

InGaP/GaAs HBT를 이용한 WLAN용 Low Noise RFIC VCO

Low Noise RFIC VCO Based on InGaP/GaAs HBT for WLAN Applications

명 성 식 · 전 상 훈* · 육 중 관

Seong-Sik Myoung · Sang-Hoon Cheon* · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문은 5 GHz 대역의 저위상잡음 특성을 갖는 모두 집적화된 LC Tank 전압제어 발진기를 설계 제작하였다. 제작된 전압제어발진기는 PN 다이오드를 사용하여 튜닝되며, 제어 전압 0~3 V 하에서 튜닝 범위는 5.01~5.30 GHz의 290 MHz 튜닝 범위를 가진다. 우수한 위상 잡음 특성을 얻기 위해 LC 필터링 기법을 이용하여 전류 전원 트랜지스터의 열잡음의 상향 변환을 막았다. 측정 결과 위상잡음은 -87.8 dBc/Hz@100 kHz offset, -111.4 dBc/Hz@1 MHz offset의 우수한 특성을 보였다. 또한 LC 필터로 인해 약 5 dB의 위상잡음 특성이 개선됨을 알 수 있었으며, 이는 HBT 공정을 이용한 최초의 실험적 결과이다. 제작된 전압제어 발진기의 FOM은 -172.1 dBc/Hz이며, 이는 5 GHz 대역의 InGaP HBT VCO 중 최고의 성능이다. 또한 본 논문에서 제안한 발진기는 기존의 InGaP HBT를 이용한 VCO에 비해 더 낮은 DC 전력을 소모하며, 더 높고 평탄한 출력 전력 특성을 보였다.

Abstract

This paper presents a fully integrated 5 GHz band low phase noise LC tank VCO. The implemented VCO is tuned by integrated PN diodes and tuning range is 5.01~5.30 GHz with 0~3 V control voltage. For improved phase noise performance, a LC filtering technique is adapted. The measured phase noise is -87.8 dBc/Hz at 100 kHz offset frequency and -111.4 dBc/Hz at 1 MHz offset frequency which is excellent performance. Moreover phase noise is improved by 5 dB after employing the LC filter. It is the first experimental result in field of InGaP/GaAs HBT VCOs. The figure of merit of the fabricated VCO with LC filter is -172.1 dBc/Hz. It is the best result among 5 GHz InGaP HBT VCOs. Moreover this work shows lower DC power consumption, higher output power and more fixed output power compared with previous 4, 5 GHz band InGaP HBT VCOs.

Key words : Cross-coupled Differential VCO, InGaP/GaAs HBT, Low Phase Noise, RFIC, WLAN

I. 서 론

최근 미국의 FCC(Federal Communications Commission)는 5~6 GHz 대역내의 300 MHz 범위를 ISM (Industry, Science, Medical) 대역으로 제안했으며, 802.11a WLAN(Wireless Local Area Network)는 매우 중요한 이동통신 산업의 한 분야로 각광받기 시작했

다. 또한 전통적으로 RF 송수신단에서 전압 제어 발진기는 매우 중요한 소자로 인식되어 왔다. 이로 인해 5 GHz 대역의 우수한 성능의 발진기를 설계하는 것은 중요한 과제가 되었다. 하지만 과거에 초고주파 집적회로 설계에 주로 사용되어 왔던 GaAs MES-FET는 저주파에서 채널의 표면을 흐르는 전하와 깊은 채널을 흐르는 전하의 트랜스 컨덕턴스와 출력

연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*(주)나리지온(Knowledge*ON Semiconductor Inc.)

