

논문 2008-45SD-12-6

# 0.1 $\mu\text{m}$ Metamorphic HEMT를 이용한 고이득 D-Band MMIC 2단 구동증폭기 개발

(Development of a Two-Stage High Gain D-Band MMIC Drive Amplifier Using 0.1  $\mu\text{m}$  Metamorphic HEMT Technology)

이 북 형\*, 이 진 구\*\*

(Bok-Hyung Lee and Jin-Koo Rhee)

## 요 약

본 논문에서는 0.1  $\mu\text{m}$  InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT기술을 기반으로 하여 D-Band(110 - 140 GHz) 대역에서 동작하는 MMIC 2단 구동 증폭기를 제작하였다. 제작된 구동 증폭기는 밀리미터파 대역인 110 GHz에서 10 dB 이상의 우수한  $S_{21}$  이득 특성을 보였으며, 이때 반사 특성 또한  $S_{11}$  -3.5 dB와  $S_{22}$  -6.5 dB로 양호한 특성을 얻었다. 이러한 높은 성능의 MMIC 구동증폭기의 특성은 주로 MHEMT성능에 기인한다. 본 논문에서 적용한 0.1  $\mu\text{m}$  MHEMT는 760 mS/mm의 전달컨덕턴스 특성과 195 GHz의 차단주파수 391 GHz의 최대공진 주파수 특성을 갖는다.

## Abstract

We report a high gain D-band(110 - 140 GHz) MMIC drive amplifier based on 0.1  $\mu\text{m}$  InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT technology. The amplifier shows an excellent  $S_{21}$  gain characteristic greater than 10 dB in a millimeterwave frequency of 110 GHz. Also the amplifier has good reflection characteristics of a  $S_{11}$  of -3.5 dB and a  $S_{22}$  of -6.5 dB at 110 GHz, respectively. The high performances of the MMIC drive amplifier is mainly attributed to the characteristics of the MHEMTs exhibiting a maximum transconductance of 760 mS/mm, a current gain cut-off frequency of 195 GHz and a maximum oscillation frequency of 391 GHz.

**Keywords :** Metamorphic HEMT, D-Band, MMIC drive amplifier.

## I. 서 론

밀리미터파 대역의 주파수 자원을 이용한 상용 및 군용 수요가 증가함에 따라 레이더 및 통신시스템의 수신부에 사용되는 구동증폭기 또한 높은 성능이 요구되고 있다. 밀리미터파 대역은 높은 동작주파수로 인해 넓은 대역폭을 제공할 수 있으며 V-band(50~75 GHz)와 D-band(110 ~170 GHz) 주파수대역에 존재하는 산

소분자에 의한 강한 신호 흡수 특성을 나타내는 대기창(atmospheric window) 이용하여 주파수 재사용 특성이 필요한 가정 및 사무용 무선통신 등의 분야에 응용되고 있다. 또한 W-band(75~110 GHz) 대역은 신호 흡수 감쇠가 적어 77 GHz 차량충돌 방지 시스템이나 94 GHz FMCW 레이더 및 유도 무기 추적장치 등의 군사적인 이용을 위해 연구가 진행되고 있다<sup>[1~3]</sup>. 본 연구에서는 W-band 대역의 MMIC 개발 기술을 기반으로 보다 상위 주파수 대역인 D-band(110~170 GHz)에서 동작하는 구동증폭기를 개발하였다. D-band 대역에서 동작하는 증폭기의 경우 110 GHz 이상의 대역에서 동작을 해야 하기 때문에 매우 우수한 특성을 갖는 능동소자의 설계, 제작기술이 필요하다. 따라서 현재 전 세계적으로 상용화 되어 MMIC 소자 제작에 사용하고

\* 정회원, 삼성탈레스(주) H/W팀 H/W1 그룹 (H/W1 Group, H/W Team, Samsung Thales Co., LTD)

\*\* 평생회원, 동국대학교 전자공학과 (Department of Electronic Eng., Dongguk University)

※ 본 연구는 동국대학교 ERC 센터인 밀리미터파신기술 연구센터(MINT)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

