

## 26.5~29.5 GHz 6비트 스위치 필터형 위상천이기

## 26.5~29.5 GHz 6-Bit Switched-Filter Phase Shifter

송재혁<sup>1</sup> · 임정택<sup>2</sup> · 이재은<sup>3</sup> · 손정택<sup>4</sup> · 김준형<sup>5</sup> · 백민석<sup>6</sup> · 이은규<sup>7</sup> · 최선규<sup>8</sup> · 김철영<sup>9</sup>Jae-Hyeok Song<sup>1</sup> · Jeong-Taek Lim<sup>2</sup> · Jae-Eun Lee<sup>3</sup> · Jeong-Taek Son<sup>4</sup> · Joon-Hyung Kim<sup>5</sup> ·  
Min-Seok Back<sup>6</sup> · Eun-Gyu Lee<sup>7</sup> · Sun-Kyu Choi<sup>8</sup> · Choul-Young Kim<sup>9</sup>

## 요 약

본 논문은 150-nm GaN HEMT 공정으로 설계 및 제작된 6비트의 위상천이기에 관한 내용이다. 5G NR 표준 중 n257(26.5~29.5 GHz) 대역에서 동작하는 스위치 필터형 위상천이기를 설계하였다. 설계된 위상 천이기는 360°의 위상을 5.625°씩 변화시키기 위해 180°부터 5.625°까지의 6개 단일 위상천이기를 사용하였으며, 지연 경로를 구성하는 필터의 구성 소자 크기를 줄이기 위해 LCL의 저역 통과 T형 필터를 사용하였다. 180° 위상천이기는 저역과 고역 통과 T형 필터를 혼합하였다. 제작된 위상천이기는 26.5~29.5 GHz에서 평균 삽입손실은 8.45 dB이며, RMS 위상오류는 4.54° 이하이다. 본 논문의 위상천이기는 낮은 비트당 삽입손실과 적은 RMS 위상오류를 갖는다.

## Abstract

This paper presents a 6-bit phase shifter designed and fabricated using a 150-nm GaN HEMT process. The designed phase shifter operates in the n257 (26.5-29.5 GHz) band of the 5G NR standard, and the structure of a switched-filter phase shifter is used. The designed phase shifter connects six single-bit phase shifters in series from 180° to 5.625° to change the phase within the phase range of 360°. An LCL low-pass T-type filter is used to reduce the size of the filter element. The 180° phase shifter mixes low-pass and high-pass T-type filters. The fabricated phase shifter has an average insertion loss of 8.45 dB and an RMS phase error of less than 4.54° at 26.5-29.5 GHz. Herein, the phase shifter had a low insertion loss per bit and a small RMS phase error.

Key words: 5G NR (n257), GaN pHEMT, Phase Shifter, STPS, T-Type Filter

## I. 서 론

5세대 통신(5G)의 발전과 상용화가 시작되면서 3GPP

에서는 새로운 주파수 대역인 n257(26.5~29.5 GHz) 주파수 대역을 5G NR(new radio) 표준으로 정의하였다. 해당 대역을 여러 국가에서 채택하고 있으며 사용자 장비(UE,

「본 과제(결과물)는 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다 (2021RIS-004).」

충남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungnam National University)

1: 박사과정(<https://orcid.org/0000-0003-3736-2753>), 2: 박사과정(<https://orcid.org/0000-0002-2698-6942>), 3: 석·박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0001-6616-6503>),

4: 석·박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0003-4794-5813>), 5: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0002-6873-9034>), 6: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0002-3651-4498>),

7: 박사후연구원(<https://orcid.org/0000-0002-3835-2226>), 8: 박사후연구원(<https://orcid.org/0000-0002-7533-4975>), 9: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-5532-7399>)

· Manuscript received December 30, 2022 ; Revised January 26, 2023 ; Accepted February 22, 2023. (ID No. 20221230-112)

· Corresponding Author: Choul-Young Kim (e-mail: [cykim@cnu.ac.kr](mailto:cykim@cnu.ac.kr))

