

X-대역 응용을 위한 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC

GaN-based Low Noise Amplifier MMIC for X-band Applications

임 병 옥*, 고 주 석*, 김 성 찬***

Byeong-Ok Lim*, Joo-Seoc Go*, and Sung-Chan Kim***

Abstract

In this paper, we report the design and the measurement of a X-band low noise amplifier (LNA) monolithic microwave integrated circuit (MMIC) using a 0.25 μm gate length microstrip GaN-on-SiC high electron mobility transistor (HEMT) technology. The developed X-band GaN-based LNA MMIC achieves small signal gain of 22.75 dB ~ 25.14 dB and noise figure of 1.84 dB ~ 1.94 dB in the desired band of 9 GHz to 10 GHz. Input and output return loss values are -11.36 dB ~ -24.49 dB and -11.11 dB ~ -17.68 dB, respectively. The LNA MMIC can withstand 40 dBm (10 W) input power without performance degradation. The chip dimensions are 3.67 mm \times 1.15 mm. The developed GaN-based LNA MMIC is applicable to various X-band applications.

요 약

본 논문에서는 0.25 μm 게이트 길이를 갖는 GaN HEMT 기술을 사용하여 개발한 X-대역 저잡음 증폭기 MMIC의 특성을 기술한다. 개발된 GaN 기반 X-대역 저잡음 증폭기 MMIC는 9 GHz ~ 10 GHz의 동작 주파수 대역에서 22.75 dB ~ 25.14 dB의 소신호 이득과 1.84 dB ~ 1.94 dB의 잡음지수 특성을 나타내었다. 입력 반사 손실 특성과 출력 반사 손실 특성은 각각 -11.36 dB ~ -24.49 dB, -11.11 dB ~ -17.68 dB를 얻었으며 40 dBm (10 W)의 입력 전력에 성능 열화 없이 정상적으로 동작하였다. MMIC의 크기는 3.67 mm \times 1.15 mm이다. 개발된 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC는 X-대역의 다양한 응용에 적용 가능하다.

Key words : Low noise amplifier, MMIC, GaN, HEMT, X-band

1. 서론

GaN(gallium nitride) 기반 MMIC(monolithic microwave integrated circuit)는 Si 혹은 GaAs (gallium arsenide) 기반 MMIC와 비교하여 넓은 에너지 밴드갭과 고온 안정성 등 재료적 특성으로 인하여 산업용 전력망, 정보통신 분야의 고출력 전력 증폭기 MMIC 응용에

주로 활용되었으나, 최근에는 방위산업 및 항공우주 분야의 저잡음 증폭기 MMIC 응용에서도 관련 연구들이 다양하게 수행되고 있다[1-4].

GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC는 고출력 및 고선형성 특성에 기인하여 우수한 전력 효율과 넓은 대역폭을 제공한다. 또한 높은 입력 전력이 인가된 상태에서도 안정적인 동작이 가능하므로 리미터 회로가 필요하지 않다

* R&D Division, Electronic Device Solution Inc., Daejeon 34127, Korea

*** Department of Electronic Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, Korea

E-mail : sckim@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-821-1130

※ Acknowledgment

This study was financially supported by Hanbat National University Financial Accounting Research Fund, in 2022. Manuscript received Mar 4, 2024; revised Mar 15, 2024; accepted Mar 20, 2024.

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.

는 장점을 가진다. 리미터 회로는 수신기 입력단의 의도 하지 않은 과도한 입력 전력으로부터 저잡음 증폭기를 보호하는 역할을 수행하지만, 수신단의 잡음지수 특성을 저하시키고 칩 면적을 증가시킨다. 따라서 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC는 전체 수신단의 잡음지수 특성 개선 및 수신단 모듈 소형화에 장점을 가진다. 또한 송신단과 수신단에 사용되는 MMIC 전체에 동일한 GaN 기반 소자 기술을 일괄적으로 적용할 수 있으므로 보다 더 효율적이고 소형화된 송수신기 모듈을 제작 가능하게 한다 [5-6].

본 논문에서는 GaN 기반 HEMT(high electron mobility transistor) 소자 기술을 사용하여 X-대역 시스템 응용에 활용 가능한 저잡음 증폭기 MMIC의 설계와 제작에 관한 내용을 기술한다.

