

GaN HEMT Die를 이용한 Ku-대역 전력 증폭기 설계 및 제작

Design and Fabrication of Ku-Band Power Amplifier Using GaN HEMT Die

김상훈 · 김보기 · 최진주 · 정병구* · 태현식*

Sang-Hoon Kim · Bo-Ki Kim · Jin-Joo Choi · Byeoung-Koo Jeong* · Hyun-Sik Tae*

요 약

본 논문은 GaN(Gallium Nitride) HEMT(High Electron Mobility Transistor) die를 이용하여 Ku-대역 전력 증폭기 설계, 제작 그리고 실험 결과에 대해 기술하였다. 저비용으로 Ku-대역 전력 증폭기를 설계하기 위하여 고가의 알루미늄 회로 기판 제작 대신 PCB(Printed Circuit Board)를 이용하여 입/출력단 정합 회로를 이용하였다. 측정 결과로는 펄스 모드로 동작시켰을 때 14.8 GHz에서 42.6 dBm의 출력 전력, 37.7 % 드레인 효율 그리고 7.9 dB의 선형 이득을 얻었다. CW (Continuous Wave) 실험 결과로는 39.8 dBm의 출력 전력, 24.1 %의 드레인 효율 그리고 7.2 dB의 선형 이득을 얻을 수 있었다.

Abstract

This paper presents a design and fabrication of Ku-band power amplifier using Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor (GaN HEMT) die. In order to fabricate the low-cost Ku-band power amplifier, a Printed Circuit Board(PCB) was used for input/output matching circuits instead of manufacturing process to use an expensive substrate. The measured output power is 42.6 dBm, the drain efficiency is 37.7 % and the linear gain is 7.9 dB under pulse operation at the frequency of 14.8 GHz. Under the continuous wave(CW) test, the output power is 39.8 dBm, the drain efficiency is 24.1 % and the linear gain is 7.2 dB.

Key words: Ku-Band, GaN HEMT Die, Low-Cost, Power Amplifier

I. 서 론

Ku-대역 고출력 전력 증폭기는 무선 통신 시스템에 다양하게 사용되어지고 있다. Ku-대역에서 대부분의 고출력 전력 증폭기는 TWI(Traveling Wave Tube), 클라이스트론 및 자이로트론 등과 같은 진공 전력 증폭기가 주를 이루고 있다. 이러한 증폭기들은 여전히 수백~수킬로 와

트급 고출력을 위해서 이용되고 있다. 반도체 소자를 이용한 반도체 전력 증폭기(Solid-State Power Amplifier: SS-PA)는 신뢰성, 크기의 소형화 및 저전압 동작 등과 같은 장점이 있다^[1]. 이러한 이유들로 Ku-대역에서도 GaN HEMT bare chip을 이용하여 고출력 반도체 전력 증폭기가 활발하게 연구되고 있다^{[2]~[5]}.

본 논문에서는 Ku-대역 고출력 반도체 전력 증폭기를

「이 연구는 2013년도 삼성탈레스 연구비의 지원으로 연구되었음.」

광운대학교 전파공학과(Department of Wireless Communications Engineering, Kwangwoon University)

*삼성탈레스(Samsung Thales)

· Manuscript received February 4, 2014 ; Revised March 11, 2014 ; Accepted April 16, 2014. (ID No. 20140204-016)

· Corresponding Author: Jin-Joo Choi (e-mail: jinchoi@kw.ac.kr)

PCB를 이용하여 입/출력단 정합 회로를 설계하여 저비용으로 제작을 하고, 실험 결과를 얻은 것에 대해 기술하였다.

II. 설계 및 제작

Ku-대역 전력 증폭기 설계를 위하여 Cree사 25 W급 CGHV1J025D GaN HEMT die를 선정하였다. 그림 1은 본문에 사용되어진 GaN HEMT die의 사진을 나타낸다. 이 소자는 0.25 μm 게이트 길이를 가지는 GaN-on-silicon carbide(SiC) HEMT이다.

