

새로운 헤어핀 공진기를 이용한 X 밴드 발진기

An X-band Oscillator Using a New Hairpin Resonator

서 성 원 · 정 진 호 · 박 찬 형

Sung Won Seo · Jinho Jeong · Chan Hyeong Park

요 약

본 논문에서는 새로운 헤어핀 공진기를 제안하고 이를 X 밴드 발진기에 응용하는 연구에 관한 것이다. 새로이 제안된 헤어핀 공진기는 스파이럴 구조를 이용하여 coupling을 강화시키는 구조이다. 기존의 헤어핀 공진기와 새로이 제안된 공진기를 마이크로스트립 선로 상에서 제작하여 특성을 비교하였다. 공진 주파수 9.2 GHz에서 제안된 공진기는 더 높은 loaded quality factor를 보여주었고, 면적 또한 약 50 % 정도 줄어들었음을 확인하였다. 새롭게 제안된 헤어핀 공진기를 이용한 발진기의 측정 결과, 출력 전력은 10.87 dBm이고, 기준 주파수 대비 2차 고조파 성분 억압은 41.99 dBc이며, 100 kHz 오프셋에서 위상 잡음은 -101.49 dBc/Hz의 특성을 얻었다. 이는 기존의 헤어핀 공진기를 이용한 발진기보다 6.17 dB 정도 개선된 위상 잡음 특성에 해당한다.

Abstract

In this paper, an X-band oscillator is presented using a new miniaturized microstrip hairpin resonator. The newly designed hairpin resonator on the microstrip line employs the spiral structure, which shows a higher loaded quality factor and the 50 % reduced circuit area compared to the conventional one at 9.2 GHz. The oscillator using proposed resonator shows the output power of 10.87 dBm, the second harmonic suppression of 41.99 dBc, and the phase noise performance of -101.49 dBc/Hz at 100 kHz offset, which is better than the conventional resonator oscillator by 6.17 dB.

Key words : Hairpin Resonator, Oscillator, Phase Noise, Quality Factor

I. 서 론

무선 통신 시스템에서 국부 발진기는 저가, 저전력, 저위상 잡음, 그리고 소형화가 중요한 설계 사양이다. 발진기 설계에 있어 공진기는 위상 잡음 특성에 밀접한 영향을 미치므로, 저잡음 특성을 갖는 트랜지스터에 대한 연구와 더불어 매우 중요한 연구 주제가 되어 왔다. 특히, 발진기의 위상 잡음은 공진기의 quality-factor(Q-factor)와 매우 밀접한 관련이 있으며, 이러한 사실은 식 (1)에 제시된 Leeson의 위상 잡음 모델을 통해 알 수 있다^{[1]-[3]}.

$$L(\Delta\omega) = 10 \log \left[\frac{2FkT}{P_{sig}} \left\{ 1 + \left(\frac{\omega_o}{2Q\Delta\omega} \right)^2 \right\} \left(1 + \frac{\Delta\omega_{1/f^2}}{|\Delta\omega|} \right) \right] \quad (1)$$

여기서 k 는 볼츠만 상수, T 는 절대 온도, P_{sig} 는 출력 전력, ω_o 는 발진 주파수, F 는 실험적으로 얻어진 계수(empirical factor), Q 는 공진부의 Q-factor이다. 이 Leeson의 모델에 의하면 발진기의 위상 잡음은 공진부의 Q-factor의 제곱에 반비례하므로, 공진부의 Q-factor를 향상시켜야 위상 잡음을 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

「이 논문은 3차년도 나노 IP/SoC 설계기술혁신사업단의 서울시 산학연 협력사업 연구비 지원으로 연구되었음.」

광운대학교 전자통신공학과(Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University)

