

# 소형화된 헤어핀 공진기를 이용한 X-대역 발진기의 설계 및 구현

김기래\*

Design and Implementation of X-Band Oscillator Using Compact Hairpin Resonator

Gi-Rae Kim\*

요 약

본 논문에서는 X-대역 레이더 시스템의 국부 발진기용으로 사용가능한 발진기를 소형화된 헤어핀 공진기를 이용하여 설계한다. 제안하는 헤어핀 공진기는 기존의 헤어핀 구조에서 선로 끝단에 커패시턴스를 증가시켜 소형화하였다. 이 구조는 기존 구조에 비해 크기를 40% 정도로 소형화할 수 있고 위상잡음 특성도 개선하였다. 제안한 헤어핀 공진기를 이용한 발진기는 측정결과 발진주파수는 9.05 GHz, 출력전력이 2.47 dBm, 위상잡음 특성이 -101.4 dBc/Hz이었다. 본 논문에서 제작된 발진기는 소형화 설계가 가능하고 평면형 구조이므로 MMIC 설계에 유리한 장점이 있다.

ABSTRACT

In this paper, oscillator with compact hairpin resonator is used to design the local oscillator of X-band radar system. The proposed hairpin resonator is minimized by increasing capacitance of line end of conventional one. By this method, size can be minimized about 40% compared with the conventional resonator and also can improve phase noise characteristic. The result of oscillator using proposed hairpin resonator is measured in oscillating frequency of 9.05 GHz, output power of 2.47 dBm, and phase noise of -101.4 dBc/Hz. The fabricated oscillator in this paper can minimize design and its planar structure makes it easy to design MMIC.

키워드

X-Band, RF Circuit, Oscillator, Negative Resistance, GaAs MESFET  
X-밴드, RF 회로, 발진기, 부정저항, GaAs MESFET

## 1. 서론

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 연구주제가 되어 왔다. 특히, 발진기의 위상 잡음은 공진기의 Q 값과 매우 밀접한 관

련이 있으며, 이러한 사실은 식(1)에 제시된 Lesson의 위상 잡음 모델을 통해 알 수 있다[1-3].

$$L(\Delta\omega) = 10\log\left[\frac{2FkT}{P_{sig}}1 + \left(\frac{\omega_0}{2Q\Delta\omega}\right)^2\left(1 + \frac{\Delta\omega_{1/f^3}}{|\Delta\omega|}\right)\right] \quad (1)$$

여기서 k는 볼츠만 상수, T는 절대온도,  $P_{sig}$ 는 출력전력,  $\omega_0$ 는 발진 주파수, F는 실험적으로 얻어진 계

\* 신라대학교 전자공학과(hamindae@naver.com)

접수일자 : 2014. 07. 30

심사(수정)일자 : 2014. 09. 25

게재 확정일자 : 2014. 10. 17

수, Q는 공진부의 Q 값이다. 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. 그러므로 발진기를 설계함에 있어, 보다 향상된 위상 잡음 성능을 구현하기 위해 높은 Q-factor를 지닌 유전체 공진기를 이용한 발진기가 폭넓게 사용되어 왔다 [4]. 그러나, 이러한 유전체 공진기는 높은 Q-factor에도 불구하고, 3차원적인 입체 구조로 인해 MMIC로 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]. MMIC 발진기에 적합한 공진기로 그림 1과 같이 평면 구조를 갖고 소형화 개념이 적용된 결합 구조를 갖는 헤어핀 구조가 K대역 등과 같이 높은 주파수에서 적용이 되었다. 헤어핀 공진기는 기본적으로  $\lambda/2$  전송선로 공진기이나 소형화 방법으로 그림 1(b),(c)처럼 집중소자의 커패시터나, 결합 선로를 이용하는 형태가 연구되어 왔다[7-9]. 본 논문에서는 헤어핀 구조에서 2개의 결합선로를 이용하여 소형화를 구현하였다. 제안한 구조를 기존의 결합선로를 이용한 구조와 비교하면 상단의 결합 선로에 커패시터를 결합하여 크기를 더욱 소형화할 수 있는 장점이 있다. 또한 구조가 대칭적이므로 push-push와 같은 구조에 적합하기에도 유리하다. 새로 제안한 구조는 기존 구조에 비해 크기를 1/2 정도로 소형화를 하였고, 이를 X대역에서 동작하는 MESFET 발진기의 공진부에 적용하여 낮은 위상잡음 특성을 구현하였다. 발진기는 반사계수를 이용한 설계방법을 기초로 하여 GaAs MESFET와 Source단에서 들여다본 임피던스의 실수부가 음의 값을 가지게 하고 이때 부가적으로 발생된 리액턴스를 상쇄하게 하는 방법을 이용하여 설계하였다[10-13]. 이 방법은 기존의 유전체 공진기를 이용한 발진기 설계 방법에 비해 위상잡음 특성은 다소 떨어지지만 공진기가 소형화되어 발진기를 소형화할 수 있고 MMIC 설계가 편리한 장점이 있다.

