

Lange 커플러를 이용한 SHF 대역용 초광대역 다단 고출력 증폭 소자 설계

Design of an Ultra-Wideband Multi-Stage High-Power Amplifier Using a Lange-Coupler for SHF Application

김형주 · 김재현 · 문효상 · 이왕용

Hyeongju Kim · Jaehyun Kim · Hyosang Moon · Wangyong Lee

요약

본 논문에서는 Lange 커플러 기반의 초광대역 다단 고출력 증폭 소자를 설계하고 그 성능을 분석하였다. 제안하는 고출력 증폭 소자는 2단 구조로 구성되었으며, Lange 커플러를 활용한 결합 구조를 통해 고출력 특성을 확보하였다. 제안된 증폭 소자는 SHF 대역에서 45.4 %의 대역폭을 가지며, 5 W 이상의 출력 전력과 12.7 dB 이상의 이득, 8.53 % 이상의 전력부가효율(PAE)을 달성하였다. 제안된 고출력 증폭 소자의 성능은 기존 GaN 기반 고출력 증폭 소자와 비교하여 매우 넓은 대역폭에서 준수한 출력 특성을 보였다. 제안된 증폭 소자는 위성통신 및 레이더 송신기 등 고출력 RF 시스템에 활용될 수 있다.

Abstract

In this study, an ultra-wideband multi-stage high-power amplifier (HPA) based on a Lange coupler is designed and its performance is analyzed. The proposed HPA is composed of a two-stage structure, and high output power is realized through a combined structure using a Lange coupler. The proposed HPA achieves 45.4 % bandwidth in the SHF Band, an output power exceeding 5 W, a power gain of more than 12.7 dB, and a power-added efficiency (PAE) greater than 8.53 %. Compared to existing GaN-based HPAs, the proposed HPA demonstrates acceptable output power performance over an ultra-wideband. The proposed HPA can be utilized in high-power RF systems such as satellite communication and radar transmitters.

Key words: Ultra-Wideband, Power Amplifier, Lange-Coupler, GaN HEMT, High Power Transmitter

I. 서론

현대 군사 시스템은 고해상도 감시, 정밀 타격, 전자전 (EW, electronic warfare) 수행 등을 위해 고주파 대역에서 강력한 전자파 출력이 요구된다. S 대역부터 Ka 대역까지

포함하는 SHF 대역은 AESA(active electronically scanned array) 레이더, 위성 통신 시스템, 전자전 등 다양한 분야의 운용 주파수로 널리 활용되고 있다^{[1]-[3]}. 또한 통신 기술 및 전자전 시스템의 급격한 발전으로 초광대역 특성의 증폭기에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[4]-[6]}.

「이 연구는 2024년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-23-052-01).」
LIG넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received November 14, 2025 ; Revised December 24, 2025 ; Accepted January 28, 2026. (ID No. 20251114-144)
· Corresponding Author: Hyeongju Kim (e-mail: m4804@naver.com)

일반적인 단일 구조로 구성된 증폭 소자는 고주파에서 전력 이득 감소, 회로 안정성 저하, 선형성 확보의 어려움 등으로 인해 광대역 고출력 특성 구현의 한계가 있다^{[7],[8]}. 이를 해결하기 위한 방법으로 다단 증폭 구조와 광대역 고출력 정합 기술이 적용된 설계 방법이 주목받고 있다^{[9],[11]}.

다단 구조는 단일 구조에 비해 이득 확보가 용이하고, 최종 출력단의 구동 능력을 향상시켜 고출력을 안정적으로 달성할 수 있다^[9]. 또한 각 단의 매칭 회로와 증폭 특성의 최적화를 통해 넓은 대역폭, 높은 선형성의 장점을 가진다. 또한 Lange 커플러를 활용한 광대역 결합기 구조는 일반적인 분산형 증폭기 구조 대비 높은 입/출력 정합 특성 확보가 가능하며, 다단 증폭기나 병렬 경로 증폭 소자의 전력을 효율적으로 결합하면서도 위상 오차와 손실을 줄일 수 있어, 광대역 고출력 정합 기술로 활용도가 높다^{[10],[11]}.

