

論文97-34D-5-2

0. $5\mu\text{m}$ -GaAs MESFET을 이용한 X-밴드 모노리식 직렬 궤환 LNA의 설계 및 특성

(Design and Characteristics of X-band Monolithic Series Feedback LNA using $0.5\mu\text{m}$ -GaAs MESFET)

全英珍*, 金鎮明*, 丁潤夏*

(Young-Jin Jeon, Jin-Myung Kim, and Yoon-Ha Jeong)

요 약

본 연구에서는 직렬 궤환 X-밴드 3단 모노리식 저잡음 증폭기를 $0.5\mu\text{m}$ -GaAs MESFET를 이용하여 성공적으로 설계, 제작하고 그 특성을 평가하였다. 3단 저잡음 증폭기의 설계에 있어서, 최적의 쇼트 스텐브(short stub) 길이를 찾기 위해, 직렬 궤환에 의한 잡음 지수와 이득 특성, 그리고 안정성(stability)에 대한 영향을 조사하였다. 이 결과에 따라, 10° 의 쇼트 스텐브를 GaAs MESFET의 소오스단에 삽입한 직렬 궤환 회로를 첫째 단에 이용하였다. 제작된 회로의 크기는 $1\text{mm}/\text{stage}$ 로서, 지금까지 발표된 X-밴드 모노리식 저잡음 증폭기와 비교하여 비교적 작았다. 측정된 이득은 주파수 8-10GHz에서 22.5-23.0dB로 충분히 크고, 매우 평탄한 특성을 보였고, 입력/출력 반사 계수는 각각 -10dB와 -15dB이하의 값이었으며, 잡음 지수는 2.6dB이하였다. 이와 같은 결과는 설계한 값과 잘 일치하는 값을 나타내었다.

Abstract

A X-band 3-stage monolithic LNA(low noise amplifier) with series feedback has been successfully designed and demonstrated by using $0.5\mu\text{m}$ GaAs MESFET. In the design of the 3-stage LNA, the effects of series feedback to the noise figure, the gain, and the stability have been investigated to find the optimal short stub length. As a result, the inductive series feedback topology which has 10 degree short stub in the GaAs MESFET source lead, has been employed in the 1-st stage. The fabricated MMIC LNA's chip size is only $1\text{mm}/\text{stage}$, which is smaller than the previously reported X-band MMIC LNAs. The measured gain is 22.5 to 23.0dB in the range of 8 to 10GHz with good flatness, and the input/output return losses are less than -10dB and -15dB, respectively. The noise figure(NF) is less than 2.6dB. The measured data show good agreement with the simulated values.

1. 서 론

근래에는 간단한 수신 장치로 정지 위성으로부터 직접 TV를 수신하는 DBS(Direct Broadcast Satellite)

* 正會員, 浦項工科大学校 電子電氣工學科

(Department of Electronic and Electrical Engineering, POSTECH)

※ 본 연구는 국방과학연구소 및 광전자연구센터의 연구비지원으로 수행된 것입니다.

接受日字:1997年3月26日, 수정완료일:1997年5月2日

시스템, 탐사 위성의 통신, GPS(Global Positioning System)등의 실현이 가능해 졌다^[1]. 이러한 통신 관련 기술의 발전과 위성 방송의 증가에 따라, 현재 상업용 위성 통신 분야에서는 사용 주파수 대역이 C-밴드에서 X및 Ku-밴드로 확장되어 가고 있다^[2-3]. Pengelly등에 의해 최 초로 트랜지스터를 이용한 X-밴드 1단 증폭기가 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 형태로 제작된 이래^[4], MMIC에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 아직까지 대부분은 하이브리드 형태인 MIC(Microwave Integra-

ted Circuit)로 제작되고 있다. 그러나 MMIC는 MIC에 비해 작은 크기, 높은 신뢰성, 높은 수율, 저렴한 가격 등의 장점으로 그 수요가 점차 증가되고 있다^[5-6]. MMIC에 이용되는 능동 소자로는 GaAs를 기반으로 하는 MESFET, HEMT, HBT등 이 있다. GaAs는 Silicon에 비해 높은 전자 이동도와 큰 포화 속도를 가져 고속의 트랜지스터 제작이 가능하고, 비교적 큰 저항비를 가지고 있기 때문에, 수동 소자를 제작하기가 일반적으로 용이하다. 여러가지 화합물 소자 중 GaAs MESFET은 가장 신뢰성과 수율이 높기 때문에 X-밴드에서 동작하는 증폭기 등을 제작하는데 매우 경제적이다 볼 수 있다.

