

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.1.107>
JIIBC 2021-1-15

한 쌍의 L-형 모노폴 슬롯 공진기를 이용한 X-밴드 트랜지스터 발진기 설계

Design of transistor oscillator for X-band application using a pair of L-shaped monopole slot resonator

이영민*, 이영순**

Yeong-min Lee*, Young-soon Lee**

요약 본 논문에서는 새롭게 제안되는 L-형 모노폴 슬롯 공진기를 이용한 X-band용 평면형 트랜지스터 발진기를 제안하였다. 평면형 설계를 위해 끝이 개방된 L자형 모노폴 슬롯을 트랜지스터 발진기의 공진기로 사용하였다. 3단계를 통한 공진기의 모의 실험 설계 결과 1169.84의 높은 Q 값과 49.934 dB의 높은 삽입 손실을 확인하였다. 최종 설계 및 제작된 발진기의 측정결과 7 dBm 이상의 발진 출력과 100 kHz 오프셋에서 -58 dBc/Hz의 양호한 위상 잡음 특성을 가지는 것을 확인하였다. 제안된 발진기는 평면형으로 마이크로파 집적회로 기술에 직접 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 DRO(유전체 공진 발진기)의 경우처럼 3D 구조의 금속 공동, 튜닝 스크류 등 추가 기기 없이 마이크로스트립 형태로만 구현할 수 있어 크기를 줄일 수 있다는 장점도 있다.

Abstract In this paper, a planar transistor oscillator for X-band using a newly proposed L-shaped monopole slot resonator is proposed. For planar design, an L-shaped monopole slot with an open-end is used as a resonator for a transistor oscillator. As a result of the simulated design of the resonator in three stages, a high Q value of 1169.84 and a high insertion loss of 49.934 dB were identified. The results of the final design and manufactured oscillator measurements confirmed that the oscillation output is greater than 7 dBm and has good phase noise characteristics of -58 dBc/Hz at 100 kHz offset. The proposed oscillator is planar and has the advantage of being directly applicable to microwave integrated circuit technology. It also has the advantage of being able to reduce its size as it can only be implemented in microstrip form without additional devices such as metal cavities and tuning screws in 3D structures, as in the case of a DRO (dielectric resonance oscillator).

Key Words : Planar Oscillator, open-ended slot, MMIC, Slot resonator

*정회원, 금오공과대학교 전자공학과
**정회원, 금오공과대학교 전자공학부 교수 (교신저자)
접수일자 2020년 12월 31일, 수정완료 2021년 1월 28일
게재확정일자 2021년 2월 5일

Received: 31 December, 2020 / Revised: 28 January, 2021 /
Accepted: 5 February, 2021

*Corresponding Author: yslee@kumoh.ac.kr
Dept. of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of
Technology, Gyeongsangbuk-do 39177, Korea

I. 서 론

무선 통신 시스템의 발전으로 군수, 자동차, 위성, 의료, 가전 등 다양한 산업 분야에서 RF(Radio Frequency) 센서와 같은 다양한 무선 통신 기기의 사용이 증가되고 있는 추세이다. 따라서, 고주파수의 전원을 안정적으로 공급할 수 있는 발진기의 중요성이 증가하고 있고, 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 위상 잡음이 마이크로웨이브 발진기에서 가장 중요한 특성 중 하나라고 할 수 있다. 발진기의 위상 잡음 특성이 좋다면 통신 시스템이 양호한 성능을 가질 수 있다^[1-2]. 위상 잡음 특성과 밀접한 관계가 있는 것이 공진기의 Q 값이다. 따라서 높은 Q 값을 가지는 공진기를 설계하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다^[3-4]. 일반적으로 유전체 공진기가 높은 Q값을 가지는 특성이 있어 발진기에 널리 사용되어 왔으나 유전체 공진기는 3차원 구조를 가지고 있기 때문에 마이크로파 집적회로(MMIC)에 적합하지 않다는 단점을 가지고 있다^[5-6]. 또한, 공정 작업이 복잡하고, 고비용이라는 문제가 있다^[3]. 이러한 MMIC 문제점을 극복하기 위하여 평면형 공진기가 제안되고 연구 및 개발되어왔다^[7-8]. 일반적으로 많이 사용되는 평면형 공진기 중 헤어핀 공진기는 Q 값이 높지 않고, 고온에서 불안정하다는 단점을 가지고 있다^[3]. 이와 같은 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 개방 중단 대칭 슬롯 구조^[9]를 가지는 공진기를 CST MWS를 이용하여 설계하고 제안하고 있다. 이러한 슬롯 구조를 이용하여 Q 값을 높이고, 구조적으로도 소형화된 발진기를 제안하고자 한다. AWR 시뮬레이션 툴을 이용하여 트랜지스터를 이용한 발진기 설계를 제시하고, 설계된 발진기 모듈을 제작하고 측정된 결과를 제시하였다.

