2014년 12월 전자공학회 논문지 제 51권 제 12 호
Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol. 51, NO. 12, December 2014 http://dx.doi.org/10.5573/ieie.2014.51.12.083

논문 2014-51-12-9

Ku-밴드 광대역 CMOS 전압 제어 발진기

(A Fully Integrated Ku-band CMOS VCO with Wide Frequency Tuning)

김 영 기*, 황 재 연*, 윤 종 덕*

(Young Gi Kim©, Jae Yeon Hwang, and Jong Deok Yoon)

요 약

본 논문에서는 상호 교차결합 차동(complementary cross-coupled differential)구조를 기반으로 조절 주파수 범위가 넓은 광대역 Ku-band 전압 제어 발진기를 0.18-μm CMOS 공정 기술을 바탕으로 설계 후 제작하여 주파수 조절 범위와 출력 스펙트럼, 위상잡음 등을 측정하여 분석하였다. PMOS와 NMOS가 캐스코드의 push-pull 구조로 연결되어 상호 교차된 차동발진기 구조에 주파수 제어용으로 MOS varactor를 사용한 본 전압 제어 발진기는 발진주파수 14.5GHz의 20%인 2.24GHz 의 매우 넓은 광대역의 주파수 제어를 달성하였음을 측정으로 확인하였다. 3.3V 전원으로부터 18mA의 DC 전류를 공급하였을 때 발진 출력전력은 -1.66dBm으로 측정되었으며, 5V 전원으로부터 47mA의 DC 전류를 공급하였을 때 발진 출력전력은 0.84dBm으로 측정되었다. 위상잡음은 100kHz offset 주파수에서 -74.5dBc/Hz로 측정되었다. 본 논문의 칩은 패드를 포함하여 1.02mm ×0.66mm의 면적을 갖는다.

Abstract

A ku-band complementary cross-coupled differential voltage controlled oscillator is designed, measured and fabricated using 0.18-μm CMOS technology. A 2.4GHz of very wide frequency tuning at oscillating frequency of 14.5GHz is achieved with presented circuit topology and MOS varactors. Measurement results show -1.66dBm output power with 18mA DC current drive from 3.3V power supply. When 5V is applied, the output power is increased to 0.84dBm with 47mA DC current. -74.5dBc/Hz phase noise at 100kHz offset is measured. The die area is 1.02mm x 0. 66mm

Keywords : oscillator, CMOS, VCO, Ku-band

Ⅰ. 서 론

전압 제어 발진기(VCO: Voltage controlled oscillator)는 무선 통신 시스템에서 필수 요소로 송수신기의 성능에 큰 영향을 미친다. 무선통신기기의 보급 확산에 따라 VCO에 대한 수요와 개발이 지속적으로 이루어지고 있으며 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 공정으로 개발할 경우 디지털 회로를 포함한 대부분의 회로를 하나의 칩에 집적할 수 있기 때문에 시스템의 소형화 구현이 용이하다. 또한 CMOS공정은 높은 신뢰성과 대량 생산시의 경제성이 높고 화합물 반도체와 비교하였을 때 환경보호에 유리하며 칩 생산 및 화학 폐기물 처리 비용이 절감된다. 이러한 종합적인 이유로 초고주파 영역의 발진기를 CMOS공정으로 설계하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[1~5].

차동발진기는 길버트 믹서나 마이크로 믹서 같은 차동믹서나 PLL을 발룬이 없이 직접 구동시킬 수 있는

* 정회원, 안양대학교 정보통신공학과
(Department of Information and Communications, Anyang University)
© Corresponding Author(E-mail: kimyg@anyang.ac.kr)
※ 본 논문은 연구년 기간 중 연구되었음.
접수일자: 2014년08월30일, 수정일자: 2014년11월06일
게재확정: 2014년12월01일

장점이 있다. 상호 교차결합 차동(complementary cross-coupled differential)구조의 발진기는 소모전류에 대한 transconductance 특성이 우수하여 교차된 차동 구조에서 빠른 스위칭이 가능하다. 또한 이 구조의 발진기는 상승과 하강 천이시의 대칭으로 인하여 1/f 잡음의 변환으로 인한 잡음의 발생이 적어서 잡음특성이 우수하다[6].

