

# M/W Link용 8W X-band 전력모듈의 설계 및 제작 연구

正會員 윤 관 기\*, 이 문 규\*\*, 이 진 구\*

## Studies on Design and Fabrication 8W X-band Power Modules for M/W Link

Kwan-ki Youn\*, Moon-kyu Lee\*\*, Jin-Koo Rhee\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 GaAs power MESFET's를 사용하여 중심 주파수 8.1GHz에서 이득 50.0dB 이상과 출력 8W 이상을 목표로 안정되고 소형화된 전력모듈을 설계·제작하였다. 전력모듈은 입력단, 중간단 및 출력단의 각 단위 전력증폭기를 설계·제작하였다. 주파수 범위 7.8~8.25GHz에서 각 단위 전력증폭기의 측정결과는 입력단 단위 전력증폭기의 경우  $23.0 \pm 1.0\text{dB}$ 의 이득( $S_{21}$ )과  $-11.6\text{dB}$  이하의 입력 반사계수( $S_{11}$ )를 얻었다. 중간단 단위 전력증폭기의 경우  $19.0 \pm 1.5\text{dB}$ 의 이득과  $-14.0\text{dB}$  이하의 입력 반사계수를 얻었다. 출력단 단위 전력증폭기의 경우 입력측에 아이솔레이터(isolator)를 연결하여 측정한 결과  $13.4 \pm 0.2\text{dB}$ 의 이득과  $-25.0\text{dB}$  이하의 입력 반사계수를 얻었다. 최종적으로 각 단위 전력증폭기 사이에 아이솔레이터를 삽입하여 전력모듈을 제작하였다. 제작된 전력모듈의 전체 크기는  $175 \times 70 \times 30\text{mm}^3$ 이며 중심주파수 8.1GHz에서 50.3dB의 이득을 얻었다.

### ABSTRACT

In this paper, the power module using the GaAs power MESFET's are designed, fabricated and measured. In the input stage power amplifier, MAG is  $23.0 \pm 1.0\text{dB}$  and reflection is about  $-11.6\text{dB}$  at the frequency range of 7.8~8.25GHz. In the middle stage power amplifier, MAG is  $19.0 \pm 1.5\text{dB}$  and reflection is about  $-14.0\text{dB}$  at the same frequency range. In the output stage power amplifier, MAG is  $13.4 \pm 0.2\text{dB}$  and reflection is about  $-25.0\text{dB}$  in the operating frequency range. The power linearity of each power amplifiers is very good. Finally, the fabricated power module shows that MAG is 50.3dB at the center frequency of 8.1GHz.

### I. 서 론

현대는 위성통신 및 이동통신 등의 장비의 효율성과 신뢰성 확보를 위하여 고신뢰성 및 소형·경량화된 송/수신기의 개발은 필수적이다. 이러한 요구에 부응하여 초고주파용 통신 부품의 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits)화 기술은 선진 각국에서

\*동국대학교 전자공학과  
\*\*현대전자 통신사업부  
論文番號: 97168-0517  
接受日字: 1997年 5月 17日

수년간 연구를 수행하여 상용화 단계에 이르고 있다. 또한, 초고주파 통신 시스템의 송/수신기는 소형화, 경량화 및 고신뢰성이 요구됨과 동시에 적은 전력소모가 요구되기 때문에 GaAs MESFET's를 사용한 각종 부품의 설계·제작 기술에 대한 중요성이 크게 부각되고 있다. 따라서 HIC(Hybrid Integrated Circuits)와 MMIC 기술 등을 적절하게 결합한 off-chip 형태의 모듈을 구성하여 고효율, 소형화 및 경량화 등의 문제점을 해결하고 있다.<sup>[1-2]</sup>

