

MEMS 기술을 이용한 180° 하이브리드 결합기가 집적된 단일 평형 혼합기의 설계 및 제작에 관한 연구

Design of the 60 GHz Single Balanced Mixer Integrated with 180° Hybrid Coupler Using MEMS Technology

김성찬 · 임병옥 · 백태종 · 고백석 · 안 단 · 김순구 · 신동훈 · 이진구

Sung-Chan Kim · Byeong-Ok Lim · Tae-Jong Baek · Baek-Seok Ko · Dan An ·
Soon-Koo Kim · Dong-Hoon Shin · Jin-Koo Rhee

요 약

본 논문에서는 표면 MEMS 기술을 이용하여 제작된 180° 하이브리드 결합기가 집적된 60 GHz 대역의 단일 평형 혼합기를 설계·제작하였다. 혼합기에 사용된 180° 하이브리드 결합기는 substrate에 의한 dielectric loss를 최소화하기 위하여 polyimide dielectric을 지지대로 사용하여 신호선이 공기 중에 떠 있는 형태의 마이크로스트립 라인을 이용하여 설계하였으며, 이때 지지대의 높이는 10 μm 이고 면적은 20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 을 사용하였다. 제작된 혼합기의 측정 결과, LO 주파수가 58 GHz에서 LO power가 7.2 dBm, 57 GHz에서 RF power가 -15 dBm 일 때, 15.5 dB의 변환 손실과 -40 dB의 RF-LO isolation 특성을 얻었다. 본 논문에서 제안된 혼합기는 RF MEMS 수동 소자를 MMIC와 집적화 함으로써 칩 성능의 감소 없이 크기를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

Abstract

In this paper, we have developed a new type of single balanced mixer with the RF MEMS 180° hybrid coupler using surface micromachining technology. The 180° hybrid coupler in this mixer is composed of the dielectric-supported air gapped microstriplines(DAMLs) which have signal line with 10 μm height to reduce substrate dielectric loss and dielectric posts with size of 20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ to elevate the signal line on air with stability. At LO power of 7.2 dBm, the conversion loss was 15.5 dB for RF frequency of 57 GHz and RF power of -15 dBm. Also, we obtained the good RF to LO isolation of -40 dB at LO frequency of 58 GHz and LO power of 7.2 dBm. The main advantage of this type of mixer is that we are able to reduce the size of the chips due to integrating the MEMS passive components.

Key words : DAML, RF MEMS, Single Balanced Mixer, Surface Micromachining

I. 서 론

최근 통신 시장의 급속한 발전은 가용 주파수 대역의 불가피한 확장을 이루었으며 이에 따라 밀리미터파 대역에 대한 관심이 집중되고 있다. 또한 능동 소자와 수동 소자를 한 곳에 집적화 하여 시스템의

소형화와 저가격화를 실현할 수 있는 MMICs(Monolithic Microwave Integrated Circuits) 기술의 발전이 필수적으로 요구되고 있다. 그러나 현재 MMICs 회로에 적용될 수 있는 수동 소자의 크기와 구조가 제한되어 있어 집적화에 많은 어려움이 남아 있다. 그러므로 최근에는 구조적 제약이 자유로우며 고성능

「이 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수 연구센터 지원금에 의하여 수행되었다. 동국대학교 밀리미터파 신기술연구센터(Millimeter-wave INnovation Technology Research Center, MINT, Dongguk University)

· 논문 번호 : 20050607-064

· 수정완료일자 : 2005년 7월 7일

소자의 제작이 용이한 표면 마이크로머시닝(surface micromachining) 기술을 이용하여 수동 소자 제작의 문제점을 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 밀리미터파 대역에서 사용 가능한 초고주파 집적 회로에서 우수한 특성을 갖는 수동 소자의 가장 기본이 되는 저 손실 전송 선로를 구현하기 위한 노력이 여러 연구 그룹에서 활발히 이루어지고 있다^{[1]~[5]}. 특히 몇 개의 연구 그룹에서 제안된 전송 선로 구조는 고주파에서의 손실 특성에 관해서는 매우 우수한 특성을 보여 주고 있으나 공정 과정이 매우 복잡하여 MMIC 회로에 적용하기에는 고려해야 할 사항을 많이 가지고 있다^[5]. 최근에 우리 연구 그룹에서는 공정 과정이 기존의 MEMS 공정에 비해 간단하며 기존의 MMIC 회로의 제작 공정과 높은 호환성을 갖는 DAMLs(Dielectric Air-gapped supported Microstrip Line structure)를 제안하였다^[6]. 제안된 구조는 신호선과 접지면 사이에 공기를 유전체로 가지는 마이크로스트립 전송선로로써 마이크로머시닝 기술을 이용한 유전체 지지대를 사용하여 신호선을 공기 증으로 띄워 기판 유전체 손실을 최소화하였다. DAML 구조의 제작 과정은 일반적인 MMIC 기술과 호환이 가능하며, 더욱이 DAML 구조의 접지면은 CPW 구조를 사용하여 제작되는 MMIC의 접지면과 동일한 접지면을 사용하므로 DAML을 사용하여 구현된 RF MEMS 소자는 평면 구조인 MMICs와 쉽게 집적될 수 있다.

