

# 0.18- $\mu\text{m}$ SiGe BiCMOS 공정 기반 70/140 GHz 듀얼 밴드 전압 제어 발진기

## A 70/140 GHz Dual-Band Push-Push VCO Based on 0.18- $\mu\text{m}$ SiGe BiCMOS Technology

김 경 민 · 김 남 형 · 이 재 성

Kyungmin Kim · Namhyung Kim · Jae-Sung Rieh

### 요 약

본 논문에서는 push-push 방식을 사용하여 설계 제작된 0.18- $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS 공정 기반 70 GHz와 140 GHz에서 모두 동작하는 듀얼 밴드 전압 제어 발진기(Voltage Controlled Oscillator: VCO)의 결과를 보인다. 측정 결과, 본 전압 제어 발진기는 조절 전압이 0.2 V에서 2 V까지 변하는 동안 하위 밴드와 상위 밴드에서 각각 67.9~76.9 GHz, 134.3~154.5 GHz의 주파수 조절 범위를 갖는다. 보정 후의 최대 출력 전력은 각각 -0.55 dBm과 -15.45 dBm이었다. 본 전압 제어 발진기는 4 V의 전원으로부터 18 mA의 DC 전류를 소모한다.

### Abstract

In this work, a 70/140 GHz dual-band push-push voltage controlled oscillator(VCO) has been developed based on a 0.18- $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS technology. The lower band and the upper band oscillation frequency varied from 67.9 GHz to 76.9 GHz and from 134.3 GHz to 154.5 GHz, respectively, with tuning voltage swept from 0.2 to 2 V. The calibrated maximum output power for each band was -0.55 dBm and -15.45 dBm. The VCO draws DC current of 18 mA from 4 V supply.

Key words : VCO, Push-Push, MOS Varactor

### I. 서 론

최근 들어 초고속 통신 시스템 및 이미징 시스템, 그리고 각종 감지 시스템에 이르기까지 다양한 적용 범위를 갖는 100 GHz 이상의 주파수 대역에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

전압 제어 발진기는 이러한 시스템의 송수신단을 구성하는 핵심적인 요소로서, 시스템 내부에서 혼합기에 기준 신호원을 제공하는 역할을 한다. 일반적

으로 전압 제어 발진기는 충분한 출력 전력과 사용 목적에 맞는 주파수 조절 범위를 갖추어야 하며, 이와 함께 낮은 위상 잡음 특성을 보여야 한다.

그동안 100 GHz 이상에서 동작하는 전압 제어 발진기들은 우수한 성능을 갖는 III~V 화합물 반도체를 중심으로 연구가 이루어졌지만, 최근 Si 기반 반도체 소자의 급격한 성능 증가로 인하여 Si CMOS나 SiGe HBT 공정을 이용한 전압 제어 발진기들도 다수 개발되고 있다<sup>[1]~[3]</sup>. 또한, 발진기 동작 주파수의

「이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0079994).」

「이 연구는 IDEC(IC Design Education Center)의 시뮬레이션 툴 지원을 통해 수행되었음.」

고려대학교 전기전자공학부(School of Electrical Engineering, Korea University)

· 논문 번호 : 20111118-143

· 교신저자 : 이재성(e-mail : jsrieh@korea.ac.kr)

· 심사일자 : 2012년 1월 3일 · 수정완료일자 : 2012년 1월 6일

향상을 위한 방법으로서, 회로의 common node에서 생성되는 2차 harmonic 성분을 이용하는 push-push 방식이 고주파 전압 제어 발진기 설계에서 널리 적용되고 있다.

본 논문에서는 0.18- $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS 공정을 이용하여 push-push 방식을 채택, 70 GHz와 140 GHz 대역에서 동작하도록 설계한 듀얼 밴드 전압 제어 발진기의 결과를 보여준다.