접수일자: 2008년7월2일, 수정완료일: 2008년12월1일

있는 PHEMT(Pseudomorphic HEMT) 소자로는 제작이 불가능하며 높은 주파수 특성을 갖는 InP HEMT와 Metamorphic HEMT를 이용해야한다. 그러나 InP의 경우 매우 고가이며 3인치 이상의 기판에서 성장하는 것이 어려운 단점이 있어, 기존의 GaAs 기판위에 성장시킬 수 있는 MHEMT를 이용하였다. 구동증폭기 제작을 위해 사용된 MHEMT의 경우 InP HEMT의 비해 상대적으로 가격이 저렴하며, 3인치 이상의 GaAs 기판에서 성장이 가능하면서도 InP HEMT와 대등한 성능을 갖는 결과들이 발표되고 있다<sup>[4~6]</sup>.

또한 D-band 대역의 회로 설계를 위해서 능동소자인 MHEMT뿐만 아니라 CPW 및 수동소자 라이브러리를 구축하였다.

## II. 본 론

### 1. MMIC 구동증폭기의 설계

그림 1에 D-band MMIC 구동증폭기 설계에 사용된 MHEMT의 에피층을 나타내었다.

버퍼층은  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  버퍼 레이어를 0에서 50 %까지 인듐의 mole fraction을 변화시키며 semi-insulating GaAs 기판위에 1000 nm의 두께로 성장시켰다. 또한 400 nm 두께의  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  버퍼를 활성층을 보호하기 위하여 성장시켰다. 버퍼층 위에 활성층은 23 nm 두께의  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  채널층과 Si로 도핑된 double  $\delta$ -doping층으로 구성되어 있으며, 15 nm 두께의  $n^+$   $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  Cap 레이어를 소스-드레인 간의 오믹 접촉을 위해 성장시켰다. 성장된 에피층은 측정결과  $3.4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 의 electron sheet density와  $9700 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ 를 나타내었다.

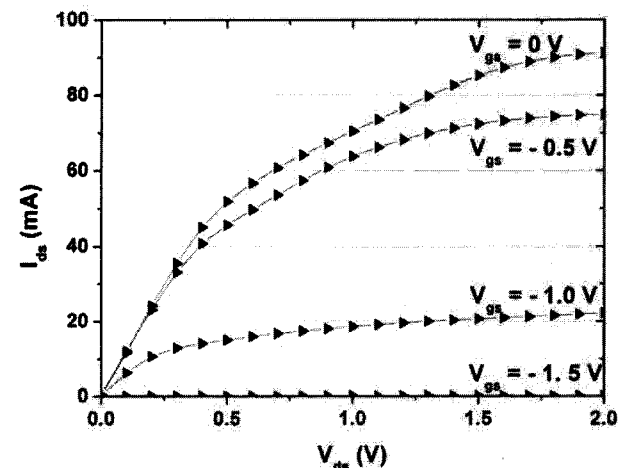
InGaAs Capping Layer $6 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 15 nm
InAlAs Donor Layer undoped 15 nm
$\delta$ -Doping Layer $4.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$
InAlAs Spacer Layer undoped 3 nm
InGaAs Channel Layer undoped 23 nm
InAlAs Spacer Layer undoped 4 nm
$\delta$ -Doping Layer $1.3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$
InAlAs Buffer Layer undoped 400 nm
$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}(x = 0 \sim 0.5)$ Metamorphic Buffer undoped 1000 nm
Semi-insulating GaAs Substrate

그림 1. Metamorphic HEMT 에피층

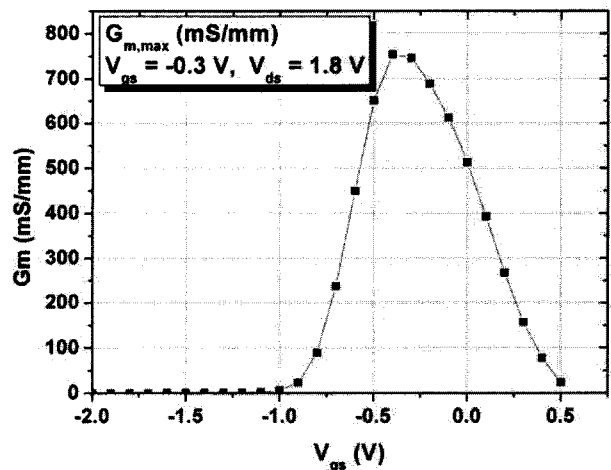
Fig. 1. Epi-structure of Metamorphic HEMT.

