

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.6.149
JIIBC 2022-6-22

Ka-대역 GaN 저잡음 증폭기의 강건성 평가

Robustness Evaluation of GaN Low-Noise Amplifier in Ka-band

이동주*, 안세환*, 주지한*, 권준범*, 김영훈**, 이상훈**, 서미희***, 김소수***

Dongju Lee*, Se-Hwan An*, Ji-Han Joo*, Jun-Beom Kwon*,
Younghoon Kim**, Sanghun Lee**, Mihui Seo***, Sosu Kim***

요약 GaN 소자는 고출력 및 고선형성 특성을 가지므로 레이더 수신기에서 저잡음 증폭기로 활용되어 리미터 없이 구현될 수 있으며, 이로 인해 잡음지수를 개선하고 면적을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 Ka-대역 레이더용 수신기에 적용하기 위한 GaN 저잡음 증폭기를 기술하였다. 설계된 저잡음 증폭기는 150-nm GaN HEMT 공정으로 제작되었으며, 목표주파수 내에서 패키징 손실을 포함하여 >23 dB 이득, <6.5 dB의 잡음지수 특성을 보였다. 고입력 부하시험시 이득 및 잡음 저하가 있었으나, 반복시험시 추가적인 성능저하는 나타나지 않았다. 부하시험 후 잡음지수 및 S-파라미터 측정을 통해 GaN 저잡음 증폭기에서 ~40 dBm 펄스 입력 전력을 견딜 수 있음을 확인하였다.

Abstract Due to high power capabilities and high linearity of GaN devices, GaN Low-Noise Amplifiers (LNAs) without a limiter can be implemented in order to improve noise figure and reduce chip area in radar receivers. In this paper, a GaN LNA is presented for Ka-band radar receivers. The designed LNA was realized in a 150-nm GaN HEMT process and measurement results show that the voltage gain of >23 dB and the noise figure of <6.5 dB including packaging loss in the target frequency range. Under the high-power stress test, measured gain and noise figure of the GaN LNA is degraded after the first stress test, but no more degradation is observed under multiple stress tests. Through post-stress noise and s-parameter measurements, we verified that the GaN LNA is resilient to pulsed input power of ~40 dBm.

Key Words : GaN, HEMT, low-noise amplifier, MMIC, noise figure, robustness, survivability, Ka-band

1. 서론

RF 수신기의 입력단에 위치한 저잡음 증폭기 (Low-Noise Amplifier)는 잡음을 최소화하며 입력신호를 증폭하는 역할을 수행하므로 원하지 않는 큰 신호가

들어왔을때도 손상을 입지 않고 견딜 수 있어야 한다. 저전력 용도로 CMOS 방식의 저잡음 증폭기^[1]가 적용될 수 있으나, 고전력 용도에서 송수신 경로의 격리도가 높지 않을 경우 송신기의 누설 신호가 수신기의 입력단으로 누설되어 수신기를 포화시키거나 영구적인 손상을 입

*정회원, LIG넥스원(주)

**정회원, 웨이브피아

***정회원, 국방과학연구소

접수일자 2022년 8월 19일, 수정완료 2022년 11월 19일
게재확정일자 2022년 12월 9일

Received: 19 August, 2022 / Revised: 19 November, 2022 /

Accepted: 9 December, 2022

*Corresponding Author: dongju.lee@lignex1.com

Dept of RF Seeker R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

힐 수 있으므로 적절한 보호방안이 강구되어야 한다.

GaN 소자는 GaAs 소자보다 더 높은 breakdown 전압을 가지며 큰 전력을 다룰 수 있으므로 전력 증폭기^[2-4] 뿐만 아니라 저잡음 증폭기에도 적용될 수 있으며, 입력 단에서 리미터를 제거할 수 있어 잡음지수를 개선하고 면적을 줄일 수 있다^[5].

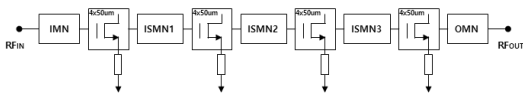
GaN 저잡음 증폭기가 견딜 수 있는 최대 입력은 CW 기준 33~37 dBm 수준^[6]으로 알려져 있으나, 입력 신호 방식 (CW 혹은 펄스), GaN 소자의 breakdown 특성 및 저잡음 증폭기의 topology 등에 의해 달라질 수 있다. Ka-대역 (26.5~40 GHz) 에서는 GaN HEMT 공정을 활용한 저잡음 증폭기 구조들이 제안되었으며^[6-7], 부하시험을 통해 각각 33 dBm@10 GHz CW 입력 전력^[6] 및 30 dBm@27 GHz CW 입력 전력^[7] 인가시 강건성을 확인하였다.

