

소형 Hairpin 공진기를 이용한 K 대역 Push-Push형 발진기

正會員 주 한 기*

The K-Band Push-push type Miniaturized Hairpin Resonator Oscillator

Han Kee Joo* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 K대역 국간(Point-to-point) 통신용 Push-Push형 발진기를 소형 Hairpin공진기를 사용하여 설계, 제작하였다. 소형 Hairpin공진기는 이론적인 해석 및 MPIE(Mixed Potential Integral Equation)방법을 이용하여 해석하였다. 이 해석된 결과를 사용하여 전송 모드로 마이크로스트립 라인과 결합된 소형 Hairpin공진기를 설계하였다.

발진기의 기본주파수를 억제하기 위하여 비선형 해석을 이용하여 최적의 출력 정합 조건을 구하여 제작하였다. 이와 같이 설계, 제작된 발진기는 22.8GHz에서 출력 전력은 -2.28dBm , 기본 주파수 및 3차 고조파 억제는 -19dBc , -24dBc 의 특성 및 0.33%의 효율을 나타내었다. 이 결과는 이론 및 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, The designed and fabrication of a K-band push-push oscillator using miniaturized hairpin resonator have been presented. One experimental oscillator has been designed and fabricated for K-band point-to-point operation. The miniaturized hairpin resonator has been analyzed theoretically and simulated by MPIE(Mixed Potential Integral Equation) method. With this results, the analysis of hairpin resonator which coupled microstrip lines has been carried out with transmission-mode using this results.

An optimized output matching network for the suppression of the fundamental and the 3rd order harmonic was acquired by using a nonlinear analysis method. The fabricated oscillator shows the output power of -2.28dBm , the fundamental frequency suppression of -19dBc , the 3rd order harmonic suppression of -24dBc and 0.33 percent efficiency at 22.8GHz. The experimental outputs are in good agreement with the theoretical and simulated results.

*전자통신 연구원 전파응용 연구실 연구원
論文番號:96309-0930
接受日字:1996年 9月 30日

I. 서 론

K대역은 고정 및 이동통신 주파수대역으로 그 용도가 다양하고 외국의 경우 국간(Point to point) 근거리 중계용이나 단거리 무선 전송용으로 활발히 개발되어 운용되고 있는 주파수 대이다.

20GHz대역에서의 공진기는 일반적으로 유전체 공진기, 공동공진기 등이 사용되고 있다. 이러한 공진기는 일반적으로 Q값이 높은 반면에 공간적인 구조를 가지므로 MIC, MMIC에 내장이 어렵기 때문에 일반적으로 마이크로스트립 라인을 사용한 공진기를 사용하거나, MMIC외부에 공진기를 설치하여 사용된다. 이로 인하여 발진기 자체의 크기가 커지며, 공진기와 선로의 정확한 결합 구조의 구현 및 회로의 정확한 구현이 어렵다. 이러한 문제점으로 2차원 구조의 Hairpin공진기를 사용하거나, Push-push 발진기의 설계 기술이 이용되고 있다. 이 발진기는 높은 출력 전력 및 낮은 위상 잡음으로 인하여 많은 시스템에 사용되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 발진기의 공진부를 MIC, MMIC에 내장이 용이한 평면 구조[1]를 가진 Hairpin 공진기를 사용하여 K 대역 발진기를 설계하였다.

설계에 있어서 마이크로파 대에서 사용하는 초고주파용 회로설 계를 위한 소프트웨어들은 일반적으로 10GHz이하에서는 해당 라이브러리들이 비교적 잘 맞지만 그 이상의 주파수에서는 오차가 점차 커져서 20GHz이상의 주파수에서는 이용이 곤란한 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 Libra를 이용하여 필요로 하는 Hairpin공진기 특성을 최적화 하여 회로의 대략적인 구조를 결정한 후에 이를 MPIE(Mixed Potential Integral Equation)틀을 이용하여 해석 하였다. 이 결과를 이용하여 전체 회로를 분석하였다. 그리고 수정이 필요한 해당 부분의 구조를 경험적으로 수정하여 수치해석용 소프트웨어를 이용하여 다시 분석하고 그 결과들을 전체 회로에 대입하여 시뮬레이션 결과와 근접한 특성을 갖도록 제작하였다.