저잡음 증폭기는 통신 시스템의 전단부를 구성하는 부품으로, 전체 시스템의 잡음 지수와 VSWR(Voltage Standing Wave Ratio)를 결정하는 중요 부분이다. 따라서 저잡음 증폭기는 낮은 잡음 지수와 높은 이득, 그리고 낮은 VSWR의 특성을 동시에 만족해야 한다. 이를 위하여 MESFET의 소오스단에 직렬 케환을 사용하여, 잡음 정합과 이득 정합을 동시에 이뤄내는 형태가 가장 많이 쓰이고 있다^{[12][17]}.

본 논문에서는 직렬 케환으로서 Short Stub를 이용하였으며, 그 길이에 따른 소자의 특성을 분석하였다. 이를 이용하여 X-밴드 GaAs MESFET 저잡음 증폭기를 3단으로 설계, 제작하고 그 특성을 조사하였다. 설계된 증폭기의 중심 주파수는 9GHz 이며, 밴드폭은 2GHz이다. 또한 본 연구에서 설계된 3단 저잡음 증폭기는 이득 23dB이상, 잡음 지수 2.4dB이하, 그리고 입출력 반사 계수는 각각 -11dB와 -15dB이하였다.

표 1. GaAs MESFET의 등가 회로 파라미터
Table 1. Equivalent circuit parameters of the GaAs MESFET.

Parameter	Idss	50%-Idss	20%-Idss
Lg(pH)	28.57	28.57	28.57
Ld(pH)	17.7	17.7	17.7
Rg(Ω)	1.60	1.60	1.60
Rd(Ω)	1.20	1.20	1.20
Rs(Ω)	2.38	2.38	2.38
Rds(Ω)	285	270	284
Ri(Ω)	1.84	3.25	4.10
Cdg(pF)	0.0234	0.0272	0.0310
Cgs(pF)	0.3520	0.2750	0.2290
Cds(pF)	0.0640	0.0616	0.0595
Gm(mS)	44.4	35.2	24.6
tau(ps)	2.83	2.83	2.83

II. GaAs MESFET 및 수동소자의 특성

설계에 사용된 GaAs MESFET 은 0.5 μ m 게이트 선폭을 가지며, 넓이는 4 \times 75 μ m, 접지는 Via Hole을 이용하였다. 소신호 등가 회로 파라미터는 드레인-소오스간 전압 5V에서 Idss, 50%- Idss, 20%-Idss에서 추출하였다. 그 결과를 표 1에 요약하였다.

표 2. 8-10GHz에서 GaAs MESFET의 이득 및 잡음 특성
Table 2. Gain and noise parameters of the GaAs MESFET in the range of 8 to 10GHz.

Freq (GHz)	Nfmin (dB)	Γ_{opt} (mag / deg)	k	Gms (dB)
8.0	1.17	0.756 \angle 51	0.48	11.5
8.5	1.24	0.747 \angle 55	0.51	11.3
9.0	1.3	0.738 \angle 58	0.54	11.0
9.5	1.36	0.730 \angle 61	0.56	10.8
10	1.42	0.723 \angle 63	0.59	10.6

표 2 에는 주파수 범위8-10GHz, 20%-Idss (Vds=5V, Vgs=-1.1)에서 이득과 최소잡음지수 (NFmin), Γ_{opt} , 그리고 k-factor를 나타내었다.

