

GaAs MESFET을 이용한 MIC 게이트 Mixer의 설계 및 제작

(Design and Fabrication of a MIC Gate Mixer Using GaAs MESFET)

朴 漢 奎*, 金 男 洙*

(Han Kyu Park and Nam Su Kim)

要 約

본 논문에서는 일반적으로 mixer를 설계할 때에 주로 사용되었던 쇼트키다이오드(schottky diode)의 범주에서 벗어나 주파수변환시 변환이득을 얻기위하여 GaAs mesfet을 사용하였다.

또한 입·출력 정합회로는 산란계수를 사용하여 유전체 기판위에 마이크로 스트립(microstrip) 선로를 설계 및 제작하였으며 실험결과 신호주파수 4GHz, 중간주파수 1.217GHz에서 변환이득 9dB를 얻었다.

Abstract

The Schottky barrier diode has been used as an element of the mixer inspite of its conversion loss. In this paper the use of a GaAs MESFET is shown as a device of mixer, and the conversion gain is obtained. Also, input matching circuits are designed by s-parameter and fabricated on a dielectric teflon epoxy fiber glass substrate. According to the results, the conversion gain is 9 dB at the signal frequency of 4 GHz and the intermediate frequency of 1.217 GHz.

I. 서 론

최근 마이크로파 주파수 대역에서 저잡음 및 큰 이득을 얻을 수 있다는 장점때문에 국내에서도 GaAs MESFET을 증폭기¹⁾로 많이 활용하여 왔으나 본 논문에서는 GaAs MESFET를 사용하여 Mixer를 구현할 수 있다는 것을 실험적으로 입증하였다. 종래는 주로 Mixer에 쇼트키다이오드(schottky diode)를 사용하여 왔으나, 다이오드로 만든 Mixer는 주파수 변환시 전력의 손실이 있는반면 GaAs MESFET의 게이트(gate)와 소우스(source) 사이에 큰 발전기전압을 가하면 MESFET의 소신호소자(small-signal elements)의 값이 변함에 따라 주파수변환이 일어나고 이때 변환된 주파수는 FET자체에서 증폭된다. 이런 장점을

이용하여 1973년 J. E. Sitch²⁾는 GaAs MESFET를 처음으로 Mixer에 응용하였는데 RF 3GHz에서 IF 20MHz로서 변환이득 5.5dB를 얻었고, 1976년 R. A. pucel³⁾은 RF 7.8GHz, IF 30MHz에서 6dB의 변환이득, 같은 해 Osamu kurita⁴⁾는 RF 10.8GHz, IF 1.7GHz로서 같은 크기의 변환이득을 얻었으며 최근 G. K. Tie⁵⁾는 RF 8GHz, IF 30MHz에서 10.5dB정도의 변환이득을 얻었다. 그러나 이들은 임피던스 정합할 때 대부분 외부 튜닝(tuning) 회로를 사용하여 정합하였으나 본 논문에서는 산란계수(s-parameter)를 사용하여 S-Band DBS 주파수영역에서 마이크로 스트립 선로로 설계하였으며, 특히 주파수변환시 영상주파수(image frequency)가 생기는데 이는 출력단에서 잡음에 영향을 미치므로 원치않는 이 주파수에 대해서 입력단에서 $\lambda/4$ 개방스터브(open stub)로 동가회로상 단락회로(short circuit termination)를 형성시켜줌으로서 출력단에 원하는 중간 주파수만 나오도록 설계하고자 한다.

