

소신호 산란계수를 이용한 3.2 GHz 저잡음 유전체 공진 발진기의 설계 및 제작

Design and Fabrication of a 3.2 GHz Low Noise Dielectric Resonator Oscillator using Small-Signal S-Parameter

조인귀 · 정재호 · 최현철

In-Kui Cho · Jae-Ho Jung · Hyun-Chul Choi

요 약

스펙트럼 분석기의 2차 local oscillator(LO) 신호인 3.2 GHz에서 동작하는 직렬 궤환형 유전체 공진 발진기를 설계 및 제작하였다. 트랜지스터의 소신호 산란계수를 이용하여 발진기를 설계하였으며, 유전체 공진기와 마이크로스트립 선로 사이의 결합계수로 인한 유전체 공진기의 반사계수를 조정하여 우수한 저잡음 특성을 얻었다. 제작된 유전체 공진 발진기의 측정 결과 출력전력은 10.50 dBm, 위상잡음은 10 kHz의 오프셋에서 -116 dBc/Hz, 고조파특성은 19.33 dBc를 얻었다.

Abstract

A series feedback DRO operating at 3.2 GHz applicable to the spectrum analyzer as the second local oscillator, is designed and fabricated. We can obtain a low noise by utilizing the small signal S-parameter of the transistor and adjusting the reflection coefficient from the coupling coefficient between dielectric resonator and microstrip line. The results show that output power is 10.50 dBm, a stable low phase noise is -116 dBc/Hz at a 10 kHz offset frequency and a harmonic characteristic is 19.33 dBc.

I. 서 론

최근 이동통신의 눈부신 발전과 더불어 스펙트럼 분석기 등과 같은 고주파 계측기 분야의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 이로 인해 이 분야에 대한 국내의 독자 기술 보유가 시급한 실정이다. 계측기의 수신부에서 사용되는 국부 발진기는 전체 시스템의 성능에 큰 영향을 미치므로 온도 안

정성이 뛰어나고 잡음 특성이 우수해야 한다. 특히 발진기의 위상잡음을 향상시키기 위해서는 양호도(Quality Factor)가 큰 공진기와 잡음 특성이 우수한 능동소자를 사용하여 발진기를 구현하는 것이 필수적이다^[1]. 따라서 LC 공진기나 마이크로스트립 공진기에 비해 양호도가 크고 온도 안정성이 뛰어난 유전체 공진기를 공진단으로 사용하는 유전체 공진 발진기(Dielectric Resonator Oscillator : DRO)의 사용이 확대되고 있다.

경북대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Kyungpook National University)

· 논문 번호 : 980916-091

· 수정완료일자 : 1999년 1월 4일

유전체 공진 발진기는 회로의 비선형 동작 특성으로 인해 설계시 트랜지스터의 대신호 산란계수를 필요로 한다. 그러나 트랜지스터의 대신호 산란계수 측정은 시간이 많이 소요되고 복잡한 장치를 요구한다^{[2],[3]}. 반면, 소신호 산란계수는 간단하게 측정 가능하며 이를 바탕으로 한 발진기 설계시 간단한 알고리즘을 이용하여 발진기를 설계할 수 있으며, 이때 유전체 공진기의 반사계수를 초기값으로 이용할 수 있다.

본 논문에서는 스펙트럼 분석기의 2차 국부발진기를 설계·제작하였으며, 그 사양은 표 1과 같다. 유전체 공진기와 마이크로스트립 선로 사이의 거리에 대한 유전체 공진기의 반사계수와 부하 양호도(Q_L)의 특성을 분석하여 발진기의 설계에 이용하였다. 또한 발진기의 출력전력과 위상잡음은 공진기의 양호도에 크게 의존하므로 마이크로스트립 선로와 유전체 공진기간의 결합계수를 조정하여 최적 설계하였다. 발진기의 특성을 결정하는 위상잡음을 줄이기 위해서 양호도(Q)가 큰 유전체 공진기를 사용하였으며, 트랜지스터는 잡음지수가 낮고 1/f 잡음특성이 우수한 것을 사용하였다.

