

논문 2004-41TC-5-9

낮은 위상잡음을 갖는 X-band 전압제어 유전체 공진형 발진기의 설계 및 제작

(Design and Fabrication of a X-band Voltage Control Dielectric Resonator Oscillator with The Low Phase Noise)

박 창 현*, 최 병 하*

(Chang-Hyun Park, Byung-Ha Choi)

요 약

본 논문에서는 낮은 위상잡음을 갖는 X-band용 전압 제어 유전체 공진형 발진기를 설계·제작하였다. 위상잡음을 개선하기 위하여 저잡음 특성과 프리커 잡음이 낮은 MESFET과 높은 선택도와 Q값이 큰 유전체 공진기를 사용하였다. 또한 바랙터 다이오드는 부하의 영향을 줄이기 위해서 Q-factor가 매우 큰 것을 사용하여야 하며, 전압에 대한 주파수 변동이 선형이 되도록 하기 위해 다이오드의 Gamma가 큰 바랙터 다이오드를 사용하였다. 구현된 회로는 최적의 성능을 갖도록 회로 시뮬레이터인 ADS를 사용하였다. 제작된 전압제어 유전체 공진형 발진기의 특성을 측정된 결과, 중심 주파수 12.05 GHz에서 5.8 dBm의 출력 파워와 -30 dBc의 고조파 억압과 100 kHz offset 주파수에서 -114 dBc의 위상잡음 특성을 얻을 수 있었으며, 바랙터 다이오드에 인가되는 전압의 변화에 따른 주파수 동조 범위는 15.2 MHz를 얻었고 이때의 전력 평탄도는 -0.2 dB의 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 제작된 발진기는 X-band에서 국부 발진기로 이용될 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a VCDRO (Voltage Control Dielectric Resonator Oscillator) with low phase noise for X-band application has been designed and fabricated. A low noise and low flicker noise MESFET and a high Q dielectric resonator were selected to obtain good phase noise performance. Also, a varactor diode having high Q, quality factor was used to reduce the loading effects and a big Gamma of diode was chosen for linearity of frequency over voltage tuning range. The fabricated circuits was simulated with circuit design tools, ADS to provide the optimum performances. As the measured results of fabricated oscillator, the output power was 5.8 dBm at center frequency 12.05 GHz and harmonic suppression -30 dBc, phase noise -114 dBc at 100 KHz offset frequency, respectively, and the frequency tuning range as the function of voltage applied to varactor diode was 15.2 MHz and its power variation with frequency was 0.2 dB. This oscillator could be available to a local oscillator in X-band.

Keywords : VCDRO, PHASE NOISE

I. 서 론

통신용량이 증가함에 따라 높은 주파수에서 발진기의 중요성은 날로 증가하고 있고, 특히 위상변조 방식을 사용하는 디지털 통신 시스템의 경우 국부 발진기의 주파수 안정도와 위상잡음 특성은 전체 시스템의 데이

터 오율특성에 상당히 중요한 역할을 한다^[1]. 디지털 변조에 요구되는 BER(Bit Error Rate)를 만족시키기 위한 낮은 위상 잡음은 Leeson^[2]이 제시한 공식에 근거하여 발진기의 loaded Q를 최대화하고, 발진기의 설계 시 낮은 프리커 또는 1/f 잡음을 가진 능동소자와 바랙터 다이오드 선택시 낮은 등가 잡음 저항을 가진 다이오드를 선택 해야하며, 전압 가변 이득을 낮게 유지하는 등의 방법을 고려하여 낮은 위상잡음을 얻을 수 있다.

특히, 위상 잡음 특성은 주로 트랜지스터의 잡음지수,

* 정회원, 국립 목포 해양대학교 해양전자·통신공학과 (Division of Marine Electronic & comm. Eng., Mokpo National maritime University)
접수일자: 2004년2월4일, 수정완료일 : 2004년4월28일

1/f 특성을 갖는 DC 근처 저주파 잡음과 캐리어와의 혼합에 의한 플리커 잡음(1/f noise), 공진부의 특성등에 의해 결정된다^[3]. 또한 유전체 공진기를 이용한 전압제어 발진기는 위상잡음과 안정도 측면에서는 우수하나, 유전체 공진기의 위상잡음 특성을 저하시키지 않고 전기적으로 튜닝할 수 있는 범위가 보통 1% 정도로 제한되어 있다^[4].

