

---

# 5.8GHz ISM대역 국부 발진기용 능동 공진 발진기 설계 및 제작

신용환\* · 임영석\*

## Design and Fabrication of a Active Resonator Oscillator for Local Oscillator in ISM Band(5.8GHz)

Yonghwan Shin\* · Yeongseog Lim\*

### 요 약

본 논문에서는 트랜지스터를 이용해서 이득을 갖는 능동 대역 통과 필터, 부정저항 특성을 갖는 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기를 설계 제작하였다. 제안된 능동 공진 발진기는 ISM 대역의 국부 발진기로 사용 가능하도록 5.5GHz의 발진주파수를 갖도록 설계하였다. 설계된 능동 공진 발진기는 유전율 3.38, 유전체 두께 0.508mm, 금속 두께 0.018mm인 기판 위에 구현하였다. 이득을 갖는 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기는 5.6GHz의 발진주파수와 -2Bm의 출력과 100kHz 오프셋에서의 위상잡음 특성은 -81dBc/Hz이다. 부정저항 특성을 갖는 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기는 5.8GHZ의 발진주파수와 -4dBm의 출력과 100kHz 오프셋에서의 위상잡음 특성은 -91dBc/Hz이다.

### ABSTRACT

In this paper, active resonator oscillator using active band pass filter with gain, active resonator with negative resistance using transistor(agilent ATF-34143) is designed and fabricated. Proposed active resonator oscillator for local oscillator in ISM band(5.8GHz) is designed with 5.5 GHz oscillation frequency. Designed active resonator oscillator implemented on the substrate which has the relative dielectric constant of 3.38, the height of 0.508mm, and metal thickness of 0.018mm. Active resonator oscillators using active band pass filter with gain show the oscillation frequency of 5.6GHz with the output power of -2dBm and phase noise of -81dBc/Hz at the offset frequency of 100kHz. Active resonator oscillators active resonator with negative resistance show the oscillation frequency of 5.6, 5.8GHz with the output power of -4dBm and phase noise of -91dBc/Hz at the offset frequency of 100kHz.

### 키워드

Negative Resistance, Active Band Pass Filter, Active Resonator, Active Resonator Oscillator

### · 서 론

통신 시스템에서 주요한 부품 중 하나인 발진기는 주로 시스템의 주파수원으로 사용된다. 일반적으로 저주파에선 크리스탈류의 자가공진 발진기를

이용하지만, 고주파에선 능동소자와 직류 전원을 이용하여 특정한 주파수의 신호를 생성하는 형태의 발진기를 사용한다. 최근에는 출력특성, 위상잡음, 크기나 비용 등을 개선하기 위한 여러 구조의 발진기가 제시되고 있다. 발진기의 특성을 결정하는 공진부는 집적에 유리한 평면 구조의 공진기, 높은 Q값을 갖는 유전체 공진기가 주로 사용된다. 평면 구조의 공진기의 경우 특성 향상에 한계가 있고, 유전체 공진기의 경우는 집적이 어려워 최근 회로의 소형화, one-chip화 추세에 있어 문제가 된다. 본 논문에서는 트랜지스터와 저항, 커패시터를 이용해서 1-포트 부성저항 발진기(다이오드 발진기)와 같은 형태로 별도의 공진부가 필요하지 않는 능동 공진 발진기를 설계 및 제작하였다.

트랜지스터를 이용해서 특정 주파수 대역에서만 부성저항 특성을 갖으면서 공진 하는 구조로 5.8GHz ISM(Industrial Scientific Medical) 대역 국부 발진기용 능동 공진 발진기를 제작하였다.

트랜지스터를 이용 1-포트 부성저항 발진기 형태로 발진기를 구현하면, 별도의 공진 부와 출력 정합회로가 필요하지 않고, 집적이 용이해서 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 공정이나 CMOS 집적이 쉬워, one-chip화가 쉽다.[1][2][3][4]

하지만 설계 시 정확한 능동소자의 모델링 데이터가 필요하고, 발진주파수가 불안정하거나, 많은 수의 트랜지스터 사용으로 위상잡음 특성이 나쁜 단점도 있다.

## II. 발진기의 기본원리

일반적으로 고주파용 발진기의 발진원리는 부성저항 개념으로 설명된다. IMPATT 또는 Gunn 다이오드를 이용하는 1-포트 부성저항 발진기를 그림 1에 표시하였다.