· 논문 번호 : 20071130-22S

· 수정완료일자 : 2008년 1월 31일

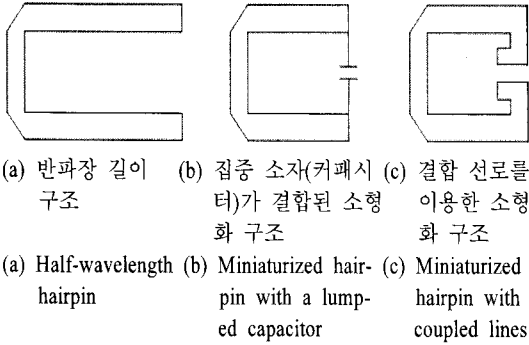


그림 1. 기존의 평면형 헤어핀 공진기 구조
Fig. 1. Conventional hairpin resonator structures.

그러므로 발진기를 설계함에 있어, 보다 향상된 위상 잡음 성능을 구현하기 위해 높은 Q-factor를 지닌 유전체 공진기를 이용한 발진기가 폭넓게 사용되어 왔다⁴⁾. 그러나, 이러한 유전체 공진기는 높은 Q-factor에도 불구하고, 3차원적인 입체 구조로 인해 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)로 집적화하는데 많은 제약이 따른다. 또한, MMIC 회로는 전체 칩이 차지하는 면적이 가격에 큰 영향을 주므로, 큰 면적의 공진기를 집적화하면 가격이 상승할 수밖에 없다.

따라서, MMIC에 응용 가능한 소형 평면형 공진기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{5),6)}. 그림 1은 유전체 공진기의 한계를 극복하기 위해 제안된 평면 형태의 헤어핀(hairpin) 공진기 구조이다. 그림 1(a)는 반파장 마이크로스트립 선로에 기반한 헤어핀 공진기이며, 그림 1(b)는 공진 회로의 면적을 줄이기 위해 양쪽 선로 끝 부분에 집중 소자인 커패시터를 이용하였고, 그림 1(c)는 집중 소자 대신 결합 선로를 가까이 두어 커플링 효과를 강화시켜 공진회로의 크기를 줄이고 Q-factor를 개선시키는 구조이다. 하지만, 그림 1과 같은 평면형 공진기들은 여전히 크기 문제로 인해 MMIC 발진기의 공진기로 사용하는 데 문제가 되어 왔다.

이러한 단점을 극복하기 위해 본 논문에서는 기존의 평면형 헤어핀 공진기의 전송 선로 양쪽 끝부분을 스파이럴 구조로 변환한 새로운 형태의 소형 공진기를 제안하였다. 이러한 방법으로 공진기의 면적을 약 50 % 정도 줄일 수 있었다. 또한, 공진기의 Q-factor 역시 향상되는 특성을 얻을 수 있었다⁷⁾. 그

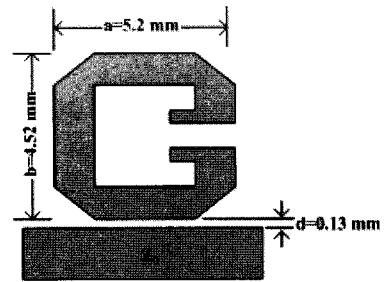
리고, 새로 제안한 공진 회로의 구조는 좌우 대칭이므로 push-push 구조 형태의 발진기 설계에 유리한 이점이 있다.

II. 새로운 헤어핀 공진기

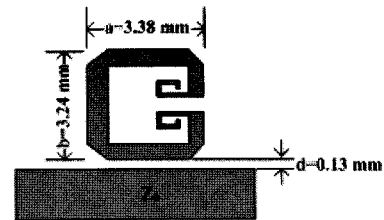
그림 2는 기존의 헤어핀 공진기와 새로 제안된 공진기의 레이아웃을 보여주고 있다. 설계 주파수는 9.2 GHz이며, 사용된 유전체 기판은 두께가 0.54 mm, 유전율이 2.54인 Teflon이다.