표 1은 Cree사 CGHV1025D의 특성을 나타낸다. DC에서부터 18 GHz까지 사용이 가능하며, 드레인 전압이 40 V일 때 15 GHz의 주파수에서 43.8 dBm의 포화 출력 전력, 7 dB의 전력 이득과 52 %의 드레인 효율을 낼 수 있다고 데이터 시트상에 명시되어 있다.

설계는 Agilent Advanced Design System(ADS)와 Ansoft사의 High Frequency Structure Simulation(HFSS)을 병행적으로 사용하여 진행하였다. 우선, 소자의 바이어스 조건과 설계 주파수 대역에서 입/출력단 최적의 임피던스를

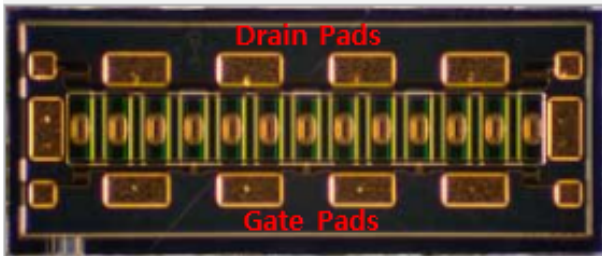


그림 1. Cree사 GaN HEMT die CGHV1J025D 형상
Fig. 1. GaN HEMT die Cree's CGHV1J025D.

표 1. CGHV1J025D 소자의 제원
Table 1. Specification of CGHV1J025D.

성능 변수	값
사용 가능 주파수	DC-18 GHz
포화 출력 전력	43.8 dBm @ 15 GHz
전력 이득	7 dB @ 15 GHz
드레인 효율	52 % @ Psat
드레인 전압	40 V
크기	0.80×1.92×0.10 mm

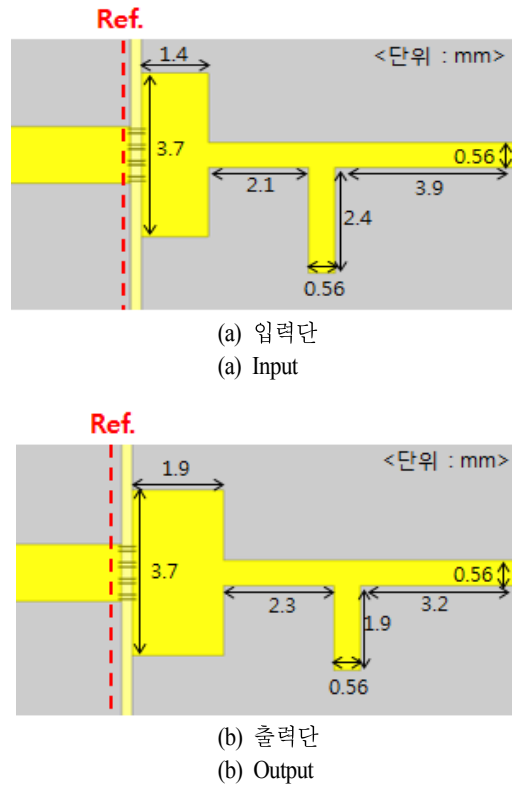


그림 2. HFSS를 이용한 정합 회로
Fig. 2. Matching circuits using HFSS.

찾기 위해 Cree사에서 제공해 준 비선형 모델과 ADS 시뮬레이션 코드를 이용하여 소스/로드-풀 시뮬레이션을 수행하였다. 15 GHz에서 드레인 전압 40 V, 바이어스 전류가 180 mA일 때의 최적의 소스 임피던스는 $0.645 - j1.287 \Omega$ 이고, 로드 임피던스는 $1.346 - j4.605 \Omega$ 이다. ADS 소스/로드-풀 시뮬레이션에서 얻은 결과를 바탕으로 Ansoft사의 High Frequency Structure Simulation(HFSS)을 통해 본딩 와이어 효과를 포함하여 그림 2와 같이 입/출력단 정합 회로를 설계하였다.

그림 3은 HFSS를 이용하여 설계한 소스 및 로드 임피던스의 위치를 보여준다. 소스 임피던스는 $0.77 - j1.287 \Omega$ 이고, 로드 임피던스는 $1.42 + j4.8 \Omega$ 이다.