· 논문 번호 : 20031115-05S

· 수정완료일자 : 2004년 1월 19일

컨덕턴스의 확산 현상으로 인해 $1/f$ 잡음의 구석 주파수가 10 MHz 이상이 되어 위상잡음 특성면에서 좋은 소자가 되지 못한다^[1]. 이에 최근에는 SiGe HBT나 Si CMOS 공정을 이용한 전압제어발진기의 연구가 많이 이루어지고 있다. InGaP/GaAs HBT는 $1/f$ 잡음 특성이 우수하며, Si 공정보다 수동소자의 기판 손실이 적어 높은 Q LC Tank 회로를 집적화할 수 있어 VCO 설계에 매우 유리하다. 또한 Si 공정에 비해 뛰어난 고주파 동작과 높은 선형성, 낮은 잡음 지수 등으로 인해 LNA, PA 설계 시에 특성이 우수하여 RF 송수신단의 단일칩화에 적합한 소자이다^{[2],[3]}. 또한 InGaP HBT는 AlGaP HBT에 비해 Al에서 발생하는 물질 산화가 없어 수명이 길며, 간단한 wet-etching 공정을 사용함으로 수율이 높고, 온도에 따른 전류 이득의 변화가 적고, 이중 접합의 공간 일치가 우수한 장점이 있다.

또한 통신 시스템의 변화로 단일 평형 주파수 혼합기 또는 이중 평형 주파수 혼합기 등에 차동 입력이 필요하게 됨에 따라 발진기의 차동 출력이 매우 중요한 요구 사항이 되었다^[4]. 본 논문에서는 위상잡음 특성이 우수하고, 차동 출력을 가지는 Cross-coupled differential VCO를 설계하였다. Cross-coupled differential VCO는 피드백 커플링 캐패시터가 DC block 역할과 함께 $1/f$ 잡음의 피드백을 줄여줌으로 위상잡음을 개선시킬 수 있는 구조이다^[5]. 또한 발진기의 차동 구조는 출력 전압의 상승-하강 동작이 대칭적이게 하여 $1/f$ 잡음의 상향변환을 줄여주어 위상잡음을 개선시키며^[6], 단일 평형 주파수 혼합기 또는 이중 평형 주파수 혼합기와 결합할 때 발진이 필요하지 않아 집적화에 유리한 구조이다.

하지만 차동 구조의 발진기에서는 그림 1에서의 Q1과 Q2의 에미터 노드에 발진주파수의 두 배 주파수가 존재하며, 두 배 주파수는 전류원 트랜지스터의 열잡음과 주파수 혼합을 통해 열잡음을 하향 변환시켜 발진기 출력의 위상잡음을 악화시키는 단점이 있다. 이때 그림 1의 L_{filter} , C_{filter} 의 필터링을 통해 전류원 트랜지스터의 열잡음이 출력단으로 전달되는 것을 막음으로 위상잡음의 개선을 얻을 수 있다^[7].

II. VCO 설계 및 제작

본 논문에서는 상용 InGaP/GaAs HBT 공정을 사

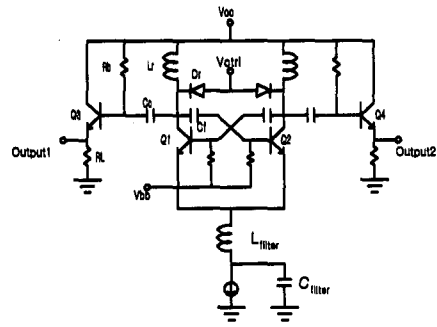


그림 1. 5 GHz cross-coupled differential VCO 회로도
Fig. 1. The schematic of the 5 GHz cross coupled differential VCO.

용하여 수동소자와 베렉터 다이오드가 풀집적화된 RFIC VCO를 설계 제작하였다. 그림 1의 Q1, Q2는 콜렉터 출력이 피드백 캐패시터 C_f 를 통해 다른 트랜지스터의 베이스로 패드백이 되며, 그 구조로 인해 Q1, Q2의 콜렉터 단에서 보는 기모드 입력 임피던스의 실수부가 음의 값을 갖게 된다. 이러한 구조를 Negative- g_m 이라고 하며 이때 부성 저항회로는 LC Tank 회로와 결합하여 발진이 발생하게 된다. 또한 설계된 VCO는 버퍼 앰프와 함께 설계되었는데, 버퍼 앰프는 발진기의 pulling-figure를 개선시키며, 동시에 부하가 직접 공진기에 연결됨으로 공진기의 Q가 감소하는 것을 막아준다. 이 때문에 버퍼 앰프는 입력 임피던스가 매우 큰 에미터 팔로워(Emitter-follower) 구조로 설계하였다.