그림 1의 설계된 에피층을 이용하여 MHEMT를 제작하였으며 제작을 위해 적용된 단위공정으로는 소자의 전기적 격리를 위한 MESA 식각 공정, AuGe/Ni/Au 계의 금속층을 이용한 오믹 공정, E-beam 시스템을 이용한 0.1  $\mu\text{m}$   $\Gamma$ -gate 공정, 격리된 소스 전극을 상호연결하기 위한 에어 브리지 공정, 노출된 소자 채널을 보호하기 위한  $\text{Si}_3\text{N}_4$  적층 공정 등의 순으로 적용되었다[7].

제작된 MHEMT의 전류-전압 및 전달컨덕턴스 특성을 4156A Semiconductor parameter analyzer로 측정하였다. 제작된 MHEMT의 DC 특성을 그림 2에 나타내었으며 측정결과 단위 게이트 폭이 70  $\mu\text{m}$ 이고 핑거 수가 2개인 소자의 I-V 및 전달컨덕턴스 특성으로 핀치 오프 전압은 -1.5 V, 포화전류는  $V_{gs} = 0 \text{ V}$ 에서 91 mA로 드레인 전류 밀도는 650  $\text{mA}/\text{mm}$ 이며, 최대 전달컨



(a)



(b)

그림 2. Metamorphic HEMT의 DC 특성 측정 결과:  
(a) DC-IV, (b) 전달컨덕턴스 특성

Fig. 2. The DC measured result of Metamorphic HEMT:  
(a) DC-IV, (b) Transconductance characteristics.

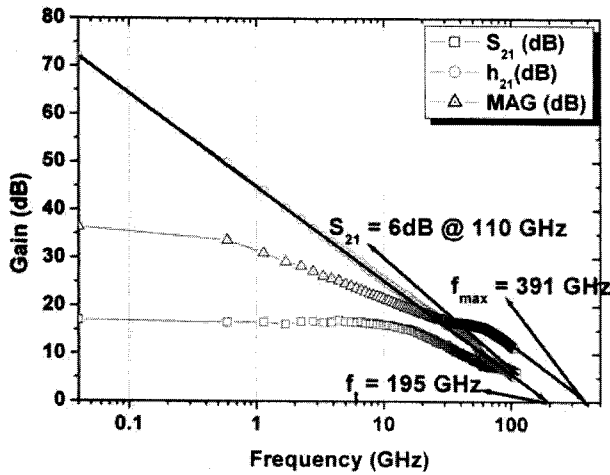
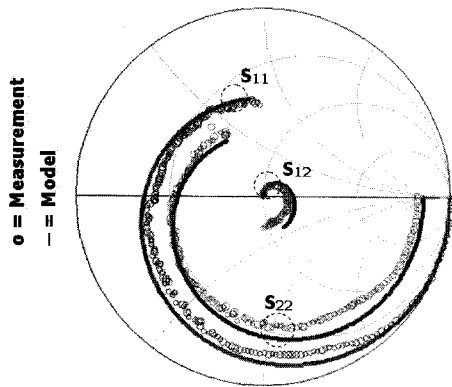
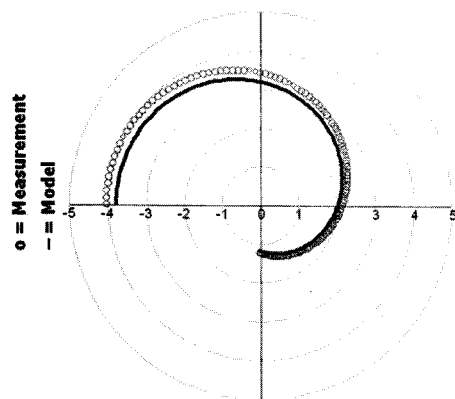


그림 3. Metamorphic HEMT의 RF 특성 측정 결과  
Fig. 3. The RF measured result of Metamorphic HEMT.



