

AESA 레이다용 Ku 대역 GaN FEM MMIC 구현

Implementation of a Ku-Band GaN FEM MMIC for AESA Radar Systems

윤수인¹ · 신재이² · 이상민³ · 강창현⁴ · 맹성주^{5*} · 김상근^{6*} · 진형석^{7*}

Su-In Yoon¹ · Jae-I Shin² · Sang-Min Lee³ · Chang-Hyun Kang⁴ ·
Seong-Joo Maeng^{5*} · Sang-keun Kim^{6*} · Hyung-Suk Jin^{7*}

요 약

본 논문에서는 AESA 레이다용 Ku 대역 GaN FEM MMIC 설계 및 제작 결과에 대해 기술하였다. 0.15 μm GaN on SiC 공정을 이용하여 전력증폭기, 저잡음 증폭기 및 RF 스위치를 단일 칩으로 집적한 Ku 대역 FEM MMIC를 설계하였다. 6×6 QFN 패키지로 구현된 FEM MMIC는 14~18 GHz 대역에서 송신 모드 기준 최소 17.97 dB의 송신 이득과 36.21 dBm 이상의 출력 전력, 최대 30.36 %의 전력부가효율을 달성하였으며, 수신 모드에서는 24.80~31.29 dB의 수신 이득과 2.76~3.49 dB의 잡음지수를 나타내었다. 설계된 FEM 단일 MMIC의 크기는 4.0×3.0 mm²이며, 최종 구현된 패키지의 크기는 6.0×6.0 mm²이다.

Abstract

This paper presents the design and implementation of a Ku-band GaN FEM MMIC for AESA radar applications. Using a 0.15 μm GaN-on-SiC process, a Ku-band FEM MMIC integrating a power amplifier, a low-noise amplifier, and a switch into a single chip was designed. The FEM MMIC, implemented in a 6.0×6.0 mm² QFN package, achieves a minimum transmit gain of 17.97 dB, an output power exceeding 36.21 dBm, and a maximum power-added efficiency of 30.36 % in transmit mode over the 14~18 GHz frequency range, while demonstrating a receive gain of 24.80~31.29 dB and a noise figure of 2.76~3.49 dB in receive mode. The chip size of the proposed FEM MMIC is 4.0×3.0 mm², and the final package size is 6.0×6.0 mm².

Key words: Ku-Band, FEM, MMIC, GaN, Radar

I. 서 론

최근 능동 위상 배열 레이다(AESA) 시스템은 다수의 송수신 모듈(TRM)을 기반으로 높은 출력 전력과 광대역

동작을 요구하며, 이에 따라 RF 프론트 엔드 모듈(FEM)에는 소형화와 함께 충분한 출력 및 우수한 송수신 격리 특성이 요구된다^[1].

기존 FEM은 PA, LNA 및 Switch를 개별 구현한 후 통

「이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(협약번호 KRIT-CT-23-046).」

알에프에이치아이씨(주)(RFHIC Corporation)

*LIG 디펜스&에어로스페이스(LIG Defense&Aerospace)

1: 선임연구원(<https://orcid.org/0009-0007-7407-1361>), 2: 전문연구원(<https://orcid.org/0009-0008-6339-0444>),

3: 전문연구원(<https://orcid.org/0000-0002-6587-5292>), 4: 본부장(<https://orcid.org/0000-0002-4433-8404>), 5: 연구원(<https://orcid.org/0009-0001-9641-8940>),

6: 수석연구원(<https://orcid.org/0000-0002-1383-9943>), 7: 팀장(<https://orcid.org/0000-0002-0764-9596>)

· Manuscript received January 7, 2026 ; Revised April 17, 2026 ; Accepted April 27, 2026. (ID No. 20260107-23S)

· Corresponding Author: Su-In Yoon (e-mail: siyoon@rfhic.com)

합하는 구조가 일반적이며, 이에 따라 모듈 크기 증가와 기생성분에 따른 성능 저하가 발생할 수 있다. GaN 소자는 높은 전력 밀도와 우수한 열전도 특성을 바탕으로 FEM 단일 칩 설계에 적합하며, 특히 높은 입력 전력 허용 특성으로 인해 별도의 리미터 없이도 LNA를 보호할 수 있는 장점이 있다^[2]. 본 연구에서는 AESA TRM 적용을 목표로 Ku 대역에서 동작하는 FEM을 설계하고, TRM 적용에 요구되는 출력, 우수한 송수신 격리도 및 소형화를 동시에 만족하도록 설계 목표를 설정하였다. 이를 바탕으로 GaN on SiC 공정을 이용한 단일 MMIC 형태의 FEM을 설계 및 제작하고, QFN 패키지를 적용한 시험을 통해 성능을 검증하였다.

