논문번호 12-02-09 http://dx.doi.org/10.7471/ikeee.2012.16.2.121

단일 전송선로의 주파수 동조회로를 이용한 push-push 전압제어 발진기의 설계 및 제작

A Design of Push-push Voltage Controlled Oscillator using Frequency Tuning Circuit with Single Transmission Line

류근관*, 김성찬*★

Keun-Kwan Ryu*, Sung-Chan Kim*★

Abstract

In this paper, a push-push VCDRO (Voltage Controlled Dielectric Resonator Oscillator) with a modified frequency tuning structure is investigated. The push-push VCDRO designed at 16GHz is manufactured using a LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) technology to reduce the circuit size. The frequency tuning structure is embedded in intermediate layer of A6 substrate by an advantage of LTCC process. Experimental results show that the fundamental frequency suppression is above 30dBc, the frequency tuning range is 0.43MHz over control voltage of 0 to 12V, and phase noise of push-push VCDRO presents a good performance of -103dBc/Hz at 100KHz offset frequency from carrier.

요 약

본 논문에서는 전압제어 발진기에서 변형된 구조의 주파수 동조회로를 갖는 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기를 설계 및 제작하였다. Push-push 전압제어 유전체 공진 발진기는 중심주파수 16GHz에서 설계되었으며, LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) 기술 공정의 장점을 이용하여 주파수 동조 회로를 A6 기판의 중간 layer에 삽입하여 설계하였으며 이로 인해 회로의 전체 크기를 줄일 수 있었다. 제작된 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 측정결과 기본 주파수의 억압특성은 30dBc 이상 특성을 나타내었으며 0~12V의 제어전압 범위에서 0.43MHz의 주파수 튜닝 대역폭을 얻었다. 또한 커리어로부터 100KHz 떨어진 지점에서 -103dBc/Hz의 위상잡음 특성을 나타내었다.

Key words : Oscillator, Dielectric Resonator, VCDRO, Push-push

Ⅰ. 서 론

마이크로웨이브 회로 설계 기술은 상업용 무선통신 기술의 발전과 더불어 급격히 발전하고 있으며 주로 회로의 소형화, 집적화, 경량화를 추구하고 있다. 또한, 무선통신 시스템에서 사용되는 신호원은 전체 시스템의 안정성에 가장 큰 영향을 미치므로 매우 중요한 부품으로 여겨지고 있으며 위상잡음 특성 및 신뢰성이 주요 관건이 된다. 또한, 그 사용 주파수도 Ku-band(12 ~ 14 GHz) 및 Ka-band(26.5 ~ 40 GHz)로 확대되고 있으며 고 신뢰도, 고 안정도, 저 위상잡음 및 저가격이 요구되고 있다.

3차원 집적화가 가능한 LTCC 기술은 마이크로파 회로의 크기 및 가격을 감소시키는데 적합한 기술이며,

* 국립한밭대학교 전자·제어공학과

★ 교신저자 : 김성찬, sckim@hanbat.ac.kr
* 接受日:2012年 05月 21日, 修正完了日: 2012年 06月 11日
揭載確定日: 2012年 06月 12日

동시에 낮은 유전체 loss tangent는 높은 주파수에서의 회로성능 특성을 보장한다. 그러므로 다양한 기판 기술에서 LTCC의 이와 같은 뛰어난 장점 때문에 마이크로파 및 밀리미터파의 엔지니어의 회로 설계 시도가 끊임없이 지속되고 있다[1-2].

유전체 공진기(DR, dielectric resonator)는 마이크로스트립 공진기나 도파관 공진기에 비해 높은 양호도와 작은 크기의 장점을 지니고 있다. 그리고 유전체 공진기를 이용한 유전체 공진 발진기(DRO, dielectric resonator oscillator)는 마이크로파 또는 밀리미터파 영역에서 높은 안정도 및 낮은 위상잡음의 신호원을 얻기 위한 가장 효과적인 방법이다[3]. 일반적으로 높은 안정도의 신호원은 시스템의 요구조건을 만족시키기 위해 주로 위상고정 방식을 사용해 왔다[4]. 이러한 위상고정 신호원을 위해서는 전압제어 발진기(VCO, voltage controlled oscillator)가 필수적이다. 하지만 push-push 구조의 전압제어 발진기의 경우 주파수 동조 회로를 실현하기는 어려움이 따른다. Push-push 구조의 발진기 이론은 다양한 논문에서 이미 설명된 바 있다[5-6]. 따라서 본 논문에서는 LTCC 기술의 장점인 3차원의 구조적인 장점을 이용함으로써 변형된 구조의 주파수 동조회로를 push-push 유전체 공진 발진기에 적용하여 마이크로파 신호원을 설계 및 제작하였다.