본 논문에서 새롭게 제안한 전송선을 이용하여 제작된 180° 하이브리드 결합기와 MMIC 회로의 집적화 가능성을 증명하기 위하여 단일 평형 혼합기를 설계하고 제작하였다. DAML을 사용하여 제작된 180° 하이브리드 결합기는 기판 유전체에 의한 손실을 최소화함으로써 삽입 손실을 감소시킬 수 있으며 평면 구조의 MMIC 회로와 3차원적으로 집적 가능하므로 공간을 효율적으로 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

II. MEMS 180° 하이브리드 결합기와 혼합기의 설계

두 개의 다이오드를 사용하여 설계한 새로운 구조의 단일 평형 혼합기는 하향 혼합기에서 가장 문

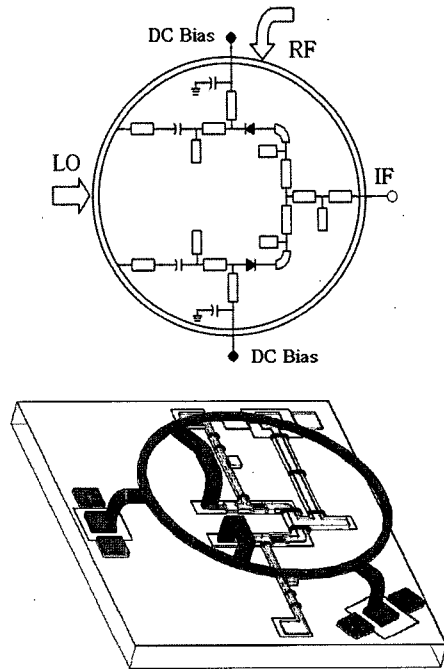


그림 1. 단일 평형 혼합기의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the single balanced mixer.

제가 되는 RF 주파수와 LO 주파수의 입력 포트를 그림 1에서 보여 주는 것과 같이 DAML 구조를 이용한 180° 하이브리드 결합기를 사용하여 구현함으로써 RF-LO isolation 특성을 극대화시킬 수 있으며, 결합기 출력 포트의 위상차 특성을 이용하여 기본적으로 두 개의 다이오드에 걸리는 파형의 위상차를 180°로 유지시킨다.

우선 우리는 DAML과 CPW 사이의 변환 부분을 포함하는 180° 하이브리드 결합기를 설계하고 제작하여 특성을 확인하였다^[7]. RF MEMS 하이브리드 결합기는 60 GHz에서 신호선의 특성 임피던스와 파장을 기반으로 설계하였다. 제작된 결합기의 반경은 1.33 mm이고 공기에 떠있는 신호선의 높이는 접지면으로부터 10 μm이다. 측정 결과, 60 GHz에서 -3.38 dB의 결합 손실과 -16.5 dB의 반사 손실 및 -33.5 dB의 격리도 특성을 얻었으며 두 개 출력 단자간에 180 ± 1°의 위상차를 얻었다. 58 GHz에서의 측정 결과는 -3.45 dB의 결합 손실, -17 dB의 반사 손실과 -26.5 dB의 격리도 특성 및 두 개 출력 단자간에 181 ± 1°의 위상차를 얻었다. 58 GHz에서의 측정 결과를 고려하면 RF MEMS 하이브리드 결합기는 60

GHz의 중심 주파수로 설계되었으나 58 GHz에서도 충분히 사용 가능할 것으로 사료된다.

