

# GaAs MESFET를 이용한 超高周波 自體發振 혼합기에 관한 研究

## (A Study on Microwave Self Oscillating Mixer Using GaAs MESFET)

權 東 昇\*, 蔡 宗 錫\*\*, 朴 漢 奎\*

(Dong Seung Kwon, Jong Seok Chae and Han Kyu Park)

### 要 約

본 논문에서는 소신호 산란계수와 직렬 제한회로에 의해 자체발진 혼합기(Self Oscillating Mixer)를 설계하였으며, 종래의 입출력 정합을 기계적 튜닝방법에서 벗어나 이중 스티브와 여분의 정합 스티브로 실현하였다.

자체발진 혼합기는 외부 발진기와 중간주파수 증폭기가 필요없이 자체 발진 및 증폭을 하므로 경제적 이점과 시스템의 단순화를 이룰 수 있다.

실험결과, RF 및 IF 중심주파수 4GHz, 1.1GHz에서 최대 변환이득 1.5dB와 잡음지수 6.5dB를 얻었고, 발진 주파수 5.1GHz에서 출력 4dBm, 효율 13.4%, 안정도  $-10\text{MHz/V}$ 와  $-0.15\text{MHz/}^\circ\text{C}$ 의 발진기 특성을 얻었다. 보다 나은 발진주파수의 안정과 출력을 얻기 위해서는 유전체 공진기 및 대신호 산란계수에 의한 설계가 연구되어야 한다. 입력단의 대역통과 여파기와 출력단의 저역통과 여파기는 각각  $-40\text{dB}$ 와  $-30\text{dB}$ 의 손실특성으로 발진출력과 RF전력을 충분히 억제하였다.

### Abstract

In this paper, self-oscillating mixer is designed by small signal S-parameter and series feedback circuit. The input-output matching circuit is accomplished from double stub and additional matching stub. The self-oscillating mixer is oscillating itself and amplifies without any external local oscillator and an intermediate frequency amplifier, so it has advantages in its economical and system simplification. The experimental results show the maximum conversion gain 1.5dB and the noise figure 6.5dB at RF center frequency 4GHz and IF 1.1GHz ; output oscillating power 4dBm, efficiency 13.4%, stability  $-10\text{MHz/V}$  and  $-0.5\text{MHz/}^\circ\text{C}$  at oscillating frequency 5.1GHz. The rejection band loss characteristics in band pass filter and low pass filter are  $-40\text{dB}$  and  $-30\text{dB}$ , respectively.

### I. 序 論

최근 마이크로파 통신장비의 소형화와 성능이 우수한 능동장치의 개발추세에 있어서 GaAs MESFET는 고주파에서 큰 이득과 높은 효율, 저잡음 특성의 소자로서 주목되어 왔다.

GaAs MESFET는 소오스-게이트간에 Schottky 장

\*正會員, 延世大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

\*\*電子通信研究所 電波技術 開發室  
(Radio Propagation Studies Section, ETRI)  
接受日字: 1986年 11月 11日

벽에서 비선형 특성을 가지므로 이를 이용하여 주파수를 변환시킬 수 있고, 신호주파수와 다른 주파수에서 발진기를 설계하여 국부발진기를 대신하고 변환된 주파수에서 증폭기를 설계하여 중간주파수 증폭기를 제거할 수 있으므로 경제성 및 시스템 단순화를 가져온다. 1979년 Yusuke Jajima<sup>1)</sup>는 500MHz IF에서 변환이득 3dB, 잡음지수 7.5dB를 얻었다.

본 논문에서는 NEC 353GaAs MESFET를 사용하여 중심 주파수 4GHz에서 자체발진 혼합기를 비유전율이 4.8~5.2이고, 두께가 0.73mm인 Epoxy fiber glass 위에 설계하였고, 입출력 정합스터브를 기계적으로 튜닝하던 종래의 방법에서 벗어나 산란계수로 설계하였다.

국부 발진주파수에서 안정도를 작게 하고, RF 및 IF 주파수에서 안정도를 크게 하도록 직렬 케환회로를 이용하였고, 발진기의 입력단과 출력단을 설계한 후 동시에 입력단에서 신호주파수에서의 저잡음 정합스터브와 영상주파수 스텐브를 출력단에서 IF 정합스터브와 RF 단락스터브를 이중스터브 및 여분의 정합스터브로 실현하였다. 그리고, 입력단에 대역통과 여파기를, 출력단에 저역통과 여파기를 사용하였다.