새로 제안된 공진기는 기존의 커패시터(그림 1(b)), 혹은 단순 결합 선로(그림 1(c)) 대신에 스파이럴 구조를 적용시켰다. 이렇게 마이크로스트립 라인의 양쪽 끝 부분에 스파이럴 구조를 이용함으로써 capacitive 결합을 증가시키고 회로의 면적을 줄일 수 있다. 전체 크기를 더욱 줄이기 위하여 마이크로스트립 라인의 특성 임피던스를 기존의 50 ohm을 사용하지 않고 더 높은 값을 사용하였다. 그 결과, 레이아웃 상에서의 공진기 면적을 50 % 정도 줄일 수 있었다.

새로운 공진기와 기존 공진기를 같이 설계하여



(a) 기존의 헤어핀 공진기 레이아웃
(a) Layout of the conventional hairpin



(b) 제안된 공진기의 레이아웃
(b) Layout of the novel hairpin

그림 2. 공진기 구조 비교
Fig. 2. Comparison between two resonators.

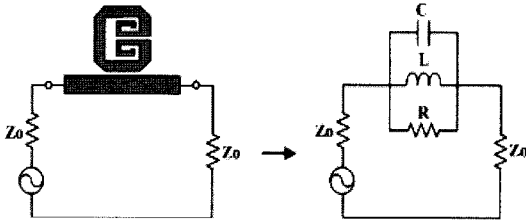


그림 3. 새로 제안된 공진기의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of the novel resonator.

그 특성을 비교하였다. 그림 3은 헤어핀 공진기를 측정할 때의 등가회로를 보여주고 있는데, 2-port 측정에서 병렬 공진회로가 직렬로 연결되어 있는 것으로 볼 수 있다. 이를 바탕으로 측정된 S-parameter에서 공진기의 quality factor를 아래의 수식을 이용하여 계산하였다.

$$Q_L = \omega_o \frac{R \cdot 2Z_o}{R + 2Z_o} C \quad (2)$$

공진기 및 발진기 설계를 위하여 Agilent사의 ADS (Advanced Design System)를 이용하였다. ADS의 line calculation을 이용하여 설계 주파수에 맞는 마이크로 스트립 선로의 특성 임피던스와 길이를 결정하여 헤어핀 형태로 공진기를 설계하였다. 설계 주파수는 9.2 GHz였다.

그림 4와 그림 5는 각각 기존 및 새로운 공진기의 S-parameter를 나타내고 있으며, 시뮬레이션 값과 측정 값을 동시에 나타내었다. 식 (2)에 제시된 방법으로 Q-factor를 계산한 결과, 시뮬레이션 상에서 기존 공진기의 Q-factor가 115였으며, 새로 제안된 공진기는 129로 증가함을 확인하였다. 측정값에서 Q-factor를 계산하면, 기존 공진기는 59, 새로 제안된 공진기는 66이었다.

따라서, 스파이럴 구조를 이용하여 새롭게 제안된 헤어핀 공진기는 칩면적은 줄이면서도 Q-factor는 증가하는 장점이 있다. 이렇게 새롭게 제안된 헤어핀 공진기를 이용하면 저위상 잡음 특성을 얻는 발진기를 설계할 수 있다. 본 논문에서는 간단한 회로 구성과 회로 설계의 용이성을 위해 직렬 케환형(series feedback topology) 발진기를 채택하였으며, 그 개략도를 그림 6에 나타내었다. GaAs MESFET의 소스(source) 단에 open-circuit의 형태로 구현된 마이크로

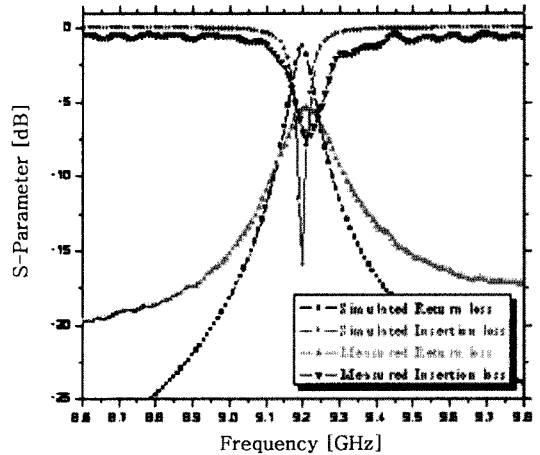


그림 4. 기존 헤어핀 공진기 시뮬레이션 및 측정
Fig. 4. Simulation and measurement of the conventional hairpin resonator.

