

레이다용 X-대역 GaN Front-End MMIC

X-Band GaN Front-End MMIC for Radar Applications

노 윤 섭¹ · 임 종 원²YounSub Noh¹ · JongWon Lim²

요 약

본 논문에서는 0.15 μm GaN(gallium nitride) HEMT(high electron mobility transistor) 공정을 이용하여 전력증폭기, 저잡음 증폭기 및 스위치가 하나의 칩에 집적된 X-대역 front-end MMIC(monolithic microwave integrated circuit)를 설계 및 제작하였다. 칩 크기 4.5×2 mm²로 제작된 front-end MMIC는 주파수 8.5~10.5 GHz 대역에서 수신 이득 21 dB, 수신 잡음지수 2.1~2.4 dB의 수신부 특성과, 송신 이득 26 dB, 송신 출력 41 dBm 및 송신 효율 42 %의 송신부 측정 결과를 보였다. 제작된 front-end MMIC는 항공기의 AESA(active electronically scanned array) 레이더나 초소형 SAR(synthetic aperture radar) 위성 등에 적용이 가능하다.

Abstract

In this study, we designed and manufactured an X-band front-end MMIC with a power amplifier, low-noise amplifier, and switch integrated into one chip using a 0.15 μm GaN HEMT process. The front-end MMIC (chip size: 4.5×2 mm²) showed receiver characteristics with a gain of 21 dB and a noise figure of 2.1~2.4 dB noise figure, along with transmitter characteristics a gain of 26 dB, an output power of 41 dBm, and a power added efficiency (PAE) of 42 % in the frequency range of 8.5~10.5 GHz. This front-end MMIC can be applied to AESA radars or ultra-small SAR satellites.

Key words: GaN, Front-End, MMIC, Radar, X-Band

I. 서 론

GaN 소자는 고출력과 고효율 특성을 기반으로 하는 전력증폭기와, 고 내압 특성의 스위치, 그리고 큰 입력전력에 강한 저잡음증폭기 특성이 가능하여 레이더 시스템의 TRM(transmit and receive module)의 핵심 부품에 적용이 가능하게 되었다.

GaN 소자 기반의 송수신 front-end MMIC는 다양한 주파

수 대역에서 개발이 되고 있으며, X-대역에서 6.3~19 Watts의 출력전력을 갖는 front-end MMIC가 보고되어 있다^{[1]-[4]}.

II. X-대역 Front-End MMIC 설계

X-대역 front-end MMIC를 설계하기 위하여 유럽 UMS사의 0.15 μm GaN HEMT 공정인 GH15-11 공정을 사용하였다. 전력증폭기 MMIC가 선 개발되었고 8.5~11 GHz

「이 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP23031-000)의 지원으로 연구되었음.」
한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

1: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-9336-0077>), 2: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-0181-130X>)

· Manuscript received February 19, 2025 ; Revised March 13, 2025 ; Accepted March 26, 2025. (ID No. 20250219-019)

· Corresponding Author: YounSub Noh (e-mail: nohys@etri.re.kr)

대역에서 27 dB의 이득, 42.5 dBm의 출력전력, 55 %의 효율 특성을 확인하였다^[5]. 선 개발된 전력증폭기 설계는 그대로 활용하고, 저잡음증폭기와 스위치를 설계하여 front-end MMIC를 설계하였다.

전력증폭기는 8F150(8 fingers, 150 μm gate width) 트랜지스터를 단위소자로 사용하였고, 초단에는 1개와 출력단에는 4개를 사용한 2단 1:4 구조로 설계하였으며, 모든 정합회로는 source-pull 및 load-pull 시뮬레이션을 통해 출력전력과 효율을 동시에 최적화하는 설계로 구현하였다(그림 1).

저잡음증폭기는 4F50(4 fingers, 50 μm gate width) 트랜지스터를 단위소자로 사용하였고, 2단 cascade 증폭기에 모두 4F50 소자를 사용하였다. 광대역 특성 및 잡음지수 최적화를 위해서 소스 축퇴(source degeneration)를 위한 microstrip 선로 Ls1 및 Ls2를 2단 증폭기 트랜지스터의 소스단에 모두 적용하여 광대역 이득 특성 및 우수한 잡음지수 설계가 가능하였다(그림 2).

