

# 고입력 내성을 위한 GaN HEMT 기반 S-대역 저잡음 증폭기

## S-Band Low Noise Amplifier Based on GaN HEMT for High Input Power Robustness

김흥희 · 김상훈 · 최진주 · 최길웅\* · 김형주\*

Hong-Hee Kim · Sang-Hoon Kim · Jin-Joo Choi · Gil-Wong Choi\* · Hyoung-Joo Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 GaAs 기반 저잡음 증폭기가 사용되고 있는 레이더 수신기의 잡음지수를 낮추고, 저잡음 증폭기의 강인성(robustness)을 위하여 GaN HEMT 기반의 저잡음 증폭기를 설계하고 측정하였다. GaAs 기반의 저잡음 증폭기를 사용하는 레이더 수신기의 경우, 맨 앞단에 저잡음 증폭기를 보호하기 위한 리미터(limiter)가 필요하고, 이는 레이더 수신기 전체 잡음지수를 나빠지게 한다. 본 연구에서 측정된 GaN 기반 저잡음 증폭기의 잡음지수는 2 dB 이하로 측정되었다. 상용화된 GaAs 기반 저잡음 증폭기의 경우, 최대 입력 전력은 약 30 dBm인 반면 본 연구에서는 입력 전력이 43 dBm일 때 소자가 번아웃(burn-out)되었고, 전류 제한 모드로 동작시킬 경우 45.4 dBm에서도 강인성이 보장되었다.

### Abstract

In this paper, we present design and measurement of LNA(Low Noise Amplifier) based on GaN HEMT(Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor) to reduce the total noise figure of radar receiver and for robustness of LNA. In radar receiver using LNA based on GaAs(Gallium Arsenide) technology, limiter is necessary at the very front of the radar receiver to protect LNA. As a result, total noise figure of radar receiver is deteriorated. In this research, measured noise figure of LNA based on GaN HEMT is below 2 dB. In the case of commercialized GaAs LNA, recommended maximum input power is about 30 dBm. On the other hand, GaN HEMT LNA which is designed and measured is burned-out when input power is 43 dBm and robustness is guaranteed at input power 45.4 dBm.

Key words: LNA, GaN HEMT, Robustness, Current Limit

### I. 서 론

현재 대부분 레이더 수신기에 사용되고 있는 저잡음 증폭기는 GaAs pHEMT(Gallium Arsenide pseudomorphic High Electron Mobility) 기술을 기반으로 개발되었다. Ga-As pHEMT 소자들은 긴 동작 수명, 낮은 동작 전압, 높은

효율 및 경량성 등의 우수한 특성을 지니고 있고, GaAs는 화합물의 높은 전자 이동도와 보다 높은 최대 동작주파수를 갖고 있다. 그러나 레이더에서 신호를 송신할 때 송신부의 고출력 증폭기의 출력은 안테나를 통하여 방사되게 되는데, 이 때 안테나로부터 일부 출력은 방사되지 않고 써큘레이터(circulator)를 통하여 수신부로 되돌아오게

「이 연구는 삼성탈레스의 연구비 지원으로 연구되었음.」

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

\*삼성탈레스(Samsung Thales, Co, Ltd)

· Manuscript received December 24, 2014 ; Revised February 5, 2015 ; Accepted February 6, 2015. (ID No. 20141224-105)

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

된다. 이 반사된 출력이 직접 수신부에 입력될 경우, 출력 정도에 따라서는 수신부를 손상시키게 된다. 그리고 재밍(jamming) 신호와 같은 고출력을 가지는 신호가 수신단으로 들어오게 될 경우, 수신단 전체가 포화되어 오작동을 유발시킬 확률이 높아진다. 그렇기 때문에 저잡음 증폭기를 고출력 신호로부터 보호하기 위하여 PIN 다이오드를 이용한 입력 보호 회로, 리미터가 필요하게 된다<sup>[1]</sup>.

저잡음 증폭기 앞에 이런 리미터 회로가 추가되면 수신단 전체의 잡음지수에 영향을 미치고, 잡음성능을 저하시키는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 최근 GaN HEMT(Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor) 소자를 이용한 저잡음 증폭기 설계 및 제작에 관심이 많아지고 있다. GaN 소자는 GaAs 소자에 비해서 높은 에너지 밴드갭 특성, 높은 항복 전압 그리고 광대역 및 높은 주파수에서 고출력 특성을 지니고 있다<sup>[2]</sup>. 그리하여 GaN HEMT 기반 저잡음 증폭기는 높은 입력 전력에 대해서 성능 저하 없이 잘 견딜 수 있으며, 수신기 맨 앞단에 저잡음 증폭기 보호를 위한 리미터 회로가 추가적으로 필요하지 않아, 결과적으로 수신단 전체의 잡음지수와 가격, 부피 측면에서 장점을 지니게 된다.