II. 저잡음 증폭기 MMIC 설계

저잡음 증폭기 MMIC의 주요 개발 성능지표는 9 GHz ~ 10 GHz의 동작 주파수 범위에서 2 dB 이하의 잡음지수, 20 dB 이상의 소신호 이득과 10 dB 이하의 입력 반사 손실 특성 등을 목표로 설정하였다.

저잡음 증폭기 MMIC 설계에 사용된 GaN 기반 HEMT는 WIN Semi. Corp. NP2502 라이브러리에 기반한다. 잡음지수 특성과 소신호 이득 특성을 고려하여 선정된 단위 게이트 폭이 50 μm , 게이트 수가 4개인 GaN HEMT 소자의 주요 특성을 표 1에 요약 하였다.

Table 1. Summary of typical parameters of the 4F50 HEMT in NP2502 technology.

표 1. 4F50 HEMT 소자의 주요 특성 요약

| Parameter | Unit | Typ. value |
|-------------------------------------|---------------|------------|
| Gate length | μm | 0.25 |
| Operating voltage | V | 10 |
| Drain current | mA/mm | 100 |
| G_{MAX} (@10 GHz) | dB | 13.1 |
| NF_{min} (@10 GHz) | dB | 0.56 |
| f_T (@ $I_{\text{DS}}=100$ mA/mm) | GHz | 38.5 |

단위 GaN HEMT 소자의 소스에는 안정도를 개선하고 잡음 정합 및 이득 정합 특성을 동시에 만족시키기 위하여 인덕티브 피드백(inductive feedback)을 추가하였다. 소스 인덕티브 피드백은 소자의 안정도 확보 및 입력 반사계수와 최적 잡음 정합의 절충된 임피던스 선택

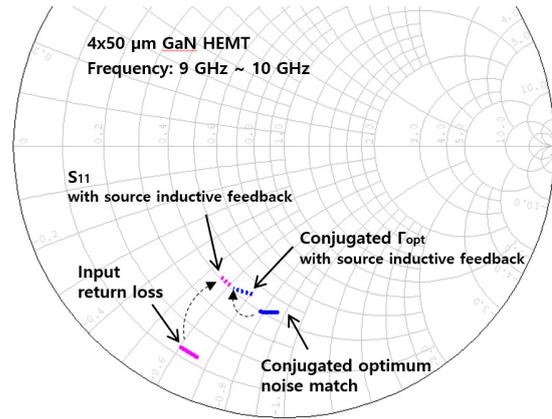


Fig. 1. Input return loss and conjugated optimum noise impedance characteristics of 4F50 μm unit GaN HEMT with and without source inductive feedback. 그림 1. 소스 인덕티브 피드백 인가에 의한 입력 임피던스와 공역 최적 잡음 임피던스 특성 변화

에 유리하지만, 최대 가용이득의 손실을 유발한다. 최대 가용이득의 손실을 고려하여 최적화된 소스 인덕티브 피드백은 0.15 nH 효과를 나타내도록 설계되었다. 그림 1에 소스 인덕티브 피드백을 추가한 후, 인덕턴스 변화에 따른 입력 반사계수 및 최적 잡음 임피던스의 궤적변화를 나타내었다. 소스 인덕티브 피드백을 추가한 후 잡음 임피던스 특성과 입력 반사계수 특성이 9 GHz ~ 10 GHz 대역에서 최대한 접근하여 최적 잡음 특성을 얻는 동시에 입력 반사계수 특성이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

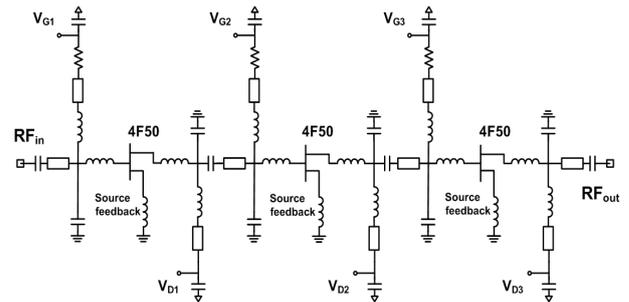


Fig. 2. Schematic diagram of the designed X-band GaN-based low noise amplifier MMIC. 그림 2. X-대역 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC의 회로도

그림 2에 X-대역에서 동작하는 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC의 회로도를 나타내었다. 설계된 저잡음 증폭기 MMIC는 이득 특성을 향상시키기 위하여 직렬 형태의 3단 공통 소스 구조로 구성되어 있고, 낮은 잡음 특성을 구현하기 위해서 각 단 HEMT 소자의 소스에 인덕티브 피드백 회로가 적용되어 있다. 설계 오차를 줄이기 위해 단위 게이트 폭이 50 μm , 게이트 수가 4개인 GaN