설계에 사용된 HBT는 2 핑거(finger)를 가지며, 에미터 크기가 각각 $2 \times 20 \mu\text{m}^2$ 이며, 컬렉터 전류 10 mA에서 단위 전류 이득 주파수(fT)가 40 GHz이며, 최대 발진 주파수(f_{max})는 60 GHz의 특성을 가지고 있다. Q1, Q2는 콜렉터 전류 4 mA의 낮은 전류 밀도 (5 kA/cm^2)에 바이어스 되어 DC 전력 소모를 줄였다.

HBT 모델링은 VBIC(Vertical Bipolar Inter-Company) 모델을 사용하였다. VBIC 모델은 Gummel-Poon 모델에 비해 Early-effect 모델링, 준포화 모델링, 기생 기판 트랜지스터 모델링, 셀프-히팅(Self-heating) 모델링, 온도 모델링 등이 더욱 개선되거나 새로 추가되어 더욱 정확한 대신호 해석을 할 수 있어 발진기의 대신호 해석에 더욱 유리한 모델이다. 또한 열 잡음, 산탄 잡음, $1/f$ 잡음 등이 모델링되어 있어 위상 잡음 예측에 Gummel-Poon 모델보다 정확

한 결과를 기대할 수 있다.

LC Tank 회로를 구성하는 인덕터는 일반적으로 VCO의 Q를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 따라서 높은 Q를 갖는 인덕터를 설계하는 것은 VCO 설계에 있어 매우 중요한 과제이다. 인덕터는 공정에서 제공하는 두개의 금속층(두께 1.3 μm , 4 μm)에서 좀더 두꺼운 금속층을 사용하여 나선형 인덕터를 제작하였으며, 금속층은 Air bridge post를 사용하여 공중에 띄우고, 기판 위에 절연체를 덮어 기판 손실을 최대한 줄여 더 높은 Q를 얻을 수 있게 하였다. 공진기를 구성하는 다이오드는 트랜지스터의 컬렉터-베이스 접합을 사용하여 구성하였다. 다이오드는 항상 역방향 바이어스가 걸리게 하였으며 역방향 바이어스 하에서 발생하는 접합 캐패시턴스는 5 GHz에서 76의 높은 Q값을 가지게 하였고, 필요한 커패시턴스를 발생시키기 위해 다수의 다이오드를 병렬 연결하여 설계하였다. 이외의 커패시터는 두개의 금속층을 사용하여 높은 Q의 MIM(Metal-Insulator-Metal) 타입으로 구현하였으며, 그 용량은 600 pF/mm²이다. 저항은 NiCr 층에 박막 저항을 디자인하였으며, sheet resistance는 50 Ohms/□이다.

그림 2는 Q1, Q2의 컬렉터 노드에 터미널을 설치한 후 소신호 해석을 통해 발진을 모의 실험한 결과이다. 제어 전압 3 V에서 실험한 결과로 5 GHz 부근에서 입력 임피던스의 실수부가 음의 값을 갖는 부성 저항이 발생하며, 입력 임피던스의 허수부가 양에서 음으로 변화하는 공진이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 3은 설계된 VCO의 대신호 해석 결과이다. 그림 3(a)는 VCO의 양 출력 포트 중 하나에서