II. Hairpin 공진기

2차원 구조의 Hairpin공진기는 MMIC, MIC에 적합하므로 본 논문에서는 소형화된 Hairpin공진기를

사용하였다. 먼저 Hairpin공진기의 공진 조건을 구하여 보면 다음과 같다.

Hairpin공진기의 공진 조건은 ABCD행렬을 이용하여 구할 수 있다. 그림 1의 총 ABCD행렬은 그림 2의 행렬을 이용하여 해석할 수 있다.[1]

Z_S single line의 특성 임피던스
 θ_S single line의 전기적 길이
 $Z_{PE}, Z_{PO}, \theta_{PE}, \theta_{PO}$ 병렬 결합 선로의 우수, 기수 모드의 특성 임피던스 및 전기적 길이

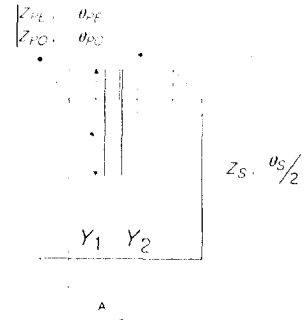


그림 1. 소형 Hairpin 공진기의 전기적 파라미터
 Fig. 1 Electrical parameters of miniaturized Hairpin Resonator.

위와 같은 파라미터를 사용하여 끝이 개방된 병렬 결합 선로와 전송 선로의 ABCD파라미터는 그림 2와 같다.

$$\begin{matrix}
 \theta_{PE} \\
 \theta_{PO}
 \end{matrix}
 \begin{bmatrix}
 \frac{Z_{PE} \cot \theta_{PE} + Z_{PO} \cot \theta_{PO}}{Z_{PE} \cot \theta_{PE} - Z_{PO} \cot \theta_{PO}} & i \frac{Z_{PE} Z_{PO} \cot \theta_{PE} \cot \theta_{PO}}{Z_{PE} \cot \theta_{PE} - Z_{PO} \cot \theta_{PO}} \\
 \frac{2}{Z_{PE} \cot \theta_{PE} + Z_{PO} \cot \theta_{PO}} & \frac{Z_{PE} \cot \theta_{PE} + Z_{PO} \cot \theta_{PO}}{Z_{PE} \cot \theta_{PE} - Z_{PO} \cot \theta_{PO}}
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 Z_{PE} \\
 Z_{PO}
 \end{matrix}$$

$$Z_S \begin{matrix} \theta_S \\ \theta_S \end{matrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta_S}{2} & i Z_S \sin \frac{\theta_S}{2} \\ i \frac{\sin \frac{\theta_S}{2}}{Z_S} & \cos \frac{\theta_S}{2} \end{bmatrix}$$

그림 2. 병렬 결합 선로 및 전송 선로의 ABCD파라미터
 Fig. 2 ABCD parameters of parallel coupled line with open end and transmission line.

ABCD 파라미터에서 공진 조건은 $C=0$ 또는 $A = \pm 1$ 이 되어야 한다. Hairpin 공진기의 구조는 좌우 대칭 구조이므로 A점에서 공진 조건 $Y_1 + Y_2 = 0$ 을 만족하여 한다. 이 식을 이용하여 공진 주파수를 계산하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$(Z_{PE}Z_{PO} \cot \theta_{PE} \cot \theta_{PO} - Z_S^2) \sin \theta_S + Z_S(Z_{PE} \cot \theta_{PE} + Z_{PO} \cot \theta_{PO}) \cos \theta_S - Z_S(Z_{PE} \cot \theta_{PE} - Z_{PO} \cot \theta_{PO}) = 0 \quad (1)$$

이 되며, $\theta_{PE} = \theta_{PO} = \theta_P$ 일 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(Z_{PE}Z_{PE} \cot \theta_P - Z_S^2 \tan \theta_P) \sin \theta_S + Z_S(Z_{PE} + Z_{PO}) \cos \theta_S - Z_S(Z_{PE} - Z_{PO}) = 0 \quad (2)$$

이 된다.