(a)  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ , and  $S_{22}$  (45 MHz ~ 110 GHz)



(b)  $S_{21}$  (45 MHz ~ 110 GHz)

그림 4. MHEMT의 소자 모델링 결과; — : modeled data, ○ : measured data: (a)  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$ , (b)  $S_{21}$

Fig. 4. The modeling result of MHEMT; — : modeled data, ○ : measured data: (a)  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$ , (b)  $S_{21}$ .

덕턴스( $G_m$ )는 760 mS/mm를 얻었다.

제작된 MHEMT의 S-parameter는 ME7808A Vector Network Analyzer를 이용하여 0.045 ~ 110 GHz의 주파수 영역에서 측정하였다. 그림 3은 70  $\mu\text{m} \times 2$  평거인 MHEMT의 RF 특성으로, 110 GHz에서 6 dB의  $S_{21}$  이득을 나타내었으며, 전류이득 차단주파수는 195 GHz, 최대공진 주파수는 391 GHz의 측정결과를 얻었다.

MMIC 증폭기를 설계하기 위해서는 소자의 동작 특성을 표현하는 소자 모델의 개발이 필수적이다. 이를 위해 본 논문에서는 Agilent사의 EEHEMT1(EEsof scalable nonlinear HEMT) 모델을 사용하여 MHEMT의 대신호 모델을 추출하였다. 대신호 모델링은 단위 게이트 폭이 70  $\mu\text{m}$ 이고 평거수가 2개인 MHEMT 소자를 추출하였다. MHEMT의 소신호 모델의 추출 결과를 45 MHz에서 110 GHz영역에서 비교하였으며, W-band 대역에서 모델과 측정값이 잘 일치하였다. MHEMT의 소신호 모델의 추출결과를 그림 4에 나타내었다.

MMIC 구동증폭기의 설계 및 제작을 위해 다양한 CPW 패턴을 설계, 제작하였다. CPW는 마이크로 스트립 라인에 비하여 후면 공정이 필요 없는 장점이 있어 밀리미터파 대역에서 많이 응용되고 있으며, 다수의 회로들이 발표되고 있다<sup>[8~10]</sup>.

CPW 라이브러리를 구축하기 위하여 35, 50, 70  $\Omega$ 의 특성 임피던스를 갖는 선로를 설계 및 제작하였으며, 불연속 특성을 고려하기 위하여 Curve, Tee, Cross의 라이브러리를 구축하였다. 또한 저항 및 캐패시터의 수동소자 라이브러리를 구축하였으며, 제작된 Ti 박막저항은 31.1~35.1  $\Omega/\square$ 의 sheet resistance 및 MIM 캐패시터는 1.17~8.89 pF의 캐패시턴스 값을 나타내었다.

그림 5에 이러한 능동, 수동소자 라이브러리를 이용하여 설계된 D-band 구동증폭기의 회로도를 나타내었다. 구동증폭기의 전체 회로는 2단으로 구성하였으며, CPW 라인을 사용하여 정합회로를 구성하였다. 바이어

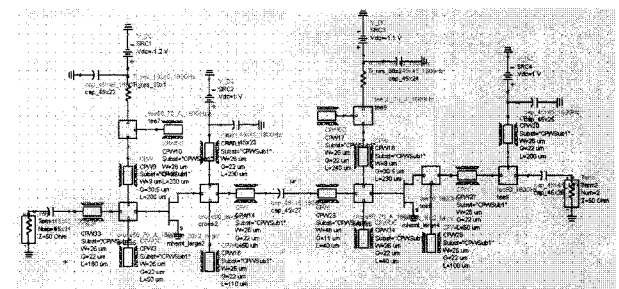


그림 5. D-band MMIC 구동증폭기 회로도  
Fig. 5. The circuit diagram of D-band drive amplifier.