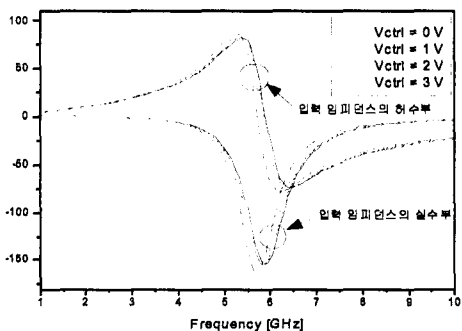
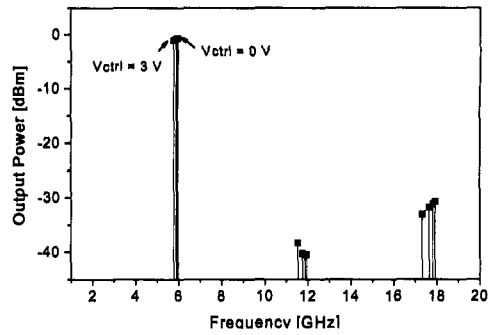
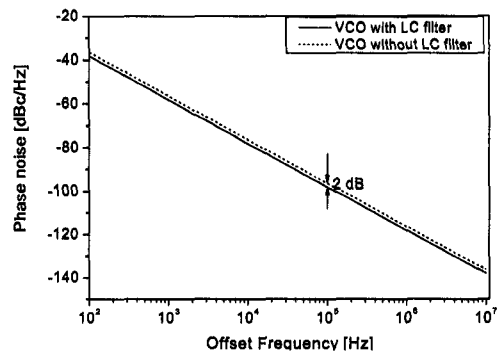


그림 2. VCO 소신호 해석 결과
Fig. 2. The small signal simulation result.



(a) 출력 스펙트럼
(a) The output spectrum



(b) 위상잡음
(b) Phase noise

그림 3. VCO 대신호 해석 결과
Fig. 3. The large signal simulation results.

예비 실험한 결과로 기본 주파수 출력 전력이 약 -0 dBm 이며 2차 3차 고조파 성분이 모두 기본파에 비해 30 dB 이상 억압되는 우수한 고조파 특성을 나타내고 있다. 그림 3(b)는 발진기의 위상 잡음 해석 결과로 100 kHz 오프셋 주파수에서 -90 dBc/Hz로 우수한 특성을 보여주고 있다. 또한 LC 필터를 사용한 경우 LC 필터를 사용하지 않은 경우에 비해 약 2 dB의 위상잡음 개선이 나타남을 확인할 수 있다.

설계된 VCO는 LC 필터, 버퍼 앰프, 그리고 패드들과 함께 0.9×0.9 mm²에 집적화 되었으며, 출력 신호의 크기, 위상 특성 및 위상잡음 특성의 악화를 막기 위해 최대한 대칭되게 레이아웃되었다.

그림 4는 실제 제작된 cross-coupled differential VCO의 사진이다.

III. 측정 결과

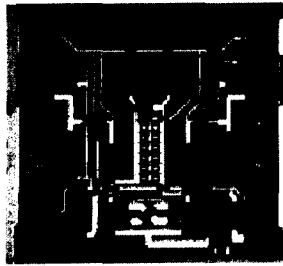
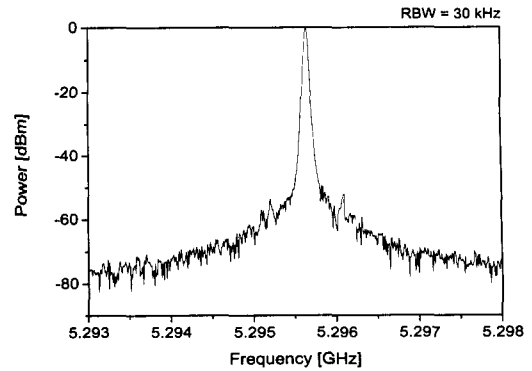


그림 4. LC 필터와 함께 집적화된 cross-coupled differential VCO(die size: $0.9 \times 0.9 \text{ mm}^2$)
 Fig. 4. Photograph of the fabricated VCO with the LC filter(die size: $0.9 \times 0.9 \text{ mm}^2$).



