

유도성 소스 축퇴를 이용한 X-대역 GaN MMIC 저잡음 증폭기

X-Band GaN Monolithic Microwave Integrated Circuit Low Noise Amplifier Using Inductive Source Degeneration

성하욱* · 한성희** · 김성일*** · 안호균*** · 임종원*** · 김동욱**

Ha-Wuk Sung* · Seong-Hee Han** · Seong-Il Kim*** · Ho-Kyun Ahn*** · Jong-Won Lim*** · Dong-Wook Kim**

요 약

본 논문에서는 0.2 μm ETRI GaN HEMT 공정을 이용하여 RF 송수신기 모듈에 사용되는 X-대역 GaN monolithic microwave integrated circuit(MMIC) 저잡음 증폭기를 설계 및 제작하였다. 피드백 마이크로스트립 선로를 트랜지스터 소스에 적용하여 회로의 안정성을 확보함과 동시에 최대 가용이득 및 최적 잡음지수의 열화를 최소화 하는 입력 정합 및 잡음 정합 궤적을 확보하였다. 바이어스 회로를 포함한 간단한 구조의 정합 기법이 적용된 MMIC 저잡음 증폭기는 8.7~11.5 GHz에서 20 dB 이상의 선형 이득을 가졌으며, 1.5~2.0 dB의 잡음지수를 보였다. 단일 신호 입력 조건에서 출력 P_{1dB} 는 17.1~24.3 dBm, 투톤(two-tone) 신호 입력 조건에서의 IMD 측정 수행 결과, 출력 IP_3 는 27.4~32.4 dBm을 보였다.

Abstract

In this study, an X-band GaN monolithic microwave integrated circuit (MMIC) low-noise amplifier is designed and fabricated for RF transceiver modules using a 0.2 μm ETRI GaN HEMT process. Through the application of a feedback microstrip line at the source of the transistor, the amplifier operation is stabilized, and a compromised impedance trace of the input impedance and noise matching is obtained, which minimizes the degradation of the maximum available gain and minimum noise figure. The developed MMIC low noise amplifier, which uses simple matching and biasing circuits as matching elements, exhibits a linear gain of more than 20 dB and a noise figure of 1.5~2.0 dB from 8.7 to 11.5 GHz. A single-tone power test shows an output P_{1dB} of 17.1~24.3 dBm, and a two-tone IMD measurement shows an output IP_3 of 27.4~32.4 dBm in the same frequency range.

Key words: GaN, HEMT, Inductive Source Degeneration, Low Noise Amplifier, MMIC

I. 서 론

현재 레이더 송수신기 시스템에 주로 활용하고 있는

저잡음 증폭기는 GaAs pHEMT 소자 기반으로 대부분 제작되었다. GaAs pHEMT는 고효율, 낮은 동작 전압, 높은 전자 이동도와 높은 최대 동작 주파수 특성을 가지고 있

「이 연구는 2019년 과학기술정보통신부의 재원으로 국방 무기체계용 핵심 반도체 부품 자립화 플랫폼 개발 융합연구단사업(No. CRC-19-02-ETRI)과 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-004)의 지원으로 연구되었음.」

*MMII연구소(Microwave & Millimeterwave Innovative Incubator Laboratory)

**충남대학교 전자정보통신공학과(Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University)

***한국전자통신연구원 DMC융합연구단(Defense Materials & Components Convergence Research Department, ETRI)

· Manuscript received February 7, 2022 ; Revised March 2, 2022 ; Accepted March 8, 2022. (ID No. 20220207-015)

· Corresponding Author: Dong-Wook Kim (e-mail: dwkim21c@cnu.ac.kr)

다^{[1][2]}. 송수신기 모듈이 RF 신호를 송신할 때 송신부의 고출력 전력 증폭기는 큰 출력 신호를 안테나를 통해 방사하게 되며 이 과정에서 일부 출력 신호는 안테나로 제대로 방사되지 않고 서큘레이터를 통해 수신부로 유입되게 된다. 수신부로 유입된 신호는 출력 정도에 따라 수신부 회로에 오동작을 일으키거나, 손상을 유발할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 수신기 회로에 누설 전력을 차단하거나, 다양한 외부 재밍 신호로부터 회로를 보호하기 위한 리미터를 추가로 삽입하게 된다. 이러한 소자의 추가 삽입은 송신기의 소형화를 저해하고, 시스템의 내부 잡음지수 열화를 가져올 수 있다.