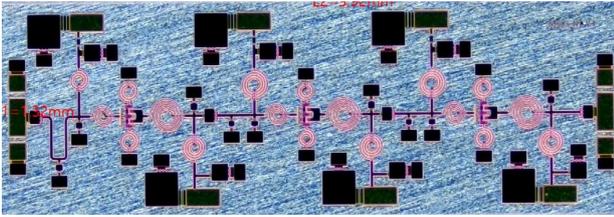


Fig. 3. Chip photograph of the fabricated X-band GaN-based low noise amplifier MMIC.

그림 3. 제작된 X-band GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC의 칩 사진

HEMT 소자의 잡음지수와 S-파라미터 측정 결과를 이용하여 저잡음 증폭기 MMIC를 설계하였다. 정합 회로 설계는 바이어스 회로를 정합 회로에 포함시켜 간단한 구조의 정합 회로가 형성되도록 하였다.

설계된 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC의 전체 회로 패턴은 NI/AWR's AXIEM 시뮬레이션을 사용하여 최적화를 수행하였다. 전자기 시뮬레이션을 통하여 최적화된 저잡음 증폭기 MMIC는 9 GHz ~ 10 GHz의 동작 주파수 대역에서 1.6 dB 이하의 잡음지수 특성과 26 dB 이상의 이득 특성을 나타내었다.

III. 저잡음 증폭기 MMIC 측정 결과

WIN Semi. Corp. standard 0.25 μm GaN HEMT 공정을 사용하여 제작된 저잡음 증폭기 MMIC의 사진을 그림 3에 나타내었다. MMIC의 크기는 3.67 mm \times 1.15 mm이다.

고입력 부하 실험을 포함하는 성능 검증을 위한 측정 치구(test fixture)를 제작하였으며 입력 단자 및 출력 단자에서의 와이어 인덕턴스(inductance)는 회로 시뮬레이션에서 미리 고려되어 설계에 반영하였다.

그림 4에 제작된 X-대역 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC의 S-parameters 측정 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타내었다. 측정은 10 V의 드레인 전압과 -2.3 V의 게이트 전압 조건 아래에서 진행되었다. 9 GHz ~ 10 GHz의 동작 주파수 대역에서 22.75 dB ~ 25.14 dB의 이득 (S_{21}) 특성, -11.36 dB ~ -24.49 dB의 입력 반사 손실 (S_{11}) 특성과 -11.11 dB ~ -17.68 dB의 출력 반사 손실 (S_{22}) 특성을 얻었다.

제작된 저잡음 증폭기 MMIC의 잡음지수 특성은 그림 5에 나타내었다. 측정결과, 9 GHz ~ 10 GHz의 동작 주파수 대역에서 1.84 dB ~ 1.94 dB의 잡음지수 특성을 얻었다.

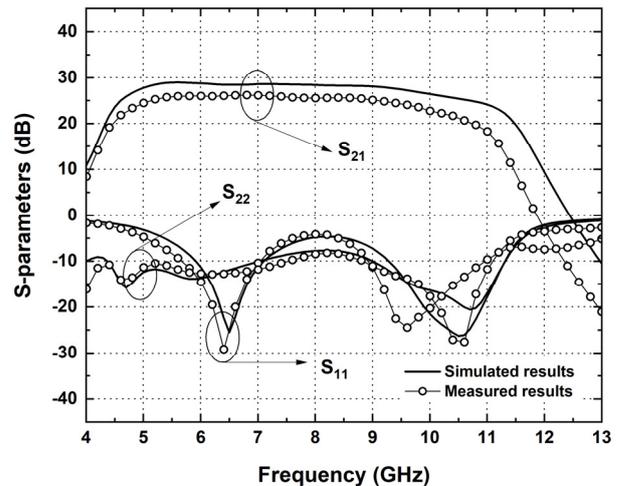


Fig. 4. Measured S-parameters characteristics of the fabricated X-band GaN-based low noise amplifier MMIC.

