

능동 인덕터를 이용한 0.15- μm GaAs pHEMT 기반 W-대역 VCO 설계

A W-band Compact and Wideband VCO Using Active Inductor in 0.15- μm GaAs pHEMT Technology

김 동 교^{*,★}

Dongkyo Kim^{*,★}

Abstract

This paper presents a varactor-less voltage-controlled oscillator (VCO) at W-band (75-110 GHz) with a compact size in a 0.15- μm GaAs pHEMT technology. For varactor-less frequency tuning, an inductive tuning circuit is employed. An active inductor is realized by the common-gate stage with gate termination and shows a wide tuning range with a high quality factor (Q-factor) compared with the conventional varactor diode. Colpitts topology with source feedback is employed for the oscillation core of the VCO. The varactor-less VCO exhibits a measured tuning range of 5.8 % and peak output power of 5.7 dBm at 88 GHz while the 146 mW of dc power is dissipated. Due to compact layout design, the chip size is only 0.48 mm².

요 약

본 논문에서는 0.15- μm GaAs pHEMT 공정을 이용하여 설계된 버랙터 없는 W-band(75-110 GHz) 전압제어 발진기(VCO)를 소개한다. 능동 인덕터를 활용하여 버랙터 없는 주파수 조절을 구현하였으며 능동 인덕터 회로는 게이트가 중단된 공통 게이트 스테이지를 이용하였다. 해당 능동 인덕터는 시뮬레이션 결과 기존의 버랙터 다이오드와 비교하여 넓은 주파수 조절 범위와 높은 Q-인자를 갖는다. 발진기 코어는 소스 피드백이 포함된 Colpitts 구조를 사용하였다. 구현된 버랙터 없는 W-band VCO의 측정 결과 88 GHz에서 5.7 dBm의 높은 출력 전력과 5.8 %의 주파수 조절 범위를 얻었으며 이 때 dc 전력 소모는 146 mW였다. 또한 해당 회로는 컴팩트한 레이아웃 디자인을 통해서 0.48 mm²의 작은 사이즈로 구현되었다.

Key words : W-band, VCO, GaAs, Active Inductor, MMIC.

* Assistant Professor, Dept. of Electronics Engineering,
Dong-A University

★ Corresponding author

E-mail : dongkyo@dau.ac.kr, Tel : +82-51-200-7706

※ Acknowledgment

The EDA tool was supported by the IC Design Education Center(IDEC), Korea.

Manuscript received Sep. 20, 2024; revised Sep. 24, 2024; accepted Sep. 27, 2024.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 초고속 통신 및 고해상도 이미징 시스템과 같은 고주파 응용의 수요 증가를 충족시키기 위해 높은 주파수에서 동작하는 각종 시스템들이 각광 받고 있다. 이러한 추세에 따라 밀리미터파(mm-wave) 시스템 및 회로에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중 W-대역(75-110 GHz)은 상업 및 군사 응용에서 주목받고 있다 [1]. 77 GHz는 주파수 변조 연속파(FMCW) 방식 차량용 레이더에 사용되며, 94 GHz는 낮은 대기 손실을 덕분에 국방용 보안 이미지 센서 및 레이더 시스템에 활용 가능하다[2]. W-대역에서 이러한 시스템들의 구현을 위

해서는 높은 출력과 넓은 주파수 조절범위를 갖는 전압 제어 발진기(VCO)의 설계가 필수적이다.

기존 발표된 HEMT 공정 기반 W-대역 VCO들을 살펴보면[3-5], 발진 주파수 조절을 위해 버랙터를 사용하거나 발진기 코어의 게이트 전압을 직접 조정하는 구조가 대부분이다. 그러나 HEMT 디바이스의 드레인-소스를 연결하여 구현되는 버랙터 다이오드 구조의 경우 트랜지스터의 기생 성분의 영향으로 인해 낮은 Q-인자 값을 갖는 문제점이 있다[6]. 게다가 W-대역과 같은 높은 주파수에서는 소자 모델링의 부정확성으로 버랙터 구조의 시뮬레이션 성능을 신뢰하기가 힘들다. 한편, 발진기 코어의 게이트 전압을 직접 조정하는 경우에는 코어 트랜지스터 g_m 의 변화로 인해 주파수 조절 범위 내에서 출력 전력의 변동이 커지는 문제점이 있다. 이러한 이유들 때문에 버랙터 없이 주파수를 조절하는 밀리미터파 VCO들이 발표되었지만[7-8] 대부분은 실리콘 기반 공정으로 설계되어 출력 전력이 비교적 낮은 단점이 있다.