설계에 사용된 수동소자는 캐패시터, 저항, 마이크로 스트립선로등이다. 캐패시터는 SiN계 캐패시터 및 Polyimide계 MIM 캐패시터를 사용하여, 큰 용량을 가지는 SiN계 캐패시터는 DC 차단용과 바이패스용으로 이용하고, Polyimide계 캐패시터는 임피던스 정합용으로 사용하였다. 저항은10 Ω -10k Ω 의 저항값을 갖는 메사(Mesa) 저항을 사용하였고, 마이크로 스트립선로의 특성 임피던스는 40 Ω - 110 Ω 의 값을 사용하였다. 마이크로스트립선로의 최대 허용 전류는 5A/mm였다

III. 직렬 케환 GaAs MESFET의 특성

저잡음 증폭기의 설계에 있어서 능동 소자의 출력단 (Γ_L) 은 잡음 지수와 관련이 없으므로 큰 이득을 얻기 위해 S_{22}^* 에 정합한다. 그러나 입력단(Γ_g)의 경우 최소 잡음 지수를 얻기 위해서 Γ_{opt} 에 정합해야 하는데, 이 경우 S_{11}^* 에 정합하는 것에 비하여 이득이 감소하고 입력 VSWR 이 나빠지는 단점이 있다. 그림 1에 입력 단에서의 10GHz 주파수에서 Noise Circle 및 Gain

Circle 을 스미스 차트(Smith Chart)상에 나타내었다. 최대 이득(S_{11}^*)에 정합을 시킬 경우, 10GHz에서 10dB이상의 이득을 얻을 수 있으나, 이 경우 잡음 지수가 3.2dB 이상이 되었다. 최소 잡음 지수에 정합을 할 경우, 10GHz에서 1.5dB 이하의 잡음 지수를 얻을 수 있으나, 이득이 6dB이하로 줄어들게 된다.

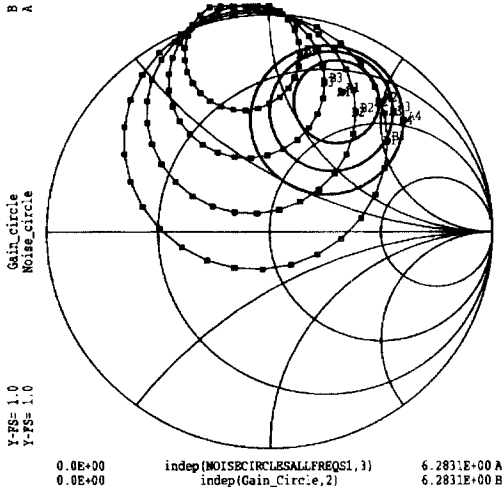


그림 1. 10GHz에서 GaAs MESFET의 Gain Circle과 Noise Circle

Fig. 1. Gain and noise circles of the GaAs MESFET at 10 GHz.

본 논문에서는 이를 해결하기 위해서 MESFET의 소오스단에 Inductive Series Feedback 효과를 줄 수 있는 쇼트 스텐브(Short Stub)를 두었다. 10GHz에서 쇼트 스텐브의 길이에 따른 GaAs MESFET의 특성을 표 3에 요약하였다.

표 3. Short Stub의 길이에 따른 GaAs MESFET의 RF특성(10GHz)

Table 3. RF characteristics of the GaAs MESFET as a function of short stub length.

Electrical length (deg)	Nfmin (dB)	Γ_{opt}	Rn	k-factor	Gms(dB)
0	1.42	$0.72 \angle 63$	47	0.592	10.64
5	1.41	$0.69 \angle 67$	39	1.018	11.26
10	1.40	$0.65 \angle 71$	31	1.175	10.61
15	1.38	$0.61 \angle 75$	26	1.136	9.44
20	1.36	$0.56 \angle 79$	20	1.072	8.33

표 3 에서 알 수 있듯이 쇼트 스텐브의 길이가 증가

함에 따라 최소 잡음 지수 (NFmin) 및 잡음 저항(R_n)이 감소하여, 그 잡음 특성이 개선됨을 잘 알 수 있다. k-factor 또한 1 이상이 되어 불안정 영역이 없어지게 된다. 한편, 점차적으로 이득이 줄어들게 되는 단점이 있으므로, 이를 고려하여 쇼트 스텐브의 길이를 10° 로 결정하였고, 이때 NF Circle 및 Gain Circle을 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보듯이 그림 1과는 달리 불안정 영역이 없어짐과 동시에, 최대 이득 정합점과 최소 잡음 정합점이 쇼트 스텐브가 없는 것과 비교하여 매우 근접하므로 큰 이득과 낮은 잡음 지수를 동시에 얻는 것이 가능함을 알 수 있다.