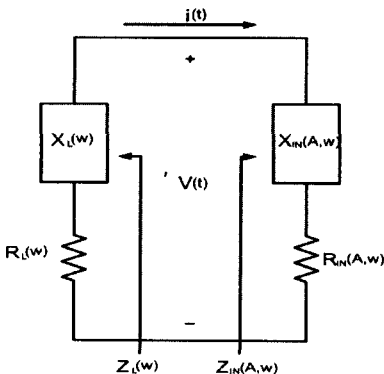


그림 1. 1-포트 부성저항 발진기  
Fig 1. 1-port negative resistance oscillator

입력 전류의 진폭과 주파수에 관한 함수로 표현되는 입력 임피던스는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{IN}(A, \omega) = R_{IN}(A, \omega) + jX_{IN}(A, \omega) \quad (1)$$

식 (1)에서  $A$ 는 회로에 흐르는 전류  $i(t)$ 의 진폭이고, 발진이 일어나기 위해서는 능동소자의 입력임피던스  $R_{IN}(A, \omega)$ 은 0보다 작아야 한다. 일반적으로 발진기는 부성저항을 갖는 능동소자와 식 (2)와 같은 부하 임피던스를 갖는 수동소자로 구성된다.

$$Z_L(\omega) = R_L(\omega) + jX_L(\omega) \quad (2)$$

식 (1)에서 회로의 전류 진폭이  $A_0$ 일 경우 주파수  $\omega_0$ 에서 발진이 일어나기 위해서는 다음과 같은 발진조건을 만족해야 한다. [5][6]

$$\Gamma_{IN}(A_0, \omega_0)\Gamma_L(\omega_0) = 1 \quad (3)$$

식 (3)에서  $\Gamma_{IN}(A, \omega)$ 은 입력 반사계수가 전류진폭과 주파수에 의존함을 나타낸 것이다.

반사계수를 임피던스에 관한 식으로 표현하면, 식 (4a)(4b)와 같다.

$$\Gamma_{IN}(A_0, \omega_0) = \frac{Z_{IN}(A_0, \omega_0) - Z_0}{Z_{IN}(A_0, \omega_0) + Z_0} \quad (4a)$$

$$\Gamma_L(\omega_0) = \frac{Z_L(\omega_0) - Z_0}{Z_L(\omega_0) + Z_0} \quad (4b)$$

식 (4a)와 (4b)를 식 (3)에 대입하면, 다음과 같은 조건을 정리 할 수 있다.

$$Z_{IN}(A_0, \omega_0) + Z_L(\omega_0) = 0 \quad (5)$$

식 (5)에 식 (1)과 (2)를 대입하여 실수부와 허수부의 발진조건을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{IN}(A_0, \omega_0) + R_L(\omega_0) = 0 \quad (6a)$$

$$X_{IN}(A_0, \omega_0) + X_L(\omega_0) = 0 \quad (6b)$$

만일 어떤 소자가  $R_{IN}(A, \omega) < 0$ 을 만족한다면, 이 소자는 특정 주파수 대역 ( $\omega_1 < \omega < \omega_2$ )에서 부성저항 특성을 갖고 있다는 것을 의미한다. 따라서 1-포트 회로망은 식 (6)의 조건을 만족하면 회로망 전체가 특정 주파수 대역 ( $\omega_o$ )에서 발진하게 된다.

$$|R_{IN}(A, \omega)| > R_L(\omega) \quad (7)$$

1-포트 부성저항 발진기의 발진은 식 (7)을 만족할 동안 계속되는데, 점차적으로 증가하던 전류의 진폭은 결국 정상상태 값 ( $A = A_o, \omega = \omega_o$ )에 도달하게 되고, 이것은 루프저항이 0이 될 때 발생하게 된다. 결론적으로, 발진 시작조건과 발진 유지조건은 다음과 같다.[6][7]

발진 시작조건

$$R_{IN} + R_L < 0 \quad (8a)$$

$$X_{IN} + X_L = 0 \quad (8b)$$

발진 유지조건

$$R_{IN} + R_L = 0 \quad (9a)$$

$$X_{IN} + X_L = 0 \quad (9b)$$

1-포트 부성저항 발진기에 사용되는 다이오드는 특성상 본래 부성저항 특성을 가지고 있지만, 3단자 능동소자인 트랜지스터의 경우 그렇지 못한 경우가 많다. 적절한 제한 회로를 이용하여 능동소자의 입력 임피던스를 불안정 영역에 위치시킨다면 능동소자와 공진부를 포함한 회로는 부성저항의 특성을 갖게 된다.