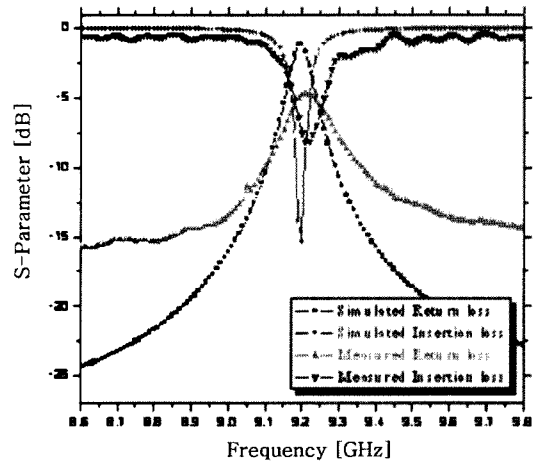


그림 5. 제안된 헤어핀 공진기 시뮬레이션 및 측정
Fig. 5. Simulation and measurement of the novel hairpin resonator.

스트립 라인을 연결하였는데, 여기서 이 라인은 capacitive feedback을 형성하여 게이트(gate)에서 부정저항(negative resistance)이 보이도록 한다.

발진 주파수는 공진기의 공진 주파수와 그림 6의 l_1, l_2, l_3 의 길이에 의해 결정된다. 공진부의 AA'면에서 최대의 자기적 결합이 일어나도록 l_1 과 l_2 를 조절하였고, l_3 는 설계 주파수에서 충분한 부정저항을 얻을 수 있도록 개방 스텐브(open stub)를 이용하였다. 즉, 트랜지스터의 게이트 단을 바라본 반사계수(reflection coefficient)의 크기가 1보다 커지도록 l_3 를

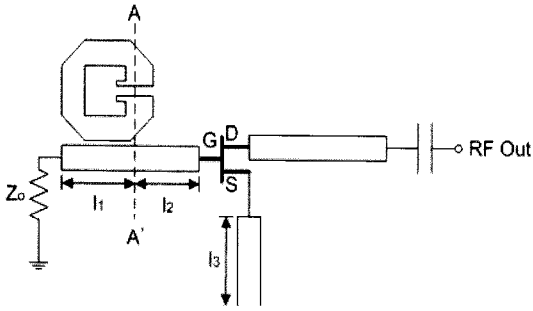


그림 6. 직렬 케환형 발진기 설계를 위한 등가회로
Fig. 6. Equivalent circuit of the oscillator.

최적화시켰다. 이 때, 부성 저항이 2 GHz 이상의 대역폭(bandwidth)을 가지도록 나타남을 확인하였다. 또한, 게이트 단은 기생 발진과 히스테리시스를 억제시키기 위해 50 ohm으로 종단시켰다.

전체 회로도도 그림 7에 나와 있다. DC 바이어스의 회로의 경우, FET 드레인(drain) 단에 하나의 파워 서플라이(power supply)를 사용하는 자기 바이어스(self-bias)를 채택하였다. 특히, 바이어스 회로 설계에 있어 능동 소자에 전원을 공급하는 동안 RF 동작에 최소한의 영향을 주는 것이 중요하므로, 이를 위해 RF choke를 신호선에 병렬로 연결한다. 즉, 그림 7에서와 같이, 1/4 파장 길이의 마이크로스트립 선로와 RF short를 위한 radial stub를 두어 구현하였다. 좁은 대역폭에서 short circuit으로 동작되는 radial stub

