THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2026 October; 37(10), 985～988.

https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2026.37.10.985
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

3.3～3.8 GHz InGaP/GaAs HBT 2단 차동전력증폭기의 단간 정합 토폴로지별 성능 비교 분석

Performance Comparison and Analysis of Interstage Matching Topologies for a 3.3～3.8 GHz InGaP/GaAs HBT Two-Stage Differential Power Amplifier

정 진 호[1] · 박 성 준[2*] · 전 주 영[3*]

Jinho Jeong[1] · Sung-Joon Park[2*] · Jooyoung Jeon[3*]

요 약

본 논문은 5G NR n78 대역(3.3～3.8 GHz)을 위한 2 μm InGaP/GaAs HBT 기반 2단 차동 전력증폭기(PA)에서 온칩 차동 변압기(토폴로지 I), 오프칩 집중 소자 정합 회로(토폴로지 Ⅱ), 온칩 단일-차동 변환 변압기(토폴로지 Ⅲ) 세 가지 단간 정합 토폴로지가 이득, 출력 전력 및 전력부가효율(PAE)에 미치는 영향을 동일한 증폭단 MMIC와 부하 조건하에서 실측 기반으로 비교 분석한다. 실측 결과, 토폴로지 I은 전 대역에서 가장 높은 선형 이득(30.3～31.4 dB)을 확인하였으며, 토폴로지 II는 3.55 GHz에서 최대 PAE 39.1 %를 달성하였다. 토폴로지 III는 전 대역에서 가장 안정적인 PAE(39.8～41 %)와 P_{sat}(35.1～35.3 dBm)을 나타내었다. 최종적으로 토폴로지별 PA 특성 및 권장 용도를 정리함으로써, 본 연구 결과는 n78 대역 PA 설계 시 단간 정합 구조 선정을 위한 실측 기반의 설계 지침을 제공한다.

Abstract

This study presents a measurement-based comparison of three interstage matching topologies－an on-chip differential transformer (Topology I), an off-chip lumped-element matching network (Topology Ⅱ), and an on-chip single-ended-to-differential transformer (Topology Ⅲ)－implemented in a two-stage differential power amplifier (PA) based on 2 μm InGaP/GaAs HBT technology for the 5G NR n78 band (3.3～3.8 GHz). The impact of each topology on gain, output power, and power-added efficiency (PAE) is evaluated under identical main-stage MMIC and loading conditions. Measurement results show that Topology I achieves the highest linear gain of 30.3～31.4 dB across the band, Topology Ⅱ achieves a peak PAE of 39.1 % at 3.55 GHz, and Topology Ⅲ demonstrates the most stable PAE of 39.8～41 % with a P_{sat} of 35.1～35.3 dBm across the entire band. By summarizing the PA characteristics and recommended applications for each topology, this study provides measurement-based design guidelines for selecting interstage matching structures in the n78-band PA design.

Key words: 5G NR, n78 Band, InGaP/GaAs HBT, Power Amplifier, Inter-Stage Matching Network

「본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다 (2026-ANCHOR-10-004).」

「이 논문은 강원대학교 강릉캠퍼스 LPKF U4 장비를 활용하여 수행한 연구 결과입니다.」

강원대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kangwon National University)

*강원대학교 전자·반도체공학부(Department of Electronic and Semiconductor Engineering, Kangwon National University)

1: 석사과정(https://orcid.org/0009-0001-5809-4148) 2: 교수(https://orcid.org/0000-0003-4222-825X), 3: 부교수(https://orcid.org/0000-0001-7928-8956)

· Manuscript received July 3, 2026 ; Revised August 6, 2026 ; Accepted August 25, 2026. (ID No. 20260703-028S)

· Corresponding Author: Jooyoung Jeon (e-mail: jyjeon@kangwon.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서 론

5G NR 단말용 전력증폭기(PA)는 넓은 동작 대역과 높은 전력 효율, 충분한 이득을 동시에 확보하는 것이 중요하다. 그림 1과 같이 구동단과 증폭단으로 구성된 2단 PA에서는 두 단을 연결하는 단간 정합 회로가 임피던스 변환과 신호 전달 특성을 결정하는 핵심 설계 요소이다. 기존 연구에서는 온칩 변압기를 활용한 차동 PA[1], 출력 정합망 대역폭 최적화[2], 단간 직접 전력 분배 기반 도허티 PA[3] 등 다양한 PA 설계 기법이 제안되었으나, 동일한 조건에서 서로 다른 단간 정합 토폴로지를 실측하여 직접 비교한 연구는 제한적이다.

