

# GaN-HEMT를 이용한 X-대역 이단 전력증폭기 설계

## Design of Two-Stage X-Band Power Amplifier Using GaN-HEMT

이우석 · 이휘섭 · 박승국 · 임원섭 · 한재경\* · 박광근\* · 양영구  
Wooseok Lee · Hwiseob Lee · Seungkuk Park · Wonseob Lim ·  
Jaekyoung Han\* · Kwangun Park\* · Youngoo Yang

### 요 약

본 논문에서는 GaN-HEMT를 이용하여 X-대역에서 동작하는 이단으로 구성된 전력증폭기를 설계 및 제작하였다. 높은 전력 이득을 얻기 위해 간단한 구조의 중간 단 정합 네트워크를 통해 이단으로 구성하였다. 3D EM 시뮬레이션을 통하여 본드와이어 인덕턴스와 기생 캐패시턴스를 예측하였다. 본드와이어 인덕턴스를 줄임으로써 정합 네트워크의 Q (quality-factor)를 최소화하여 대역 특성을 향상시켰다. 제작된 전력증폭기는 40 V의 동작 전압을 인가하였으며, 8.1~8.5 GHz에서 16 dB 이상의 전력 이득, 42.5 dBm 이상의 출력 전력, 35 % 이상의 효율 특성을 나타냈다.

### Abstract

This paper presents an X-band two-stage power amplifier using GaN-HEMT. Two-stage structure was adopted to take its high gain and simple inter-stage matching network. Based on a 3D EM simulation, the bond-wire inductance and the parasitic capacitance were predicted. By reducing bond-wire inductance, Q of the matching network is decreased and the bandwidth is improved. The implemented two-stage PA shows a power gain of more than 16 dB, saturated output power of more than 42.5 dBm, and an efficiency of more than 35 % in frequency range of 8.1~8.5 GHz with an operating voltage of 40 V.

Key words: GaN-HEMT, X-Band, Power Amplifier, Two-Stage Power Amplifier

### I. 서 론

주요 군 통신이나 위성통신 주파수 대역으로 사용하는 X-대역에서 최근 고효율과 높은 출력 전력을 얻기 위해 GaN-HEMT(Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor)를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

수 백 MHz~수 GHz 대역과 같은 일반적인 상용 이동 통신 주파수 대역에 비해 X-대역과 같은 높은 주파수 대

역에서는 상대적으로 손실이 많이 발생하게 된다. 이는 전체적인 전력 이득과 효율 저하에 상당한 영향을 미치게 된다. GaN-HEMT는 기존의 LDMOS(Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor), GaAs(Gallium Arsenide) 소자들 보다 에너지 밴드 갭이 넓어 큰 항복 전압을 가진다. 또한, 전력 밀도가 높아 출력 특성이 우수하며, 고효율 특성을 보인다. 더불어 넓은 주파수 특성을 보여 X-대역과 같은 높은 주파수 시스템에 적용하기 적합하다<sup>[1]~[6]</sup>.

「이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2014R1A5A1011478).」  
성균관대학교 정보통신대학(School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

\*(주)피플웍스(Peopleworks Co., Ltd.)

· Manuscript received September 25, 2015 ; Revised October 20, 2015 ; Accepted November 26, 2015. (ID No. 20150925-10S)

· Corresponding Author: Youngoo Yang (e-mail: yang09@skku.edu)