표 1. 발진기의 기본사양

Table 1. The basic specification of oscillator.

항 목	규 격 (SPEC.)
주파수	3.2 GHz
출력 LEVEL	+10 dBm ±2 dB
Harmonic	< 15 dBc
Phase Noise	< -105 dBc / Hz @ 10 KHz

II. 설계 방법

2-1 발진기 이론

주파수가 안정한 DRO에서는 DR을 직렬 케환성분(Series Feedback Element) 및 병렬 케환성분(Parallel Feedback Element)의 두가지 형태로 사

용한다. 즉 직렬 케환형, 병렬 케환형으로 나눌 수 있다. 병렬 케환형은 유전체 공진기를 케환요소로서 직접 이용한 형태로 해석이 복잡하고 마이크로스트립 선로와의 결합도를 조절하기 어려우며 튜닝(Tuning)범위가 좁을 뿐만 아니라 출력이 낮다. 직렬 케환형은 공진기와 선로간의 결합관계를 모델화하기 쉽고 부하에 대하여 발진 주파수 변화 및 출력 전력 변화가 적다는 장점을 갖고 있다. 따라서 병렬 케환형의 단점을 보완할 수 있을 뿐만 아니라 회로 구조가 간단한 직렬 케환형 발진기를 선택하였다.

2-단자망 발진기는 일반적으로 그림 1과 같이 공진부, 능동소자부, 부하로 구성되며, 능동소자에서의 반사계수 (Γ_{IN})와 부하에서의 반사계수 (Γ_{OUT})는 공진기의 반사계수 (Γ_R)와 부하 반사계수 (Γ_L) 및 트랜지스터의 소신호 산란계수 [S]에 의해 다음과 같이 결정된다^{[4],[5]}.

$$\Gamma_{IN} = S_{11} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_L}{1 - S_{22} \Gamma_L} \quad (1)$$

$$\Gamma_{OUT} = S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_R}{1 - S_{11} \Gamma_R} \quad (2)$$

발진기의 설계에 있어 트랜지스터의 불안정성은 식 (3)으로 표현된다^[3].

$$K < 1 \quad (3)$$

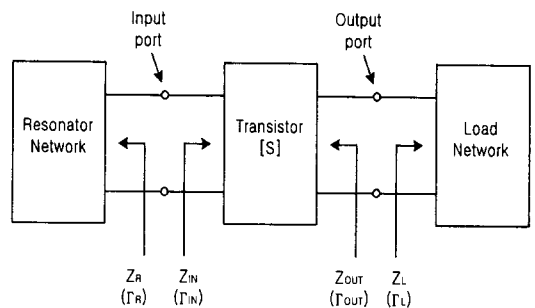


그림 1. 2-단자망 발진기 모델

Fig. 1. Two-ports oscillator model.

여기서, K 는 트랜지스터의 안정도계수를 나타내며, 만약 1보다 큰 값을 가질 경우 트랜지스터에 케환을 첨가하여 안정도계수를 1보다 작게 해야 한다.

발진기의 정상상태 발진조건은 다음 식으로 표현된다^[3].

$$\Gamma_{IN} \cdot \Gamma_R = 1 \quad (4)$$

$$\Gamma_{OUT} \cdot \Gamma_L = 1 \quad (5)$$

발진기가 과도 상태에서부터 정상상태까지 계속 발진하기 위해서는 식 (4)와 식 (5)가 과도기 상태동안 만족되어야 하는데, 이때 트랜지스터의 소신호 산란계수는 전력의 증가로 인해 대신호 산란계수로 변하게 된다. 따라서 발진기는 다음 식과 같은 초기조건을 만족하도록 설계되어야 한다^[3].

$$1.2R_R < -R_{IN} \quad (6)$$

$$X_R = -X_{IN} \quad (7)$$

여기서, 발진을 시작하기 위해서는 능동소자의 부성저항이 부하저항보다 약 20% 정도를 초과해야 함을 나타내는 것이며, 발진기가 발진을 계속하여 정상 상태로 도달함에 따라 능동소자의 부성저항은 정상상태 발진조건을 만족하는 값에 도달한다.