위의 문제점들을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 0.15- μm GaAs pHEMT 공정을 이용하여 설계된 W-대역에서 동작하는 소형 광대역 VCO를 제시한다. 버랙터가 없는 VCO 구조 구현을 위하여 공통 게이트 기반의 가변 능동 인덕터를 사용하여 높은 Q-인자와 함께 넓은 주파수 조절 범위를 확보하였다. 능동 인덕터의 설계와 분석, VCO의 설계 절차는 2장에서 설명하며, 3장에서는 설계된 W-대역 VCO의 측정 결과를 제시한다.

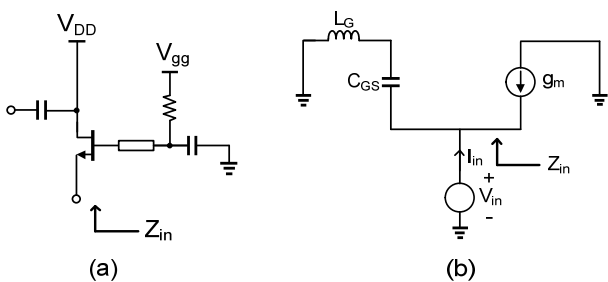


Fig. 1. (a) Schematic and (b) small-signal equivalent model of the CG with gate inductor.
 그림 1. 게이트 인덕터가 추가된 CG의 (a) 회로도 및 (b) 소신호 등가 모델

II. 회로 설계

1장에서 설명한 버랙터를 이용한 VCO 설계의 단점 극복을 위하여 능동 인덕터가 발진 주파수 조절에 사용되었다. 50- Ω 전송선로는 두께와 간격이 각각 12 μm 인 CPW(Coplanar Waveguide) 구조로 구현되었으며,

출력 전력과 발진 주파수를 고려하여 2 \times 50 μm 게이트 넓이를 갖는 HEMT가 발진기 코어 및 능동 인덕터에 활용되었다.

1. 능동 인덕터 설계

일반적으로 적절한 게이트 종단을 갖춘 공통 게이트(CG) 구조의 입력 임피던스(Z_{in})는 인덕터와 같이 동작한다. 검증에 위해 그림 1의 소신호 등가회로에서 Z_{in} 을 계산해보면 아래와 같이 표현되며,

$$Z_{in} = \frac{1 - \omega^2 L_g C_{gs}}{g_m + j\omega C_{gs}} \quad (1)$$

Z_{in} 의 허수부는 다음과 같다.

$$\text{Im}[Z_{in}] = \omega \frac{C_{gs}(\omega^2 L_g C_{gs} - 1)}{g_m^2 + \omega^2 C_{gs}^2} \quad (2)$$

수식 (2)에서 볼 수 있듯이, Z_{in} 의 허수부는 주파수에 따라 증가하며 $\omega^2 L_g C_{gs}$ 의 값이 1보다 클 경우 양의 값이 된다. 이는 적절한 값의 L_g 가 포함된 CG의 Z_{in} 이 인덕터와 같이 동작한다는 것을 의미한다.

수식 (2)의 결과 검증은 아래 설명과 같이 그림 2의 능동 인덕터 회로의 시뮬레이션을 통해 수행되었다. 그림 2는 CG가 차동으로 결합된 능동 인덕터의 회로도이다. 게이트 인덕터는 전송선로 과 TL_2 로 구현되었으며, 출력 정합을 위해 전송선 TL_3 - TL_6 이 사용되었다. 또한 전송선로 TL_7 과 TL_8 은 능동 인덕터와 발진기 코어 회로의 연결 용도로 사용되었다. 해당 능동 인덕터의 인덕턴스 값은 게이트 컨트롤 전압($V_{control}$)을 변화시켜 조절한다. 그림 3은 설계된 능동 인덕터의 $V_{control}$ 에 따른 95 GHz