II. LTCC 유전체 공진 발진기의 설계

유전체 공진 발진기에서 가장 널리 사용되고 있는 구조는 HEMT(high electron mobility transistor)의 소스 단자에 연결되어 있는 저항으로 자기바이어스 방식을 사용하는 직렬궤환형 구조이다. 직렬 궤환형 구조는 부하에 따른 발진 주파수의 변동이 적고 회로가 간단하여 구현하기에 적합한 장점이 있다. 본 논문에서는 유전체 공진 발진기의 능동소자로서 Fujitsu에서 제공하는 FHX35X chip HEMT를 사용하였다. 또한 6개의 유전체 층을 갖고 있는 Ferro A6의 기판의 LTCC 공정을 이용하여 유전체 공진 발진기를 설계 및 제작하였다. Ferro A6는 유전율 5.9, loss tangent 0.0013, 유전체 두께 100 ㎛ 및 금속 두께 10 ㎛(max)의 제원을 가지고 있다.

그림 1은 LTCC 구조의 유전체 공진 발진기의 구조를 보여주고 있다. 첫 번째와 다섯 번째의 금속 층은 접지(ground)로 사용되었다. 또한, HEMT 소자의 드레인(drain)과 소스(source) 바이어스 회로는 세 번째의 금속 층에 삽입하였다. 그리고 게이트(gate) 단자에서 유전체 공진기와 결합하는 마이크로스트립 라인, 소스 단자에서 정궤환용 마이크로스트립 라인 및 드레인 정합회로(matching circuit)는 일곱 번째 금속 층에 위치하여 설계하였다. 두 번째, 네 번째 및 여섯 번째 금속 층은 LTCC 공정상 마이크로스트립 라인의 최소 선폭 및 선간 간격(gap)을 고려하여 빈(blank) 층으로 활용하였다. 고임피던스 전송라인을 구현하기 위해서는 100 ㎛ 이상의 유전체 층이 요구되기 때문이다.

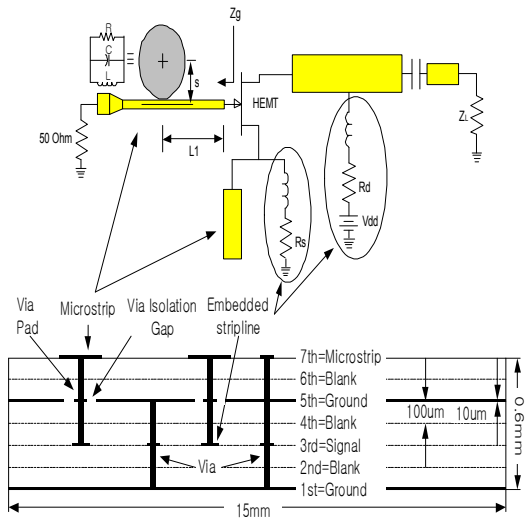

Fig. 1. Configuration of LTCC DRO
그림 1. LTCC 유전체 공진 발진기의 구조

그림 1은 마이크로스트립 라인과 결합한 유전체 공진기를 나타내고 있으며 Zg는 HEMT의 게이트 단자에서 바라본 등가회로의 임피던스를 나타낸다. L1의 길이가 공진 주파수의 파장에 대해 약 1/4일 때 임피던스 Zg의 리액턴스 변화가 급격하고 레지스턴스의 크기가 작기 때문에 낮은 위상잡음을 갖는 발진기 구현이 가능하다. 이와 같이 유전체 공진기와 결합한 마이크로스트립 라인의 전기적 길이가 90도일 때 임피던스 변환기(impedance inverter)로 동작한다. 따라서 임피던스 변환기는 병렬 공진회로를 직렬 공진회로로 변환한다. 높은 특성임피던스의 임피던스 변환기와 결합한 유전체 공진회로의 리액턴스 변화 기울기는 낮은 특성임피던스의 임피던스 변환기와 결합한 유전체 공진회로의 리액턴스 변화 기울기보다 급격하다. 이는 고 임피던스의 임피던스 변환기를 이용할 경우 발진기의 위상잡음 특성이 향상될 수 있음을 의미한다[7].

III. LTCC Push-push 전압제어 발진기의 설계

그림 2는 push-push 형태의 전압제어 유전체 공진 발진기(VCDRO, voltage controlled dielectric resonator oscillator)의 구조를 보여주고 있다. 직렬 궤환형 구조의 단일 발진기는 특히 $TE_{01\delta}$ 모드로 동작하는 유전체 공진기를 이용하는 push-push 발진기의 구현에 매우 적합하다. 따라서 본 논문에서는 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기를 설계하기 위해 두 개의 직렬 궤환형 발진기, 2차 고조파(2fo)의 전력 결합기 및 단일 주파수 동조회로를 이용하였다.