user equipment) 장치에 대해 교차 네트워크 로밍을 지원하기 위한 밀리미터파 시스템이 필요하다<sup>[1]</sup>. 고속 데이터 통신을 위한 5G 시스템 주파수 대역에서는 높은 전송 손실을 극복하는 방법으로 많은 수의 안테나를 사용한 위상배열 시스템이 적용되고 있다. 위상배열 시스템은 빔조향을 이용하여 신호 대 잡음비(SNR, signal-to-noise ratio)를 개선하고, 공간 선택성을 갖는다<sup>[2]</sup>. 빔조향 방향에 따라 각 안테나와 연결된 RF 단의 위상을 조절하는 위상천이기는 필수 회로이다. 위상천이기는 제어 신호에 따라 단일 비트 위상을 제어하여 360° 위상을 제어한다. 세밀한 빔조향을 위해 더 많은 단일 비트 위상천이기가 필요하나, 각 위상천이기가 갖는 삽입손실이 크기 때문에 제한 없이 여러 비트를 사용할 수 없다. 또한, 위상천이기의 위상 조절에 따라 반사 손실, 삽입손실이 변하고 위상오류가 발생하기 때문에 모든 위상제어 상태를 고려한 설계가 필요하다. GaN 기반 위상천이기는 광대역 동작에 유리하며 큰 전력 처리 능력과 고주파 대역에서의 우수한 효율성과 선형성을 보여준다. 또한, 고출력 GaN 전력 증폭기와 같은 다른 RF 회로와의 통합에 유리하다<sup>[3]</sup>.

본 논문에서는 5G NR 표준인 n257(26.5~29.5 GHz) 주파수 대역에서 위상배열 시스템에 적용 가능한 위상천이기를 설계하였다. 설계된 위상천이기는 스위치 필터형 단일 위상 천이기를 이용하여 6비트로 구성하였으며, 낮은 삽입손실과 적은 위상 오류를 갖도록 최적화하였다. 설계된 위상천이기는 150-nm GaN HEMT 공정을 이용하여 제작 및 측정되었다.

## II. 위상천이기 설계

STPS(switched-type phase shifter)는 전력 소비 없이 디지털 제어 및 양방향 기능 등의 강점을 가진다. STPS는 각각의 위상 조절을 위한 단일 비트 위상천이기를 직렬로 연결하여 구성된다. STPS는 180° 단일 비트 위상천이기를 기본으로 제어 비트가 늘어날수록 절반의 각을 갖는 단일 비트 위상천이기를 갖는다. 그림 1은 6비트 설계된 위상천이기의 블록다이어그램을 나타낸다. 180°부터 5.625°의 6개의 단일 비트 위상천이기를 직렬연결하여 빔조향 범위인 360°를  $64(=2^6)$ 등분한 5.625°씩의 조절이 가

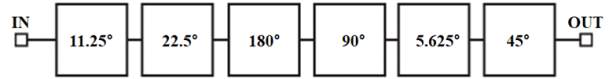


그림 1. 6비트 위상천이기의 블록다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of 6-bit phase shifter.

능하다. 위상천이기의 특성과 입력 및 출력 반사 손실을 고려하여 각 단일 비트 위상천이기의 순서를 배치하였으며, 90°와 180°의 특성이 가장 민감하여 중앙에 배치하였다. 그림 2는 LCL T형 필터가 적용된 단일 비트 위상천이기의 회로도이다. GaN과 같은 화합물 공정에서 CMOS와 달리 전송선로와 접지면이 멀어 인덕턴스가 상대적으로 크게 보인다. 따라서, 인덕터를 비교적 작게 설계할 수 있으며, 이에 따라 LCL 구조의 T형 필터가 구현에 유리하다. 또한, 커패시터를 연결하기 위한 선로의 기생 인덕턴스에 의해 필요한 커패시터의 값이 증가할 수 있어 최소 길이의 선로를 사용하였으며, 전체 레이아웃에 대하여 전자기장(EM, electromagnetic) 시뮬레이션을 진행하여 기생 소자의 영향을 반영하였다. 지연 경로를 구성하는 L1과 C1은 식 (1)에 의해 값이 결정되며<sup>[4]</sup>, 트랜지스터 M1은 기생 커패시터와 L1의 공진이 발생하도록 결정된다. 트랜지스터 M2와 L2는 경로 선택에 따라 a에서 개방과 단락으로 보이도록 결정하였다. 단일 필터를 사용하는 위상천이기는 90°보다 큰 위상에서 삽입손실이 매우 커져 180° 위상천이기 구현에 적합하지 않다. 따라서, 180° 위상천이기는 그림 2(b)의 저역 및 고역 통과 T 필터를 스위

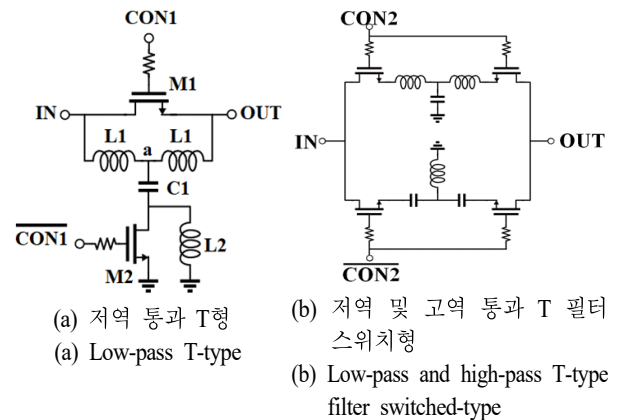


그림 2. 단일 비트 위상천이기의 회로도  
Fig. 2. Schematic of single phase shifter.