따라서 Hairpin 공진기의 설계는 공진 기본 주파수에서 $Z_S, \theta_P, Z_{PE}, Z_{PO}$ 를 정하면 θ_S 를 구할 수 있다.

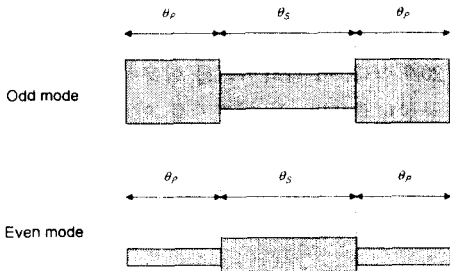


그림 3 공진 점에서의 등가 회로
Fig. 3 Equivalent circuits at resonance points.

공진 주파수에서 병렬 결합 선로(open ended)의 우수, 기수 모드에 대하여 생각하여 보면, 공진 점에서 동시에 기수, 우수모드가 존재하게 된다. 등가 회로는 그림 3과 같이 된다. 이때의 SIR(Stepped impedance resonators)의 공진 조건은 다음과 같다.

$$\text{우수 모드: } \tan \left(\frac{\theta_S}{2} \right) \tan \theta_P = K_O = \frac{Z_{PO}}{Z_S} \quad (3)$$

$$\text{기수 모드: } \tan \left(\frac{\theta_S}{2} \right) \tan \theta_E = K_E = \frac{Z_{PE}}{Z_S} \quad (4)$$

따라서 기본 공진은 기수 모드에서, 다음 공진 주파수는 우수 모드에서 일어난다. 마이크로스트립 선로와 결합된 공진기를 구성할 경우 등가 모델은 그림 4와 같은 공진기와 J인버터로 등가화 할 수 있다.

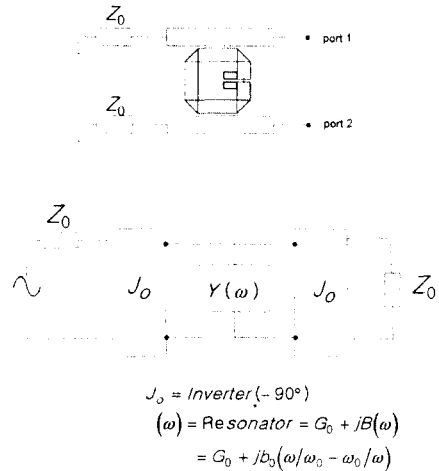


그림 4 Hairpin 결합기의 등가 회로
Fig. 4 Equivalent circuit of a hairpin coupler.

그림 4에서 G_0 공진기의 컨덕턴스, b_0 공진기의 슬롯 파라미터, ω_0 공진 각주파수를 나타낸다. 그림 4와 같이 J인버터에 의하여 -180 의 위상차가 발생한다.[2] 이때의 삽입손실을 ABCD 행렬을 이용하여 계산하면,

$$L(f) = \frac{1}{4} \left\{ \left(2 + \frac{Q_e}{Q_0} \right)^2 + Q_e^2 (f/f_0 - f_0/f)^2 \right\} \quad (5)$$

여기에서 $Q_e = b_0/Z_0 J_0^2$, $Q_0 = b_0/G_0$ 이다.

식(5)의 삽입손실 계산식으로부터 공진주파수 f_0 및 삽입손실보다 -3dB 점의 주파수 $(f)_{3\text{dB}}$ 에서의 삽입손실은

$$L(f_0) = L_0 = 1 + \frac{Q_e}{Q_0} + \frac{1}{4} \left(\frac{Q_e}{Q_0} \right)^2 \quad (6)$$

$$L(f)_{3\text{dB}} = 2L_0 = 1 + \frac{Q_e}{Q_0} + \frac{1}{4} \left(\frac{Q_e}{Q_0} \right)^2 + \frac{1}{4} Q_e^2 \cdot \Omega_1^2 \quad (7)$$

와 같이 표현된다. 여기에서 $\Omega_1 = \left| \frac{f_{3dB}}{f_0} - \frac{f_0}{f_{3dB}} \right|$ 이다.