### II. GaAs MESFET의 혼합효과

GaAs MESFET의 비선형성은 게이트-소오스간의 Schottky장벽에 의한  $I_G - V_{GS}$  비선형성과 Pinch-off 효과에 의한  $I_D - V_{DS}$  비선형성이 있으나, 여기서는  $I_G - V_{GS}$ 의 비선형성만을 고려한다.

GaAs MESFET의 혼합기는 그림 1의 게이트-소오스간에 큰 국부발진전력( $\omega_{LO}$ )이 가해졌을때, 트랜스 컨덕턴스  $g_m$ 값이  $\omega_{LO}$ 에 의해 변조되고, 시변 전압증폭인  $\mu(t)$ 는  $\mu(t) \approx \bar{R}_d g_m(t)$ 로 쓸 수 있으며, 입력소신호( $\omega_{RF}$ )에 의한 전압  $V_C(t)$ 와의 곱은 측대역 주파수 성분  $|n\omega_{LO} \pm \omega_{RF}|$ 를 가지며, 이 중에서 중요한 주파수 성분은 중간주파수  $\omega_{IF} = |\omega_{LO} - \omega_{RF}|$ 이며, 영상주파수는  $|\omega_{LO} + \omega_{RF}| = 2\omega_{IF}$ 이다. 변환이득은 게이트 바이어스와 국부전력의 함수이며, 가장 큰 증속변수는  $g_1$  ( $g_m$ 의 푸리에 급수 성분) 값이어서, 이는 Pinch-off 바이어스에서 최대이며, 가능한 큰 국부발진 전력에 의해 변환이득이 증대된다.

### III. 증폭기 및 발진기 설계이론

#### 1. 안정도와 이득 및 잡음지수

4 단자 회로망에서 발진은 입력, 혹은 출력단자가 부정저항, 즉,  $|S'_{11}| > 1$ , 혹은  $|S'_{22}| > 1$ 일때 나타나지만, 1보다 작을 때는 어떠한 부하로도 안정하게 된

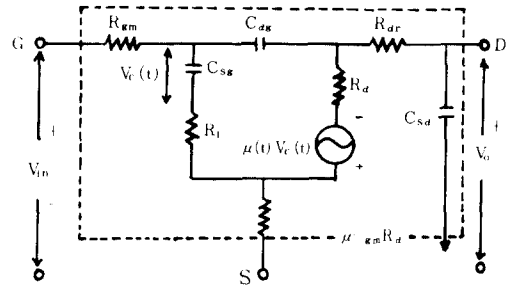


그림 1. GaAs MESFET의 소신호 등가회로  
Fig. 1. Small Signal Equivalent Circuit of GaAs MESFET.

다.<sup>2)</sup> 트랜지스터의 안정도 K는 식 (1)로 표시된다.

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

여기서  $\Delta = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}|$ 이다.

안정도  $K < 1$ 때의 증폭기 설계는 불안정 영역을 피하고 가능한 멀리 떨어진 점에서 원하는 이득을 얻도록 한다. 주어진 산란계수중  $S_{12}$ 값을 거의 무시할 수 있는 경우에는 단방향성 증폭기로 설계할 수 있다. 이때, 동작전력인  $G'_{P,0}$ 는 식 (2), (3)으로 나타낸다.

$$G'_{P,0} = |S_{21}|^2 \frac{1 - |I_S|^2}{|1 - I_S^* S_{11}|^2} \cdot \frac{1 - |I_L|^2}{|1 - S_{22} I_L|^2} \quad (2)$$

$$= G_0 \cdot G_S \cdot G_L \quad (3)$$

$G_0$ 는 디바이스특성에 의한 이득을 나타내며,  $G_S, G_L$ 은 각각 입, 출력단의 이득을 나타내고, 다음의 식 (4)의 조건에서 최대이득을 갖는다.

$$\begin{aligned} I_S &= S_{11}^* \\ I_L &= S_{22}^* \end{aligned} \quad (4)$$

산란계수  $S_{12}$ 값이 매우 작아 단방향으로 가정( $S_{12} \approx 0$ )했을 경우, 그 오차를 나타내는 단방향 지수 U는

$$U = \frac{|S_{12}| \cdot |S_{21}| \cdot |S_{11}| \cdot |S_{22}|}{(1 - |S_{11}|^2) \cdot (1 - |S_{22}|^2)} \quad (5)$$

로 주어지며, 단방향 변경이득  $G_{TU}$ 와 양방향 변성이득  $G_T$ 의 비는,

$$\frac{1}{|1+U|^2} < \frac{G_T}{G_{TU}} < \frac{1}{|1-U|^2} \quad (6)$$

로 주어진다.