본 논문에서는 150-nm GaN HEMT 공정으로 제작된 Ka-대역 저잡음 증폭기를 기술하였고, ~40 dBm 펄스 입력을 인가한 부하시험 수행 전후 성능변화를 비교하여 저잡음 증폭기의 강건성을 평가하였다.

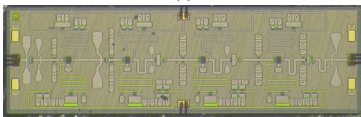
II. 저잡음증폭기 제작

1. 저잡음 증폭기 MMIC

그림 1(a)는 개발된 Ka-대역 저잡음 증폭기 MMIC의 구조를 나타낸다. Win Semiconductor 150-nm GaN-on-SiC 공정을 활용하여 제작되었으며, 잡음지수 특성이 좋은 4x50 μm Coplanar Waveguide 트랜지스터를 적용하였다.



(a)



(b)

그림 1. Ka-대역 저잡음 증폭기 MMIC (a) 구조 (b) 사진
Fig. 1. Ka-band LNA MMIC (a) structure (b) photograph

Ka-대역에서 >20 dB 이득을 달성하기 위해 4-stage 다단구조를 채택하였으며, 정합회로는 3개의 ISMN(단간 정합 네트워크), 1개의 IMN(입력 정합 네트워크) 및 1개의 OMN(출력 정합 네트워크)을 포함한다. 저잡음 증폭

기에서 좋은 입력 정합특성과 저잡음 특성을 동시에 만족하기 위해 Inductive Source Feedback을 전송선로 방식으로 모든 트랜지스터에 적용하였다.

송신기의 누설신호가 저잡음 증폭기의 입력단에 인가될 때의 시나리오는 다음과 같다. 게이트 바이어스 전압 (Vg)은 음수 값이므로, 게이트 누설전류(Ig)가 흐르는 만큼 전압강하가 발생하여 트랜지스터에 입력된다. 입력 전력이 증가할 경우 첨두전압이 음수로 더 떨어지므로 그만큼 Ig가 증가하여 트랜지스터에 부하가 더 가해지게 된다^[5]. 해당 부하를 경감시키기 위해서 게이트 바이어스 경로에 직렬로 수 k Ω 의 피드백 저항 (Rg)을 삽입하여 Ig를 억제할 수 있으며, 1 k Ω 에서 8 k Ω 으로 값을 증가시키면 약 10 dBm 더 큰 입력 전력에서도 저잡음 증폭기가 견딜 수 있다^[6].

제작된 저잡음 증폭기 MMIC의 형상을 그림 1(b)에 제시하였다. 크기는 4340x1200 μm 이며, 각 단별 게이트 바이어스 및 드레인 바이어스를 칩 내에서 각각 묶어서 모듈 제작시 바이어스 회로 구성을 단순화하였다.

2. 저잡음 증폭기 모듈

고입력 부하시험을 위해 별도의 저잡음 증폭기 모듈을 그림 2와 같이 제작하였고 모듈의 입출력 경로의 손실, 즉 2.92 mm 커넥터, 50 Ω 전송선 및 MMIC의 bonding wire - thru line - bonding wire 순으로 패턴을 연결한 후 커넥터를 통해 S-파라미터를 측정하였다. 측정된 삽입손실은 그림 3과 같이 Ka-대역 목표주파수 내에서 입출력 경로를 포함하여 3.65~3.9 dB 이므로, 입력 경로만 고려시 절반의 손실인 1.825~1.95 dB 만큼 잡음 지수에 포함됨을 알 수 있다. 이는 MMIC의 손실을 제외하고 커넥터, 50 Ω 전송선, bonding wire 손실만 고려한 것이다.