최근에는 gallium nitride high electron mobility transistor (GaN HEMT)를 이용한 RF 송수신기 시스템 개발이 활발하게 진행되고 있다. Si이나 GaAs보다 높은 항복전압, 고출력 전력 조건에서 우수한 선형성 등에서 이점을 보이고, 높은 전자 이동속도와 우수한 열전도도 특성을 가지는 GaN 소자를 수신부에 이용하면 별도의 회로 보호용 리미터 회로가 필요하지 않으므로 회로의 크기와 시스템 내부 잡음지수 측면에서 유리하다^{[3]~[8]}.

본 논문은 한국전자통신연구원(ETRI)의 0.2 μm GaN HEMT 자체 공정을 이용하여 개발한 소스 피드백 구조의 X-대역 GaN MMIC 저잡음 증폭기의 설계 및 개발 결과를 제시한다.

II. X-대역 GaN MMIC 저잡음 증폭기

2-1 GaN HEMT 선정

본 논문에서 사용된 GaN HEMT는 $4 \times 100 \mu\text{m}$ 로 26 GHz까지 동작이 가능하며, 드레인 단자 기준으로 X-대역에서 최대 가용이득은 13.9~15.5 dB, 최소 잡음지수는 0.78~1.1 dB로 예상되었다. 20 GHz까지의 S -파라미터 데이터로부터 외삽하여 추출된 트랜지스터의 f_T 와 f_{\max} 는 각각 31.7 GHz와 70.3 GHz였다. 저잡음 증폭기는 표 1의 설계 목표와 같이 9~10 GHz 대역에서 선형 이득은 17 dB 이상, 잡음지수는 2.5 dB 이하의 성능을 낼 수 있어야 한다.

ETRI GaN HEMT의 시뮬레이션에는 소스 단자를 공통 단자로 활용하는 S -파라미터와 잡음 파라미터가 사용되었다. 인덕터 소자는 2.5차원 전자파 시뮬레이션을 통하

표 1. X-대역 GaN MMIC 저잡음 증폭기 설계 목표

Table 1. Design specifications of X-band GaN MMIC low noise amplifier.

Frequency [GHz]	9~10
Associated gain [dB]	≥ 17
Noise figure [dB]	≤ 2.5
Input return loss [dB]	≥ 10
Size [mm^2]	$\leq 1.7 \times 1.7$

여 모델을 추출하였고, 커패시터는 기판 정보를 기반으로 한 2차원 등가 모델을 활용하였다.

2-2 안정화 회로 설계

$V_{GS} = -3.5 \text{ V}$, $V_{DS} = 20 \text{ V}$, $I_{DS} = 40 \text{ mA}$ 의 바이어스 조건에서 트랜지스터는 불안정한 특성을 보였으며, 안정화된 상태에서 최적 잡음 정합 및 이득 정합 시뮬레이션을 진행하기 위해 그림 1과 같이 소스에 인덕턴스 소자 L_S 를 사용하였다. 그림 2는 트랜지스터 소스에 피드백 인덕터를 인가한 후, 인덕턴스 증가에 따른 입출력 임피던스(S_{11} , S_{22}) 및 최적 잡음 임피던스(S_{opt})의 궤적 변화를 X-대역에서 보여주고 있다. S_{opt} 는 게이트에서 입력 쪽을 바라보았을 때 나타나는 궤적으로서 S_{opt} 궤적의 임피던스로 정합 회로를 구성하면 잡음 지수가 최소가 된다. 소스에 피드백 인덕터를 사용함으로써 트랜지스터의 게이트 및 드레인에서 바라본 임피던스의 크기를 증가시킬 수 있어 입력 및 최적 잡음 정합 궤적과 출력 정합 궤적 확보가 유리하며 정합 회로에 사용되는 소자의 개수를 줄임으로써 광대역 정합과 더불어 회로를 크기를 축소할 수 있다^[9].

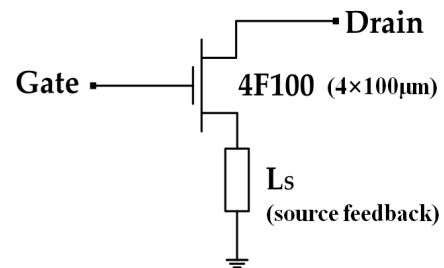


그림 1. 유도성 소스 축퇴를 이용한 회로 안정화

Fig 1. Circuit stabilization using inductive source degeneration.