Γ_R 는 1보다 작으므로 발진을 유지하기 위해서는 Γ_{IN} 이 1보다 커야 한다. 그리고 Γ_{IN} 이 2보다 크다는 조건하에서 발진기 설계시 소신호 산란계수만을 이용할 수 있다^{[3],[5]}. 그러나 Γ_{IN} 이 너무 크게 되면 발진기는 공진기 없이 발진하게 되고 위상잡음이 아주 나쁜 발진 신호를 얻게 된다. 반면 Γ_{IN} 이 너무 작으면 공진기가 놓인 상태에서도 발진이 없게 된다. 따라서 Γ_{IN} 은 2와 3사이의 값이 적절하다.

2-2 공진부의 구성

직경이 d 이고 높이 L 인 고립된 원통형 유전체

공진기의 공진 주파수는 TE_{010} 모드에서 다음과 같은 근사식으로 표현된다^{[5],[6]}.

$$f \text{ [GHz]} = \frac{68}{d \text{ [mm]} \sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{d \text{ [mm]}}{L \text{ [mm]}} + 3.45 \right) \quad (8)$$

여기서, d 와 L 은 각각 공진기의 직경과 높이, ϵ_r 은 공진기의 비유전율을 나타내는데, $1 < d/L < 4$ 와 $30 < \epsilon_r < 50$ 의 범위에서 2% 이내의 오차를 갖는다^{[3],[6]}.

고주파 발진기에서 공진기와 능동소자는 발진기의 특성을 결정하는 중요한 부분이며, 유전체 공진기와 결합을 하는 마이크로스트립 라인, 주파수를 결정하는 튜너, 지지대 등으로 구성되는 유전체 공진기의 구성도는 그림 2와 같다.

공진기의 스푸리어스 모드(Spurious Mode)를 막기 위해서는 직경과 높이의 비가 2.2~3이 되도록 선택하는 것이 바람직하다. 유전체 공진기는 비유전율이 35.46, 직경이 17.15 mm, 높이는 8.39 mm인 Trans. Tech.사의 유전체 공진기를 사용하였고, 위상잡음을 줄이기 위해 비유전율이 4.5, 직경이 10.02 mm, 높이는 3.46 mm인 지지대를 사용하였다. d_1 의 증가는 공진 주파수를 낮아지게 하며, d_2 의 증가는 공진 주파수를 높아지게 한다.

마이크로스트립 선로와 결합되는 유전체 공진기의 상대적인 위치가 발진기의 출력전력과 위상잡

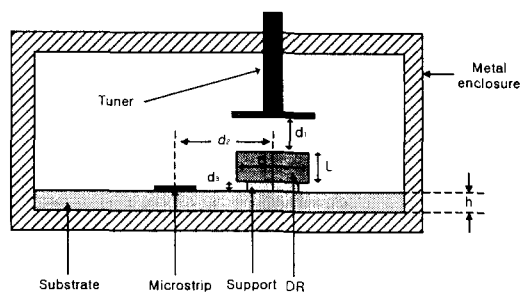


그림 2. 유전체 공진기의 구성도
Fig. 2. Alignment of the dielectric resonator.

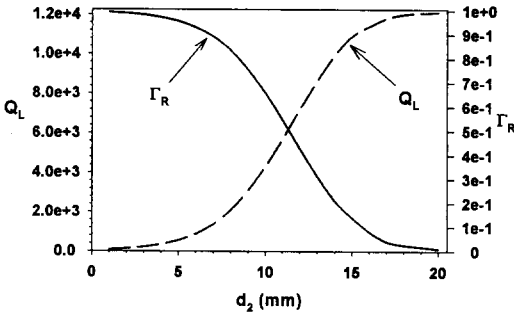


그림 3. d_2 에 따른 Γ_R 과 Q_L 의 변화
Fig. 3. The variation of Γ_R and Q_L according to d_2 .