제작된 하이브리드 결합기를 이용하여 단일 평형 혼합기를 설계하기 위하여 Agilent ADS 설계 tool을 사용하였다. 동일한 접지면에 MMIC와 MEMS 하이브리드 결합기가 집적되기 때문에 DAML 구조와 CPW 라인 사이에 교차되는 지역의 영향을 조사하였다. 그림 2에서 보여주는 것처럼 CPW 구조에 기인하는 접지면의 손상 때문에 DAML의 신호선은 이 지역에서는 완벽하게 마이크로스트립 라인 mode로써 동작하지 않는다. 우리는 접지면 손상에 의한 접지 전위는 CPW 구조의 신호선에 의해서 분리된 각각의 접지면을 air-bridge로 연결하여 상쇄될 수 있다고 가정하였다. 그러한 가정을 확인을 하기 위해서 Ansoft사의 HFSS commercial software를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 3에 58 GHz의 중심 주파수에서 DAML 구조와 air-bridge 사이의 거리에 따른 S-parameter의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 이러한 시뮬레이션의 결과로부터 DAML 구조와 air-bridge 사이의 거리에 따른 S-parameter의 시뮬레이션

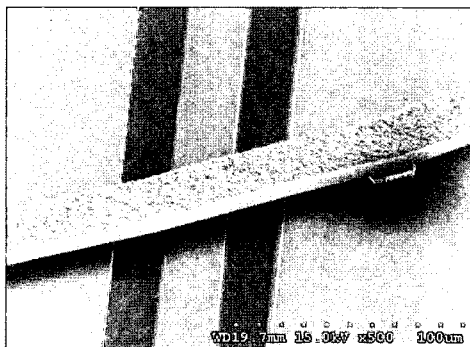
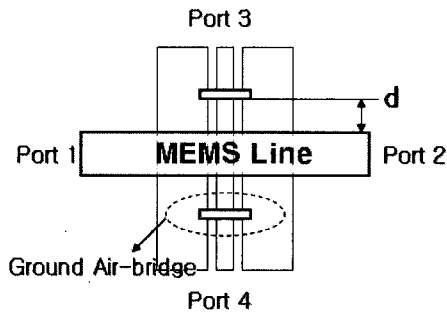


그림 2. DAML 구조와 CPW 라인 사이에 교차되는 지역
Fig. 2. DAML-to-CPW crossed region.

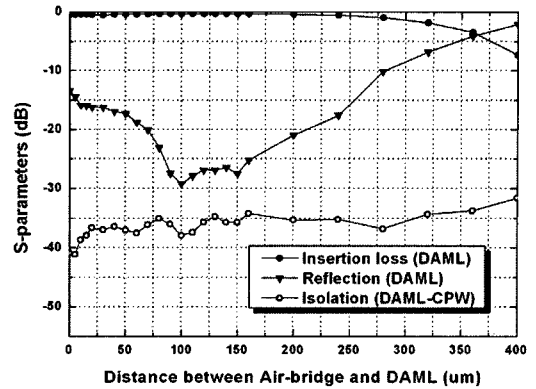


그림 3. 58 GHz에서 DAML 구조와 air-bridge 사이의 거리에 따른 S-parameter의 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation results of S-parameters due to the distance between DAML and air-bridge(@ 58 GHz).

결과를 나타내었다. 이러한 시뮬레이션의 결과로부터 DAML 구조와 air-bridge 사이의 적당한 거리는 90~150 μm가 됨을 알 수 있었다.

단일 평형 혼합기는 0.1 μm GaAs PHEMT을 기반으로 한 Schottky 다이오드와 CPW, DAML 구조의 라이브러리를 사용하여 설계하였으며 RF, LO와 IF 주파수는 각각 57 GHz, 58 GHz와 1 GHz가 되도록 설계되었다. 매칭 회로와 IF 포트는 CPW 전송선로를 사용하여 설계하였으며 RF와 LO 포트는 우수한 RF-LO isolation 특성을 얻기 위해서 뿐만 아니라 180°의 위상차를 가지고 각각의 다이오드를 구동하기 위하여 DAML 구조를 채택한 RF MEMS 하이브리드 결합기를 사용하여 설계하였다.