(a) LC 필터링된 VCO의 출력 스펙트럼
 (a) The output spectrum of the VCO with LC filter

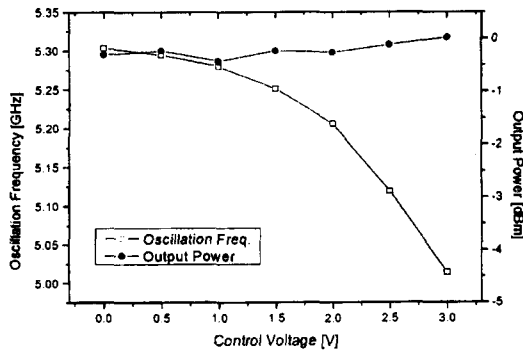
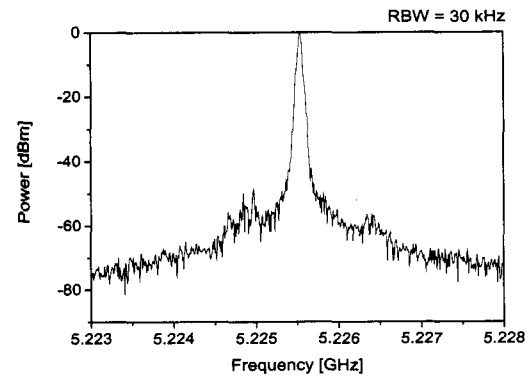


그림 5. 제어 전압의 변화에 대한 발진 주파수와 출력 전력변화
 Fig. 5. Oscillation frequency and output power as a function of the control voltage.



(b) LC 필터링되지 않은 VCO의 출력 스펙트럼
 (b) The output spectrum of the VCO without LC filter

그림 6. VCO 출력 스펙트럼
 Fig. 6. The spectrums of the VCOs.

측정은 FR-4를 이용한 측정용 지그를 제작하여 골드 와이어를 사용하여 측정용 지그에 연결하여 실시하였다. 차동 출력의 한쪽을 50 Ohm 터미네이션 후 다른 한쪽에서만 측정하였으며, 측정 장비는 Agilent 사의 HP8593E를 사용하였다.

그림 5는 제어 전압에 대한 발진 주파수와 출력 파워의 변화이다. 제어 전압 0~3 V 변화함에 따라 발진 주파수는 5.3~5.01 GHz로 290 MHz 변화하며 출력 파워는 약 0 dBm 정도이며, 최대 변화는 0.5 dB 이다. 그림 6은 VCO의 출력 스펙트럼이며 LC 필터를 사용한 경우 1 MHz offset 주파수에서 -111.4 dBc/Hz, 100 kHz offset 주파수에서는 -87.8 dBc/Hz의 우수한 위상잡음 특성을 나타내고 있으며, LC 필터가 없는 VCO보다 약 5 dB 정도 우수한 위상잡음 특성을 보였다. 이 결과는 시뮬레이션에 비해 더 큰 위상잡음의 개선 정도를 보이고 있다. 이는 위상잡

음 시뮬레이션 시 공진 회로를 구성하는 나선형 인덕터가 자기 공진 주파수인 20 GHz까지 모델링되어 harmonic balanced 시뮬레이션의 harmonic order를 3으로 시뮬레이션함으로 그 이상의 차수에서의 위상잡음의 개선이 계산되지 않음으로 발생한 차이로 사료된다. 실제로 3차 이상의 고조파 신호에 대해서도 전류원 트랜지스터의 콜렉터 점은 LC 필터에 의해 접지되어 위상잡음이 개선되나 harmonic balanced 시뮬레이션에서는 이것을 계산할 수 없다. VCO 출력의 고조파 특성은 2차, 3차 고조파 모두 기본파보다 40 dB 이상 억압되는 우수한 고조파 특성을 나타내었다. 모든 측정 결과는 표 1에 정리되어 있다.

발진기 성능의 비교를 위해 FOM(Figure of Merit)을 정의하였다. 발진기의 FOM은 이격 주파수에서 측정된 발진기의 위상 잡음($L_{meas}(f_{offset})$)과 발진 주파

표 1. 측정 결과

Table 1. Measured result.