본 논문에서는 0.18-μm CMOS 공정 기술을 바탕으로 상호 교차결합 차동 구조를 이용하여 조절 주파수 범위가 넓은 Ku-band 전압 제어 발진기를 설계 후 제작하여 주파수 조절 범위와 출력 스펙트럼, 위상잡음 등을 측정하여 분석하였다.

Ⅱ. 회 로 설 계

그림 1에 도시된 상호 교차결합 차동 발진기는 NMOS 교차결합 발진기와 PMOS 교차결합 발진기를 조합한 형태의 구조를 가지며 4개의 FET (NMOS1, NMOS2, PMOS1, PMOS2)가 각각 스위치처럼 작동함으로써 발진 출력된다.

V1으로 정의되는 NMOS1, PMOS1의 드레인 전압은

$$\begin{aligned} & V1 \\ & \equiv V_{drain_NMOS1} \\ & \equiv V_{drain_PMOS1} \\ & = V_{DD} - I_{DS_PMOS1} R_{DS_PMOS1} \\ & = V_{souece_NMOS1} + I_{DS_NMOS1} R_{DS_NMOS1} \end{aligned} \quad (1)$$

로 주어진다.

만약 NMOS1의 게이트 전압 Vgs_NMOS1 이 문턱전압(threshold voltage)보다 높아지는 방향으로 증가하면 PMOS1의 게이트와 드레인 사이의 전압 Vgs_PMOS1이 동시에 낮아져서 NMOS1의 드레인 소스저항 Rds_NMOS1가 줄어들고 PMOS1 의 드레인 소스저항 Rds_PMOS1은 늘어난다. V1의 전위는 이 증가된 Rds_PMOS1에 의하여 낮아지고 감소된 Rds_NMOS1에 의하여 Push - Pull 동작으로 더 낮아진다.

이때 NMOS1의 드레인이 NMOS2와 PMOS2의 게이트에 연결되어 있기 때문에 V1이 낮아지면 그 결과로 Rds_NMOS2의 값이 늘어나고 Rds_PMOS2 는 줄어서 V2를 더 높은 전위로 끌어 올린다. 이러한 push-pull

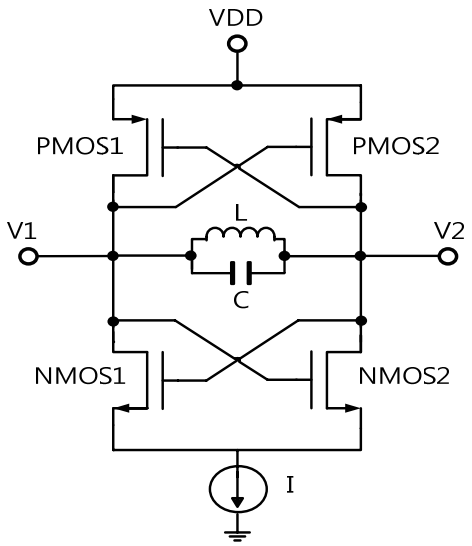

그림 1. 상호 교차결합 차동 전압 제어 발진기 회로도
Fig. 1. Simplified circuit diagram of the presented oscillator core.

동작이 순간적으로 반복되어 V2의 전압은 최대값으로 V1의 전압은 최소값으로 가게 한다. 하지만 이러한 극한 상태는 계속 지속되지 못하고 V1과 V2에 연결된 공진회로를 통하여 충방전을 반복하게 된다. V1과 V2의 전압차이의 변화로 인하여 둘 사이에 연결된 캐패시터를 통하여 흐르는 전류는

$$i_C = C\frac{dv_C}{dt} \quad (2)$$

로 주어진다.

