

논문 2010-47TC-10-10

소스 피드백을 이용한 고이득 W-band MMIC 증폭기 설계

(Design of High-gain W-band MMIC Amplifier Using Source Feedback)

박상민*, 김영민**, 고유민**, 서광석***, 권영우***, 정진호****

(Sangmin Park, Youngmin Kim, Yumin Koh, Kwang-Seok Seo, Youngwoo Kwon, and Jinho Jeong)

요약

본 논문에서는 70 nm mHEMT MMIC 기술을 이용한 고이득 W-band 증폭기를 제시한다. W-band에서 고이득 특성을 얻기 위하여 공통 소스 FET의 소스 피드백 라인의 길이를 조절하면 설계 주파수에서 이득이 최대가 되도록 하였다. 이 라인의 길이를 조절하여 94 GHz에서 MAG를 0.8 dB 향상시킬 수 있음을 시뮬레이션에서 확인하였다. 뿐만 아니라, 이 소스 피드백 라인은 FET의 입력 임피던스도 변화시켜 입력 정합을 용이하게 한다. 이 현상을 이용하여 공통 소스 FET 4단으로 이루어진 W-band 증폭기를 CPW로 설계하였다. 제작된 W-band 증폭기는 측정 결과 70~103 GHz에서 22.0 dB 이상의 아주 우수한 이득 특성을 보였다.

Abstract

In this paper, a high gain W-band amplifier is presented using 70 nm mHEMT MMIC technology. The length of source feedback line of common-source FET is carefully determined to maximize the gain at a design frequency. Simulation shows that MAG can be increased by 0.8 dB by optimizing the length of this line. In addition, this feedback line changes the input impedance of the common-source FET in a way that the input match can be made easier. In this work, 4-stage amplifier is designed on CPW using the source feedback. The measurement shows the excellent gain performance higher than 22.0 dB across 70~103 GHz.

Keywords: amplifier, HEMT, MMIC, W-band

I. 서론

통신 시장의 발전으로 마이크로파 대역의 주파수 자원이 포화되어가고 있어 주파수 대역의 확장이 절실하게 필요한 상황이다. 이에 따라서, 더 높은 주파수 대역인 밀리미터파 대역을 기반으로 하는 기술이 관심을 받고 있으며, 꾸준한 투자와 연구가 이루어지고 있다. V-band (50~75 GHz)의 60 GHz 대역은 산소분자의

강한 신호 흡수 특성 때문에 비교적 사용거리가 짧은 가정 및 사무용 무선 LAN에 응용되고 있으며, W-band (75~110 GHz)의 77 GHz는 공기 중에서 신호의 흡수·감쇠가 적어 장거리 레이더 시스템, 특히, 자동차 충돌방지 시스템에 응용되고 있다. 그리고 94 GHz는 옷, 안개나 먼지 등에 대하여 투과하는 성질을 이용한 이미지 센서로 응용 및 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1]

이러한 밀리미터파 대역에서 회로를 구현하기 위해서는 높은 주파수에서 우수한 이득 및 잡음 특성을 나타내는 트랜지스터에 대한 연구가 필수적이다. 밀리미터파에서 사용되는 대표적인 화합물 반도체 트랜지스터로 HEMT (high electron mobility transistor)가 있으며 GaAs와 InP로 제작되고 있다. InP 기반의 HEMT는

* 학생회원, 광운대학교

(Kwangwoon University)

** 학생회원, *** 정회원, 서울대학교 전기공학부

(Seoul National University)

**** 정회원-교신저자, 서강대학교

(Sogang University)

접수일자: 2010년8월25일, 수정완료일: 2010년10월13일

GaAs 기반의 HEMT보다 높은 이득 특성과 낮은 잡음 특성, 높은 차단 주파수 등의 여러 장점 때문에 밀리미터파 대역에서 동작하는 증폭기에 많이 사용되고 있다. 그러나, GaAs 기판에 비하여 InP 기판은 부서지기 쉬우며 가격이 비싸다는 단점이 있다.^[2~6]

이러한 단점을 보완한 것이 mHEMT (metamorphic HEMT)이다. mHEMT는 GaAs 기판위에 버퍼층을 두어 InP HEMT에서 전자의 이동 채널로 사용하는 InGaAs 층을 둔 것으로 InP HEMT와 대등한 주파수 특성을 가지면서 가격은 그에 비해 낮은 장점이 있다.^[9~10] 하지만, mHEMT가 밀리미터파 대역에서 우수한 이득 특성을 보이지만, 트랜지스터의 이득은 주파수 제곱으로 감소하기 때문에 W-band에서는 여전히 높은 이득을 얻기가 어렵다.