Supply Voltage	3 V
Current(core only)	8 mA
Control Voltage	0~3 V
Frequency Range	5.01~5.30 GHz
VCO Gain	-96.7 MHz/V
Output Power	-0.43~0.02 dBm
Phase noise	-87.83 dBc/Hz at 100 kHz offset -111.43 dBc/Hz at 1 MHz offset
Harmonics	2nd/1st = -41.93 dBc 3rd/1st = -42.41 dBc
Chip size	0.9 × 0.9 mm ²

수(f_{osc}), 소모 전력(P_{diss})으로 정의된다^[8].

$$FOM = L_{meas}(f_{offset}) - 20 \log(f_{osc} / f_{offset}) + 10 \log(P_{diss} / 1mW)$$

위 식에 따라 계산된 FOM은 -172.1 dBc/Hz이다. 이는 5 GHz 대역에서 발진하는 InGaP HBT 발진기를 이용한 발진기 중 가장 우수한 성능이다. 또한 기존에 설계되었던 비슷한 대역의 발진기^{[10],[13]}들에 비해 낮은 DC 전력 소모에 높은 출력 전력을 보이며, 우수한 출력 전력 평탄도를 가지고 있다. 표 2에 최근 발표된 5 GHz 대역의 발진기들의 FOM을 비교하였다.

IV. 결 론

본 논문은 InGaP/GaAs HBT 공정을 사용하여

표 2. 최근 발표된 5 GHz 대역 VCO의 FOM

Table 2. FOMs of the recently published 5 GHz band VCOs.

Reference	Frequency [GHz]	FOM [dBc/Hz]	Tuning Range [%]	Output Power variation [dB]
GaAs MESFET ^[9]	5.44	-168.6	12.9	1.1
InGaP HBT ^[10]	5.51	-165.3	8.0	-
CMOS ^[11]	5	-176.6	18.0	3.1
SiGe ^[11]	5	-180.2	12.3	4
SiGe ^[12]	5.78	-169.7	3.5	-
This work	5.3	-172.1	5.6	0.45

WLAN용 우수한 위상잡음 특성을 갖는 cross-coupled differential VCO를 설계 제작하였다. 제작된 VCO는 커패시터 커플링으로 피드백하고, 차동 구조를 사용하여 1/f 잡음의 상향 변환을 줄였으며, 높은 Q의 인덕터와 다이오드 접합 커패시터로 구성된 공진 회로를 사용함으로 더욱 우수한 위상잡음 특성을 얻을 수 있게 하였다. 또한 LC 필터링을 통해 전류원 트랜지스터의 열잡음으로 인한 위상잡음 악화를 막았다. 측정 결과 100 kHz offset 주파수에서 -87.8 dBc/Hz, 1 MHz offset 주파수에서 -111.4 dBc/Hz의 우수한 위상잡음 특성을 나타내었으며, 0~3 V의 제어전압을 변화시키며 5.30~5.01 GHz 발진 주파수 변화를 얻을 수 있었으며, LC 필터로 인해 약 5 dB의 위상잡음 개선을 얻을 수 있었다. 이는 InGaP/GaAs HBT 공정에서 LC 필터를 사용하여 위상잡음을 개선한 최초의 실험 결과다. 본 논문에서 제안한 VCO는 5 GHz 대역의 InGaP HBT를 이용한 VCO 중 최고의 FOM을 가지며, 기존의 VCO에 비해 낮은 DC 전력 소모, 높고 일정한 출력 파워를 가진다.