따라서, 본 논문에서는 MMIC 전력모듈의 설계 및 제작을 위한 선행 기반 기술인 HIC 전력모듈의 설계, 제작 및 측정기술 확립을 목표로 연구를 수행하였다. 초고주파용 HIC 전력모듈의 설계 및 제작은 각 단위 전력증폭기를 설계·제작하고 최종적으로 아이솔레이터를 이용하여 HIC 전력모듈을 구성하는 방법을 택하였다. 또한, HIC 전력모듈의 소형화 및 신뢰성 향상을 목적으로, 정합회로 및 바이어스 회로 등을 최적화하여 설계하였다. HIC 전력모듈의 설계 및 측정 기술은 MMIC 제작에 비해 저렴한 비용으로 설계 및 측정기술을 검증할 수 있을 뿐 아니라 오차 수정에도 용이하다.<sup>[3]</sup> 본 논문에서는 초고주파용 핵심 부품의 하나인 초고주파 송/수신단의 M/W link용 전력모듈을 HIC 형태로 설계, 제작 및 측정하였다. 일반적으로 전력모듈과 같은 대신호 회로는 비선형 특성을 갖기 때문에 원하는 동작특성을 얻기 위해서는 반복적인 설계, 제작 및 측정을 통한 보정이 필수적이다. 본 논문에서 제작한 전력모듈은 중심 주파수 8.1GHz에서 이득 50.0dB 이상, 출력 8W 이상을 갖도록 전력모듈을 설계·제작하여 한 개의 housing에 탑재하여 특성을 측정하였다.

## II. 단위전력증폭기의 설계

초고주파용 전력증폭기의 정합회로를 집중소자 형태로 설계하면 전력증폭기의 제작시 기생효과 등의 영향으로 정확한 정합회로의 구현이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 GaAs MESFET's의 S-파라미터로 소자의 입·출력임피던스를 계산하여, 정합회로를 설계한 후  $\lambda/4$  마이크로스트립(microstrip) 선로를 갖는 분산정수 형태의 회로를 구성하였다. 또한, GaAs MESFET's의 1dB 출력역압점(compression output power:  $P_{1dB}$ )과

1dB 이득역압점(compression power gain:  $G_{1dB}$ )을 기준으로 입력측 반사계수를  $-10.0dB$  이하로 설정하고, 최대이득을 얻을 수 있도록 최적화 하였다.<sup>[4]</sup> 설계 및 시뮬레이션은 HP사의 Libra를 이용하여 손실을 감안한 lossy matching 방법으로 최적화 하였다.<sup>[5-6]</sup> GaAs MESFET의 측정된 입·출력 임피던스를 이용하여 변환된 등가적인 병렬 캐패시턴스와  $\lambda/4$  마이크로스트립 선로를 포함한 전력증폭기의 입·출력단 정합회로를 그림 1에 보였다.

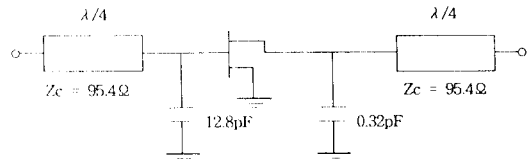


그림 1. 설계된 전력용GaAs MESFET  $\lambda/4$  정합회로  
Fig. 1 Designed  $\lambda/4$  matching circuits of GaAs power MESFET's

입력단과 중간단 단위 전력증폭기는 100pF 바이패스 칩 캐패시터를 사용하여 1단 전력증폭기를 직렬로 연결하여 2단 전력증폭기를 구성하였다. 출력단 단위 전력증폭기는 회로의 안정도와 최대 출력을 얻기 위하여 7.7~8.5GHz 대역에서 내부 정합된 전력용 GaAs MESFET's를 사용하였다. 출력단 단위 전력증폭기는 출력전력을 높이기 위하여 두개의 소자를 전력 분배기와 결합기로 상호 접속되는 balanced 형태인 Wilkinson 전력 분배기를 사용하였다. Balanced 형태로 설계된 출력단 전력증폭기의 회로도도 그림 2에 나타내었다. 또한, 각 단위 전력증폭기에 DC 전압 및 전류를 공급하기 위하여 전원회로가 필요하다. 전원회로는 DC 정원을 능동소자에 전원을 공급할 수 있어야 할뿐만 아니라 전체 정합회로를 통과하는 입출력 신호에 영향이 없도록 설계해야 한다. 따라서 본 논문에서는 테프론 기판상에 구현이 쉽고 높은 임피던스를 갖는 마이크로스트립 형태의 전원 라인을 채용하였으며, DC 차단 및 RF 파이패스 캐패시터를 이용하여 전체 전원회로를 구현하였다.

설계된 입력단 및 출력단 단위 전력증폭기의 이득 특성에 대한 Libra 시뮬레이션 결과를 그림 3에 보였다. 중심주파수 8.1GHz에서 입력단 단위 전력증폭기

는 24.0dB, 중간단 단위 전력증폭기는 19.0dB 이상의 결과를 얻었다.