## II. 회로 설계

그림 1은 본 연구에서 설계한 전압 제어 발진기의 회로도이다. 본 전압 제어 발진기는 Colpitts 구조를 채택하였으며, 70 GHz 및 140 GHz의 두 대역에서 작동하고 측정이 가능하도록 설계 및 제작되었다. 이러한 듀얼 밴드 동작은 요구되는 경우에 따라 두 가지 주파수 대역 중 필요한 대역의 신호를 선택적으로 제공할 수 있고, 두 대역의 주파수가 동시에 필요한 경우에는 두 대역 신호를 동시에 제공할 수도 있다. 예를 들어 PLL의 경우 출력단에는 상위 대역을, 주파수 분주단에는 하위 대역의 신호를 제공함으로써 주파수 분주단의 수를 줄이는 것도 가능하다. 이와 함께 보다 실용적인 측면에서의 장점으로서 상위 대역 주파수 측정의 용이함을 들 수 있다. 일반적으로 100 GHz 이상에서 동작하는 전압 제어 발진기

측정의 경우, 외장 sub-harmonic mixer를 통하여 스펙트럼 분석기에서 신호를 검출하게 되는데, 이 때 스펙트럼 분석기에서는 여러 종류의 harmonic 신호들이 동시에 나타나게 되어 정확한 발진 주파수의 측정에 어려움이 있다. 이 때 외장 mixer를 필요로 하지 않거나 혹은 외장 pre-selected mixer를 사용하여 측정할 수 있는 하위 주파수 대역의 주파수를 미리 정확히 알 수 있으면 상위 주파수 대역의 신호를 쉽게 분별할 수 있다. 본 논문에서는 듀얼 밴드 동작을 위하여 코어와 버퍼 사이에 fundamental 신호 측정을 위한 차동 출력단을 삽입하여 듀얼 밴드 구조를 구현하였다.

CMOS 공정과 달리 HBT와 같은 bipolar 공정을 사용하여 ring 구조 혹은 LC 교차 결합 구조의 전압 제어 발진기를 설계할 경우, base와 collector 사이에 바이어스 레벨의 분리를 위한 DC blocking capacitor를 삽입하는 경우가 일반적인데, 이 때 추가적인 캐패시턴스 값으로 인해 발진기의 발진 주파수가 감소하게 된다. 이에 반해 Colpitts 구조는 이러한 DC blocking capacitor를 필요로 하지 않는다. 이러한 이유 때문에 bipolar 공정을 사용한 고주파 전압 제어 발진기 설계에는 일반적으로 Colpitts 구조가 선호된다<sup>[4]-[6]</sup>. 또한, 본 전압 제어 발진기의 설계에는 나선형 인덕터를 대신하여 마이크로스트립 라인이 사용되었다. 마이크로스트립 라인의 경우 나선형 인덕터보다 손실이 적고 효율적인 layout이 가능할 뿐만 아니라 시뮬레이션의 정확성 또한 상대적으로 높다는 장점이 있다.

설계된 회로에서  $L_{B1}$ 과  $L_{B2}$ 는 varactor( $C_{VAR1}$ ,  $C_{VAR2}$ )와 함께 LC 공진부를 형성하여 전압 제어 발진기의 발진 주파수를 결정한다.  $L_{E1}$ 과  $L_{E2}$ 는 current source를 대체하여 기생 capacitance 성분을 줄이고 voltage headroom 역시 감소시킨다<sup>[7]</sup>. Varactor는 MOS varactor가 사용되었고, 0.2 V부터 2 V까지의 전압 조절 구간에 대해 capacitance는 52.3 fF부터 90.2 fF까지 변화하였으며, Q-factor는 4.1부터 7.5까지 변화였다.  $L_{C1}$ 과  $L_{C2}$ 는 전압 제어 발진기의 코어 부분과 버퍼를 연결하여 효율적인 layout이 가능하도록 하며, 출력 전력의 증가에도 영향을 미친다. 버퍼는 common base 구조가 사용되었는데, bipolar 기반 구조에서 common emitter나 emitter follower 버퍼가 사용될