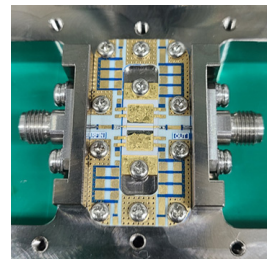


그림 2. 제작된 Ka-대역 저잡음 증폭기 모듈
Fig. 2. Fabricated Ka-band LNA module

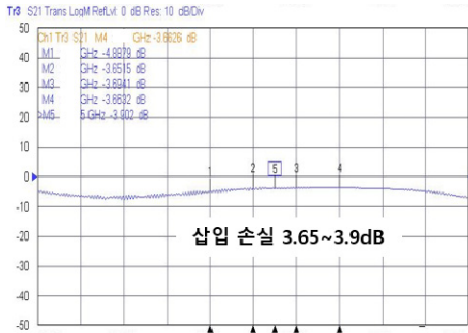


그림 3. 저잡음 증폭기 모듈의 삽입손실 측정 결과
 Fig. 3. Measured Insertion loss of LNA module

III. 측정 결과

저잡음 증폭기 모듈의 잡음지수 측정 셋업을 그림 4에 제시하였다. Ka-대역 노이즈 소스를 활용하여 calibration을 수행 후 모듈에 바이어스를 인가하고 스펙트럼 분석기를 통해 이득 및 잡음지수를 확인하였다.

고입력 부하시험을 수행하기 위해서 그림 5와 같이 신호 생성기 입력을 받아 증폭시켜주는 10 W급 증폭기를 사용하였으며, 저잡음 증폭기 모듈의 출력 신호가 20 dBm 이상이므로 스펙트럼 분석기 보호를 위해 Ka-대역 감쇄기를 연결하여 출력을 관찰하였다. 이 때 인가한 Ka-대역 입력 신호의 크기는 MMIC 입력 기준으로 38 ~40 dBm 이며, duty-cycle은 40 % 이다. 고입력 부하시험을 진행하기 전 소신호 특성이 정상임을 확인 후 입력 신호를 10초간 유지하여 부하시험을 수행한 후 출력 파형이 깨짐이 없는지 관찰하였다. 부하시험 진행 중 시료의 손상을 고려하여 38 dBm 부터 입력 신호를 조금씩 증가시키며 부하시험을 반복하였다.

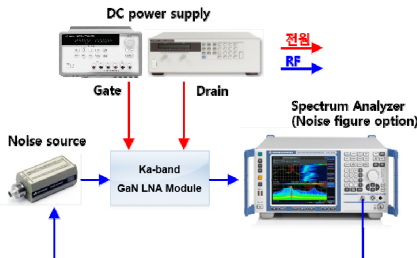


그림 4. 저잡음 증폭기 잡음지수 측정 셋업
 Fig. 4. Noise figure measurement setup for LNA

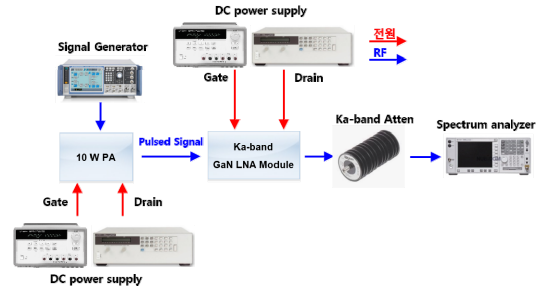
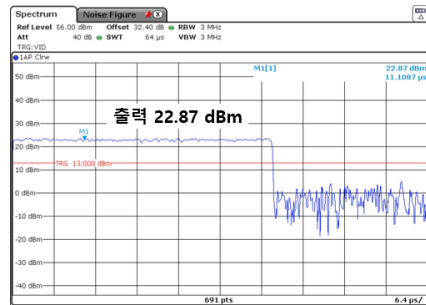
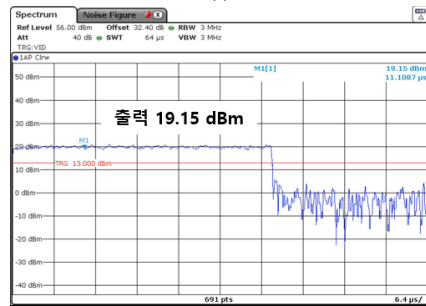


그림 5. 저잡음 증폭기 고입력 부하시험 셋업
 Fig. 5. High input power stress test setup for LNA

그림 6은 부하시험 시 출력 레벨 측정결과를 나타낸다. 38 dBm 펄스 입력 인가시 출력 레벨 22.98 dBm, 부하시험 종료 후 0 dBm 인가시 출력 레벨 20.83 dBm 으로 정상 출력되었으며, 펄스 입력을 40 dBm 까지 증가시켜도 출력 레벨 22.87 dBm, 0 dBm 인가시 19.15 dBm 으로 약 1.68 dB 가량 출력 저하가 나타나기는 하지만 파형 깨짐 없이 정상 동작함을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 6. 부하시험 시 출력 레벨 측정 결과
 (a) 40 dBm 펄스 입력시 (b) 시험 후 0 dBm 펄스 입력시