스 라인은  $\lambda/4$  short stub를 사용하여 110 GHz 대역 고주파 신호의 바이어스 라인으로의 손실을 막도록 설계하였다. 또한 바이어스 라인의 저항을 추가하여 안정도를 향상시켰다. 설계된 전체 회로 패턴은 모멘텀 시뮬레이션을 이용하여 최적화를 수행하였다.

### III. 실험

MMIC 구동증폭기를 제작하기 위해 CPW 라인과  $\text{Si}_3\text{N}_4$  유전체 사용한 MIM 캐패시터, Ti 박막 저항, 에어브리지, 게이트 길이가 0.1  $\mu\text{m}$ 인 MHEMT를 칩 내부에 일괄 형성하였다<sup>[11~13]</sup>. 그림 6에 110 GHz MMIC 구동증폭기의 공정 단계를 나타내었다. 그림 7은 제작된 MMIC 증폭기의 표면사진으로 칩 면적은 1.9 mm  $\times$  1.2 mm이다.

제작된 MMIC 증폭기는 Anritsu사의 ME7808A Vector Network Analyzer를 사용하여 0.045~110 GHz 대역에서 On-wafer 측정 방법으로 S-parameter 특성 측정을 수행하였다. 증폭기의 측정결과 110 GHz에서 10.3 dB의 양호한  $S_{21}$  이득 특성을 얻었으며 입력반사

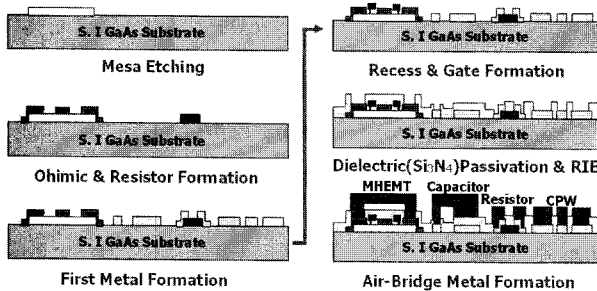


그림 6. MMIC 구동증폭기 제작 단계  
Fig. 6. Fabrication flow of MMIC drive amplifier.

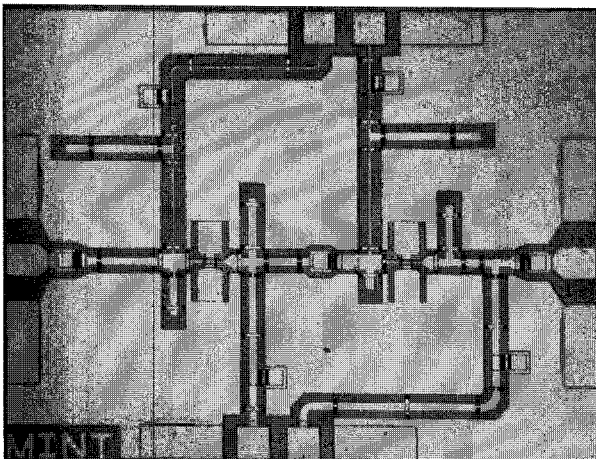


그림 7. 제작된 MMIC 구동증폭기 사진  
Fig. 7. Photograph of the fabricated drive amplifier.

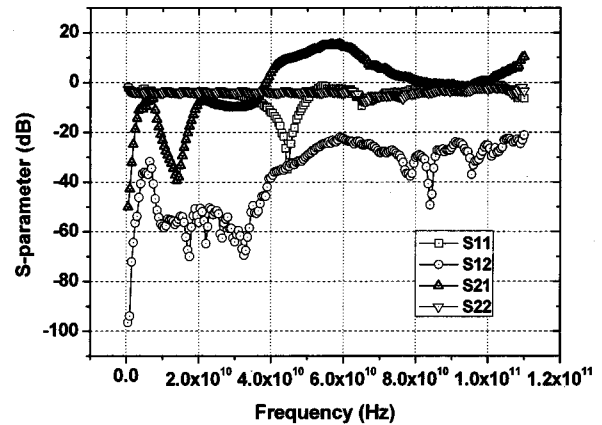


그림 8. 구동증폭기의 S-parameter 특성 측정결과  
Fig. 8. S-parameter measured results of drive amplifier.

