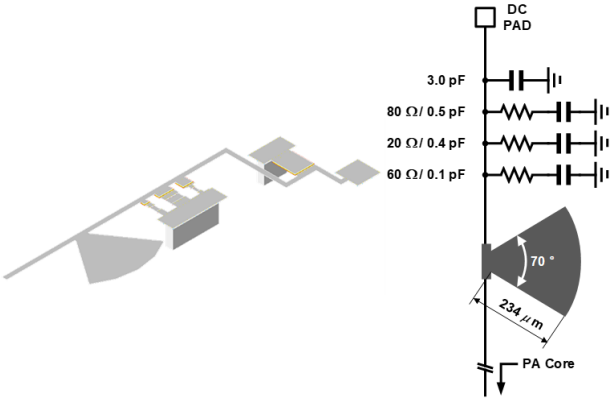


Fig. 2. Hybrid network.
그림 2. 하이브리드 네트워크

3. 제안하는 하이브리드(Hybrid) 네트워크

본 논문에서는 앞서 기술한 기존의 RC 및 방사형 스터브 네트워크의 장점을 취하여 W 대역 전력증폭기에 적합한 바이어스 네크워크로서, 그림 2와 같이 하이브리드 네트워크를 제안하였다.

제안하는 하이브리드 네트워크는 바이어스 전압이 인가되는 패드(pad)와 전력증폭기 중심(core) 회로 사이에 위치한다. 이때, 방사형 스터브는 중심 회로에 인접하게 위치 시켜 동작 주파수인 W 대역에서의 ac 접지가 우선적으로 형성 되도록 하였다. 다음으로 RC 네트워크는 바이어스 전압 패드와 방사형 스터브 사이에 위치하여, 방사형 스터브가 제공 할 수 없는 낮은 주파수 영역에서의 ac 접지를 제공하는 역할을 수행 한다. 결과적으로 이와 같은 하이브리드 네트워크는 전력증폭기의 바이어스 네트워크에서 동작주파수인 W 대역 뿐만 아니라 이보다 낮은 주파수 영역의 고주파 성분의 ac 접지를 효과적으로 제공 한다.

제안하는 하이브리드 네트워크의 효용성을 정량적으로 검증하기 위하여 60-nm GaN pHEMT 공정을 이용하여 바이어스 네트워크를 구성하여 성능을 확인 하였다. 이때, 바이어스 네트워크를 구성하고 있는 연결 선로 및

방사형 스터브의 특성은 EM 시뮬레이션을 통하여 도출하였다.

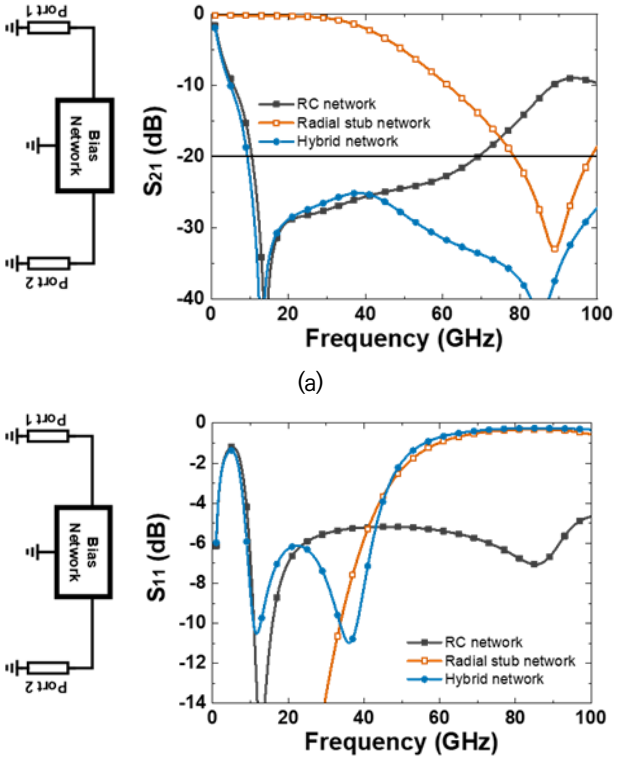


Fig. 3. S-parameters of bias networks: (a) S_{21}, (b) S_{11}.
그림 3. 바이어스 네트워크의 S-parameter: (a) S_{21}, (b) S_{11}