*正會員, 延世大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)
接受日字: 1985年 11月 15日

II. 산란계수를 사용한 입·출력 정합회로

산란계수를 사용해서 입·출력을 정합하려면 먼저 안정계수 K를 고려해야 하며 안정계수가 1보다 작을 경우 입·출력 반사계수가 각각 입력 안정원(input stability circle) 및 출력 안정원(output stability circle)의 내부에 있는지 혹은 외부에 있는지를 확인 하여야 한다. 이때 불안정한 영역에 있다면 안정한 영역으로 옮겨서 정합시켜야 한다. 입력 안정원의 중심 C_s 및 반경 r_s (*)는

$$\text{반경 } r_s = \left| \frac{S_{12} S_{21}}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \right| \quad (1)$$

$$\text{중심 } C_s = \frac{(S_{11} - \Delta S_{22}^*)^*}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \quad (2)$$

출력 안정원의 중심 C_L 과 반경 r_L 은

$$\text{반경 } r_L = \left| \frac{S_{12} S_{21}}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \right| \quad (3)$$

$$\text{중심 } C_L = \frac{(S_{22} - \Delta S_{11}^*)^*}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \quad (4)$$

여기서 $\Delta = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21}$ 이며 *는 공액복소수를 나타낸다.

본 실험에서 사용한 GaAs MESFET는 일본 NEC사의 NE71083으로 게이트길이는 $0.3\mu\text{m}$ 이고 정합회로를 구성할 때 산란계수를 직접 측정하여 사용하는 것이 이상적이나 직접 측정할 수 없어서 NEC사의 사양에 의해서 드레인과 소우스간의 전압 $V_{ds} = 3\text{V}$, 드레인 전류 $I_D = 10\text{mA}$ 일 때 RF신호 4GHz의 산란계수값과 중간주파수 1.217GHz의 값을 1GHz의 산란계수 값으로 대치하여 그대로 적용하였다. 그 값은 표 1과 같다.

표 1. $V_{ds} = 3\text{V}$, $I_D = 10\text{mA}$ 일때 산란계수

Table 1. Scattering parameters at $V_{ds} = 3\text{V}$, $I_D = 10\text{mA}$.

주파수(GHz)	S 11	S 21	S 12	S 22
4	0.889 < -79	2.459 < 107	0.052 < 36	0.625 < -57
1	0.99 < -15	3.7 < 170	0.02 < 74	0.63 < -11

입력 정합회로는 RF에 대한 최소잡음점으로 설계하기 위하여 사양에 주어진 최소잡음지수인 점의 반사계수인 $\Gamma_{opt} = 0.64 < 61^\circ$ 로 선택하였고 이점은 스미스도표상에서 입력 안정원의 안정한 영역에 있다. 영상주파수를 제거하기 위하여 영상주파수에 대한 $\lambda/4$ 병렬 스테르브를 사용하였는데 개방스테르브(open stub)인 $\lambda(\text{image fr.})/4$ 스테르브는 영상주파수에 대해 단락회로종단(short circuit termination) 역할을 하며 신호주파수에 대해서는 $0.162\lambda_{RF}$ 의 길이이다. 스미스도표상에서 그런결과 이 점은 신호주파수에 대해 병렬스테르브

정합하는 점과 일치한다. 따라서 간단한 단일 스테르브 정합회로를 만들었으며 출력정합회로는 중간주파수에 대해서 정합시켜야 하므로 반사계수는

$$\Gamma_L = \left(S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_s}{1 - \Gamma_s} \right)^* \quad (5)$$