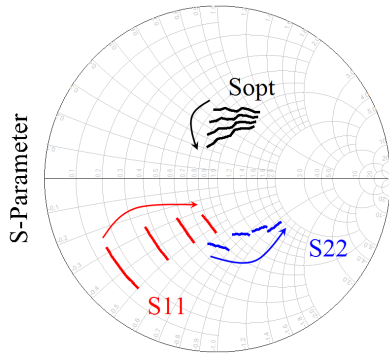


그림 2. $4 \times 100 \mu\text{m}$ 트랜지스터 기준 소스 인덕턴스 증가에 따른 입출력 및 최적 잡음 임피던스 궤적의 변화($L_S=0 \sim 0.3 \text{ nH}$, $\text{step}=0.1 \text{ nH}$)

Fig. 2. Variation of input, output and noise impedance traces with the increase of source inductance($L_S=0 \sim 0.3 \text{ nH}$, $\text{step}=0.1 \text{ nH}$).

그러나, 트랜지스터의 소스에 인가된 피드백 인덕터는 입력 및 최적 잡음 정합 궤적의 절충된 임피던스 선택과 동작의 안정성을 확보하는 이점 이외에 최대 가용이득의 손실을 유발한다. 이러한 최대 가용이득의 손실을 최소화하기 위해 동작 주파수 내에서 안정도가 확보될 수 있는 최소 길이의 마이크로스트립 선로를 트랜지스터의 소스에 적용하였으며, 첫 번째 단에 사용된 마이크로스트립 선로는 0.15 nH 의 효과를 가지며, 두 번째 단은 0.1 nH 의 효과를 가지도록 설계하였다.

2.3 입출력 및 잡음 정합회로 설계

주어진 이득 성능의 설계 목표를 구현하기 위해 본 논문에서는 2단 캐스케이드 형태의 공통 소스 구조를 이용하여 X-대역 MMIC 저잡음 증폭기를 설계하였다. 그림 3은 제안된 X-대역 GaN 저잡음 증폭기의 회로도도를 보여주고 있다. S-파라미터 시뮬레이션을 통해 동작 주파수 대역에서 안정도를 확보하였을 때, 첫 번째 단의 트랜지스터의 입력 임피던스는 10 GHz 에서 $Z_{S,10G}=23.87-j18.4 \Omega$ 이며, 최적 이득 임피던스와 최적 잡음 임피던스는 각각 $Z_{S_GAIN,10G}=9.741+j18.281 \Omega$ 와 $Z_{S_NOISE,10G}=47.62+j34.38 \Omega$ 이다. 최적 이득 임피던스 조건에서 구현될 수 있는 선형 이득은 11.3 dB , 최적 잡음 임피던스에서 확보할 수 있는 잡음

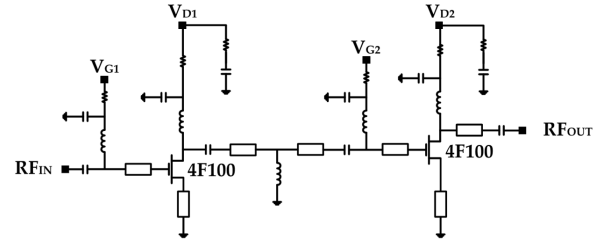


그림 3. 제안된 X-대역 GaN 저잡음 증폭기의 회로도

Fig. 3. Schematic circuit of the proposed X-band GaN low noise amplifier.

음지수는 약 1 dB 이다. 이득, 잡음 지수 및 입력 반사 손실 특성까지 모두 절충한 조합이 필요하므로, 이를 감안하여 선택한 소스 임피던스는 $Z_{S_NEW,10G}=35.8+j19.18 \Omega$, 부하 임피던스는 $Z_{L_NEW,10G}=41.04+j49.3 \Omega$ 이며, 동일한 방법으로 두 번째 단에 사용된 트랜지스터의 입력 임피던스, 최적 이득 임피던스, 최적 잡음 임피던스 궤적들을 비교하여 새로운 소스 및 부하 임피던스를 추출하였다.

각 단에서 추출된 소스 및 부하 임피던스 궤적을 이용하여 먼저 첫 번째 단의 입력 정합 회로를 설계하고 두 번째 단의 출력단에 사용되는 출력 정합 회로를 설계하였으며, 각 단의 입력과 출력 정합 회로가 고려된 상황에서 첫 번째 단과 두 번째 단 사이의 단 간 정합회로 설계를 진행하였다.