#### 2. 발진기 설계

주어진 산란계수로부터 그림 2에서 입력 임피던스  $I_S$ 를 조정하여 출력 임피던스  $Z_{out}$ 의 실수부가 음수이

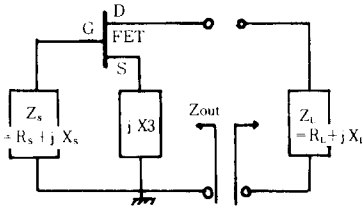


그림 2. 직렬 케환회로 및 발진기회로  
Fig. 2. Series Feedback Element and Oscillator Circuit.

고,  $R_e(Z_{out})$ 의 절대치가 최대로 될 때 회로가 발진하며, 출력이 최대로 발진한다.<sup>15)</sup>

그림 2에서 부하 임피던스의 허수부분  $I_m(Z_L)$ 은 원하는 주파수에서의 공진조건으로부터 직접 구해진다.

$$I_m(Z_L) = -I_m(Z_{out}) \quad (7)$$

그리고,  $R_e(Z_L)$ 은 식(8)에 의해서 구할 수 있다.<sup>14)</sup>

$$R_e(Z_L) = \frac{1}{3} |R_e(Z_{out})| \quad (8)$$

식(8)은  $R_e(Z_{out})$ 이 드레인 발진전류의 증가에 따라 선형적으로 감소할 경우, 발진기로부터 최대출력을 얻을 수 있는 설계조건이다.

#### IV. 자체발진 혼합기

GaAs MESFET의 게이트단자에 신호가 입력되므로서, 직렬케환 소자를 갖는 발진기를 이용한 자체발진 혼합기(Self Oscillating Mixer : S.O. Mixer)가 설계된다. (그림3).

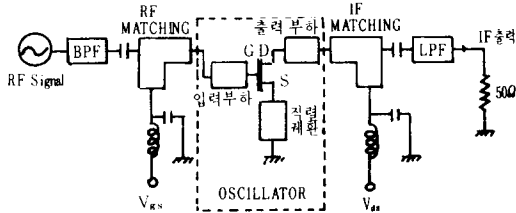


그림 3. 자체발진혼합기의 시스템 개략도  
Fig. 3. The Complete Schematic of the S. O. Mixer.

케환소자를 결정하는데 있어서는 발진주파수에서 발진출력을 최대로 하고, IF 및 RF주파수에서 안정도를 보장하고, 신호의 손실이 작도록 설계한다.

입력신호( $\omega_{RF}$ )가 정합회로를 거쳐 FET에서 증폭되고, FET의 트랜스컨덕턴스가 발진주파수( $\omega_{LO}$ )에서 발진전압에 의해 변조되며, 그림 1의  $\mu(t)V_c(t)$ 의 비선

형성에 의해  $\omega_{IF} = |\omega_{RF} - \omega_{LO}|$ 의 주파수 성분이 드레인 전류가 증폭되어 나타난다. 자체혼합발진기의 난제는 게이트-소오스간의 Schottky 비선형성이 가장 큰 바이어스 조건하에서 충분한 발진출력을 얻는 것이다.

S. O. Mixer의 전체적인 설계과정은 그림 4와 같다.

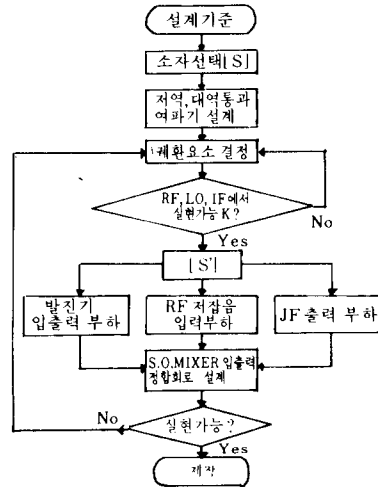


그림 4. S. O. Mixer의 전체설계과정.  
Fig. 4. Overall Design Procedure of the S. O. Mixer.