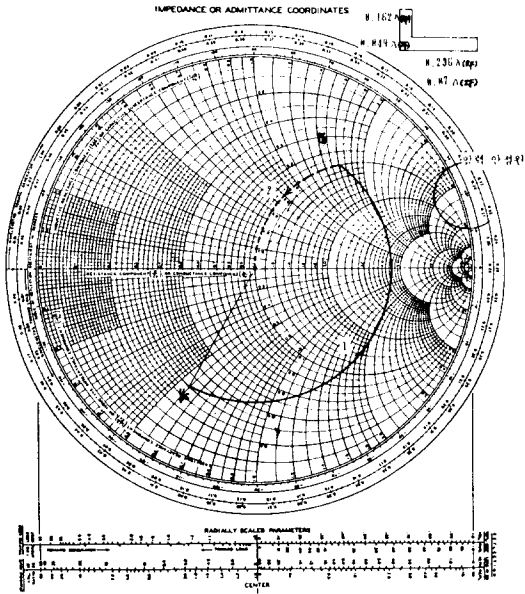
인데 이 점 역시 출력 안정원의 안정한 영역에 속해야 하며 여기서 중요한 것은 반사계수 Γ_s 값으로 이 Γ_s 값은 중간주파수에 대한 반사계수 $\Gamma_{S(IF)}$ 이다. 따라서 입력정합회로 전체를 포함하여 중간주파수에 대한 반사계수값을 다시 구해야 한다. 이 과정을 그림 1(b)에 나타내었다. 또한 저역통과여과기를 지나기 전에 가장 큰 신호인 발진주파수를 차단해 주기 위해 발진주파수에 대한 $\lambda_{LO}/4$ 병렬 개방스테르브를 실현해 주었다. 물론 이때 이 병렬스테르브의 어드미턴스 성분도 고려하여 출력정합회로를 설계해야 한다.

그림 1(a)에서 신호입력반사계수($\Gamma_{S(RF)}$)는 잡음을 고려하여 신호주파수에 대한 최소잡음점인 $\Gamma_{S(RF)} = \Gamma_{opt} = 0.64 < 61^\circ$ 로 잡았으며 이점의 특성임피던스 50Ω 으로 정규화된 임피던스는 $Z_s = 0.76 + j1.4$ 이며 어드미턴스로는 $Y_s = 0.3 - j0.55$ 이며 이 값을 복소정합시키기 위해 ①은 실수값을 ②는 허수값을 정합시키는 과정을 나타내며 이 결과 직렬 마이크로 스트립(series microstrip line)의 길이는 신호주파수에 대해 $0.236\lambda_{RF}$ 이고 스테르브의 길이는 $0.162\lambda_{RF}$ 이다.

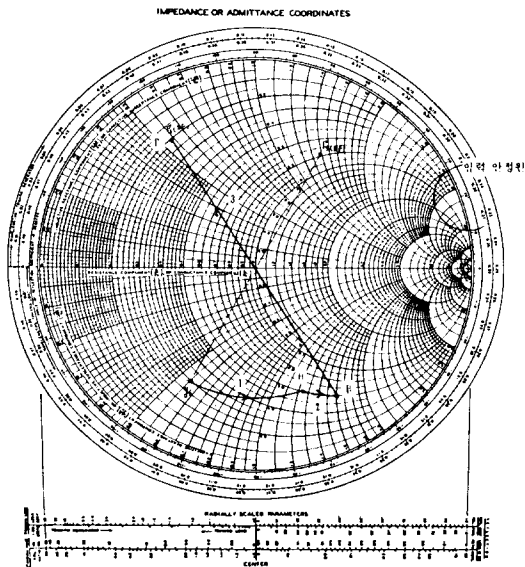
출력정합회로를 구성할 때는 원하는 중간 주파수 신호가 최대가 되도록 정합시켜야 하며 이때 중간주파수에 대한 출력반사계수 $\Gamma_{L(IF)}$ 와 입력반사계수 $\Gamma_{S(IF)}$ 는 (5)식과 같은 관계가 있는데 입력정합회로를 구성했으므로 $\Gamma_{S(RF)}$ 점을 입력회로에 따라 움직인점으로 $\Gamma_{S(IF)}$ 를 잡아야 한다. 따라서 입력정합회로의 직렬마이크로 스트립의 길이 $0.236\lambda_{RF}$ 는 중간주파수에 대해서 $0.07\lambda_{IF}$ 가 되고 병렬스테르브 $0.162\lambda_{RF}$ 는 $0.049\lambda_{IF}$ 가 된다. 그러므로 그림 1(b)의 ①은 반사계수의 크기가 0.64인 원을 따라 부하방향으로 $0.07\lambda_{IF}$ 움직인점 A($0.6 - j1.25$)가 되고 ②는 $g = 0.6$ 인 콘덕턴스라인을 따라 부하방향으로 $0.049\lambda_{IF}$ 움직인점 B($0.6 - j1.6$)이 되고 임피던스는 $0.25\lambda_{IF}$ 떨어진점 C($0.2 + j0.55$)이다. 이 점의 반사계수 $\Gamma_{S(IF)}$ 는 $0.73 < 120^\circ$ 이다.