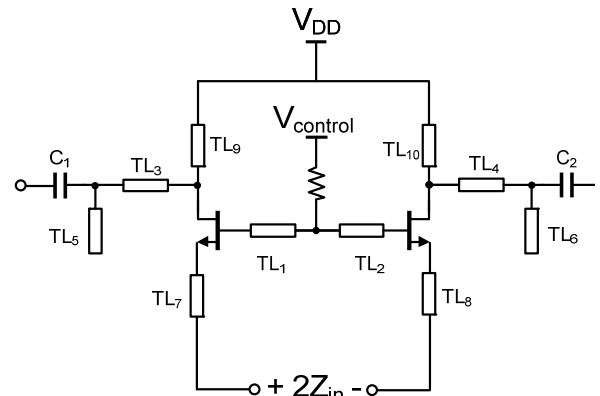


Fig. 2. Schematic of the proposed active inductor.
 그림 2. 본 논문에서 제안된 능동 인덕터 회로도

에서의 인덕턴스 변화 및 Q -인자 시뮬레이션 결과이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 인덕턴스는 $V_{control}$ 이 -0.1에서 1.0 V까지 증가함에 따라 99에서 46 pH까지 넓은 범위의 변화를 보인다. 또한 해당 능동 인덕터는 95 GHz에서 최대 25의 Q -인자를 갖는데, 이 값은 해당 주파수에 서일반적인 드레인-소스가 연결된 구조의 벡터 다이오드가 최대 7의 Q -인자를 보이는 것과 비교하면 굉장히 높은 값이다.

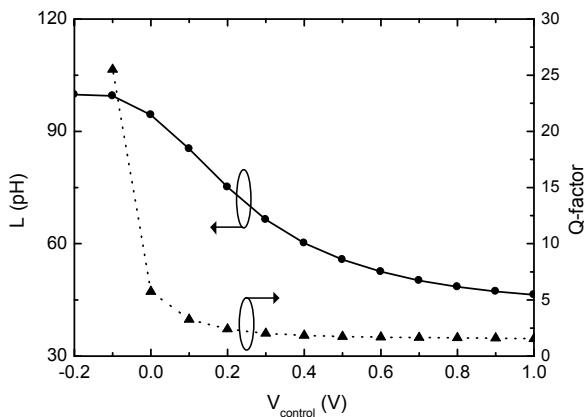


Fig. 3. Simulated inductance and Q -factor of the active inductor versus $V_{control}$.

그림 3. 능동 인덕터의 $V_{control}$ 에 따른 인덕턴스 및 Q -인자 변화 시뮬레이션 결과

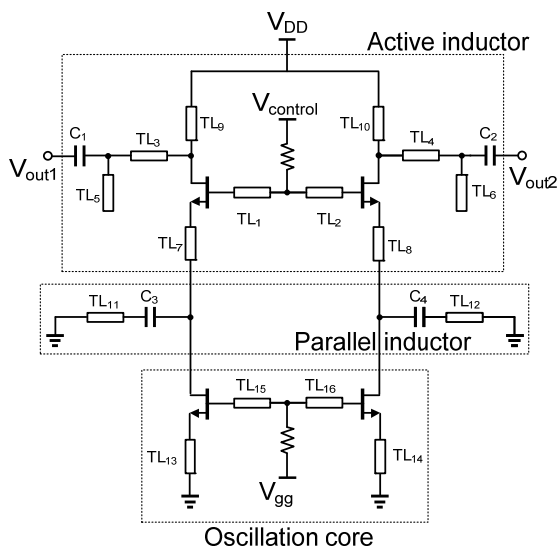


Fig. 4. Schematic of the proposed W-band varactor-less VCO.

그림 4. 제안된 W-대역 벡터 없는 VCO의 회로도

2. 벡터 없는 VCO 설계

그림 4는 능동 인덕터와 발진 코어로 구성된 벡터 없는 W-대역 VCO의 전체 회로도이다. 해당 회로는 가

상 접지의 활용 및 시스템 집적의 용이성을 위하여 차동 구조로 설계되었다. 발진 코어의 경우 커패시티브 피드백을 통하여 HEMT 소자의 불안정성을 높여 발진을 일으키는 Colpitts 구조를 이용하였다. DC 접지 경로와 커패시티브 소스 피드백을 동시에 확보하기 위해서 $\lambda/4$ 이상의 길이(440 μm)를 갖는 전송선로 TL_{13} , TL_{14} 를 사용하였다. 발진 조건을 위한 드레인 인덕턴스의 경우 제한된 능동 인덕터로 대체되었다. 해당 능동 인덕터는 발진주파수 조절뿐만 아니라 출력 포트와 발진 코어의 격리를 위한 버퍼 역할도 수행한다.