따라서 본 논문에서는 안정된 발진을 하면서 낮은 위상잡음 특성과 출력 전력 평탄도가 좋고, 고주파 특성이 우수하도록 구현하고자 하며, 구현된 회로는 HP사의 ADS를 이용하여 최적화하였다.

최적화된 회로는 유전율 $\epsilon=3.5$ 이고 두께 $H=20\text{mil}$ 인 TACONIC사의 RF35 마이크로 스트립 기판 위에 구현하여 X-band에서 사용할 수 있는 전압제어 유전체 공진형 발진기를 설계·제작하였다.

II. 전압 제어 유전체 공진형 발진기

전압 제어 유전체 공진형 발진기(VCDRO)는 유전체 공진기의 결합위치에 따라 크게 병렬 결합 발진기, 반사형 발진기, 직렬 결합 발진기로 나눌 수 있으며, 출력단에 유전체 공진기를 결합하는 병렬 결합형이나 반사형은 능동소자의 자체 결합 없이도 발진하는 장점이 있으나, 발진기의 전체 적인 성능 저하나 주파수의 변화를 일으키는 단점이 있으므로 본 논문에서는 직렬 결합형 발진기로 설계하였다.

그림 1은 일반적인 2단자망 부성 저항 발진기의 모델이다. 트랜지스터는 S파라미터로 표현되며 안정도 판별식 K는

$$K = \frac{1 + |\Delta| - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \quad (1)$$

여기서, $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$ 이다.

이때 발진기가 안정적으로 발진하기 위해서는 다음 세 가지의 발진조건을 만족해야 한다.

$$K < 1 \quad (2)$$

$$\Gamma_c \Gamma_{in} = 1 \quad (3)$$

$$\Gamma_L \Gamma_{out} = 1 \quad (4)$$

발진을 위해서는 항상 안정도 K가 1보다 작아야 하며, 이 조건이 만족되지 않을 경우에는 공통단자를 서

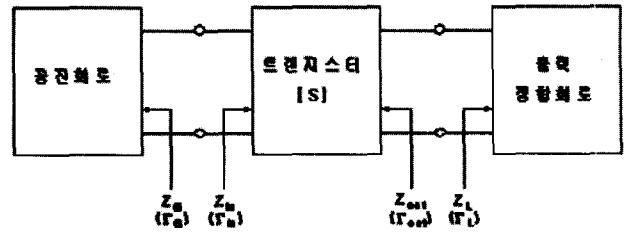


그림 1. 2단자망 발진기 모델
Fig. 1. Two-port oscillator model

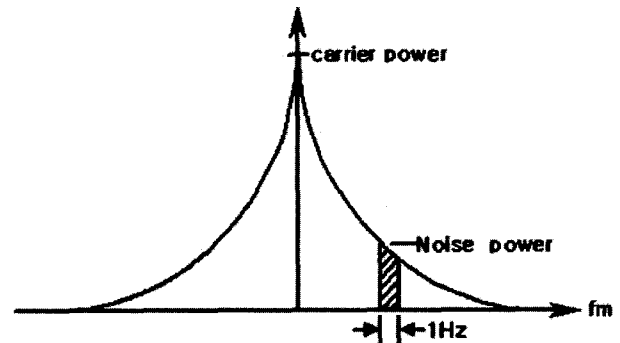


그림 2. 위상잡음 정의
Fig. 2. Definition of phase noise

로 바꾸거나 제한 회로를 이용하여야 한다.

위상잡음의 발생 메카니즘은 낮은 주파수에서 잡음원(1/f noise)이 능동소자의 비선형성을 통해 발진 주파수 부근의 잡음으로 기인된다. 발진기의 위상잡음은 발진주파수로부터 오프셋 주파수 f_m 만큼 떨어진 주파수에서 1 Hz의 대역폭을 갖는 잡음전력과 발진주파수에서의 신호 전력 비로 그림 2처럼 정의된다.