III. MEMS 하이브리드 결합기와 집적된 단일 평형 혼합기의 제작 및 측정

집적화 과정은 GaAs PHEMTs를 사용한 Schottky 다이오드, CPW 전송 선로, 금속 저항, MIM(금속-절연체-금속) 커패시터와 DAML 구조의 제작 공정을 포함하고 있다. 단일 평형 혼합기의 평면 부분을 위해 첫번째 층은 본 연구 센터에서 사용하는 표준 MMIC 공정 과정을 이용하여 제작하였다^[8]. DAML 구조는 첫번째 층에 제작된 MMIC 회로 위에서 3차원적으로 제작되었다. DAML 구조의 제작은 낮은

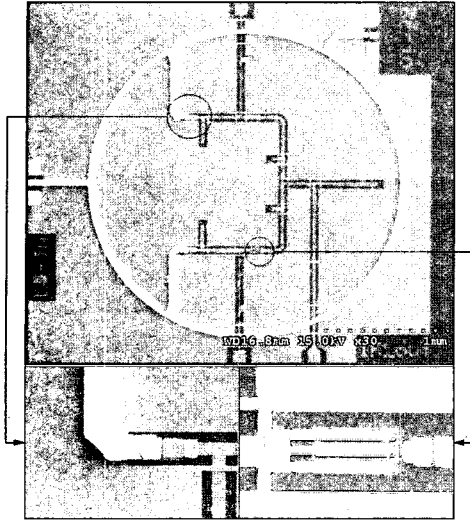


그림 4. 제작된 단일 평형 혼합기의 SEM 사진: 개략도, DAML에서 CPW로 변환되는 부분, 0.1 μm GaAs PHEMT를 이용한 Schottky 다이오드

Fig. 4. SEM photographs of the fabricated single balanced mixer: Overview, DAML-to-CPW transition part, Schottky diode using 0.1 μm GaAs PHEMT.

온도($T < 120\text{ }^\circ\text{C}$)에서 수행되며 MMIC 회로의 성능을 감소시킬 수 있는 건식 식각 공정과 같은 공정과정이 필요 없으므로, DAML 구조를 형성하는 두번째 층을 위한 공정 과정은 첫번째 층의 MMIC 회로에 전혀 영향을 주지 않는다.

CPW 구조를 이용하여 제작된 MMIC와 MEMS 하이브리드 결합기를 집적하기 위해서 10 μm 높이의 유전체 지지대가 접지면 위에 제작하였다. 유전체 지지대는 광학적으로 현상 가능한 polyimide를 사용하였으며 크기는 20 $\mu\text{m} \times 20\text{ } \mu\text{m}$ 이다. 10 μm 높이를 가진 희생층을 패터닝 한 후에 신호선의 패터닝 동안에 발생할 수 있는 희생층의 현상을 방지하기 위해서 Au 박막을 증착하였다. 동시에 Au 박막은 전기 도금기를 이용하여 5 μm 의 금속 두께를 가진 신호선을 형성하기 위한 seed metal로써 사용된다. 신호선을 형성한 후 희생층 영역을 제거하여 공기 중에 떠 있는 DAML 구조를 구현하였다. 그림 4에 제작된 단일 평형 혼합기의 SEM 사진을 나타내었다.

58 GHz의 LO 주파수에서 LO 입력 power에 따른 변환 손실의 측정 결과를 그림 5에 나타내었다. 58

GHz의 LO 주파수와 7.2 dBm의 LO power 및 -15 dBm의 RF power를 설정했을 때 56 GHz에서 59.5 GHz까지의 RF 주파수 대역에서 -17 dB \pm 1.5 dB의 변환손실 특성을 얻어 3.5 GHz의 3 dB 변환손실 대역폭을 얻었다. 그림 6에 LO 입력 power 변화에 따른 변환 손실 특성을 나타내었다. 57 GHz의 RF 주파수와 -15 dBm의 RF power 및 58 GHz의 LO 주파수를 사용하였을 때 6 dBm 이상의 입력 LO power에서 saturation 특성을 보이기 시작하며 10 dBm의 LO 입력 power에서 -15.25 dB의 최소 변환 손실을 얻었다. 그림 7은 RF-LO isolation의 측정 결과를 보여주고

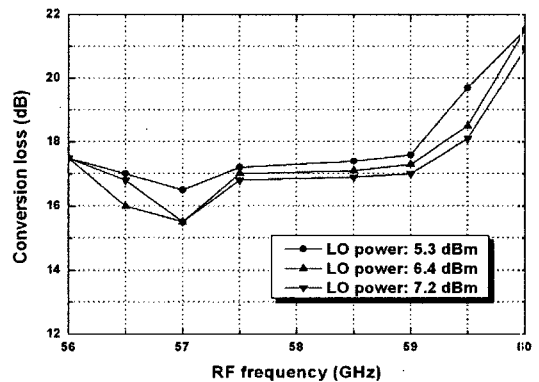


그림 5. 변환 손실의 측정 결과(1.5 V 다이오드 바이어스와 -15 dBm의 RF power)

Fig. 5. Measurement results of the conversion loss (In condition of 1.5 V diode bias and -15 dBm RF power).