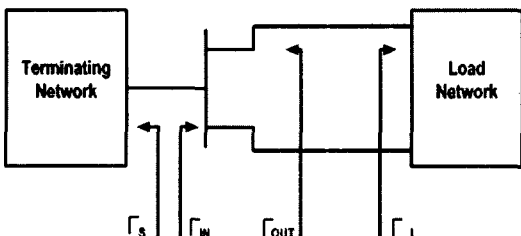


그림 2. 2-포트 네트워크 발진기  
Fig 2. 2-port network oscillator

그림 2는 트랜지스터를 사용하는 일반적인 2-포트 네트워크 발진기를 나타낸다. 그림 2에서 입력과 출력 측에서 바라본 입출력 반사계수  $\Gamma_{IN}$  과  $\Gamma_{OUT}$  은 식 (10)으로 표현되며

$$\Gamma_{IN} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} = \frac{S_{11} - \Delta\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (10a)$$

$$\Gamma_{OUT} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} = \frac{S_{22} - \Delta\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} \quad (10b)$$

발진기가 정상상태에 이르게 되면 다음 식을 만족한다.

$$|\Gamma_S| |\Gamma_{IN}| = 1 \quad (11a)$$

$$|\Gamma_L| |\Gamma_{OUT}| = 1 \quad (11b)$$

식 (11a)(11b)중 하나의 조건만 만족하게 되면 발진은 지속되기 때문에 입력 단의 식 (11a)을 적용하면

$$|\Gamma_S| |\Gamma_{IN}| = 1 \quad (12a)$$

$$\angle\Gamma_S + \angle\Gamma_{IN} = 0 \quad (12b)$$

이 된다. 그러나 발진이 시작되면 발생된 교류 전력에 의해서 부성저항의 크기가 적어지므로 소신호 선형 산관계수가 변한다. 이는 결과적으로  $\Gamma_{IN}$ 을 변화시키므로 식 (12a)(12b)의 조건이 만족되지 않아 발진이 오랫동안 지속되지 않는다. 그래서 발진이 시작되어서 성장하기 위한 초기 조건은

$$Re[Z_R] \leq Re[Z_T] \quad (13a)$$

$$Re[Z_T] \leq 0 \quad (13b)$$

$$Im[Z_R] = -Im[Z_T] \quad (13c)$$

이며, 일단 발진이 시작되면 이를 유지시키기 위해 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$Re[Z_R] = |Re[Z_T(P_{OUT})]| \quad (14a)$$

$$Re[Z_T] < 0 \tag{14b}$$

$$Re[Z_R] = -Im[Z_T] \tag{14c}$$

부성저항 특성을 갖기 위해 외부 케환 회로가 부가된 트랜지스터의 음의 저항 값의 절대 값이 공진기의 양의 저항 값보다 크고, 공진기의 리액턴스 값이 케환 된 트랜지스터의 리액턴스와 절대 값은 같고 부호는 반대이면 발진이 일어나게 된다. 발진기가 안정 상태 일 때의 출력 전력 값은 케환 된 트랜지스터의 음의 저항 값이 포화에 의해 감소되어 공진기의 저항 값과 절대 값은 같고 부호는 서로 반대일 때 발생하게 된다.

### III. 능동 공진 발진기의 설계

본 논문에서는 이득을 갖는 능동 대역 통과 필터와 부성저항 특성을 갖는 능동 공진기를 이용해서 부성저항을 갖으면서 공진하는 1-포트 부성 저항 발진기 형태의 능동 공진 발진기를 구현하였다. 제안된 능동 공진 발진기는 5.8GHz ISM대역에서 시스템의 국부 발진기로 사용 가능하도록 설계하였다. 제안된 능동 공진 발진기는 애질런트의 설계 툴 ADS2002C를 이용 설계하였다.