일반적으로 발진기는 제한을 갖는 증폭기로 볼 수 있으므로 Leeson은 발진기의 위상잡음을 다음과 같이 모델링 하였다^[5].

$$\psi(f_m) = \frac{FkTB}{2P_{avg}} \left[\frac{1}{f_m} \frac{f_c}{4Q_L^2} + \frac{1}{f_m} \frac{f_c}{4Q_L^2} + \frac{f_c}{f_m} + 1 \right] \quad (5)$$

여기서, F 는 증폭기의 잡음지수, kTB 는 열 잡음 전력 발생원, f 는 발진주파수, Q_L 은 공진기의 부하 Q, f_c 는 플리커 잡음전력이 열 잡음전력과 같아지는 코너 (corner)주파수이다. 식(5)의 Leeson모델에서 위상잡음은 먼저 플리커 잡음이 적은 트랜지스터를 선택하면 저주파의 $1/f^3$ 잡음을 줄일 수 있고 공진기의 높은 선택도는 열 잡음에 의한 $1/f^2$ 잡음을 줄일 수 있다. 그리고 바랙터의 높은 선택도는 유전체 공진기와 결합 정도에 의해 위상잡음에 영향을 미치게 된다^[6]. 따라서 본 논문에서는 위상잡음을 고려하여 플리커 잡음이 적은 NEC사의 NE32584C를 선택하였고, 공진기로서는 Q값

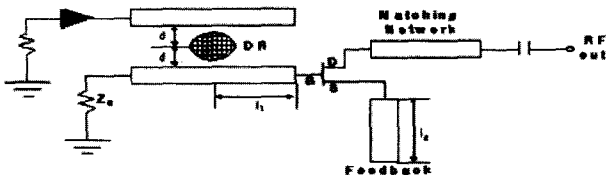


그림 3. 전압 제어 유전체 발진기의 구조
Fig. 3. A configuration of VCDRO

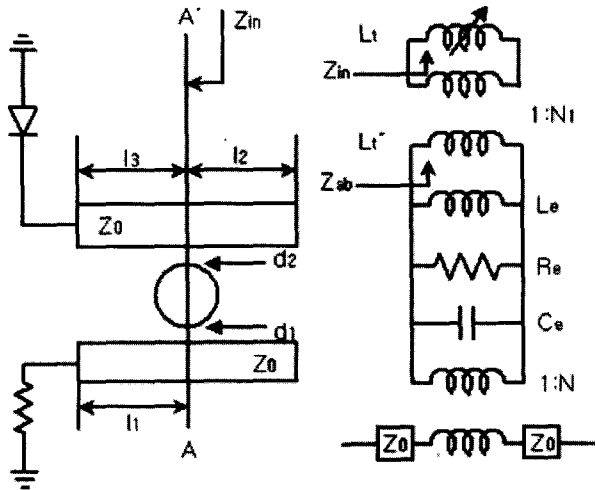


그림 4. 바랙터와 유전체 공진기의 결합
Fig. 4. Coupling varactor to DR

이 큰(40,000이상) 아이텍사의 IDR03을 사용하였으며, 바랙터 다이오드는 높은 선택도와 가변 범위가 좋은 M/A -COM사의 MA46451를 사용하였다.

MESFET의 동작점 결정은 설계 목표치 중 출력레벨 및 위상잡음을 고려하여 결정한다. 일반적으로 높은 드레인-소스 전류는 위상 잡음이 증가하고, 적은 드레인-소스 전류는 출력 파워가 감소되게 된다. 특히 1/f 잡음은 발진회로의 발진 신호와 주변 저주파 잡음과 주파수 혼합에 의해 나타나므로 DC 바이어스점, 능동 소자에서 본 RF 부하곡선, RF 주파수 대역에서 임피던스의 주파수 의존성 등에 의해 영향을 받는다. 따라서 트랜지스터의 V-I 특성 곡선으로부터 출력은 작지만 위상잡음을 작게 하기 위한 동작 점으로 $V_{ds}=2V$ 이고, $V_{gs}=-0.3V$, $I_{ds}=20mA$ 인 점을 선택하였다.