그림 2와 같이 유전체 공진기는 병렬 마이크로스트립 라인 사이에 위치하여 OSC1과 OSC2의 임피던스 변환기와 각각 동시에 결합된다. 기본 주파수의 경우 OSC1에서 HEMT의 게이트 전류는 OSC2에서 HEMT의 게이트 전류와 정반대의 위상, 즉 180도의 위상차를 갖는다. 그러나 2차 고조파의 경우 두 게이트 전류는 동위상, 즉 0도의 위상차를 갖게 된다. 완벽한 대칭구조인 OSC1과 OSC2의 신호는 다음과 같이 식(1) 및 식(2)로 각각 나타낼 수 있다.

$$S_{OSC1}(t) = a_1 e^{j\omega_0 t} + a_2 e^{j2\omega_0 t} + a_3 e^{j3\omega_0 t} + \ldots \quad (1)$$

$$S_{OSC2}(t) = a_1 e^{j\omega_0 (t-\pi)} + a_2 e^{j2\omega_0 (t-\pi)} + a_3 e^{j3\omega_0 (t-\pi)} + \ldots \quad (2)$$

식(1)과 식(2)에서 π의 위상차를 제외하고는 두 개의 신호는 이상적으로 크기 및 주파수가 동일하다. 그러므로 push-push 발진기의 출력 신호는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{out}(t) = 2a_2 e^{j2\omega_0 t} + 2a_4 e^{j4\omega_0 t} + 2a_6 e^{j6\omega_0 t} + \ldots \quad (3)$$

완벽하게 대칭구조인 OSC1과 OSC2의 경우 push-push 발진기는 식(3)과 같이 짝모드(even mode) 신호만을 제공한다.

그림 2는 바랙터 다이오드(varactor diode)를 이용한 주파수 동조회로의 보여주고 있다. 일반적으로 평면형 push-push 발진기에 주파수 동조회로를 삽입하는 것에는 어려움이 있다. 그러나 본 논문에서는 공진 주파수의 동조를 위해 유전체 공진기와 결합할 수 있도록 점선(dashed)으로 표시된 전송라인을 LTCC 다층 공정기술의 장점을 이용하여 여섯 번째 층(blanked layer)에 삽입하였다. 주파수 동조를 위한 점선으로 표시된 전송선로는 중심주파수의 반파장의 길이를 갖고 있으며 유전체 공진기는 전송선로의 중간에 위치시켜 최대 자계 결합이 발생하도록 하였다.

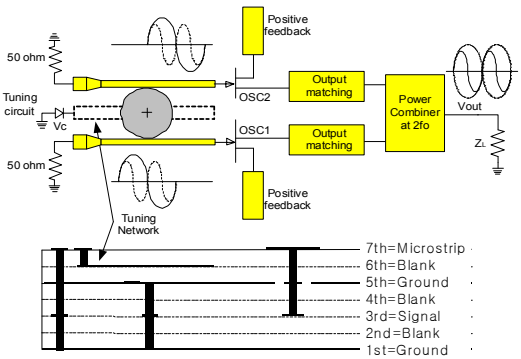

Fig. 2. Configuration of LTCC push-push VCDRO with single frequency tuning circuit

그림 2. 단일 주파수 동조회로를 갖는 LTCC push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 구조

IV. 측정 및 고찰

LTCC 공정을 기반으로 제작된 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기는 16GHz 근처에서 발진 주파수를 갖고 있으며 유전체 공진기는 트랜지스터의 게이트 단자로부터 약 1/4파장 길이만큼 떨어진 위치에 고정시켰다. 출력 스펙트럼 및 위상잡음 특성은 Agilent사의 8565E 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정되었다.

그림 3은 8565E 스펙트럼 분석기의 전체 span에서 측정된 스펙트럼이다. 기본 주파수 및 3차 고조파는 약 30dBc 및 26dBc의 억압특성을 각각 나타내었다.

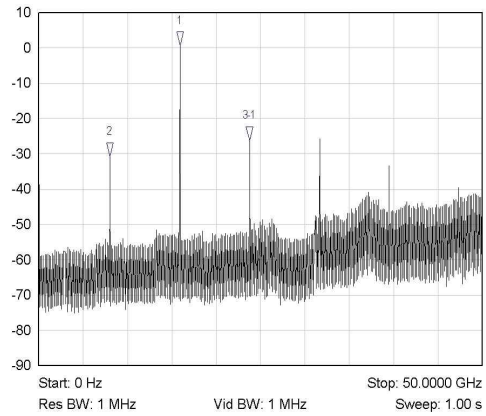

Fig. 3. Harmonic suppression characteristics of push-push VCDRO (The fundamental frequency suppression is 30dBc, and the third harmonic suppression is 26dBc.)