본 논문에서는 Lange 커플러를 이용하여 SHF 대역에서의 45% 이상의 대역폭(17~27 GHz)을 갖는 초광대역 특성과 고출력을 동시에 만족하는 다단 구조의 고출력 증폭 소자를 제안한다. 또한, 높은 항복 전압, 우수한 전력 밀도, 열 안정성 등의 장점을 가지는 GaN HEMT(high electron mobility transistor) 공정을 활용하여 제안된 초광대역 다단 고출력 증폭 소자를 제작하고 검증하였다.

II. Lange-Coupler

Lange 커플러는 고주파 및 광대역 응용을 위해 설계된 전력 결합기로 넓은 대역폭, 낮은 삽입 손실, 우수한 격리도 및 위상 정합 특성으로 고주파 시스템에서 널리 사용된다. 또한, 다단 구조나 병렬 구조의 증폭기에서 출력의 위상 정합과 전력 결합 효율을 높이는 데 유리하다. Lange 커플러는 인쇄회로기판(PCB)에 구현이 가능하여 소형화 및 집적화에 적합하여 높은 주파수 대역에서는 Lange 커플러의 광대역 특성과 정밀한 결합 특성이 전체 시스템 성능 고도화에 큰 영향을 준다.

Lange 커플러는 그림 1과 같이 일반적으로 네 개의 포트 구성된다. P1은 입력 포트에 신호가 결합기로 인가되는 지점이다. P2는 전달 포트에 입력된 신호가 결합 구간을 통과한 후 출력된다. P3은 결합 포트에 입력 전력의 일부가 90° 위상차를 가지며 결합되어 출력된다. P4는 격리

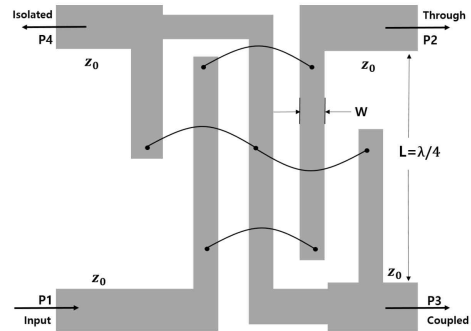


그림 1. Lange 커플러 구조
Fig. 1. Structure of the Lange-coupler.

포트로 신호가 전달되지 않아 격리도를 확보할 수 있다.

각 결합 구간의 전송선 길이는 동작 중심 주파수에서 전기적 길이의 $\lambda/4$ 이 되도록 설계된다. 또한, Lange 커플러는 인접한 전송선을 교차 연결하는 브리지 구조는 갖는다. 이 브리지는 본딩 와이어로 구현되며, 결합선 간 전위차를 균일화하고 모드 간 위상 속도를 맞춰 넓은 대역폭과 높은 결합도 특성을 만든다. 이와 같은 동작은 전송선 간의 우수한 전자기 결합과 구조적 대칭성에 기반한 것으로, 커플러의 중심 대역에서 높은 격리도와 낮은 반사 손실(S_{11})을 달성할 수 있다.

Lange 커플러의 핵심 동작 원리는 전송선 간의 우수한 커플링 계수(coupling factor)를 바탕으로 하며, 이는 전송선의 폭, 전송선 사이의 간격, 브리지의 선폭 및 기판의 유전율에 따라 조절된다. 일반적으로 전송선 간 간격이 좁고 커플링 선로의 길이가 길수록 결합 성능이 향상되고 넓은 대역폭에서도 안정적인 전력 분배와 위상 특성을 유지할 수 있다.

본 논문에서 제안한 초광대역 다단 고출력 증폭 소자에서 Lange 커플러는 병렬로 구성된 단위 증폭단 간의 전력 결합기 역할을 하며, 출력 신호 간 위상 불일치를 최소화하고, 전체 출력 전력의 합성 손실을 억제하는 역할을 한다. 특히 고주파수 영역에서는 결합기의 위상 오차 및 손실은 전력부가효율(PAE)과 대역폭에 직접적인 영향을 미치므로 Lange 커플러의 정밀한 설계가 중요하다.