그림 4는 증폭기 회로의 각 단에서의 정합 회로 및 임피던스 궤적 변화를 보여주고 있다. 입력 및 출력 정합 회로 설계에 사용되는 소자의 개수를 가능한 줄이기 위해 L-C 바이어스 회로, RF 신호가 전달되는 마이크로스트립 선로와 DC 블로킹 커패시터를 활용하여 간단한 구조로 정합을 수행하였다. 단 간 정합 회로의 경우, 분기(shunt) 인덕턴스 소자의 주파수 응답 특성을 활용하여 동작 주파수 대역에서의 이득 및 잡음 특성이 열화되지 않는 값을 선정함으로써, 저주파 대역에서의 이득만을 열화시켜 안정도를 개선하였다. 각 단에 사용된 트랜지스터의 게이트와 드레인 바이어스 조건이 동일하여($V_{GS1}=V_{GS2}$, $V_{DS1}=V_{DS2}$) 단일 바이어스 패드에서 각 단으로 전압을 인가되는 구조를 사용하였다. 각 단의 바이어스 패드 연결로 인한 루프 피드백 발진 가능성을 막기 위해 게이트 저항 250Ω 과 드레인 저항 2.5Ω 을 사용하여 추가적인 안정성

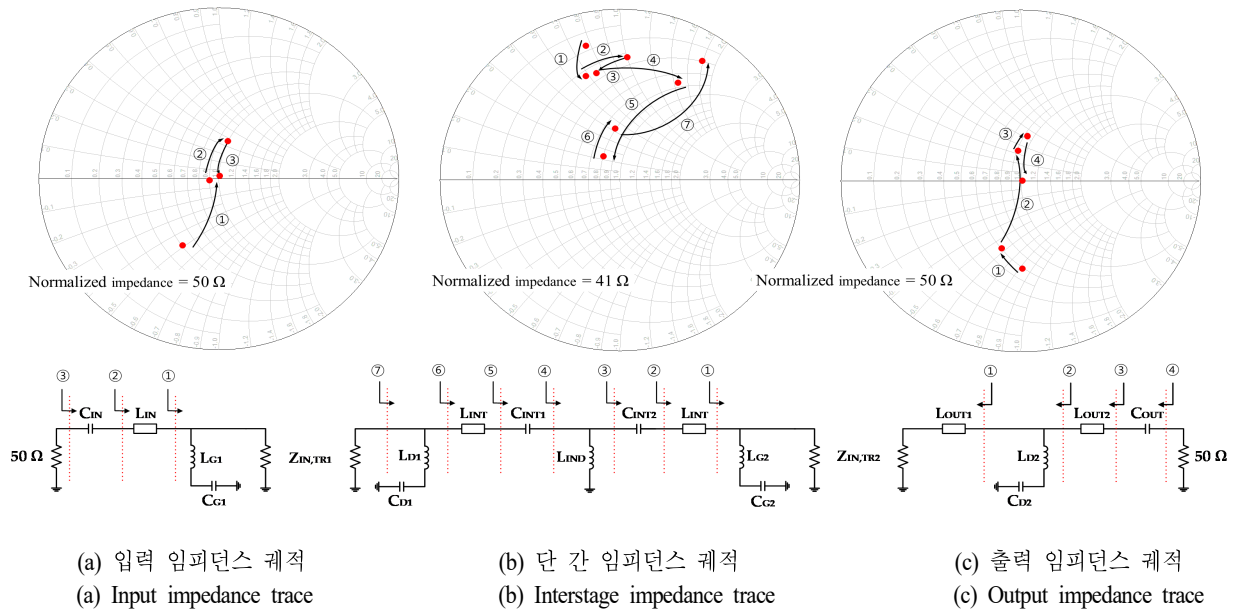


그림 4. 입출력 정합회로 및 단 간 정합회로의 임피던스 궤적

Fig. 4. Impedance traces of input, output and interstage matching circuits.

을 확보하였고, 저주파 대역에서의 예측 불가능한 발진을 부분적으로 억제하고자 드레인 바이어스 선로에 저주파 트랩 역할을 하는 R-C 분기(shunt) 회로를 추가하였다. 또한 설계에 사용된 금속 선로의 두께는 $3.4 \mu\text{m}$ 이며, DC 전류가 흐르는 바이어스 회로에 대해 충분한 선폭을 두어 과전류로 인한 회로 손상을 방지하였다.

그림 5는 $0.2 \mu\text{m}$ GaN HEMT 공정으로 제작된 X-대역

MMIC 저잡음 증폭기 사진을 보여주고 있다. RF 패드, DC 패드 및 인덕터를 포함한 칩의 크기는 $1.62 \times 1.62 \text{ mm}^2$ 이며, 측정을 위해 MMIC 칩을 알루미늄 금속 캐리어에 실버 에폭시 공정을 사용하여 부착한 후 온-웨이퍼 (on-wafer) 프로브 스테이션에서 측정하였다.