시뮬레이션 결과에서 확인 할 수 있듯이, RC 네트워크의 경우, 10.6 GHz 부터 68.9 GHz 대역에서 -20 dB 이하의 S_{21} 값을 보였으나 이보다 동작 주파수가 높아 질 경우 바이어스 네트워크로서의 성능이 열화 됨을 알 수 있다. 방사형 스터브 네트워크의 경우, 78.6 GHz부터 98.3 GHz 대역에서 -20 dB 이하의 S_{21} 값을 보였으나, 이보다 동작 주파수가 낮아 질 경우 바이어스 네트워크로서의 성능이 급격하게 열화 됨을 알 수 있다. 반면, 제안하는 하이브리드 네트워크의 경우 RC 네트워크 및 방사형 스터브 네트워크의 활용 가능 주파수 범위 모두를 포함하는 9.4 GHz이상의 대역 -20 dB 이하의 S_{21} 값을 보였다. 여기서 10 GHz 이하의 대역은 집적회로 외부의 PCB 상에서의 캐패시터를 통하여 ac 접지를 확보하였다.

추가적으로 그림 3에서 보인 각 바이어스 네트워크의 S_{11} 결과는 동작 주파수 73 GHz부터 100 GHz 범위에서 RC 네트워크, 방사형 스터브 네트워크 및 하이브리드 네트워크는 각각 -5.99 dB, -0.56 dB 및 -0.33 dB 이상을 보였다. 결과적으로 S_{11}으로 살펴본 하이브리드 네트워크가 73 GHz부터 100 GHz 범위에서 가장 우수한 성능을 보였다.

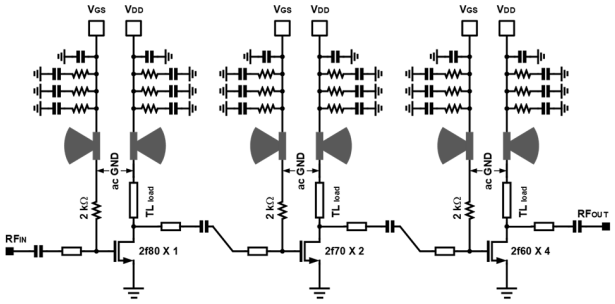


Fig. 4. Schematic of designed W-band power amplifier.
그림 4. 설계된 W 대역 전력증폭기의 회로도

Ⅲ. 하이브리드 네트워크가 적용된 전력증폭기

본 논문에서는 하이브리드 네트워크의 W 대역 전력증폭기 적용 효용성 검증을 위하여, 60-nm GaN pHEMT 기반의 W 대역 전력증폭기를 설계 하였다. 높은 동작주파수를 고려할 때, 전력이득 확보가 상대적으로 어려운 관계로 그림 4와 같이 3단(3 stage) 구조를 채택하였으며, 기판을 관통하는 Through hole via가 제공 되는 공정을 활용하여 Single-ended 구조를 채택하였다. 전원전압 VDD는 6.0 V를 사용하였으며, 게이트 바이어스 전압은 -0.8 V를 사용하였다. 전원전압 인가를 위한 바

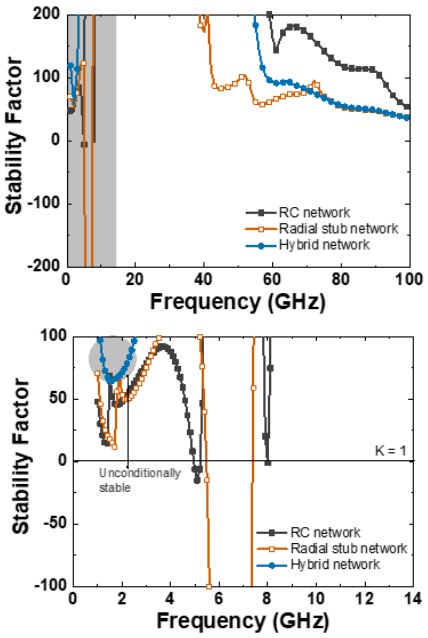


Fig. 5. Stability factor of designed power amplifier.
그림 5. 설계된 전력증폭기의 안정도 지수

이어스 네트워크에 사용된 소자 값은 그림 2와 동일하며, 게이트 바이어스를 위한 네트워크의 경우, 전원전압을 위한 네트워크와 유사하나, 최적화 과정에서 구체적인 소자 값이 변경 되었다.