음에 결정적인 영향을 준다^[7]. 그림 3은 유전체 공진기와 마이크로스트립 선로 사이의 거리 d_2 에 따른 유전체 공진기의 반사계수 (Γ_R)와 부하 양호도 (Q_L)의 특성을 보여준다. 여기서, d_2 가 증가함에 따라 Q_L 이 증가하는데 이는 발진기의 위상잡음이 감소될 수 있음을 의미한다. 또한 d_2 의 증가는 결합계수의 감소로 인한 Γ_R 의 감소를 의미하여 출력전력이 감소할 것임을 예측할 수 있다.

d_2 와 d_3 가 줄게 되면 유전체 공진기와 마이크로스트립 선로 사이의 결합이 강하게 되어 높은 출력전력을 얻게 되나 부하 양호도(Q_L)값을 낮추게 되어 나쁜 위상잡음을 얻게 된다. 따라서 출력전력과 위상잡음의 상보적인 특성으로 시스템의 사양에 맞도록 d_2 의 길이를 적절히 선정해야 한다.

발진기 위상잡음은 Leeson이 제안한 식이 널리 사용되며, 발진기의 단측파대 위상잡음은 다음 식으로 주어진다^[8].

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(f_m) &= \frac{FkT}{2P_o} \left[1 + \left(\frac{f_o}{2Q_L f_m} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{f_c}{f_m} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, F 는 능동소자의 잡음지수, k 는 볼츠만 상수, T 는 주변 온도[°K], f_m 는 중심 주파수로부터의 주파수 이격[Hz], Q_L 은 공진기의 Loaded Q, P_o 는 발진기 출력[W], f_o 는 발진기 중심 주

파수[Hz], f_c 는 코너(Corner) 주파수[Hz]이다.

식 (9)에서 위상잡음이 Q_L 의 함수로 표현되며 Q_L 에 역수 관계임을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 Γ_R 을 0.5, 0.6, 0.8로 설계하여 유전체 공진기와 마이크로스트립 선로 사이의 결합계수 변화로 Q_L 을 조정하여 출력전력과 위상잡음의 특성을 비교, 분석하였다.

2-3 DRO 설계

본 논문에서 사용한 직렬 케환형 유전체 공진 발진기의 등가회로는 그림 4와 같고, 잠재적으로 불안정한 BJT의 입력단에 유전체 공진기를 위치시킨 것으로 마이크로스트립 선로와 유전체 공진기가 강하게 결합하면 BJT는 불안정해지고 발진이 일어나게 된다.

능동소자로서 선정된 AT-42085의 3.2 GHz에서의 소신호 산란계수는 $S_{11} = 0.68 \angle 145.28^\circ$, $S_{21} = 1.958 \angle 42.8^\circ$, $S_{12} = 0.0772 \angle 64.6^\circ$, $S_{22} = 0.418 \angle -50.8^\circ$ 로 S_{11} 과 S_{22} 가 1보다 작으므로 케환이 요구된다.

길이 a 는 유전체 공진기 반사계수의 위상을 결정하며, 길이 b 는 이미터단에서 케환량을 결정한다. 그리고 길이 c 와 d 는 최대 출력을 얻기 위한 출력정합의 값을 의미한다. 이 값을 구하는 과정은 이미터(emitter)단에 케환을 취하여 S'_{11} 과 S'_{22} 가

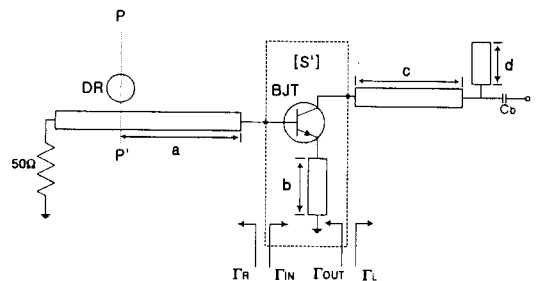


그림 4. 유전체 공진 발진기의 구조
Fig. 4. The configuration of the DRO.

1보다 크게 함으로서 트랜지스터를 불안정하게 하고, 선택된 Γ_R 에 의해 Γ_{OUT} 을 도출하고 최대 출력이 가능하도록 Γ_L 을 구성하였다. 이때 각 단에서 발진기의 초기조건이 만족하는지 확인해야 하며, 이러한 과정은 여러번의 반복적인 작업이 요구된다.