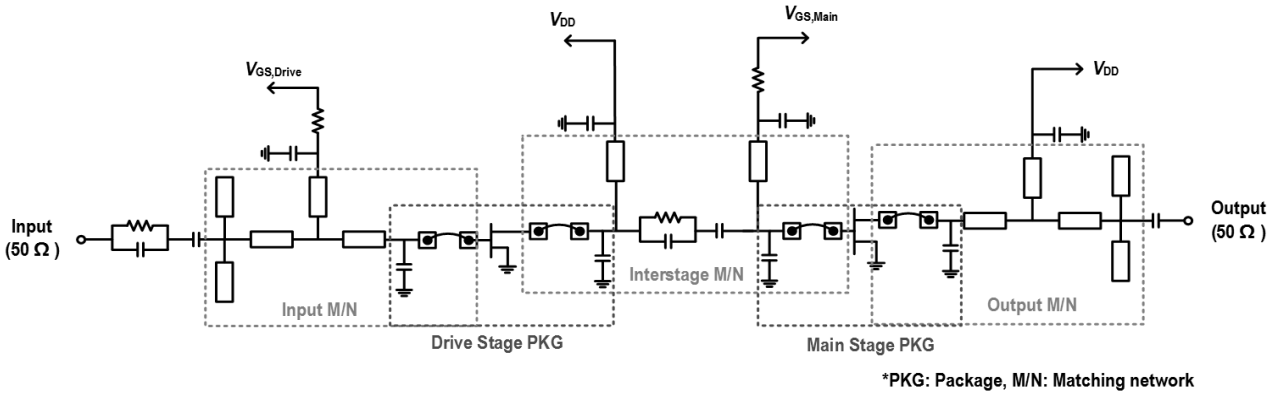


그림 1. 제안된 X-대역 이단 전력증폭기의 전체 회로도  
 Fig. 1. Overall schematic diagram of the proposed X-band two-stage power amplifier.

본 논문에서는 GaN-HEMT bare-die의 패키징과 이를 이용하여 이단으로 구성된 X-대역 전력증폭기를 설계 및 제작하였다. 전력증폭기는 높은 전력 이득을 얻기 위해 보조 전력 증폭 단과 주 전력 증폭 단을 포함하여 이단으로 설계되었다. 더불어 3D EM 시뮬레이션을 통하여 본드와이어 인덕턴스와 패키지의 기생 캐패시턴스를 예측한 후 이를 정합 네트워크에 반영하여 최대 25 W의 출력 전력과 45.1 %의 고효율을 얻었다.

## II. 이단 전력증폭기의 설계

### 2-1 전체 회로 설계

그림 1은 제안된 X-대역 GaN-HEMT 이단 전력증폭기의 전체 회로도를 나타낸다. 사용된 소자는 Cree사의 GaN-HEMT CGHV1J006D를 보조 전력 증폭 단으로, CGHV1J025D를 주 전력 증폭 단으로 사용하였다. 각각의 bare-die는 40 V의 동작 전압을 필요로 하며, DC~18 GHz의 주파수 범위에서 사용이 가능하다<sup>[7],[8]</sup>. Bare-die 트랜지스터의 성능 검증을 위해 소스- 및 로드-풀을 하였다. 이를 통해 트랜지스터의 최적의 성능을 나타내는 임피던스를 추출하고 시뮬레이션 결과를 표 1에 나타내었다.

Keysight사의 ADS(Advanced Design System)을 이용하여 표 1에서 얻은 최적 임피던스를 기반으로 입출력 및 중간 단 정합을 하였다. ADS의 Momentum EM 시뮬레이션을 기반으로 하여 정합 네트워크를 최적화하였다. 입력

표 1. 소스- 및 로드-풀 임피던스와 시뮬레이션 결과  
 Table 1. Source- and load-pull impedances and simulation results.

보조 증폭 단		주 증폭 단	
Source	Load	Source	Load
2.1+j4.1	13.5+j35.8	0.6+j1.1	3.2+j8.7
출력 전력	최대 효율	출력 전력	최대 효율
38.6 dBm	62.9 %	44.8 dBm	63.5 %

과 중간 단 정합 네트워크에 병렬 저항과 캐패시터를 이용하여 회로의 안정성을 확보하고, 본드와이어 인덕턴스와 패키지 기생 캐패시턴스를 정합 네트워크에 포함하였다. 2차 고조파 임피던스는 패키지 내부의 본드와이어와 기생 캐패시턴스에 의하여 정합되어 효율 상승 효과를 얻을 수 있고, 외부 정합 네트워크에 둔감하다. 이로 인해 외부 정합 네트워크는 기본파 임피던스만 정합되도록 간단하게 구성되었다. 더불어 대역 특성을 향상시키기 위해 정합 회로에 balanced stub를 사용하였다.

### 2-2 트랜지스터 패키징

그림 2는 Ansys사의 HFSS의 3D EM 시뮬레이션을 이용하여 트랜지스터 패키징을 위한 등가회로 모델을 나타낸다. 본드와이어와 기생 캐패시터를 각각 직렬 인덕터와 9.8의 유전율( $\epsilon_r=9.8$ )을 갖는 병렬 캐패시터의 등가 회로를 나타낼 수 있다. 표 1과 같이 사용된 bare-die 트랜지스

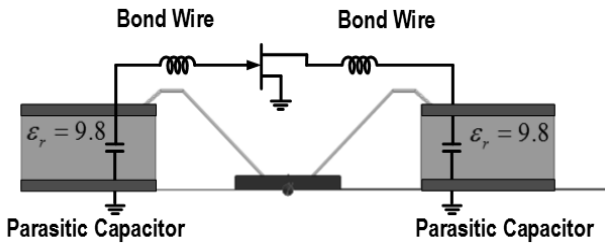


그림 2. 트랜지스터 패키징을 위한 등가회로 모델  
Fig. 2. Equivalent circuit model for transistor packaging.