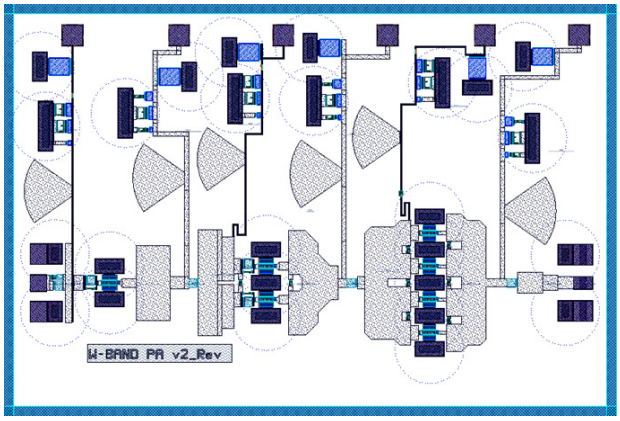


Fig. 6. Layout of designed power amplifier.
그림 6. 설계된 전력증폭기의 레이아웃

그림 5에서는 설계한 전력증폭기에 바이어스 네트워크를 적용하여 안정도를 평가한 것이다. 그림 5에서와 보인 바와 같이 바이어스 네트워크를 적용 하지 않은 경우와 RC 네트워크 및 방사형 스터브 네트워크의 경우는 stability factor가 1 이하가 되는 주파수 영역이 존재한다. 반면, 하이브리드 네트워크의 경우 100 GHz의 주파수 영역까지 stability factor가 34 이상으로 형성되어 '무조건 안정' 요건을 만족함을 알 수 있다.

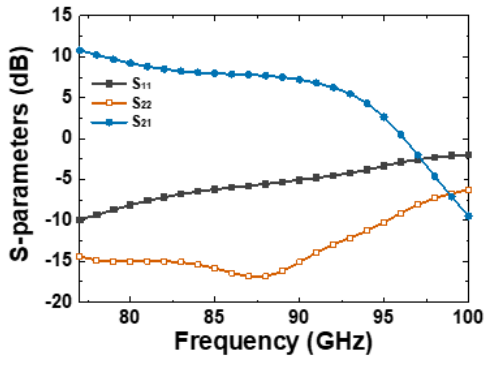


Fig. 7. S-parameter of designed power amplifier.
그림 7. 설계된 전력증폭기의 S-parameter

하이브리드 바이어스 네트워크가 적용되어 최종적으로 설계된 전력증폭기의 레이아웃을 그림 6에서 보였으며, 전체 집적회로의 크기는 가로 2.95 mm 및 세로 1.98 mm이다. 이를 바탕으로 EM 시뮬레이션이 반영된 전력증폭기 전체의 S-parameter를 그림 7에서 보였다.

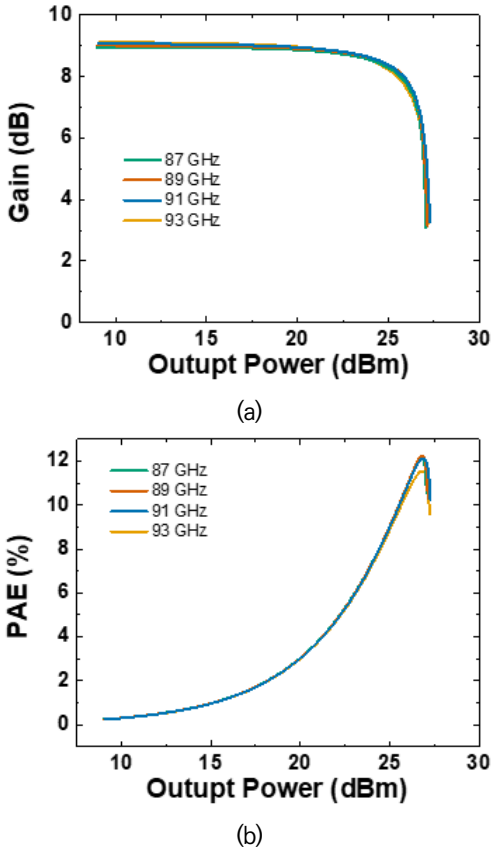


Fig. 8. Large signal characteristics of designed power amplifier: (a) gain, (b) PAE.
그림 8. 설계된 전력증폭기의 대신호 특성: (a) 이득, (b) PAE

그림 8은 설계된 전력증폭기의 출력전력에 따른 전력이득 및 power-added efficiency(PAE)를 보인 것이다. 전력이득의 경우 동작 주파수 87 GHz부터 93 GHz까지 약 9 dB로 확인 되었으며, 최고 PAE는 출력전력 26.7 dBm에서 약 12.3%로 확인 되었다.

Ⅴ. 결론

본 논문에서는 60-nm GaN pHEMT 공정을 사용한 W 대역 전력증폭기를 설계에 있어 바이어스 네트워크의 형태에 따른 성능 평가 결과를 제시하였다. 일반적으로 전력증폭기에서 사용하는 RC 네트워크 및 방사형 스터브 네트워크의 성능을 확인 하고 기존의 두 바이어스 네트워크를 결합한 하이브리드 바이어스 네트워크를 구성하였다. 구성된 하이브리드 바이어스 네트워크를 W 대역 전력증폭기에 적용하여 안정도를 확보하였다. 설계된 전력증폭기는 동작 주파수 87 GHz부터 93 GHz에서 전력이득 약 9 dB를 확보하였으며, 최고 PAE는 출력전력 26.7 dBm에서 약 12.3%로 확인 되었다.