### III. 헤어핀 공진기의 설계

그림 1은 기존의 헤어핀 공진기와 새로 제안된 공진기의 레이아웃을 나타내고 있다. 설계 주파수는 9.0 GHz이며, 사용된 유전체 기판은 두께가 0.787 mm, 유전율이 2.3인 테프론이다. 새로 제안된 공진기는 기존의 헤어핀 공진기 구조에서 선로의 길이를 줄여 인덕턴스 성분을 줄이고 공진기의 끝단에 연결된 스테브의 면적을 크게 하고 결합 용량을 증가하여 커패시턴스 성분을 증가하였다. 이와 같이 공진기를 구성하는 마이크로 스트립 라인의 길이를 줄이고 양쪽 끝 부분에 결합용량을 증가시킴으로써 공진기의 면적을 줄일 수 있다. 그리고 소형화 설계를 위해 마이크로 스트립 선로의 특성 임피던스를  $75 \Omega$ 로 설계하였다. 레이아웃 상에서의 공진기 면적을 기존 헤어핀 구조에 비해 40% 정도로 줄일 수 있었다.

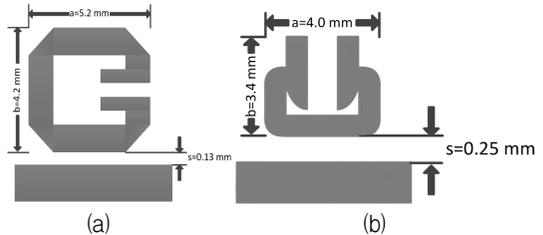


그림 1. 공진기 구조 비교  
 Fig. 1 Comparison between the resonators.  
 (a) 기존의 헤어핀 공진기  
 (a) Conventional hairpin resonator  
 (b) 제안된 공진기  
 (b) Proposed hairpin resonator

그림 2는 헤어핀 공진기의 등가회로를 나타내고 있다. 공진기 및 발진기 설계를 위하여 Agilent사의 ADS를 이용하였다. ADS의 line calculation을 이용하여 설계 주파수에 맞는 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스와 길이

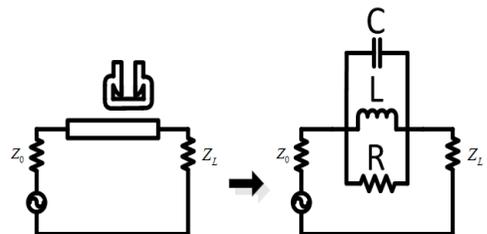


그림 2. 새로 제안된 공진기의 등가회로  
 Fig. 2 Equivalent circuit of the novel resonator

를 결정하여 헤어핀 형태로 공진기를 설계한다. 공진기의 중심 주파수는 9.0 GHz으로 설계하였다. 그림 3은 새로운 헤어핀 공진기의 특성을 나타내고 있다. 그림에서 공진주파수가 9.0 GHz인 것을 알 수 있다.

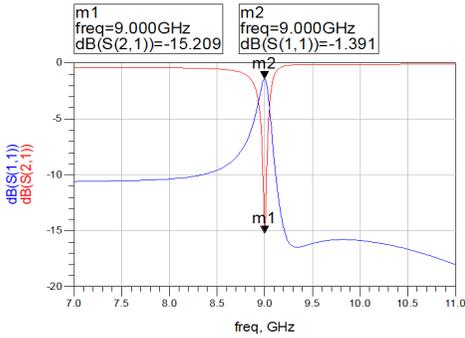


그림 3. 제안된 헤어핀 공진기의 S-parameter  
Fig. 3 S-parameter of the proposed hairpin resonator.