본 논문에서는 공통 소스 FET의 소스 단자에 인덕터 성분의 피드백을 연결하여 W-band에서 높은 이득을 가지는 증폭기를 설계하였다. 일반적으로 인덕터 성분의 소스 피드백은 저잡음 증폭기를 설계할 때 많이 활용되는데, 저잡음 임피던스 정합을 용이하게 하며 증폭기의 안정도를 개선시키지만 이득은 감소시키는 것으로 알려져 있다.^[11~12]

본 논문에서는 소스 피드백으로 사용된 전송선의 길이를 조절하면 W-band와 같은 밀리미터파 대역에서 트랜지스터의 MAG (maximum available gain)가 증가한다는 사실을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 이 현상을 이용하여 고이득 W-band MMIC 증폭기를 설계 제작 하였다.

II. 소스 피드백을 이용한 트랜지스터 MAG 개선

본 논문에서 사용한 트랜지스터는 게이트 길이가 70 nm인 mHEMT로서 서울대 반도체공동연구소에서 제작 되었다. 이 mHEMT의 $f_T = 215$ GHz, $f_{max} = 235$ GHz, $g_m = 780$ mS/mm이다.^[13]

그림 1은 게이트 면적이 $2 \times 25 \mu\text{m}$ 인 mHEMT의 소신호 등가 회로와 소신호 측정에서 추출된 각 소자의 값을 나타낸 것이다. 이때의 게이트 바이어스 전압은 -0.3 V, 드레인 전압 2.0 V, 드레인 전류는 7.4 mA이다. 그리고, 소스 단자에는 특성임피던스가 53Ω 인 전송선이 연결되어 있다. 그림 2는 이 소스 피드백 라인의 길이에 따른 MAG 변화를 나타낸 것이다. 이 라인의 길이가 0, 즉 소스가 접지되어 있을 경우 94 GHz에서

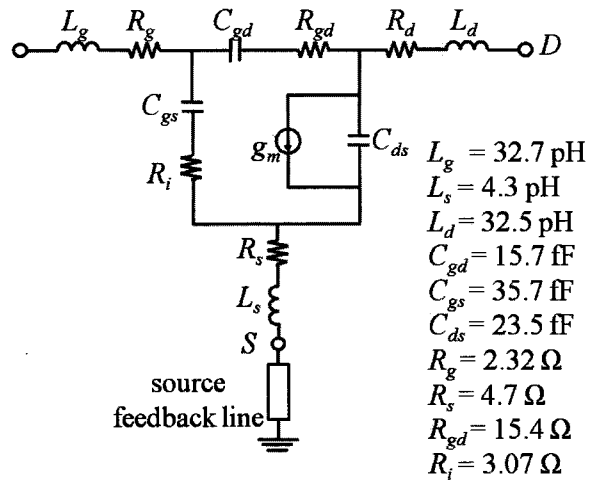


그림 1. HEMT의 소신호 등가회로

Fig. 1. Small-signal equivalent circuit of HEMT.

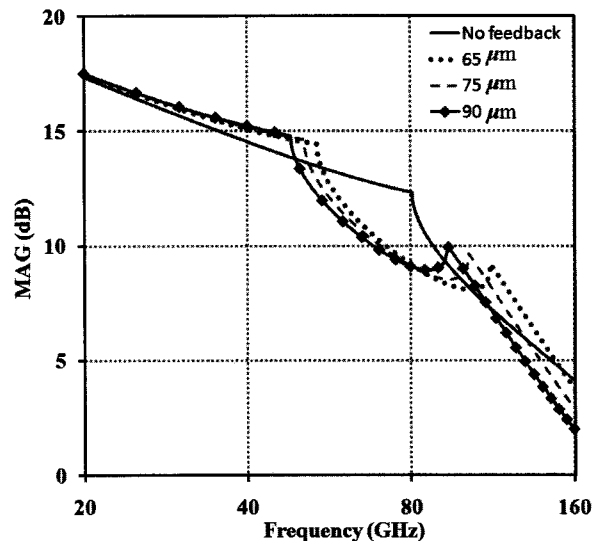


그림 2. 소스 피드백 라인 길이에 따른 MAG의 변화

Fig. 2. MAG variation with the length of source feedback line.