이때 캐패시터와 병렬로 연결된 인덕터에도 같은 양의 인덕터 전압

$$v_L = L\frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

이 생긴다. 공진부 외부에서의 순간 전류를 무시하면 캐패시터와 인덕터가 폐회로를 이루고 있기 때문에 캐패시터의 전류와 인덕터의 전류양은 같다. 따라서

$$i_C = i_L \quad (4)$$

이들 식을 결합하면

$$v_C = LC\frac{d^2 v_C}{dt^2} \quad (5)$$

인 2차 미분방정식이 되고 그 해인 사인파로 공진부 양단의 전압이 주어진다. 이때의 공진 주파수는

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

로 구해진다.

이렇게 주워진 공진부의 전압과 전류는 이전에 기술한 NMOS1, PMOS1, NMOS2, PMOS2의 교차된 push-pull 동작에 의하여 에너지가 공급되어 정상상태의 발진을 유지한다.

실질적인 발진기 회로에서는 트랜지스터와 소자간의 연결선인 마이트로 스트립선에 존재하는 기생 캐패시터 성분과 인덕터 성분이 추가되어 발진 주파수는 식 (6)에서 주어진 주파수 보다 더 낮아지는데, 시뮬레이션을 통한 회로 설계시 이러한 기생성분의 영향을 반영하여 레이아웃 효과가 포함된 최종회로를 설계하였다[7].

앞에서 기술한 상호 교차결합 차동 전압 제어 발진기를 기반으로 완충 증폭기부(buffer amplifier), 정 전류원 회로부(constant current source)와 바랙터를 추가하여 상호 교차결합 차등 전압 제어 발진기를 그림 2 와 같이 설계하였다. 공진부에 인덕터(inductor)와 바랙터(varactor)을 이용하여 제어 전압으로 바랙터의 정전용량을 제어하여 공진하는 주파수를 조절할 수 있

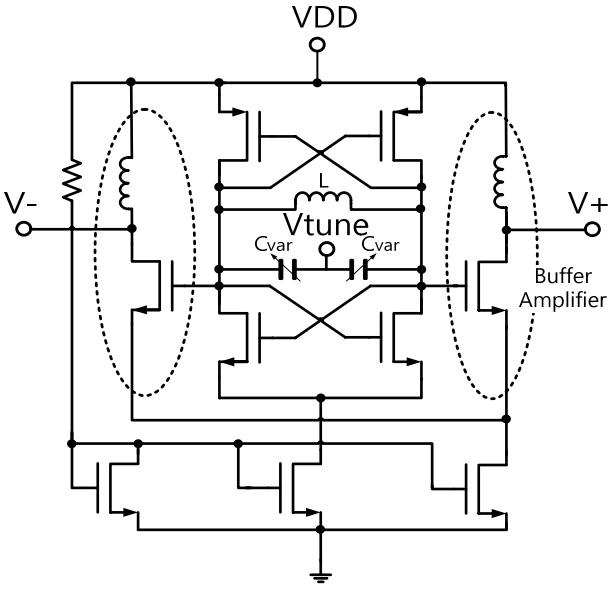

그림 2. 완충 증폭기부를 구비한 상호교차 결합 차동 전압 제어 발진기 회로도
Fig. 2. Simplified circuit diagram of VCO with buffer amplifier.

도록 설계하였다. 발진기의 발진 주파수를 조절하기 위하여 직류전압의 변화로 정전용량을 변화시키는 바랙터로 p-n 접합바랙터에 비하여 정전용량 변화범위가 넓고 생산공정의 변차로 인한 정전용량 값의 편차가 적은 MOS 바랙터를 사용하였다[8]. 넓이 2.66μm 길이 0.5μm 인 6개의 MOS 바랙터 2개를 대칭으로 병렬 연결 하였다. 바렉터의 쵸크 회로는 덩치가 큰 인덕터 대신에 10.472kΩ의 on-chip 폴리저항과 1nH정도의 off-chip 와이어 본드선(웨지본드)을 직렬로 연결하여 사용하였다.

외부에 연결되는 모든 연결 port의 패드에는 ESD (Electro-Static Discharge) 다이오드를 내장시켜 회로를 보호하였다.