#### V. 설계 및 제작

##### 1. 저역통과 여파기의 설계

MIC(Microwave Integrated Circuit)에 주로 쓰이는 여러 형태의 저역여파기가 있으나, 비교적 소형이며, 특성이 우수한 High-Z/Low-Z 저역통과여파기<sup>16)</sup>에 대해 언급한다. S. O. Mixer의 출력단에 쓰이는 저역여파기는 RF와  $L_o$ 전력이 출력단에서 억제되고, IF출력이 작은 손실로 통과하기 위해서 비교적 예리한 손실특성( $f_{cut-off} = 2GHz$ ,  $n=7$ ,  $Ripple=0.01dB$ )을 갖도록 설계한다. (그림5)

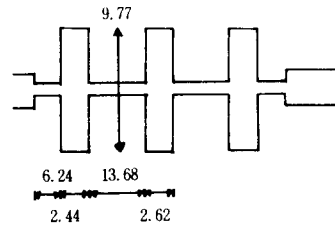


그림 5. 마이크로스트립 저역통과여파기  
Fig. 5. The Low Pass Filter Using the Microstrip Line.

2. 대역통과 여파기의 설계

통과대역에서 삽입손실은 여파기 대역폭과 전송선의 부하 Q와의 함수이다. 대역통과 여파기 중에서 가장 잘 쓰이는 여파기는 소형이며, 양 끝을 개방하여 반파장 공진기를 이용한 Side Coupled Filter이다. 이는 입력단에서 발전기 출력이 신호발생기 혹은 안테나에 반사되는 것을 방지하기 위해 예리한 손실특성( $n = 4$ ,  $BW = 500\text{MHz}$ ,  $Ripple = 0.01\text{dB}$ )을 갖는 여파기를 설계해야 한다. 그림 6은 대역통과 여파기와 이의 설계 설계치를 나타낸다.

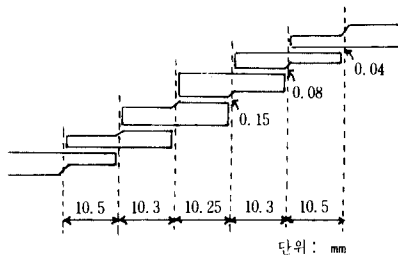


그림 6. 측대역통과여파기의 설계  
Fig. 6. The Design Dimension of the Side Coupled Band Pass Filter.

3. 케환요소 길정 및 발전기 설계

FET에서 직렬케환요소는 안정도를 충분히  $K < 1$  이 되고, 최대출력을 얻을 수 있도록 정해야 한다. 더구나 신호주파수와 중간주파수에서 안정도영역이 증대하도록 케환요소를 설계해야 한다. 사양에 주어진 산란계수는 직렬케환 요소를 포함한 새로운 산란계수를 계산할 수 있으며, 이 산란계수는 케환요소가 변화시켜 위의 조건에 맞는 산란계수를 선택하여 발전기 및 증폭기를 설계하였다. 그 결과, 발전주파수에서 직렬케환요소  $X_3$ 가 50일때, 각 주파수에서 최적 산란계수를 나타냄을 알 수 있으며, 표 1에 나타내었다.

그림 2에서와 같이 직렬케환요소  $X_3$ 가 50일때, 입력 임피던스  $Z_s = 10 + j40$ 에서 출력 임피던스는 최대 부성 저항(설대치)  $Z_{out} = -1.2 - j4.02$ 를 갖는다. 따라서 케환요소  $X_3$ 가 50일때, 발전기의 출력은 최대가 되고, RF주파수와 IF주파수에서 안정도를 동시에 크게 할 수 있었다.

그림 7에 케환요소  $X_3 = 50$ 을 Smith Chart상에 단락스터브로 실현한 것을 나타내었다.

4. 자체발전 혼합기의 이출력 정합회로 설계

S. O. Mixer의 입력단에서 영상주파수 단락스터브와 출력단에서 RF 단락스터브를  $\lambda/4$  개방스터브로 실현

표 1. 직렬케환요소에 따른 산란계수

Table 1. Scattering Parameters for the Series Feedback.