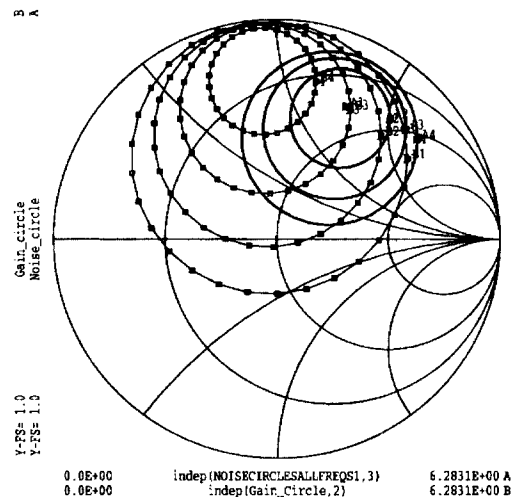


그림 2. 10 Short Stub를 가진 GaAs MESFET의 Gain Circle과 Noise Circle

Fig. 2. Gain and noise circles of the GaAs MESFET with 10° short stub.

IV. X-밴드 GaAs MESFET 3단 저잡음 증폭기의 설계

다단 증폭기에서 전체 회로의 잡음 지수는 다음과 같은 Friis 공식으로 표현된다.

$$F_{tot} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (1)$$

F : 잡음 지수

G : 가용 이득 (Available gain)

따라서 3단 저잡음 저잡음 증폭기의 입력단 설계에 있어서, 잡음 지수에 영향이 큰 첫째단은 입력 VSWR 및 잡음 지수의 특성을 좋게 하기 위하여, 앞에서 설명한 직렬 케환을 사용하였고, 전체 잡음 지수에 미치는

영향이 작은 둘째 단과 세째 단은 큰 이득과 낮은 입력 VSWR을 가 지도록 정합하였다. 특히 세째 단은 표 3에서 쇼트 스테르브의 길이가 5° 일 때 가장 이득이 크 기 때문에, 그만큼의 직렬 케환 주었다. 마지막으로 각 정합점을 기준으로 HP MDS (Microwave Design System)를 이용하여, 최적화하는 과정을 반복하여 실행하였다. 설계된 GaAs MESFET 3단 저잡음 증폭기를 그림 3에 나타내었다.

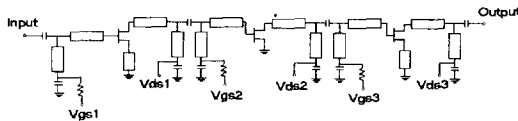


그림 3. 3단 저잡음 증폭기의 회로도

Fig. 3. Schematic circuit of the 3-stage LNA.

설계된 GaAs MESFET 3단 저잡음 증폭기의 특성을 그림 4 와 그림 5에 나타내었다.

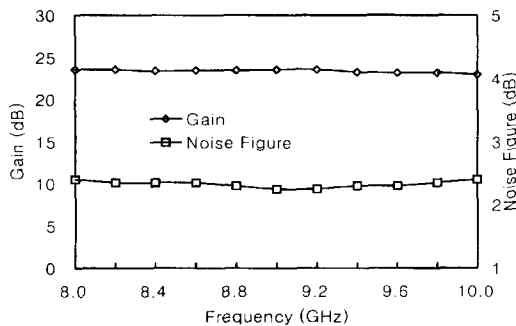


그림 4. 설계된 GaAs MESFET 3단 저잡음 증폭기의 잡음 및 이득 특성

Fig. 4. Noise figure and gain characteristics of designed GaAs MESFET 3-stage LNA.