Fig. 6. Measured output power during stress test
 (a) 40 dBm pulsed input (b) 0 dBm pulsed input after test

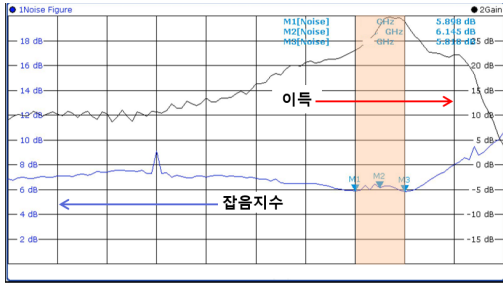


그림 7. 부하시험 전 소신호 이득 및 잡음지수 측정 결과
Fig. 7. Measured noise figure and gain before stress test

그림 7은 부하시험 전 소신호 이득 및 잡음지수 측정 결과이다. Ka-대역 f_L , f_C , f_H 주파수에서 이득값은 각각 23.03, 27.91, 28.91 dB 이며, 잡음지수는 각각 5.9, 6.14, 5.82 dB로 측정되었다.

고입력 부하시험 전 저잡음 증폭기의 드레인 전류 (I_{dq})는 100 mA 이나, 부하시험 후 80 mA 로 하락하여 그림 8, 9와 같이 잡음지수 증가 및 이득 감소를 확인하였다. 이는 부하가 걸릴 경우 일부 채널 전자들이 인근 layer로 침투하는 hot carrier effect로 인해 threshold voltage가 증가하여^[7] 소모전류가 줄어들어 이득이 감소한 것으로 판단된다. 최초 성능 저하 후 반복하여 부하시험시 추가 성능변화는 없었으며, 감소된 이득을 보상하기 위해 게이트 바이어스를 증가시켜 I_{dq} 값을 120 mA 로 맞추고 측정한 잡음지수 및 이득의 성능변화를 그림 8, 9에서 각각 비교하였다. 잡음지수의 경우 목표주파수에서 약 0.1~0.3 dB 정도 보상이었으며, 이득값은 pre-test 결과와 동등 수준으로 보상을 할 수 있었다.

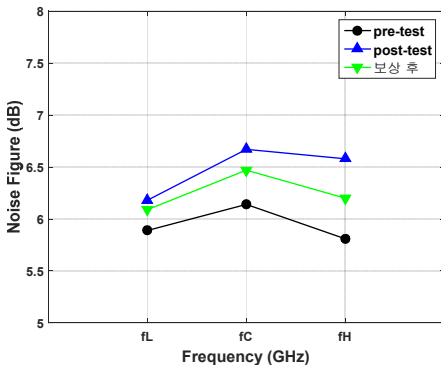


그림 8. 부하시험 시 잡음지수 측정 결과
Fig. 8. Measured noise figure during stress test

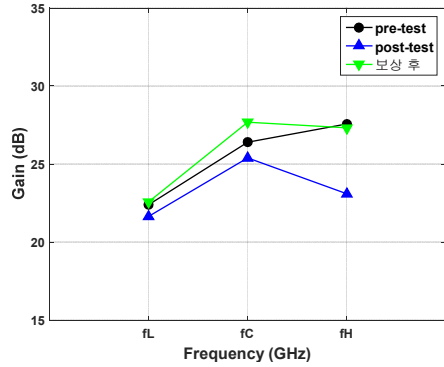


그림 9. 부하시험 시 이득 측정 결과
Fig. 9. Measured gain during stress test

IV. 결론

본 논문에서는 150-nm GaN HEMT 공정을 활용하여 Ka-대역 저잡음 증폭기를 제작하였다. 리미터 없이 GaN 저잡음 증폭기를 수신기 전단에 적용하여 잡음지수를 개선하고 모듈의 소형화를 목표로 하였다. 고입력 부하시험 시 잡음지수가 증가하고 이득이 감소하였지만 게이트 바이어스를 조절하여 성능을 보상을 할 수 있으며, 반복시험시 저잡음 증폭기가 정상 동작함을 확인하였다. 본 연구를 통해 확보한 GaN 저잡음 증폭기를 Ka-대역 레이더 시스템의 수신기 모듈에 적용 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] Seok-Ho Noh, Jee-Youl Ryu, "Development of a Low-Power 24GHz Low Noise Amplifier", The Journal of KIIT, Vol. 18, No. 8, pp. 51-56, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14801/jkiit.2020.18.8.51>
- [2] Ju-Heun Lee, Hyo-Chul Kim, Heung-Rae Cho, Deok-Jae Lee, Se-Hwan An, Man-Hee Lee, Ji-Han Joo, and Hong-Rak Kim, "Design and fabrication of Ka-band 100W SSPA using spatial combiner", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC), Vol. 22, No. 1, pp. 35-43, 2022. DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.1.35>
- [3] Hong-Gu Ji, "GaN HPA Monolithic Microwave Integrated Circuit for Ka band Satellite Down link Payload", The Journal of Korea Academia- Industrial cooperation Society(KAIS), Vol. 16, No. 12, pp. 8643-8648, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8643>