References

[1] K. W. Kobayashi and V. Kumar, "A Broadband 70-110-GHz E-/W-Band LNA Using a 90-nm T-Gate GaN HEMT Technology," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.31, no.7, pp.885-888, 2021.
DOI: 10.1109/LMWC.2021.3076360.
[2] X. Tong, P. Zheng and L. Zhang, "Low-Noise Amplifiers Using 100-nm Gate Length GaN-on-Silicon Process in W-Band," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.30, no.10, pp.957-960, 2020. DOI: 10.1109/LMWC.2020.3019816.
[3] L. Gao, E. Wagner and G. M. Rebeiz, "Design of E- and W-Band Low-Noise Amplifiers in 22-nm CMOS FD-SOI," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.68, no.1, pp.132-143, 2020. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2944820.
[4] C. -J. Liang et al., "A 0.6-V VDD W-Band Neutralized Differential Low Noise Amplifier in 28-nm Bulk CMOS," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.31, no.5, pp.481-484, 2021. DOI: 10.1109/LMWC.2021.3062027.
[5] V. Trinh and J. Park, "A 16.3 dBm 14.1% PAE 28-dB Gain W -Band Power Amplifier With Inductive Feedback in 65-nm CMOS," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.30, no.2, pp.193-196, 2020. DOI: 10.1109/LMWC.2020.2965101.
[6] J. -A. Han et al., "A Sandwiched-Slab-Transformer-Based SiGe Power Amplifier Operating at W- and D-Bands," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.30, no.6, pp.597-600, 2020. DOI: 10.1109/LMWC.2020.2986920.

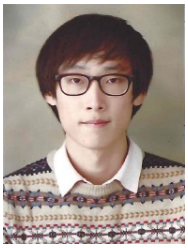
BIOGRAPHY

Jinho Yoo (Member)

2013 : BS degree in Electronic Engineering, Soongsil University.
2015 : MS degree in Electronic Engineering, Soongsil University.
2021 : Ph.D degree in Electronic Engineering, Soongsil University.

2021.03~Present : Full-time researcher, School of Electronic Engineering, Soongsil University

Jaeyong Lee (Member)

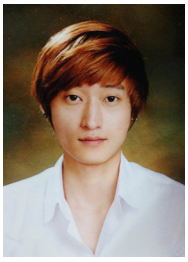


2017 : BS degree in Electronic Engineering, Soongsil University.
2019 : MS degree in Electronic Engineering, Soongsil University.
2020 ~ Present : Ph.D degree in Electronic Engineering, Soongsil University.

Seongjin Jang (Member)

2016 : BS degree in Electronic Engineering, Soongsil University.
2016~Present : Ph.D candidate in Electronic Engineering, Soongsil University.

Hayeon Jung (Member)

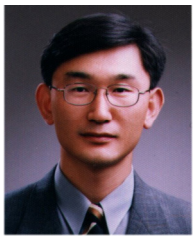


2015 : BS degree in Electronic Engineering, Soongsil University.
2021 : Ph.D degree in Electronic Engineering, Soongsil University.

Kichul Kim (Member)

2011 : MS degree in Gwangju Institute of Science and Technology.
2016 : Ph.D degree in Electronic Engineering, KAIST
2007.01~2008.11 : Research Engineer, Samsung Thales Inc.
2016.10~Present : Senior researcher, Agency for Defense Development

Jeung Won Choi (Member)



1989 : BS degree in Chungnam National University.
1993 : MS degree in Chungnam National University.
1997 : Ph.D degree in Chungnam National University.
1997.07~Present : Principal researcher, Agency for Defense Development
2013.09~Present : Professor, University of Science and Technology

Juman Park (Member)

2009 : BS degree in Electronic Engineering, Kyungnam University.
2011 : MS degree in Electronic Engineering, Kyungpook National University.
2012.04~Present : Senior researcher, Agency for Defense Development

Changkun Park (Member)

2001 : BS degree in Electronic Engineering, KAIST.
2003 : MS degree in Electronic Engineering, KAIST.
2007 : Ph.D degree in Electronic Engineering, KAIST.
2007.09~2009.08 : Research Engineer, Hynix Semiconductor Inc.
2009.09~Present : Professor, Dept. of Electronic Engineering, Soongsil University