II. Ku 대역 FEM MMIC 설계

Ku 대역 FEM MMIC 설계를 위해 유럽 UMS 사의 0.15 μm GaN on SiC 공정을 사용하였다. 제안된 FEM MMIC는 전력 증폭기, 저잡음 증폭기, SPDT(single pole, double throw) 스위치를 단일 칩으로 집적하여 구성하였다.

전력 증폭기는 출력 전력을 고려하여 8F 60 μm (gate fingers, length) 크기의 단위 트랜지스터를 사용한 2단 구조로 설계되었으며, 그림 1과 같이 구동 단과 출력 단의 소자 크기를 1:2 비율로 구성하였다. 안정도 향상을 위해 게이트 단에 저항-커패시터 병렬 회로를 삽입하여 저주파 발진을 억제하고 동작 주파수 대역에서의 안정도를 확보하였다. 또한 광대역 특성을 위해 주파수별 로드 풀 및 소스 풀 시뮬레이션을 통해 최적 임피던스를 도출하고, 이를 수식화하여 매칭 회로를 설계함으로써 동작 주파수 대역에서 균일한 특성이 유지되도록 하였다.

저잡음 증폭기는 그림 2와 같이 3단 구조로 구성하였

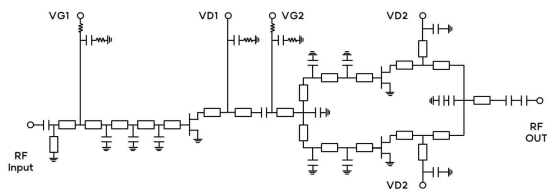


그림 1. Ku 대역 전력 증폭기 회로도
Fig. 1. Schematic of Ku band power amplifier.

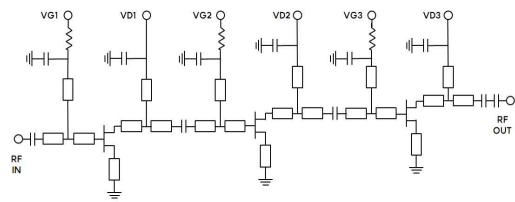


그림 2. Ku 대역 저잡음 증폭기 회로도
Fig. 2. Schematic of Ku band low noise amplifier.

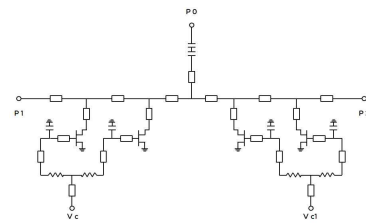


그림 3. Ku 대역 SPDT 스위치 회로도
Fig. 3. Schematic of Ku band SPDT switch.

다. 첫 번째 및 두 번째 단에는 4F 30 μm 크기의 소자를 사용하여 잡음지수 최적화를 우선으로 고려하였으며, 마지막 단에서는 전체 이득을 고려하여 6F 30 μm 크기의 소자를 적용하였다. 또한 광대역 동작 조건에서의 안정도 향상과 잡음지수 최적화를 위해 모든 트랜지스터에 소스 축퇴(source degeneration) 구조를 적용하였으며, 동작 주파수 대역에서 K-factor가 1 이상임을 확인하였다.

스위치는 SPDT(single pole, double throw) 구조로 설계하였으며, 그림 3과 같이 parallel-parallel 2단 구조를 적용하여 삽입 손실을 최소화하고 높은 격리도를 확보하고자 하였다. 해당 구조는 스위치 off 상태에서 기생 커패시턴스에 의한 신호 누설을 완화하여 송수신 경로 간 향상시키는 데 유리하다. 또한 송수신단 성능에 영향을 미치는 요소 중 하나인 낮은 on 저항을 확보하기 위해 6F 100 μm 크기의 소자를 선정하였다.