II. 공진기 설계

2장에서는 본 논문에서 제안하고자 하는 새로운 형태의 공진기의 핵심 이론인 개방 중단 슬롯 이론과 발진기의 위상 잡음(Phase Noise) 특성과 가장 연관성이 깊은 Quality factor의 정의를 제시한 후 본격적인 평면형 공진기 설계를 제시하고자 한다.

1. 모노폴 슬롯 이론

슬롯 공진의 기본이라고 할 수 있는 반파장($\frac{\lambda}{2}$) 슬롯

안테나를 그림 1에 제시하였다.

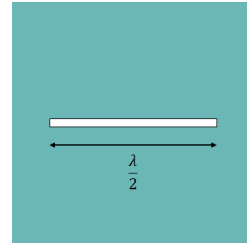


그림 1. 반파장($\frac{\lambda}{2}$) 슬롯 안테나

Fig. 1. Half-wavelength($\frac{\lambda}{2}$) slot antenna

도체판에 약 $\frac{\lambda}{2}$ 길이의 슬롯을 만들고 중앙에 급전점을 가지는 기본적인 공진 슬롯 안테나이다^[10-11]. 슬롯이 여기되면 그림 2(a)와 같은 전기장이 형성되고 전류가 슬롯을 따라 흐르면서 공진이 발생한다. 이러한 반파장 슬롯의 한쪽을 개방시켜 소형화시킨 형태가 그림 2(b)의 $\frac{\lambda}{4}$ 모노폴 슬롯 구조이다^[9]. 그림 2(b)의 구조는 그림 2(a) 구조의 반파장 슬롯 공진 구조에서 전기적인 개방 지점(전계가 최대가 되는 지점)을 자계벽(magnetic wall)으로 간주하여 자계벽을 따라 절단된 구조로 전체 슬롯 길이를 $\frac{\lambda}{2}$ 다이폴 슬롯 형태에서 $\frac{\lambda}{4}$ 모노폴 슬롯 형태로 절반으로 감소시킬 수 있다.

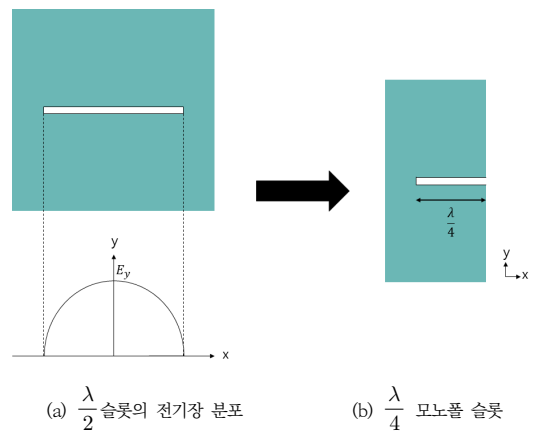


그림 2. 슬롯 구조

Fig. 2. Slot structure

2. Quality factor의 정의

Quality factor(이하 Q 값)라 함은 공진기 또는 공진 회로의 주파수응답 대역 특성을 나타내는 지표이다. 공진 회로의 대역폭 정의에 사용되며 공진 특성의 첨예도(Sharpness)의 척도가 된다. Q 값이 클수록 주파수 선택성이 좋아지며 에너지 축적률이 커진다. 반대로 Q 값이 작아질수록 대역폭이 넓어지며 주파수 선택성이 나빠지게 된다. Q 값을 계산하기 위하여 아래 그림에 공진기의 삽입손실 그래프와 수식을 제시하였다.

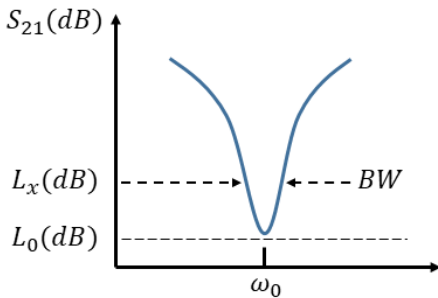


그림 3. 공진기 삽입 손실 그래프
 Fig. 3. Resonator insertion loss graph

그림 3과 수식 (1)-(3)을 이용하여 공진기의 Q 값을 계산 할 수 있다^[12]. 일반적으로 유전체공진기의 Q 값이 약 1000정도인데 마이크로스트립 전송선로에 슬롯을 삽입하여 최대한 높은 Q 값을 가지도록 설계하였다. 발진기 측면에서 높은 Q 값을 가지는 공진기를 사용하여 설계하는 것이 주파수 선택성을 높여 양호한 위상잡음 특성을 가질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 단계별로 슬롯 공진기를 변형시켜 Q 값을 높여 양호한 위상잡음 특성을 가지는 발진기를 설계할 계획이다.