앞에서 ADS 시뮬레이션 코드를 통해 얻어낸 소스 및 로드 임피던스와 완전히 동일하지는 않지만, ADS 시뮬레이션 코드에서 얻은 임피던스 점과 최대한 근처에 위치하게 설계하였다. HFSS 시뮬레이션에서 얻은 입/출력단

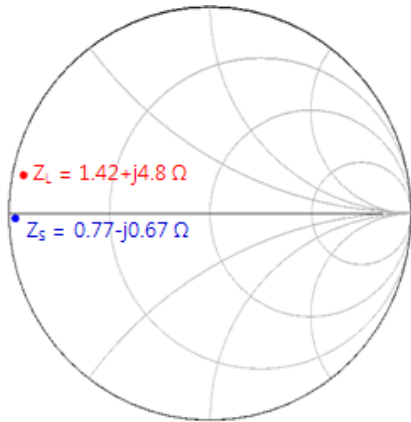


그림 3. 소스 및 로드 임피던스 시뮬레이션 결과(HFSS)
 Fig. 3. The simulation results of source & load impedance. (HFSS).

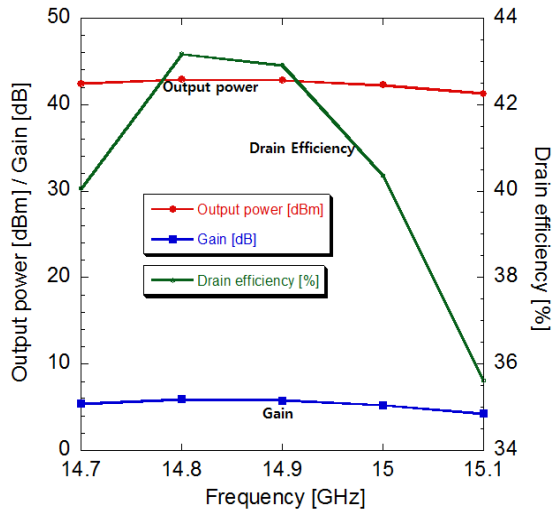


그림 4. 대신호 시뮬레이션 결과(ADS)
 Fig. 4. The simulation results of the large signal(ADS).

임피던스 결과를 s2p 파일로 추출하여 ADS 시뮬레이션 코드에 심어서 출력 전력, 전력 이득 및 드레인 효율을 예측해 보았다. 그림 4와 같이 Ku-대역 14.8 GHz에서 42.9 dBm 출력 전력, 5.9 dB 전력 이득 및 43.2 %의 드레인 효율을 얻을 수 있었다.

고주파 대역에서는 스텐브의 라인 폭 및 길이에 따른 임피던스의 변화가 매우 민감하고, 설령 시뮬레이션과 동일하게 설계를 하여 제작을 하더라도 본딩 와이어 길이 및 PCB 제작 시 생기는 오차로 인해 임피던스가 틀어질

가능성이 있기 때문에 입/출력 정합 회로 기판 제작 시 튜닝 패드를 만들어서 측정 시 임피던스 변화를 측정할 수 있도록 제작을 하였다. 위에서 언급한 발생 가능한 오차들 중에서 실제 전력 증폭기를 제작할 때 제작 오차가 발생할 확률이 가장 큰 본딩 와이어 길이에 따른 영향을 HFSS 시뮬레이션 코드를 이용하여 분석해 보았다. 본딩 와이어 길이에서 오차 발생 확률이 가장 큰 이유는 GaN bare chip에서 마이크로스트립 라인으로 본딩 와이어를 연결할 때, 수동으로 연결을 해야 하기 때문에 아무리 정확하게 맞춘다고 하여도 시뮬레이션에서 설계한 길이와 차이가 날 수 있기 때문이다. 그리하여 직경이 1 mil인 본딩 와이어를 길이에 따른 임피던스 변화를 시뮬레이션 코드를 통해 살펴보았다.