이론적으로 이상적인 Lange 커플러의 S-파라미터는 다음과 같은 4×4 행렬로 표현된다.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} 0 & 1 & j & 0 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 0 & j & 1 & 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 포트 1에 입력된 신호는 포트 2와 포트 3으로 -3 dB씩 분배되고, 포트 3은 포트 2보다 90° 위상차를 가지며 포트 4에 전력이 전달되지 않음을 나타낸다.

$$C \text{ (dB)} = -20\log_{10}\left(\frac{V_{\text{coupled}}}{V_{\text{input}}}\right) = -10\log_{10}\left(\frac{P_{\text{coupled}}}{P_{\text{input}}}\right) \quad (2)$$

전력 분배 비율은 커플링 계수 C로 정의되며, 식 (2)와 같이 전압 또는 전력의 비로 표현된다. 일반적으로 Lange 커플러의 커플링 계수는 3 dB로 설계되며, 이는 입력 전력의 50%가 각각 두 출력 포트에 전달됨을 의미한다. 기판 유전율, 선로 길이와 폭, 선로 사이의 간격 등에 따라 C값이 결정되며, 이를 통해 원하는 대역폭과 커플링 특성을 구현할 수 있다.

III. 회로 설계

초광대역 다단 고출력 증폭 소자에 적용하기 위한 Lange 커플러를 마이크로스트립 라인으로 설계하였다. 본 설계에서 표 1과 같이 Lange 커플러의 포트를 정의하였다.

그림 2는 설계한 Lange 커플러의 주파수 응답 특성을 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 설계 대역폭 17~27 GHz 내에서 S₂₁은 -4.5~-3.2 dB, S₃₁은 -4~-3.5 dB로 나타나 입력 전력이 전달 포트와 결합 포트에 각각 절반씩 전달되고 있음을 볼 수 있다. 반사손실(S₁₁)은 설계 주파수 대역 내에서 -16.1 dB 이하로 양호한 정합 특성을 보였다.

표 1. Lange 커플러의 각 포트별 기능
Table 1. Port functions of the Lange-coupler.

Port	Function
P1 → P2 (S ₂₁)	Through port transmission
P1 → P3 (S ₃₁)	Coupled port transmission
P1 → P4 (S ₄₁)	Isolation port transmission
P1 → P1 (S ₁₁)	Input port reflection

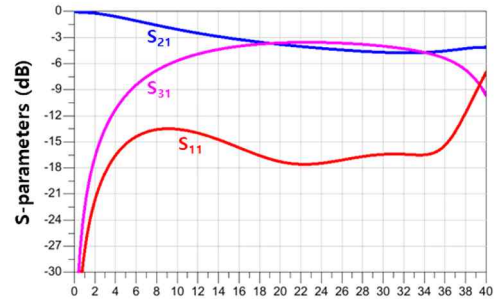


그림 2. Lange 커플러의 주파수 응답 특성 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulated frequency response of the Lange-coupler.

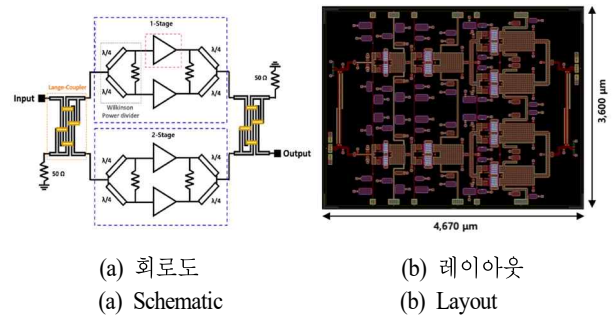
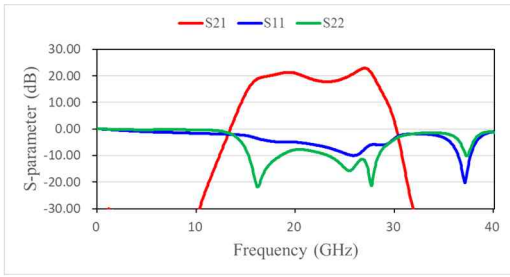


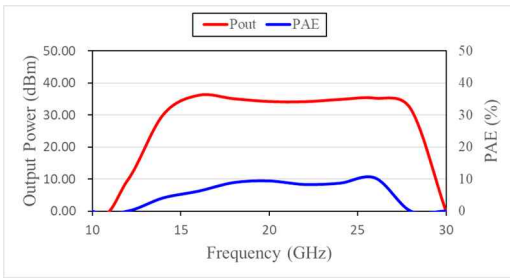
그림 3. 초광대역 다단 고출력 증폭 소자의 구조도
Fig. 3. Structure of the proposed high power amplifier.