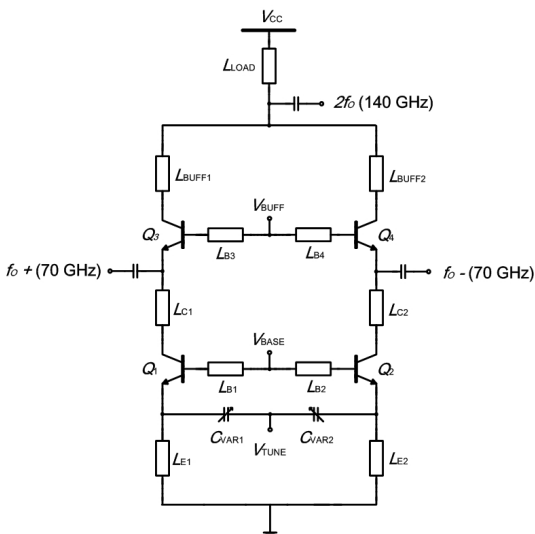


그림 1. 70/140 GHz 전압 제어 발진기의 회로도  
Fig. 1. Schematic of the 70/140 GHz push-push VCO.

경우 앞서 설명한 내용과 비슷한 이유로서 회로의 코어와 버퍼의 연결단에 DC blocking capacitor가 필요하게 되어 발진 주파수를 감소시키게 된다. 때문에 bipolar 기반 회로의 경우 common base 버퍼가 널리 사용되는 경향이 있다.  $L_{B3}$ 과  $L_{B4}$ 는 positive feedback을 위한 line으로 버퍼의 이득 증가를 가져온다<sup>[8]</sup>.

### III. 측정 결과

본 전압 제어 발진기는 0.18- $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS 공정을 이용하여 제작되었으며, 그림 2에는 제작된 전압 제어 발진기의 칩 사진이 나타나 있다. 전압 제어 발진기는 패드를 포함하여  $910\ \mu\text{m} \times 735\ \mu\text{m}$ 의 면적을 갖는다.

본 전압 제어 발진기의 하위 밴드 신호 측정에는 Agilent사의 11974 V-band preselected mixer와 E-4407B 스펙트럼 분석기가 사용되었으며, 출력 전력 측정에는 Agilent사의 E4419B power meter와 V8486 V-band power sensor가 사용되었다. 또한, 하위 밴드 신호의 경우 차동 출력을 갖게 되는데, 측정시에는 한 쪽 출력을 50  $\Omega$ 으로 종단하였다. 프로브와 케이블, 그리고 도파관의 손실은 측정을 통해 보정되었다. 그림 3은 하위 밴드에서의 발진 주파수 및 출력 전력 측정을 위한 셋업을 나타낸다.

그림 4는 제어 전압이 1.2 V일 때의 하위 밴드 출

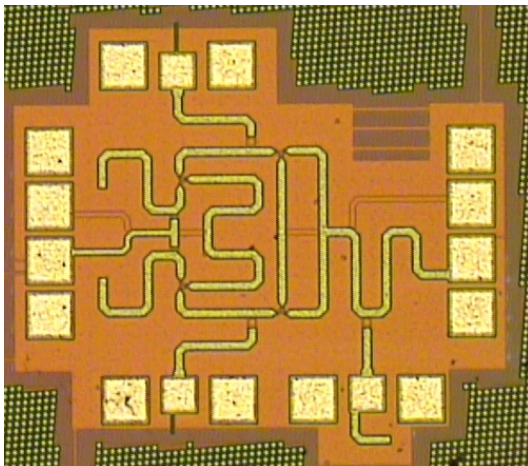


그림 2. 제작된 70/140 GHz push-push 전압 제어 발진기의 칩 사진

Fig. 2. Die photo of the fabricated 70/140 GHz push-push VCO.

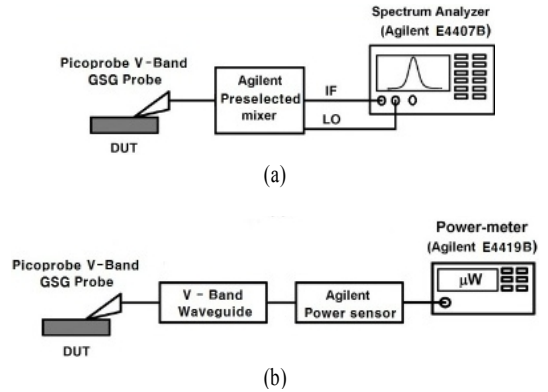


그림 3. 하위 밴드에서의 (a) 발진 주파수 및 (b) 출력 전력 측정을 위한 셋업

Fig. 3. Measurement setup for (a) output frequency and (b) output power at lower band.