III. 측정 및 결과

그림 6은 $V_{DS}=20 \text{ V}$, $I_{DS}=40 \text{ mA}$ 의 바이어스 조건에서 측정된 S-파라미터 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 보여주고 있다. S-파라미터 측정은 웨이퍼상에서 Cascade 온웨이퍼 프로브 시스템과 Keysight 회로망 분석기 (N5230A)를 사용하여 이루어졌다. 10 GHz 에서 S_{21} 시뮬레이션 결과는 20.3 dB 이며, 측정 결과는 21.1 dB 로 약 0.8 dB 의 차이를 보였다. $8.2 \sim 11.9 \text{ GHz}$ 에서 증폭기의 선형 이득은 20 dB 이상의 값을 보였으며, 입력 반사 손실의 경우 $8.3 \sim 11.4 \text{ GHz}$ 에서 10 dB 이상의 값을 보였다. 출력 반사 손실은 $8.8 \sim 11.25 \text{ GHz}$ 에서 10 dB 이상의 특성을 보였다. 전반적인 측정 결과를 살펴보면 실제 구현된 회로의 성능은 이득 특성을 기준으로 판단할 때 0.5 GHz

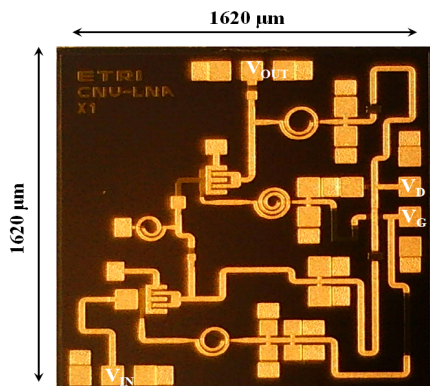


그림 5. 제작된 X-대역 MMIC 저잡음 증폭기 칩 사진

Fig. 5. Photograph of the fabricated X-band MMIC low noise amplifier chip.

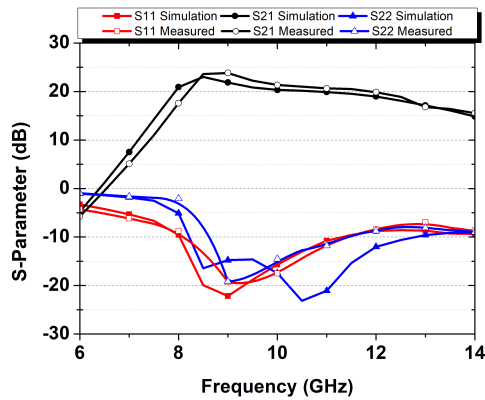


그림 6. S-파라미터 시뮬레이션 및 측정값 비교
Fig. 6. Comparison of simulated and measured S parameter results.

정도 상향되었음을 알 수 있다.

그림 7은 제작된 저잡음 증폭기의 주파수에 따른 잡음 지수 시뮬레이션 및 측정 결과를 비교하고 있다. Keysight 잡음지수 분석기(N8975A)와 잡음발생원(N4002A)을 이용하였고, 측정에 함께 사용된 RF 입출력 프로브 및 RF 출력 케이블에 대한 S-파라미터 정보를 각각 추출하였다. 프리스 방정식 계산을 통해 전체 잡음지수에서 저잡음 증폭기만의 잡음지수를 추출하였다. 10 GHz에서 시뮬레이션 결과는 1.64 dB로 예상되었고, 측정 결과는 1.5 dB로 확인되었다. 8.6~12 GHz에서 2 dB 미만의 잡음지수 특성을 확인하였고, 측정된 잡음 지수 결과를 보면 S-파라미터 측정 결과와 동일하게 공정에 의해 주파수 상향이

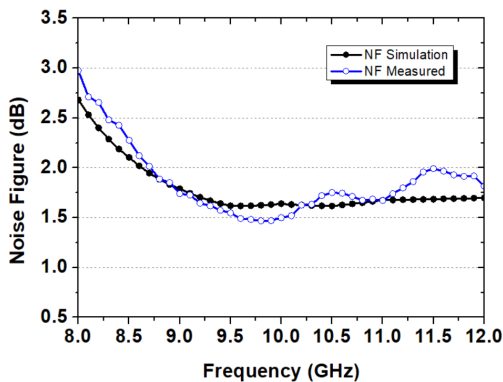


그림 7. 잡음지수 시뮬레이션 및 측정 결과 비교
Fig 7. Comparison of simulated and measured noise figure.

발생하였음을 알 수 있다.