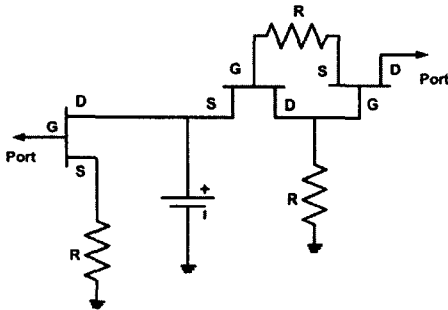


그림 3. 이득을 갖는 능동 대역 통과 필터  
Fig 3. Active band pass filter with gain

먼저 이득을 갖는 능동 대역 통과 필터를 이용하는 능동 공진 발진기는 그림 3과 같이 애질런트사의 트랜지스터 ATF-34143과 저항을 이용해서 5.3GHz 부근에서 이득을 갖으면서 첨예한 주파수 통과 특성을 나타내는 능동 대역 통과필터를 구현하였다. 설계된 능동 대역 통과필터는 약 5.3GHz에서 3.3dB의 이득을 갖고, 주파수 선택특성이 나

타나는 것을 확인할 수 있었고, 트랜지스터에 인가되는 직류 바이어스의 변화와 사용되는 저항 값을 변화하면 통과 주파수대역이 가변 되는 것을 확인할 수 있었다. 설계된 능동 대역 통과 필터를 루프 형태로 입, 출력포트를 연결하면 부성저항 특성을 갖으면서 5.3GHz에서 공진 하는 능동 공진 발진기를 구현할 수 있다.

그림 4, 5는 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기의 시뮬레이션 결과로 약 5.3GHz의 기본 발진주파수에서 약 -5.5dBm의 출력특성과 -7, -18dBc의 2, 3고조파 억압특성을 얻을 수 있다. 위상 잡음 특성은 10kHz, 100kHz, 1MHz의 오프셋에서 각각 -71, -95, -115dBc/Hz의 결과를 얻을 수 있었다.

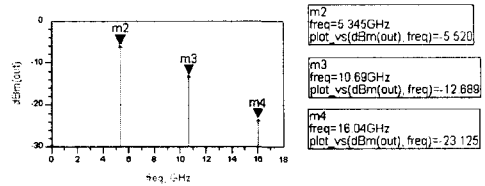


그림 4. 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기의 출력 스펙트럼  
Fig 4. Output spectrum of active resonator oscillator using active band pass filter

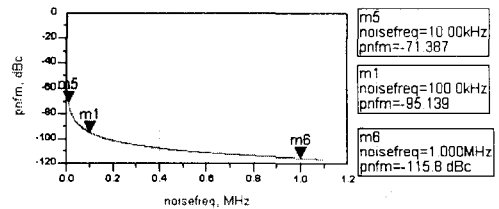


그림 5. 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기의 위상잡음  
Fig 5. Phase noise of active resonator oscillator using active band pass filter

부성저항 특성을 갖는 능동 공진기를 이용하는 능동 공진 발진기는 그림6과 같이 트랜지스터와 저항, 캐패시터를 이용해서 5.5GHz 부근에서 부성 저항 특성을 갖으면서 병렬 공진하는 능동 공진기를 구현한다.

구현된 공진기는 5.5GHz 대역의 좁은 주파수 대역에서 부성저항 특성을 갖으면서 좁은 주파수

대역에서 병렬 공진 특성이 나타난다.

트랜지스터에 인가되는 직류 바이어스의 가변에 따라 공진 주파수 대역이 변하도록 능동 공진기를 구현하였다.

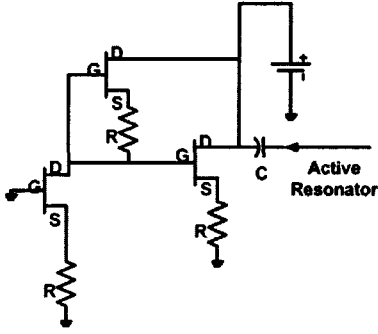


그림 6. 부정저항 특성을 갖는 능동 공진기  
Fig 6. Active resonator with negative resistance

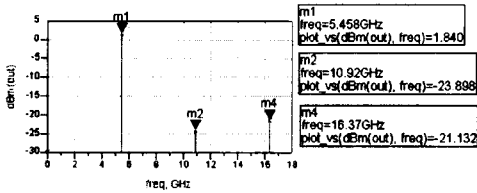


그림 7. 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기의 출력 스펙트럼  
Fig 7. Output spectrum of active resonator oscillator using active resonator