대략적인 발진주파수 결정을 위하여 아래의 수식을 이용하였다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{in}C_{core}}} \quad (3)$$

이 때 f_0 는 발진주파수, L_{in} 은 능동 인덕터의 인덕턴스 값, C_{core} 는 발진 코어의 기생 커패시턴스 값을 의미한다. 시뮬레이션을 통해 얻은 C_{core} 값은 65 fF로, 수식 (3)에 따르면 목표 발진 주파수인 $f_0 = 95$ GHz를 얻기 위해서는 43 pH의 L_{in} 값이 필요하다. 그러나 앞서 2-1 절에서 설명된 바와 같이 능동 인덕터의 인덕턴스 값은 46-99 pH로, 95 GHz의 f_0 를 얻기에는 다소 큰 값이다. 이를 해결하기 위하여 그림 4와 같이 능동 인덕터와 발진 코어 사이에 전송선 TL_{11} 과 TL_{12} 로 구현된 병렬 인덕터를 삽입하여 f_0 를 95 GHz에 맞추었다. 결과적으로 시뮬레이션된 발진 주파수는 93.7-102 GHz로 넓은 주파수 조절 범위를 보였다.

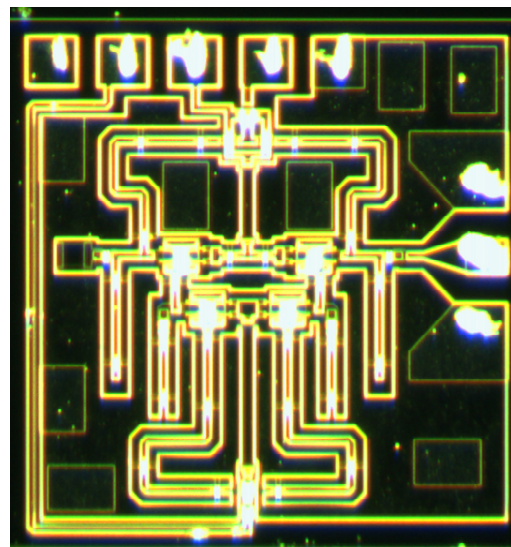


Fig. 5. Chip micrograph of the W-band VCO.

그림 5. W-대역 벡터 없는 VCO의 칩 사진

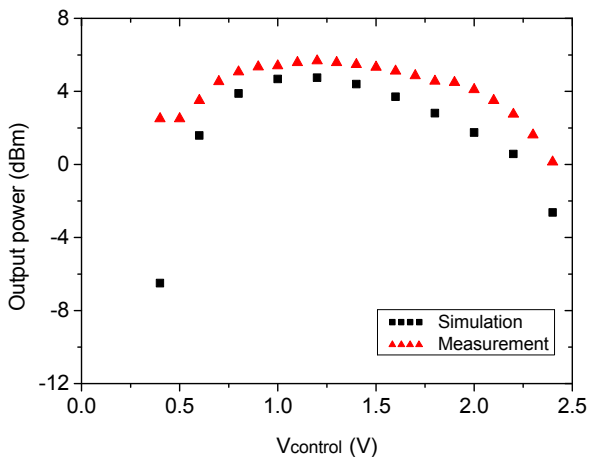


Fig. 6. Measured and simulated output power of the VCO.

그림 6. VCO 출력 전력 측정 및 시뮬레이션 결과

III. 측정 결과

제안된 버랙터 없는 W-대역 VCO는 $f_T/f_{MAX} = 90/160$ GHz인 0.15- μm GaAs pHEMT 공정을 사용하여 설계 및 제작되었다. 그림 5는 제작된 VCO 칩 사진이며 프로빙 패드를 포함한 면적은 $680 \times 710 \mu\text{m}^2$ 로 매우 컴팩트하게 설계되었다.

$V_{DD} = 3.4 \text{ V}$, $V_{gg} = -0.4 \text{ V}$ 의 바이어스 조건에서 측정을 진행하였으며, 발진 주파수 조절을 위한 $V_{control}$ 은 0.4-2.5 V 사이에서 조정되었다.