그림 3. Push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 고조파 억압특성

그림 4는 약 2.0dB의 케이블 손실을 포함한 0.5dBm의 출력 전력을 나타내고 있다. Free running 상태에서 중심 주파수는 목표 주파수에 비해 약간 낮게 측정되었으나 유전체 공진기의 동조나사 등을 이용하여 미세 조정하면 16GHz에 정확하게 맞추는 것이 가능하다.

제안된 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기는 중심 주파수로부터 100KHz 및 1MHz의 떨어진 주파수에서 -103dBc/Hz 및 -123dBc/Hz의 위상잡음 특성을 각각 갖고 있으며 이를 그림 5에 나타내었다. 능동소자로서 HEMT를 대신하여 플리커 잡음(flicker noise)이 매우 낮은 MESFET(metal semiconductor field effect

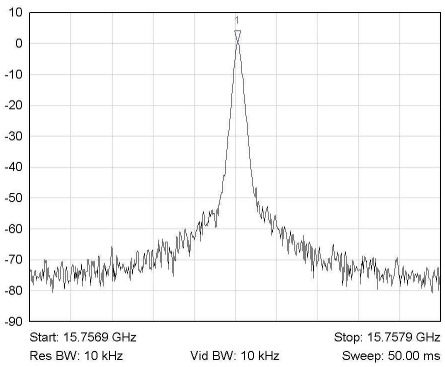

그림 4. Push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 출력 전력

Fig. 4. Output power of push-push VCDRO (The output power is 0.5dBm including cable loss of 2.0dB.)

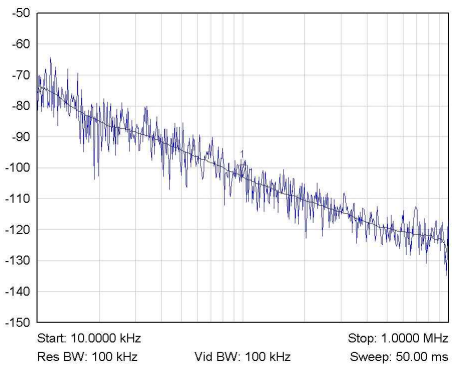

Fig. 5. Phase noise characteristics of push-push VCDRO (The maker1 means -103dBc/Hz at 100KHz offset frequency from carrier.)

그림 5. Push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 위상잡음 특성

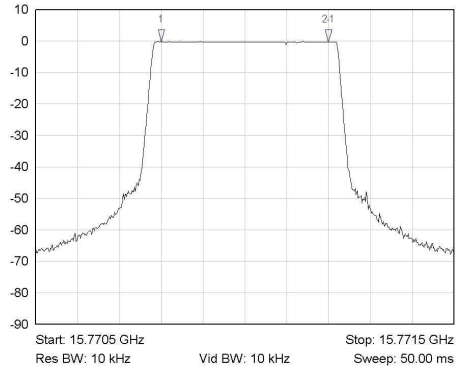

Fig. 6. Frequency tuning range of push-push VCDRO (The tuning range is 0.43MHz.)

그림 6. Push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 주파수 동조 범위

transistor) 및 HBT(heterojunction bipolar transistor) 등을 사용하면 위상잡음 특성이 더욱 향상될 것으로 사료된다.

그림 6은 제안한 주파수 동조회로에서 바랙터 다이오드에 의해 동조된 0.43MHz의 주파수 범위를 나타내고 있다. 동조범위는 다소 협대역 특성을 나타내고 있으나 위상고정 발진기를 구현하기 위해서는 충분한 동조범위를 갖고 있다.