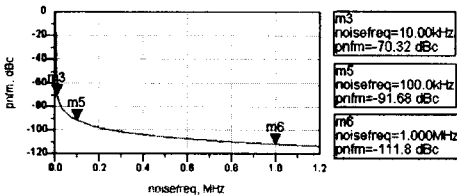


그림 8. 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기의 위상잡음  
Fig 8. Phase noise of active resonator oscillator using active resonator

그림 7, 8은 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기의 출력 스펙트럼과 위상잡음 특성을 보여준다. 약 5.5GHz의 기본 발진주파수에서 1.8dBm의

출력을 갖는 출력 스펙트럼을 얻을 수 있었고, 2, 3 고조파 억압특성은 각각 -25, -23dBc 정도이다. 10, 100kHz, 1MHz의 옵셋에서 각각 -70, -91, -111dBc/Hz의 위상잡음 특성을 얻을 수 있었다.

#### IV. 능동 공진 발진기의 제작

설계된 각각의 능동 공진 발진기는 유전율 3.38 유전체 두께 0.508mm, 금속 두께 0.018mm인 기판 위에 HEMT와 칩 형태의 저항과 캐패시터를 부착하여 하이브리드 형태로 제작하였다.

제작된 각각의 능동 공진 발진기는 안리쓰의 스펙트럼 어날라이저 MS2665C를 이용 출력 스펙트럼과 위상잡음 특성을 측정하였다.



그림 9. 제작된 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기  
Fig 9. Fabricated active resonator oscillator using active band pass filter

그림 9는 제작된 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기의 실물사진이다. 바이어스 회로를 제외하면 약 15×15mm 정도의 크기를 갖는다.

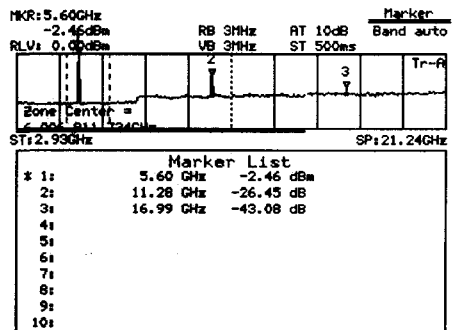


그림 10. 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기의 출력 스펙트럼  
Fig 10. Output spectrum of active resonator oscillator using active band pass filter

그림10은 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기의 출력 스펙트럼특성을 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과보다 발진 주파수가 약간 높은 약 5.6GHz의 기본 발진주파수에서 약 -2dBm의 출력 레벨을 보여준다. 2,3고조파의 억압 특성은 각각 -24, -41dBc 정도로 시뮬레이션 결과보다 양호한 결과를 보여준다.

그림11과 같이 위상잡음 특성은 5.6GHz의 기본 발진주파수의 100kHz 읍셋에서 약 -81dBc/Hz 정도이다.

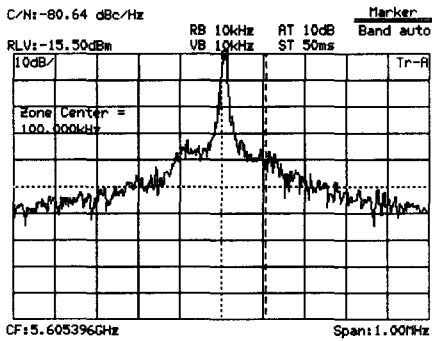


그림 11. 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기의 위상잡음  
Fig 11. Phase noise of active resonator oscillator using active band pass filter

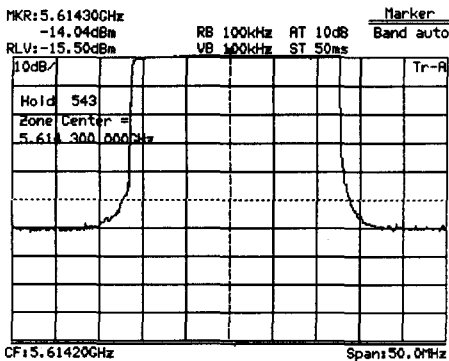


그림 12. 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기의 발진주파수 가변특성  
Fig 12. Oscillation frequency drift of active resonator oscillator using active band pass filter