그림 4. 제작된 X-band GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC의 S-parameters 특성 측정 결과

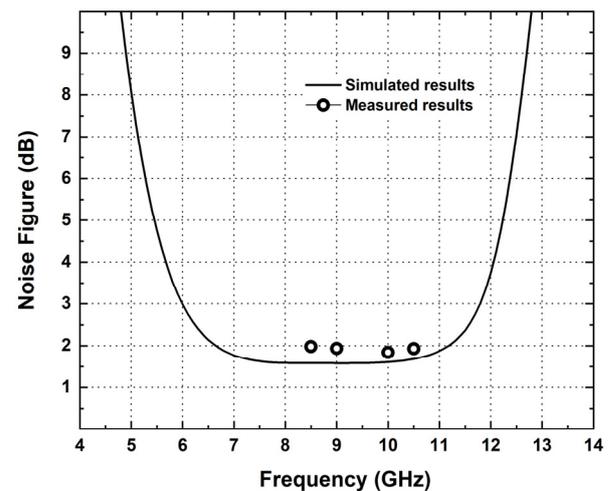


Fig. 5. Measured noise figure characteristics of the fabricated GaN-based low noise amplifier MMIC.

그림 5. 제작된 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC의 잡음지수 특성 측정 결과

저잡음 증폭기 MMIC의 고입력 부하 실험을 위해 구동 증폭기를 사용하여 소자 특성이 열화될 때까지 입력 전력을 증가하였다. 전력 특성 측정은 100 μs 의 펄스 폭 (pulse width)과 10%의 듀티 사이클(duty cycle)의 펄스 모드에서 진행되었다. 측정 결과, 40 dBm(10 W)의 입력 전력에 24 dBm의 출력 전력 특성을 나타내었으며 소자 성능의 열화없이 정상적으로 동작함을 확인하였다. 그림 6에 10 GHz 측정주파수에서 입력 전력 증가에 대한 출력 전력 특성을 나타내었다.

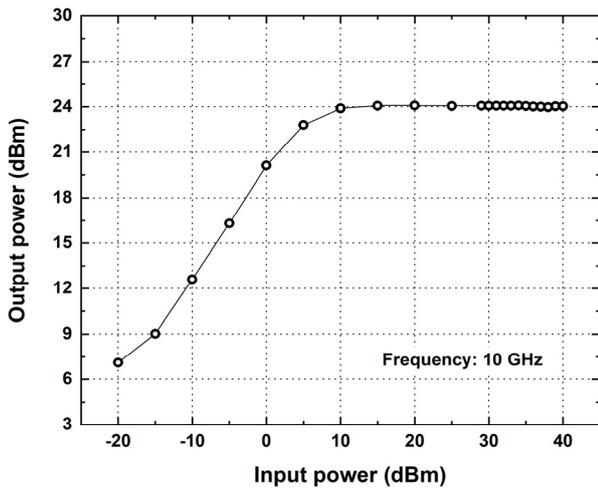


Fig. 6. Measured output power characteristics of the fabricated GaN-based low noise amplifier MMIC.

그림 6. 제작된 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC의 출력 전력 특성 측정 결과

Table 2. The comparison of the developed X-band GaN-based low noise amplifier MMIC with other reported data.

표 2. 개발된 X-band GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC의 특성 비교

| Ref. | Frequency (GHz) | Gain (dB) | NF (dB) | Pinput.max (dBm) |
|-----------|-----------------|-------------|-----------|------------------|
| [7] | 8~10 | 18 | 2.8 | 46 |
| [8] | 8~11 | 22~30 | 1.6~2.0 | 34 |
| [9] | 7~12 | 14 | 2.5 | - |
| [10] | 7~11 | 18 | 2 | 40 |
| [11] | 2~20 | 15.7 | 2.6 | 30 |
| [12] | 8~12 | 20 | 1.5 | 20 |
| This work | 9~10 | 22.75~25.14 | 1.84~1.94 | 40 |

표 2에 개발된 X-대역 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC의 측정 결과를 제시하고, 해외 상용 반도체 업체에서 개발된 0.25 μm GaN HEMT 기반의 X-대역 저잡음 증폭기 MMIC의 특성과 비교하였다. 개발된 저잡음 증폭기 MMIC는 잡음지수와 이득 특성 및 최대 입력 전력 특성을 포함하는 주요 성능지표에서 우수한 경쟁력을 나타내며 X-대역 다양한 응용에 충분히 적용 가능하다.