레이더 수신기에서 저잡음 증폭기에 과도한 입력 전력이 인가되고, 그로 인한 출력 전력으로부터 저잡음 증폭기 뒤에 오는 수동소자들을 보호하기 위하여 저잡음 증폭기의 드레인 전류를 제한함으로써 출력 전력을 제한할 필요가 있다<sup>[3]</sup>. 일반적인 수동소자들이 견딜 수 있는 최대 전력은 15~20 dBm 정도이다. 드레인 전류 제한은 레귤레이터를 사용하여 정전류원으로 동작하도록 회로를 구성하여 구현하였다.

## II. 회로 설계 및 제작

저잡음 증폭기 설계를 위하여 본 논문에서는 Cree社에서 제공되는 6 W 베어 칩 CGHV1J006 소자를 사용하였다. 저잡음 증폭기 용으로 개발된 것이 아닌 전력 증폭기 용으로 개발된 것이기 때문에 데이터 시트에는 잡음지수가 제공되어 있지 않다. 그래서 Cree社에서 제공된 비선형 모델을 사용하여 ADS 시뮬레이션 코드를 통해 이 소자의 잡음지수를 파악하였다.

설계 주파수는 3~3.5 GHz이고, ADS 시뮬레이션 코드를 사용하여 잡음원과 이득원을 통해 확인해 본 이득과 잡음지수 그리고 이 때의 임피던스를 그림 1에 나타내었다.

잡음원과 이득원을 통해 선택한 임피던스를 토대로 입력 및 출력 정합회로를 설계한다. 그리고 소자와 입력 및 출력 정합회로간의 와이어 본딩 효과를 3-D 전자기장 시뮬레이션 코드인 HFSS를 사용하여 모델링 후 S-파라미터를 추출하여 ADS 시뮬레이션 코드에 적용하여 시뮬레이션의 정확도를 향상시켰다. 그림 2는 HFSS를 통해 모델링한 와이어 본딩 구조를 나타내고 있다.

위에서 고려한 와이어 본딩 효과와 설계한 입력 및 출력 정합회로를 모두 포함하여 저잡음 증폭기의 회로도도 제작된 사진을 그림 3에 나타내었다.

그림 4에 저잡음 증폭기의 시뮬레이션 결과와 측정결과를 함께 나타내었다. 시뮬레이션은 Agilent社 ADS(Ad-

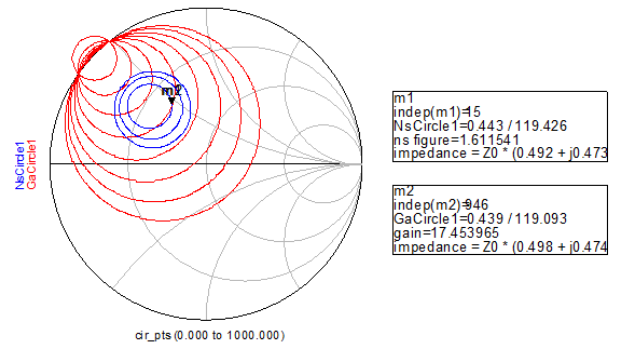


그림 1. 이득원과 잡음원  
Fig. 1. Gain circle and noise circle.

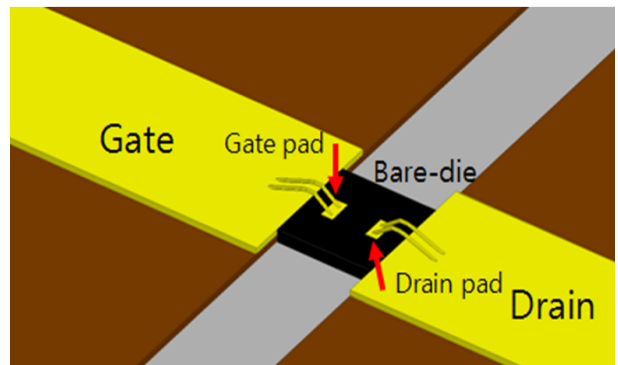


그림 2. HFSS를 사용한 와이어 본딩 모델링  
Fig. 2. Wire bonding modeling using HFSS.