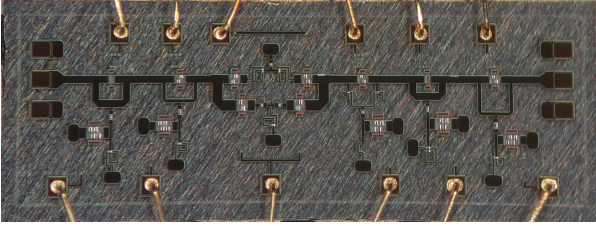


그림 3. 제작된 위상천이기의 현미경사진  
Fig. 3. Photomicrograph of fabricated phase shifter.

칭하는 구조를 사용하였다. 저역 및 고역 통과 T 필터를 각각 위와 아래 경로에 사용한 180° 단일 비트 위상천이기는 두 경로의 위상 지연이 -90°와 +90°이 되도록 T형 필터를 구현하였고, 경로에 따라 상대 위상 지연이 0°와 180°가 되도록 하였다.

$$L1 = \frac{Z_0 \tan |\Phi/2|}{\omega_0}, C1 = \frac{\sin |\Phi|}{\omega_0 Z_0} \quad (1)$$

그림 3은 n257(26.5~29.5 GHz) 주파수 대역에 맞춰 설계된 위상천이기를 150-nm GaAs HEMT 공정을 통해 제작한 현미경 사진이다. 위상천이기의 크기는 RF 및 DC 패드를 포함하여 3.06×1.13 mm<sup>2</sup>이다. 위상 천이를 위한 제어 전압은 측정용 PCB(printed circuit board)에 와이어 본딩하여 인가하였으며, GSG(ground-signal-ground) 프로브팁을 이용하여 온 웨이퍼 측정을 진행하였다. 제어 전압은 on 상태일 때 0 V이며, Off 상태일 때 -3.5 V이다. -3.5 V의 동작에서 최소 RMS Phase error를 갖는다.

### III. 측정 결과

그림 4~그림 7은 n257 위상천이기의 측정 결과이다. n257(26.5~29.5 GHz) 대역에서 반사 손실은 8.91 dB 이상이고, 평균 삽입 손실은 8.45 dB이며, 제곱평균제곱근(RMS, root mean square) 위상 오류와 삽입 손실 오류는 각각 4.54°, 2.22 dB 이하이다.

표 1은 제작된 위상천이기와 기존 연구 간의 성능 비교를 나타내었다. 제작된 위상천이기는 다른 위상천이기와 비교하여 제어 비트의 수가 많아 세밀한 위상 조절이 가능하고, 단위 비트당 삽입손실이 가장 낮으며, 가장 낮은 RMS 위상 오류를 갖는다.

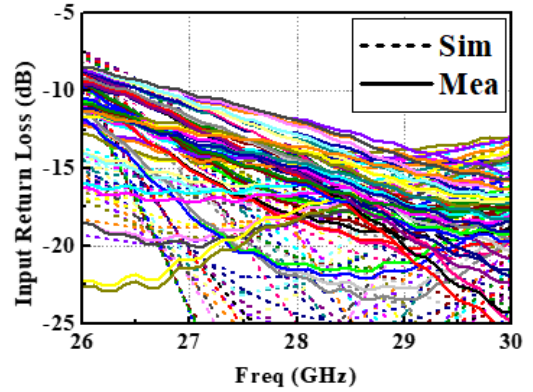


그림 4. n257 위상천이기의 입력 반사 손실  
Fig. 4. Input return loss of n257 phase shifter.

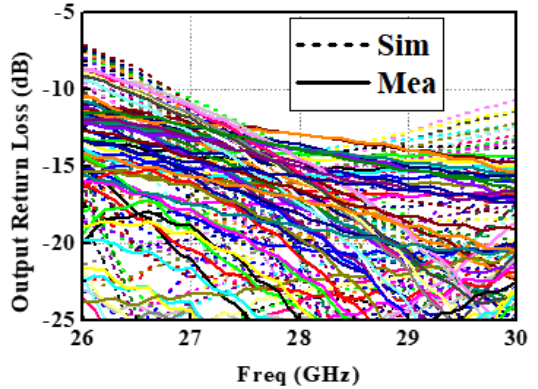


그림 5. n257 위상천이기의 출력 반사 손실  
Fig. 5. Output return loss of n257 phase shifter.