MAG는 8.9 dB이다. 소스 피드백 라인의 길이를 증가시키면 50~90 GHz 대역에서는 MAG가 감소하지만, 90 GHz 이상에서는 오히려 MAG가 증가한다는 사실을 알 수 있다. 특히, MAG가 증가하는 주파수는 소스 피드백 라인의 길이에 따라 조절이 가능하다. 이러한 현상은 전송선 대신에 인덕터를 연결했을 때도 나타난다. 인덕터 값을 변화시키면서 MAG를 시뮬레이션 해보면 그림 2와 같은 양상으로 MAG가 개선되는 주파수가 변동함을 확인할 수 있다.

이 트랜지스터의 경우, 소스 피드백 라인의 길이가 90 μm 인 경우 94 GHz에서 MAG가 0.8 dB 정도 증가 하였으며 이 보다 긴 라인의 경우 MAG가 감소하였다.

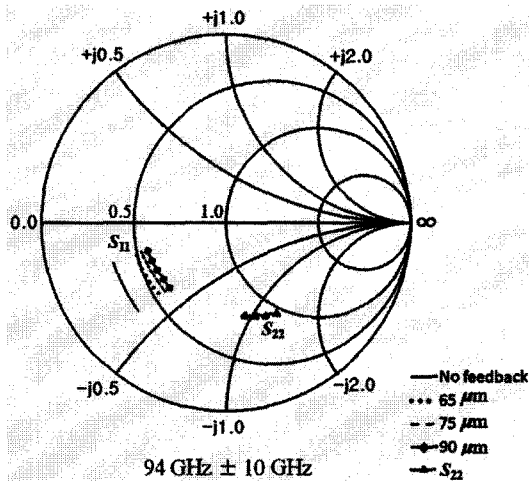


그림 3. 소스 피드백 라인 길이에 따른 S_{11} 의 변화
 Fig. 3. S_{11} variation with the length of source feedback line.

이 피드백 라인을 인덕터로 대체할 경우 25.5 pH의 인덕터가 소스에 연결되어 있을 때 0.8 dB 정도의 MAG 개선이 있었다. 따라서, 소스 단자에 90 μm 길이를 갖는 피드백 라인을 연결하여 94 GHz에서 높은 이득을 갖는 증폭기를 설계하였다.

소스 피드백을 연결하면 트랜지스터의 S_{11} 역시 영향을 받게 된다. 소스 피드백의 길이에 따른 S_{11} 변화를 스미스 차트에 나타내면 그림 3과 같다. 주파수는 94 ± 10 GHz이다. 이 그림을 통하여 소스 피드백의 길이가 90 μm 로 증가함에 따라 S_{11} 이 점점 50 Ω 에 근접하는 것을 알 수 있는데, 이것은 소스 피드백 라인에 의한 인덕턴스가 입력 임피던스의 실수부를 증가시키기 때문이다. 결론적으로 소스 피드백 라인은 입력 임피던스 정합을 용이하게 하는 장점이 있다. 이 그림에 트랜지스

터의 S_{22} 도 나타내었는데, 소스 피드백 라인의 길이에 따라 S_{22} 의 변화는 거의 없었다. 따라서 소스 피드백 라인을 적절히 결정하게 되면 설계 주파수에서 MAG를 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라, 입력 정합 회로도 보다 쉽게 설계할 수 있게 된다.

III. 고이득 W-band 증폭기 설계

그림 4는 설계된 W-band 증폭기의 회로도로서 총 4단으로 구성되어 있다. 각 단 트랜지스터의 소스 단에는 90 μm 길이의 전송선이 연결되어 있어 94 GHz에서 MAG를 증가시키고 입력 정합을 간편하도록 하였다. 전체 4단 중, 둘째 단과 셋째 단은 서로 동일하다. 입력단, 중간단, 출력단 임피던스 정합은 전송선으로만 구성하였다.

게이트 및 드레인 바이어스 회로는 94 GHz에서 $\lambda/4$ 길이보다 조금 짧은 단락 스테브를 사용하여 구성하였고, 이것은 임피던스 정합으로도 사용된다. 그리고 바이어스 회로 중간에 저항을 삽입하여 저주파에서 전체 회로의 안정도를 높였다.

회로 설계에 사용한 전송선은 CPW (coplanar wave guide)이다. CPW는 비아홀 공정이 필요하지 않고, 기판을 갈아서 얇게 만들지 않아도 되는 장점이 있다. 사용한 GaAs 기판의 두께는 650 μm 이다. CPW의 특성을 좀 더 정확히 해석하기 위하여 ADS(Advanced Design System)의 모멘텀을 이용하였다.