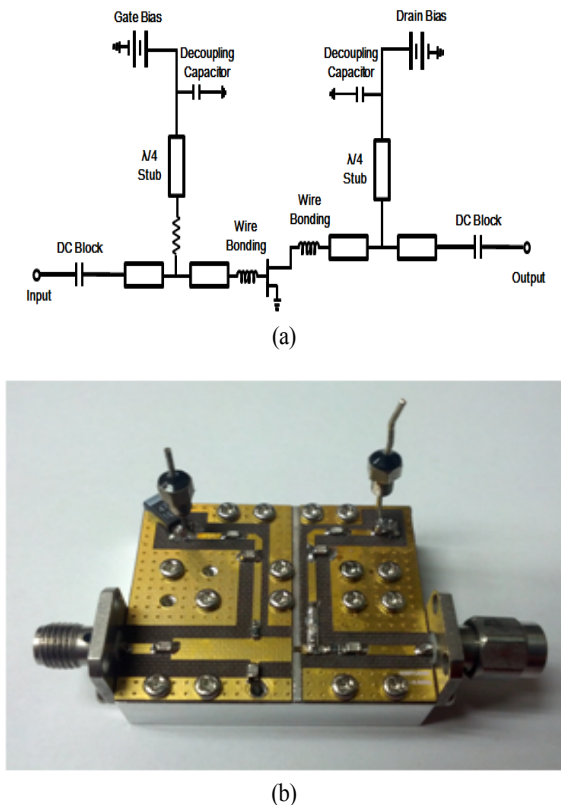


그림 3. (a) CGHV1J006 저잡음 증폭기 회로도, (b) CGHV1J006 저잡음 증폭기 제작 사진  
 Fig. 3. (a) Circuit of CGHV1J006 low noise amplifier, (b) Photograph of the manufactured CGHV1J006 low noise amplifier.

vanced Design System) 시뮬레이션 코드를 사용하였고, 측정은 Agilent社 잡음계측기 N8975A를 사용하여 이득과 잡음지수를 측정하였다. 그리고 HP 네트워크 분석기 8510C를 사용해서 저잡음 증폭기의 입력 반사손실을 측정하였다.

저잡음 증폭기는 게이트 전압  $-2.3\text{ V}$ , 드레인 전압  $40\text{ V}$ 로 동작되고, 이득은  $13\text{ dB}$ , 잡음지수는  $2\text{ dB}$  이하이고 입력 반사손실은  $-7\text{ dB}$  이하의 실험결과를 얻었다.

저잡음 증폭기의 강인성 측정은 구동 증폭기를 사용하여 입력 전력을 소자가 변이될 때까지 인가하였고, 펄스 폭  $10\text{ }\mu\text{s}$ ,  $10\%$  듀티로 진행하였다. 강인성을 측정된 결과는 그림 5에 나타내었다.

측정 결과로는 약  $43\text{ dBm}$ 의 입력전력이 저잡음 증폭기

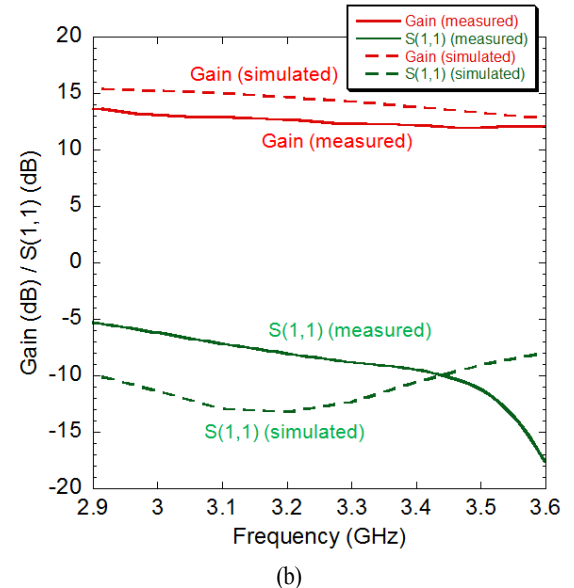
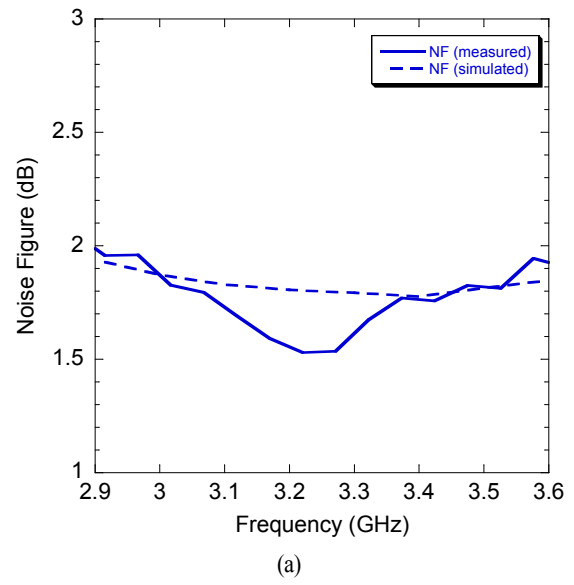