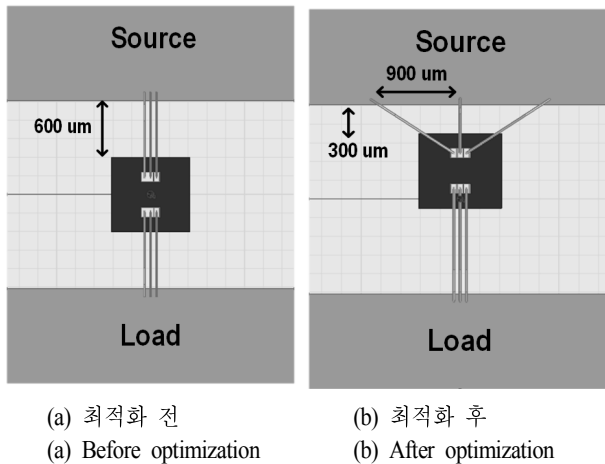


그림 3. 보조 전력 증폭 단 패키지 최적화  
Fig. 3. Package optimization of the drive stage.

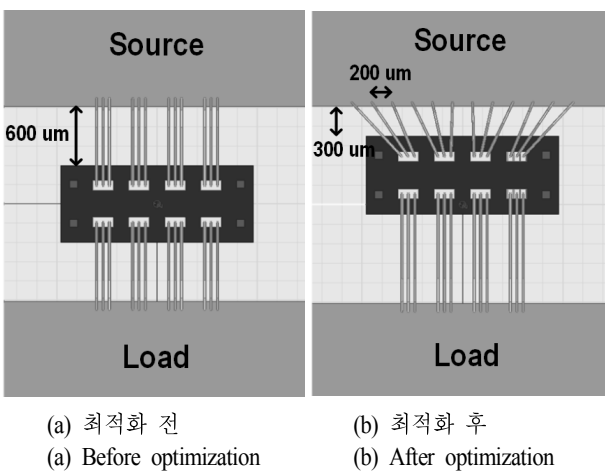


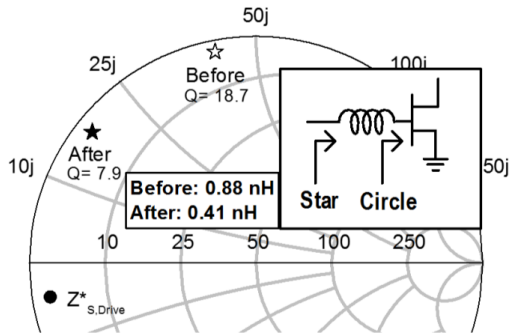
그림 4. 주 전력 증폭 단 패키지 최적화  
Fig. 4. Package optimization of the main stage.

터의 소스 임피던스는 로드 임피던스에 비하여 낮은 임피던스를 갖는다. 이러한 낮은 소스 임피던스의 정합 계율은 매우 민감한 특성을 보이며, 소스의 본드와이어 인덕턴스가 증가함에 따라 정합 네트워크의  $Q$ 값이 증가하여 전체적인 대역 특성이 제한된다. 따라서 트랜지스터 bare-die의 소스쪽 본드와이어 인덕턴스를 최소화하여 정합 네트워크의 낮은  $Q$ 를 갖도록 하는 것이 매우 중요하다.