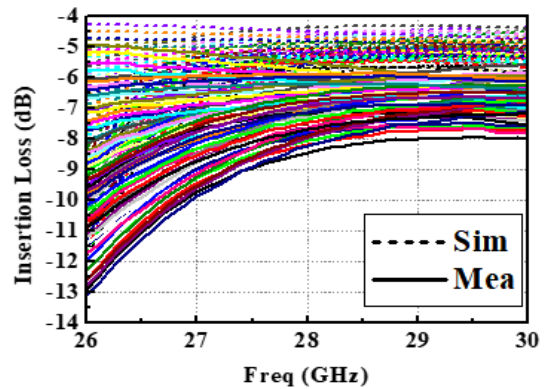


그림 6. n257 위상천이기의 삽입 손실  
Fig. 6. Insertion loss of n257 phase shifter.

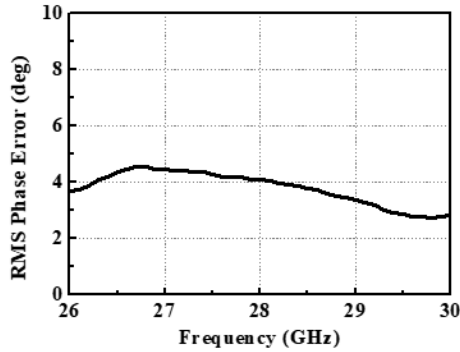


그림 7. n257 위상천이기의 RMS 위상 오류  
Fig. 7. RMS phase error of n257 phase shifter.

표 1. 위상천위기 성능 비교  
Table 1. Comparison with other works.

Ref.	This work	Ref. [5]	Ref. [6]
Process	150-nm GaN	250-nm BiCMOS	22-nm FD-SOI CMOS
Topology	STPS	VP-APN	STPS
Freq. [GHz]	26.5-29.5	24-30	24-29.5
FBW [%]	10.7	22.2	20.5
No. of bit	6	2	4
Resolution [°]	5.625	45	22.5
IL [dB]	8.45±3.35	9±0.15	13.5±2.5
IL per bit [dB]	1.4	4.5	3.37
Return loss [dB]	> 8.91	> 10	> 7
RMS IL error [dB]	< 2.22	< 0.5	N/A
RMS PE [°]	< 4.54	< 5	< 5
Area [mm <sup>2</sup> ]	3.45*	0.28	0.15

\*With RF and DC pad.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 5G NR 표준 n257(26.5~29.5 GHz)에서 동작하는 위상천이기를 150-nm GaN HEMT 공정을 사용하여 설계 및 제작하였다. 제작된 위상천이기는 6비트 제어 스위치 필터형으로 구성되었으며, 측정된 위상천이기는 낮은 비트당 삽입손실과 적은 위상 오류를 달성하였다.

#### References

- [1] J. H. Lee, J. S. Park, and S. C. Hong, "Frequency reconfigurable dual-band CMOS power amplifier for millimeter-wave 5G communications," in *2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium(IMS)*, Atlanta, GA, Jun. 2021, pp. 846-849.
- [2] E. V. P. Anjos, D. Schreurs, G. A. E. Vandenbosch, and M. Geurts, "A compact 26.5~29.5-GHz LNA-phase-shifter combo with 360° continuous phase tuning based on all-pass networks for millimeter-wave 5G," *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, vol. 68, no. 9, pp. 3927-3940, Sep. 2021.
- [3] F. L. Pour, R. T. Reed, and D. S. Ha, "Design and performance investigation of a temperature compensated transmitter with GaN HEMTs for phased-array applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 7, pp. 3640-3651, Jul. 2022.
- [4] H. S. Lee, B. W. Min, "W-Band CMOS 4-bit phase shifter for high power and phase compression points," *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs*, vol. 62, no. 1, Jan. 2015.
- [5] E. V. P. Anjos, D. M. M. P. Schreurs, G. A. E. Vandenbosch, and M. Geurts, "A 24~30 GHz ultra-compact phase shifter using all-pass networks for 5G user equipment," in *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS)*, Los Angeles, CA, Aug. 2020, pp. 217-220.
- [6] E. Kobal, T. Siriburanon, R. B. Staszewski, and A. Zhu, "A 28-GHz switched-filter phase shifter with fine phase-tuning capability using back-gate biasing in 22-nm FD-SOI CMOS," in *ESSCIRC 2021-IEEE 47th European Solid State Circuits Conference(ESSCIRC)*, Grenoble, Sep. 2021, pp. 377-380.