그림 4. (a) 저잡음 증폭기 잡음 지수, (b) 저잡음 증폭기 이득과 입력 반사 손실  
 Fig. 4. (a) Noise figure of LNA, (b) Gain and input return loss of LNA.

로 인가되고, 피크 게이트 전류가 약  $175\text{ mA}$ 에서 소자가 변이되었다. 실험결과로  $6\text{ W}$  Cree社 베어 칩 소자는 약  $43\text{ dBm}$ 의 최대 입력 전력을 가짐을 알 수 있었다.

그림 6은 CGHV1J006 저잡음 증폭기의 선형성을 알아보기 위하여 시뮬레이션 결과를 바탕으로 한  $1\text{ dB}$ 를 나

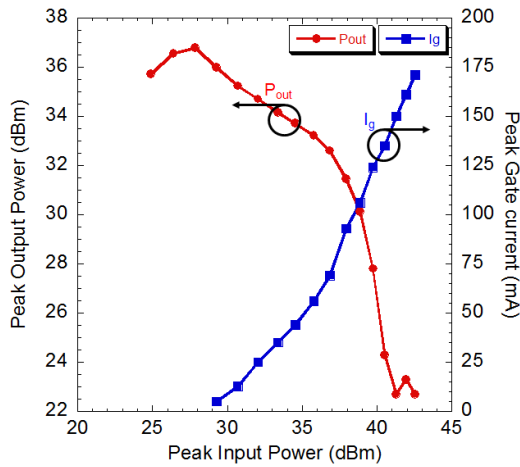


그림 5. CGHV1J006 저잡음 증폭기 강인성 측정  
Fig. 5. The measurement of robustness.

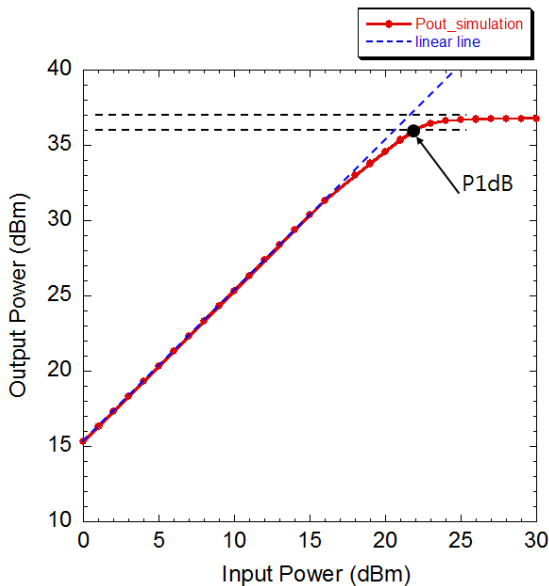


그림 6. CGHV1J006 저잡음 증폭기 P1dB 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. P1dB simulation result of CGHV1J006 LNA.

타내고 있다. P1dB는 증폭기가 최대로 이용 가능한 선형 출력 전력점으로써 시뮬레이션 결과 P1dB는 36 dBm을 보이고 있다.