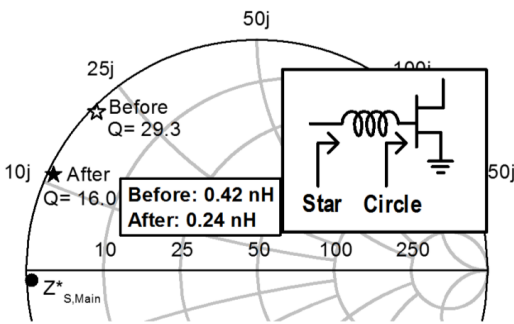
주 전력 증폭 단 및 보조 전력 증폭 단의 소스쪽 본드와이어 인덕턴스의 최적화 전과 후에 대한 모습을 각각 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 본드와이어의 길이는 인덕턴스를 결정하는 주된 요소로, 트랜지스터와 패키지 electrode 사이의 거리를 줄임으로써 인덕턴스를 최소화할 수 있다. 반대로 상대적으로 로드쪽 본드와이어의 길이는 길어져 인덕턴스는 증가하게 된다. 하지만 로드 임피던스는 소스 임피던스에 비해 실수부와 허수부가 모두 상대적으로 큰 값을 나타낸다. 이러한 이유 때문에 정합 네트워크의 전체적인  $Q$ 값은 소스쪽 본드와이어에 의해 결정됨을 알 수 있다. 다시 말해, 로드쪽의 본드와이어 인덕턴스는 전체적인 대역 특성에 미치는 영향이 상대적으로 적다는 것을 의미한다. 그 외에 본드와이어 간의 상호 인덕턴스도 본드와이어 인덕턴스를 결정하는 주된 요인 중에 하나이다. 상호 인덕턴스를 줄이기 위해 그림 3(b), 그림 4(b)와 같이 각각의 본드와이어 간의 간격을 조절하여 상호 인덕턴스를 최소화 하였다. 하지만 본드와이어 간의 간격을 계속 늘릴 경우, 본드와이어 각각의 길이가 길어지게 되어 오히려 인덕턴스가 증가하게 된다. 따라서 각각의 본드와이어간의 적절한 간격을 유지하며, 인덕턴스를 최소화 하여야 한다. 3D EM 시뮬레이션을 통하여 본드와이어의 높이, 개수 및 간격을 최적화하여 인덕턴스를 최소화 하였다. 최적화 전후의 소스쪽 본드와이어 인덕턴스 시뮬레이션 결과, 보조 전력 증폭 단의 경우 0.88 nH에서 0.42 nH로, 주 전력 증폭 단의 경우 0.42 nH에서 0.24 nH로 최소화하였다.

그림 5에 본드와이어 인덕턴스에 따른 소스 임피던스의 변화와 입력 정합 네트워크에 대한  $Q$ 값의 변화를 나타내었다. 제안된 구조의 트랜지스터 패키징을 통하여 보조 및 주 전력 증폭 단의 정합 네트워크의  $Q$ 를 각각 7.9

III. 제작 및 측정



(a) 보조 전력 증폭 단  
(a) Drive stage



(b) 주 전력 증폭 단  
(b) Main stage

그림 5. 본드와이어 인덕턴스 최적화에 따른 입력 정합 네트워크의 Q 변화

Fig. 5. Q variation of the input matching network for the optimization of the bond-wire inductances.

와 16.0으로 줄임으로써 대역 특성에 보다 유리하도록 하였다.

표 2. 기존 전력증폭기들과 성능비교

Table 2. Performance comparison to the previously published power amplifiers.

Ref.	Freq. (GHz)	Device technology	V <sub>DD</sub> (V)	Gain (dB)	P <sub>OUT</sub> (W)	DE (%)	PAE (%)	Remark
[9]	9.5 ~ 10.0	GaN-HEMT	50	12.0	25	41.0	35.0	MMIC
[10]	9.0 ~ 10.0	GaN-HEMT	28	8.7	40	N/A	35.7	Thin-film
[11]	9.5 ~ 10.5	GaN-HEMT	40	10.3	69	N/A	35.0	Internally matched
This work	8.1 ~ 8.5	GaN-HEMT	40	20.9	25	45.1	36.9	2-stage hybrid

DE: drain efficiency, PAE: power-added efficiency.

그림 6은 Cree사의 GaN-HEMT bare-die CGHV1J006D와 CGHV1J025D를 이용하여 제작된 X-대역 이단 전력증폭기의 평가 보드와 패키지 내부의 사진을 나타낸다. 트랜지스터는 방열과 크기를 고려해 2.0×3.0 mm<sup>2</sup>의 세라믹 패키지 내부에 실장하였고, 10 mil 두께의 Tarconic사의 TLY-5 기판을 사용하여 제작되었으며, 전체 회로의 크기는 64×47 mm<sup>2</sup>이다. 40 V의 동작 전압을 인가하였으며, 정지 전류는 보조 전력 증폭 단이 24 mA, 주 전력 증폭 단이 58 mA 조건에서 측정되었다.