여기에서 무부하Q 및 외부Q는 다음과 같이 주파수 및 삽입손실로 표현된다.

$$Q_e = \frac{2}{\Omega_1} \sqrt{L_0} \quad Q_0 = \frac{\sqrt{L_0}}{\Omega_1(\sqrt{L_0}-1)} \quad (8)$$

따라서 구현된 SRR 결합기의 삽입손실을 측정하여 Q_e 및 Q_0 를 구할 수 있으며 또한 양쪽이 부하로 단락된 공진기의 부하 Q[3] 및 결합계수 k 는

$$Q_L = \frac{f_0}{(\Delta f)_{3dB}} \quad (9)$$

$$k = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_0}{Q_L} - 1 \right) \quad (10)$$

를 이용하여 구할 수 있다.

III. Hairpin 공진기를 사용한 Push-Push형 발진기

일반적인 Push-push형 발진기[4]의 블록 선도는 그림 5와 같다. 여기에서는 단일 발진기 설계하는 방법과는 다른 그림 5와 같이 공진 결합기와 FET가 연결된 전체적인 발진기의 회로를 이용하여 발진 조건을 구한다.

그림 5와 같이 두 FET가 결합기에 연결되어 있으므로 Hairpin 결합기와 FET(feedback포함)를 단순한 2-단자 회로로 볼 수 있다. 이때의 소신호 발진조건(발진 주파수 f_0)은 다음과 같다.

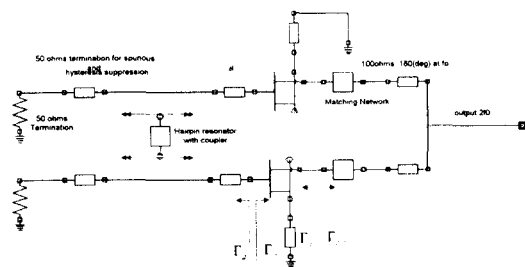


그림 5. Push-push hairpin 발진기의 블록 선도
Fig. 5 Block diagram of the Push-push Hairpin Oscillator.

$$\begin{aligned} K < 1 \\ \Gamma_g \cdot \Gamma_{in} > 1 \\ \angle \Gamma_g \cdot \Gamma_{in} = 0 \\ \Gamma_d \cdot \Gamma_{out} > 1 \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 K 는 능동 소자의 안정 계수
 Γ_g = 공진부의 반사 계수
 Γ_{in} = gate단의 입력 반사 계수
 Γ_d = drain단의 출력 반사 계수
 Γ_{out} = 부하 반사 계수

이상과 같은 발진 조건을 만족할 경우에 발진 주파수 (f_0)에서 발진이 시작된다. FET의 출력은 위상이 반전되어 발진하며, 이 발진 된 출력은 100Ω, 180°선로를 T결선에 의하여 결합되어 $2f_0$ 를 출력시킨다.

IV. Push-push 발진기의 설계 및 제작

1. Hairpin공진기의 설계

식(2)를 이용하여 공진 주파수 11.5GHz로 하여 공진기를 TMM3($\epsilon_r = 3.27, t = 20\text{mil}$)기판에 설계하였다. 설계한 파라미터는 다음과 같다.

$Z_S = 74.8\Omega, \theta_P = 20.4^\circ, Z_{PE} = 142.4\Omega, Z_{PO} = 42.7\Omega, \theta_P = 120.9^\circ$ 이다. 이 파라미터를 이용하여 Hairpin공진기를 구성하였으며, 이 공진기를 이용하여 결합기를 설계하였다. 설계는 Libra 6.0을 사용하여 대략적인 설계를 하였다. 이 설계된 Hairpin공진 결합기는 다시 MPIE시뮬레이터(Ensemble4.02)를 이용하여 공진 주

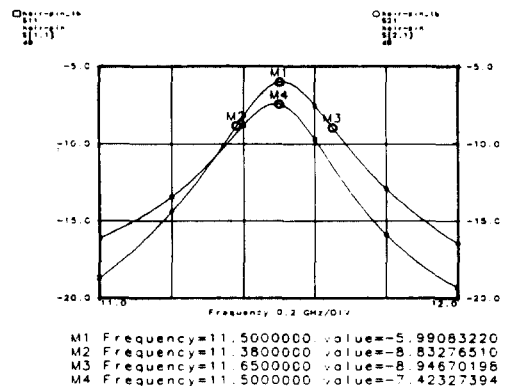


그림 6. Hairpin 결합기의 주파수 응답 특성.
Fig. 6 Frequency response of the hairpin coupler.