트랜지스터의 이미터에 케환의 양이 $-j93.9 \Omega$ 일 때 입력단자에서 $R_{IN} = -40.877 \Omega$, $R_R = 20.403 \Omega$, $X_{IN} = -37.676 \Omega$, $X_R = 37.765 \Omega$ 으로 식 (6), 식 (7)의 초기발진조건이 만족하며, 케환의 양이 다른 경우에는 초기발진조건이 만족하지 않았다. 이때 트랜지스터의 새로운 소신호 산란계수[S']는 $S'_{11} = 2.53 \angle -87.36^\circ$ 과 $S'_{22} = 1.38 \angle -71.17^\circ$ 로 모두 1보다 큰 값으로서 충분한 불안정성을 나타낸다.

초기조건을 만족하는 입출력 정합회로가 구성이 되면 트랜지스터의 안정도원상에서 불안정 영역에 있는지 확인하여 최종 설계회로를 결정해야 하며, 그림 5는 설계된 회로의 입·출력 안정도원으로서 입·출력 모두가 불안정 영역에 있음을 나타낸다.

발진기의 최종 설계된 마이크로스트립 선로의 치수는 표 2와 같다.

표 2. 마이크로스트립 선로의 치수

Table 2. Dimension of the microstrip line.

μ _strip	a	b	c	d	RF choke
단위(mm)	22.17	19.7302	4.64	2.1	15.84

III. 제작 및 측정

제작에 사용된 기판은 RT/Duroid 3003($\epsilon_r = 3$)이고, 설계되어진 회로의 음영필름과 제작된 치수는 그림 6과 같다. 측정 장비는 신호의 고조파 특성을 측정하기 위해 스펙트럼 분석기 HP-8563E와 위상잡음을 측정하기 위해 Phase Noise RDL's NTS-1000A를 사용하였다.

$\Gamma_R = 0.6$ 인 경우에 유전체공진기와 마이크로스트립 선로 사이의 거리(d_2)가 예측했던 10.6mm에서 발진현상이 있었고 d_2 가 증가하면 발진현상이 없었으며, d_2 가 작아지면 신호의 순수성이 떨어지는 것을 확인하였다.

그림 7은 $V_{CE} = 8 V$, $I_c = 30 mA$ 의 바이어스 상태에서 스펙트럼 분석기로 측정한 고조파 특성을 나타낸다.

주파수 범위를 2.5 GHz에서 10 GHz까지의 대역에서 본 것으로, 기본 주파수와 2차 고조파와는 19.33 dBc의 성능을 보이고 있다. 이것은 15 dBc인 발진기의 2차 고조파 사양을 만족함을 나타내며, Γ_R 이 작을수록 더 우수한 2차 고조파 특성을 나타내었다.

그림 8은 스펙트럼 분석기의 스펠을 100 kHz로 하 경우 기본 발진 주파수의 스펙트럼을 나타낸다.

기본 주파수인 3.2000468 GHz에서 출력 전력이 10.50 dBm이며, 주파수 안정도가 중심 주파수에서 매우 우수하며, 발진 주파수는 정확히 3.2 GHz를 보이지 못하고 있는데 이는 기계적인 튜닝에서 오는 정밀성에 의한 것으로 전기적인 튜닝으로 대처한다면 우수한 주파수 선택도를 얻을 수 있을 것

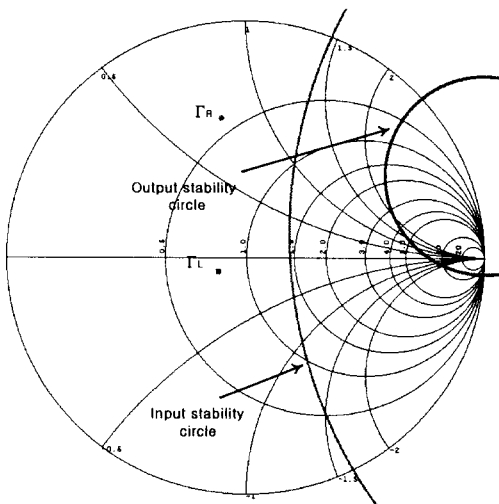


그림 5. 입·출력 안정도원과 Γ_R , Γ_L 의 위치
Fig. 5. Input·output stability circle and load ports.