그림 1(c)는 그림 1(b)에서 얻은 $\Gamma_{S(IF)}$ 와 $\Gamma_{L(IF)}$ 의 관계식 (5)에서 중간주파수 출력 반사계수 $\Gamma_{L(IF)} = 0.66 < 8.55^\circ$ 를 얻었고 이 점의 정규화임피던스 $Z_L = 4.43 + j1.57$ 이며 어드미턴스 $Y_L = 0.2 - j0.07$ 이다. 이때 반사계수가 0.66인 원을 따라 부하방향으로 $0.717\lambda_{IF}$ 떨어진점 A($1 - j1.73$)으로 움직여 직렬마이크로 스트립을 형성하고 $g = 1$ 인 라인을 따라 B($1 - j0.38$)점까지 움직여서 서셉턴스를 1.34만큼 증가시켰는데 두개의

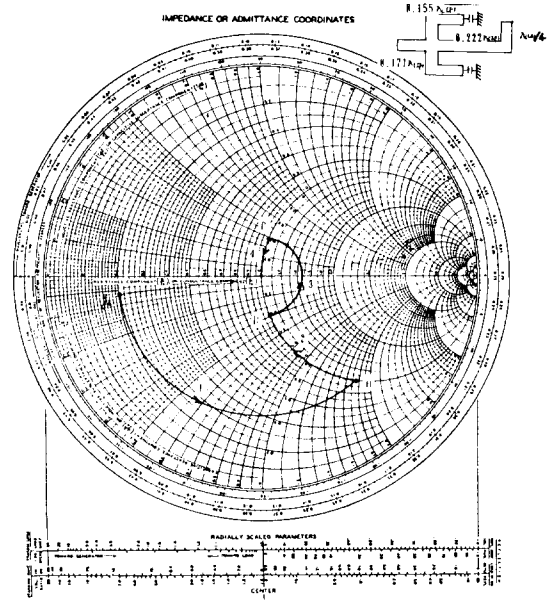
단락 병렬스터브를 형성시켰으므로 증가된 서셉턴스는 한스터브당 $1.34/2=0.67$ 이며 $-j0.67$ 에 해당하는 파수 $0.405\lambda_{IF}$ 과 short 지점인 $0.25\lambda_{IF}$ 와 차이가 되는 $0.155\lambda_{IF}$ 를 병렬스터브 하나의 길이로 정하였다. B점의 반사계수는 $0.19 < 281^\circ$ 인데 반사계수가 0.19 인 원을 따라 부하방향으로 $0.222\lambda_{IF}$ 떨어진 점 C($1+j0.38$)로 이동하였는데 이는 발진주파수에 대해 $\lambda_{LD}/4$ 스테르브를 잡기위한 것이고 중간주파수에 대해서는 0.058



(a) 입력정합회로



(b) 중간 주파수에 관해 고려한 입력 반사계수



(c) 출력 정합회로(출력 안정원은 스미스도표 밖에 있다)

그림 1. Mixer의 입·출력 정합회로
Fig. 1. Input and output matching circuit of Mixer.

λ_{IF} 에 해당한다. 이 C점을 스미스도표의 중심점으로 정합시켰다.

스미스도표상에서 실선은 직렬스트립라인의 정합을 나타내고 점선은 스테르브의 정합을 나타낸다. 또한 이렇게 정합시킨 각 정합회로의 스트립라인 구조를 스미스도표와 함께 나타내었다.