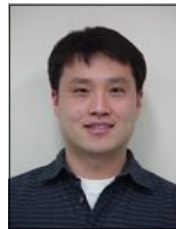
- [4] Ju-Heun Lee, Hyo-Chul Kim, Heung-Rae Cho, Deok-Jae Lee, Se-Hwan An, Man-Hee Lee, Ji-Han Joo, and Hong-Rak Kim, "Design and fabrication of 200W SSPA in Ka-band", The Journal of KIIT, Vol. 20, No. 2, pp. 79-88, 2022.
 DOI: <https://doi.org/10.14801/ikiit.2022.20.2.79>
- [5] E. M. Suijker, M. Rodenburg, J. A. Hoogland, M. van Heijningen, M. Seelmann-Eggebert, R. Quay, P. Bruckner, and F. E. van Vliet, "Robust AlGaIn/GaN Low Noise Amplifier MMICs for C-, Ku- and Ka-band Space Applications," Annual IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, pp. 1-4, 2009.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/csics.2009.5315640>
- [6] M. Rudolph, N. Chaturvedi, K. Hirche, J. Wurfl, W. Heinrich, and G. Trankle, "Highly Rugged 30 GHz GaN Low-Noise Amplifiers," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 19, No. 4, pp. 251-253, 2009.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2009.2015514>
- [7] X. Tong, R. Wang, S. Zhang, J. Xu, P. Zheng, and F. Chen, "Degradation of Ka-Band GaN LNA Under High-Input Power Stress: Experimental and Theoretical Insights," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 66, no. 12, pp. 5091-5096, Dec. 2019.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2947311>

주 지 한(정회원)



- 2002년 8월 : 충북대학교 전파공학과 (공학사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
- 2008년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야 : 레이더 시스템, 마이크로파 신호처리

권 준 범(정회원)



- 1997년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
- 1999년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원

<주 관심분야 : 레이더 시스템, 마이크로파 신호처리>

김 영 훈(정회원)



- 2005년 2월 : 경남대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2007년 8월 : 경남대학교 정보통신공학과 (공학석사)
- 2007년 5월 ~ 2019년 4월 : ㈜피플웍스 Mil.사업부 수석연구원
- 2019년 5월 ~ 현재 : ㈜웨이브피아 연구소 상무이사

• 주 관심분야 : GaN Transistor 및 MMIC

이 상 훈(정회원)



- 2002년 2월 : 광운대학교 전자공학과 (공학사)
- 2004년 2월 : 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2012년 8월 : Texas A&M University(공학박사)
- 2012년 6월 ~ 2014년 9월 : 삼성전자 반도체 부문 연구원

• 2014년 9월 ~ 현재 : ㈜웨이브피아 대표이사, CTO
 • 주 관심분야 : GaN Transistor 및 MMIC, CMOS IC

저 자 소 개

이 동 주(정회원)



- 2005년 8월 : 충남대학교 전자공학과 (공학사)
- 2008년 2월 : 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 (공학석사)
- 2016년 8월 : 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 (공학박사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 선임연구원

• 주 관심분야 : mm-Wave MMIC 및 시스템 설계

안 세 환(정회원)



- 2004년 2월 : 숭실대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 숭실대학교 정보통신공학과 (공학석사)
- 2007년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원

• 주 관심분야 : 초고주파 회로 설계, 마이크로파 송수신기

서 미 희(정회원)



- 2006년 2월 : 고려대학교 물리학과(이학사)
- 2013년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
- 2013년 3월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원

• 주 관심분야 : 초고주파 레이더 송수신기

김 소 수(정회원)



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
- 1996년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원

• 주 관심분야 : 초고주파 레이더 시스템