력 스펙트럼을 나타낸다. 그림 5는 전압 제어 발진기의 제어 전압에 따른 출력 신호의 주파수와 출력 전력의 시뮬레이션 결과 및 측정 결과이다. 시뮬레이션 결과와 측정 결과는 수치적으로는 다소 오차가 있지만 경향성은 유사하게 나타났다. 제어 전압을 0.2 V부터 2 V까지 조절했을 때 발진 주파수는 67.9 GHz부터 76.9 GHz까지 변화하였다. 출력 전력은 0 V부터 0.6 V까지는  $-18.1\ \text{dBm}$ 에서  $-4.12\ \text{dBm}$ 까지 급격히 변화했지만, 0.7 V부터 2 V까지는  $-1\ \text{dBm}$  내외의 평탄한 출력 전력을 나타내었다. 이러한 평탄한 출력 전력이 나타나게 된 원인은 제어 전압이 0.7

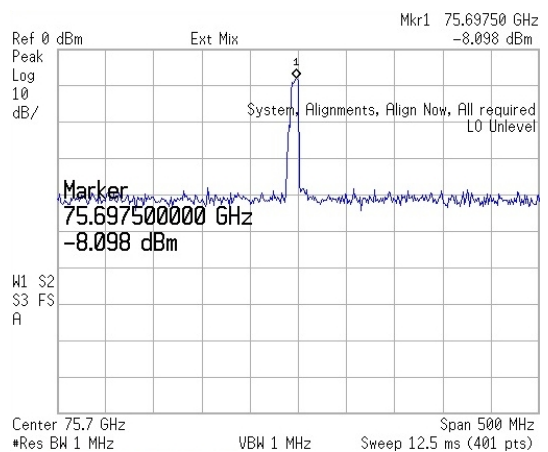


그림 4. 제어 전압이 1.2 V일 때의 하위 밴드 출력 스펙트럼

Fig. 4. Lower band output spectrum of the VCO at VTUNE=1.2 V.

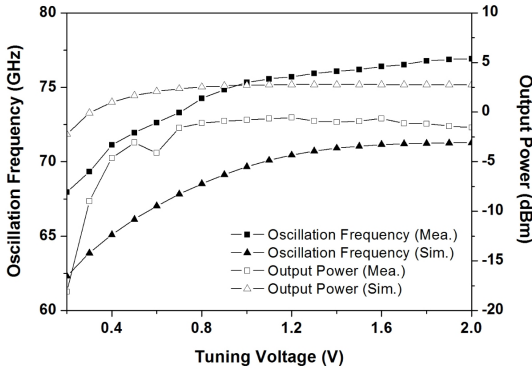


그림 5. 하위 밴드에서의 제어 전압에 따른 출력 주파수와 출력 전력  
 Fig. 5. Oscillation frequency and output power vs. tuning voltage for lower band signal.

V를 초과하는 구간에서는 varactor의 C와 Q가 크게 변하지 않기 때문이라고 분석된다.

상위 밴드 신호 측정에는 Quinstar사의 D-band mixer와 Agilent사의 8565E 스펙트럼 분석기가 사용되었으며, 출력 전력 측정에는 VDI사의 power sensor 및 Erickson사의 PM4 power meter가 사용되었다. 프로브와 케이블, 그리고 도파관의 손실은 측정을 통해 보정되었다. 그림 6은 상위 밴드에서의 발진 주파수 및 출력 전력 측정을 위한 셋업을 나타낸다.