파수를 조정하였다. 또한 Push-push형 발진기에 사용 가능한 위상반전, 대역 통과 및 저지 특성을 가질 수 있도록 설계하였으며, 공진기와 결합선로사이의 간격은 2mil로 하였으며, 충분한 결합이 일어나도록 180°의 결합선로를 사용하였다. 스푸리어스 및 히스테리시스를 억제하기 위하여 전송 선로의 끝단에 50Ω으로 단락 처리하였다. 이 구성된 결합기의 특성은 그림 6과 같이 $Q_e \approx 141.174$, $Q_0 \approx 171.437$, $Q_L \approx 42.6$ 이므로 결합계수 $k = 6.05$ 로 계산되었다.

2. Push-push형 발진기의 설계

23GHz에서 출력 전력 -2.5dBm이상, 기본 주파수 억제 -19dBc이상을 갖는 발진기를 설계하였다. 능동 소자는 ATF26884를 사용하였다. 기본 발진 주파수는 11.5GHz, 2차 고조파에서 최대의 전력을 출력하기 위하여 먼저, 능동 소자의 바이어스 점을 최적화 하였다. 그림 5와 구조에서 능동 소자의 안정화 계수 및 부성 저항을 얻기 위하여 단락 스테브를 FET소스 단에 연결하였다. 11.5GHz에서 발진 조건을 만족시키기 위하여 게이트 단과 Hairpin공진 결합기 사이의 선로 길이(θ_1)을 최적화하여 식(5)을 만족하며, 최대의 출력 반사 계수를 갖도록 설계하였다.

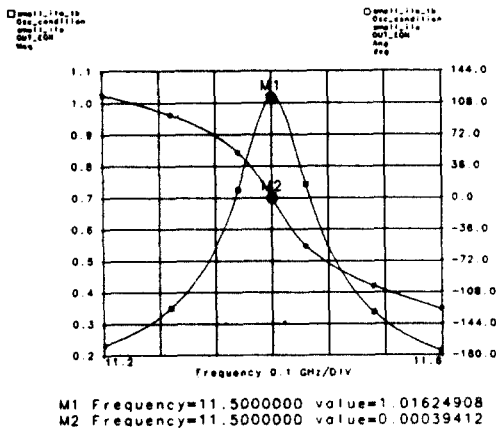


그림 7. 설계된 발진기의 발진 조건
Fig. 7 Simulated oscillation condition of the designed oscillator.

설계된 발진기의 출력 임피던스는 2차 고조파에서 최대의 출력 전력을 얻기 위하여 출력 정합 회로에 따른 출력 임피던스의 비를 비선형 모의 실험을 통하

여 구하였다. 이때의 출력 정합 회로 임피던스의 비는 $Z_{out} = -\frac{R_d}{3} - jX_d$ 이며, 최대의 2차 고조파 출력을 갖는다. 출력 정합 회로의 구성은 개방 스테브와 직렬 선로를 이용하여 구성하였다. 연결된 출력 정합 회로의 종단은 180°, 100Ω 선로를 사용하여 T결선하였다. 설계된 발진기 비선형 모의 실험 결과를 그림 8과 9에 나타내었다.