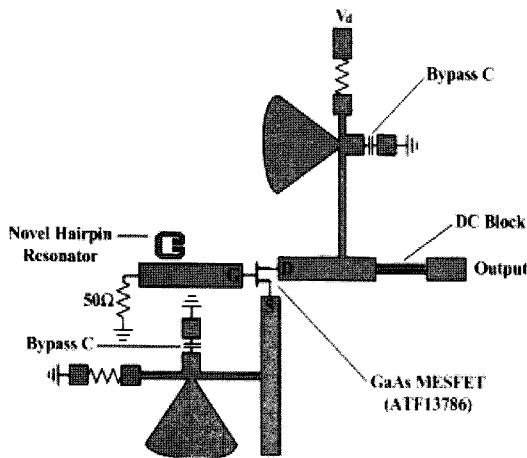


그림 7. 새로 제안된 공진 발진기의 PCB 레이아웃
Fig. 7. Printed-circuit board layout of the novel resonator oscillator.

는 1/4 파장 길이의 마이크로스트립 선로를 지나면서 open circuit으로 동작하여 RF choke로서의 역할을 하게 된다. 또한, radial stub에 바이패스(bypass) 커패시터를 추가로 연결함으로써, 저주파에서 short circuit을 만들어 기생 발진을 막을 수 있다.

III. 측정 및 결과 분석

설계된 X 밴드 발진기는 유전체 두께가 0.54 mm, 금속 두께가 0.018 mm, 유전율이 2.54인 Chukoh사의 Teflon 기판 위에 제작되었다. 부성 저항을 생성시키는 능동 소자로는 저잡음 특성을 가지는 Agilent사의 GaAs MESFET, ATF 13786을 사용하였다.

제작된 공진기 및 발진기를 측정하기 위하여 Agilent사의 8510C vector network analyzer와 E4440A PSA series spectrum analyzer를 사용하였다. 그림 8과 9는 각각 기존의 공진기를 사용한 발진기, 그리고 새로운 공진기를 사용한 발진기의 출력 스펙트럼을 보여주고 있다.

두 회로는 동일 바이어스 조건 $V_{ds}=2.93$ V 및 $I_{ds}=42.4$ mA 하에서 측정되었다. 측정된 공진 주파수는 기존의 평면형 헤어핀 공진기의 경우, 9.211 GHz이었고, 이 때 측정된 Q-factor는 59이었다. 새로 제안된 공진기의 공진 주파수는 9.210 GHz이었으며, 이 때 측정된 Q-factor는 66으로 기존 공진기의 Q-factor에 비해 약 12 % 정도 상승되었다.

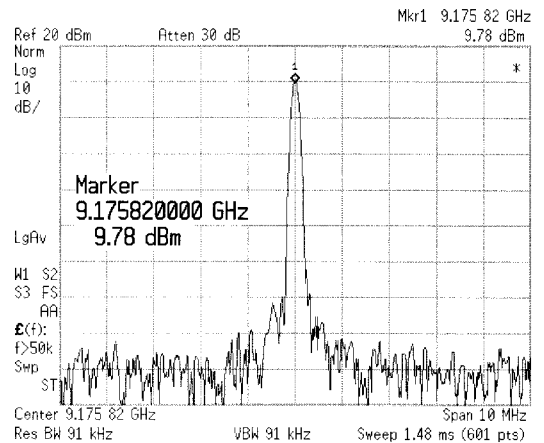


그림 8. 기존 헤어핀 공진 발진기의 출력 전력
Fig. 8. Output power spectrum of the conventional hairpin resonator oscillator.