그림 5와 같이 본딩 와이어 기준점을 설계하여 임의의 정합 회로에서의 임피던스 점을 확인하고, 기준보다 0.1 mm 씩 변화를 주어가며 임피던스가 어떻게 변화하는지 살펴보았다. 그림 6에서 확인할 수 있듯이, 본딩 와이어가 0.1mm 씩 증가할 때마다 위상이 약 6°씩 증가하는 경향을 확인하였다. 그리하여 입/출력단 정합 회로를 제작 하기에 앞서 시뮬레이션을 통해 튜닝 패드를 이용하여 임피던스가 어떻게 변화하는지 경향을 파악한 후 실제 전력 증폭기를 제작한다. 그림 7이 실제 제작된 전력 증폭기이다. 제작된 입/출력단 정합 회로 기판은 유전율 3.5 인 TACONIC사 RF35A2이며, 기판 두께는 10 mils 기판을 사용하여 제작하였다. 그리고 마이크로스트립 라인 폭과 길이를 변화시킬 수 있는 튜닝 패드를 설계하여 제작하였다. 전력 증폭기에 사용된 캐리어는 GaN bare die에서

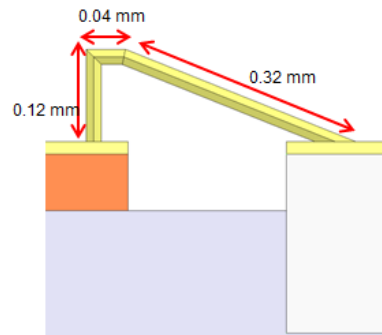


그림 5. 본딩 와이어 설계(HFSS)
 Fig. 5. The design of the bonding wire(HFSS).

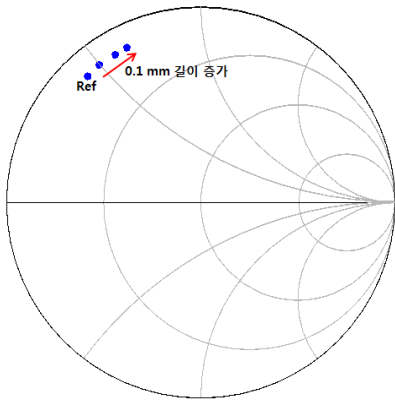


그림 6. 본딩 와이어 길이에 따른 영향(HFSS)
 Fig. 6. The effects of different bonding wire length(HFSS).

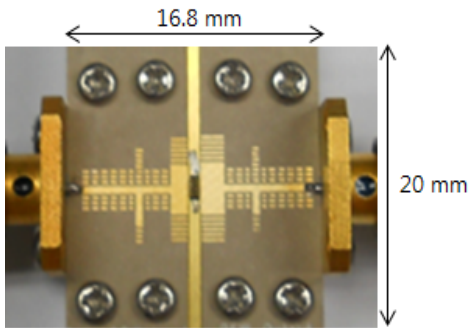


그림 7. 제작된 Ku-대역 전력 증폭기 사진
 Fig. 7. The photograph of the fabricated Ku-band power amplifier.

발생하는 열을 효과적으로 배출하기 위해 15:85 % 비율로 합금된 CuW로 제작되었으며, GaN bare die의 유테틱 본딩을 위해 소프트 금도금 처리를 하였다. 그리고 GaN bare die는 90:10 % 비율로 합금된 AuSn을 이용하여 캐리어에 유테틱 본딩을 하였고, GaN bare chip과 마이크로스트립 라인을 연결하기 위해 1 mil의 직경을 가지는 금와이어를 이용하여 와이어 본딩 작업을 하였다. 그림 1에서 보듯이 게이트단과 드레인단에 각각 4개의 패드가 있고, 각 패드에 2개씩 와이어 본딩을 하여 총 8개를 연결하였다.