Ⅲ. 회로 제작 및 측정 분석

설계된 전압 제어 발진기는 0.18-μm CMOS 공정으로 제작하였으며, 그림 3은 본 칩을 와이어 본딩과 RF 프르브를 이용하여 발진 스펙트럼을 측정할 때 현미경으로 확대하여 찍은 사진이다. 와이어 본딩으로 전원단과 접지단을 테스트 기판에 연결하여 RF 프르브를 통하여 HP8563E spectrum analyzer로 발진스펙트럼을 측정하였다. 본 논문의 칩은 패드를 포함하여 1.02mm × 0.66mm의 면적을 갖는다.

그림 4는 제작한 차동전압 제어 발진기의 단일 출력단에서 보정 없이 측정한 발진전력 스펙트럼으로 공급전압 5V, 소모 전류 47mA일 때 14.5GHz의 주파수에서 -2.83dBm의 출력을 얻었다. 본 논문의 발진기는 출력단 2개에서 같은 발진전력이 공급되므로 실제의 총 발진전력은 2배로 증가되어 케이블손실 0.67dB를 보정하

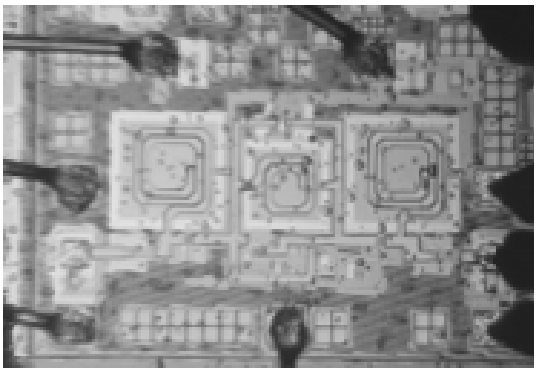

그림 3. VCO 칩의 사진
Fig. 3. Die photograph of the VCO.

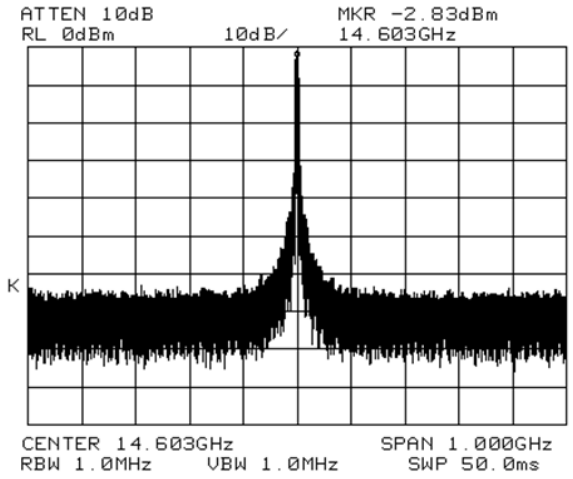

그림 4. VCO의 단일 출력단에서 보정 없이 측정한 발진전력 스펙트럼

Fig. 4. Measured spectrum of the VCO at one port without cable loss calibration.

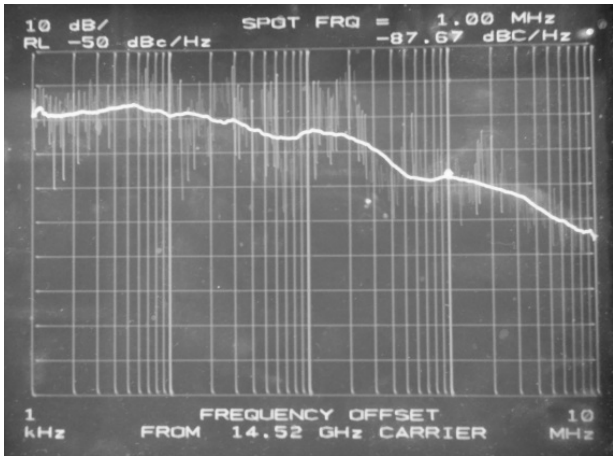

그림 5. 측정된 VCO의 위상잡음특성

Fig. 5. Measured phase noise of the VCO.

면 총 발진전력은 0.84dBm이다.

본 논문의 발진기의 위상잡음은 그림 5에 도시된바와 같이 100kHz의 offset 주파수에서 -74.5dBc/Hz와 1MHz의 offset 주파수에서 -87.67dBc/Hz로 측정되었다.

