

논문 2006-43SD-4-2

70 nm MHEMT와 DAML 기술을 이용한 우수한 성능의 94 GHz 단일 평형 혼합기

(High-performance 94 GHz Single Balanced Mixer Based On
70 nm MHEMT And DAML Technology)

김성찬*, 안 단*, 임병옥**, 백태종**, 신동훈*, 이진구*

(Sung-Chan Kim, Dan An, Byeong-Ok Lim, Tae-Jong Beak,
Dong-Hoon Shin, and Jin-Koo Rhee)

요약

본 논문에서는 70 nm InGaAs/InAlAs MHEMT와 DAML 기반의 하이브리드 링 결합기를 이용하여 낮은 변환 손실과 높은 격리도 특성을 갖는 94 GHz 단일 평형 혼합기를 개발하였다. 혼합기에 사용된 MHEMT는 607 mA/mm의 드레인 전류 밀도, 1015 mS/mm의 전달컨덕턴스, 330 GHz의 전류이득차단주파수, 425 GHz의 최대공진주파수 특성을 나타내었다. 제작된 하이브리드 링 결합기는 85 GHz ~ 105 GHz의 범위에서 3.57 ± 0.22 dB의 커플링 손실과 3.80 ± 0.08 dB의 삽입 손실 특성을 나타내었다. 혼합기의 측정 결과, 93.65 GHz ~ 94.25 GHz의 범위에서 2.5 dB ~ 2.8 dB의 변환 손실 특성과 -30 dB 이하의 격리도 특성을 얻었으며, 94 GHz의 중심주파수에서 6 dBm의 LO 전력을 인가하였을 때 2.5 dB의 최소 변환 손실 특성을 얻었다. 변환 손실 및 격리도 특성을 고려할 때, 본 논문에서 개발된 혼합기의 특성은 지금까지 보고된 GaAs 기반 HEMT 소자들을 사용하는 94 GHz 대역용 혼합기 중에 가장 우수한 결과물이다.

Abstract

In this paper, the 94 GHz, low conversion loss, and high isolation single balanced mixer is designed and fabricated using GaAs-based metamorphic high electron mobility transistors (MHEMTs) with 70 nm gate length and the hybrid ring coupler with the micromachined transmission lines, dielectric-supported air-gapped microstrip lines (DAMLs). The 70 nm MHEMT devices exhibit DC characteristics with a drain current density of 607 mA/mm, an extrinsic transconductance of 1015 mS/mm. The current gain cutoff frequency (f_T) and maximum oscillation frequency (f_{max}) are 320 GHz and 430 GHz, respectively. The fabricated hybrid ring coupler shows wideband characteristics of the coupling loss of 3.57 ± 0.22 dB and the transmission loss of 3.80 ± 0.08 dB in the measured frequency range of 85 GHz to 105 GHz. This mixer shows that the conversion loss and isolation characteristics are 2.5 dB ~ 2.8 dB and under -30 dB, respectively, in the range of 93.65 GHz ~ 94.25 GHz. At the center frequency of 94 GHz, this mixer shows the minimum conversion loss of 2.5 dB at a LO power of 6 dBm. To our knowledge, these results are the best performances demonstrated from 94 GHz single balanced mixer utilizing GaAs-based HEMTs in terms of conversion loss as well as isolation characteristics.

Keywords: Single balanced mixer, 70 nm gate length, MHEMT, DAML, Hybrid ring coupler

* 정회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술연구센터(MINT)
(Millimeter-wave INnovation Technology research
center, Dongguk University)

** 학생회원, 동국대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, Dongguk
University)

※ 이 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터
를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의
하여 수행되었습니다.