III. 저역통과 여파기 설계

저역통과 여파기는 인덕터 및 캐패시터의 특성 임피던스를 변화시켜 고임피던스 및 저임피던스로 설계하였으며¹⁾ 등가회로 및 스트립라인 구조는 그림 2와 같다. 여기서 각각의 인덕턴스 및 캐패시턴스 값은

$$L(K) = \frac{G(K) Z_0}{2\pi f} \quad (\text{Henries}) \quad (6)$$

$$C(K) = \frac{G(K)}{2Z_0 \pi f} \quad (\text{Farads}) \quad (7)$$

이때 Z_0 는 선로의 특성 임피던스 50Ω 이고 f 는 차단 주파수이다. 차단 주파수를 2GHz 로 정하여 신호주파수를 40dB 이상 감쇄시키기 위해서 $n=7$ 로 설계하면 K 번째 $G(K)$ 값들은

$G(0)=1.000$	$G(3)=1.748$
$G(1)=0.797$	$G(4)=1.633$
$G(2)=1.398$	$G(5)=1.748$

$G(6) = 1.392$ $G(8) = 1.000$
 $G(7) = 0.797$

으로 택했고 이 값에 의해서 설계한 저역통과여파기는 통과영역에서 0.01dB의 ripple을 갖는다. 각 인덕터 및 캐패시터의 스트리플라인 길이는 HARLAN HOWE^[7]가 제시한 계산식을 적용하였으며 설계시 인덕터선로의 임피던스 $Z_L = 10.9\Omega$, 캐패시터 선로의 임피던스 $Z_C = 85.3\Omega$ 으로 정하였고 각각의 인덕턴스값 및 캐패턴스값, 그리고 길이는 표 2와 같다.

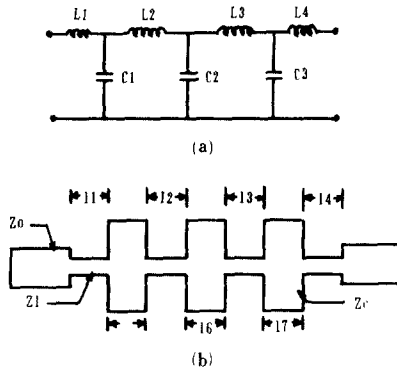


그림 2. 저역 통과 여파기 (a) 등가회로 (b) 스트리플라인 구조
 Fig. 2. Lowpass filter, (a) Equivalent circuit, (b) Stripline structure.

표 2. 인덕터 및 캐패시터
 Table 2. Inductor and capacitor.

구분 \ 종류	인 덕 터				캐 패 시 터		
	L1	L2	L3	L4	C1	C2	C3
값 (nH 또는 PF)	3.17	6.96	6.96	3.17	2.23	2.6	2.22
길이 (mm)	6.24	13.68	13.68	6.24	2.44	2.62	2.43
선로 임피던스 (Ω)	$Z_L = 10.9$				$Z_C = 85.3$		

(1) 인덕터 L1, L2, L3, L4 및 캐패시터 C1, C2, C3는 스트리플라인 구조에서 그 길이를 각각 11, 12, 13, 14 및 15, 16, 17으로 표시하고 해당값을 적은 것이다.

IV. 실험 및 결과고찰

본 실험에서 사용한 유전체 기판은 국산제품인 OAK사의 epoxy fiber glass로 비유전율 $\epsilon_r = 4.8$, 두께 0.8mm, $\tan\delta = 0.05$ 이고 MESFET는 게이트길이가 0.3 μm 인 NEC사의 NE71083, 발진기는 NEC사의 2SC2585 silicon transistor로 자체 제작해서 사용했으며 발진기의 발진 주파수는 5.217GHz, 출력 5.5dBm 이었으며 전체 실험장치도는 그림 3과 같다.