III. 측정 결과

그림 8은 제작된 Ku-대역 전력 증폭기의 입력 전력에 따른 출력 전력, 전력 이득 및 드레인 효율 측정 결과를

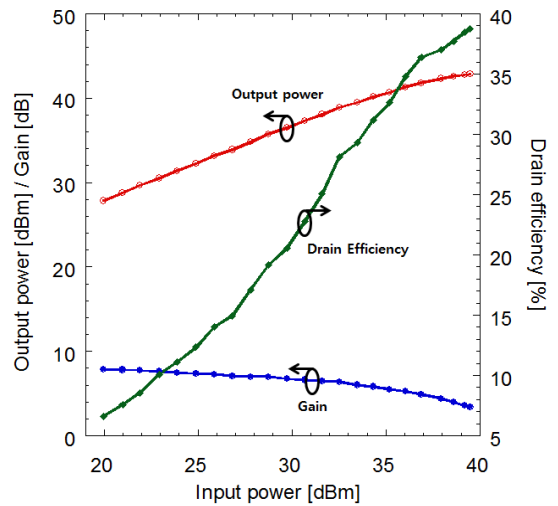


그림 8. 입력 전력에 따른 Ku-대역 전력 증폭기 측정 결과(펄스 측정)
 Fig. 8. Measured results of fabricated Ku-band power amplifier as a function of input power.(pulse condition).

보여준다. 40 V의 드레인 전압과 -2.48 V의 게이트 전압을 갖는 Class AB 바이어스 조건에서 전력 증폭기를 구동시켰다. 전력 증폭기 측정에 사용한 입력 신호는 펄스폭 10 us, 듀티 사이클 0.01 % 펄스 신호를 사용하였다. 그림 9에서 확인할 수 있듯이, 주파수 14.8 GHz에서 42.6 dBm의 출력전력, 37.7 %의 드레인 효율 및 7.9 dB의 선형 이득을 얻었다.

제작된 전력 증폭기의 주파수 응답 특성은 그림 9에 나타내었다. 14.7 GHz에서 15.1 GHz의 대역에서 40 dBm 이상의 출력 전력, 4 dB 이상의 전력 이득과 23 % 이상의 드레인의 효율을 얻었다.

표 2는 14.8 GHz에서 펄스 duty cycle을 0.01 %, 0.1 %,

표 2. Duty cycle 가변에 따른 성능 비교

Table 2. Performance comparison of variations in duty cycle.

주파수	Duty cycle	출력 전력	드레인 효율
14.8 GHz	0.01 %	42.6 dBm	37.7 %
14.8 GHz	0.1 %	42.3 dBm	35.8 %
14.8 GHz	1 %	41.6 dBm	35.8 %
14.8 GHz	4 %	41.9 dBm	31.8 %

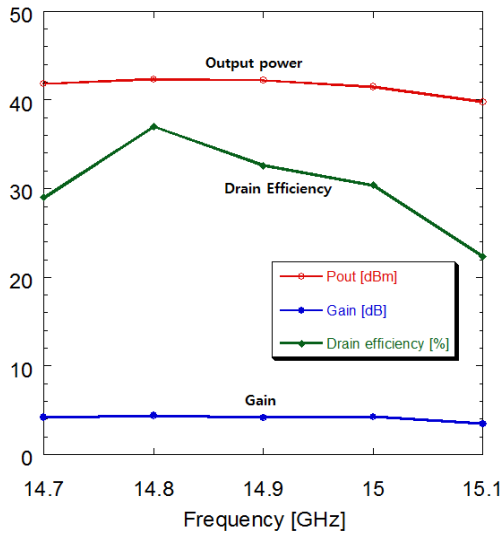


그림 9. 주파수에 따른 Ku-대역 전력 증폭기 측정 결과 (펄스)
 Fig. 9. Measured results of fabricated Ku-band power amplifier as a function of frequency(pulse condition).