본 논문에서는 동일한 2 μm InGaP/GaAs HBT 공정 MMIC를 사용하여 제작된 n78 대역 2단 차동 PA에 세 가지 단간 정합 토폴로지—온칩 차동 변압기(토폴로지 I), 오프칩 집중 소자 정합 회로(토폴로지 Ⅱ), 온칩 단일-차동 변환 변압기(토폴로지 Ⅲ)—를 적용하고 각각의 성능을 실측 기반으로 비교 분석함으로써 토폴로지별 구조적 특성에 따른 설계 가이드라인을 제시한다.

Ⅱ. 전력증폭기 단간 정합 토폴로지

단간 정합 회로는 구동단과 증폭단 사이의 임피던스 변환과 차동 신호의 크기 및 위상 평형을 결정하는 핵심 요소로, PA의 이득, 출력 전력 및 PAE에 영향을 미친다. 본 논문에서 비교한 세 가지 PA는 동일한 증폭단 MMIC 및 부하 조건을 사용하였다. 다만, 토폴로지 Ⅲ는 구동단을 단일 종단 구조로 통합하여 구동단 트랜지스터 크기가 720 μm²(단일 소자)로, 토폴로지 Ⅰ, Ⅱ의 540 μm²(총합 1,080 μm²)와 상이하다. 구동단 크기의 차이는 이득 및 전력 특성에 일부 영향을 줄 수 있으나, 세 토폴로지는 동일한 5,040 μm²의 증폭단과 부하 조건을 적용하였으므로 그 영향은 제한적이며, 본 연구에서는 단간 정합 토폴로지에 따른 성능 차이를 중심으로 비교하였다. 그림 2에 PA 회로도 및 MMIC 레이아웃을 나타내었다. 주요 공통 사양은 표 1과 같다.

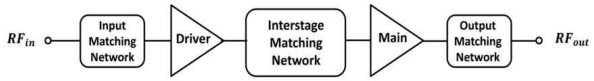
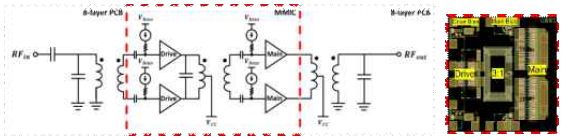
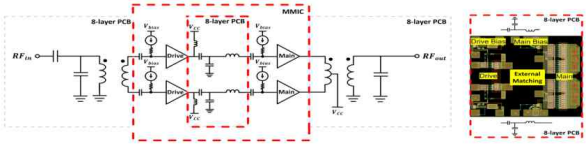


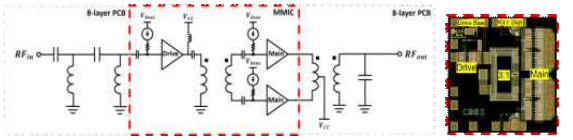
그림 1. 2단 전력증폭기의 기본구조
Fig. 1. Basic structure of the two-stage power amplifier.



(a) 토폴로지 Ⅰ
(a) Topology Ⅰ



(b) 토폴로지 Ⅱ
(b) Topology Ⅱ



(c) 토폴로지 Ⅲ
(c) Topology Ⅲ

그림 2. PA 회로도 및 MMIC 레이아웃
Fig. 2. PA circuit diagram and MMIC layout.

2-1 토폴로지 Ⅰ: 온칩 차동 변압기

단간 정합 변압기를 MMIC 내부에 집적한 차동 구조로, 권선비 3:1을 통해 구동단의 출력임피던스를 증폭단의 최적 입력 임피던스로 정합한다. 외부 기생 성분을 최소화하고 광대역 이득 확보에 유리하다. 구동단 트랜지스터 크기는 540 μm²(총합 1,080 μm²)이다.

표 1. 공통 설계 조건 및 사양
Table 1. Common design conditions and specifications.

Parameter	Value	Unit
Process	2 μm InGaP/GaAs HBT	-
Operation freq.	3.3~3.8	GHz
Supply voltage	5.5	V
Main emitter size	5,040	μm²
Driver emitter size	1,080 (Ⅰ,Ⅱ)/720 (Ⅲ)	μm²
$Gain_{peak}$	30	dB
P_{sat}	36	dBm
PAE_{peak}	50	%

2-2 토폴로지 Ⅱ: 오프칩 집중 소자 정합

단간 정합을 MMIC 외부의 다층 PCB상에 집중 소자를 실장하여 2-section 정합회로를 구현한 하이브리드 구조로서 제작 후 소자 값 조정을 통한 임피던스 튜닝 유연성이 높으며 동일한 MMIC 및 PCB를 활용하여 유사한 여러 제품을 개발 시에 유리하다. 구동단 트랜지스터 크기는 토폴로지 Ⅰ과 동일한 540 μm²(총합 1,080 μm²)이다.