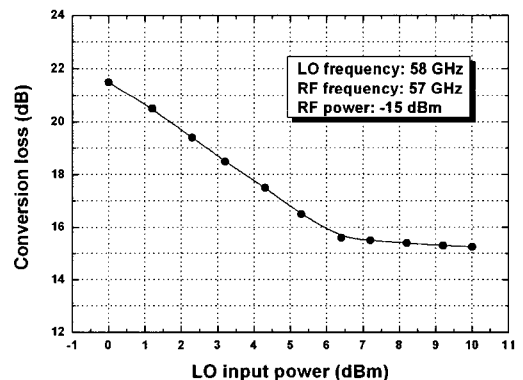


그림 6. LO 입력 power에 따른 변환 손실의 측정 결과(RF 주파수: 57 GHz)

Fig. 6. Measurement results of the conversion loss vs. LO input power.

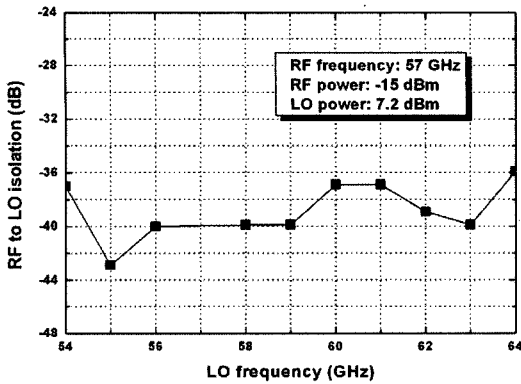


그림 7. RF-LO의 isolation 측정 결과
Fig. 7. Measurements results of the RF-to-LO isolation.

있다. 측정 결과로부터 58 GHz의 LO 주파수와 7.2 dBm의 LO power에서 -40 dB의 RF-LO isolation을 얻었다. 이때, 사용한 RF 주파수와 power는 각각 57 GHz와 -15 dBm이었다.

이러한 측정 결과로부터 제안된 단일 평형 혼합기는 60 GHz용 실내 무선 LAN 응용과 같은 밀리미터파 시스템에 충분히 적용될 수 있으며, 본 논문에서 제안된 이러한 구조는 이층 구조로써 3차원적으로 MMIC 회로와 집적화 될 수 있기 때문에 MMIC 회로를 설계하는데 있어서 RF MEMS 수동소자에 기인하는 우수한 성능뿐만 아니라 공간 활용 측면에서도 매우 큰 장점을 가지고 있다고 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서 우리는 RF MEMS 하이브리드 결합기를 집적화 한 단일 평형 혼합기를 설계 및 제작하였다. 이 혼합기에 사용된 RF MEMS 하이브리드 결합기는 기판의 유전체 손실을 감소시키기 위해서 접지면에서부터 10 μm 높이에 띄어져 있는 신호선과 이 신호선을 지탱하는 20 μm×20 μm 크기의 유전체 지지대로 구성되어 있는 DAML 구조를 채택하였다. 제작된 혼합기의 측정 결과로부터 57 GHz의 RF 주파수와 -15 dBm의 RF power 및 58 GHz의 LO 주파수와 7.2 dBm의 LO power에서 -15.5 dB의 변환 손실을 얻었다. 또한 58 GHz의 LO 주파수와 7.2 dBm의 LO power에서 -40 dB의 우수한 RF-LO isolation 특성을 얻었다. 이때 57 GHz의 RF 주파수

에서 -15 dBm의 RF power가 사용되었다.