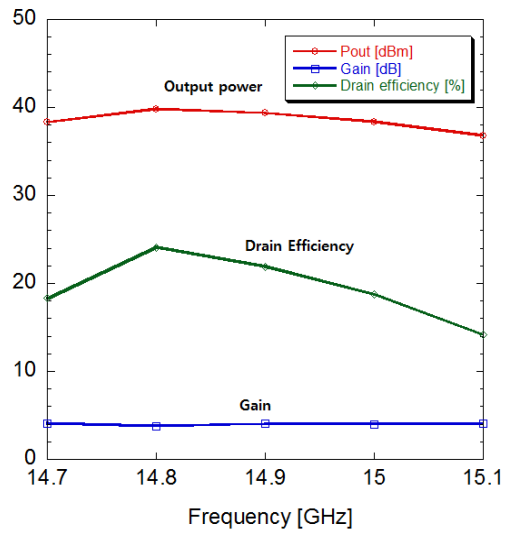


그림 11. 주파수에 따른 Ku-대역 전력 증폭기 측정 결과 (CW)
 Fig. 11. Measured results of fabricated low-cost Ku and power amplifier as a function of frequency(CW).

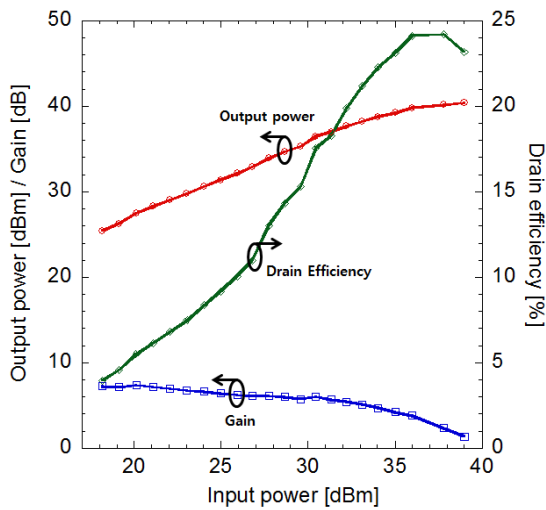


그림 10. 입력 전력에 따른 Ku-대역 전력 증폭기 측정 결과(CW)
 Fig. 10. Measured results of fabricated Ku-band power amplifier as a function of input power(CW).

1%, 4%로 가변시켜 가며 전력 증폭기의 특성을 확인하였다. 이 때, 펄스폭은 10 us로 고정을 시킨 상태에서 duty 가변을 하였다. duty가 높아지면서 GaN bare die의 열화

표 3. Ku-대역 GaN 전력 증폭기 성능 비교

Table 3. Performance comparison of Ku-band GaN power amplifier.

주파수 [GHz]	출력 전력 [W]	PAE [%]	이득 [dB]	크기 [mm ²]	운용 모드	참고 문헌
Ku-대역	62.2	44	8.5	9.8×9.2	Pulse	[2]
13.9	17.7	36.4	8.7	16.5×9.7	Pulse	[3]
14	100	•	8	•	Pulse	[4]
14.25	34.7	15	5.3	11×12.9	CW	[5]
14.8	18.2	25	7.9	16.8×20	Pulse	본 논문

현상으로 인해 출력 전력과 드레인 효율의 특성이 저하되는 현상을 확인할 수 있었다.

그림 10은 14.8 GHz에서 CW 모드에서 전력 증폭기 입력 전력에 따른 출력 전력, 전력 이득 및 드레인 효율을 보여준다. 바이어스 조건은 펄스 측정 때와 모두 동일하게 세팅하여 측정을 하였다. Ku-대역 전력 증폭기 CW 측정 결과로는 39.8 dBm의 출력 전력, 24.1%의 드레인 효율과 7.2 dB 선형 이득을 얻을 수 있었다. 앞의 펄스 모드에서 얻은 출력 전력보다 CW 모드에서 2.8 dB 낮은 출력 전력을 얻었는데, 이는 GaN bare die에서 발생하는 열로

인해 펄스 모드에서 동작시보다 특성이 저하되는 현상을 확인하였다. 그림 11은 14.7 GHz에서 15.1 GHz 대역에서의 출력 전력, 전력 이득 및 드레인 효율 특성을 보여준다. 최대 40 dBm의 출력 전력과 4 dB 전력 이득 및 24% 드레인 효율을 얻었다. 펄스 모드에서 동작시보다 열적인 문제로 인해 확연하게 특성이 저하되는 현상을 확인하였다.