감사의 글

본 저자는 6" InGaP HBT 파운드리 서비스와 디자인 라이브러리를 제공하여 cross-coupled differential VCO 회로 설계를 실제 칩으로 제작해 주신 나리지*에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P. C. Canfield, D. J. Allstot, J. Medinger, L. Forbes, A. J. McCamant, W. A. Vetanen, B. Odekirk, E. P. Finchem and K. R. Gleason, "Buried-channel GaAs MESFETs with improved small-signal characteristics", in *IEEE GaAs IC Symp. Tech. Dig.*, pp. 163-166, 1987.
- [2] M. E. Kim, A. K. Oki, G. M. Gorman, D. K. Umemoto and J. B. Camou, "GaAs heterojunction bipolar transistor device and IC technology for high performance analog and microwave applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-37, pp. 1286-1303, Sep. 1989.
- [3] B. L. Nelson et al., "High-linearity, low dc power

- GaAs HBT broadband amplifiers to 11 GHz", *IEEE GaAs IC Symp. Digest*(San Diego), pp. 79-82, Oct. 1989.
- [4] Behzad Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice Hall PTR, 1998.
- [5] M. Borremans, B. De Muer and M. Steyaert, "Phase noise up-conversion reduction for integrated CMOS VCOs", *Electron. Lett.*, vol. 36, pp. 857-858, May 2000.
- [6] A. Hajimiri, T. H. Lee, "A general theory of phase noise in electrical oscillators", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 33, pp. 179-194, Feb. 1998.
- [7] Emad Hegazi, Henrik Sjolund and Asad A. Abidi, "A Filtering Technique to Lower LC Oscillator Phase noise", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 36, pp. 1921-1930, Dec. 2001.
- [8] H. Jacobsson, S. Gevorgian, M. Mokhtari, C. Hednass, B. Hansson, T. Lewin, H. Berg, W. Rabe and A. Schuppen, "Low-Phase-Noise Low-Power IC VCOs for 5-8 GHz Wireless Applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2533-2539, Dec. 2000.
- [9] S. -W. Yoon, E.-C. Park, C. -H. Lee, S. -H. Sim, S. -G. Lee, E. Yoon, J. Laskar and S. Hong, "Cross coupled differential oscillator MMICs with low phase-noise performance", *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, vol. 11, pp. 495-497, Dec. 2001.
- [10] S. -A. Yu, C.-C. Meng and S. -S. Lu, "A 5.7 GHz interpolative VCO using InGaP/GaAs HBT technology", *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, vol. 12, pp. 37-38, Feb. 2002.
- [11] C. Samori, S. Levantino and V. Bocuzzi, "A -94 dBc/Hz@100 kHz, fully-integrated, 5-GHz, CMOS VCO with 18 % tuning range for Bluetooth applications", *IEEE 2001 Custom Integrated Circuits Conf.*, pp. 201-204, May 2001.
- [12] J. -O. Plouchart, H. Ainspan, M. Soyuer and A. Ruehli, "A fully-monolithic SiGe differential voltage-controlled oscillator for 5 GHz wireless applications", *2000 IEEE Radio Frequency IC Symp.*, pp. 57-60, Jun. 2000.
- [13] G. Grau, U. Langmann, W. Winkler, D. Knoll, J. Osten and K. Pressel, "A current-folded up-conversion mixer and VCO with center-taped inductor in a SiGe HBT technology for 5-GHz wireless LAN application", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 35, pp. 1345-1352, Sept. 2000.
- [14] Yunseong Eo, Keechul Kim and Byungdu Oh, "Low Noise 5 GHz Differential VCO Using InGaP/GaAs HBT Technology", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 13, no. 7, pp. 259-261, Jul. 2003.

명 성 식



2002년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 집적회로 설계

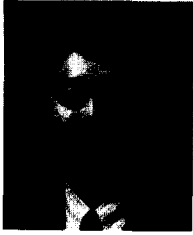
전 상 훈



1993년 2월: KAIST 전기전자공학과 (공학사)
 1995년 2월: KAIST 전기전자공학과 (공학석사)
 2001년 2월: KAIST 전기전자공학과 (공학박사)
 2001년 7월~현재: Knowledge*ON

Semiconductor 책임연구원
 [주 관심분야] HBT 특성 연구

육 중 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1996년 2월: University of Michigan (공학박사)

2000년 2월~현재: 연세대학교 전기

전자공학과 교수

[주 관심분야] MEMS, 초고주파 회로, EMI/EMC, 마이크로파 수치해석