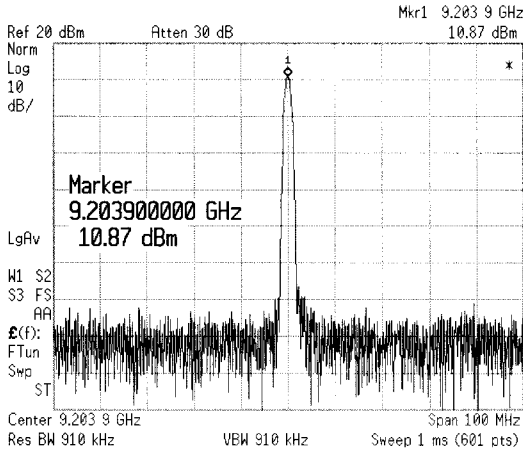


그림 9. 제안된 헤어핀 공진 발진기의 출력 전력
Fig. 9. Output power spectrum of the novel hairpin resonator oscillator.

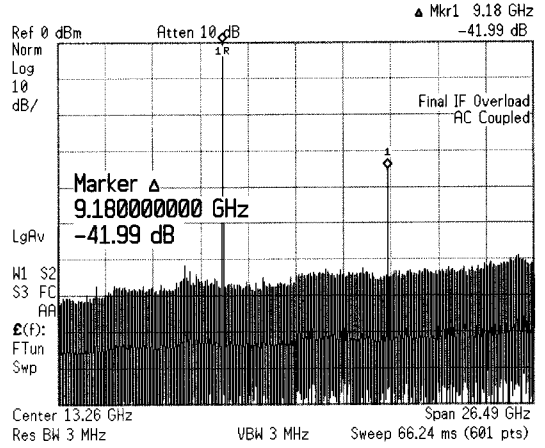


그림 11. 제안된 헤어핀 공진 발진기의 고조파 억압
Fig. 11. Second harmonic suppression of the novel hairpin resonator oscillator.

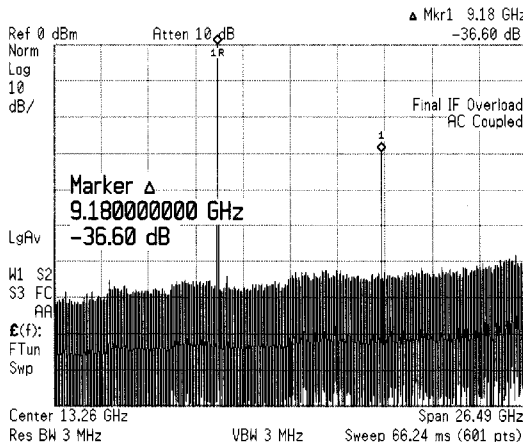


그림 10. 기존 헤어핀 공진 발진기의 고조파 억압
Fig. 10. Second harmonic suppression of the conventional hairpin resonator oscillator.

기존의 공진기를 이용한 발진기의 경우, 출력 전력은 9.78 dBm, 2차 고조파 억압은 -36.60 dBc, 그리고 위상 잡음 특성은 전체 span을 1 MHz, resolution bandwidth를 10 kHz, video bandwidth를 100 Hz로 설정하였을 때, 100 kHz offset에서 -95.32 dBc를 보였다(그림 12). 새로 제안된 공진기를 적용한 발진기는 출력 전력이 10.87 dBm, 2차 고조파 억압은 -41.99 dBc이고, 위와 동일 조건하에서 위상 잡음 특성은 100 kHz offset에서 기존의 공진기를 적용시킨 발진기와 비교할 때 6.17 dB가 개선된 -101.49 dBc를 나타내었다(그림 13).

그림 14와 15는 각각 기존 공진기를 이용한 발진기, 새로운 공진기를 이용한 발진기의 제작 사진을 보여주고 있다. 실제 측정된 공진기의 공진 주파수, 삽입 손실 및 반사 손실, 그리고 이를 적용한 발진기의 출력 전력, 2차 고조파 억압 및 위상 잡음 특성은 시뮬레이션 결과와 약간의 차이가 있는데, 이러한 오차는 금속 선로의 손실, 측정시 연결된 케이블 및 커넥터의 손실 등에 기인할 수 있다. 조금 더 정밀하게 기판의 금속 패턴을 제작하게 되면 이러한 오차들의 상당 부분은 앞으로 더욱더 줄어들 것이라