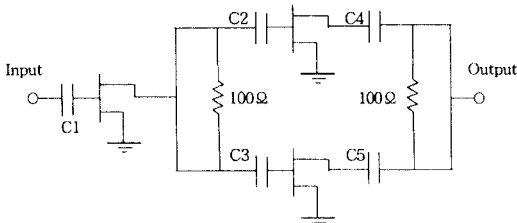


그림 2 출력단 단위 전력증폭기 설계 회로도  
Fig. 2 A schematic diagram of the designed output stage power amplifier

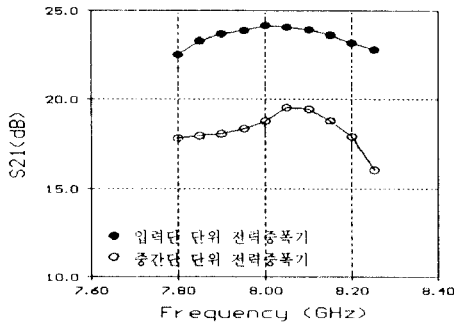
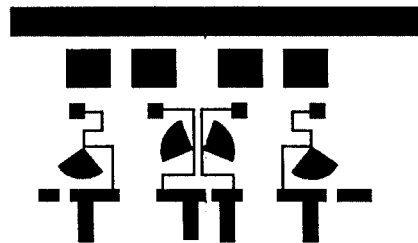


그림 3. 이득특성의 Libra 시뮬레이션 결과  
Fig. 3 Libra simulations for S<sub>21</sub> gain

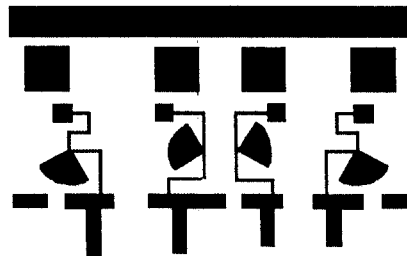
### Ⅲ. 단위전력증폭기의 제작 및 특성 측정

반복적인 최적화 과정과 제작을 거쳐 설계된 최종적인 각 단위 전력증폭기의 음화 필름을 그림 4에 보였다. HIC 전력증폭기는 테프론 기판상에 사진 부식법을 이용하여 제작하였다. 또한, 패턴의 정확도를 높이기 위하여 반도체 제작 공정인 UV lithography 기술을 이용하여 정합회로에 영향을 주지 않고 DC를 전달하기 위한 바이어스 회로는 0.1mm의 폭으로 제작하여 동작주파수 범위에서 높은 임피던스를 실현하였다.<sup>[7]</sup> 각 단위 전력증폭기의 제작에 사용된 테프론 기판의 사양은 유전체의 비유전율 2.52, 유전체의 두께 0.508mm, 동박두께 0.018mm 및  $\tan \delta = 0.003$ 이다. 전력용 GaAs MESFET's를 이용하여 제작된 입력

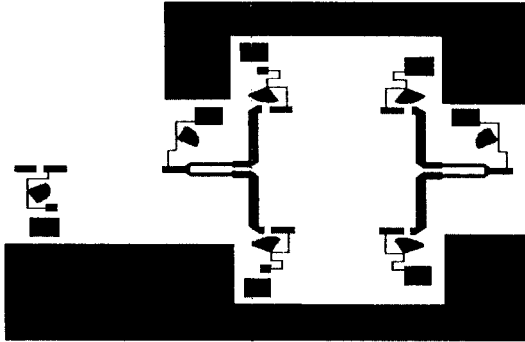
단, 중간단 및 출력단 단위 전력증폭기의 초고주파 특성은 주파수 범위 7.8~8.25GHz에서 HP8722A vector network analyzer를 사용하여 측정하였다. 각 단위 전력증폭기의 측정 바이어스 조건은 다음과 같다. 입력단은  $V_{ds} = 5.0V$ ,  $V_{gs} = -0.7V(I_{ds} = 0.5I_{dss})$ , 중간단은  $V_{ds} = 8.0V$ ,  $V_{gs} = -1.7V(I_{ds} = 0.5I_{dss})$ , 그리고 출력단은  $V_{ds} = 10.0V$ ,  $V_{gs} = -1.5V(I_{ds} = 0.6I_{dss})$ 의 인가 전압 하에서 각 단위 전력증폭기의 특성을 측정하였다. 이러한 측정 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)에서 입력단 전력증폭기의 이득은  $23.0 \pm 1.0dB$ 이고, 입력 반사계수는  $-11.6dB$  이하의 결과를 얻었다. 그림 5(b)에서 중간단 전력증폭기의 이득은  $19.0 \pm 1.5dB$ 이고, 반사계수는  $-14.0dB$  이하의 결과를 얻었다. 그림 5(c)에서 출력단 단위 전력증폭기는 제작에 사용된 소자가 내부정합되어 있기 때문에 반사계수가 너무 커서 입력단에 아이솔레이터(isolator)를 연결하여 측정하였다. 측정 결과 이득은  $13.4 \pm 0.2dB$ 이고, 반사계수는  $-25.0dB$  이하의 결과를 얻었다.