직류공급 전원의 잡음을 줄이기 위하여 상용 NI-MH 충전지를 직렬로 연결하여 공급전원단과 주파수 조절단에 공통으로 5.1V로 연결하여 측정하여 그림 6과 같이 100kHz의 offset 주파수에서 -83dBc/Hz와 1MHz 의 offset 주파수에서 -86dBc/Hz로 측정되었다.

그림 7에 공급전압 3.3V와 5V에서 본 발진기의 제어전압의 변화에 따른 발진주파수와 출력전력의 변화를 종합적으로 도시하였다. 2.8V에서 5V까지의 제어전

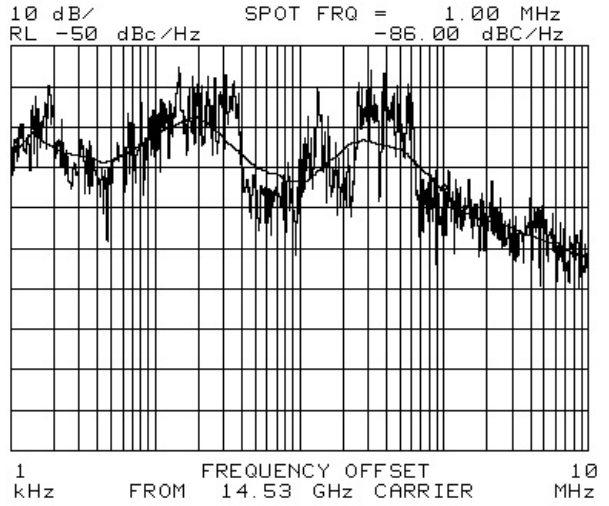

그림 6. 충전지를 이용하여 측정한 VCO의 위상잡음특성

Fig. 6 Measured phase noise of the VCO with rechargeable battery.

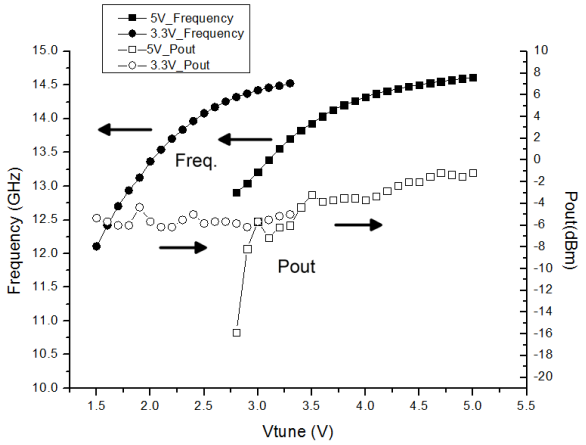

그림 7. 공급전압 3.3V와 5V에서 본 발진기의 발진 주파수 제어전압의 변화에 따른 발진주파수와 출력전력의 변화

Fig. 7 Spectrum variation with changes of tuning voltage for 3.3V and 5V supplies.

압의 변화로 VCO의 발진주파수는 12.9GHz에서 14.6GHz까지 1.7GHz 만큼 발진 주파수에 대하여 13.3% 제어된다.

공급전압을 3.3V로 낮추면 주파수 조절범위가 더욱 넓어져 12.1GHz에서 14.5GHz까지 2.4GHz 만큼 발진 주파수에 대하여 20%의 광대역 주파수제어가 가능하다. 이때 발진전력이 -1.66dBm로 감소하지만 소모전류도 18mA로 줄어들어 광대역의 주파수제어가 필요한 저전력 회로에 유용하게 적용 할 수 있다. 그림에 도시된 전압보다 더 넓은 범위의 주파수 조절 전압을 가하

면 발진이 사라져서 발진 주파수 측정이 불가능하였다. 또한 5V이상의 전압을 가할 경우는 발진성능이 저하되거나 칩이 손상되어 안정된 측정이 불가능하였다.