IV. 결론

본 논문에서는 0.25 μm 의 게이트 길이를 갖는 GaN HEMT 기술을 사용하여 개발한 X-대역 저잡음 증폭기

MMIC의 특성을 기술하였다. 개발된 GaN 기반 X-대역 저잡음 증폭기 MMIC는 9 GHz ~ 10 GHz의 동작 주파수 대역에서 22.75 dB ~ 25.14 dB의 소신호 이득과 1.84 dB ~ 1.94 dB의 잡음지수 특성을 나타내었다. 입력 반사 손실 특성과 출력 반사 손실 특성은 각각 -11.36 dB ~ -24.49 dB, -11.11 dB ~ -17.68 dB를 얻었으며 40 dBm (10 W)의 입력 전력에 성능 열화 없이 정상적으로 동작함을 확인하였다. MMIC의 크기는 3.67 mm \times 1.15 mm이다. 개발된 GaN 기반 저잡음 증폭기 MMIC는 X-대역의 다양한 응용에 충분히 적용 가능하다.

References

- [1] D. Runton, et al., "History of GaN: High-Power RF Gallium Nitride (GaN) from Infancy to Manufacturable Process and Beyond," *IEEE Microwave Magazine*, vol.14, no.3, pp.82-466, 2013. DOI: 10.1109/MMM.2013.2240853
- [2] S. Colangeli, et al., "GaN-Based Robust Low-Noise Amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.60, no.10, pp.3238-3248, 2013. DOI: 10.1109/TED.2013.2265718
- [3] S. D'Angelo, et al., "A GaN MMIC Chipset suitable for integration in future X-band spaceborne radar T/R module Frontends," in *Proc. of International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications*, pp.1-4, 2016. DOI: 10.1109/MIKON.2016.7492014
- [4] M. Rudolph, et al., "Analysis of the survivability of GaN low-noise amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.55, no.1, pp.37-43, 2007. DOI: 10.1109/TMTT.2006.886907
- [5] P. Schuh, et al., "High performance GaN Single-Chip Frontend for Compact X-band AESA Systems," in *Proc. of the 12th European Microwave Integrated Circuits Conference*, pp.41-44, 2017. DOI: 10.23919/EuMIC.2017.8230655
- [6] A. Biondi, et al., "Compact GaN MMIC T/R module front-end for X-band pulsed radar," in *Proc. of the 2016 European Microwave Integrated Circuits Conference*, pp.297-300, 2016.

DOI: 10.1109/EuMIC.2016.7777549

[7] A. Liero, et al., "On the recovery time of highly robust low-noise amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.58, no.4, pp.781-787, 2010.

DOI: 10.1109/TMTT.2010.2041519

[8] O. Kazan, et al., "An X-band Robust GaN Low-Noise Amplifier MMIC with Sub 2dB Noise Figure," in *Proc. of the 48th European Microwave Conference (EUMC)*, pp.1202-1204, 2018.

DOI: 10.23919/EuMIC.2018.8539909

[9] C. Andrei, et al., "Highly Linear X-band GaN-based Low-Noise Amplifier," in *Proc. of the International Symposium on Signals, Systems, and Electronics (ISSSE)*, pp.1-4, 2012.

DOI: 10.1109/ISSSE.2012.6374314

[10] P. Schuh, et al., "Robust X-band low noise limiting amplifiers," in *Proc. of IEEE International Microwave Symposium Digest*, pp.1-4, 2013.

DOI: 10.1109/ MWSYM.2013.6697551

[11] "TGA2227," Qorvo Inc., [internet], <http://www.qorvo.com>.

[12] "CGY2222UH/C2," OMMIC Inc., [internet], <http://www.ommic.com>.

Joo-Seoc Go (Member)



2014 : MS degree in Electronic Communication Engineering, Hongik University.

2016~2017 : Research Engineer, U2SR

2018 : Research Engineer, GP Inc.

2019~present : Research Engineer, Electron Device Soution Inc.

Sung-Chan Kim (Member)



1999 : BS degree in Electronic Engineering, Dongguk University.

2001 : MS degree in Electronic Engineering, Dongguk University.

2006 : Ph. D. degree in Electronic Engineering, Dongguk University.

2007~present : Professor, Hanbat National University.

BIOGRAPHY

Byeong-Ok Lim (Member)



2003 : MS degree in Electronic Engineering, Dongguk University.
2009 : Ph. D. degree in Electronic Engineering, Dongguk University.
2010~2016 : Research Engineer, Hanwha Systems.

2017~2018 : Research Engineer, GP Inc.

2018~present : CEO, Electron Device Soution Inc.