### III. 발진기의 설계

발진기를 설계하기 위해서는 원하는 동작주파수 대역에서 충분한 이득과 출력 전력을 가지는 트랜지스터를 선정하여야 한다. 본 논문에서는 GaAs MESFET 중에서 HP사의 ATF - 13786을 선정하였고, 발진기의 설계는 반사계수 파라미터를 이용하여 발진기의 발진조건을 만족하도록 설계하였다.

선정한 트랜지스터는 안정된 상태로 발진조건을 만족하지 못하기 때문에 트랜지스터의 소스단에 리액턴스 소자를 추가하여 귀환(feedback) 루프를 만들어 발진조건을 만족하도록 설계한다. 본 논문에서는 그림 4에서 나타낸 바와 같이 소스단에 리액턴스 소자로 커패시터 소자를 추가하였다. 커패시터의 용량을 변화시키면 트랜지스터의 입력 임피던스 값이 변하게 되고 발진조건인 음의 값을 갖게 될 수 있다. 그림 4는 선택된 트랜지스터에 귀환소자로 커패시터를 추가하고 그 용량을 변화시키면서 입력 임피던스의 실수 값과 허수 값을 구하기 위한 회로이며, Agilent사의 ADS 툴을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 트랜지스터의 게이트 단에서 입력 임피던스가 부정저항을 가지도록 커패시턴스 값을 변화시키면서 입력 임피던스의 실수 값과 허수 값을 구하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5

의 시뮬레이션 결과에서 입력임피던스의 실수 값이 음의 값을 갖도록 하는 커패시턴스 값은 많이 존재하지만 본 논문에 커패시턴스를 0.1 pF인 점을 선택하였다. 이 조건에서 트랜지스터의 입력 임피던스는  $Z_{in} = -50.88 - j11.27 [\Omega]$  이다.

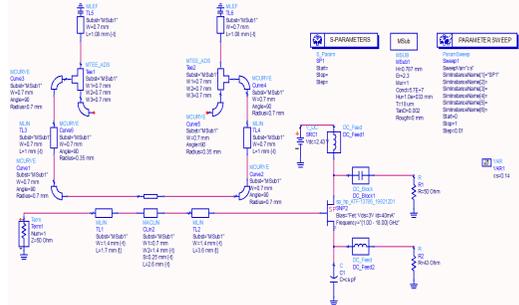


그림 4. 귀환소자를 갖는 트랜지스터 회로  
Fig. 4 Simulation TR circuit with feedback

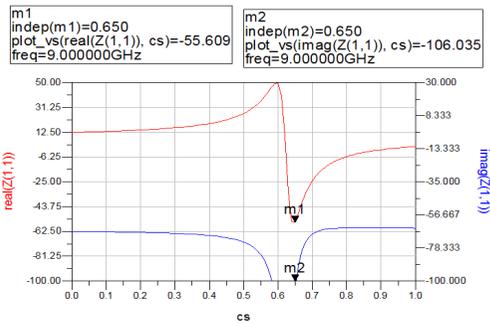


그림 5. 트랜지스터의 입력임피던스  
Fig. 5 Input impedance of transistor

트랜지스터의 입력 단, 즉 게이트 단에서 발진 조건을 만족하기 위해서는 입력 임피던스의 실수 값은 음의 값을 가져야하고 허수 값의 합은 0이 되어야 한다. 입력 임피던스의 실수 값은  $-50.609 \Omega$ 이고 허수 값은  $-j106.035 \Omega$  이다. 발진 조건을 만족하기 위해 이 허수 값의 리액턴스를 상쇄하여야 하므로 게이트단에  $+j106.035 \Omega$ 의 리액턴스를 추가해야 한다. 발진 주파수에서 인덕턴스 값을 계산하면 0.24 nH이다. 그림 6에서 나타낸 바와 같이 트랜지스터의 게이트 단자에 인덕터를 추가하여 기본적인 발진조건을 만족하는 발진기회로를 구성하였다. 그림 6와 같이 설계된 기본적인 발진회로가 소신호에서 발진조건을 만족하는지 여부를 시뮬레이션 하였