계수는 110 GHz에서 -3.5 dB, 출력반사계수는 110 GHz에서 -6.5 dB의 특성을 나타내었다. 그림 8에 D-band MMIC 구동증폭기의 S-parameter 측정결과를 나타내었다.

### IV. 결 론

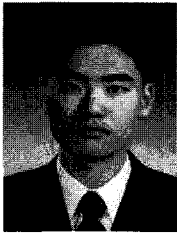
본 논문에서는 InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMT 및 CPW 라이브리리를 이용하여 110 GHz 대역의 MMIC 구동증폭기를 설계 및 제작하였다. 제작된 MHEMT의 드레인 전류 밀도는 650 mA/mm, 최대 전달컨덕턴스( $G_m$ )는 760 mS/mm를 얻었으며,  $f_T$ 는 195 GHz,  $f_{max}$ 는 391 GHz의 특성을 나타내었다. D-band MMIC 구동증폭기의 설계는 MHEMT의 대신호 소신호 모델과 CPW 라이브리리를 이용하여 설계하였다. 설계된 구동증폭기는 D-band 대역인 110에서 130 GHz 대역에서 이득을 갖지만 측정장비의 한계로 110 GHz 까지 측정되었다. MMIC 구동증폭기의 측정결과, 110 GHz에서 10.3 dB의 양호한  $S_{21}$  이득 특성을 얻었으며 입력반사 계수는 110 GHz에서 -3.5 dB, 출력반사계수는 110 GHz에서 -6.5 dB의 특성을 나타내었다.