III. MMIC 제작 및 측정

설계된 FEM MMIC는 0.15 μm GaN 공정을 통해 제작되었으며, 면적은 4.0 \times 3.0 mm²이다. 제작된 MMIC의 시험을 위해 6 \times 6 QFN(quad flat no-lead) 패키지를 적용하였으며, Ag Epoxy 공정을 이용하여 조립되었다. 그림 4와 같

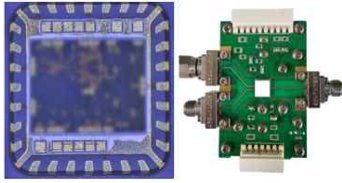


그림 4. 제작된 Ku 대역 FEM MMIC 및 시험 치구
Fig. 4. Fabricated Ku-band FEM MMIC and test fixture.

이 패키지 내부에 SLC(single layer capacitor)를 배치하여 전원부의 잡음을 제거하고 고주파 신호의 안정성을 향상시키고자 하였다. 또한 고주파 대역에서의 안정적인 전기적 특성 확보를 위해 Rogers 사의 RO4003C 8mil 기판을 사용하여 시험용 PCB를 제작하였다. 시뮬레이션은 Die 레벨에서 수행하였으며, 측정은 EVB 환경에서 진행하였다. 측정 결과는 PCB 및 커넥터의 손실을 반영한 결과이다.

제작된 FEM 단일 칩의 스위치 제어 전압은 0 V와 -20 V이며, 송수신 동작 모드별 RF 특성을 측정하였다.

그림 5는 송신 모드에서의 소신호 측정 결과이다. 14~18 GHz 대역에서 소신호 이득은 17.97~21.40 dB로 측정되었으며, 입출력 반사 계수는 각 -5.63, -6.80 dB 이하를 확인하였다.

송신 모드의 대신호 시험은 드레인 전압 20 V, 드레인 순시 전류 120 mA 조건에서 50 μ s 주기의 15 % Duty를 가진 RF 펄스 신호를 인가하여 측정하였다.

대신호 측정 결과, 그림 6과 같이 14~18 GHz 대역에서 출력 전력은 36.21~37.40 dBm, 최대 전력부가효율은 17.60~30.36 %의 특성을 나타내었다. 모사 해석과 비교

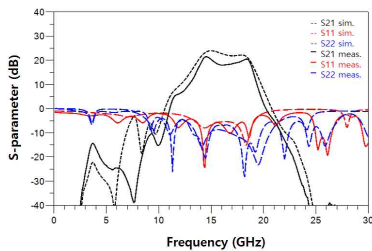


그림 5. FEM MMIC 송신 모드 소신호 측정 결과
Fig. 5. Small signal measurement results of FEM MMIC in transmit mode.

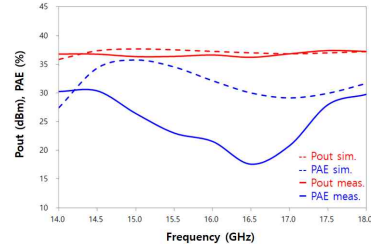


그림 6. FEM MMIC 송신 모드 대신호 측정 결과
Fig. 6. Large signal measurement results of FEM MMIC in transmit mode.

시 출력 전력은 유사한 경향을 보였으나, 전력부가효율에서는 차이가 확인되었다. 이러한 차이는 PDK(process design kit) 기반 모델의 정확도 한계와 더불어, 모사 해석 과정에서 패키지 및 PCB로 인한 손실과 기생 성분이 반영되지 않았기 때문으로 판단된다. 후속 연구에서는 패키지 및 PCB 정보를 포함한 모델링을 적용하여, 모사 해석 결과와 실측 결과 간의 오차를 최소화할 계획이다.

저잡음 증폭기는 드레인 전압 10 V, 드레인 순시 전류 40 mA 조건에서 측정하였다. 그림 7은 수신 모드에서의 소신호 측정 결과이다.

14~18 GHz 대역에서 소신호 이득은 24.80~31.29 dB, 입출력 반사 계수는 각 -6.70, -8.50 dB 이하의 특성을 가진다. 동일한 전원 조건에서 측정된 잡음 지수는 그림 8과 같이 2.76~3.49 dB의 특성을 확인하였다.