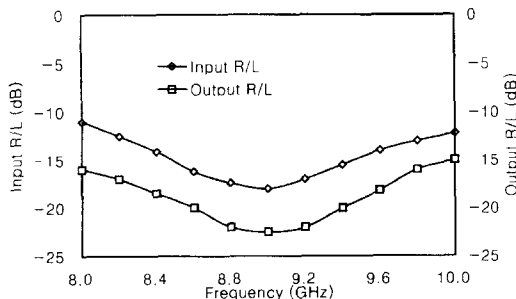


그림 5. 설계된 GaAs MESFET 3단 저잡음 증폭기의 입출력 반사 계수

Fig. 5. Input/output return losses of the designed GaAs MESFET 3-stage LNA.

그림 4는 주파수에 따른 잡음 특성과 이득 특성을 나타내었다. 잡음 지수는 2.4dB이하, 이득 특성은 23dB이상을 나타내고 있고, 그 특성이 설계한 주파수 대역에서 매우 평탄함을 알 수 있다. 그림 5는 주파수에 따른 입력 및 출력단의 반사 계수를 나타내며, 입력단의 반사 계수는 -11dB (VSWR \approx 2)이하이며, 출력단은 -15dB(VSWR \approx 1.43) 이하임을 알 수 있다.

V. X-밴드 GaAs MESFET 3단 저잡음 증폭기의 특성

GMTT (GEC-Marconi Materials Technology) F20 Foundry를 이용하여 제작된 GaAs MESFET 3단 저잡음 증폭기의 현미경 사진을 그림 6에 나타내었다. 칩의 크기는 1.4mm \times 2.2mm로서, 비교적 작은 면적에 제작하였다. 접지는 Via Hole 을 통하여 이루어졌으며, GaAs MESFET의 바이어 스는 외부에서 본딩 및 납땜을 통하여 각각 -1.1V 와 5V를 게이트와 드레인에 인가하였다. 측 정할 때 저주파에서의 발진을 막기 위하여 10nF의 캐패시터를 병렬로 연결하였고, 고주파에서의 발진을 막기 위하여 30pF의 캐패시터를 병렬로 연결하였다.

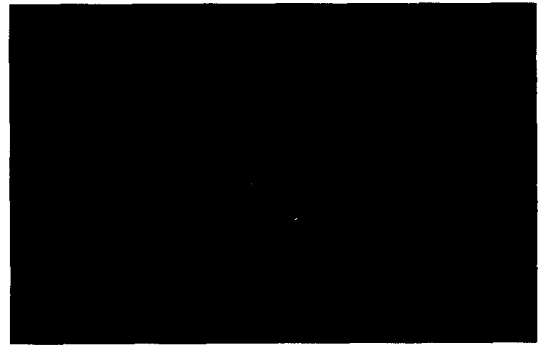


그림 6. 0.5 μ m GaAs MESFET 3단 저잡음 증폭기의 현미경 사진

Fig. 6. Photograph of the 0.5 μ mGaAs MESFET 3-stage LNA.

제작된 MESFET 3단 저잡음 증폭기의 잡음 지수 및 이득 특성을 그림 7에 나타내었다. 잡음 지수는 8-10GHz에서 2.6dB 이하였고, 이득은 22.5dB이상 이었다. 설계한 값과 비교하여 잡음 지수가 증가한 것은 소자들 간의 Coupling, 수동소자의 손실, 공정상의 변화 및 측정 오차 등에 기인한 것으로 판단된다. 이득

특성은 주파수 8-10GHz에서 22.5dB 이상으로 평탄한 특성을 보이며, 설계치와 거의 일치함을 알 수 있다.

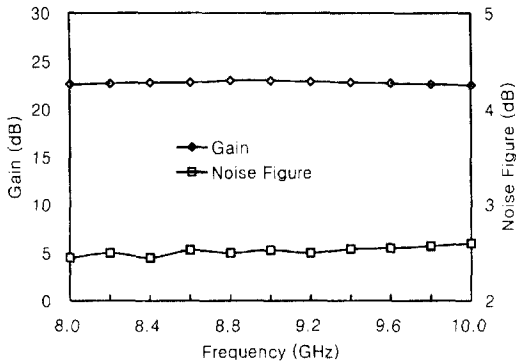


그림 7. 제작된 GaAs MESFET 3단 저잡음 증폭기의 잡음 및 이득 특성

Fig. 7. Noise figure and gain characteristics of the fabricated GaAs MESFET 3-stage LNA.