### Ⅲ. 전류 제한 모드 저잡음 증폭기

앞에서도 언급했듯이, 레이더 수신기에서 저잡음 증폭

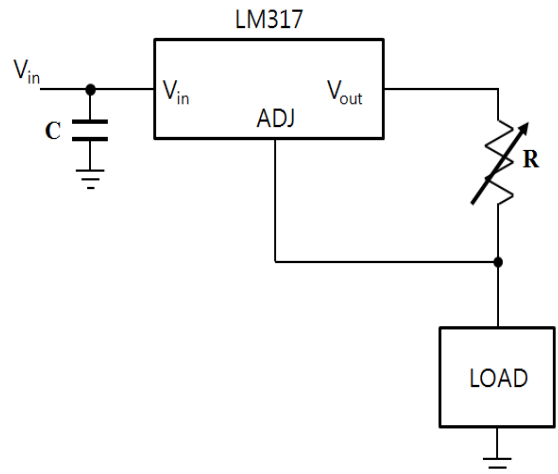


그림 7. LM317을 사용한 정전류원 회로도  
Fig. 7. Current source circuit using LM317.

기 뒤에 오는 수동 소자들은 과입력 전력으로부터 보호되어야 하고, 이는 저잡음 증폭기의 출력 전력을 제한함으로써 가능하다. 저잡음 증폭기의 출력 전력은 저잡음 증폭기의 드레인 전류를 제한함으로써 출력 전력을 제한할 수 있다. 저잡음 증폭기의 드레인 전류를 제한하기 위하여 드레인단에 일정한 전류원이 공급되어야 하고, 이는 레귤레이터를 사용한 정전류원 회로를 구성함으로써 구현이 가능하다. 사용된 레귤레이터는 LM317 모델이고 최대출력 전압은 40 V, 최대 출력 전류는 1.5 A이다. 정전류원 회로도에는 그림 7에 나타내었다<sup>4)</sup>.

드레인 전류를 각각 43 mA, 65 mA, 90 mA로 제한하였고, 실험은 CW로 진행하였다. 각각 제한된 전류에서의 제한된 출력 전력은 13 dBm, 17 dBm 그리고 20 dBm으로 제한되었다. 그림 8은 실험결과를 나타내고 있다.

드레인 전류를 제한한 상태, 즉 저잡음 증폭기의 출력 전력을 제한한 상태에서 강인성을 측정해 보았다. 실험 결과는 입력 전력을 약 45.4 dBm 인가하였을 때에도 소자가 번아웃되지 않고 강인성이 보장되었다. 출력 전력은 21 dBm 이하로 제한되었고, 피크 게이트 전류 역시 148 mA 이상 흐르지 않는다는 것 또한, 알게 되었다. 이 실험으로부터 드레인 전류를 제한함으로써 출력 전력을 제한하고, 그로 인해 게이트 전류 역시 제한됨으로써 과입력 전력에 대한 저잡음 증폭기의 강인성이 전류 제한

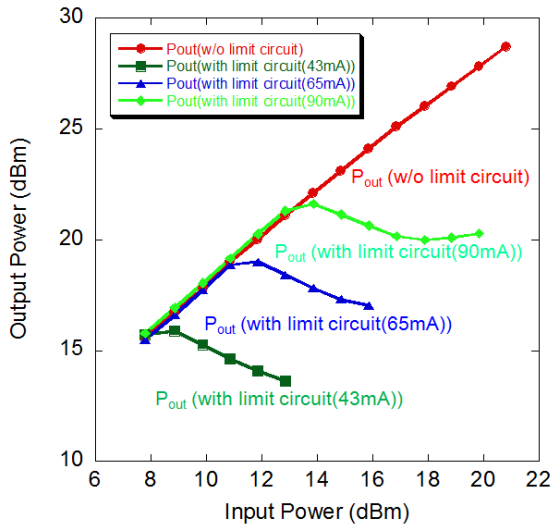


그림 8. 전류 제한 모드로 측정된 저잡음 증폭기 출력 전력  
Fig. 8. The measured output power of the LNA in current limiting mode.