그림 7은 제작된 전력증폭기의 측정된 S 파라미터와 전력 이득 및 효율을 나타낸다. 주파수 8.3 GHz에서 S<sub>11</sub>, S<sub>21</sub>은 각각 -15.8 dB, 27.3 dB 임을 알 수 있다. 측정 결과,

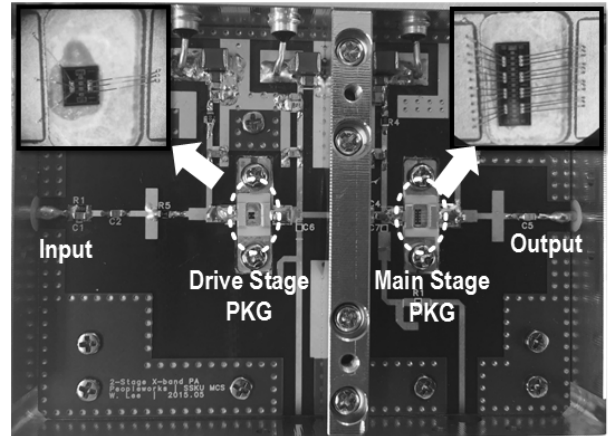
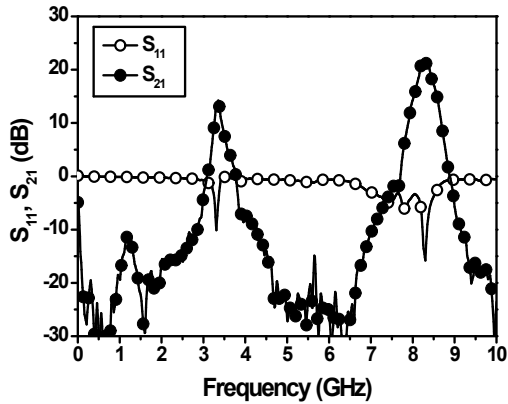
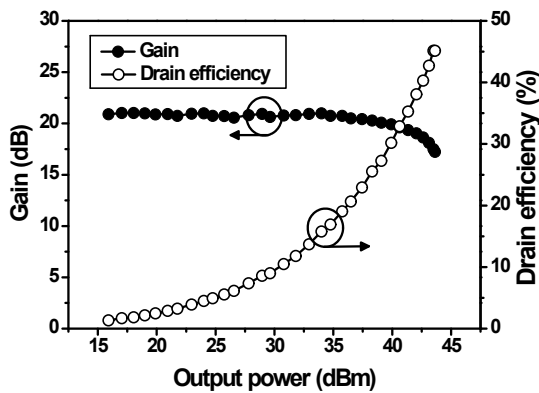


그림 6. 제작된 X-대역 이단 전력증폭기

Fig. 6. Implemented X-band two-stage power amplifier.



(a) S-파라미터  
(a) S-Parameter



(b) 전력 이득과 효율  
(b) Gain and drain efficiency

그림 7. 제작된 이단 전력증폭기의 측정 결과  
Fig. 7. Measured performances of the two-stage PA.

8.2 GHz에서 최대 20.9 dB의 전력이득, 43.9 dBm 출력 전력 및 45.1 %의 효율을 나타내었다.

그림 8은 주파수에 따른 전력증폭기의 성능을 나타낸다. 8.1~8.5 GHz의 범위에서 16 dB 이상의 전력 이득, 42.5 dBm 이상의 출력 전력, 35 % 이상의 효율을 갖는 것을 알 수 있다. 표 2에 기존의 전력증폭기의 성능과 제작된 전력증폭기의 성능을 비교하였다. 기존 전력증폭기들과 비교하였을 때 제안된 전력증폭기는 이단으로 구성되어 높은 전력 이득을 나타내며, 패키지 내부에서 본드와이어와 기생 캐패시턴스에 의해 2차 고조파 임피던스가

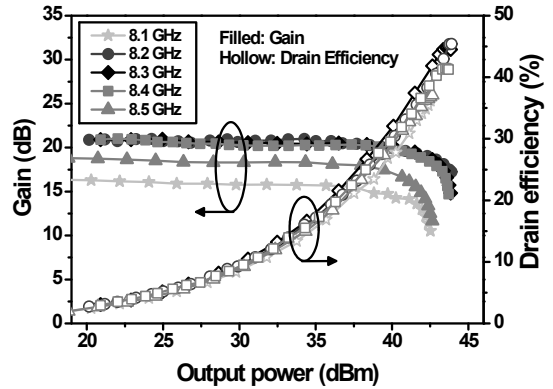


그림 8. 주파수에 따른 측정 결과  
Fig. 8. Measured performances for frequency ranges.