FREQ	X3	K	$\begin{bmatrix} S11' \\ S12' \\ S21' \\ S22' \end{bmatrix}$	Class	단방향 지수 (UF) $GI < UF < GT$
5GHz (LO)	50	0.58	$\begin{bmatrix} 0.59 < -52.4 \\ 0.31 < 140 \\ 1.49 < 16.1 \\ 0.74 < -64.9 \end{bmatrix}$	4.9	$GI = -4.5\text{dB}$ $GT = 9.9\text{dB}$
4GHz (RF)	36	0.71	$\begin{bmatrix} 0.57 < -50.7 \\ 0.18 < 137.2 \\ 1.67 < 5.4 \\ 0.67 < -69.3 \end{bmatrix}$	9.2	$GI = -2.4\text{dB}$ $GT = 3.2\text{dB}$
1GHz (IF)	6.2	0.82	$\begin{bmatrix} 0.92 < -67.1 \\ 0.01 < 90 \\ 1.91 < 121.9 \\ 0.72 < -77.8 \end{bmatrix}$	285	$GI = -2\text{dB}$ $GT = 2.7\text{dB}$

표 2. 각 주파수에서의 파장과  $\lambda/4$  개방스터브의 어드미턴스

Table 2. The Wavelengths at Each Frequency and the Admittance of  $\lambda/4$  Open Stubs.

FREQ	파장 (mm)	$Y_{oc}   l = \lambda_{RF}/4$	$Y_{oc}   l = \lambda_{IM}/4$
RF (4GHz)	39.2	0	$j1.71$
LO (5GHz)	31.2	$-j2.35$	$j3.7$
IF (1GHz)	157	$-j0.41$	
IM (6GHz)	25.9		0

하였다. 표 2는  $\lambda/4$  개방스터브의 각 주파수에서 어드미턴스를 나타낸다.

S. O. Mixer의 입력단 정합은 그림 7과 같이 회로의 튜닝능력을 증대시키기 위해 이중스터브  $l_1, l_2, l_3$ 를 가변시키고,  $l_4$ 를 영상주파수 단락스터브인  $\lambda_{IM}/4$  개방스터브로 실현하였고, 발전기 입력부하 ( $Z_s = 0.2 + j0.8$ )와 RF 저잡음부하 ( $T_s^* = 0.55 \angle -63^\circ$ )를 Smith Chart상의 순서에 따라 정합시켰다.

S. O. Mixer의 출력단 정합은 그림 8과 같이  $l_4$ 를 RF 단락스터브인  $\lambda_{RF}/4$  개방스터브로,  $l_1, l_2, l_3, l_4$ 를 통해 발전기 출력부하 ( $Y_L = 0.4 + j4$ )를 실현하였고,

IF 출력신호 정합 ( $-2\text{dB} < UF < 2.7\text{dB}$ 이므로 단방향으로 가정하여  $\Gamma_L = S_{22}^* = 0.74 \angle 251$ )은 발전기 출력부하에 영향을 미치지 않도록  $\lambda_{LO}/4$  단락스터브의 폭 ( $l_4$ 의 특성임피던스)와  $l_4$  길이로서 앞의 이중스터브로 실현 못한 정합을 마무리 짓는다.

이상의 S. O. Mixer를 증폭기로서 고찰할 때 예상되

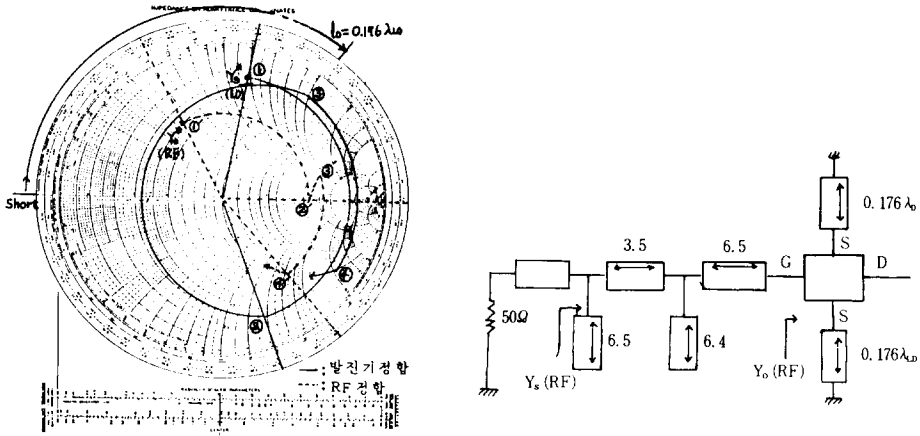


그림 7. S. O. Mixer의 입력단 정합  
Fig. 7. The Input Matching of the S. O. Mixer.