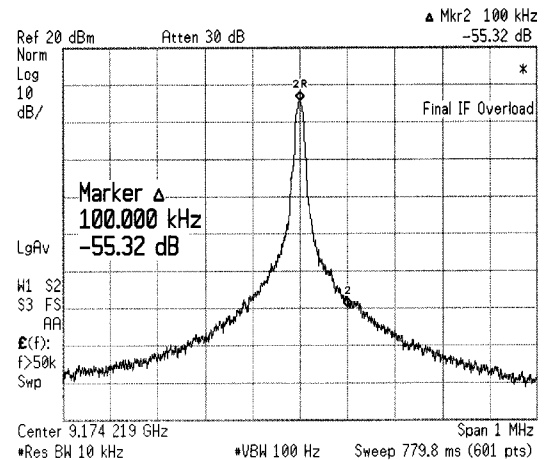


그림 12. 기존 헤어핀 공진 발진기의 위상 잡음
Fig. 12. Phase noise characteristic of the conventional hairpin resonator oscillator.

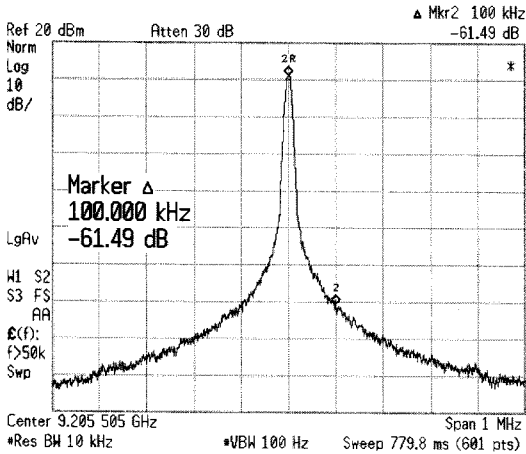


그림 13. 제안된 헤어핀 공진 발진기의 위상 잡음
Fig. 13. Phase noise characteristic of the novel hairpin resonator oscillator.

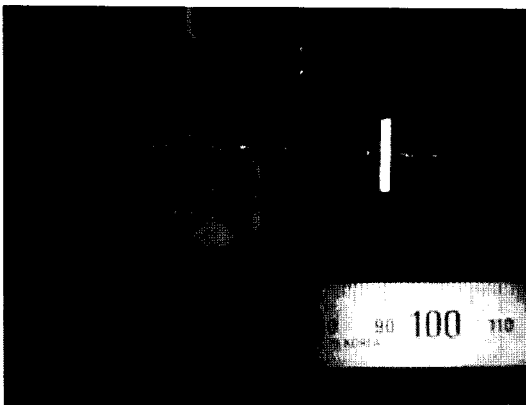


그림 14. 기존 헤어핀 공진 발진기의 제작 사진
Fig. 14. Photograph of the fabricated conventional hairpin resonator oscillator.

고 예상된다. 따라서, 향후 MMIC로 제작하면 더욱 우수한 측정 결과를 얻을 수 있을 것이라 기대한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 새로 제안된 평면형 구조의 공진기를 이용하여 X 밴드에서 동작하는 발진기를 설계, 제작 및 측정하였다. 공진부는 대역 저지 형태의 특성을 나타내며, 발진기 설계는 직렬 케환형 구조에 기반하였다. 공진부의 해석과 발진기의 케환 및 부성 저항 설계를 위해 비선형소자 시뮬레이터인 Agilent사의 ADS를 사용하였다. 설계 주파수는 9.2 GHz