본 논문에서 연구된 증폭기는 110 GHz 주파수 대역에서 국내에 첫 번째로 보고되는 MMIC 구동증폭기로 양호한 이득 특성을 나타내어 향후 D-band 대역 레이더 및 무선통신 시스템에 응용될 수 있을 것으로 예상된다. 또한 연구된 MMIC 증폭기의 설계 및 제작결과를 바탕으로 향후 소자 성능 향상과 회로 설계 최적화를 통해 더욱 우수한 성능의 D-band 대역의 MMIC 증폭기를 제작할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] B.H. Lee, D. A, M.K. Lee, B.O. Lim, J.H. Oh, S.D. Kim, J.K. Rhee, J. D. Park, and S.Y. Yi, "Low Conversion Loss and High LO-RF Isolation 94-GHz Active Converter" *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 54, No. 6, pp. 2422-2430, June 2006.
- [2] J.D. Park and W.J. Kim "An Efficient Method of Eliminating the Range Ambiguity for a Low-Cost FMCW Radar Using VCO Tuning Characteristics" *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 54, No. 10, pp. 3623-3629, Oct. 2006.
- [3] B.H. Lee, D. An, M-K. Lee, B-O. Lim, S-D. Kim, and J-K. Rhee, "Two-Stage Broadband High-Gain W-band Amplifier Using 0.1- $\mu$ m Metamorphic HEMT Technology," *IEEE Elec. Device Letters*, vol. 25, no. 12, pp. 766-768, Dec. 2004.
- [4] C. S. Whelan, W. E. Hoke, R. A. McTaggart, S. M. Lardizabal, P. S. Lyman, P. F. Marsh, T. E. Kazior, "Low Noise In<sub>0.32</sub>(AlGa)<sub>0.68</sub>As/In<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>As Metamorphic HEMT on GaAs substrate with 850 mW/mm output power density," *IEEE Elec. Device Lett.*, vol. 21, no. 1, pp. 5~8, Jan. 2000.
- [5] Bok-Hyung Lee, Dong-Hoon Shin, Sam-Dang Kim, and Jin-Koo Rhee, "High Maximum Frequency of Oscillation of 0.1  $\mu$ m Off-set  $\Gamma$ -Shaped Gate InGaAs/InAlAs/GaAs Metamorphic HEMTs," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 43, no. 6, pp. 427~430, Sep. 2003.
- [6] S. C. Kim, B. O. Lim, H. S. Lee, T. J. Baek, D.H. Shin, and J. K. Rhee, "50 nm InGaAs/InAlAs- H. Shin, and J. K. Rhee, "50 nm InGaAs/InAlAs Transistors Using Double Exposure at 50 kV Electron-beam Lithography Without Dielectric Support," *J. Vad. Sci. Technol. B*, vol. 22, no. 4, pp. 1807-1810, Jul/Aug 2004.
- [7] B. H. Lee, S. D. Kim, and J. K. Rhee, "Small-Signal Analysis of High Maximum Frequency of Oscillation 0.1- $\mu$ m Off-Set  $\Gamma$ -Shaped Gate InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic High Electron Mobility Transistors" *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 43, PP.1914-1918, 2004.
- [8] W. R. Curtice, and R. L. Camisa, "Self-consistent GaAs FET Models for Amplifier Design and Device Diagnostics," *IEEE Trans. Micro. Theory & Tech.*, vol. 32, pp. 1573~1578, Dec. 1984.
- [9] Dan An, Bok Hyung Lee, Yeon Sik Chae, Hyun Chang Park, Hyung Moo Park and Jin Koo Rhee, "Low LO Power V-band CPW Down-Converter Using a GaAs PHEMT," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 41, no. 6, pp. 1013~1016, Dec. 2002.
- [10] Won-Young Uhm, Woo-Suk Sul, Han-Shin Lee, Sam-Dong Kim, Hyung-Moo Park, and Jin-Koo Rhee, "High-Performance V-band Monolithic Quadruple Subharmonic Mixer With Anti-Parallel Diode Pair," *Micro. and Optical Tech. Lett.*, vol. 40, no. 5, pp. 349~352, March 2004.
- [11] Tae-Sin Kang, Seong-Dae Lee, Bok-Hyoung Lee, Sam-Dong Kim, Hyun-Chang Park, Hyung-Moo Park, and Jin-Koo Rhee, "Design and Fabrication of a Low-Noise Amplifier for the V-band" *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 41, no. 4, pp. 533~538, Oct. 2002.
- [12] J. W. Shin, Y. S. Yoon, S. D. Lee, H. C. Park and J. K. Rhee, "Effects of He gas on hydrogen content and passivation of GaAs PHEMT with SiN films," *2000 Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices (AWAD)*, pp. 121~124, 2000.
- [13] Il-Hyeong Lee, Seong-Dae Lee, and Jin-Koo Rhee, "Studies on Air-Bridge Processes for mm-wave MMIC's Applications," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 35, no. 12, pp. S1043~S1046, 1999.

## 저 자 소 개



이 복 형(정회원)

1999년 동국대학교 전자공학과  
공학사2001년 동국대학교 전자공학과  
공학석사2006년 동국대학교 전자공학과  
공학박사2006년~2007년 동국대학교 밀리미터파신기술  
연구센터 연구교수

2007년~현재 삼성탈레스(주) 전문연구원

<주관심분야: MMIC 설계 및 공정, 밀리미터파  
소자 제작>

이 진 구(평생회원)

1969년 국립항공대학교

전자공학과 공학사

1975년 서울대학교 전자공학과  
공학석사1982년 Oregon State University,  
전기공학과 공학박사

1985년 Cray Research, USA, Research Scientist

1985년 Microwave Semiconductors, USA,  
Senior Engineer1990년~1991년 University of Michigan,  
Visiting Research Scientist

1995년~현재 한국전자파학회 이사

2005년~2006년 대한전자공학회 회장

1985년~현재 동국대학교 공과대학 전자공학과  
교수

1999년~현재 밀리미터파신기술연구센터 소장

&lt;주관심분야: MMIC 설계, 소자모델링&gt;