(a) 입력단 단위 전력증폭기  
(a) The input stage power amplifier

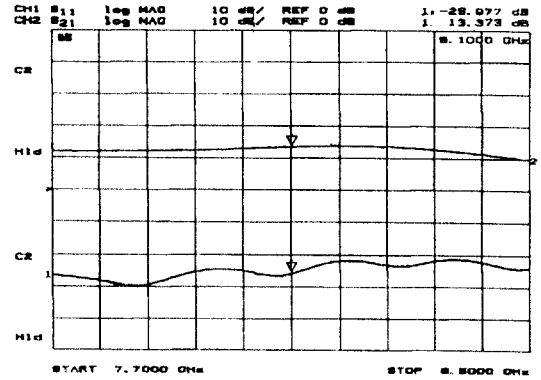


(b) 중간단 단위 전력증폭기  
(b) The middle stage power amplifier



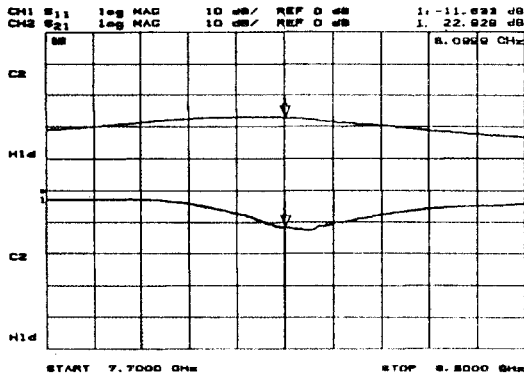
(c) 출력단 단위 전력증폭기  
(c) The output stage power amplifier

그림 4. 각 단위 전력증폭기 제작을 위한 음화 필름  
Fig. 4 The individual stage power amplifiers

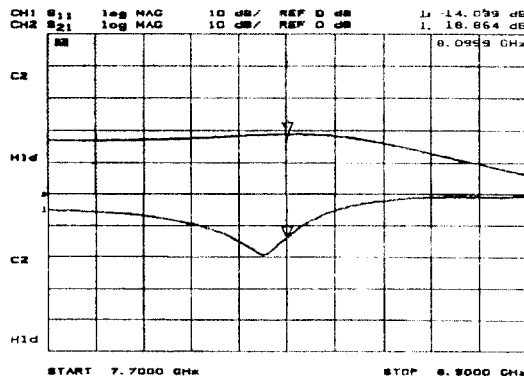


(c) 출력단 단위 전력증폭기  
(c) The output stage power amplifier

그림 5. 각 단위 전력증폭기의 이득 및 입력 반사계수 측정 결과  
Fig. 5 The measured gain and the input reflection data



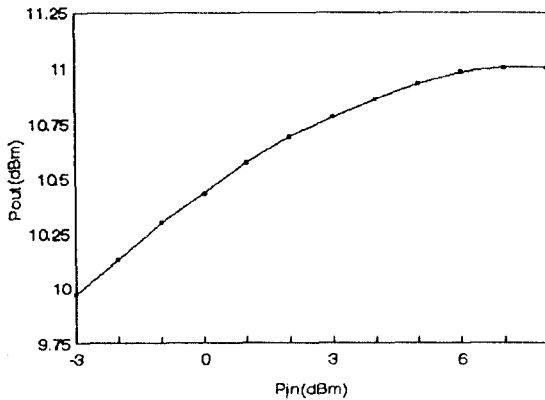
(a) 입력단 단위 전력증폭기  
(a) The input stage power amplifier