접수일자: 2005년11월30일, 수정완료일: 2006년4월3일

I. 서론

최근 통신 시장의 급속한 발전은 가용 주파수 대역의 불가피한 확장을 이루었으며 이에 따라 60 GHz 무선 LAN, 77 GHz 자동차 충돌방지 시스템, 94 GHz FMCW (frequency modulation continuous wave) 레이더 시스템 등과 같은 밀리미터파 (millimeter-wave) 대역 시스템

개발에 대한 관심이 집중되고 있다. 밀리미터파 대역에서의 다양한 시스템을 구현하기 위하여 하향 혼합기(down conversion mixer)는 가장 중요한 부품 중 한가지이다. 혼합기의 설계 시, 여러 가지 구조의 혼합기를 설계할 수 있지만 각기 구조의 장·단점이 있으므로 변환 손실(conversion loss)과 격리도(isolation) 특성을 고려하여 시스템의 요구사항에 맞도록 설계하여야 한다. High electron mobility transistors (HEMTs)를 사용하는 능동형(active) 혼합기는 다이오드(diode)를 사용하는 수동형 혼합기에 비하여 낮은 LO 전력(power)을 사용하며 변환 손실 특성이 우수한 장점이 있다. 높은 격리도 특성은 회로 구조의 복잡성을 고려할 때 단일 평형(single balanced) 구조를 사용함으로써 얻어질 수 있다. 본 논문의 목적은 94 GHz 응용을 위하여 낮은 변환 손실 특성과 높은 격리도 특성을 동시에 갖는 단일 평형 능동 혼합기를 구현하는 것이다. 이는 두 가지 기술로써 해결할 수 있다. 하나는 밀리미터파 대역에서 동작하는 우수한 성능의 능동 소자를 개발하는 것이고 다른 하나는 격리도 특성을 향상시키기 위하여 사용되는 결합기(coupler)나 발룬(balun) 등의 수동소자를 개발하는 것이다. 두 가지 기술이 충족된다 하여도 현재 MIMIC(Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit) 회로에 적용될 수 있는 수동 소자의 크기와 구조가 제한되어 있어 단일 기판의 MIMIC에 수동 소자를 집적화 하는 것은 많은 어려움이 따른다.

InP 기반의 HEMT는 GaAs 기반의 HEMT와 비교하여 높은 이득 특성과 낮은 잡음 특성 및 300 GHz 이상의 차단 주파수를 갖는 우수한 초고주파 특성 등의 여러 장점 때문에 밀리미터파 대역에서 동작하는 혼합기의 응용에 주로 사용되어져 왔다^{[1]-[3]}. 그러나 GaAs 기반의 웨이퍼와 비교하면, InP 기반의 웨이퍼는 역학적으로 부서지기 쉬운 성질과 높은 재료비용과 같은 결정적인 결점을 가지고 있다. 최근 이러한 단점을 개선하기 위하여 GaAs 기판위에 metamorphic 버퍼층(buffer layer)를 사용하는 InAlAs/InGaAs metamorphic HEMT(MHEMT)가 제안되었으며^{[4]-[5]}, 이에 본 논문에서도 MHEMT 구조를 사용하였다. Metamorphic 버퍼를 사용함으로써 InGaAs/InAlAs 이종 접합 구조(heterostructure)가 In(indium) 몰분율의 넓은 범위에 걸쳐 손상 없이 성장될 수 있으므로 InP 기반의 HEMT와 비교하여 동등한 특성을 얻을 수 있다.