$$L_0 = -20 \log |S_{21}(\omega_0)| \quad (1)$$

$$L_x (dB) = L_0 - 3 + 10 \log(1 + 10^{-0.1L_0}) \quad (2)$$

$$Q_u = \frac{\omega_0}{BW} \quad (3)$$

3. 평면형 공진기 설계

유전체 공진기와 다이캐스팅 몰드(metal enclosure)를 삽입하기 위한 구조적인 측면에서의 문제점, 유전체 공진기 장착을 위한 수공정 과정에서의 편차, 집적화(MMIC)하기 어렵다는 유전체 공진기의 단점을 보완하고자 평면형 공진기 설계를 진행하였다.

개방 종단 모노폴 슬롯 이론을 적용하기 위하여 먼저 1 단계로 반파장 U-슬롯을 전송 선로에 삽입하여 공진기 설계를 진행하였다.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} [1 + 12 (\frac{H}{W})]^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{c}{f \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (5)$$

식 (4) 및 (5)를 이용하여 마이크로스트립 기판의 선폭 및 파장을 설계하고자 하는 10.525 GHz X-band에 맞게 계산하였고, 전송선로에 반파장 U-슬롯을 삽입하여 반사 손실(S_{11}) 및 삽입 손실(S_{21}) 모의 실험을 진행하였다. 그 후 2 단계로 개방 종단 L-형 모노폴 슬롯, 마지막 3단계로 개방 종단 대칭으로 위치한 한 쌍의 L-형 모노폴 슬롯으로 단계별 모의 실험을 진행하여 최종 평면형 태의 공진기 설계를 진행하였다.

그림 4에서는 1단계에서 사용된 U-형 $\frac{\lambda}{2}$ 다이폴 슬롯, 2단계에서 사용된 $\frac{\lambda}{4}$ L-형 모노폴 슬롯 및 3단계에서 사용된 한 쌍의 L-형 모노폴 슬롯의 구조들을 비교하여 제시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 식 (4) 및 (5)를 이용하여 반파장 길이의 U 슬롯 설계를 시작으로 개방 종단 슬롯 모노폴 이론에 의해 반파장 U-형 슬롯의 대칭 축(자계벽)을 따라서 절단된 1/4 파장 L-형 모노폴 슬롯, 한 쌍의 L-형 모노폴 슬롯 3 단계로 공진기 설계를 진행하였다.

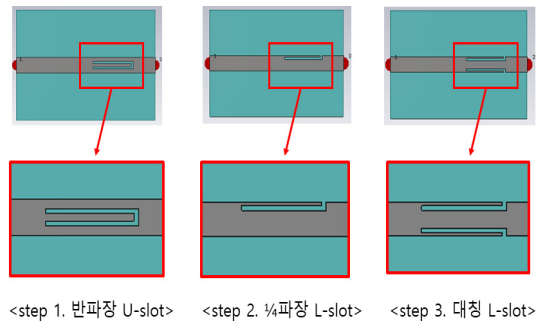


그림 4. 슬롯 공진기 비교
 Fig. 4. Slot resonator comparison

이러한 각 단계별 구조의 삽입손실, 대역폭 및 Q 값의 계산결과를 표 1에 제시하였다. 표 1에서 보는바와 같

이 모의 실험을 통한 S 파라미터 결과와 수식 (1)-(3)을 통하여 Q 값을 계산한 결과 최종 3단계에서는 1169의 높은 결과를 얻을 수 있었다. 일반적인 유전체 공진기의 Q 값인 1000과 비슷한 수치를 확인하여 개방 종단 대칭 L-슬롯 공진기를 발진기에 적용하면 양호한 위상잡음 특성이 나올 것으로 예상된다.