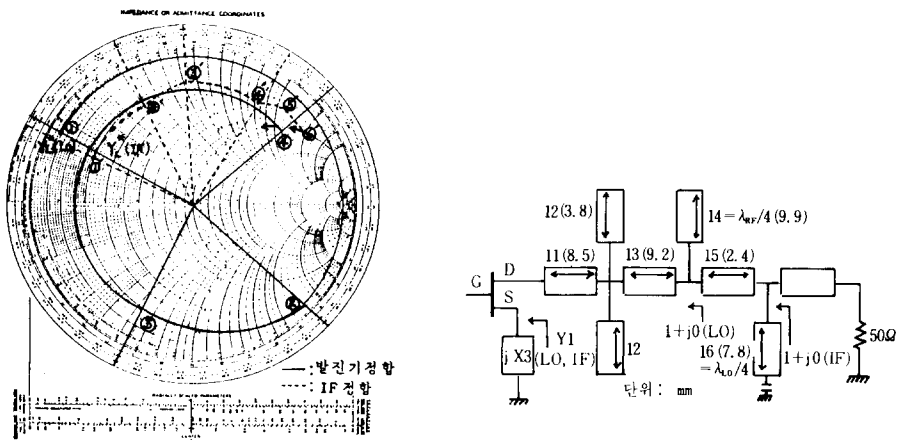


그림 8. S. O. Mixer의 출력단 정합  
Fig. 8. The Output Matching of the S. O. Mixer.

는 총 정합이득  $G_T$ 는

$$G_T = G_s \cdot G_o \cdot G_L \quad (9)$$

이다. 여기서  $G_s$ 는 입력단 저잡음 정합시 이득이 1.2 dB를 갖는다.

$$G_o = |S_{21}|^2 = 8.47 \text{ or } 9.28\text{dB} \quad (\text{IF})$$

$$G_L = \frac{1}{(1 - |S_{22}|^2)} = 2.08 \text{ or } 3.18\text{dB} \quad (\text{IF})$$

따라서,  $G_T$ 는 13.6dB이다. GaAs MESFET의 게이트-소오스간의 Schottky 비선형성에 의한 변환손실은 Schottky-barrier의 높은 직렬저항 때문에 일반적인

Schottky-diode에 비해 변환손실이 큰 점을 감안하여 10dB라 가정하면 3.66dB의 변환이득이 예상된다. 이상의 설계를 토대로 NEC 353 GaAs MESFET를 사용하여 Epoxy fiber glass 위에 photo-etching 방법으로 제작하였다. 그림 9는 전체 시스템 및 바이어스 회로이다.

### VI. 실험 및 결과고찰

S. O. Mixer의 변환이득과 잡음지수는 그림10과 같은 실험장치로 측정하였고, 발진기의 출력 및 발진주파수, 그리고 여파기의 특성은 Spectrum Analyzer

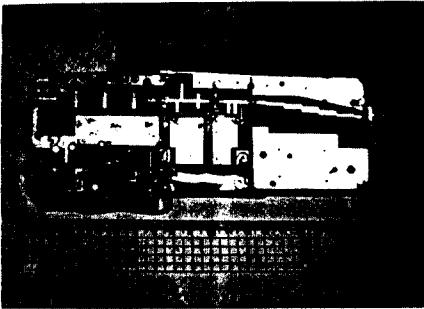


그림 9. 바이어스를 포함한 전체시스템  
 Fig. 9. Overall Layout Including a Bias Circuit.

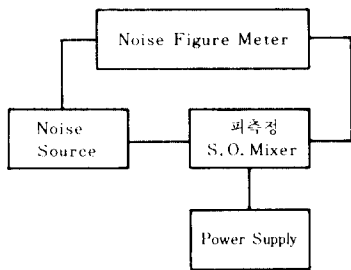


그림10. 실험장치도  
 Fig. 10. A Block Diagram of the Experimental Apparatus.

Power Meter, Frequency Counter로 측정하였다.