그림 5에 제작된 W-band 증폭기의 레이아웃을 나타내었으며, 전체 크기는 DC 패드와 RF 패드를 포함하여 1.77 mm \times 0.86 mm 이다.

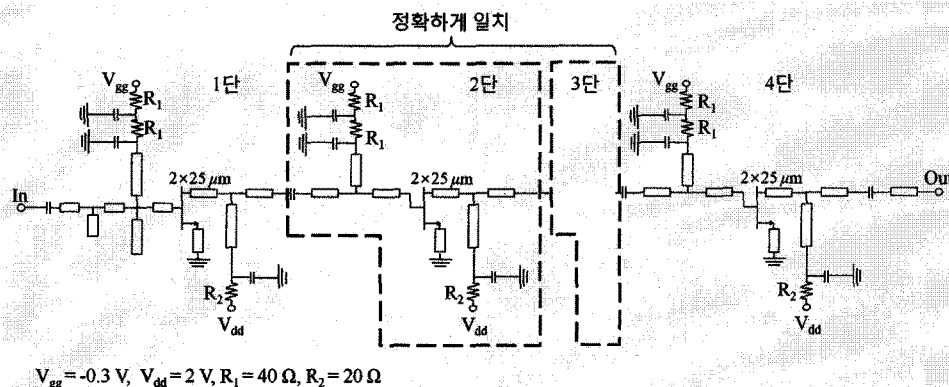


그림 4. W-band 증폭기 회로도
 Fig. 4. Schematic of W-band amplifier.

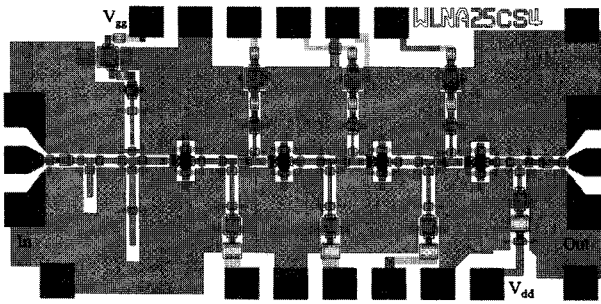


그림 5. 설계된 W-band MMIC 증폭기의 레이아웃
Fig. 5. Layout of the designed MMIC amplifier.

IV. 측정 결과

제작된 W-band 증폭기는 웨이퍼 상에서 프로브를 이용하여 측정하였다. 4단 증폭기는 드레인 전압 $V_{dd} = 2.0$ V, 게이트 전압 $V_{gg} = -0.3$ V의 바이어스를 가했으며 그때 총 드레인 바이어스 전류는 $I_{total} = 28.0$ mA였다. 그림 6은 측정된 S-parameters를 시뮬레이션과 함께 보여준다. 측정 결과, 제작된 W-band 4단 증폭기는 94 GHz에서 22.6 dB의 이득 특성을 보였고, 70 ~ 103 GHz에서 22.0 dB 이상의 이득을 가지는 것을 확인하였다. 94 GHz에서 S_{11} 은 -11.0 dB이고, S_{22} 는 -8.2 dB로 측정되었다. 시뮬레이션에 비하여 측정된 입출력 반사 계수가 좋지 못하는데 이 차이는 트랜지스터 모델, CPW 해석의 오차로 인한 결과라고 생각된다.

표 1은 기존에 발표된 W-band MMIC 증폭기와 본 논문을 비교한 것이다. 다른 mHEMT를 이용한 참고문헌과 비교해 보면 본 연구에서 설계된 증폭기가 94

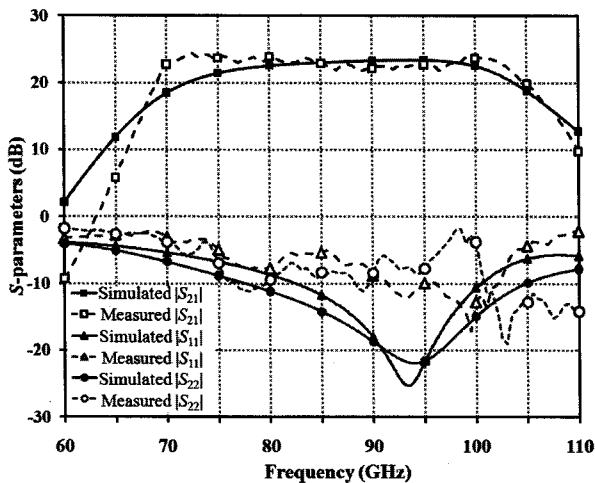


그림 6. S-parameters (시뮬레이션과 측정결과)
Fig. 6. S-parameters (simulation and measurement).