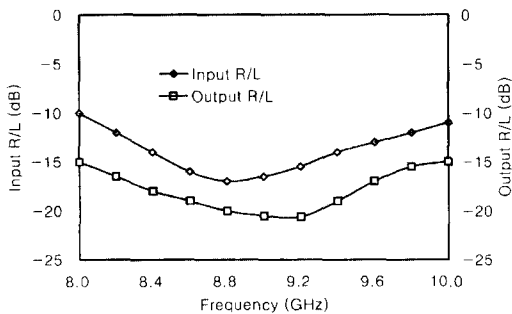


그림 8. 제작된 GaAs MESFET 3단 저잡음 증폭기의 입출력 반사 계수

Fig. 8. Input/output return losses of the fabricated GaAs MESFET 3-stage LNA.

그림 8에서는 MESFET 3단 저잡음 증폭기의 입력 및 출력의 반사 계수를 나타내었다. 입력 단의 반사 계수는 -10dB이하로 설계치와 비슷함을 알 수 있고, 출력단도 -15dB이하로서 설계된 값과 일치함을 알 수 있다.

본 연구에서 얻은 결과들을 다른 X-밴드 저잡음 증폭기의 특성과 비교하여, 그 특성을 표 4에 나타내었다. 표 4에서는 각각의 저잡음 증폭기에 사용된 능동 소자 및 능동 소자의 최소 잡음 지수, 저잡음 증폭기의 잡음 지수 및 이득, 그리고 칩의 단위 면적을 비교하였다. M. Yanane 등^[7]과 N. Ayaki 등^[8]의 연구에서는 능동 소자의 잡음 지수 및 이득 특성이 우수한 HEMT

을 이용하여 2단 저잡음 증폭기를 제작하였는데, 그 특성은 비교적 우수하나, 칩의 크기가 크기 때문에 경제성이 떨어진다. N. Shiga 등^[9-10] 및 S. Hori 등^[11]의 연구에서는 능동 소자로 MESFET을 이용하여 3-4단 저잡음 증폭기를 제작하였으나, MESFET의 특성 때문에 이득이 비교적 작았고, 칩의 크기 또한 1.2 mm²/stage 이상으로서 비교적 큰 편이었다. 본 연구 결과는 기존의 발표된 연구들과 비교하여, 잡음 지수가 2.6dB로서 조금 떨어지는 편인데, 이는 잡음 지수가 1.43dB인 MESFET소자를 이용하였기 때문이다. 이들을 종합적으로 검토하여 볼 때, 본 연구에서 얻어진 이득 특성은 밴드폭내에서 7.5dB/stage로 비교적 우수하며, 칩의 크기 1mm²/stage로 비교적 작기 때문에 산업화 및 그 응용에 있어서 매우 유리함을 알 수 있다.

표 4. X-밴드 MMIC 저잡음 증폭기의 특성 비교

Table 4. Comparisons of X-band MMIC LNAs.

Author	Active Device	Stage	Nfmin (dB)	NF (dB)	Gain/Stage (dB)	Area/Stage (mm ² /#)	Ref.
Hitachi	HEMT	2	1.1	1.3	7.7	1.5	[7]
Mitsubishi	HEMT	2	1.0	1.6	7.0	1.96	[8]
Sumimoto	MESFET	4	0.7	1.1	6.5	1.2	[9]
Sumimoto	MESFET	4	1.2	1.7	6	2.25	[10]
Toshiba	MESFET	3	1.9	3.4	6.6	1.5	[11]
This Work	MESFET	3	1.43	2.6	7.5	1.0	-