그림 3은 Lange 커플러를 이용해 설계된 초광대역 다단 고출력 증폭 소자의 회로도와 레이아웃이다. 제안된 고출력 증폭 소자는 Lange 커플러를 입력단과 출력단에 배치하여 두 개의 단위 증폭기가 결합된 단위 증폭단을 전력 결합하도록 설계하였다. 이를 통해 전력 결합과 임/출력 정합 특성을 동시에 확보하였다. 단위 증폭기의 출력단엔 Wilkinson 전력 결합구조를 적용하여 소형화하였다. 또한, 단위 증폭단을 커플러의 전달 포트와 결합 포트에 근접 배치하여 신호 경로를 최소화하였고, 바이어스 회로와 GND Via는 간섭을 최소화하도록 배치하였다. 제안한 고출력 증폭 소자의 레이아웃 크기는 4.67×3.60 mm²이다.

그림 4는 초광대역 다단 고출력 증폭 소자의 단위 증폭기 시뮬레이션 결과이다. 단위 증폭기는 동작 주파수 범위 내에서 14.4 dB 이상의 이득을 가지는 것을 그림 4(a)를 통하여 볼 수 있다. 그림 4(b)는 단위 증폭기의 출력 및 전력부가효율 특성을 나타낸다. 시뮬레이션 결과 출력



(a) 이득
(a) Gain



(b) 출력 및 효율
(b) Output power and PAE

그림 4. 단위 증폭기의 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulated characteristics of the unit-cell amplifier.

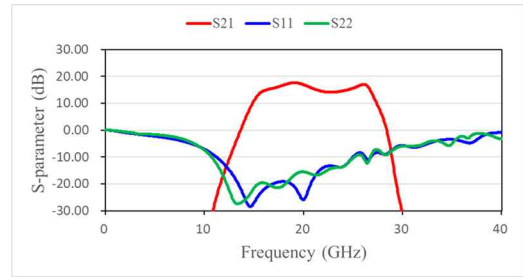
전력은 동작 주파수 대역 내에서 2.7 W (34.3 dBm) 이상, 전력 부가효율은 7.6 % 이상으로 나타났다.

그림 5는 초광대역 다단 고출력 증폭 소자의 시뮬레이션 결과를 보인다. 제안한 고출력 증폭 소자는 설계 대역폭 내에서 13.6 dB 이상의 이득을 가지는 것을 그림 5(a)에서 볼 수 있다. 그림 5(b)는 제안한 고출력 증폭 소자의 출력 특성과 전력부가효율 특성을 보인다. 시뮬레이션 결과 출력 전력 특성은 동작 주파수 대역 내에서 6.6 W (38.2 dBm) 이상으로 나타났고, 전력부가효율은 9.9 % 이상으로 나타났다.

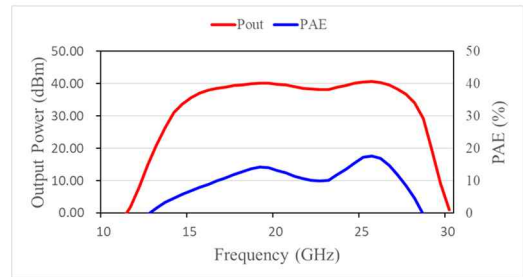
제안된 전력 결합 구조를 통해 시스템 출력 전력은 약 3.9 W(35.9 dBm), 전력 부가효율은 2.3 % 이상 향상된 결합 성능을 보였다.

IV. 제작 및 측정 결과

그림 6은 초광대역 다단 고출력 증폭 소자의 제작 사진

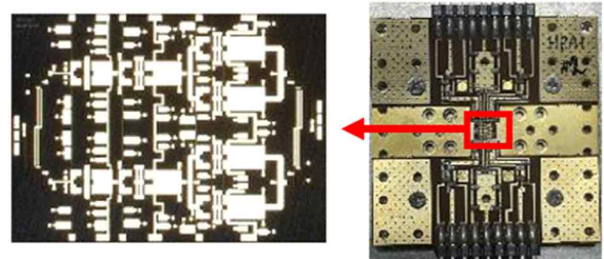


(a) 이득
(a) Gain



(b) 출력 및 효율
(b) Output power and PAE

그림 5. 초광대역 고출력 증폭 소자의 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulated characteristics of the proposed high power amplifier.