표 1. 삽입손실, 대역폭, Q값 비교
Table 1. Insertion loss, bandwidth, Q value comparison

	$S_{21}(f_0)$ [dB]	대역폭 [MHz]	Q factor
step 1	-31.154	26	404
step 2	-35.218	19	554
step 3	-49.934	9	1169

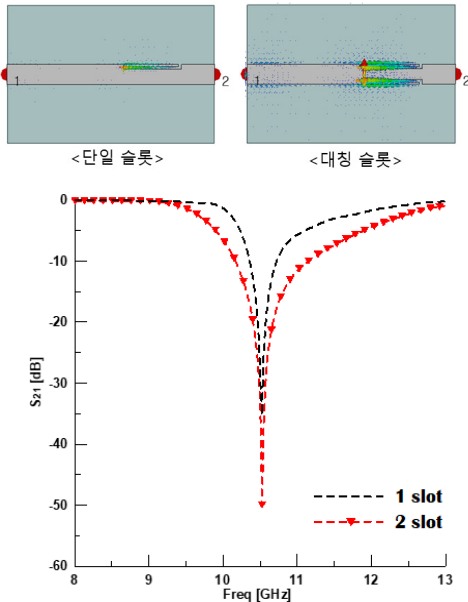


그림 5. 단일 슬롯과 대칭슬롯 전류 분포 및 삽입손실 비교
Fig. 5. Comparison of single slot and symmetric slot current distribution and insertion loss

대칭 슬롯을 사용하여 양호한 값의 삽입 손실과 Q 값이 나타나게 된 원인은 슬롯간의 전자기적인 coupling 효과에 의해 공진특성이 양호해진 결과인 것으로 판단하여 단일 슬롯과 대칭 슬롯의 전류 분포를 비교하여보았다. 그림 5에 제시된 바와 같이 단일 슬롯에 비해 대칭 슬롯에서 확연하게 많은 전류 분포가 형성된 것을 확인할 수 있었고, 슬롯 간의 커플링 효과로 삽입 손실과 Q값 특성이 개선된 것을 이 그림을 통하여 확인할 수 있었다.

III. 발진기 설계

2장에서 단계별 모의실험을 통하여 Q값이 개선된 평면 형태의 한 쌍의 L-형 모노폴 슬롯 공진기를 이용한 발진기 설계를 3장에 제시하고자한다. 발진기 이론을 통한 기초 설계, 발진기 궤환 회로 구성을 위한 안정도 test, 바이어스 회로 및 매칭 네트워크 설계순으로 진행하였다.

1. 궤환 회로 설계

사용하고자 하는 주파수 대역인 X-밴드에 적용 할 수 있는 트랜지스터를 선정하였다. 12 GHz 이상 사용할 수 있는 저 잡음 FET인 CEL사의 CE3512K2 트랜지스터를 선정하였다. 제조사로부터 제공된 트랜지스터의 데이터 시트 S파라미터를 토대로 설계를 진행하였다.

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \quad (6)$$

트랜지스터 발진기 이론에 따라 설계하고자 하는 대역에서 불안정영역에 위치해야하므로 안정도 계수 K 수식 (6)을 이용하여 안정도 테스트를 진행하였다. K 값이 1 보다 작아야 potentially unstable 한 영역에 있다고 할 수 있는데 안정도 확인 결과 1에 근접한 값을 가지는 것을 확인하였고, 더 확실하게 불안정 영역으로 보내 안정적으로 발진할 수 있도록 소스단에 궤환 회로를 추가하였다.

그림 6에 쇼트 스티브를 이용하여 구성된 궤환 회로 Circuit Schematic과 2D Layout을 제시하였다. 그림과 같이 스티브의 길이인 L_f 파라미터를 조절하여 안정적인 발진이 일어날 수 있도록 설계하였다. 오픈 스티브가 아닌 쇼트 스티브를 이용하여 설계한 이유는 다음과 같다. 설계하고자하는 전원인 $V_{ds}=3V$, $I_{ds}=30mA$ 가 안정적으로 트랜지스터 드레인-소스단에 공급 되려면 소스단이 그라운드와 연결이 되어있어야 하기 때문이다. 시뮬레이션 단계에서부터 직경 1mm의 비아 홀을 삽입하여 접지면과 연결이 되어 궤환 회로가 안정적하도록 하였고, 4 핀 트랜지스터의 소스가 2 핀인 소사이므로 아래 위로 연결이 될 수 있도록 설계하였다. 이 궤환 회로를 토대로 변화된 S 파라미터와 안정도 값 K를 확인하여 표 2와 그림 7에 각각 나타내었다.