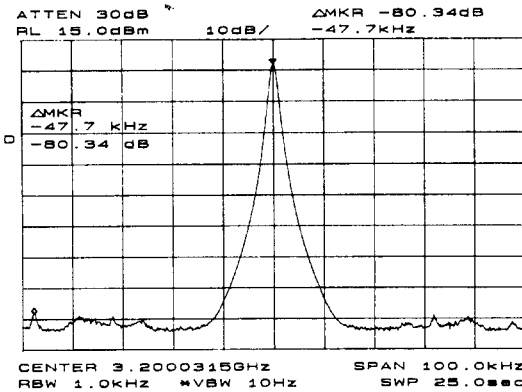


그림 9. 발진 신호의 스퓨리어스 특성
Fig. 9. Spurious characteristic of oscillation signal.

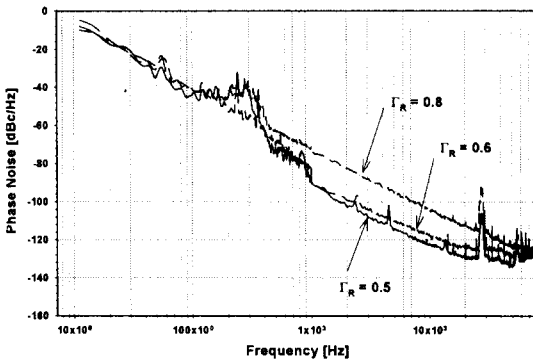


그림 10. DRO의 위상잡음 특성
Fig. 10. Phase noise characteristic of DRO.

Γ_R 이 감소할수록 위상잡음이 감소하여 위상잡음의 특성이 Q_L 에 의해 결정됨을 알 수 있으며, Γ_R 이 0.5에서 가장 우수한 위상잡음을 나타내었

다. 200 Hz의 부근에서 위상잡음의 감소폭이 심하게 이탈하는 것(Spurious)을 확인할 수 있는데 이는 기관의 불안정한 접지에 영향이 있음을 확인하였으며, 다른 원인을 찾아 개선하는 것이 필요하다.

$\Gamma_R = 0.5, 0.6$ 과 0.8 에서의 발진기의 전체적인 특성을 표 3에 나타내었다.

Γ_R 이 증가함에 따라 유전체 공진기와 마이크로스트립 선로 사이의 결합계수가 증가하여 출력전력이 증가하며, 반면 공진기의 양호도(Q_L) 감소로 위상잡음의 특성은 나빠짐을 나타내고 있다. 이것은 유전체 공진기의 반사계수의 증가는 Q_L 의 감소와 결합계수의 증가를 의미하고 있음을 알 수 있다. 위상잡음 특성과 출력전력 특성은 서로 상보적인 관계이므로 제작하려는 발진기의 사양에 따라 적절히 이와 같이 선택하여야 한다.

IV. 결 론

스펙트럼 분석기의 수신부에 2차 주파수 혼합기의 LO 신호로 사용되는 저잡음의 발진기를 설계, 제작하여 그 특성을 분석하였다. 발진기의 설계는 트랜지스터의 대신호 산란계수를 이용하는 대신 트랜지스터의 소신호 산란계수를 이용하여 시간적, 장비면에서 유리한 설계 방법을 선택하였으며, 유전체 공진기의 반사계수(Γ_R)를 조정하여 출력전력과 잡음특성의 상보적인 관계를 확인함으로써 우수한 위상잡음 특성을 얻을 수 있었다. 유전체 공진기의 반사계수(Γ_R)를 0.5로 설계시 가장 우

표 3. 공진기의 반사계수(Γ_R)에 따른 DRO 특성
Table 3. DRO characteristic according to reflection coefficient of resonator.