VI. 결 론

본 논문에서는 직렬 변환 GaAs MESFET의 특성을 쇼트 스테르브의 길이에 따라 분석하였고, 이를 이용하여 X-band 3단 저잡음 증폭기 MMIC를 설계하였다. GEC-Marconi의 Foundry를 이용하여 제작한 MMIC LNA를 측정하였다. 측정된 잡음 지수는 주파수 8-10GHz범위에서 2.6dB이하의 값으로서 설계한 것보다 약간 높은 값이었지만, 이득과 입출력 반사 계수의 경우는 설계치와 거의 일치하였다. 특히 이득은 8-10GHz에서 22.3dB-23dB로 충분히 크고, 매우 평탄한 특성을 보였다. 입출력 반사 계수는 각각 -10dB 및 -15dB이하의 값을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] J. Smuk, P. Katzin, v. Aparin, and Shifrin, "Miniature GPS translator module," IEEE MTT-S Dig., vol. 1, pp. 13-16, 1995.
- [2] R.E. Lehmann and D.D. Heston, "X-band monolithic series feedback LNA," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., no. 12, pp. 1560-1566, 1985.
- [3] H. Okazaki, K. Horikawa, and M. Tanaka, "Ku-band self-controlled burst mode high power amplifier," IEEE MTT-S Dig., vol. 2, pp. 557-560, 1994.
- [4] R. S. Pengelly, and J.A. Turner, "Monolithic broadband GaAs FET amplifier," Electron. Lett., vol. 22, no. 10, pp. 251-252, 1976.
- [5] K. Hubbard, K. Macgowan, C. Kau, K. Smith, and s. Maus, "A Family of low cost high performance HEMT MMICs for commercial DBS application," IEEE MTT-S Dig., vol. 3, pp.1649-1652, 1995.
- [6] J. D. Adam, H. Bubay, M.R. Daniel, M. C. Driver, G.W. Eldridoe, M.H. Hanes, and R.L. Messham, "Monolithic integration of an X-band circulator with GaAs MMICs," IEEE MTT-S Dig., vol. 1, pp. 97-98, 1995.
- [7] M. Yanane, M. Mori, S.Takahashi, and M. Noda, "Low-noise 2 DEG FET MMIC amplifier for DBS," in 3rd Asia-Pacific Microwave Conf. Proc., Tokyo, pp. 951-954, 1990.
- [8] N. Ayaki, A. Inoue, T. Katoh, M. Komaru, M. Noda, M. Kobiki, K. Nagahama, and N. Tanino, "A 12GHz-band monolithic HEMT low-noise amplifier," in GaAs IC Symp. Tech. Dig., pp. 101-104, 1988.
- [9] N. Shiga, S. Nakajima, N. Kuwata, K. Otobe, T. Sekiguchi, K. Matsuzaki, and H. Hayashi, "Monolithic pulse-doped MESFET LNA for DBS downconverter," in GaAs IC Symp. Tech. Dig., pp.127-130, Oct. 1992.
- [10] N. Shiga, S. Nakajima, K. Otobe, T. Sekiguchi, N. Kuwata, K. Matsuzaki, and H. Hayashi, "X-band MMIC Amplifier with pulsed-doped GaAs MESFETs," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 39, no. 12, pp. 1987-1994, 1991.
- [11] S. Hori, K. Kamei, K. Shibata, M. Tatematsu, K. Mishima, and S. Okano, "GaAs monolithic MICs for direct broadcast satellite receivers," IEEE MTT-S Dig., pp. 59-64, 1983.

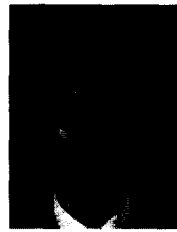
— 저 자 소 개 —



全 英 珍(正會員)

1970년 10월 18일 생. 1993년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1995년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업(공학 석사). 1995년 ~ 현재 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정. 주관심 분야는 화합물 반도체 소자 및 회

로 설계



金 鎭 明(正會員)

1972년 10월 15일 생. 1996년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업. 1996년 3월 ~ 현재 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정. 주관심 분야는 고주파 회로 설계 및 제작.



丁 潤 夏(正會員)

1974년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1976년 경북대학교 전자공학과 졸업.(공학석사). 1987년 Univ. of Tokyo 전자공학과 졸업(공학 박사). 1987년 3월 ~ 현재 포항공과대학교 전자전기공학 과 조교수, 부교수, 교

수. 1990년 1월 ~ 1991년 2월 Bell통신 연구소 기술 고문. IEEE Senior Member. 주관심 분야는 화합물 반도체 소자, 수신 OEIC, 초고주파 회로 설계 및 제작, 나노소자 연구 등임.