또한 발진기의 동조 방법에는 기계적 동조와 전기적 동조 방법이 있는데, 본 논문에서는 바랙터 다이오드를 이용한 전기적 동조 방법을 사용하였다. 이때 바랙터 다이오드가 소자의 직렬 또는 병렬로 직접 연결되어지면 발진기의 위상잡음 특성이 감소하므로 직렬 케환 형태를 가지는 발진기의 유전체 공진기에 바랙터 다이오드가 연결된 마이크로스트립 전송선로를 결합시켜

공진주파수를 변화시킴으로써 주파수 동조를 얻는 방법을 사용하여 위상잡음을 줄이도록 하였다. 그림 3은 바랙터 다이오드가 연결된 유전체 공진형 발진기의 구조를 나타낸다.

계한 VCDRO의 회로로써 그림 3에서의 직렬케환 회로는 부정저항을 발생시키기 위해 공통 소스단에 리액턴스 소자를 직렬로 연결하여 l_2 길이를 최적화하였다.

그림 4는 유전체 공진기의 등가회로이며, 두 개의 마이크로스트립 라인과 동시에 자기적 결합을 일으킨다. 유전체 공진기와 마이크로스트립 라인 사이의 간격 d_1, d_2 에 의해 결합 계수 β_1, β_2 가 각각 결정된다. 길이 l_2 는 $\lambda/4$ 로 유지되며 AA'면에서 공진기가 최대 자체 결합을 갖는다. 유전체 공진기의 공진 주파수를 전기적으로 가변시키기 위해서 바랙터 다이오드를 사용할 경우 AA'에서 바랙터 다이오드를 들여다본 입력 임피던스는 l_3 을 $\lambda/4$ 의 임피던스 변환기를 거치므로 바랙터의 접합용량의 변화는 입력 임피던스의 인덕턴스로 변화로 치환된다. 결합면에서 바라본 입력 임피던스는 다음 수식 (6)과 같이 표현된다.

$$Z_{in} = j\omega Z_0^2 C_v v(t) \quad (6)$$

이때, 변환 인덕턴스 $L_t = Z_0^2 C_v v(t)$ 이고, ab에서 바라본 임피던스

$$Z_{ab} = (j\omega L_t / N_1^2) \quad (7)$$

바랙터에 의한 식(7)의 입력 인덕턴스 변화는 이상적인 변압기를 통해서 공진회로의 총 인덕턴스 L_{et} 를 다음 수식과 같이 변화시킨다.

$$L_{et} = L_e // L_t' = L_e L_t' / (L_e + L_t') \quad (8)$$

그리고 전달 인덕턴스 L_t' 은 다음 수식과 같다.

$$L_t' = L_t / N_1^2 \quad (9)$$

여기서 N_1 은 이상적인 변압기의 권선비이다. 그러므로 총인덕턴스의 변화로 기존의 공진 주파수 ω_0 는 새로운 공진 주파수 ω_0' 에서 공진이 일어난다.

$$\omega_0' = \frac{1}{\sqrt{L_{et} C_e}} \cong \omega_0 \left\{ 1 + \frac{N_1^2 L_e}{2Z_0 C_e v(t)} \right\} \quad (10)$$