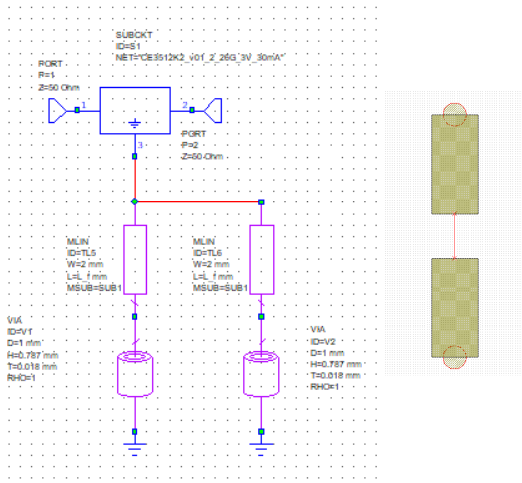


그림 6. 단락 스텐브를 이용한 궤환회로
 Fig. 6. Feedback circuit using short stub

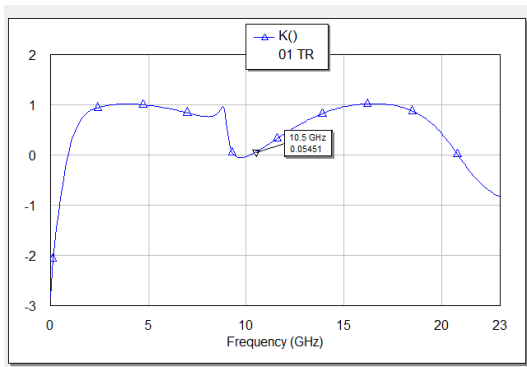


그림 7. 안정도 계수 확인 결과
 Fig. 7. Stability factor confirmation results

표 2. 궤환 회로 추가로 변화된 S 파라미터
 Table 2. Changed S parameter due to feedback circuit

[S]	크기[dB]	위상[degree]
S_{11}	2.042	-23.97
S_{21}	2.982	157.7
S_{12}	0.5192	132.5
S_{22}	1.88	-20.05

그림 7에서 확인한바와 같이 발진주파수인 10.5 GHz에서 0.05451로 1보다 확연하게 작은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 potentially unstable 한 영역에 있다고 할 수 있고, 발진 가능성을 확인하였다. 또한, 안정도 서클을 확인을 통해 불안정 영역에 위치한 감마T를 선정하고 궤환회로 설계를 통해 변화된 S 파라미터와 임피던스

수식들을 이용하여 입력 및 부하 임피던스를 계산하여 매칭 회로 설계를 진행하였다.

2. 바이어스 회로 및 매칭 회로 설계

트랜지스터와 같은 능동소자를 이용한 발진기의 경우 직류 전압을 인가하여 일정한 전류가 흐를 수 있도록 안정적인 바이어스 회로 설계가 필수이다. 바이어스가 불안정하게 된다면 정확한 발진 출력이 나타나지 않으며, 회로가 불안정해져 소자의 파괴가 발생할 수 있다. 인덕터 소자를 이용한 RF 초크가 일반적으로 사용되나 본 논문에서는 고주파 대역에서 안정성을 위해 라디얼 스텐브를 이용한 바이어스 회로 설계를 진행하였다.

그림 8에 바이어스 회로 구성도 및 2D 레이아웃을 제시하였다. 라디얼 스텐브의 반지름을 $\frac{\lambda}{4}$ 로 설계하였고 선로의 폭을 0.3mm로 설계하였다. 바이어스 회로 모의 실험 결과인 그림 9에서 나타난 바와 같이 DC 전원에서는 안정적으로 전원이 공급되고, 발진 주파수인 10.525 GHz 대역에서는 39.1 dB이상의 삽입손실을 가져 격리가 잘 되는 것을 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

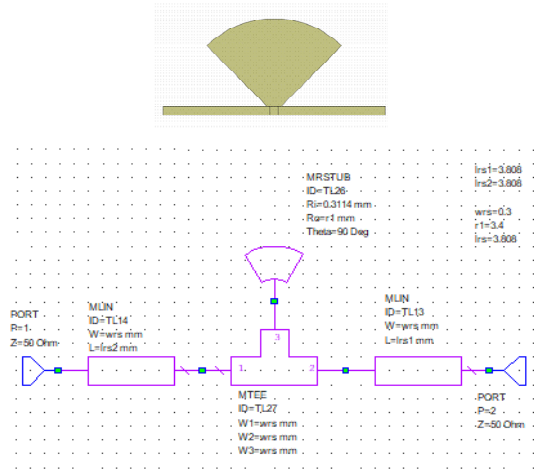


그림 8. 바이어스 회로 (부채꼴 스텐브) 구성도
 Fig. 8. Bias circuit (radial stub) configuration

트랜지스터 궤환 회로를 통해 생성된 고주파 발진 출력이 출력단으로 손실 없이 전달될 수 있도록 매칭 회로 설계 또한 발진기에서 매우 중요한 역할을 수행한다. 본 논문에서는 설계가 비교적 용이한 오픈 스텐브 정합 기술을 이용하여 매칭 회로 설계를 진행하였고, 그림 10에 매칭 회로 구성도와 2D 레이아웃을 제시하였다. 발진기의 드레인 단과 연결되는 포트 1에 계산된 로드 임피던스 Z_L 값을 입력하였고, 발진기 출력 단인 포트 2에 특성

임피던스 50ohm 을 입력하여 최적화 기능을 이용하여 설계하였다.