고전력 SPDT(single pole double through) 스위치는 고전

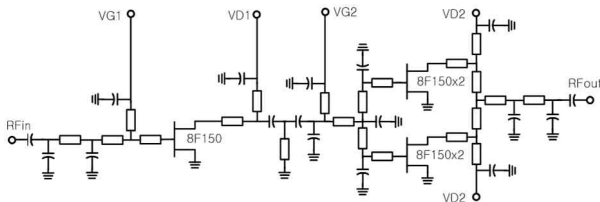


그림 1. X-대역 GaN 2단 전력증폭기 회로도
Fig. 1. Schematic diagram of X-band GaN 2-stage power amplifier.

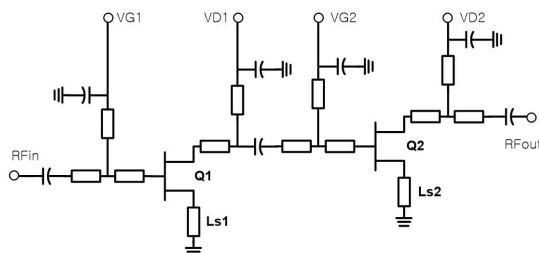


그림 2. X-대역 GaN 2단 저잡음증폭기 회로도
Fig. 2. Schematic diagram of X-band GaN 2-stage low noise amplifier.

력 특성과 고 격리도 특성을 동시에 확보하기 위하여, 직렬-병렬-병렬 구조로 설계하였다. 직렬 트랜지스터 Q1, Q4와 병렬로 인덕터 L_p 를 사용하여 온-상태의 트랜지스터의 등가 커패시턴스와 LC 공진을 통해 동작 대역에서의 삽입손실 특성을 개선하였다. 고 격리도를 확보하기 위하여 두 개의 shunt 트랜지스터 구조를 사용하였다. 모든 스위치의 게이트 단에는 게이트로의 RF 신호 누설을 방지하기 위하여 큰 저항을 직렬로 사용하였다. 직렬 트랜지스터 Q1과 Q4는 8F100(8 fingers, 100 μm gate width)을, 병렬 트랜지스터 Q2, Q3, Q5, Q6은 4F50(4 fingers, 50 μm gate width)을 사용하였다. 그림 3에서 포트 P1은 공통 포트이며, 제어전압 Vc1이 0V high이고 Vc2가 -25V low인 경우 P1과 P2 경로는 스위치-온 상태이며, P1과 P3 경로는 스위치-오프 상태가 된다.

III. Front-end MMIC 측정 결과

UMS사의 0.15 μm GaN HEMT 공정으로 MMIC가 제작되었으며, 그림 4와 같이 4.5×2.0 mm의 크기로 제작되었다. MMIC의 우측에 SPDT 스위치가 배치 되었으며, 상단에 2단 전력증폭기와 하단에 2단 저잡음증폭기가 위치한다.

X-대역 GaN front-end MMIC의 시험을 위하여 CuW 재료의 캐리어에 MMIC를 직접 유테틱 본딩하였으며, RO4003C 8 mil 기판에 RF 50 Ω 및 DC 바이어스 회로를 구성하여 시험하였다.

X-대역 GaN front-end MMIC의 수신부는 SPDT 스위치

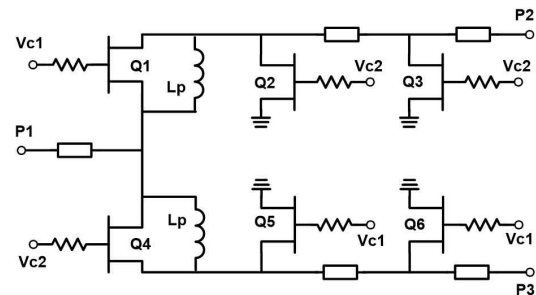


그림 3. X-대역 GaN SPDT 스위치 회로도: 직렬-병렬-병렬 구조
Fig. 3. Schematic diagram of GaN X-band SPDT switch: series-shunt-shunt configuration.