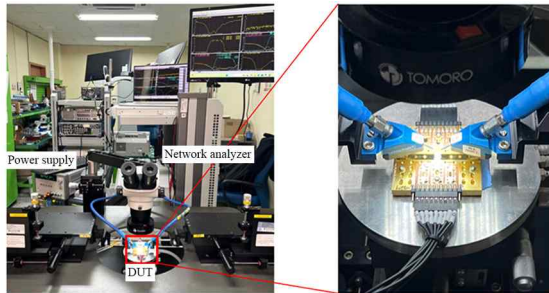


(a) 제작 사진
(a) Photograph
(b) 측정용 지그
(b) Measurement jig

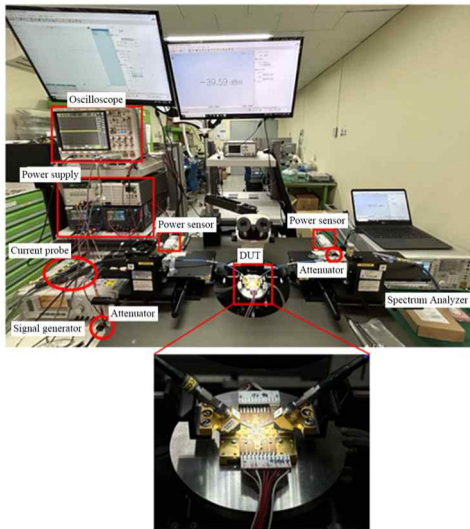
그림 6. 초광대역 고출력 증폭 소자의 제작 사진
Fig. 6. Photograph of the proposed high power amplifier.

과 측정용 지그의 형상을 나타낸다. 제안한 고출력 증폭 소자의 성능을 검증하기 위해 UMS(United Monolithic Semiconductors) 사의 0.15- μm 공정인 GH15-11 공정을 이용하여 제작하였다. 발열 제어 및 온웨이퍼 측정을 위해

고출력 증폭 소자 칩을 에폭시 본딩으로 캐리어에 접착하였고, 측정용 지그에 캐리어를 접착하였다. 에폭시 본딩은 방열 권장 두께인 0.5 mm로 설정하였다. 이를 통해 열적 안정성 및 기계적 접합의 신뢰성을 확보하였다. 또한 증폭 소자와 인쇄회로기판 간 전기적 연결은 와이어 본딩을 통하여 구현하였다. 신호 경로의 길이 및 기생 인덕턴스를 최소화하기 위해 최단 경로 및 대칭 구조로 배치하였다. 신호 입력은 전력 공급기를 통하여 인가 하였으며, 출력은 파워미터 및 스펙트럼 분석기를 통하여 측정하였다. 그림 7은 초광대역 다단 고출력 증폭 소자의 특성을 측

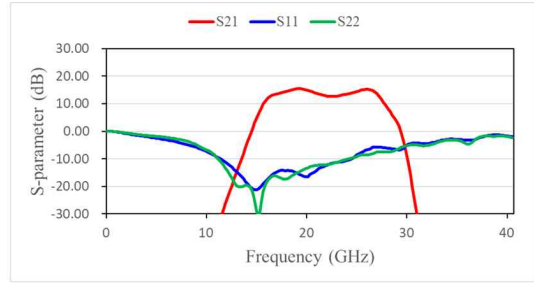


(a) 소신호 시험 환경
(a) Small-signal measurement setup

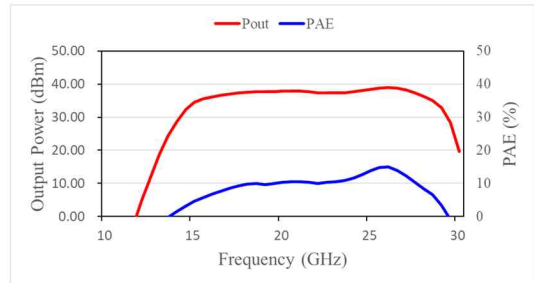


(b) 대신호 시험 환경
(b) Large-signal measurement setup

그림 7. 제안한 고출력 증폭 소자 측정 환경
Fig. 7. Measurement setup for the proposed high power amplifier.



(a) 이득
(a) Gain



(b) 출력 및 효율
(b) Output power and PAE

그림 8. 제안한 고출력 증폭 소자의 측정 결과
Fig. 8. Measured characteristics of the proposed high power amplifier.