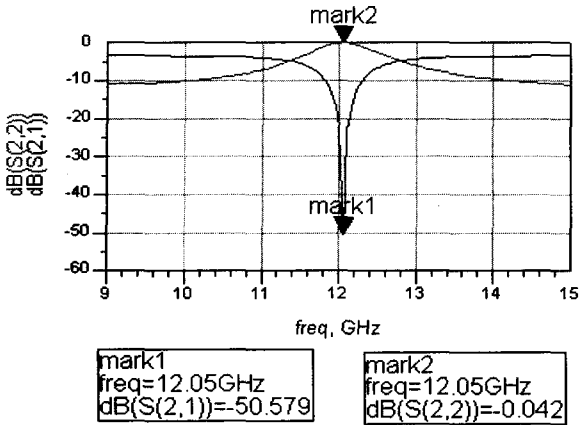


그림 5. 공진기 특성
Fig. 5. Resonator characteristics

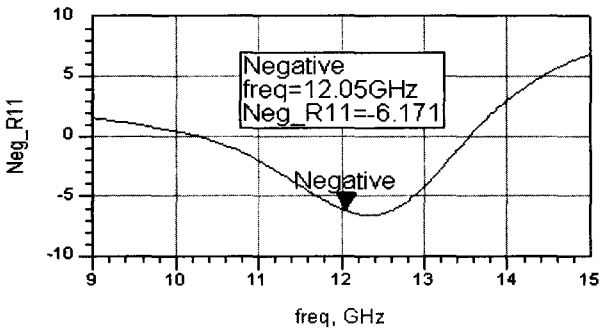


그림 6. 부정 저항 특성
Fig. 6. Negative resistance characteristics

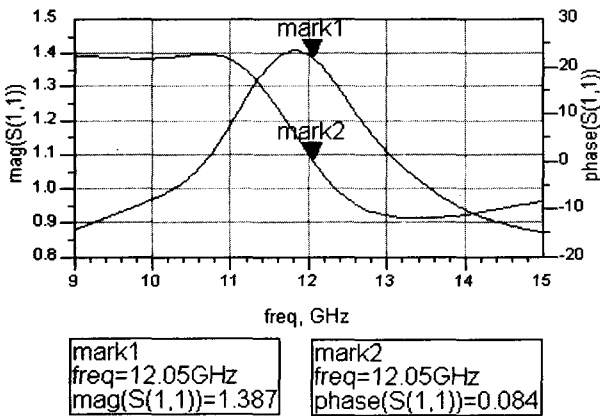


그림 7. 발진 테스트
Fig. 7. Oscillation test

식(10)에서 공진기와 마이크로 스트립 라인의 결합을 증가시키면 이상적인 변압기의 권선비 N_1 이 증가한다. 따라서 바랙터에 의한 영향이 증가되어 공진주파수의 변화 대역폭이 넓어짐을 알 수 있다. β 와 quality factor와의 관계는 다음 식과 같이된다^[7].

$$Q_u = Q_L(1 + \beta) = \beta Q_e \quad (11)$$

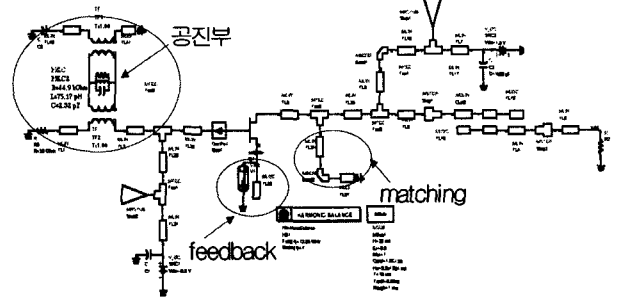


그림 8 하모닉 발란스 시뮬레이션 셋업
Fig. 8. Simulation setup for harmonic balance

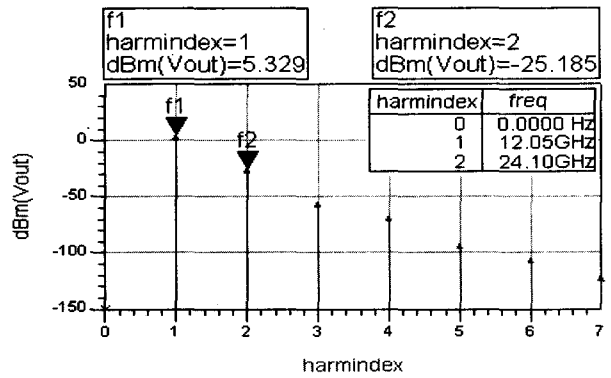


그림 9. 출력 특성
Fig. 9. Output characteristics

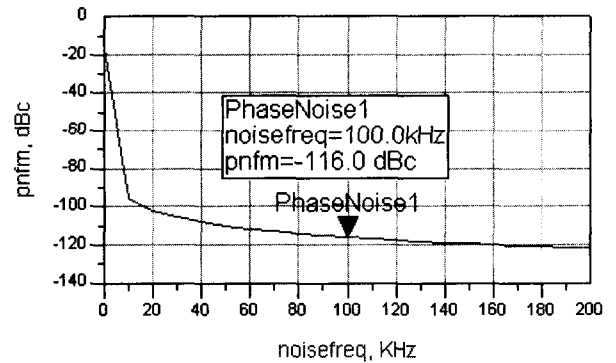


그림 10. 위상 잡음
Fig. 10. Phase noise

그리고 등가 모델 파라미터 값 R, L, C 값은 β 와 ω_0 와 관계로서 다음 수식과 같다^[8].

$$R = 2Z_0\beta, L = \frac{R}{Q_u\omega_0}, C = \frac{Q_u}{\omega_0 R} \quad (12)$$