표 1. 기존에 발표된 논문들과의 비교

Table 1. Comparison with the reported MMIC amplifiers.

Ref.	Technology	f_{max} [GHz]	frequency [GHz]	Total Stage	Gain [dB]	Gain /Stage [dB]
[1]	0.1 μ m MHEMT	-	80 ~ 90	2	8 dB at 85 GHz	4.0
[5]	0.1 μ m InPHEMT	-	85 ~ 115	4	16 dB at 94 GHz	4.0
[7]	0.05 μ m MHEMT	-	60 ~ 80	3	9.6 dB at 70 GHz	3.2
[8]	0.07 μ m InPHEMT	-	75 ~ 94	1	8 dB at 94 GHz	8.0
This work	0.07 μ m MHEMT	235	70 ~ 103	4	22.4 dB at 103 GHz	5.9

GHz에서 단위 스테이지당 이득이 가장 높다는 것을 알 수 있다. 그리고, 참고문헌 [8]은 70 nm InP HEMT를 이용한 1단 증폭기로서 94 GHz에서의 이득이 8 dB이다. 그러나 100 GHz 이상의 주파수에서의 이득이 급격히 감소하여, 103 GHz에서의 이득이 약 4.0 dB이다. 본 논문은 94 GHz에서의 이득이 22.6 dB이고, 103 GHz에서 22.0 dB 이상의 이득을 나타낸다. 이러한 결과들을 비교해 보면, 본 논문에서 제시하는 소스 피드백 방법이 밀리미터파 대역에서 높은 이득을 가지는 증폭기 설계에 효과적임을 알 수 있다.

IV. 결 론

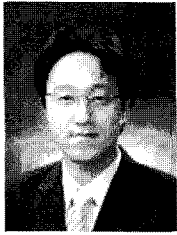
본 논문에서는 mHEMT의 소스 피드백 라인 길이를 조절하여 설계 주파수에서 MAG를 최대화하였고, 이러한 특성을 이용하여 W-band 증폭기를 설계·제작 하였다. 제작된 4단 W-band 증폭기의 이득이 70~103 GHz에서 22.6~24.4 dB로 측정 되었으며, 이는 증폭기 각 단당 5.9 dB의 이득에 해당한다. 다른 참고 문헌과 비교했을 때 이 값은 아주 우수한 값으로서, 본 논문에서 제안한 방법이 효과적임을 나타낸다. 이러한 고이득 밀리미터파 대역 단일칩 MMIC 증폭기는 밀리미터파 시스템을 구현하는데 유용하게 사용되리라 기대한다.

참 고 문 헌

[1] C. Schworer, A. Tessmann, M. Leich, A. Leuther, S. Kudszus, A. Bessemoulin, and M.