Ku-대역 GaN HEMT 전력 증폭기 특성을 본 논문과 비교를 위해 표 3에 나타내었다. 본 논문이 비교 대상들에 비해 출력이 낮은 것은 단일 소자를 사용하여 전력 증폭기 설계 및 제작을 하였기 때문이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 GaN bare die를 이용하여 Ku-대역 전력 증폭기를 설계 및 제작하였다. 전력 증폭기 측정은 펄스 모드와 CW 모드에서 측정을 하였다. 펄스 모드에서 측정된 결과로는 14.8 GHz에서 42.6 dBm의 출력 전력, 37.7 % 드레인 효율 및 7.9 dB 선형 이득을 얻었다. CW 모드에서는 39.8 dBm의 출력 전력, 24.1 %의 드레인 효율 및 7.2 dB의 선형 이득을 확인하였다. 펄스 모드와 CW 모드에서 동작을 시킬 때 성능의 차이가 있는데, CW 모드에서 성능의 저하가 최소화 되도록 cooling system 측면의 연구가 필요하다. 그리고 소자를 병렬적으로 배치하여 보다 높은 출력을 얻을 수 있도록 입/출력단 정합 회로 설계 및 제작에 관한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

김 상 훈



2009년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2009년 9월~현재: 광운대학교 전파공학과 석박사통합과정
 [주 관심분야] RF 회로 설계, 고출력 증폭기, TRM 등

김 보 기



2010년 8월: 백석대학교 정보통신학과 (공학사)
 2010년 9월~현재: 광운대학교 전파공학과 석박사통합과정
 [주 관심분야] RF 회로 설계, 고출력 증폭기, 공간 결합기 등

References

- [1] Aethercomm, "Gallium Nitride(GaN) Microwave transistor technology for radar applications", *Microwave Journal*, vol. 51, no. 1, pp. 106, Jan. 2008.
- [2] K. Yamauchi, H. Noto, H. Nonomura, S. Kunugi, M. Nakayama, and Y. Hirano, "A 45% power added efficiency, Ku-band 60 W GaN power amplifier", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 1-4, Jun. 2011.
- [3] Ge Qin, Chen Xiaojuan, Luo Weijun, Yuan Tingting, Pu Yan, and Liu Jaggard, "A Ku band internally matched high power GaN HEMT amplifier with over 30 % of PAE", *Journal of Semiconductors*, vol. 33, no. 1, Jan. 2012.
- [4] H. Noto, H. Maehara, H. Uchida, M. Koyanagi, H. Utsumi, J. Nishihara, H. Otsuka, K. Yamanaka, M. Nakayama, and Y. Hirano, "X- and Ku-band internally matched GaN amplifiers with more than 100 W output power", *Microwave Integrated Circuits Conference(EuMIC)*, pp. 695-698, Oct. 2012.
- [5] K. Takagi, Y. Kashiwabara, K. Masuda, K. Matsushita, H. Sakurai, K. Onodera, H. Kawasaki, Y. Takada, and Y. K. Tsuda, "Ku-band AlGaIn/GaN HEMT with over 30 W", *Microwave Integrated Circuit Conference, 2007. EuMIC 2007. European*, pp. 169-172, Oct. 2007.

최진주



1983년 8월: 서울대학교 물리교육학과 (이학사)
1985년 8월: 미국 Georgia State University 물리학과 (이학석사)
1991년 8월: 미국 University of Michigan 핵공학과 (공학박사)
1991년 5월~1997년 8월: 미국 해군연구소 (NRL) 연구원

1997년 9월~현재: 광운대학교 전자융합공학과 교수
[주 관심분야] RF 회로 설계, 고출력 증폭기, Vacuum Tube Amplifier 등

태현식



1983년 3월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 5월: 동양정밀공업(주) 선임연구원
1990년 5월~현재: 삼성탈레스(주) 수석연구원
[주 관심분야] 무선통신장비 및 통신시스템, Data Link 시스템 설계 등

정병구



2001년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2003년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)
2009년 12월: 단암시스템즈(주) 선임연구원
2009년 12월~현재: 삼성탈레스

[주 관심분야] 초고주파 송수신기 및 시스템, DATA LINK 시스템 설계 등