그림 8은 10 GHz에서 입력 전력 증가에 따른 출력 전력 및 전력 이득의 변화를 측정한 그래프를 보여주고 있다. 전력 성능을 측정한 결과, 출력 P_{ldB} 는 20.3 dBm으로 측정되었으며, 1 dB 포화점에서의 전력 이득은 19.8 dB로 확인되었다.

그림 9는 50 MHz의 주파수 간격을 가지는 투톤(two-tone) 신호를 저잡음 증폭기의 입력에 인가하였을 때, 10

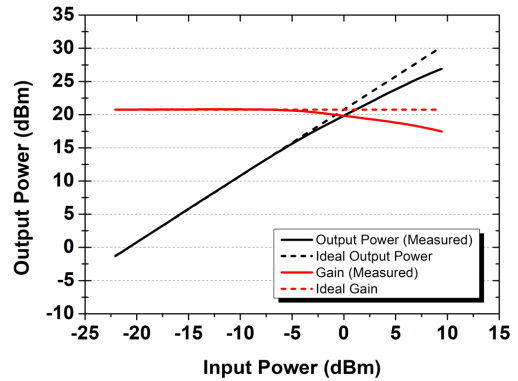


그림 8. 저잡음 증폭기의 입력 전력 증가에 따른 출력 전력 및 전력 이득 변화($f_0=10$ GHz)
Fig. 8. Variation of output power and power gain of low noise amplifier with the input power($f_0=10$ GHz).

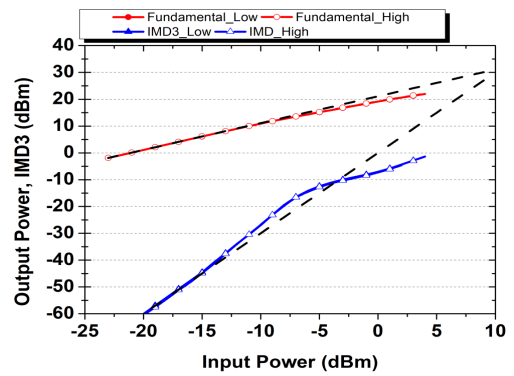


그림 9. 10 GHz에서 투톤 신호를 입력한 저잡음 증폭기의 3차 IMD 측정 결과 ($f_{\text{Low}}=10.05$ GHz, $f_{\text{High}}=10.1$ GHz, $\Delta f=50$ MHz)
Fig. 9. Measured third-order intermodulation distortion (IMD3) results of low noise amplifier at 10 GHz with two-tone signal input($f_{\text{Low}}=10.05$ GHz, $f_{\text{High}}=10.1$ GHz, $\Delta f=50$ MHz).

GHz에서 3차 상호변조왜곡(intermodulation distortion, IMD) 성분을 측정된 결과를 보여주고 있다. Keysight 신호 발생기(E8267D, E8257D)와 스펙트럼 분석기(E4446A)를 이용하여 8.5 GHz부터 10.5 GHz까지 0.5 GHz 단위로 해당되는 주파수에 끼치는 IMD 성분의 영향을 관찰하였다. $f_{Low}=10.05$ GHz와 $f_{High}=10.1$ GHz의 투톤 신호에 대해 $2f_{Low}-f_{High}=10$ GHz의 3차 IMD 신호를 측정된 결과 입력 IP_3 는 10.4 dBm, 출력 IP_3 는 31.5 dBm으로 측정되었다.

표 2는 8.5 GHz부터 10.5 GHz까지 0.5 GHz 단위로 측정된 전력 이득, 출력 P_{1dB} , 출력 IP_3 특성을 보여주고 있다. 출력 P_{1dB} 의 경우, 8.5 GHz 대역을 제외한 전체 주파수 영역에서 20 dBm 이상의 값을 보였으며, 출력 IP_3 는 27.4~32.4 dBm으로 측정되었다. 측정된 전력 이득을 통

표 2. 주파수에 따른 전력 이득, 출력 P_{1dB} 및 출력 IP_3 결과

Table 2. Measured results of power gain, output P_{1dB} and output IP_3 with the frequency.

Frequency [GHz]	Power gain [dB]	Output P_{1dB} [dBm]	Output IP_3 [dBm]
8.5	23.5	17.1	27.4
9	23.4	24.3	31.7
9.5	21.9	21.8	30.8
10	21.1	20.3	31.5
10.5	20.8	19.8	32.4

해 계산된 입력 IP_3 는 3.9~11.6 dBm으로 확인되었다.