정합되어 효율 향상 효과를 얻을 수 있었다. 이로 인해 기존의 전력증폭기에 비해 우수한 효율 특성을 보인다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 GaN-HEMT bare-die를 이용하여 X-대역에서 동작하는 이단 전력증폭기를 설계 및 제작하였다. 본드와이어 인덕턴스와 기생 캐패시턴스에 의해 고조파 임피던스가 패키지 내부에서 정합되어 간단한 외부 정합 네트워크를 구성하였다. 또한, 3D EM 시뮬레이션을 통해 본드와이어와 기생 캐패시턴스를 예측하였고 본드와이어 인덕턴스를 줄임으로써 정합 네트워크의 Q를 감소시켜 대역 특성을 향상시켰다. 세라믹 패키지 내부에 실장하여 제작된 GaN-HEMT X-대역 이단 전력증폭기는 최대 20.9 dB의 전력 이득, 43.9 dBm의 출력 전력, 45.1 %의 고 효율 특성을 나타내었다.

#### References

[1] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y. F. Wu, "AlGaIn/ GaN HEMTs-an overview of device operation and applications", *Proc. of IEEE*, vol. 90. no. 6, pp. 1022-1031, Jun. 2002.  
[2] K. Kanto, A. Satomi, Y. Asahi, Y. Kashiwabara, K. Matsushita, and K. Takagi, "An X-band 250 W solid-state power amplifier using GaN power HEMTs", in *Radio*

and *Wireless Symp.*, pp. 77-80, Jan. 2008.

[3] M. Casto, M. Lampenfeld, J. Pencheng, P. Courtney, S. Behan, P. Daughenbaugh, and R. Worley, "100 W X-band GaN SSPA for medium power TWTA replacement", in *Wireless and Microwave Technology Conf.*, pp. 1-4, Apr. 2011.

[4] E. Suijker, M. Sudow, M. Fagerlind, N. Rorsman, A. Hek, and F. Viiet, "GaN MMIC power amplifiers for S-band and X-band", in *European Microw. Conf. 2008.*, pp. 297-300, Oct. 2008.

[5] Y. Yamashita, T. Nakata, T. Kumamoto, R. Suzuki, and M. Tanabe, "X-band GaN HEMT advanced power amplifier unit for compact active phased array antennas", *ICCAS-SICE*, pp. 3047-3050, Aug. 2009.

[6] K. Takagi, K. Masuda, Y. Kashiwabara, H. Sakurai, K. Matsushita, S. Takatsuka, H. Kawasaki, Y. Takada, and K. Tsuda, "X-band AlGaIn/GaN HEMT with over 80 W output power", in *IEEE CSIC Symp.*, pp. 265-268, Nov. 2006.

[7] Cree, GaN HEMT Die CGHV1J006D datasheet, Ver. 0.6, 2014 [Online]. Available: <http://www.wolfspeed.com/RF>

[8] Cree, GaN HEMT Die CGHV1J025D datasheet, Ver. 1.1, 2014 [Online]. Available: <http://www.wolfspeed.com/RF>

[9] J. Leckey, "A 25 W X-band GaN PA in SMT package", in *European Microw. Conf. 2014*, pp. 1341-1343, Oct. 2014.

[10] H. Jeong, H. Oh, A. Ahmed, and K. Yeom, "Design of X-band 40 W pulse-driven GaN HEMT power amplifier", in *Asia-Pacific Microw. Conf. 2012*, pp. 466-468, Dec. 2012.

[11] T. Yamamoto, E. Mitan, K. Inou, M. Nishi, and S. Sano, "A 9.5~10.5 GHz 60 W AlGaIn/GaN HEMT for X-band high power application", in *European Microw. Conf. 2007*, pp.173-175, Oct. 2007.

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

박 승 국



2011년 2월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 2015년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
 [주 관심분야] High-Efficiency RF Power Amplifier, Broadband Power Amplifier and Passive Circuit

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

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

한 재 경



2009년 3월: 남서울대학교 정보통신공학과 (공학사)  
2008년 10월~2013년 4월: 이노알에스 연구소 주임연구원  
2013년 4월~현재: 피플웍스 Mil. 사업부 연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 고출력 SSPA, 탐색기용 수신

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

박 광 근



1999년 3월: 경기대학교 전자공학과 (공학사)  
2015년 3월: 성균관대학교 이동통신공학과 (공학석사)  
2007년 5월~현재: 피플웍스 Mil. 사업부 연구소 책임연구원  
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 고출력 SSPA, 능동 위상 배열 시스템