단일 칩 구조에서는 송, 수신 경로가 근접하게 배치되므로 경로 간 격리 특성이 중요하다. 격리도 측정 결과, 그림 9와 같이 14~18 GHz 대역에서 -34 dB 이하의 격리 특성을 확인하였다. 이는 단일 MMIC 구조에서도 송

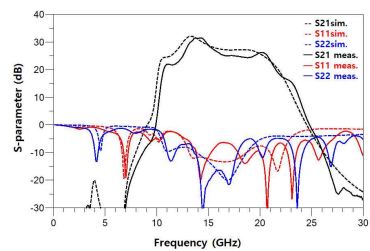


그림 7. FEM MMIC 수신 모드 소신호 측정 결과
Fig. 7. Small signal measurement results of FEM MMIC in receive mode.

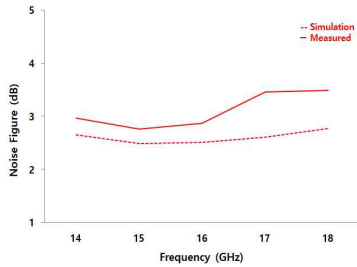


그림 8. FEM MMIC 수신 모드 잡음 지수 측정 결과
Fig. 8. Noise figure measurement results of FEM MMIC in receive mode.

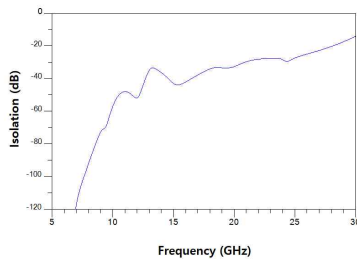


그림 9. FEM MMIC isolation 측정 결과
Fig. 9. Isolation measurement results of FEM MMIC.

수신 경로 간 간섭이 효과적으로 억제되었음을 보여준다.

본 논문의 Ku 대역 GaN FEM MMIC 성과와 기존 발표된 결과를 비교하여 표 1에 정리하였다. 표 1에 요약된 바와 같이, 본 논문의 FEM MMIC는 넓은 주파수 대역에서 높은 송신 이득과 충분한 송신 출력 성능을 확보하였다.

표 1. Ku 대역 FEM MMC 성능 비교

Table. 1. Performance comparison with previously reported Ku Band FEM MMICs.

Typ.	Ref [3]	Ref [4]	Ref [5]	This work
Freq. (GHz)	13~16	15~18	8.5~10.5	14~18
Tx gain (dB)	23	20	26	19.5
Tx pout (dBm)	39.5	31.4	41	36.7
Tx PAE (%)	33	30	42	25.3
Rx gain (dB)	25	23	21	27.23
Rx NF (dB)	2.8	3.25	2.4	3.11
Type	Die (20 mm ²)	7×7 PKG	Die (9 mm ²)	6×6 PKG

또한, 수신부의 핵심 특성인 잡음지수는 PKG로 조립된 상태에서도 2.76~3.49 dB로 우수한 성능을 보였으며, 6×6 Package로 구현되어 소형화 측면에서도 유리하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 AESA 레이더 시스템에 적용 가능한 Ku 대역 GaN FEM MMIC의 설계 및 구현에 대해 기술하였다. 개발된 FEM 단일 MMIC는 0.15 μm GaN on SiC 공정을 이용하여 제작되었으며, QFN 패키지를 적용하여 최종 구현되었다. 본 연구를 통해 구현된 FEM MMIC의 크기는 6.0×6.0 mm²이며 AESA 레이더 시스템 이외에도 위성 통신, 위성 SAR 시스템 등 다양한 송수신시스템에서 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] T. Do, V. H. Nguyen, H. Ngo, and B. L. Pham, "High power, harmonics suppressed multi-die single chip front-end module for X-band radar application," in *2024 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference(APMC)*, Bali, Nov. 2024, pp. 751-753.
- [2] J. H. Han, J. G. Kim, "A S/C/X-band GaN low noise amplifier MMIC," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 5, pp. 430-433, May 2017.
- [3] F. Scappaviva, G. Bosi, A. Biondi, S. D'Angelo, L. Cariani, and V. Vadalà, et al., "Advances in Ku-band GaN single chip front end for space SARs: From system specifications to technology selection," *Electronics*, vol. 11, no. 19, p. 2998, Sep. 2022.
- [4] Macom, "ENGSD00083: Transmit/receive module, 15~18 GHz," 2026. Available: <https://www.macom.com/products/product-detail/ENGSD00083>
- [5] Y. S. Noh, J. W. Lim, "X-band GaN front-end MMIC for radar applications," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 4, pp. 424-427, Apr. 2025.