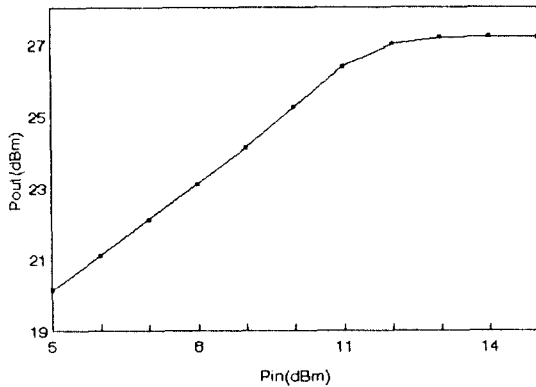
(b) 중간단 단위 전력증폭기  
(b) The middle stage power amplifier

입력단 단위 전력증폭기와 중간단 단위 전력증폭기의 측정결과를 그림 3의 설계값과 비교하면, 입력단의 경우 측정치가 약 1.0dB의 이득이 감소하였으며 중간단은 약 0.2dB의 이득이 감소하였다. 이러한 오차는 설계된 회로를 테프론 기판상에 제작하는 과정에서 발생한 공정 오차로 사료된다. 즉, 음화 필름 제작시 생기는 오차와 이로 인한 마이크로스트립 선로의 오차에 기인한 것이다.

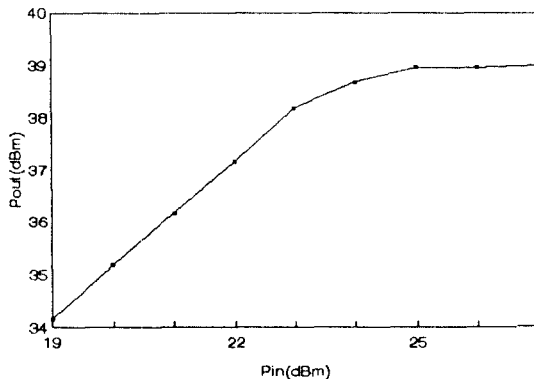
주파수 8.1GHz에서 HP437B power meter를 사용하여 측정된 입력단, 중간단 및 출력단 전력증폭기의 입력전력 대 출력전력 특성을 그림 6에 나타내었다. 측정 바이어스 조건은 소신호이득(S<sub>21</sub>)의 측정 조건과 같다. 그림 6(a)에서 입력단 전력증폭기는 입력전력 5.0dBm 일 때 10.8dBm의 출력전력을 나타내었다. 그림 6(b)에서 중간단 전력증폭기는 입력전력 12.0dBm 일 때 26.98dBm의 출력전력을 나타내었다. 그림 6(c)에서 출력단 전력증폭기는 입력전력이 25.0dBm 일 때 38.95dBm의 출력전력을 나타내었다. 각 단위 전력증폭기의 입력전력 대 출력전력 특성의 직선성이 매우 좋은 것을 볼 수 있다.



(a) 입력단 단위 전력증폭기  
(a) The input stage power amplifier



(b) 중간단 단위 전력증폭기  
(b) The middle stage power amplifier



(c) 출력단 단위 전력증폭기  
(c) The output stage power amplifier

그림 6. 각 단위 전력증폭기의 입력전력 대 출력전력 특성  
Fig. 6 The input power vs. the output power

#### IV. 전력모듈의 제작 및 특성 측정

제작된 각 단위 전력증폭기의 이용하여 전력모듈을 제작하였다. 각 단위 전력증폭기의 결합은 아이솔레이터를 사용하였다. 그림 7에 전력모듈의 블록 다이어그램과 전력모듈 제작에 사용된 GaAs MESFET's의 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 전력모듈 제작에 사용된 GaAs MESFET's 사양 ( $f = 8\text{GHz}$ ,  $I_{ds} = 0.5I_{dss}$ )

Table 1. Characteristics of the power GaAs MESFET's ( $f = 8\text{GHz}$ ,  $I_{ds} = 0.5I_{dss}$ )

모델명	변수	$I_{ds}$	$V_p$	$G_{1dB}$	측정조건	비고
국제상사(FET1)		60 mA	-0.1 V	$\approx 9.5$ dB	$V_{ds} = 3\text{V}$	입력단
HMF 03020(FET2)		80 mA	-3.5 V	8.0 dB	$V_{ds} = 8\text{V}$	중간단
HMF 12020-200(FET3)		0.34 A	-3.5 V	7.0 dB		
MGFC 36V7785(FET4)		2 A	-3 V	8.0 dB	$V_{ds} = 10\text{V}$	출력단
MGFC 39V7785(FET5)		4 A	-3 V	7.0 dB		