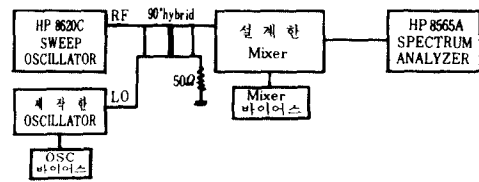


그림 3. 전체 실험장치도
 Fig. 3. Test setup for measurement.

또한 Mixer내에 함께 설계한 저역통과 여파기의 특성은 그림 4와 같이 측정 되었는데 통과대역에서는 평균 2dB의 손실을 가졌고 통과대역 이외에서는 평균 24dB의 손실특성을 보여주고 있다.

실험에 사용한 90° 하이브리드의 특성은 그림 5에 나타내었고 3.4GHz에서 4.4GHz까지 5dB의 균일한 감쇄가 있었고 발진주파수인 5.217GHz에서는 7.5dB의 감쇄가 측정되었다. 또한 그림 6은 단자 1과 단자 4의 분리특성 측정결과를 나타내었는데 단자 1로 신호 주파수, 단자 4로 발진주파수를 가하였기 때문에 신호

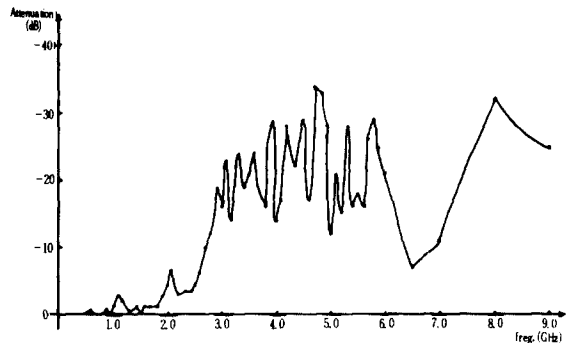


그림 4. 저역통과 여파기의 특성
 Fig. 4. The characteristics of lowpass filter.

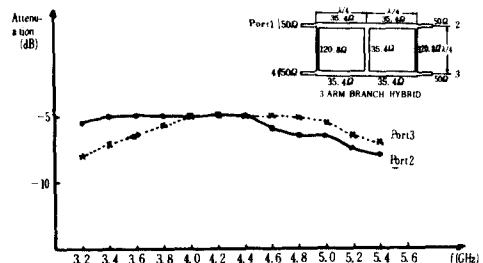


그림 5. 실험에 사용한 90° 3arm brankch hybrid의 특성
 Fig. 5. The characteristic of 90° 3arm brankch hybrid for experiment.

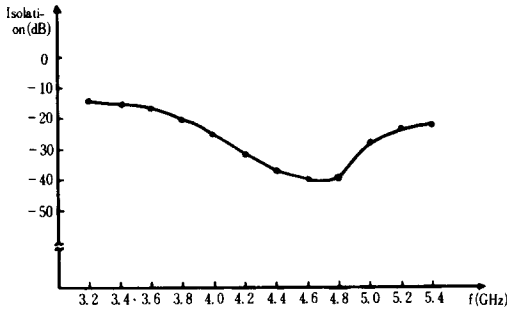


그림 6. 단자 4에서 측정된 분리특성
Fig. 6. Measured isolation characteristic at port 4.

대 발진주파수 분리도는 신호주파수 4GHz에서 -25dB로 측정되었다.

전체 Mixer의 변환이득은 그림 7과 같이 측정되었으며 이때 게이트와 소우스간의 전압은 -0.52V, 드레인과 소우스간의 전압은 3.03V, 드레인 전류는 5mA이며 신호주파수의 Mixer의 입력 power는 -30dBm을 넣었으며 실험결과 신호주파수 40 GHz, 중간주파수 1.217GHz에서 최대 9dB를 얻었다. 발진기의 출력은 10.5dBm이나 90° 하이브리드에서 손실을 고려할 때 Mixer 입력은 3dBm이다.