다. 시뮬레이션을 위해 기본 발진회로에 바이어스 회로를 추가하였다. 바이어스 특성은  $V_{DS} = 3V$  일 때  $I_D = 40mA$ 이며,  $V_{GS} = -1.0V$ 이다. 따라서 자기바이어스(self-bias)를 위해 소스 단자에  $25\Omega$ 의 저항을 연결하였고 DC와 AC회로를 분리하기 위해 DC\_Feed (RFC)와 DC\_Block을 추가하였다. 그림 6의 설계된 발진기 기본회로에 대해 ADS 툴을 사용하여 시뮬레이션 하였으며, 결과는 트랜지스터의 게이트 단에서 반사계수(S11)의 실수 값과 허수 값을 구하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 보는 바와 같이 주파수 9.0 GHz에서 반사계수의 실수 값이 1보다 크고, 허수 값인 위상이 0을 나타내어 소신호 발진 조건을 만족하는 것을 알 수 있다.

그림 6에서 설계된 발진기의 기본회로는 집중소자로 구성되었다. 집중소자는 자가 공진 주파수(SRF)로 인하여 X-대역의 주파수에서는 특성을 나타내지 못하므로 분포소자인 마이크로스트립 라인으로 변환하여 발진기를 설계하였다. 그림 6의 커패시터와 인덕터를 마이크로 스트립 선로로 변환하는 과정을 ADS 툴을 이용하여 계산하였다. 먼저, 그림 6의 소스 단에 있는 귀환 커패시터를 전송선로로 변환한 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에는 커패시터 외에 소스 단에 추가되는 바이어스회로까지 고려하여 나타내었다. 커패시터 기능을 대체할 개방 스텐트와 RFC기능의 스트립선로 2개, 그리고 셀프바이어스를 위한 저항으로 구성하여 소스 단을 설계한 그림이다. 그림 9는 개방된 전송선로(TL2)의 길이를 변화하면서 집중소자 커패시터와 스미스차트상의 같은 리액턴스 값을 갖는 전송선로의 길이를 나타낸 그림이다. 그 결과 개방된 전송선로의 길이가 4.81 mm 일 경우 집중소자의 리액턴스 값과 일치함을 알 수 있다.

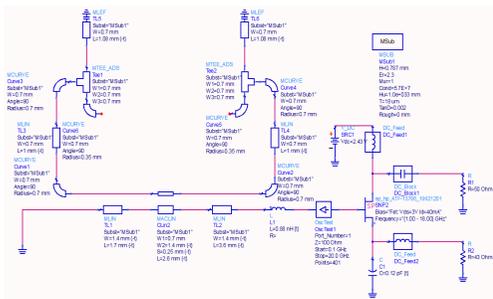


그림 6. 소신호 발진가능성 시뮬레이션  
Fig. 6 Simulation of oscillation for small signal

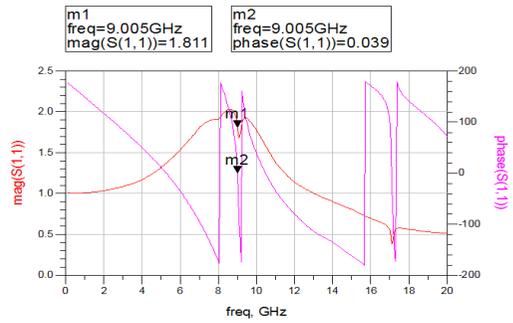


그림 7. 반사계수(S11) 시뮬레이션 결과  
Fig. 7 Simulation result of reflection coefficient(S11)