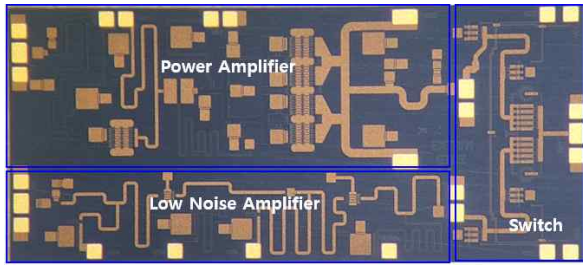


그림 4. 제작된 X-대역 GaN front-end MMIC 사진
Fig. 4. Photograph of fabricated X-band GaN front-end MMIC.

의 수신경로를 온-상태로 하고, 저잡음증폭기의 드레인 전압 10 V와 드레인 전류 50 mA 조건에서 CW 조건에서 시험하였다. 측정 결과 8.5~10.5 GHz 대역에서 21 dB의 이득 특성 및 -11.5 dB 이하의 입출력 반사손실 특성을 보였다(그림 5).

그림 6과 같이 동일한 바이어스 조건에서 측정된 잡음지수는 8~12 GHz 대역에서 2.1~2.4 dB의 특성을 갖는다. 10 GHz 대역에서 잡음지수가 조금 커지는 특성을 보이거나 전체적으로 0.3 dB 이내의 잡음지수 평탄도를 보였다.

X-대역 GaN front-end MMIC의 송신부 소신호 시험은 SPDT 스위치의 송신경로를 온-상태로 하고, 전력증폭기의 드레인 전압 20 V와 드레인 전류 600 mA 상태에서 CW 조건으로 시험하였다. 측정 결과 8.5~10.5 GHz 대역에서 26 dB의 이득 특성을 보였다(그림 7).

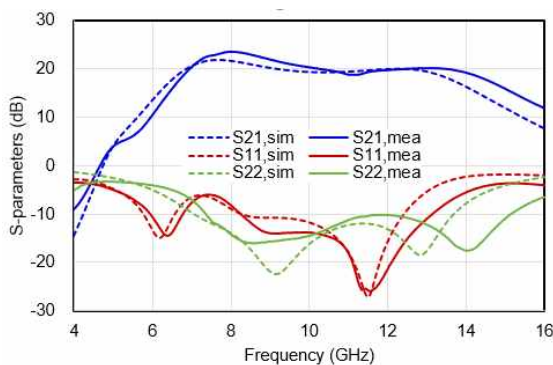


그림 5. X-대역 GaN front-end MMIC 수신부 S-parameters 측정결과
Fig. 5. Measured S-parameters of X-band GaN front-end MMIC receiver.

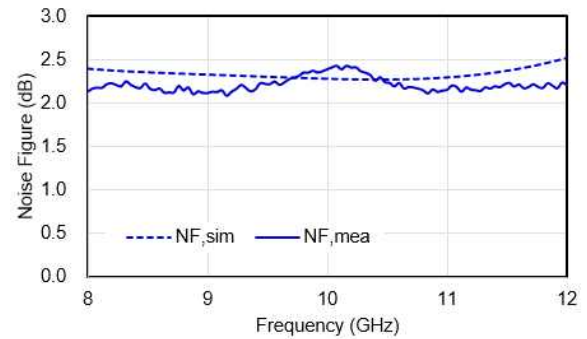


그림 6. X-대역 GaN front-end MMIC 수신부 잡음지수 측정결과
Fig. 6. Measured noise figure of X-band GaN front-end MMIC receiver.

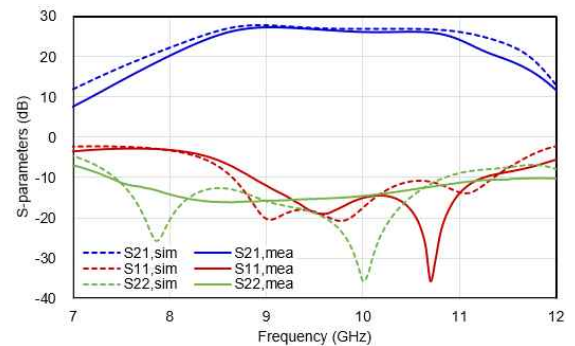


그림 7. X-대역 GaN front-end MMIC 송신부 S-parameters 측정결과
Fig. 7. Measured S-parameters of X-band GaN front-end MMIC transmitter.