그림 7은 제어 전압이 1.9 V일 때의 상위 밴드 출력 스펙트럼을 나타낸다. 그림 8은 전압 제어 발진기의 제어 전압에 따른 출력 신호의 주파수와 출력 전력의 시뮬레이션 결과 및 측정 결과이다. 역시 하

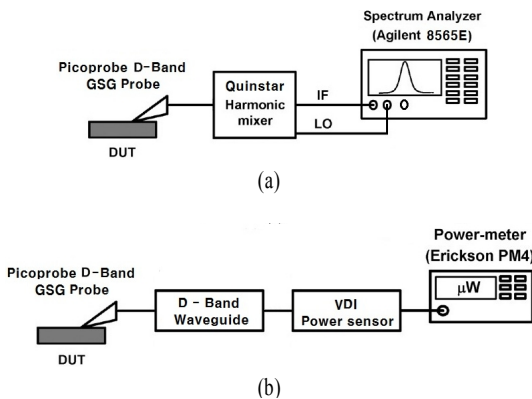


그림 6. 상위 밴드에서의 (a) 발진 주파수 및 (b) 출력 전력 측정을 위한 셋업  
 Fig. 6. Measurement setup for (a) output frequency and (b) output power at upper band.

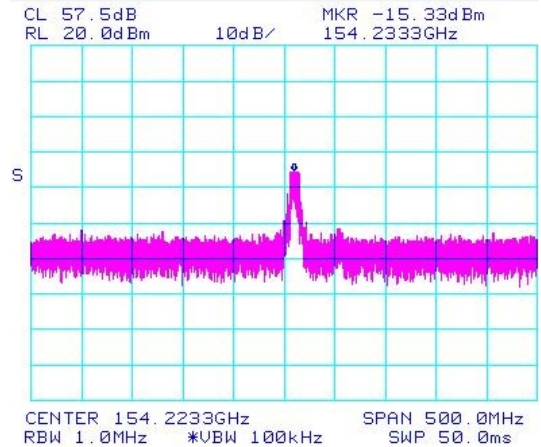


그림 7. 제어 전압이 1.9 V일 때의 상위 밴드 출력 스펙트럼  
 Fig. 7. Upper band output spectrum of the VCO at  $V_{TUNE}=1.9$  V.

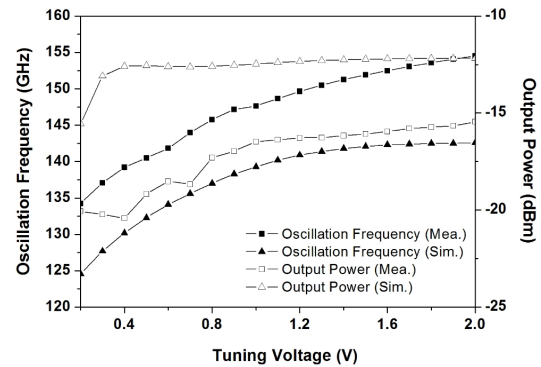


그림 8. 상위 밴드에서의 제어 전압에 따른 출력 주파수와 출력 전력  
 Fig. 8. Oscillation frequency and output power vs. tuning voltage for upper band signal.

위 밴드에서와 마찬가지로 수치적으로는 다소 오차가 있지만 경향성은 그대로 유지된 것으로 나타났다. 제어 전압이 0.2 V부터 2 V까지 변할 때 134.3 GHz부터 154.5 GHz까지의 발진 주파수 조절 범위를 가졌고, 출력 전력은  $-20.4$  dBm에서  $-15.5$  dBm까지 변하였다. 하위 밴드와 마찬가지로 제어 전압이 0.7 V부터 2 V까지 변할 때는  $-15 \sim -16$  dBm 내외의 비교적 평탄한 출력 전력을 유지하였다. 표 1에는 본 전압 제어 발진기 및 140 GHz 대역에서 동작하는 다른 전압 제어 발진기들에 대한 성능을 요약하여 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 본 회로는 기존

표 1. 전압 제어 발진기의 성능 비교

Table 1. Performance comparison with prior arts.