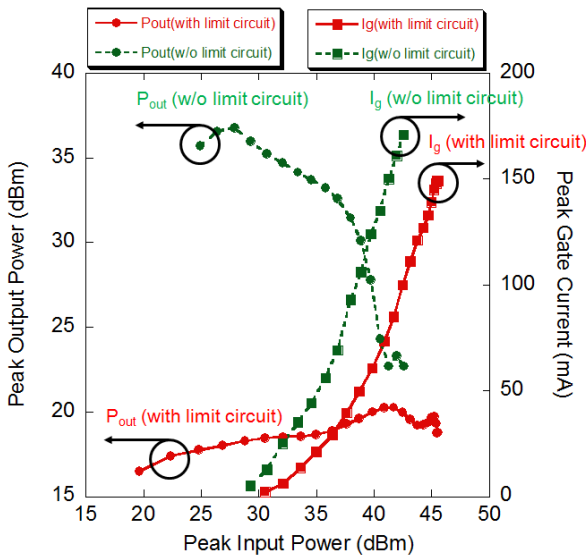


그림 9. 전류 제한 모드로 동작한 저잡음 증폭기 강인성 측정  
Fig. 9. The measurement of robustness for LNA in current limiting mode.

모드로 동작될 경우, 그렇지 않은 경우보다 향상된다는 것을 알 수 있다. 그림 9는 전류 제한 모드로 동작했을 경우와 그렇지 않을 경우 강인성 측정 결과를 비교한 것이다.

RFHIC社에서 MMIC 형태로 상용화된 리미터를 포함한 GaAs 기반 저잡음 증폭기 CL3102D-L의 경우, 2.7~3.5 GHz에서 이득이 11.5 dB, 잡음 지수는 1.5 dB이고, 최대 입력 전력은 30 dBm로 명시되어 있다<sup>[5]</sup>. 이와 비교해 본 논문에서 제시한 GaN HEMT 소자를 사용한 저잡음 증폭기의 경우 이득과 잡음 지수는 비슷하지만, 강인성이 Ga-As 기반 저잡음 증폭기에 비해 뛰어난 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기존에 레이더 시스템에 사용되던 Ga-As 기반 저잡음 증폭기의 강인성을 향상시키고 리미터를 필요로 하지 않게 됨에 따라 시스템 전체의 잡음지수를 낮출 목적으로 Cree社에서 제작된 GaN HEMT 기반 6W CGHV1J006 소자를 사용하여 저잡음 증폭기를 설계 및 제작 측정을 진행하였다. 설계 주파수 대역은 3~3.5 GHz 이고, 이득은 13 dB, 잡음지수 1.5 dB 그리고 입력 반사손실은 -7 dB 이하가 되는 것을 확인하였다. 그리고 전류 제한 모드로 저잡음 증폭기를 동작시킴으로써 출력 전력을 제한하였고, 이 때 저잡음 증폭기의 강인성은 입력 전력 45.4 dBm까지 보장되는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

#### References

- [1] Seong-Sik Yang, Tak-Young Kim, Deok-Kyu Kong, So-Su Kim, and Kyung-Wan Yeom, "A novel analysis of a Ku-band planar P-I-N diode limiter", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 6, pp. 1447-1460, Jun. 2009.
- [2] U. Mishra, S. Likun, T. Kazior, and Y. -F. Wu, "GaN-based RF power devices and amplifiers", *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 2, pp. 287-305, Feb. 2008.
- [3] Ulf Schmid, Rolf Reber, Patrick Schuh, and Martin Oppermann, "Robust wideband LNA design", *Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Microwave Integrated Circuits Conference*, pp. 186-189, Oct 2014.
- [4] STmicroelectronics Datasheet, "LM317 adjustable volta-

ge regulators", available at: [www.st.com](http://www.st.com)  
[5] RFHIC Datasheet, "This LNA family is a high gain,

ultra low noise amplifier CL3102D-L", available: [www.rfhic.com](http://www.rfhic.com)

김 홍 희



2013년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)  
2013년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)  
[주 관심분야] RF 회로 설계, 고출력 증폭기, 마그네트론 등

최 길 응



2002년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)  
2006년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)  
2011년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)  
2011년 3월~현재: 삼성탈레스 ISR·PGM 연구소 전문연구원

[주 관심분야] RF 회로 설계, 능동 위상 배열 시스템 등

김 상 훈



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

김 형 주



1989년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)  
1992년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)  
1989년 3월~1998년 2월: 삼성전자 연구원  
1998년 3월~2006년 2월: Radionix 이사

2006년 3월~2008년 12월: M&M Lynx 수석연구원  
2009년 1월~현재: 삼성탈레스 ISR·PGM 연구소 수석연구원  
[주 관심분야] 안테나, RF 시스템, 레이더 시스템 등

최 진 주



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] Passive and Active Solid State Devices, High Power Vacuum Electronics, Microwave Power Module, Phased Array Rrdar System