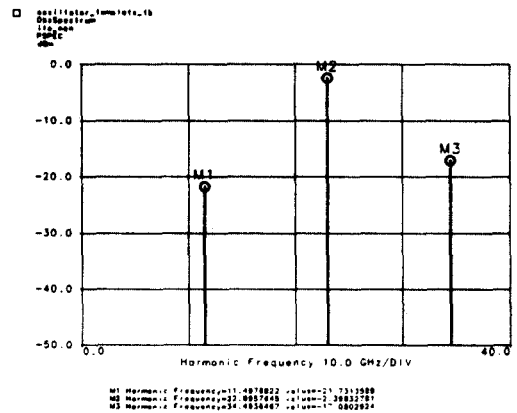


그림 8. 설계된 발진기의 발진 전력
Fig. 8 Simulated oscillating power of the designed oscillator.

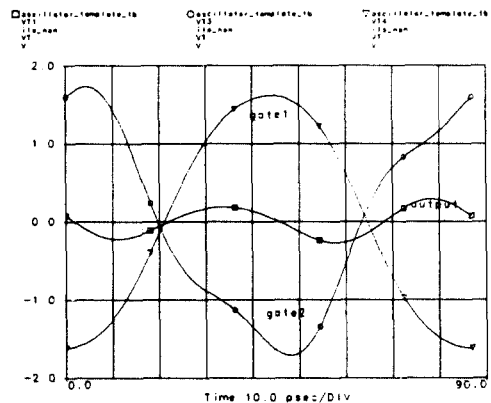


그림 9. 설계된 발진기의 전압 파형
Fig. 9 Simulated oscillating voltage waveform at gate1, gate2 and output terminal.

V. 실험 및 결과

위에서 설계된 발진기를 TMM3기판에 직접 인쇄(direct writing) 방식을 이용하여 제작하였다. 50 단락 저항은 KDI제품을 사용하였으며, DC차단 커패시터는 Alpha의 Beam lead 커패시터를 사용하였다. Via Hole의 직경은 20mil로 하여 제작하였다. 제작된 발진기의 특성을 측정하기 위하여 HP8564E스펙트럼 분석기를 사용하였다.

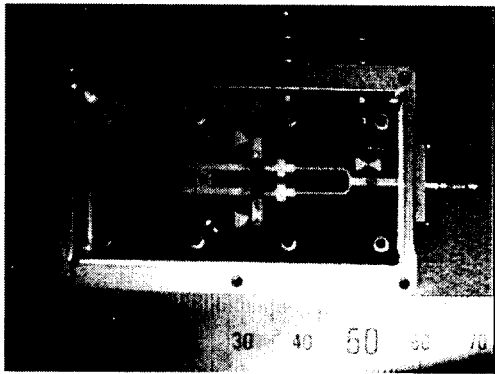


그림 10. Prototype Hairpin Oscillator의 사진(단위: mm)
Fig. 10 Photograph of the prototype oscillator.(unit: mm)

그림 11과 12는 제작된 발진기의 고조파 특성 및 Span이 100MHz인 때의 측정 스펙트럼이다.

드레인 전압 2.5V, 드레인 전류 60mA, 상온의 측정 조건에서 발진 특성은 기본 발진 주파수에서 11.36

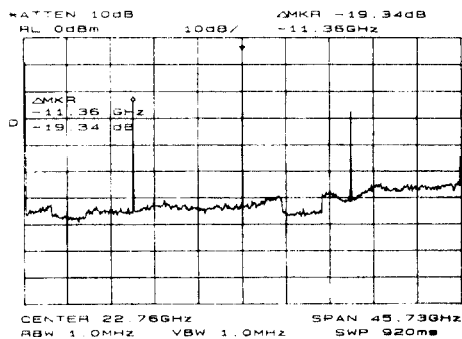


그림 11. Prototype Oscillator의 고조파 특성
Fig. 11 Harmonic characteristics of the prototype oscillator.