정하기 위한 시험 환경을 나타낸다. 온웨이퍼 측정을 위해 프로브 스테이션을 이용하였다. 대신호 시험의 경우 파워 센서를 통하여 전력을 측정하였으며, 입력단과 출력단에서 측정되는 값이 실제 RF 프로브에서 측정하는 전력과 일치하도록 손실에 대한 보정을 수행하고 측정하였다.

그림 8은 초광대역 다단 고출력 증폭 소자의 측정 결과를 보인다. 그림 8(a)는 소신호 시험을 통해 측정한 주파수 응답 결과를 나타낸다. 입력 전력은 -15 dBm 이하 범위로 인가하였으며 네트워크 분석기를 이용하여 주파수 응답 특성을 측정하였다. 측정 결과 제안한 고출력 증폭 소자는 주파수 대역 내에서 12.7 dB 이상의 이득을 가져 시뮬레이션 대비 0.9 dB 낮은 결과를 보였다. 이는 제작 오차와 패키징 및 본딩 과정에서 발생하는 기생효과 등의 영향으로 볼 수 있다.

그림 8(b)는 대신호 시험을 통해 측정한 출력 전력 및 전력부가효율 결과를 나타낸다. 고출력 증폭소자의 출력

표 2. GaN 기반 고출력 증폭 소자 성능 비교
Table 2. Performance comparison of the GaN based high power amplifier.

	This work	Ref. [9]	Ref. [10]	Ref. [11]
Freq. (GHz)	F~F+10	18.5~24	25~27.5	27~29
BW (%)	45.4	25.9	9.5	7.1
P_{out} (W)	>5	>3.2	>4.0	>9
Gain (dB)	>12.7	>20	>10	>18
PAE (%)	>8.53	>40	>20.0	>25.0

특성을 확인하기 위하여 최대 효율 및 최대 포화전력 기준인 RF 입력전력은 29.6 dBm을 인가하였으며, 전원 공급 전압(V_{DD}) 및 전류(I_{DD})는 각각 25 V, 3.31 A를 인가하여 측정을 수행하였다. 측정 결과 초광대역 다단 고출력 증폭소자는 5 W 이상의 출력 전력과 8.53 % 이상의 최대 전력부가효율을 가졌다. 소신호 시험 측정결과와 같이 제작 오차와 패키징 및 본딩 과정에서 발생하는 기생효과 등의 영향으로 1.6 W 낮은 출력 전력을 보였지만, 전력부가효율은 시뮬레이션 결과와 유사한 값을 가졌다.

표 2는 제안한 초광대역 다단 고출력 증폭 소자와 최근 5년 이내 GaN 기반 150 nm 공정을 사용한 SHF 대역 고출력 증폭 소자 연구 결과의 성능을 비교한 결과를 보인다. 참고문헌 [9]는 3단 구조의 고출력 증폭 소자로 본 논문에서 제안한 고출력 증폭 소자보다 더 높은 이득과 전력부가효율을 가졌지만, 더 좁은 대역폭과 낮은 출력 특성을 가지는 것을 볼 수 있다. 참고문헌 [10] 및 참고문헌 [11]은 본 논문에서 제안한 고출력 증폭 소자와 유사한 Lange 커플러를 통한 전력 결합 구조의 GaN HEMT 소자 연구결과이다. 제안한 고출력 증폭 소자는 참고문헌 [10]과 비교하여 낮은 전력부가효율을 가졌지만, 넓은 대역폭에서 준수한 출력 및 고이득 특성을 가졌다. 참고문헌 [11]은 높은 이득과 전력부가효율을 보였지만, 제안된 고출력 증폭 소자와 비교하여 매우 좁은 대역폭을 갖는 것을 볼 수 있다. 비교 결과를 통해 제안된 고출력 증폭 소자는 매우 넓은 대역폭에서 고출력 특성을 갖는 것을 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Lange 커플러 기반의 초광대역 다단 고출력 증폭 소자를 설계하고 GaN HEMT 공정을 이용하여 구현하였다. 제안된 고출력 증폭 소자는 SHF 대역에서 45.4 %의 초광대역 특성을 가지고 5 W 이상의 안정적인 출력 전력을 제공하며, 12.7 dB 이상의 이득과 8.53 % 이상의 전력부가효율을 달성하였다. 이는 SHF 대역의 8 W 이하 출력 수준을 갖는 기존 GaN 기반 증폭 소자 연구 대비 넓은 대역폭에서 준수한 출력 특성을 보여 광대역 고출력 시스템을 위한 전력 증폭 소자로 활용할 수 있음을 보였다.