제작 및 측정을 진행하였고 분석한 내용을 4장에서 제시하고자 한다.

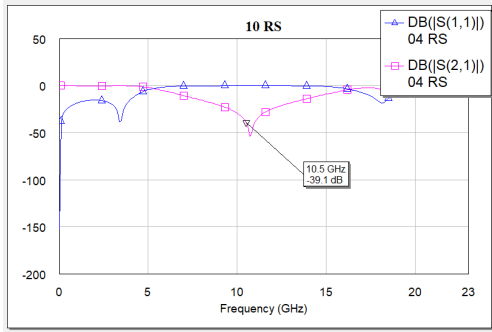


그림 9. 바이어스 회로 모의실험 결과
Fig. 9. Bias circuit simulation result

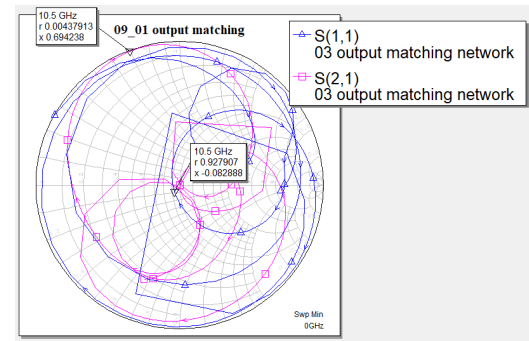
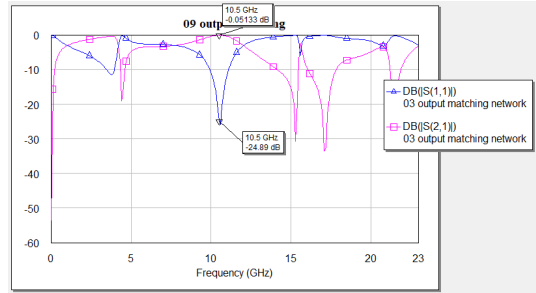


그림 11. 매칭 회로 모의실험 결과
Fig. 11. matching circuit simulation result

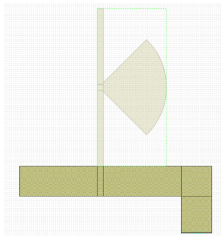
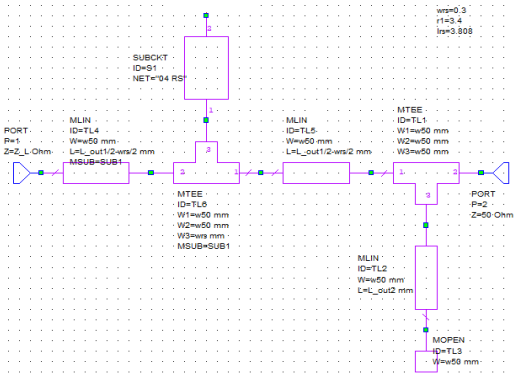


그림 10. 매칭 회로 구성도
Fig. 10. matching circuit configuration

설계된 매칭 회로 모의실험 결과(dB 그래프 및 smith chart)를 그림 11에 제시하였다. 발진주파수 대역인 10.5 GHz에서 S_{21} 이 0 dB, S_{11} 이 -24.89 dB로 나타났으며, 스미스 차트의 S_{11} 그래프를 통해서도 10.5 GHz에서 정규화 임피던스 값이 $0.9279-j0.082$ 로 50ohm 에 매칭이 잘 되어있는 것을 확인 할 수 있었다. 앞서 2장에서 설계된 공진기와 3장에서 설계된 궤환회로, 매칭회로, 바이어스 회로를 조합하여 발진기 모듈을 구성하여

IV. 측정 결과 분석

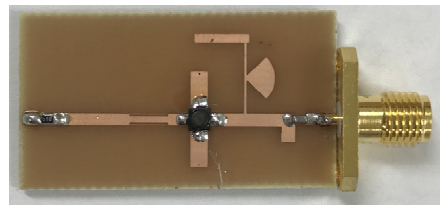
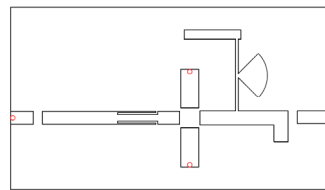


그림 12. 최종 설계 및 제작된 발진기 모듈
Fig. 12. Finally designed and manufactured oscillator module

그림 12에 최종 설계 및 제작된 발진기 모듈을 제시하였다. 제작된 발진기는 유전체 4.3, 유전체 두께 0.787mm, 동박 두께 0.018(half oz)인 FR-4 기판을 사용하여 제작되었다. 제작된 발진기 모듈의 크기는 전원인가를 위한 회로, 50ohm정합회로, DC Block을 위한 회로가 삽입되어 가로 35mm, 세로 20mm 크기로 제작 하였다.