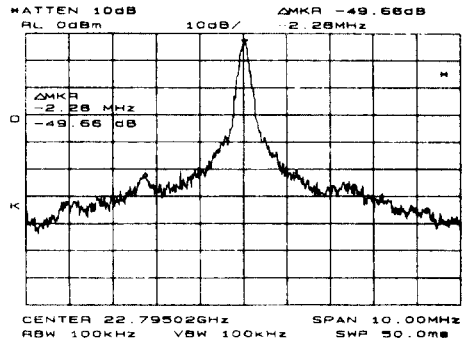


그림 12. Prototype Oscillator의 스펙트럼.(Span:100MHz)
Fig. 12 Spectrum of the prototype oscillator.(span: 100MHz)

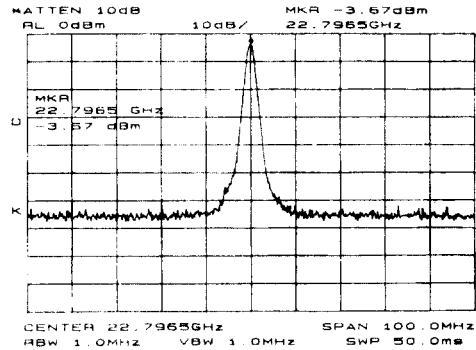


그림 13. Prototype Oscillator의 스퓨리우스 특성.(span: 10MHz)
Fig. 13 Spurious characteristics of the prototype Oscillator. (span: 10MHz)

표 1. 제작된 Oscillator의 특성.

Table 1. Characteristics of the prototype oscillator.

Oscillation Frequency	22.8GHz
Output power level(2nd Harmonic)	-2.28dBm
1st Harmonic suppression	-19dBc
3rd Harmonic suppression	-24dBc
Power supply voltage	2.5V
Current consumption	60mA
Efficiency(%)	0.33%
Dimension(inch)	1×2×0.4

GHz, -23dBm , 2차 고조파는 -2.28dBm 측정되었다. 여기에서 기본 주파수 억압 특성은 약 -19dBc 이며, 3차 고조파 억압은 약 -24dBc , 3차 고조파는 약 -24dBc 로 측정되었다. 따라서 비선형 설계의 예측 주파수 및 전력을 나타낸 그림 7의 결과와 유사함을 알 수 있다. 제작된 발진기의 스퓨리어스 특성은 -49dBc (Span: 10MHz, RW: 100kHz)이었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 발진기의 공진부를 MIC, MMIC에 내장이 용이한 평면 구조를 가진 Hairpin 공진기를 설계하여 K대역 Push-Push형 발진기를 설계하였다.

설계는 초고주파회로 시뮬레이터를 이용하여 필요한 Hairpin 공진기 특성을 대략적으로 결정한 후에 이를 MPIE (Mixed Potential Integral Equation) 툴을 이용하여 해석하였다. 이 결과를 이용하여 위상 반전 배열을 가진 마이크로스트립 라인과 결합된 Hairpin 공진기를 해석하였으며, 이를 이용하여 전체 회로를 분석하였다. 또한 발진기의 기본 주파수 및 3차 고조파를 억제하며 2차 고조파의 출력을 최대로 하는 출력 정합 조건을 비선형 해석하여 최적화 하였다.

이와 같이 설계, 제작된 발진기의 측정된 발진 주파수 22.8GHz에서 출력 전력은 -2.28dBm 기본 주파수 및 3차 고조파 억제는 -19dBc , -24dBc 의 특성을 얻었으며, 시뮬레이션 결과와 유사함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. M. Sagawa, K. Takahashi, and M. Makimoto, "Miniaturized Hairpin Resonator Filters and Their Application to Receiver Front-End MICs", *IEEE Trans. Microwave Theory-Tech.*, vol. MTT-37, no. 12, pp. 1991-1997, Dec. 1989
2. Anthony M. Pavio and Mark A. Smith "A 20-40 GHz Push-Push Dielectric Oscillator" *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-33 no. 12, pp. 1346-1349, Dec. 1985.
3. G. Mattaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. New York: McGraw-Hill,

1964 Sec. 11. 03

4. Aberlardo Podcameni, and Luiz Fernando Martins Conrado "Design of Microwave Oscillator and filters Using Transmission-Mode Dielectric Resonators Coupled to Microstrip Lines" *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-33, no. 12, pp. 1329-1332, Dec. 1985.



周 漢 基 (Han Kee Joo) 정희원
 1993년: 충남대학교 전자공학과 (학사)
 1995년: 충남대학교 대학원 전자공학과(석사)
 1995년~현재: 전자통신 연구원
 전파응용 연구실
 연구원