Γ_R / 특성	주파수(GHz)	출력전력(dBm)	고조파(dBc)	위상잡음@10 kHz (dBc/Hz)	Spurious@3 kHz (dBc)
0.5($I_C=30$ mA)	3.2	7.33	26.00	-121	72.50
0.6($I_C=30$ mA)	3.2	10.50	19.33	-116	80.34
0.8($I_C=38$ mA)	3.2	13.33	23.33	-105	78.33

수한 잡음특성을 얻었으며 Γ_R 의 증가에 따라 잡음특성은 나빠지나 출력전력은 향상됨을 확인할 수 있었다. 유전체 공진기는 비유전율이 35.46, 직경이 17.15 mm, 높이는 8.39 mm인 Trans. Tech.사의 유전체 공진기를 사용하였고, 위상잡음을 줄이기 위해 비유전율이 4.5, 직경이 10.02 mm, 높이는 3.46 mm인 지지대를 사용하였으며, 반사계수(Γ_R)를 0.6으로 설계하여 출력전력은 10.50 dBm, 고조파 특성은 19.33 dBc, 위상잡음은 -116 dBc/Hz로 스펙트럼 분석기의 기준사양을 만족하는 유전체 공진 발진기를 구현하였다.

능동소자의 바이어스에 따른 특성을 연구하고, 이상적인 비아 홀(via hole)에 의한 접지와 납땀 그리고 제조시에 정밀성이 더한다면 좀 더 안정한 발진주파수와 위상잡음 특성을 얻을 수 있으리라 여겨진다. 또한 위상잡음의 특성에서 낮은 오프셋의 경우 발생하는 과도한 스퓨리어스 현상을 막는 것에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서 설계·제작한 DRO는 스펙트럼 분석기의 수신부에 이용 가능하며, 이동통신의 무선중계 장치의 고안정 발진기에 응용할 수 있으며, 전기적인 조정이 가능하도록 VCDRO(Voltage Controlled Dielectric Resonator Oscillator)를 구현하여 PLL(Phase Locked Loop)에 응용할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] J. K. Plourde, and C. L. Ren, "Application

of dielectric resonators in microwave components", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-29, no. 8., pp. 754-770, Aug. 1981.

[2] K. M. Johnson, "Large signal GaAs MES-FET oscillator design", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, no. 3, March 1979.

[3] T. L. Lim, "A soft-substrate k-Band VT-DRO with Low Phase Noise", *Asiapacific Microwave conference*, pp. 127-130, 1995.

[4] E. Holzman, *Solid-state Microwave power oscillator Design*, Artech House, pp. 82, 1992.

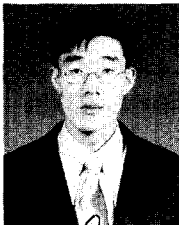
[5] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design*, Prentice-Hall, pp. 397-399, 1984.

[6] D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric resonator*, Artech House, pp. 494-495, 1986.

[7] M. N. Tutt, "The Role of Baseband Noise and Its upconversion in HBT Oscillator Phase Noise", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-43, no. 7, July 1995.

[8] U. L. Rohde, *Microwave and Wireless Synthesizers Theory and Design*, John Wiley & Sons, pp. 79-90, 1994.

조 인 귀



1997년 2월: 경북대학교 전자, 전기공학부(공학사)
 1997년 3월~현재: 경북대학교 대학원 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 고주파 회로설계, 발진기 설계, RF 시스템 설계 등

정 재 호



1994년 2월: 경북대학교 무기재료공학과(공학사)
 1996년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1996년 3월~현재: 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 고주파 회로설계, 압전체 수치해석, RF 시스템 설계 등

최 현 철



1982년 2월: 경북대학교 전자공학과
(공학사)

1984년 2월: 한국과학기술원 전기
및 전자공학과(공학석사)

1989년 2월: 한국과학기술원 전기
및 전자공학과(공학박사)

1989년~1990년: 대현정밀(주) 연구

소장

1990년~1992년: 경북대학교 공과대학 전자공학과 전임
강사

1992년~1996년: 경북대학교 공과대학 전자공학과 조교
수

1996년~현재: 경북대학교 전자·전기공학부 부교수

[주 관심분야] 전파전파 및 역산란해석, 초고주파 회로
및 시스템 설계, EMI/EMC 등