2-3 토폴로지 Ⅲ: 온칩 단일-차동 변환 변압기

구동단을 단일 종단(single-ended) 구조로 유지하고, 3:1 변압기를 통해 증폭단에 차동 신호를 공급하는 단일-차동 구조로서 차동 구조(토폴로지 Ⅰ, Ⅱ)에 비해 구동 트랜지스터 크기를 720 μm²(단일 소자)로 축소하였다. 이는 차동 경로의 의도치 않은 공정상 비대칭 요소를 억제하고 DC 바이어스를 단일화할 수 있으며, 구동단 레이아웃 면적 감소에도 유리하다.

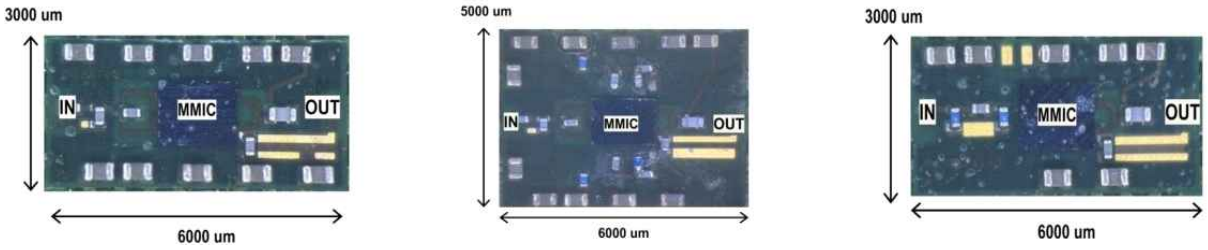
Ⅲ. 제작 및 측정 결과

세 가지 단간 정합 토폴로지는 공정한 성능 비교를 위해 모두 동일한 8층 PCB 환경에서 제작 및 측정하였다. WIN Semiconductors 사에 의뢰하여 제작한 MMIC를 단간 정합 구조만을 달리한 세 가지 모듈을 그림 3에 나타내었다. EVB(evaluation board)는 LPKF U4를 이용하여 제작 및 실장한 후 측정을 수행하였다. 측정 환경에 의한 오차를 최소화하고자 세 모듈 모두 동일한 측정 셋업을 사용하여 평가하고 대신호 측정결과를 표 2에 정리하였으며, PAE의 주파수 특성은 그림 4에 나타내었다. 이를 통해 각 토폴로지의 성능을 비교하였다.

- 토폴로지 Ⅰ (온칩 차동 구조): 집적화된 변압기의 광대역 특성을 바탕으로 세 구조 중 가장 높은 선형 이득(Gain: 30.3～31.4 dB)을 제공함을 확인하였다. 하지만 차동 구조 내 입출력 변압기 간의 상호 간섭 및 정합 오차로 인해 PAE는 목표 대비 낮게 관측되었다.
- 토폴로지 Ⅱ (오프칩 집중 소자 정합 구조): 외부 SMD를 활용한 포스트 튜닝을 통해 3.55 GHz에서 최대 39.1 %의 PAE를 달성하며 특정 주파수에서의 최적화 가능성을 입증하였다. 그러나 SMD 기반의 정합 회로는 주파수에 따른 리액턴스 변화와 실장 기생 성분의 영향으로 세 구조 중 성능 편차가 가장 크게 나타났다.
- 토폴로지 Ⅲ (온칩 단일-차동 변환 구조): 전 대역에 걸쳐 가장 안정적인 효율 특성을 유지하였으며, 특히 3.8 GHz에서 약 40 % 수준의 높은 PAE를 기록하였다. 이는 구동단을 단일 구조로 구성함으로써 입력 변압기 단계에

표 2. 대신호 측정 결과 비교
Table 2. Comparison of large-signal measurement results.

Characteristics	Topology	3.3 GHz	3.55 GHz	3.8 GHz
P_{sat} (dBm)	Ⅰ	34.5	35	34.9
	Ⅱ	34.7	35.2	33.8
	Ⅲ	35.1	35.3	35.3
PAE_{peak} (%)	Ⅰ	33.1	38	37
	Ⅱ	29.2	39.1	28.5
	Ⅲ	41	41	39.8
$Gain_{peak}$ (dB)	Ⅰ	30.3	31.4	30
	Ⅱ	26.7	28.6	24.8
	Ⅲ	29.8	29.7	28.3



(a) 토폴로지 Ⅰ (b) 토폴로지 Ⅱ (c) 토폴로지 Ⅲ
(a) Topology Ⅰ (b) Topology Ⅱ (c) Topology Ⅲ

그림 3. 제작된 토폴로지별 PA 모듈 사진
Fig. 3. Photographs of the fabricated PA modules for each topology.