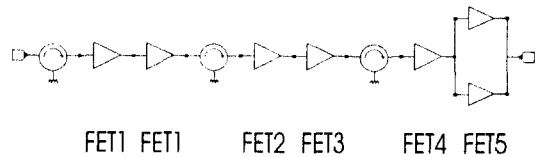


그림 7. 설계·제작된 전력모듈의 블록 다이어그램

Fig. 7 A block diagram of the designed and fabricated power module

최종적으로 입력단, 중간단 및 출력단 전력증폭기를 결합하여 전력모듈을 제작하였다. 전력모듈의 전체 크기는  $175 \times 70 \times 30\text{mm}^3$ 이었으며, 이러한 전력모듈의 실물사진을 그림 8에 보였다. 제작된 전력모듈은 열적 잡음을 줄여주고 전력모듈의 크기를 줄여주기 위한 목적으로 방열판을 housing으로 사용하여 각 단위 전력증폭기와 전원회로를 탑재하였다.

제작된 전력모듈의 주파수 특성 측정결과를 그림 9에 나타내었다. 측정결과 주파수 범위 7.8~8.25GHz에서  $50.3 \pm 3\text{dB}$ 의 이득과  $-20.0\text{dB}$  이하의 입력 반사

계수를 얻었다. 이는 각 단위 전력증폭기 사이에 삽입된 2개의 아이솔레이터에 의한 0.8dB의 손실을 고려하면 51.1dB를 예측할 수 있으나 실제로는 0.8dB의 오차를 보였다. 이러한 오차는 마이크로스트립 선로의 변환 과정에서 발생한 계산 오차와 각 단위 전력증폭기의 제작시 오차로 사료된다. 앞으로의 과제는 이러한 오차를 더욱 줄여 나가는 것이라 하겠다.

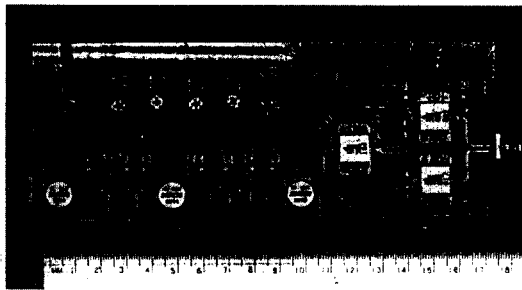


그림 8. 제작된 전력모듈의 실물사진  
Fig. 8 A photograph of the fabricated power module

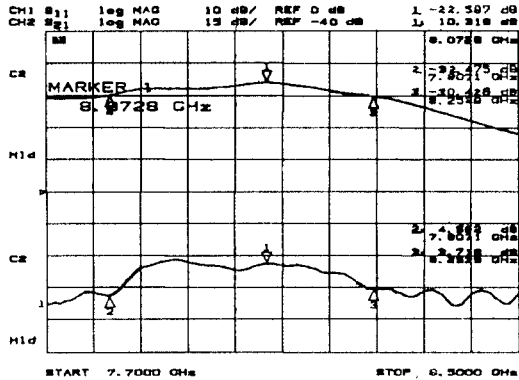


그림 9. 제작된 전력모듈의 주파수 특성  
Fig. 9 Frequency characteristics of the fabricated power module

## V. 결 론

본 논문에서는 전력용 GaAs MESFET's를 이용한 X-band용 전력모듈을 설계·제작하고 그 특성을 측정하였다. 전력모듈의 제작은 입력단, 중간단 및 출력단의 각 단위 전력증폭기를 제작하여 아이솔레이터를

사용하여 연결하였다.

설계된 각 단위 전력증폭기는 중심주파수 8.1GHz에서 입력단 단위 전력증폭기는 24.0dB, 중간단 단위 전력증폭기는 19.0dB 이상의 이득을 얻었다. 제작된 입력단 단위 전력증폭기의 측정 주파수 범위 7.8~8.25GHz에서 이득은  $23.0 \pm 1.0$ dB, 입력 반사계수는  $-11.6$ dB 이하, 그리고 주파수 8.1GHz에서 입력전력 대 출력전력 특성은 입력전력 5.0dBm 일 때 출력전력 10.8dBm의 결과를 얻었다. 중간단 단위 전력증폭기의 이득은  $19.0 \pm 1.5$ dB, 입력 반사계수는  $-14.0$ dB 이하, 그리고 입력전력 대 출력전력 특성은 입력전력 12.0dBm 일 때 출력전력 26.98dBm의 결과를 얻었다. 출력단 단위 전력증폭기의 이득은  $13.4 \pm 0.2$ dB, 입력 반사계수는  $-25.0$ dB 이하, 그리고 입력전력 대 출력전력 특성은 입력전력 25.0dBm 일 때 출력전력 38.95dBm의 결과를 얻었다. 설계·제작된 각 단위 전력증폭기의 전력증폭 특성의 직선성은 매우 양호하다. 설계값과 측정값을 비교해 보면 입력단 단위 전력증폭기의 경우 이득이 약 1.0dB 감소하였으며 중간단 단위 전력증폭기의 경우 이득이 약 0.2dB 감소하였다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 테프론 기판상에 회로를 구현할 때 좀더 정확한 패터닝이 요구된다.