제작된 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의

Table I. Performance of push-push VCDRO with proposed tuning structure

표 1. 제안한 동조회로를 갖는 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 성능 특성

파라미터	설계(목표)사양	측정결과
발진 주파수	16.0GHz	15.75GHz
출력 전력	0dBm	0.5dBm
고조파 억압		
@fo	>30dBc	>30dBc
@3fo	>25dBc	>26dBc
위상잡음		
@100KHz	-100 dBc/Hz	-103 dBc/Hz
@1MHz	-120 dBc/Hz	-123 dBc/Hz
DC 전력 소모	<40mA(5V)	<40mA(5V)
동조범위 [VD=1V-11V]	-	0.43 MHz

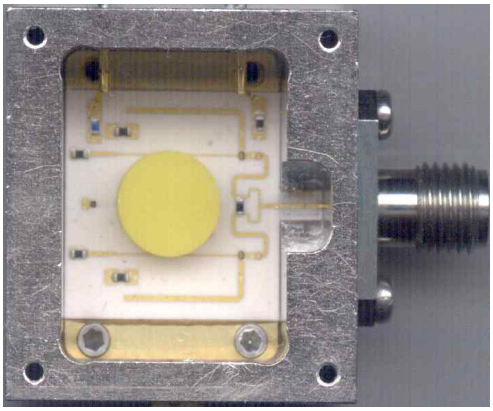

Fig. 7. Photograph of push-push VCDRO (The circuit size is 15mm X 15mm.)

그림 7. Push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 실물 사진

성능특성은 표 1에 요약되었다. 또한 그림 7은 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 실물사진으로 15mm × 15mm의 회로 크기를 나타내고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 유전체 두께 100um 및 금속 두께 10㎛ 인 Ferro A6 기판을 기반으로 한 LTCC 기술을 이용하여 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기를 설계 및 제작하였다. 바랙터 다이오드를 이용한 주파수 동조회로를 A6 기판의 중간층에 배치함으로써 push-push 구조의 전압제어 유전체 공진 발진기에서 평면형 구조의 어려움을 극복하였다. 제작된 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기는 대역통과 필터를 사용하지 않고도 30dBc 이상의 기본 주파수 억압특성을 나타내었으며 출력 전력은 0.5dBm 이상을 나타내었다. 또한 위상잡음은 중심 주파수로부터 100KHz 떨어진 주파수에서 -103dBc/Hz의 특성을 나타내었다. 이와 같이 제작된 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기는 위상고정 발진기에 응용될 수 있다. 또한 제안한 push-push 발진기의 주파수 동조회로 설계 및 제작 기술은 Ka대역의 위성통신 수신기, 무선 LAN, 이동통신 시스템 등과 같이 다양한 상업용 및 군사용 초고주파 부품 설계에 응용할 수 있겠다.

참고문헌

[1] B. G. Choi, M. G. Stubbs and C. S. Park, "A Ka-band Narrow Bandpass Filter Using LTCC Technology," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters,* vol. 13, no. 9, pp. 388-389, 2003

[2] K. H. Kim, M. S. Ahn, J. H. Kang and I. G. Yun, "Circuit Modeling of Interdigitated Capacitors Fabricated by High-K LTCC Sheets," *ETRI Journal,* vol. 28, no. 2, pp. 182-190, 2006

[3] J. Hesselbarth, P. Nuechter and U. Goebel, "Surface-mount High-Q Resonators for Millimeter-wave LTCC Oscillators," *33rd European Microwave Conference,* pp. 1283-1286, 2003

[4] T. A. Bos, F. Bayer and U. Lott, "A Low Cost 16.2GHz Phase Locked Oscillator for Wireless LAN," *IEEE MTT-S Digest,* pp. 1395-1398, 1997

[5] L. Dussopt and G. M. Rebeiz, "A Low Phase Noise Silicon 18-GHz Push-Push VCO," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters,* vol. 13, no. 1, pp. 4-6, 2003

[6] A. M. Pavio and M. A. Smith, "A 20-40 GHz Push-push Dielectric Resonator Oscillator," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,* vol. 33, no. 12, pp. 1346-1349, 1985

[7] K. K. Ryu, M. Q. Lee, I. B. Yom, S. P. Lee, "Development of EQM (Engineering Qualified Model) Local Oscillator for Ka-band Satellite Transponder," *Microwave and Optical Technology Letters,* vol. 40, no. 3, pp. 198-200, 2004

저 자 소 개

류 근 관 (정회원)

1992년 광운대학교 전자통신공학과 공학사
1994년 광운대학교 전자통신공학과 공학석사
2000년 광운대학교 전자통신공학과 공학박사
2000년 3월 ~ 2003년 1월 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원
2003년 ~ 현재 국립한밭대학교 전자공학과 교수
<주관심분야> 초고주파용 능동/수동 회로 설계

김 성 찬 (정회원)

1999년 동국대학교 전자공학과 공학사
2001년 동국대학교 전자공학과 공학석사
2006년 동국대학교 전자공학과 공학박사
2006년 ~ 2007년 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 박사후연구원
2007년 ~ 현재 국립한밭대학교 전자공학과 교수
<주관심분야> 밀리미터파 소자 및 회로설계, 제작