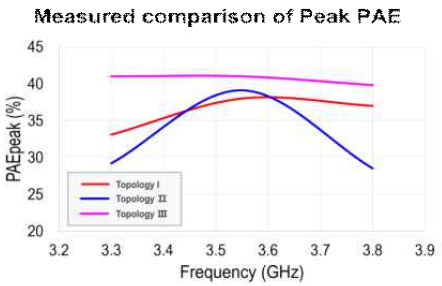


그림 4. 토폴로지별 최대 전력부가효율 특성 비교
Fig. 4. Comparison of maximum power-added efficiency among different topologies.

서의 위상 불균형 문제를 구조적으로 해결하고, 전력 합성 효율을 극대화한 결과로 분석된다.

Ⅳ. 고찰 및 분석

분석 결과로부터 토폴로지별로 이득과 PAE 사이에서 상호 절충이 뚜렷한 것을 확인할 수 있다. 토폴로지 I은 전 대역에서 가장 높은 선형 이득에 유리하나, PCB 입력 변압기 단계부터 차동 경로로 분리되어, 차동 구조 내 변압기 간 상호 간섭 및 +/− 경로 간 소자 특성 불일치로 인한 위상 불균형이 누적되어 PAE 안정성 측면에서 불리하였다. 토폴로지 Ⅱ는 포스트 튜닝을 통해 특정 주파수에서 높은 PAE를 달성할 수 있으나, 주파수 변화에 따른 성능 편차가 가장 크게 나타나 광대역 환경 적용에 한계가 있다. 반면 토폴로지 Ⅲ는 이득이 상대적으로 낮지만 구동단을 단일 구조로 통합함으로써 위상 불균형 요인을 구조적으로 억제하여 전 대역에서 PAE(39.8~41 %)를 나타냈다. 이를 토대로 설계 목표에 따른 토폴로지 선정 가이드라인을 표 3에 정리하였다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 3.3~3.8 GHz n78 대역 모바일 기기용 2단 전력증폭기 설계를 위해 2 μm InGaP/GaAs HBT 공정 기반의 세 가지 단간 정합 토폴로지를 동일 조건에서 제작 및 실측 비교하였다. 세 토폴로지 간에는 이득과 PAE 사이의 상호 절충 관계가 뚜렷하였으며, 특히 온칩 단일-차동 변환 변압기(토폴로지 Ⅲ)는 위상 불균형을 구조적으로 억제하여 전 대역에서 가장 안정적인 PAE를 달성하는 데 유리함을 실측을 통해 확인하였다.

표 3. 단간 정합 토폴로지별 특성 비교 및 가이드라인
Table 3. Characteristics and design guidelines of different interstage matching topologies.

Topology	Benefits	Drawbacks	Recommended applications
I (on-chip differential transformer)	High integration, wideband gain	No post-fabrication tuning	Wideband PA under area constraints
Ⅱ (off-chip lumped-element matching)	High tuning flexibility, good component sharing	Device-variation sensitivity	Shortened PA development time and rapid validation
Ⅲ (on-chip single-ended-to-differential transformer)	Consistent PAE over frequency and smaller layout area	Low gain	High-yield, stable-efficiency applications

본 결과는 n78 대역 PA 설계 시 단간 정합 구조 선정을 위한 실측 기반 설계 지침으로 활용될 수 있으며, 향후 정밀 모델링과 구동단 로드라인 최적화를 통해 전체 성능 개선에 기여할 수 있다.

References

[1] S. Kang, M.-S. Jeon, and J. Kim, "Highly efficient 5.15- to 5.85-GHz neutralized HBT power amplifier for LTE applications," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 3, pp. 254-256, Mar. 2018.

[2] W. Lee, H. Kang, H. Lee, W. Lim, J. Bae, and H. Koo, et al., "Broadband InGaP/GaAs HBT power amplifier integrated circuit using cascode structure and optimized shunt inductor," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 12, pp. 5090-5100, Dec. 2019.

[3] H. Oh, J. Shin, H. Jeon, Y. Y. Woo, K. C. Hwang, and K. Y. Lee, et al., "Broadband InGaP/GaAs HBT Doherty power amplifier IC using direct interstage power division for compact 5G NR handset module," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 25879-25892, Mar. 2023.