표 3은 본 논문의 결과를 기존 발표된 GaN 저잡음 증폭기 논문들의 결과와 비교하고 있다. 제작된 X-대역 GaN MMIC 저잡음 증폭기는 주파수 대역, 이득, 잡음 지수 측면에서 기존에 발표된 저잡음 증폭기와 유사하거나 우수한 성능을 보였으며, 칩의 면적은 가장 작은 값을 보여 경쟁력이 충분함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 0.2 μ m ETRI GaN HEMT를 이용한 X-대역 MMIC 저잡음 증폭기를 설계 및 제작하였다. 트랜지스터의 소스에 인덕턴스 피드백 효과를 삽입하여 회로의 안정성을 확보하였으며, 입출력 정합 궤적 및 최적 잡음 정합 궤적을 조율하여 간단한 구조의 정합 회로를 설계함으로써 정합 손실을 최소화하고 칩의 면적을 줄였다. 제작된 MMIC 저잡음 증폭기는 8.7~11.5 GHz에서 선형 이득은 20.5~24.1 dB, 잡음 지수는 1.5~2 dB, 입력 반사 손실은 9.45~20.8 dB로 측정되었다. 설계 목표 주파수 대역에서 전력 특성을 측정된 결과, 출력 P_{1dB} 는 17.1~24.3 dBm, 출력 IP_3 는 27.4~32.4 dBm으로 측정되었다. 본 연구에서 개발된 MMIC 저잡음 증폭기는 큰 출력 전력과 높은 선형성이 요구되는 X-대역 군용 레이다 송수신기 시스템 개발에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

표 3. 본 논문의 결과와 기존 발표된 X-대역 저잡음 증폭기 결과의 비교

Table 3. Comparison of our work and the previously published X-band low noise amplifier results.

References	Frequency [GHz]	Gain [dB]	Noise figure [dB]	Input return loss [dB]	P_{1dB} [dBm]	OIP ₃ [dBm]	Chip size (mm ²)	Process
[10]	7~12	14	2.5	10	20	28	5	GaN HEMT
[11]	8~10	18	2.5~3	5~10	N.A.	37	N.A.	GaN HEMT
[12]	4.5~7	22.5~25.5	1.3~1.8	9~15	24	35	3.6	GaN HEMT
[13]	8~11	22.2~30.8	1.6~1.95	9.1~20.6	23	29	3.6	GaN HEMT
[14]	7~11	≥18	≥2	N.A.	N.A.	N.A.	6.0	GaN HEMT
[15]	10~12	24.4~25.2	1.3~1.75	≥10	N.A.	32.8	4.5	GaN HEMT
This work	8.7~11.5	20.5~24.1	1.5~2	9.45~20.8	17.1~24.3	27.4~32.4	2.62	GaN HEMT