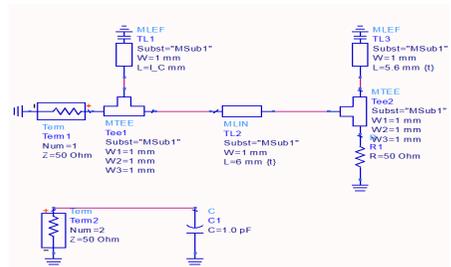


그림 8. 소스단 커패시터의 전송선로로 변환  
Fig. 8 Capacitor convert to transmission line

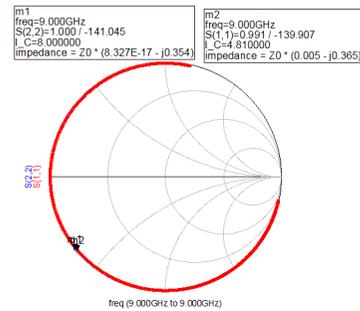


그림 9. 개방 전송선로 길이  
Fig. 9 Length of open transmission line

다음 단계는 소스단에서 발생한 리액턴스를 상쇄하기 위해 게이트단에 삽입한 인덕터도 같은 방법으로 전송선로로 변환할 수 있다. 그림 10은 집중소자 인덕터를 전송선로로 변환하기 위한 단락된 전송선로와 저항, RFC로 구성된 회로도를 나타낸 그림이다. 그림 10은 상단부의 전송선로와 하단부의 인덕터 0.24 nH가 발진주파수에서 리액턴스가 같도록 전송선로의 길이를 구하는 시뮬레이션 회로이다. 집중소자를 하단부와 같

이 회로를 구성한 뒤 단락된 전송선로의 길이를 변화시켜 집중소자 인덕터와 스미스차트 상의 리액턴스가 일치하는 길이를 구하는 것이다. 그림 11에서 나타낸 바와 같이 단락된 전송선로의 길이가 11.55 mm일 경우 집중소자 인덕터와 같은 리액턴스 값을 나타내는 것을 알 수 있다. DC Block 회로를 집중소자 커패시터를 사용하게 되면 주파수가 높을 경우 기생적인 인덕터와 저항 성분이 포함되어 발진에 나쁜 영향을 주게 된다. 발진기에 최소의 영향을 주어야 하기 때문에 결합전송선로를 이용하여 DC블록을 설계하였다.

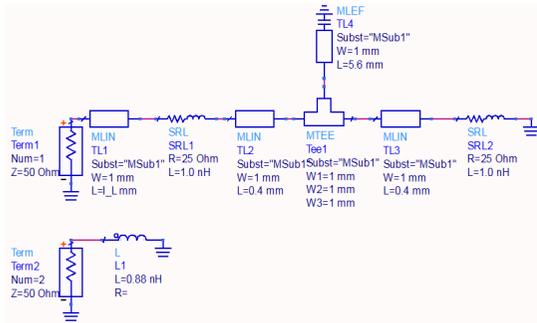


그림 10. 인덕터의 전송선로 변환  
Fig. 10 Inductor convert to transmission line

그림 12는 DC블록 회로도도의 결합전송선로 길이에 변화를 주어 본 논문에서 제안된 주파수대역에서 가장 작은 삽입손실을 가지는 길이를 나타낸 것이다. 그림 13에서 보는바와 같이 결합전송선로의 길이가 5.5 mm 일 경우 가장 작은 손실을 가지는 것을 알 수 있다.