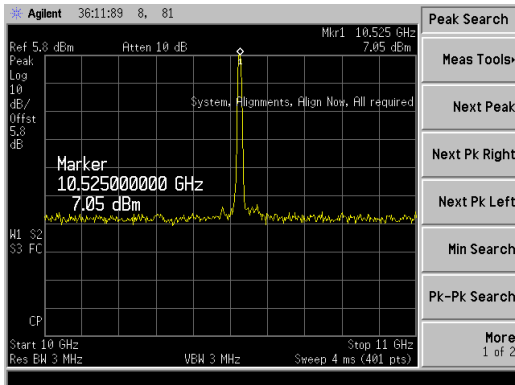


그림 13. 발진기 모듈 발진 출력 측정 결과
 Fig. 13. Measured oscillator module oscillation output

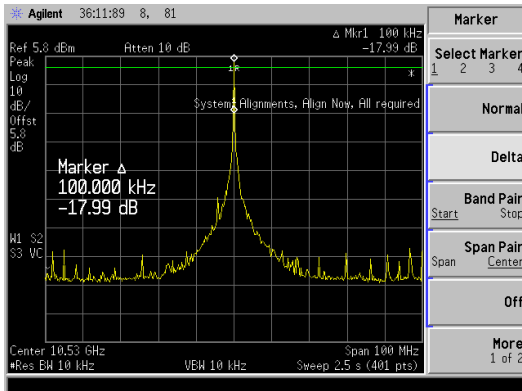


그림 14. 발진기 위상 잡음 측정 결과 (100 kHz offset)
 Fig. 14. Measured oscillator phase noise (100 kHz offset)

그림 13에 발진기 모듈 발진 출력 측정 결과를 나타내었다. 발진기 모듈 측정에 사용된 장비는 Agilent사의 E4407B 스펙트럼 분석기이다. 그림과 같이 설계하고자 했던 10.525 GHz에서 발진 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 발진 출력 또한 7 dBm 이상의 양호한 값이 나타나고 있는 것을 확인 하였다.

그림 14에 발진기 위상 잡음 측정 결과를 제시하였다. 사용된 스펙트럼 분석기의 설정은 Span 100 MHz, VBW(Video Bandwidth) 10 kHz, RBW(Resolution

Bandwidth) 10 kHz로 측정하였다. 스펙트럼 분석기의 정밀도가 낮아 RBW를 10 kHz로 측정후 Hz 단위로 변경하여 측정 오차를 줄이고자 하였다. 위상 잡음 측정 및 계산 결과 100 kHz offset에서 -57.99 dBc/10kHz의 값을 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 높은 Q값을 가질 수 있도록 새롭게 제안된 한 쌍의 L-형 모노폴 슬롯 공진기를 이용한 X-band 평면형 발진기를 제안하였다. 공진부는 마이크로 스트립 전송선로에 슬롯을 내어 공진을 발생시키는 공진기를 제시하였다. 기본적인 슬롯 공진 형태인 반파장 U 슬롯 공진기 설계를 시작으로 개방 중단 이론을 적용시켜 한 쪽 끝이 개방된 $\frac{\lambda}{4}$ 길이의 L형 공진기를 설계하였다. 한 단계 더 나아가 개방 중단 시킨 L형 슬롯을 전송선로에 대칭으로 추가하여 커플링 효과를 증대시켰다. 이러한 효과로 발진기의 위상 잡음 특성과 밀접한 관계가 있는 Q 값을 개선 할 수 있었다. 특히 유전체 공진기의 일반적인 Q 값인 1000과 비슷한 값인 1169.44라는 만족스러운 값을 가질 수 있었고, 공진주파수 10.525 GHz에서 삽입손실(S_{21}) 49.934 dB의 높은 값을 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