발진주파수 f_0 에서 F_{offset} 만큼 떨어진 주파수에서의 위상잡음 $L\{f_{offset}\}$과 소모전력 P_{DC}를 객관화한 발진기의 성능지표(*FOM*:Figure Of Merit)는 식 (7)과 같이 정의한다. 주파수 조절범위(*FTR*:Frequency Tuning Range)까지 고려한 전압제어발진기의 성능지표(*FOMT* : Figure Of Merit with Tuning)은 식 (8)로 정의할 수 있다[9].

$$FOM = L\{f_{offset}\} - 20\log\left(\frac{f_0}{f_{offset}}\right) + 10\log\left(\frac{P_{DC}}{1mW}\right) \quad (7)$$

$$FOMT = FOM - 20\log\left(\frac{FTR}{10}\right) \quad (8)$$

표 1에서는 본 논문의 주파수와 비교할 만한 타 연구진들이 발표한 CMOS 차동 발진 전압제어 발진기들을 FOMT로 발진성능을 객관화하여 비교하였다.

본 논문과 유사한 0.18-μm CMOS 공정의 상호 교차결합 차동구조인 참고문헌 [6]의 발진기는 저위상잡음을 주목적으로 하여 5.8mW의 저전력으로 구성하였다. 고주파특성이 우수한 90nm 이하의 CMOS공정 기반의 발진기 중 참고문헌 [10]의 발진기는 PMOS 대신 Q가 높은 전송선을 공진 및 쵸크로 시용하여 출력전력을 늘렸으며, 참고문헌 [11]의 발진기는 공진부에 능동 인덕터를 사용하여 위상잡음특성을 향상시켰다.

표 1. 차동 발진 CMOS 전압제어발진기의 성능 비교표
Table 1. Summary of the performance comparison of complementary cross-coupled CMOS VCO.

참고문헌	CMOS 공정 (nm)	중심 주파수 (GHz)	주파수 제어 범위 (GHz)	발진 전력 (dBm)	위상 잡음 (dBc/@ 100kHz)	FOMT	특징
[6]	180	9.85	1.1 (11%)	-	-89	-182.1	저전력
[10]	60	15.05	0.88 (6%)	11.3	-92	-179.7	전송선 쵸크
[11]	90	12.72	0.21 (1.6%)	-11.1	-66	-149.5	능동 인덕터
본 논문	180	13.7	2.42 (20%)	-1.66	-74.5	-165.6	광대역
본 논문	180	14.53	2.42 (17%)	0.84	-83	-167.1	광대역 충전지 로측정

본 논문의 발진기는 정전용량이 큰 MOS 바랙터를 사용하여 주파수 조절범위을 광범위 하게 설계 하였다. NMOS의 드레인에 Q가 매우 큰 쵸크 인덕터 대신 PMOS를 사용하여 PMOS의 드레인과 소스간의 저항 $R_{DS_PMOS_1}$를 쵸크로 사용하여 0.18-μm CMOS 공정의 소자로 회로를 구성하였다. 이에 따라 저항성분이 증가하여 발진조건을 넓은 주파수 범위에서 유지하여 2.42GHz의 광대역 주파수범위에서 발진이 가능하였다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 상호 교차결합 차동구조 발진기를 해석하고 주파수 제어 범위가 매우 넓은 광대역 Ku-band 전압 제어 발진기를 0.18-μm CMOS 공정기술을 기반으로 설계 후 제작하여 주파수 조절 범위와 최대 출력, 위상 잡음 등을 측정하여 분석하였다. 정전용량이 큰 MOS 바랙터를 상호 교차결합 차동구조에 적용한 본 논문의 전압 제어 발진기는 Ku-대역의 발진주파수 14.5GHz에서 20%에 해당하는 2.4GHz의 매우 넓은 광대역 주파수조절 범위를 달성하였다.