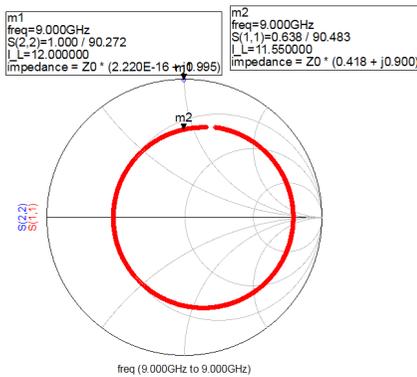


그림 11. 단락 전송선로 길이  
Fig. 11 Length of short transmission line

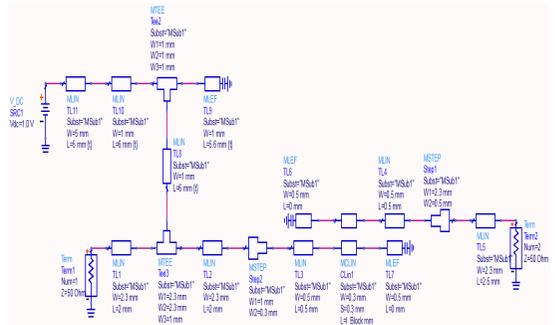


그림 12. DC 블록 시뮬레이션 회로도  
Fig. 12 Simulation circuit of DC block

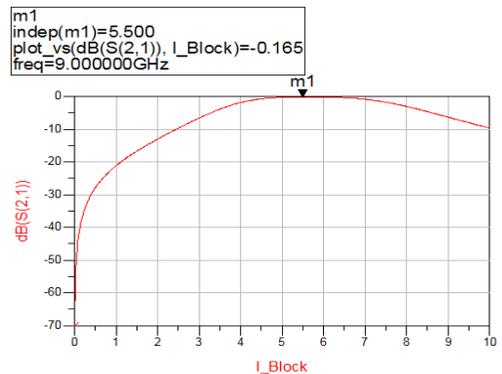


그림 13. 길이의 변화에 따른 DC블록의 특성  
Fig. 13 Characteristic of DC block

그림 14는 전송선로로 설계된 발진기의 전체 회로도도를 나타낸 그림이다. 그림 15는 전송선로로 설계된 발진기의 소신호발진가능성을 나타낸 결과이다. 그 결과 본 논문에서 제안된 주파수 대역인 9.0 GHz에서 소신호 발진이 일어나는 것을 알 수 있다. 그림 16은 설계된 발진기의 발진 주파수, 신호 크기 및 하모닉 신호의 크기의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 결과 값이 소신호 해석의 발진주파수와 약간 차이를 보이는 것은 시뮬레이션 도구에서 소신호 트랜지스터와 대신호 트랜지스터 모델의 오차에 기인한 것이다. 이것은 발진기의 제작시 EM 시뮬레이션 과정을 통해 조정이 가능하다.

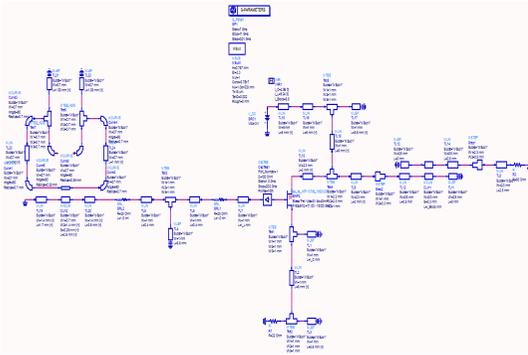


그림 14. 전송선로를 이용한 발진기 회로도  
Fig. 14 Circuit of oscillator with transmission line

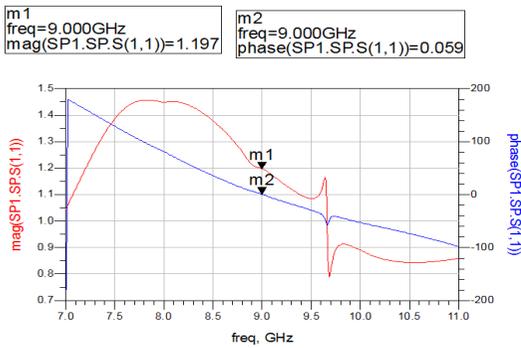


그림 15. 설계된 발진기의 발진조건 결과  
Fig. 15 Oscillation result of designed oscillator

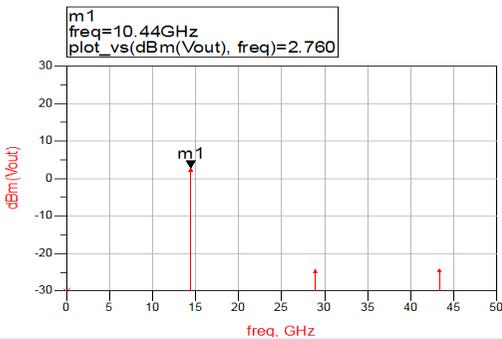


그림 16. 대신호 발진 시뮬레이션 결과  
Fig. 16 Oscillation result for large signal

#### IV. 발진기 제작 및 측정

트랜지스터의 동작점은  $I_D$ 는 40mA,  $V_{DS}$ 는 3.0V,

$V_{GS}$ 는 -1.0V가 되도록 회로를 설계하였고 바이어스 방법은 자기 바이어스 방법을 이용하여 설계하였다. 그림 17은 발진기의 최적화된 값을 고려하여 제작된 발진기를 나타내었다.

그림 18은 제작된 발진기의 측정된 결과를 나타낸 그림이다. 발진기의 스펙트럼 특성은 스펙트럼 분석기를 사용하였고 제작된 발진기의 발진 주파수는 9.054 GHz이고 출력은 2.47 dBm이다.