좋은 공진 특성을 얻기 위해 그림 3에서의 l_2 의 Feedback길이를 변화시켜 가면서 공진 주파수를 확인한 결과 그림 5와 같이 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

Feedback를 최적화시킨 결과 그림 6에서처럼 11GHz~13GHz 사이에서 부정 저항 특성을 나타냄으로써 발진기

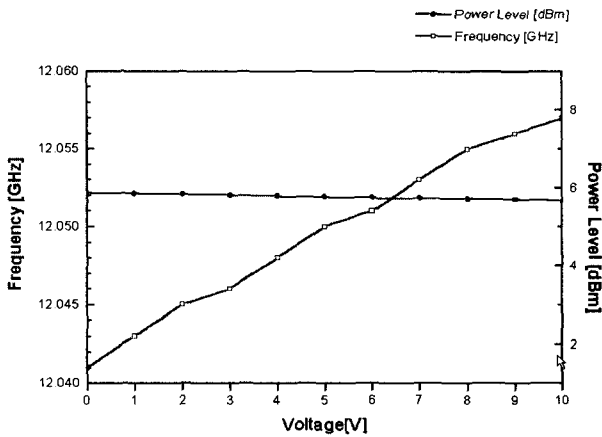


그림 11. 가변 전압에 따른 출력 전력과 주파수 응답
Fig. 11. Output power and frequency response VS tuning voltage

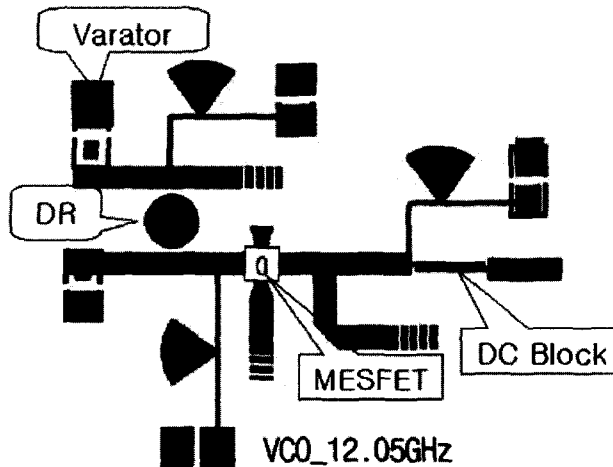


그림 12. VCDRO 레이아웃
Fig. 12. Layout of VCDRO

능성을 확인하였고 그림 7은 S_{11} 의 크기와 위상을 나타낸다.

부하 정합 회로는 설계 주파수에서 최대의 파워를 가져다 주도록 결정하여야 하며 부하 임피던스는 일반적으로 다음의 수식으로서 결정된다^[9].

$$R_L(\omega_0) + jX_L(\omega_0) = -\frac{R_{IN}(0, \omega_0)}{3} - jX_{IN}(0, \omega_0) \quad (13)$$

소신호 파라미터에 의해 설계된 발진기 회로에서 계산된 부하 임피던스 Z_L 을 50Ω 과 정합이 되도록 오픈 스타브를 사용한 출력 정합 회로를 구성한 후, 출력 전력, 고조파 특성 등 트랜지스터의 비선형 특성에 의해 발생하는 발진 특성 예측을 하기 위하여 ADS를 이용하여 하모닉 발란시스 시뮬레이션을 하였다.