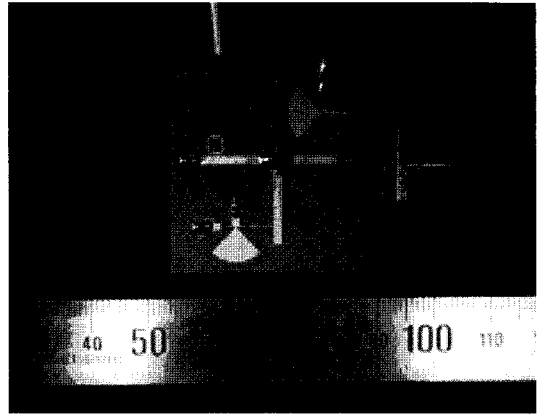


그림 15. 제안된 헤어핀 공진 발진기의 제작 사진
Fig. 15. Photograph of the fabricated novel hairpin resonator oscillator.

였으며, 단일 DC 전원 공급원을 이용하는 자기 바이어스 구조를 채택하였다. 제안된 공진기는 그림 2(a)에 제안되었던^[5] 기존의 평면형 헤어핀 공진기보다 면적을 50 % 정도 줄이면서 Q-factor를 12 % 정도 증가시키는 특성을 보였다. 결과적으로, 이를 응용한 발진기의 위상 잡음 특성을 6.17 dB 정도 개선시켰다.

제안된 공진기 구조는 마이크로파 및 밀리미터파 공진기, 능동 필터 및 발진기 분야로의 많은 응용이 가능하다. 또한, MMIC로 집적화할 경우, 보다 작은 면적을 차지하는 공진 회로를 삽입할 수 있어 향후 이 분야와 관련하여 제작 단가를 낮추는 이점을 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] D. B. Leeson, "A simple model of feedback oscillator noise spectrum", *Proc. IEEE*, vol. 54, pp. 329-339, Feb. 1966.
- [2] A. Hajimiri, T. H. Lee, "A general theory of phase noise in electrical oscillator", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 2, pp. 179-194, Feb. 1998.
- [3] T. H. Lee, A. Hajimiri, "Oscillator phase noise: A tutorial", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 35, no. 3, pp. 326-336, Mar. 2000.
- [4] P. G. Wilson, R. D. Carver, "An easy-to use FET DRO design procedure suited to most CAD programs", *IEEE MTT-S Dig.*, vol. 3, pp. 1033-1036,

Jun. 1989.

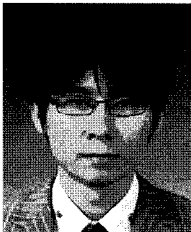
[5] M. Sagawa, K. Takahashi, and M. Makimoto, "Miniaturized hairpin resonator filters and their applications to receiver front-end MIC's", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 37, no. 12, pp. 1991-1997, Dec. 1989.

[6] C. G. Hwang, J. S. Lee, J. H. Kim, N. H. Myung, and J. I. Song, "Simple K-band MMIC VCO utili-

zing a miniaturized hairpin resonator and a three terminal p-HEMT varactor with low phase noise and high output power properties", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 13, no. 6, pp. 229-231, Jun. 2003.

[7] F. Hwang, "Superconducting microwave bandpass filter using spiral resonators with no air bridge", *Electron. Lett.*, vol. 37, pp. 361-362, Mar. 2001.

서 성 원



2006년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)
 2008년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2008년 2월~현재: LG전자 MC사업본부 연구원
 [주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 설계, CMOS 아날로그 회로 설계

박 찬 형



1992년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
 2000년 3월~2003년 2월: MIT(Massachusetts Institute of Technology), Visiting Scientist
 2003년 3월~현재: 광운대학교 전자통신공학과 부교수
 [주 관심분야] 반도체 소자 및 집적회로 잡음 모델링, 나노 전자 및 광소자 해석 및 설계, Carrier transport 이론

정 진 호



1997년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)
 1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
 2004년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2004년 10월~2007년 2월: Univ. of

California, San Diego, Postdoc.

2007년 3월~현재: 광운대학교 전자통신공학과 조교수
 [주 관심분야] RF Power Amplifier, MMIC, RFIC, Device Modeling, Power Combiner