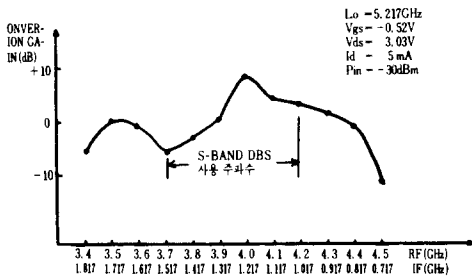


그림 7. 측정된 Mixer의 변환이득
Fig. 7. Measured conversion gain of mixer.

그림 8은 설계한 Mixer의 스트립라인 구조이다. 그림 9는 제작한 FET Mixer와 발진기를 같은 종류의 기관에 제작하여 적류차단 콘덴서(DC blocking capacitor)로 연결하였으며 90° 하이브리드 역시 같은 기관위에 제작하였다. 변환이득을 측정할 때에는 90° 하이브리드에서의 신호주파수 감쇄를 고려하여 하이브리드출력단에서의 power를 Mixer의 입력 power로 하였다.

그림 10은 신호주파수 4GHz일때 중간주파수 1.217GHz가 측정되었으며 Mixer에 입력 power가 -30dBm일때 변환이득 9dB가 증폭되어 -21dBm이 되는 것을 스펙트럼 분석기에서 촬영한 것이다. 이때 수직눈금은

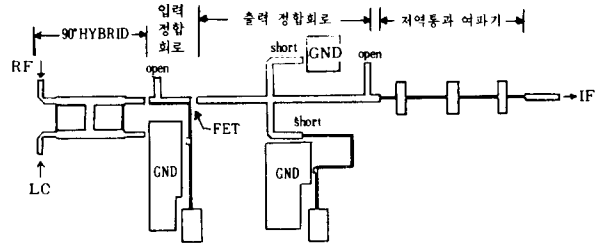


그림 8. 설계한 Mixer의 스트립라인 구조
Fig. 8. Stripline geometry of designed mixer.

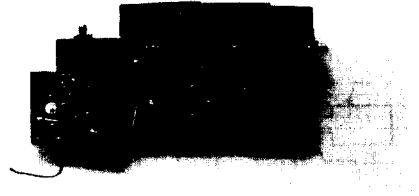


그림 9. 발진기를 부착한 Mixer
Fig. 9. Mixer with oscillator.

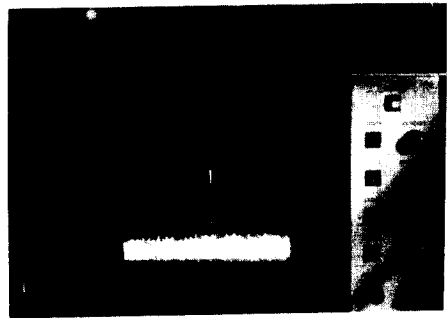


그림 10. 중간주파수 스펙트럼 사진
Fig. 10. Photography of intermediate frequency spectrum.

1 눈금당 5dBm으로 놓았고 스펙트럼 분석기의 기준레벨(reference level)은 -10dBm이다. RF신호발생기는 HP8620C이며 스펙트럼 분석기는 HP8565A이다. 신호주파수에 비해 큰 출력을 갖는 발진주파수는 단락회로(short riccuit termination) 역할을 하는 $\lambda_{1.0}/4$ 스터브로 일차 차단되고 다시 저역통과 여파기에 의해서 신호주파수 및 발진주파수가 차단된다. 변환이득은 등가 회로상의 각 소자값들을 정확히 알 수 없어서 이론적으로 계산할 수 없었으나 사양에는 저잡음점으로 증폭