그림 8은 최종 설계된 HB 해석을 위한 회로도이다. 우수한 성능을 얻기 위하여 Feedback 길이와 매칭회로

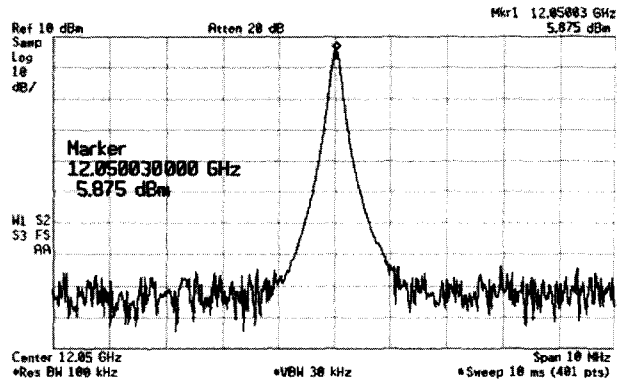


그림 13. 주파수 특성
Fig. 13. Frequency characteristics

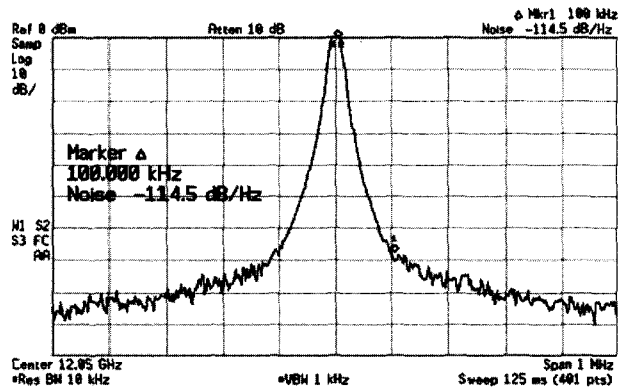


그림 14. 위상 잡음 특성
Fig. 14. Phase noise characteristic

그리고 공진부 파라미터를 변화시켜가면서 최적화하였다. 설계된 VCDRO의 시뮬레이션 결과 출력 특성은 12.05 GHz에 5.8 dBm, 고조파 응답은 기본파 대비 -30 dBc, 위상 잡음은 100 kHz offset 주파수에서 -116 dBc, 바랙터 다이오드에 인가되는 가변 전압에 따른 주파수 가변 범위와 출력 전력 변화는 그림 11과 같다.

III. VCDRO의 제작 및 측정결과

그림 8의 설계된 VCDRO 회로는 유전율이 3.5인 TACONIC사의 RF35 기판 위에 제작하였고, MESFET는 저잡음 특성을 가지고 있는 NEC사의 NE32584C와 가변 특성이 우수한 바랙터 다이오드는 M/A-COM사의 MA46451를 또 높은 Q값을 갖는 유전체 공진기는 아이텍사의 IDR03를 주문하여 사용하였다. 그림 12는 설계된 VCDRO의 레이아웃을 보여주며, 최상의 측정결과를 얻기 위해 DR의 위치와 피드백을 튜닝하여 낮은 위상잡음을 얻을 수 있었다.

측정결과 주파수 특성은 중심 주파수 12.05 GHz에서 5.8 dBm의 출력과 0 V에서 10 V의 가변 전압에서 주파

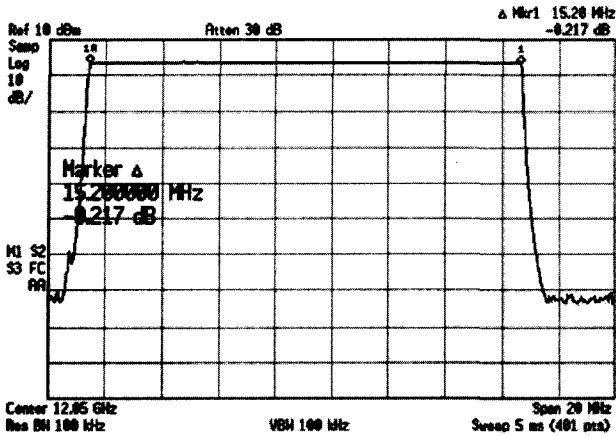


그림 15. 주파수 가변 특성

Fig. 15. Characteristic for variable frequency

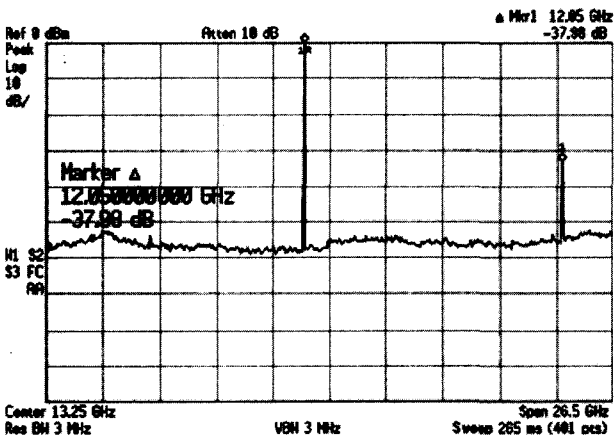


그림 16. 고조파 억압 특성

Fig. 16. Harmonic suppression characteristic

수 동조 범위는 15.2 MHz이며, 이때의 전력 평탄도는 -0.2 dB로 우수한 성능을 보였고, 고조파 응답은 2차 고조파에서 -37 dBc, 위상 잡음은 100 kHz offset 주파수에서 -114 dBc로 매우 우수한 값이 측정되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 낮은 위상잡음을 갖는 전압 제어 유전체 공진기형 발진기를 설계 및 제작하였다.