* IDEC의 CAD 툴과 파운드리 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

[1] J. Jin, X. Yu, X. Liu, W. M. “A Wideband Voltage-Controlled Oscillator With Gain Linearized Varactor Bank,” *IEEE Trans. Components, Packing and Manufacturing Technology*, Vol. 4, no 5, pp. 905-910, May 2014.
[2] Y. Shen, K. F. Tsang, W. C. Lee, Fa. H. Hung, I. F. Triantis and K. X., “Design of low-phase-noise CMOS transformer-based gate-coupled quadrature VCO,” *Elecrtronics Letters*, Vol. 50, no. 6, pp. 434 - 436, March 2014.
[3] N. Kim, J. Yun, and J. S. Rieh, “A 120 GHz Voltage Controlled Oscillator Integrated with 1/128 Frequency Divider Chain in 65 nm CMOS Technology,” *Journ. Semiconductor Technology*

and Technology, Vpl. 14, no. 1, pp. 131-137, February 2014.

[4] D. S. Kim, S. H. Chai, "Deaign of 3~10GHz UWB Frequency Synthesizer for MBOA System", *Journal of the IEEK*, Vol. 50, no. 2 pp. 134-139, February 2013.

[5] M. C, Park, S. H. Jung, Y. S. Eo, "0.13㎛ CMOS Quadrature VCO for X-band Application", *Journal of the IEEK*, Vol. 49, SD, no. 8 pp. 41-46, August 2012.

[6] L. Jia, J. G. Ma, K. S. Yeo, and M. A. Do, "9.3 - 10.4-GHz-Band Cross-Coupled Complementary Oscillator With Low Phase-Noise Performance," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol. 52, no. 4, pp. 1273-1278, April 2004.

[7] J. S. Lee, Y. G. Kim, E. J. Lee, C. W. Kim, and P. Roblin, "A 8-GHz SiGe HBT VCO design on a low resistive silicon substrate using GSML," *IEEE Trans. on Circuits and Systems-I*, Vol. 54, no. 10, pp. 2128-2136, October 2007.

[8] Y. J. Chan, C. F. Huang, C. C. Wu, C. H. Chen, and C. P. Chao, "Performance Consideration of MOS and Junction Diodes for Varactor Application," *IEEE Trans. Electron Devices, Vol.* 54, no. 9 pp. 2570-2573, September 2007.

[9] J. Kim, J. O. Plouchart, N. Zamdmer, R. Trzcinski, K. Wu, B. J. Gross, and M. Kim, "A 44 GHz differentially tuned VCO with 4 GHz tuning range in 0.12 m SOI CMOS," *IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers*, pp. 416 - 417, February 2005.

[10] L. Huang, S. Yuan, R. Zhang, and W. Li, "A 15 GHz CMOS low phase noise VCO using coupled coplanar waveguide," *Proceedings of International Conference on Computer Research and Development (ICCRD)*, Vol. 3, pp. 310 - 313, March 2011.

[11] D. Zito, D. Pepe, and A. Fonte, "13 GHz CMOS Active Inductor LC VCO," *IEEE Microwave and Components Letters, Vol.* 22, no. 3, pp. 138-140, March 2012.

저 자 소 개

김 영 기(정회원)

Young-Gi Kim was born in Seoul, Korea. He received B.S. and M.S. degree in Electronics Engineering from Hanyang University in 1983 and 1984, respectively. He received his Ph.D from the University of Texas at Arlington in 1993. From 1986 to 1997, he was with Korea Telecom Research Laboratory, where he was engaged with long distance optical fiber communication and developed Monolithic Microwave Integrated Circuits for wirless application. In 1996, he moved to Anyang University, where he is currently a Professor in the Department of Data Communication Engineering. His research interests are included Monolithic Microwave Integrated Circuits and Devices.

<주관심분야 : 반도체, MMIC, RFIC>

윤 종 덕(정회원)

2012년 안양대학교 정보통신 공학과 학사 졸업
2014년 안양대학교 정보통신 공학과 석사 졸업
2013년~현재 ㈜파이텍 전력변환, MMIC 설계 담당

<주관심분야 : MMIC, 고주파 증폭기 및 발진기, 전원장치, 통신>

황 재 연(정회원)

2012년 2월 안양대학교 정보통신 공학과 학사 졸업
2014년 2월 안양대학교 정보통신 공학과 석사 졸업
2014년 현재 ㈜마이크로인피니티 개발업무

<주관심분야 : RF, FPGA, MMIC, 반도체>