참 고 문 헌

- [1] K. Nishikawa, S. Sugitani, K. Inoue, T. Ishii, K. Kamogawa, B. Piernas, and K. Araki, "Low-loss passive components on BCB-based 3D MMIC technology", *Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International*, vol. 3, pp. 1881-1884, 2001.
- [2] G. E. Ponchak, A. N. Downey, "Characterization of thin film microstrip lines on polyimide", *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B*, vol. 21 no. 2, pp. 171-176.
- [3] Suidong Yang, Zhirun Hu, N. B. Buchanan, V. F. Fusco, J. A. C. Stewart, Yunhong Wu, B. M. Armstrong, G. A. Armstrong, and H. S. Gamble, "Characteristics of trenched coplanar waveguide for high-resistivity Si MMIC applications", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 5, pp. 623-631.
- [4] Y. C. Shih, T. Itoh, "Broadband characterization of conductor-backed coplanar waveguide using accurate on-wafer measurement techniques", *Microwave Journal*, pp. 95-105, Apr. 1991.
- [5] S. V. Robertson, A. R. Brown, L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, "A 10~60-GHz micromachined directional coupler", *IEEE Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 11, pp. 1845-1849.
- [6] H. S. Lee, D. H. Shin, Y. H. Chun, S. C. Kim, B. O. Lim, T. J. Beak, S. K. Kim, H. C. Park, and J. K. Rhee, "Design and characterization of micromachined transmission line with dielectric post for millimeter-wave applications", *IEE Electronics Letters*, vol. 39, Issue 25, pp. 1827-1828, 2003.
- [7] B. S. Ko, T. J. Baek, D. H. Shin, S. C. Kim, B. O. Lim, H. S. Lee, S. K. Kim, H. C. Park, Y. H. Chun, and J. K. Rhee, "Design and fabrication of 180° hybrid ring coupler for applications of MMICs using dielectric-supported air-gapped microstriplines", *IEE Electronics Letters*, vol. 40, no. 11,

pp. 675-676, May 2004.

[8] Sung Chan Kim, Dan An, Woo Suk Sul, Han Shin Lee, Hyo Jong Han, Won Young Uhm, Hyung Moo Park, Sam Dong Kim, Dong-Hoon Shin, and Jin

Koo Rhee, "High conversion gain cascode quadruple subharmonic mixer for millimeter-wave applications", *Current Applied Physics*, vol. 5, Issue 3, pp. 231-236, Mar. 2005.

김 성 찬



1999년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
2001년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년 3월~현재: 동국대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 밀리미터파 소자 회로 설계 제작

고 백 석



2003년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 3월~2005년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
2005년 3월~현재: (주)플렉트론닉스 [주 관심분야] RF MEMS 설계

임 병 옥



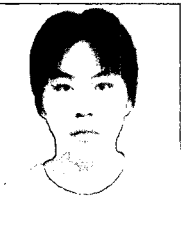
2000년 2월: 국립 한경대학교 전자공학과 (공학사)
2002년 3월: 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
2002년 3월~현재: 동국대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 밀리미터파 대역용 MIMIC 부품 설계 및 제작

안 단



1998년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 3월~현재: 동국대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] MIMIC 설계 및 소자 모델링

백 태 중



2003년 2월: 중부대학교 정보통신공학과(공학사)
2003년 3월~현재: 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
[주 관심분야] MEMS, E-beam lithography, MMIC 공정

김 순 구



1989년 2월: 동국대학교 물리학과 (이학사)
1984년 2월: 동국대학교 물리학과 (이학석사)
1994년 2월: 동국대학교 물리학과 (이학박사)
1999년 10월~현재: 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 연구교수
[주 관심분야] 밀리미터파 대역용 MIMIC 부품 설계 및 제작

신 동 훈



1982년 2월: 동국대학교 물리학과 (이학사)
1984년 2월: 동국대학교 물리학과 (이학석사)
1999년: 런던대학교 전기전자공학과 (공학박사)
1999년~현재: 동국대학교 밀리미터

파 신기술 연구센터 연구교수

[주 관심분야] 밀리미터파 소자 및 회로 설계 제작

이 진 구



1969년: 국립항공대학교 전자공학과 (공학사)
1975년: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1982년: Oregon State University 전기공학과 (공학박사)
1985년: Cray Research, USA, Research Scientist.

1985년: Microwave Semiconductors, USA, Senior Engineer.

1990년~1991년: University of Michigan, Visiting Research Scientist

1995년~현재: 한국전자파학회 이사

1996년~현재: 한국산업인력관리공단 기술사 검정 심의 위원

2002년~2004년: 대한전자공학회 부회장

1985년~현재: 동국대학교 공과대학 전자공학과 교수

1999년~현재: 밀리미터파 신기술 연구센터 소장

2005년~현재: 대한전자공학회 회장

[주 관심분야] 밀리미터파용 소자 및 MIMIC 설계 및 제작