최종적으로 각 단위 전력증폭기를 연결하여 제작된 전력모듈은  $175 \times 70 \times 30$ mm<sup>3</sup>의 크기를 가지며, 이득은 주파수 8.1GHz에서 50.3dB를 얻었다. 각 단위 전력증폭기 사이에 삽입된 2개의 아이솔레이터에 의한 0.8dB의 손실을 고려하면 51.1dB를 예측할 수 있으나 실제로는 0.8dB의 오차를 보였다. 이는 마이크로스트립 선로의 계산 오차와 각 단위 전력증폭기의 제작시 오차로 사료된다. 따라서 이러한 오차를 보정하기 위한 연구가 필요하다. 또한, GaAs를 이용한 소자의 열적 잡음을 줄이기 위한 연구도 필요하다.

더 높은 동작주파수에서 고이득, 고전력 및 고효율을 갖는 전력모듈을 제작하기 위해서는 반복실험을 통한 최적화 설계와 정밀한 제작이 요구된다. 본 논문에서 설계·제작된 GaAs MESFET's를 이용한 전력모듈은 지속적인 반복설계를 통하여 동작특성의 안정화와 재현성이 확보하게 되면 무선통신 송/수신기의 전력증폭부에 적용이 가능하리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 이진구 등, "AlGaAs/GaAs 계를 이용한 전력용 증폭기의 MMIC화에 관한 연구," 반도체공동연구소 3차 결과보고서, 1996.
2. 윤상훈, 김상명, 윤관기, 이일형, 신석현, 이진구, "1 W 출력을 갖는 C-Band 용 선형 전력증폭기에 관한 연구," 1993 년도 대한전자공학회 추계종합학술대회 논문집, 제16권, 제2호, pp. 474-477, 1993. 11.
3. 이문규, 박균호, 윤관기, 조희철, 이진구, 맹성재, 이종람, 박형무, "전력용 GaAs MESFET를 이용한 7.75~8.5GHz 대역의 초고주파 LINK용 전력모듈의 제작," 1995년도 대한전자공학회 추계종합학술대회 논문집, 제18권, 제2호, pp. 475-478, 1995. 12.
4. John L. B. Walker, "High-Power GaAs FET Amplifiers", Artech House Inc., 1993.
5. Robert Soares, Jacques Graffeuil, Juan Obrgon, "Applications of GaAs MESFET's", Artech House Inc., 1983.
6. Karl B. Niclas, "On Design and Performance of Lossy Match GaAs MESFET Amplifiers", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-30, No. 11, pp. 1900-1906, November 1982.
7. 이진구 등, "전력용 GaAs MESFET를 이용한 초고주파 LINK용 전력모듈의 제작," 한국전자통신연구소 3차 결과보고서, 1995. 12.



윤 관 기(Kwan-ki Youn) 정회원  
 1967년 3월 9일생  
 1992년 2월: 동국대학교 전자공학과(학사)  
 1995년 8월: 동국대학교 대학원 전자공학과(석사)  
 1995년 9월~현재: 동국대학교 대학원 전자공학과 박사과정

※주관심분야: MMIC power amplifiers



이 문 규(Moon-kyu Lee) 정회원  
 1970년 11월 16일생  
 1994년 2월: 동국대학교 물리학과(학사)  
 1997년 2월: 동국대학교 대학원 전자공학과(석사)  
 1997년 3월~현재: 현대전자 통신사업본부

※주관심분야: 이동통신용 systems (HPA, LPA)

이 진 구(Jin-Koo Rhee) 정회원  
 한국통신학회 논문지, 제11권, 제3호, 참조