References

- [1] G. Amendola, D. Cavallo, T. Chaloun, N. Defrance, Goussetis G, and Margalef-Rovira M, et al., "Low-Earth orbit user segment in the Ku and Ka-band: An overview of antennas and RF front-end technologies," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 24, no. 2, pp. 32-48, Feb. 2023.
- [2] V. Jain, F. Tzeng, L. Zhou, and P. Heydari, "A single-chip dual-band 22–29-GHz/77–81-GHz BiCMOS transceiver for automotive radars," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 12, pp. 3469- 3485, Dec. 2009.
- [3] R. Reddy, S. Sinha, "State-of-the-art review: Electronic warfare against radar systems," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 57530-57567, Mar. 2025.
- [4] C. Huang, S. He, W. Shi, and B. Song, "Design of broadband high-efficiency power amplifiers based on the hybrid continuous modes with phase shift parameter," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 2, pp. 159-161, Feb. 2018.
- [5] H. Chen, J. X. Xu, Z. H. Kong, W. H. Chen, and X. Y. Zhang, "Broadband high-efficiency power amplifier with quasi-elliptic low-pass response," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 52566-52574, Mar. 2020.
- [6] Y. M. A. Latha, K. Rawat, "Design of ultra-wideband power amplifier based on extended resistive continuous class B/J mode," *IEEE Transactions on Circuits and*

Systems II: Express Briefs, vol. 69, no. 2, pp. 419-423, Feb. 2022.

- [7] V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello, D. P. Nguyen, H. Wang, and A. V. Pham, "A review of technologies and design techniques of millimeter-wave power amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 7, pp. 2957-2983, Jul. 2020.
- [8] J. Kim, "A review of Ku-band GaN HEMT power amplifiers development," *Micromachines*, vol. 15, no. 11, p. 1381, Nov. 2024.
- [9] M. R. Duffy, G. Lasser, G. Nevett, M. Roberg, and Z. Popović, "A three-stage 18.5–24-GHz GaN-on-SiC 4 W 40

% efficient MMIC PA," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 54, no. 9, pp. 2402-2410, Sep. 2019.

- [10] A. Piacibello, C. Ramella, V. Camarchia, and M. Pirola, "A balanced stacked GaN MMIC power amplifier for 26-GHz 5G applications," in *2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, San Diego, CA, Jun. 2023, pp. 331-334.
- [11] H. G. Ji, J. H. Jeong, and D. M. Kang, "Balanced GaN HPA MMIC for 5G FR2 band base station," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 6, pp. 444-449, Jun. 2023.

김 형 주 [LIG넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0009-0002-4762-8498>



2021년 2월: 숭실대학교 전자정보공학부 전자공학전공 (공학사)
 2024년 2월: 숭실대학교 전자정보공학부 정보통신공학과 (공학석사)
 2024년 1월~현재: LIG넥스원 연구원
 [주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, EMC 등

문 효 상 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1128-7249>



2006년 8월: 경희대학교 전파통신공학과 (공학사)
 2008년 8월: 경희대학교 전파공학과 (공학석사)
 2008년 7월~현재: LIG넥스원 수석연구원
 [주 관심분야] 전자전 시스템, 안테나, EM 시뮬레이션

김 재 현 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7403-7135>



2012년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
 2014년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)
 2019년 8월: 숭실대학교 전자공학과 (공학박사)
 2020년 6월~2022년 4월: (주)피코젠 책임

연구원

2022년 5월~2023년 5월: 한국자동차연구원 연구원

2023년 5월~현재: LIG넥스원 선임연구원

[주 관심분야] 전자전 시스템, 안테나

이 왕 용 [LIG넥스원/연구위원]

<https://orcid.org/0000-0002-9955-5983>



2007년 2월: 아주대학교 전자정보공학과 (공학석사)
 1995년 8월~현재: LIG넥스원 연구위원
 [주 관심분야] 전자전 시스템, 전파교란, 전자공격 등