그림12에는 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기의 발진주파수의 가변 특성을 보여주는 것으로써 사용된 능동 대역 통과 필터에 사용된 트랜지스터에 인가되는 직류 전압 변화에 따른 발진주파수 가변 특성으로 제안된 능동 공진 발진기

를 전압 제어 발진기로 적용 가능함을 보여준다. 인가전압을 약 1.1 - 2.5 V 범위로 가변 시켰을 때  $\pm 0.5$ dB의 출력 레벨로 약 25MHz 정도의 발진주파수 가변 특성을 얻을 수 있다.



그림 13. 제작된 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기  
Fig 13. Fabricated active resonator oscillator using active resonator

그림 13은 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기의 실물사진이다. 바이어스 회로를 제외하면 약 15×15mm 정도의 크기를 갖는다.

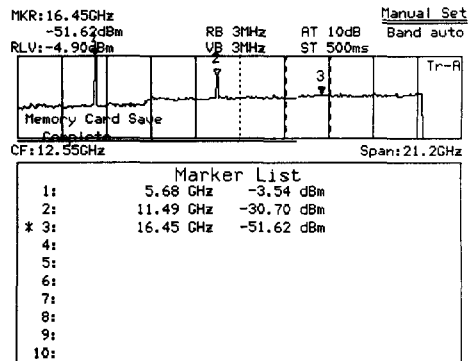


그림 14. 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기의 출력 스펙트럼  
Fig 14. Output spectrum of active resonator oscillator using active resonator

그림14는 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기의 출력 스펙트럼 특성을 보여주고 있다. 약 5.8GHz의 기본 발진주파수에서 약 -3dBm의 출력 레벨을 보여준다. 시뮬레이션 결과와는 발진주파수가 상향되고, 출력 레벨의 저하가 나타났다. 2, 3 고조파의 억압 특성은 각각 -25, -48dBc 정도로 시뮬레이션 결과보다 양호한 결과를 보여준다.

위상잡음 특성은 그림15와 같이 약 5.8GHz의 기본 발진주파수의 100kHz 읍셋에서 위상잡음 특성이 -91dBc/Hz로 시뮬레이션 결과와 비슷하다.

V. 결 론

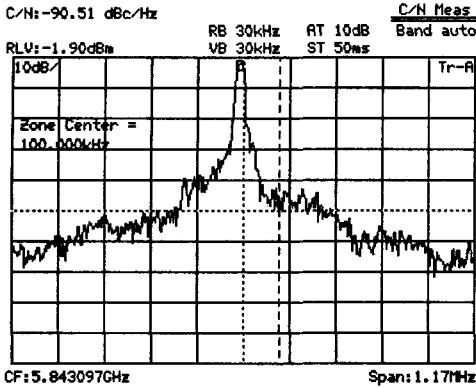


그림 15. 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기의 위상잡음  
 Fig 15. Phase noise of active resonator oscillator using active resonator

그림16은 인가전압 변화에 따른 발진주파수의 가변 특성을 보여주는 것으로 사용된 능동 공진기의 트랜지스터 인가전압을 약 1.5-3V 범위로 가변시켰을 때  $\pm 0.5\text{dB}$ 의 출력 레벨로 약 20MHz 정도의 발진주파수 가변 특성을 얻을 수 있었다.

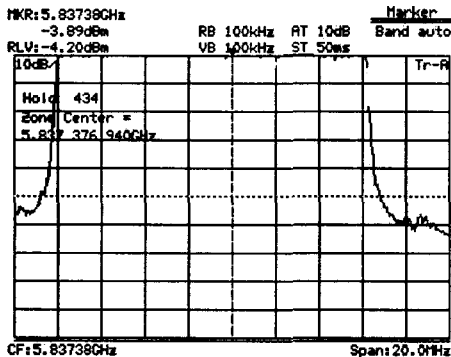


그림 16. 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기의 발진주파수 가변특성  
 Fig 16. Oscillation frequency drift of active resonator oscillator using active resonator

제작된 각각의 능동 공진 발진기의 측정 결과가 시뮬레이션 결과와 비교해서 발진주파수와 위상잡음 특성에서 오차가 발생한 것은 시뮬레이션 시 사용한 ATF-34143의 등가모델과 실제 사용되는 ATF-34143간의 특성 차이, 제작 시 소자를 연결하면서 발생하는 선로의 불연속과 접지로 사용된 비아홀 등에 기인 한 것이라 본다.