- Schlechtweg, "Coplanar High Performance MMICs in MHEMT and PHEMT Technology for Applications up to 100 GHz," in *Proc. Gallium Arsenide & Other Semiconductors Application Symposium*, pp. 511-514, Milan, Sep 2002.
- [2] P. C. Chao, A. J. Tessmer, Kuang-Hann G. Duh, Pin Ho, Ming-Yih Kao, Phillip M. Smith, James M. Ballingall, S. M. J. Liu, and A. A. Jabra, "W-band low-noise InAlAs/InGaAs lattice-matched HEMT's," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 11, pp. 59-62, Jan 1990.
- [3] K. C. Hwang, P. Ho, M. Y. Kao, S. T. Fu, J. Liu, P. C. Chao, P. M. Smith, and A. W. Swanson, "W-band high power passivated 0.15 μm InAlAs/InGaAs HEMT device," in *Proc. Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 18-20, Mar 1994.
- [4] K. H. G. Duh, S. M. J. Liu, M. Y. Kao, S. C. Wang, O. S. A. Tang, P. Ho, P. C. Chao, and P. M. Smith, "Advanced millimeter-wave InP HEMT MMIC's," in *Proc. Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 493-496, 1993.
- [5] J. W. Archer, R. Lai, "Ultra-Low-Noise InP-MMIC Amplifiers for 85-115 GHz," *2000 Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 173-176, Dec 2000.
- [6] K. C. Hwang, P. C. Cho, C. Creamer, K. B. Nichols, S. Wang, D. T. Kong, D. Dugas, and G. Patton, "Very high gain millimeter-wave InAlAs/InGaAs/GaAs metamorphic HEMT's," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 20, No. 11, pp. 551-553, Nov 1999.
- [7] Arnulf Leuther, Rainer Weber, Michael Dammann, Michael Schlechtweg, Michael Mikulla, Martin Walther, Gunter Weimann, "Metamorphic 50 nm InAs-Channel HEMT," *Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 129-132, May 2005.
- [8] Mikael Malmkvist, Anders Mellberg, and Jan Grahn, "A W-band MMIC amplifier using 70-nm gate length InP HEMT technology," in *Proc. Gallium Arsenide & Other Semiconductor Application Symposium*, pp. 165-168, Oct 2005.
- [9] C. S. Whelan, W. E. Hoke, R. A. McTaggart, S. M. Lardizabal, P. S. Lyman, P. F. Marsh, and T. E. Kazior, "Low Noise $\text{In}_{0.32}(\text{AlGa})_{0.68}\text{As}/\text{In}_{0.43}\text{Ga}_{0.57}\text{As}$ Metamorphic HEMT on GaAs Substrate with 850 mW/mm Output Power Density," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 21, No. 1, pp. 5-8, Jan 2000.
- [10] C. S. Whelan, P. F. Marsh, W. E. Hoke, R. A. McTaggart, C. P. McCarroll, and T. E. Kazior, "GaAs Metamorphic HEMT (MHEMT): An Attractive Alternative to InP HEMTs for High Performance Low Noise and Power Applications," in *Proc. Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 337-340, May 2000.
- [11] Mou Shouxian, Ma Jianguo, Yeo Kiat Seng, and Do Manh Anh, "An Integrated Dual-band Low Noise Amplifier for GSM and Wireless LAN Applications," *Int. Conf. System On Chip*, pp. 67-70, Sep 2003.
- [12] Mou Shouxian, Ma Jianguo, Yeo Kiat Seng, and Do Manh Anh, "An Integrated SiGe RF Bandpass Low Noise Amplifier for Multi-band Wireless Communication Applications," *2003 Asia-Pacific Conference*, pp. 420-424, Sept 2003.
- [13] Sungwon Kim, Yumin Koh, and Kwangseok Seo, "High performance 70 nm $\text{In}_{0.8}\text{GaP}/\text{In}_{0.4}\text{AlAs}/\text{In}_{0.35}\text{GaAs}$ Metamorphic HEMT With Pd Schottky Contacts," *Int. Conf. Solid State Devices and Materials*, pp. 520-521, 2007.

저 자 소 개



박 상 민(학생회원)
2007년 광운대학교 전자공학과
학사 졸업.
2010년 광운대학교 전자통신
공학과 석사 졸업.
<주관심분야 : MMIC 설계>



권 영 우(정회원)
1988년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.
1990년 미시건 대학교
전기공학 석사 졸업.
1994년 미시건 대학교
전기공학 박사 졸업.
1996년~서울대학교 전기공학부 교수.
<주관심분야 : MMIC, RF MEMS, RF PA>



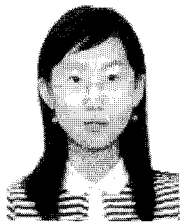
김 영 민(학생회원)
2001년 성균관대학교 전자공학과
학사 졸업.
2005년 서울대학교 전기공학부
석사 졸업.
2005 ~서울대학교 전기공학부
박사 과정.

<주관심분야 : MMIC 설계>



서 광 석(정회원)
1976년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.
1978년 KAIST 석사 졸업.
1987년 미시건 대학교 전기공학
박사 졸업.
1989년~서울대학교 전기공학부
교수.

<주관심분야 : 초고속 소자 물리 및 기술, 화합물
반도체, 고주파 회로 설계>



고 유 민(학생회원)
2004년 경북대학교 전기공학과
학사 졸업.
2008년 서울대학교 전기공학부
석사 졸업.
2008년~서울대학교 전기공학부
박사 과정.

<주관심분야 : MMIC 설계 및 제작, system-
on-packaging>



정 진 호(정회원)
1997년 서울대학교 전기공학부
학사 졸업.
1999년 서울대학교 전기공학부
석사 졸업.
2004년 서울대학교 전기컴퓨터
공학부 박사 졸업.
2010년~서강대학교 전자공학과 조교수.

<주관심분야 : MMIC, RF PA>