그림11에서 보듯이 설계 중심주파수 4 GHz에서 최대 변환이득 1.5dB와 3dB대역폭 250MHz를 얻었고, 잡음지수는 6.5dB로 측정되었다. 이는 예상이득에 비해 2.6dB 작으며, 설계시 단방향성 가정, 농중의 FET 간의 특성차이, 그리고 작은 발진기 출력에서 얻어진다. 그림12에서 4dBm의 발진기 최대출력과 13.4%의 효율 그리고, 그림13에서 -10MHz/V와 -0.15MHz/°C의 발진주파수 안정도를 갖는다. 또한 5GHz 에서 설계된 발진기는 100MHz 이동한 5.1GHz에서 발진하였다. 그림14는 저역 및 대역통과 여파기의 삽입손을 나타내었다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 GaAs MESFET로 직렬케환을 통해 소신호 산란계수를 계산한 후 가변 이중스터브와 여분의 정합스터브를 사용하여 발진기 및 증폭기, 그리고 혼합기를 동시에 실현하여 경제적 이점 및 간단한 시스템을 구성할 수 있었다. 중심주파수 4GHz에서 최대 변환이득 1.5dB와 250MHz의 3dB 대역폭을 얻었고,

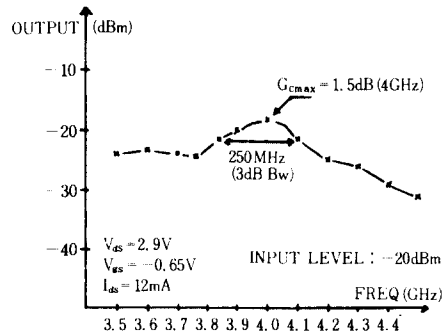


그림11. S. O. Mixer의 변환이득  
 Fig. 11. Conversion Gain of the S. O. Mixer.

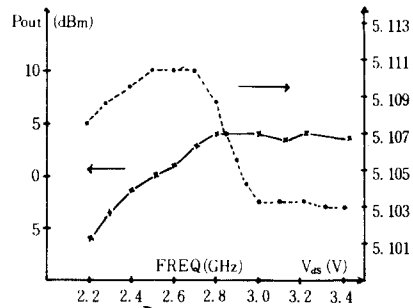


그림12. 드레인-소스 전압에 따른 발진출력 및 주파수 변화  
 Fig. 12. Oscillating Output and Frequency Shifting as a Function of  $V_{DS}$ .

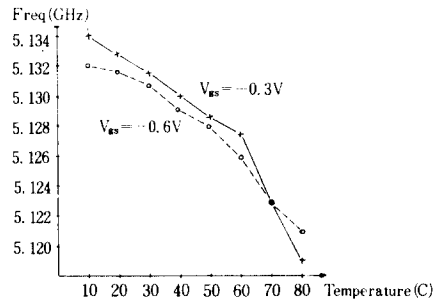


그림13. 온도-발진주파수 안정도  
 Fig. 13. Temperature-Oscillating Frequency Stability.

발진기의 최대출력 4dBm과, 효율 13.4%. 그리고 -10 MHz/V, -0.15MHz/°C의 발진주파수 안정도 및 6.5 dB의 잡음지수를 얻었다. 그러나 유전체 공진기와 대 신호 산란계수에 의한 발진기 설계, 그리고 잡음에 대한 연구가 더욱 요구된다.

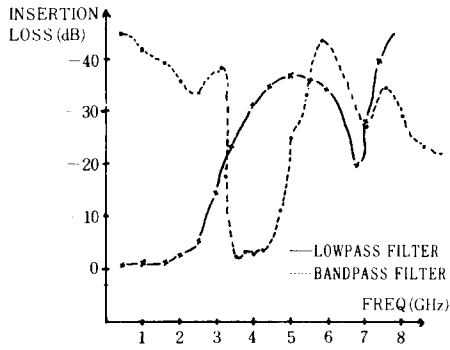


그림14. 지역 및 대역통과 여파기의 삽입손  
 Fig. 14. Insertion Loss of Low Pass and Band Pass Filters.

參 考 文 獻

- [1] Yusuke Jajima, "GaAs FET applications for injection-locked oscillators and self-oscillating" mixers.", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-27, pp. 629-632, July 1973.
- [2] R.A. Pucel, D. Masie and R. Bera, "Performance of GaAs MESFET mixers at X-band," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-24, pp.361-366, June 1976.
- [3] 박한규, 박기수, 초고주파 공학, 청문각, 1981.
- [4] G. Gonzalez, Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design, *Prentice-Hall, INC.* 1984.
- [5] Minoru Maeda, et al., "Design and performance of X-band oscillators with GaAs schottky-gate FET", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-23, pp. 661-667, Aug. 1975.
- [6] H. Howe, Stripline circuit design, *Artech House, Inc.*, 1974.