기를 설계할 때 14dB 정도의 이득을 얻을 수 있는데 R. A. pucel에 의하면 Mixer는 증폭기에는 얻을 수 있는 가용이득보다 변환이득이 더 크다고 하였다.^[1] 따라서 9dB를 얻은 것은 손실이 많았다는 것을 의미하며 같은형의 FET라도 같은 조건에서 산란계수의 변화가 심하므로 정확한 산란계수를 알 수 없었기 때문이며 (실제로 똑같은 형의 FET를 교체하여 측정하였을 때 같은 조건에서 변환이득이 4dB로 측정되기도 하였다), 그 외에도 제작상 오차 및 콘넥터의 손실등도 고려할 수 있다. 발전기의 출력변화에 따른 Mixer 변환이득을 측정하면 더욱 좋은 실험자료를 얻을 수 있을 것이지만 장비의 부족으로 발전기를 자체제작 했기 때문에 고정된 출력에 대해 측정하였고 잡음지수도 측정할 수 없었다. 그러나 입력정합시 최적잡음지수가 되는 Γ_{in} 점을 선택해서 정합하였는데 NEC사의 사양에 의하면 $V_{DS}=3V$, $I_{DS}=10mA$ 일때 잡음지수는 0.6dB이다. 또한 입력정합회로에서 영상주파수를 제거 하였는데 이를 스펙트럼분석기로 측정하여 확인 하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 변환손실이 -6dB내지 -10dB인 다이오드 일변도의 Mixer에서 벗어나 변환이득을 얻을 수 있는 GaAs MESFET을 사용하여 Mixer를 설계하였으며 종래 GaAs MESFET Mixer설계시 입·출력 정합회로에 주로 사용되던 튜닝스터브등 외부조정회로는 산란계수를 사용하여 마이크로스트립라인으로 정합하였고, 입력회로에서 잡음에 영향을 크게주는 영상주파수차단스터브를 이용하였으며 S-Band용 DBS Mixer의 주파수대역에서 측정한 결과 신호주파수 4GHz, 중간주파수 1.217GHz에서 최대 변환이득 9dB를 얻었다. 따라서 이는 다이오드 Mixer에 비해 상대적으로 신호를 +15내지 +19dB 증폭한 결과이며 결국 중간주파수 증폭기의 필요증폭도가 낮아져서 증폭단이 1단 내지 2단 줄어들게 되므로 증폭기 설계시 어려운 문제인 대역폭, 이득, ripple등의 문제점들을 경감시킬

수 있다. 아직 실험결과가 S-Band 대역의 DBS에 직접 사용할 수 있을 정도로 만족스럽지는 않지만 GaAs MESFET에 산란계수를 적용하여 입·출력정합회로를 스트립라인으로 구성하였고 변환손실대신에 변환이득을 얻을 수 있었다는데에 이 논문의 큰 의미가 있다고 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] 박한규, "GaAs MESFET를 이용한 초고주파 증폭기에 관한 연구" 전자공학회지, 제13권제 5호, pp. 126-133, 12월 1976년
- [2] J.E. Sitch and P.N. Robson, "The Performance of Field-Effect Transistors as Microwave Mixers," *Proc. of IEEE*, vol. 61, no 3, pp. 399-400, March 1973.
- [3] Robert A. Pucel, DAMEL MESSE, RICHARD BERA, "Performance of GaAs MESFET Mixers at X-Band," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-24, no. 6, pp. 351-360, June 1976.
- [4] Osamu Kurita and Kozo Morita, "Microwave FET Mixer," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-24, no. 6, pp. 361-366, June 1976.
- [5] G.K. Tie and C.S. Aitchison, *Noise Figure and Associated Conversion Gain of a Microwave MESFET Gate Mixer*. Conf. Proc. 13th Euro. Microwave Conf., pp. 579-584, 1983.
- [6] Guillermo Gonzalez, *Microwave Transistor amplifiers and design*, Prentice-Hall, INC., New Jersey, pp. 96, 1984.
- [7] Harlan Howe, JR, *Stripline Circuit design*, Artech house, INC., Massachusetts, pp. 190-200, 1974.