제작된 VCO의 출력 전력은 PM4 파워미터를 사용하여 측정되었다. W-대역 프로브 및 웨이브가이드의 손실은 측정 후 보정되었다. 능동 인덕터의 $V_{control}$ 변화에 따라 측정 및 시뮬레이션된 출력 전력의 값은 그림 6에

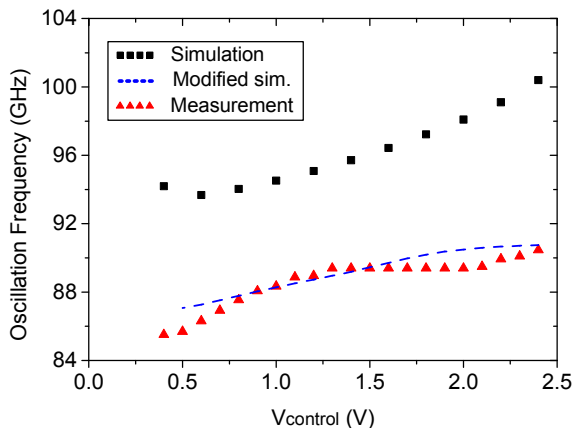


Fig. 7. Measured and simulated oscillation frequency of the VCO.

그림 7. VCO 발진 주파수 측정 및 시뮬레이션 결과

나타내었다. 측정된 출력 전력은 최소-2.6 dBm, 최대 5.7 dBm의 값을 보였으며, 시뮬레이션 결과와 잘 맞는 것을 알 수 있다. $V_{control} = 1.2 \text{ V}$ 에서 최대 출력 전력인 5.7 dBm을 얻었으며 이 때 소모되는 DC 전력은 146 mW였다.

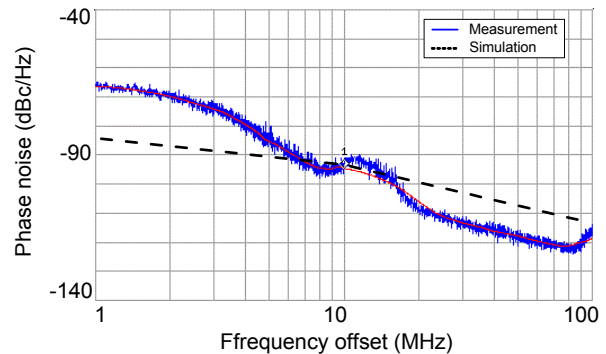


Fig. 8. Measured and simulated phase noise of the VCO.

그림 8. VCO 위상 잡음 측정 및 시뮬레이션 결과

VCO의 스펙트럼은 Agilent E4440A 스펙트럼 분석기 및 Quinstar W-band sub-harmonic 믹서를 이용하여 측정되었다. 능동 인덕터의 $V_{control}$ 변화에 따라 측정된 발진 주파수는 그림 7과 같이 85.5-90.6 GHz로 나타났다. 시뮬레이션과 비교하면 9.2 GHz 정도의 주파수가 하향 이동된 결과를 얻었는데, 이는 시뮬레이션에서 예상하지 못한 기생 커패시턴스가 추가된 것이 원인으로 보인다. 검증용 위해 발진 코어의 트랜지스터 소자에 기생 성분으로 커패시턴스(C_{gs} & C_{gd}) 15 fF, 인덕턴스(L_g) 10 pH를 추가한 결과 그림 7의 수정된 시뮬레이션 결과와 같이 측정과 비슷한 개형을 얻을 수 있었다. 그림 8은 $V_{control}$ 이 0.9 V일 때 측정된 위상 잡음 결과이며 10-MHz 오프셋에서 -94.7 dBc/Hz의 값을 보인다. 시뮬레이션 결과와 비교하여 낮은 오프셋 주파수에서 큰 값이 측정되었는데, 측정 시 신호의 drift 현상이 원인이 된 것으로 보인다.

표 1은 본 논문에서 개발된 VCO의 측정 결과를 정리하고, 기존 발표된 HEMT 공정 기반 VCO들과 성능을 비교한다. 제안된 VCO는 버랙터 없이 5.8%의 넓은 주파수 조절 범위를 보이며, 최대 5.7 dBm의 출력 전력은 더 낮은 노드의 공정을 이용한 기존 VCO들과 비교할만한 결과를 얻었다. 또한 컴팩트한 레이아웃 디자인을 통하여 기존 결과물들과 비교하여 가장 작은 칩 면적을 이용하여 구현되었다.

IV. 결론

본 논문에서는 버랙터 없이 동작하는 0.15- μm GaAs pHEMT 기반 W-대역 VCO의 특성을 기술하였다. 버랙터 대신 제안된 능동 인덕터 구조를 사용하였으며, 측정 결과 발진 주파수는 85.5-90.6 GHz로 버랙터 없이 5.8%의 넓은 주파수 조절 범위를 얻을 수 있었다. 또한 88 GHz에서 최대 5.7 dBm의 출력 전력을 확보하였으며 0.48 mm²의 컴팩트한 면적에 구현되었다. 개발된 VCO는 상업용 또는 군사 목적의 다양한 통신 및 이미징 시스템에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

Table 1. Performance comparison of the previously reported W-band HEMT VCOs.