References

- [1] C. V. N. Rao, D. K. Ghodgaonkar, and N. Sharma, "GaAs MMIC low noise amplifier with integrated high-power absorptive receive protection switch," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 12, pp. 1128-1130, Dec. 2018.
- [2] A. Barigelli, W. Ciccognani, S. Colangeli, P. Colantonio, M. Feudale, and F. Giannini, et al., "Development of GaN based MMIC for next generation X-Band space SAR T/R module," in *2012 7th European Microwave Integrated Circuit Conference*, Amsterdam, Oct. 2012, pp. 369-372.
- [3] M. Thorsell, M. Fagerlind, K. Andersson, N. Billstrom, and N. Rorsman, "An X-band AlGaIn/GaN MMIC receiver front-end," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 55-57, Jan. 2010.
- [4] S. D'Angelo, A. Biondi, F. Scappaviva, D. Resca, and V. A. Monaco, "A GaN MMIC chipset suitable for integration in future X-band spaceborne radar T/R module Frontends," in *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Krakow, May 2016, pp. 1-4.
- [5] M. Chen, W. Sutton, I. Smorchkova, B. Heying, W. B. Luo, and V. Gambin, et al., "A 1~25 GHz GaN HEMT MMIC low-noise amplifier," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 20, no. 10, pp. 563-565, Oct. 2010.
- [6] M. P. Lee, S. Kim, S. J. Hong, and D. W. Kim, "Compact 20-W GaN internally matched power amplifier for 2.5 GHz to 6 GHz jammer systems," *Micromachines(Basel)*, vol. 11, no. 4, p. 375, Apr. 2020.
- [7] S. Zhang, P. Zheng, J. Xu, R. Wang, Y. Huang, and X. Tong, "A 15-34 GHz robust GaN based low-noise amplifier with 0.8 dB minimum noise figure," in *2019 17th IEEE International New Circuits and Systems Conference(NEWCAS)*, Munich, Jun. 2019, pp. 1-4.
- [8] M. Rudolph, R. Behtash, R. Doerner, K. Hirche, J. Wurfl, and W. Heinrich, 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, Jan. 2007.
- [9] S. Zafar, S. Osmanoglu, B. Cankaya, A. Kashif, and E. Ozbay, "GaN-on-SiC LNA for UHF and L-band," in *2019 European Microwave Conference in Central Europe(EuMCE)*, Prague, May 2019, pp. 95-98.
- [10] C. Andrei, R. Doerner, O. Bengtsson, S. A. Chevtchenko, W. Heinrich, and M. Rudolph, "Highly linear X-band GaN-based low-noise amplifier," in *2012 International Symposium on Signals, Systems, and Electronics(ISSSE)*, Potsdam, Dec. 2012, pp. 1-4.
- [11] A. Liero, M. Dewitz, S. Kuhn, N. Chaturvedi, J. Xu, and M. Rudolph, "On the recovery time of highly robust low-noise amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 4, pp. 781-787, Apr. 2010.
- [12] A. M. E. Abounemra, M. Helaoui, and F. M. Ghannouchi, "A high gain and high linear 0.25 μm GaN HEMT based monolithic integrated C-band low noise amplifier," in *2019 IEEE International Electromagnetics and Antenna Conference(IEMANTENNA)*, Vancouver, BC, Oct. 2019, pp. 16-19.
- [13] O. Kazan, F. Kocer, and O. A. Civi, "An X-band robust GaN low-noise amplifier MMIC with sub 2 dB noise figure," in *2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference(EuMIC)*, Madrid, Sep. 2018, pp. 234-236.
- [14] P. Schuh, R. Reber, "Robust X-band low noise limiting amplifiers," in *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(MTT)*, Seattle, WA, Jan. 2013, pp. 1-4.
- [15] M. Vittori, S. Colangeli, W. Ciccognani, A. Salvucci, G. Polli, and E. Limiti, "High performance X-band LNAs using a 0.25 μm GaN technology," in *2017 13th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics(PRIME)*, Taormina, Jun. 2017, pp. 157-160.

성 하 욱 [MMII연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0442-9712>



2020년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2022년 2월: 충남대학교 전파정보통신공학과 (공학석사)
2022년 3월~현재: MMII연구소 연구원
[주 관심분야] GaN HEMT 광대역 저잡음 증폭기 MMIC 및 전력증폭기, 마이크로파 및 밀리미터파 전력증폭기 모듈

김 성 일 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5949-2447>



1998년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
2019년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
2000년 3월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 능동소자 모델링

한 성 희 [충남대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-5103-9074>



2021년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2021년 3월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] GaAs pHEMT 밀리미터파 전력증폭기 MMIC, 3차원 프린팅 기술 기반 빈 공간 기판집적도파관

안 호 균 [한국전자통신연구원/책임연구원 및 실장]

<https://orcid.org/0000-0003-3937-8257>



1999년 2월: 고려대학교 금속공학과 (공학사)
2001년 2월: 고려대학교 금속공학과 (공학석사)
2016년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
2001년 1월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원

2020년 1월~현재: 한국전자통신연구원 DMC융합연구단 국방 RF부품연구실 실장

[주 관심분야] GaN HEMT 소자 및 MMIC 기술

임 중 원 [한국전자통신연구원/책임연구원 및 단장]

<https://orcid.org/0000-0003-0181-130X>



1988년 2월: 중앙대학교 물리학과 (이학사)
1990년 8월: 중앙대학교 물리학과 (이학석사)
1998년 2월: 중앙대학교 물리학과 (이학박사)
2000년 3월~현재: 한국전자통신연구원

책임연구원

2019년 12월~현재: 한국전자통신연구원 DMC융합연구단 단장
[주 관심분야] GaN HEMT 소자 및 MMIC 등

김 동 옥 [충남대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1913-4714>



1990년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
1992년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
1996년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
1991년 8월~2000년 5월: LG종합기술원

선임연구원

2000년 6월~2002년 8월: (주)텔레포스 연구소장
2002년 9월~2004년 9월: 에스원기술연구소 응용기술팀장
2009년 6월~2009년 12월: ETRI 초빙연구원
2010년 1월~2011년 1월: 미국 UCSD 방문교수
2004년 10월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 교수
[주 관심분야] 초고속 및 초고주파 집적회로, 마이크로파 및 밀리미터파 전력증폭기 모듈, 근거리 레이더 모듈