이를 위하여 낮은 프리커 잡음을 갖는 NEC사의 NE32584C MESFET은 등가회로모델을 이용하였고, Q 값이 큰 유전체 공진기는 아이텍사의 IDR03을 주문 제작하여 다이오드의 Gamma가 큰 바랙터 다이오드와 결합된 등가회로를 구현하여 R, L, C 파라미터를 추출하였으며, 설계 및 시뮬레이션은 HP사의 ADS를 이용하였다. 제작용 기판은 유전율이 3.5이고 두께가 20mil인 TACONIC사의 RF35기판을 사용하였다.

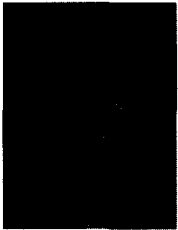
제작된 발진기의 성능은 HP사의 스펙트럼 분석기

(E4407B)를 이용하여 측정하였고 게이트 바이어스가 -0.3V이고 드레인 인가 전압은 2V에서 주파수 12.05 GHz에서 5.8 dBm과 0 V에서 10 V의 가변 전압에서 주파수 동조 범위는 15.2 MHz에, 전력 평탄도는 -0.2 dB로 우수한 성능을 얻을 수 있었으며, 위상 잡음은 100 kHz 대역폭에서 -114 dBc로 우수한 위상 잡음특성을 보였다. 고조파 응답은 2차 고조파에서 -37 dBc의 값을 얻었다. 설계·제작된 전압 제어 유전체 공진기 발진기는 X-band에서 국부 발진기로 사용할 수 있을 것이다.

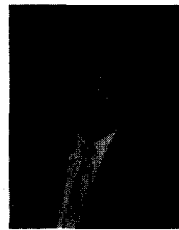
참 고 문 헌

- [1] Ali Hajimiri, "The Design of Low Noise Oscillators" Kluwer Academics Publishers. 1996.
- [2] Leeson, D. B., "A simple model of feedback oscillator noise spectrum", Proc IEEE., 1966. 54, pp 329-330.
- [3] David M. Pozar, "Microwave Engineering" John Wiley & Sons, Inc. 1990.
- [4] J.Y.Lee and U.S. Hong, "Voltage control dielectric resonator using three terminal MESFET varactor", Electronic Letter, 4th Aug. 1994. Vol.30. No.16
- [5] F. M. Gardner, "Phaselock Reqniques" 2nd Ed. New York, Wiley, 1979.
- [6] Robert G. Rogers, "Low Phase Noise Microwave Oscillator Design" Artech House. 1991.
- [7] Aps Khanna and Y. Garault, "Determination of Loaded, Unloaded, and External Quality Factors of a Dielectric Resonator Coupled to a Microstrip Line", IEEE MTT-31, No 3, March, 1983.
- [8] G. Gonzalez, "Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design" Prentice-Hall Inc., 1997.
- [9] Eric Holzman, "Solid State Microwave Power Oscillator Design" Artech House. 1992

저 자 소 개



박 창 현(정회원)
 2002년 국립 목포 해양대학교
 해양 전자·통신공학부
 공학사
 2004년 국립 목포해양대학교 대학원
 전자·통신공학과 공학 석사
 <주관심분야: 마이크로파 능동 및
 수동소자, 이동통신, MEMS>



최 병 하(정회원)
 1969년 한국항공대학교 항공전자
 공학과 공학사
 1983년 건국대학교 대학원
 전자공학과 공학석사
 1987년 통신기술사
 1993년 한국항공대학교 대학원
 항공전자공학과 공학박사
 1972년~현재 국립목포해양대학교 해양전자·통
 신공학부 교수
 <주관심분야: 안테나, 해상이동통신 및 위성통신>