	Ref. [2]	Ref. [3]	Ref. [4]	This work
Process	90-nm CMOS	90-nm CMOS	90-nm CMOS	0.18- $\mu\text{m}$ SiGe
Topology	Push-push LC cross-coupled	Fundamental LC cross-coupled	Push-push LC cross-coupled	Push-push Colpitts
Frequency(GHz)	131	140	140	140
Tuning range(GHz)	2.2	0.8	3.5	20
Output power(dBm)	-15.2	-19	-23	-15.5
DC power(mW)	27.6(core only)	9.6*	15.2(core only)	72

\* Buffer 소모 전력 포함 여부 확실치 않음

의 유사 대역 발진기에 비해 월등한 주파수 조정 범위를 갖는 것을 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 상용화된 0.18- $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS 공정 기술을 바탕으로 70/140 GHz 듀얼 밴드 전압 제어 발진기를 개발하였다. 본 전압 제어 발진기는 하위 밴드인 70 GHz 대역에서 9 GHz의 주파수 조절 범위를 가졌으며, -1 dBm 내외의 출력 전력을 보였다. 또한, 상위 밴드인 140 GHz 대역에서는 20 GHz의 주파수 조절범위를 가졌으며, -15 dBm 내외의 출력 전력을 보였다. 본 연구는 Si 기반 공정에 기반한 넓은 주파수 조절 범위의 100 GHz 이상급 전압 제어 발진기의 가능성을 제시하며, 추후 지속적인 연구의 기반이 될 것으로 전망된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P. -C. Huang, R. -C. Liu, H. -Y. Chang, C. -S. Lin, M. -F. Lei, H. Wang, C. -Y. Su, and C. -L. Chang, "A 131 GHz push-push VCO in 90-nm CMOS technology", in *IEEE Radio Frequency Integr. Circuits Symp. Dig.*, pp. 613-616, Jun. 2005.
- [2] C. Cao, K. K. O, "A 140-GHz fundamental mode voltage-controlled oscillator in 90-nm CMOS technology", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 16, pp. 555-557, Oct. 2006.
- [3] N. Kim, K. Kim, and J. -S. Rieh, "A 70/140 GHz dual-band push-push VCO in a 90-nm CMOS technology", in *RFIC 기술 워크샵*, pp. 451-452, Sep. 2010.
- [4] R. Wanner, R. Lachner, and G. R. Olbrich, "A monolithically integrated 190-GHz SiGe push-push oscillator", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, pp. 862-864, Dec. 2005.
- [5] R. Wanner, R. Lachner, G. R. Olbrich, and P. Russler, "A SiGe monolithically integrated 278 GHz push-push oscillator", in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 333-336, Jun. 2007.
- [6] M. Seo, M. Urteaga, A. Young, V. Jain, Z. Griffith, J. Hacker, P. Rowell, R. Pierson, and M. Rodwell, ">300 GHz fixed-frequency and voltage-controlled fundamental oscillators in an InP DHBT process", in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 272-275, May 2010.
- [7] H. Li, H. -M. Rein, "Millimeter-wave VCOs with wide tuning range and low phase noise, fully integrated in a SiGe bipolar production technology", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 38, pp. 184-191, 2003.
- [8] H. -H. Hsieh, L. -H. Lu, "A 40-GHz low-noise amplifier with a positive-feedback network in 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, pp. 1895-1902, 2009.

김 경 민



2010년 2월: 고려대학교 전기전자  
전파공학부 (공학사)  
2010년 3월~현재: 고려대학교 전기  
전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] 밀리미터파 회로 및  
시스템

이 재 성



1991년 2월: 서울대학교 전자공학  
과 (공학사)  
1995년 2월: 서울대학교 전자공학  
과 (공학석사)  
1999년 12월: Univ. of Michigan EE-  
CS (공학박사)  
1999년~2004년: IBM Semiconduc-  
tor R & D Center  
2004년~현재: 고려대학교 전기전자전파공학부(現)부교수  
[주 관심분야] 밀리미터파 및 THz 소자 및 회로

김 남 형



2008년 2월: 고려대학교 전기전자  
전파공학부 (공학사)  
2008년 3월~현재: 고려대학교 전  
기전자공학과 석박사 통합 과정  
[주 관심분야] 밀리미터파 회로 및  
시스템