발진기 중 궤환부의 경우는 안정적인 전원 공급을 위하여 쇼트 스테이블을 이용하였고, 변화된 S 파라미터 값을 이용하여 궤환회로를 설계 하였다. 안정도 테스트를 통해 불안정영역을 확인하고, 부하 임피던스를 이용하여 매칭 네트워크를 구현하였다. 또한, 안정적인 DC 전원 공급을 위해 바이어스 회로 설계를 진행하였다. 이러한 단계들을 거쳐 설계된 발진기 측정 결과 7 dBm 이상의 발진 출력을 확인하였고, 위상 잡음 측정 결과 100 kHz offset에서 약 -58 dBc/Hz의 값을 가지는 것을 확인하였다. 본 논문에서 설계된 발진기의 경우 평면 형태로 설계되어 별도의 추가 기기 없이 발진출력을 발생시킬 수 있어 제조 공정이 간편하여 저가로 제작이 가능하고, 마이크로파 집적회로로 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 제안된 발진기는 향후 X-band 레이더, 전력절감용 조명 센서, 의료 센서 등 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J. S. An and H. G. Yoo, "Study on the Phase Noise Improvement of Oscillator using RF Feedback," The Journal of The Institute of Webcasting, Internet Television and Telecommunication, Vol. 4, No. 1, pp. 51-55, 2004.
- [2] J. Y. Ryu, "A New Switchable Dual Mode Voltage Controlled Oscillator," The Journal of Korean Institute of Information Technology (JKIIT), vol. 8, No. 6, pp. 157-163, 2010.
- [3] B. Shrestha and N. Y. Kim, "Microwave Oscillator Design Using Folded T-type Slot Resonator for X-band Applications," Microwave and Optical Technology Letters (MOTL), Vol. 54, pp. 2817-2821, 2012.
DOI : <https://doi.org/10.1002/mop.27215>
- [4] K. C. Yoon, H. W. Lee, J. G. Park, K. B. Kim, J. C. Lee, "Design of an I-band low phase noise oscillator using a new hairpin resonator," Microwave and Optical Technology Letters (MOTL), Vol. 51, pp. 1172-1174, 2008.
DOI : <https://doi.org/10.1002/mop.24283>
- [5] Y. T. Lee, J. S. Lim, C. S. Kim, D. Ahn, and S. Nam, "A compact-size microstrip spiral resonator and its application to microwave oscillator," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 12, no. 10, pp. 375-377, Oct. 2002.
DOI : <https://doi.org/10.1109/LMWC.2002.804556>
- [6] S. W. Seo, H. Y. Jung, J. H. Jeong, and C. H. Park, "Design of an X-band oscillator using novel miniaturized microstrip hairpin resonator," Proceedings of APMC, Bangkok, Thailand, 2007.
DOI : <https://doi.org/10.1109/APMC.2007.4554736>
- [7] C. S. Kim and Y. I. Lee, "Design of SIR-based Bandstop Filter with Symmetrical Hairpin Wideband," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 18, No. 1, pp. 43-46, 2018.
DOI : <http://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.1.43>
- [8] J. K. Koo, J. S. Lim, S. M. Han and D. Ahn, "Design of a CPW Oscillator Using Spiral Resonators," The Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society (JKAIS), Vol. 10, No. 10, pp. 2639-2645, 2009.
- [9] J. H. Jin, U. J. Kim, S. Y. Jang, Y. S. Lee, Y. K. Cho, "Microstrip Fed Meander Slot Antenna with Open-End for the RF Remote Controller," The Journal Of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 18, no. 2, pp.143-150, 2007.
DOI : <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2007.18.2.143>
- [10] Y. Liu, L. Yang, Y. Liu, J. Ren, J. Wang, and X. Li, "Dual-Band Planar MIMO Antenna for WLAN Application," Microwave and Optical Technology Letters (MOTL), Vol. 57, No. 10, pp. 2257-2262, 2015.
DOI : <https://doi.org/10.1002/mop.29312>
- [11] K. L. Wong, H. J. Jiang, and Y. C. Kao, "High-Isolation 2.4/5.2/5.8 GHz WLAN/MIMO Antenna Array for Laptop computer Application," Microwave and Optical Technology Letters (MOTL), Vol. 55, No. 2, pp. 382-387, 2013.
DOI : <https://doi.org/10.1002/mop.27279>
- [12] Guillermo González, Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, pp. 397-403, 1997.

저 자 소 개

이 영 민(정회원)



- 2016년 8월 : 금오공과대학교 전자공학부 (공학사)
- 2020년 8월 : 금오공과대학교 전자공학과 (공학석사)
- 관심분야 : RF 회로 설계, 오실레이터, 안테나 설계 및 해석

이 영 순(정회원)



- 1979년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1981년 2월 : 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1981년 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수
- 관심분야 : 전자기장 이론, 안테나 산란문제, 도파관 불연속, 전자기장 개구결합 문제, 전자기장 수치해석

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 Grand ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음.
(IITP-2021-2020-0-01612)