본 논문에서는 5.8GHz ISM 대역용 시스템의 국부 발진기로 사용 가능한 이득을 갖는 능동 대역 통과 필터, 부성저항 특성을 갖는 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기를 ADS2002C를 이용 시뮬레이션 및 설계하였다. 설계된 능동 공진 발진기는 유전율 3.38, 유전체 두께 0.508mm, 금속 두께 0.018mm인 테프론 기판 위에 ATF-34143과 칩 형태의 저항과 캐패시터를 실장 하는 하이브리드 형태로 제작하였다.

이득을 갖는 능동 대역 통과 필터를 이용한 능동 공진 발진기는 5.6GHz의 기본 발진주파수에서 -2dBm의 출력을 얻었고, 양호한 고조파 억압 특성과 100kHz 옵셋에서 -81dBc/Hz의 위상잡음 특성을 얻었다.

부성저항 특성을 갖는 능동 공진기를 이용한 능동 공진 발진기는 5.8GHz의 기본 발진주파수에서 -4dBm의 출력을 얻었고, 양호한 고조파 억압 특성과 100kHz 옵셋에서 -91dBc/Hz의 위상잡음 특성을 얻었다.

각각의 능동 공진 발진기는 사용된 트랜지스터에 인가되는 직류 바이어스의 변화로 발진주파수를 가변 할 수 있어 전압 제어 발진기로 적용 가능하다. 앞으로 안정적인 발진 특성을 얻을 수 있고, 위상잡음 특성을 개선하면 5.8GHz ISM 대역 시스템의 국부 발진기로 충분히 적용 가능하리라 본다.

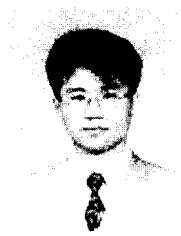
참고문헌

- [1] C. M. Hung and Kenneth K. O "A 1.24-GHz Monolithic CMOS VCO with Phase Noise of -137 dBc/Hz at a 3-MHz Offset" IEEE Microwave and Guided Wave Letters, VOL. 9, NO. 3, March 1999. pp. 111-113.
- [2] 이연주 외6인 "FET 공진기를 이용한 능동 공진 발진기 설계" 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집 Sept. 2002, pp.19-22.
- [3] E. Sonmez, P. Abele, K. -B. Schad, H. Schumacher "16GHz Integrated Oscillator Design with Active Elements in a Production Ready SiGe HBT MMIC Technology" 30th European Microwave Conference - Paris 2000 pp. 329-332.
- [4] M. Soyuer, J. N. Burghartz, H. A. Ainspan,

K. A. Jenkins, P. Xiao, A.R. Shahani, M. S. Dolan, and D. L. Hareme, "An 11-GHz 3-V SiGe Voltage Controlled Oscillator with Integrated Resonator" IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 32, pp. 1451-1454, Sep 1997.

- [5] Guillermo Gonzalez, "Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design" Prentice Hall, pp.1-293, 1997.
- [6] E. Holtzman, "Solid State Microwave Power Oscillator Design" Artech House, 1992
- [7] "VCO Designer's Handbook" Mini-Circuits

저자소개



신용환(Yong-Hwan Shin)

1996년 2월: 전남대학교 전자공학과(공학사)  
1999년 8월: 전남대학교 전자공학과(공학석사)  
1999년 9월-현재: 전남대학교 전자공학과 박사과정

※ 관심분야 : 초고주파용 수동 및 능동회로 설계



임영석(Yeong-Seog Lim)

1980년 2월: 서울대학교 전자공학과(공학사)  
1982년 2월: 서울대학교 전자공학과(공학석사)  
1989년 2월: 전북대학교 전자공학과(공학박사)

1984년 9월 현재: 전남대학교 전자정보통신공학부 교수

※ 관심분야 : 전자파 해석, RF 소자 설계, 초고주파 회로해석