표 1. 설계된 VCO의 성능 정리 및 기존 발표된 HEMT 기반 W-대역 VCO들과의 성능 비교

Ref.	Tech.	f_0 (GHz)	P_{out} (dBm)	Tuning range (%)	Chip size (mm ²)
[3]	0.15- μm GaAs	107	-8.5	1.5	-
[4]	100-nm GaAs	92	6.8	3.7	4.5
[5]	100-nm GaAs	97	0.7	2.1	1.5
[9]	50-nm GaAs	93	15	11.3	0.93
[10]	60-nm GaN	84	-0.67	1.2	0.63
[11]	150-nm GaN	109.5	-2.1	1.4	1.49
This work	0.15- μm GaAs	88	5.7	5.8	0.48

References

[1] V. Jain, F. Tzeng, L. Zhou, and P. Heydari, "A single-chip dual-band 22-29-GHz/77-81-GHz Bi-CMOS transceiver for automotive radars," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.44, no.12, pp.3469-3485, 2009. DOI: 10.1109/JSSC.2009.2032583

[2] A. Townley et al., "A 94-GHz 4TX-4RX phased-array FMCW radar transceiver with antenna-in-package," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.52, no.5, pp.1245-1259, 2017. DOI: 10.1109/JSSC.2017.2675907

[3] W. Wang, et al., "A 108 GHz GaAs mHEMT VCO MMIC," in *Int. Microw. Antenna, Propag., EMC Technol. Wireless Commun. Symp.*, 2009, pp.127-130. DOI: 10.1109/MAPE.2009.5355843

[4] R. Weber, et al., "A PLL-stabilized W-band MHEMT push-push VCO with integrated frequency divider circuit," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, 2007, pp.653-656. DOI: 10.1109/MWSYM.2007.379986

[5] P.-Y.Chen, Z.-M.Tsai, S.-S.Lu, and H.Wang, "An ultra low phase noise W-band GaAs-based pHEMT MMIC CPW VCO," in *Eur. Microw. Conf.*, 2003, pp.503-506. DOI: 10.1109/EUMC.2003.177527

[6] J. Jeong, and Y. Kwon, "A Fully Integrated V-Band PLL MMIC Using 0.15- μm GaAs pHEMT Technology," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.41, no.5, pp.1042-1050, 2006. DOI: 10.1109/JSSC.2006.872872

[7] P.-Y. Chiang, O. Momeni, and P. Heydari, "A 200-GHz inductively tuned VCO with -7-dBm output power in 130-nm SiGe BiCMOS," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol.61, no.10, pp. 3666-3673, 2013. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2279779

[8] X. Liu, C. Chen, J. Ren, and H. C. Luong, "Transformer-based varactor-less 96 GHz-110 GHz VCO and 89 GHz-101 GHz QVCO in 65 nm CMOS," in *Proc. IEEE Asian Solid-State Circuits Conf. (A-SSCC)*, 2016, pp.357-360. DOI: 10.1109/ASSCC.2016.7844209

[9] F. Thome, S. Maroldt, and O. Ambacher, "Prospects and limitations of stacked-FET approaches for enhanced output power in voltage-controlled oscillators," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol.64, no.3, pp.836-846, 2016. DOI: 10.1109/TMTT.2016.2520485

[10] T. N. T. Do, Y. Yan, and D. Kuylenstierna, "A low phase noise W-band MMIC GaN HEMT oscillator," in *Proc. IEEE Asia-Pacific Microw. Conf. (APMC)*, pp.113-115, 2020. DOI: 10.1109/APMC47863.2020.9331430

[11] J. Wang et al., "A 110-GHz Push-Push Balanced Colpitts Oscillator Using 0.15- μm GaN

HEMT Technology,” in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp.77-80. 2023.

DOI: 10.1109/IMS37964.2023.10188124

BIOGRAPHY

Dongkyo Kim (Member)



2015 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
2021 : PhD degree in IT Convergence, Korea University.
2021~2022 : Staff Engineer, Samsung Electronics.
2022~Present : Assistant Professor, Dong-A University.