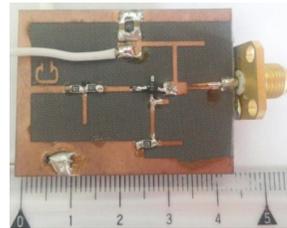


그림 17 제작된 X-band용 발진기 사진  
Fig. 17 Photo of designed X-band oscillator

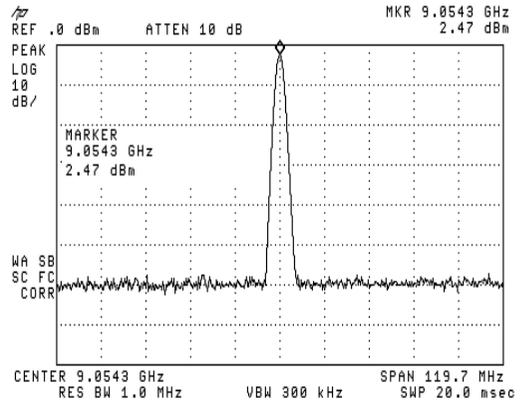


그림 18. 제작된 발진기 측정결과  
Fig. 18 Experiment result of designed oscillator

#### V. 결론

본 논문에서는 2개의 결합선로를 이용하여 기존의 헤이핀 공진기보다 약 40% 작은 크기의 공진기를 설계하였다. 또한 발진기의 설계방법은 반사계수를 이용한 설계방법을 기초로 하여 GaAs MESFET와 Source단에서 들여다본 임피던스의 실수부가 음의 값을

가지게 하고 이때 부가적으로 발생된 리액턴스를 상쇄하게 하는 방법을 이용하여 설계하였다. 그 결과 기존의 발진기 설계 방법에 비해 위상잡음 특성이 좋아지고 유전체 공진기에 비해 MMIC 설계가 편리하다는 것을 알 수 있었다. 제작된 새로운 헤어핀 공진 발진기의 측정결과는 발진주파수 9.054 GHz에서 2.47 dBm이 측정되었다. 본 논문의 발진기는 X-대역 레이더의 수신부의 국부 발진기로 사용될 수 있다.

## References

- [1] D. B. Leeson, "A simple model of feedback oscillator noise spectrum," *Proc. IEEE*, vol. 54, issue 2, Feb. 1966, pp. 329-330.
- [2] A. Hajimiri and T. Lee, "A general theory of phase noise in electrical oscillator," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 2, Feb. 1998, pp. 179-194.
- [3] T. Lee and A. Hajimiri, "Oscillator phase noise: A tutorial," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol. 35, no. 3, Mar. 2000, pp. 326-336.
- [4] P. G. Wilson and R. D. Carver, "An easy-to use FET DRO design procedure suited to most CAD programs," *IEEE MTT-S Dig.*, Long Beach, CA, vol. 3, June 1989, pp. 1033-1036.
- [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, Dec. 1989, pp. 1991-1997.
- [6] C. Hwang, J. Lee, J. Kim, N. Myung, and J. Song, "Simple K-band MMIC VCO utilizing 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, June 2003, pp. 229-231.
- [7] D. Baek, "8-GHz CMOS quadrature VCO using transformer-based Lc tank," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 13, no. 10, 2003, pp. 446-448.
- [8] V. S. Kaper, "High-power monolithic AlGaIn/GaN HEMT oscillator," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol. 38, no. 9, 2003, pp. 1457-1467.
- [9] C. Lee, "A low phase noise X-band MMIC GaAs MESFET VCO," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 10, no. 8, 2000, pp. 325-327.
- [10] G. Kim, J. Yoon, and Y. Lee, *RF Circuit Design*. Seoul: Chung mun gak, 2010, pp. 593 - 681.
- [11] K. Yeom. *Active Microwave Design theory and introduction*. Seoul: Hongriling publishing company, 2008, pp. 396-499.
- [12] Y. Yoon, *RF active circuit design theory and practical*. Seoul: Hongriling publishing company, 2005, pp. 74-95.
- [13] K. Kim and H. Seo, "The System Performance Analysis and Implementation of Digital Communication Satellite," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 4, Apr. 2014, pp. 439-445.

## 저자 소개



### 김기래(Gi-Rae Kim)

1986년 서강대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1988년 서강대학교대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1998년 경남대학교대학원 전자공학과(공학박사)

1988년~1993년 삼성전자(주) 정보통신연구소

1993~1999 마산대학교 정보통신공학과 교수

1999년~현재 신라대학교 공과대학 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 초고주파 회로 설계, MMIC, 전파 해석 및 모델링