X-대역 GaN front-end MMIC의 송신부 대신호 시험은 드레인 전류 600 mA 동작 바이어스 상태에서, RF 펄스폭 100 μ s와 duty cycle 10 %의 조건에서 시험하였다. 시험결과 8.5~10.5 GHz 대역에서 41 dBm의 출력전력 및 42 %의 전력부가효율(PAE) 특성을 보였다(그림 8).

본 논문과 기존의 발표된 X-대역 GaN front-end MMIC의 성능비교는 표 1과 같다. 수신부의 가장 중요한 특성인 잡음지수의 경우 2.4 dB 이하로 가장 우수한 특성을 보였고, 송신부 출력전력은 41 dBm에서 송신 효율 42 %의 수준으로 비교 기술 대비 가장 높은 값인 34 % 대비 8 % 이상 높은 값의 우수한 성능을 보였다.

표 1. X-대역 GaN front-end MMIC 성능비교

Table 1. Performance comparison with previously reported X-band GaN front-end MMICs.

Ref.	Frequency (GHz)	Rx Gain (dB)	Rx NF (dB)	Tx Gain (dB)	Tx Pout (dBm)	Tx PAE (%)	Chip size (mm ²)
[1]	9~12	11~19	3.2~4.4	24	38	26	3.6×3.3
[2]	8.6~11.2	15~16	2.5~3.0	22.5~25	39	25	3.0×3.0
[3]	7.7~12.2	13.5~14.5	2.8~3.2	34~36	42.2	22.5~29	4.8×2.7
[4]	8.5~11.5	24.5	2.5	37	42	34	6.0×5.0
This work	8.5~10.5	21	2.1~2.4	26	41	42	4.5×2.0

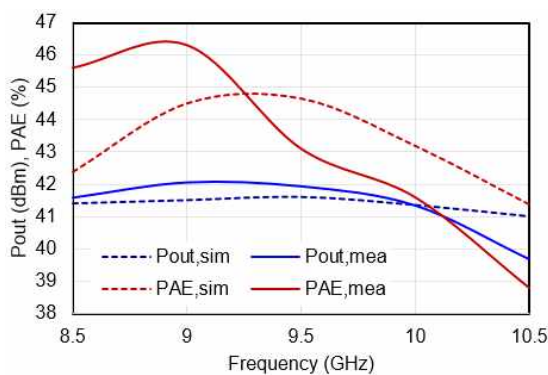


그림 8. X-대역 GaN front-end MMIC 송신부 출력전력 및 전력부가효율 측정결과

Fig. 8. Measured output power and PAE of X-band GaN front-end MMIC transmitter.

IV. 결 론

본 논문에서는 0.15 μm GaN HEMT 공정을 이용하여 X-대역 AESA 레이더나 위성 SAR의 송수신 모듈에 적용이 가능한 front-end (전력증폭기, 저잡음증폭기, 스위치) 단일 MMIC를 성공적으로 개발한 결과를 기술하였다. 기존 기술대비 수신 잡음지수 및 송신 효율 특성이 아주 우수하고, 우주급에까지 사용하기 적합한 UMS사의 GaN 공정으로 개발하여, 항공기 AESA나 위성 SAR용 송수신 모듈에 즉시 적용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] S. Masuda, M. Yamada, Y. Kamada, T. Ohki, K. Makiyama, and N. Okamoto, et al., "GaN single-chip transceiver frontend MMIC for X-band applications," in *2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Jun. 2012, pp. 1-3.
- [2] A. Biondi, S. D'Angelo, F. Scappaviva, D. Resca, and V. A. Monaco, "Compact GaN MMIC T/R module front-end for X-band pulsed radar," in *2016 11th European Microwave Integrated Circuit Conference Proceedings (EuMIC)*, London, Oct. 2016, pp. 297-300.
- [3] P. Schuh, H. Sledzik, and R. Reber, "High performance GaN single-chip frontend for compact X-band AESA systems," in *2017 12th European Microwave Integrated Circuit Conference Proceedings*, Nuremberg, Oct. 2017, pp. 41-44.
- [4] MEC, *X-Band GaN Single-Chip Transceiver Module*, MECX15SCFE, Jul. 2024.
- [5] Y. S. Noh, D. S. Kim, S. J. Chang, H. W. Jung, and J. W. Lim, "X-band GaN power amplifier MMIC design and radiation evaluations for space applications," in *2024 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)*, Danang, Nov. 2024.