현재 마이크로스트립(microstrip) 전송선로와 CPW(coplanar waveguide) 전송선로가 수동 소자의 응용에

주로 사용되고 있다. 그러나 이런 일반적인 전송선로는 반도체 기판에서의 유전체 손실(dielectric loss)과 분산(dispersion) 특성으로 인하여 밀리미터파 대역에서 회로의 동작 특성을 저하시킨다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위하여 구조적 제약으로부터 자유로우며 고성능 소자의 제작이 용이한 표면 마이크로 머시닝(surface micromachining) 기술을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 밀리미터파 대역 MIMIC 응용에서 사용 가능하며 우수한 특성을 갖는 수동 소자의 가장 기본이 되는 저 손실 전송선로를 구현하기 위한 노력이 여러 연구 그룹에서 활발히 이루어지고 있다^{[6]-[11]}. 특히 몇 개의 연구 그룹에서 제안된 전송선로 구조는 고주파에서의 손실 특성에 관해서는 매우 우수한 특성을 보여주고 있으나 공정과정이 매우 복잡하여 MIMIC 회로에 적용하기에는 고려해야 할 사항을 많이 가지고 있다^[11]. 최근에 우리 연구 그룹에서는 공정 과정이 기존의 전송선로 공정에 비해 간단하며 기존의 MIMIC 회로의 제작 공정과 높은 호환성을 갖는 DAML(Dielectric-supported Air-gapped supported Microstrip Line)을 제안 하였다^[12]. 제안된 구조는 신호선과 접지면 사이에 공기를 유전체로 가지는 마이크로스트립 전송선로로써 마이크로머시닝 기술을 이용한 유전체 지지대를 사용하여 신호선을 공기 중으로 띄워 기판 유전체 손실을 최소화 하였다. DAML 구조의 제작 과정은 일반적인 MIMIC 기술과 호환이 가능하며, 더욱이 DAML 구조의 접지면은 CPW 구조를 사용하여 제작되는 MIMIC의 접지면과 동일한 접지면을 사용하므로 DAML을 사용하여 구현된 수동 소자는 평면 구조인 MIMIC와 쉽게 집적될 수 있다.

본 논문에서는 낮은 변환 손실 특성과 높은 격리도 특성을 동시에 얻기 위하여 게이트 길이(gate length)가 70 nm인 MHEMT와 DAML 기반의 하이브리드 링 결합기(hybrid ring coupler)를 사용하여 단일 평형 혼합기를 개발하였다. 본 논문에서 사용된 기술을 사용하면 DAML을 이용한 다양한 수동 소자들을 능동 MIMIC와 집적화함으로써 우수한 성능의 고 집적화된 MIMIC의 구현이 가능하다.

II. 70 nm MHEMT 특성

혼합기의 낮은 변환 손실 특성을 얻기 위하여 HEMT 소자는 낮은 게이트 정전용량(capacitance) 및 높은 전달컨덕턴스(transconductance) 특성을 가져야 한다^[13].

In _{0.53} Ga _{0.47} As	Capping layer	15 nm
In _{0.52} Al _{0.48} As	Schottky layer	10 nm
Si planar doping 4.5x10 ¹⁷ /cm ²		
In _{0.52} Al _{0.48} As	Spacer layer	3 nm
In _{0.53} Ga _{0.47} As	Channel layer	15 nm
In _{0.52} Al _{0.48} As	Spacer layer	4 nm
Si planar doping 1.3x10 ¹⁷ /cm ²		
In _{0.52} Al _{0.48} As	Buffer layer	400 nm
In _x Al _{1-x} As (x=0~0.5)	Grade Buffer layer	1000 nm
Semi-insulating GaAs substrate		

그림 1. InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT (MHEMT) 에피 구조의 단면도

Fig. 1. Schematic cross-section of InGaAs/InAlAs/GaAs metamorphic HEMT (MHEMT) epitaxial structure.

낮은 게이트 정전용량을 위하여 narrow 게이트 리세스 (recess) 식각 (etching) 공정을 사용하는 70 nm 게이트를 소자에 적용하였으며, 높은 전달컨덕턴스 특성을 야기 시키는 높은 전자 (electron) 면전하밀도 (sheet density) 위하여 이중 이종접합 구조의 에피 구조를 사용하였다^[14]. 에피층과 GaAs 기판 사이의 매우 큰 격자 부정합 (lattice mismatch)을 완화시키기 위하여 InAlAs를 사용하며 In 몰분율이 0.01부터 0.5까지 변화하는 inverse step graded metamorphic 버퍼층을 적용하였으며 채널층에서의 In 몰분율은 0.53 이다. 그림 1에 MBE (molecular beam epitaxy)를 사용하여 (100) GaAs 기판위에 성장된 에피층의 구조를 나타내었다. Hall 측정으로부터 상온 (300K)에서의 2DEG층의 면 전하밀도는 3.36×10¹² cm⁻²이고 전자의 이동도 (mobility)는 9070 cm²/V-s이었다.

70 nm 게이트 길이를 갖는 GaAs MHEMT 소자는 T-게이트를 형성하기 위하여 유전체 지지대를 이용하지 않고 가장 일반적인 전자빔 노광 방법을 이용하여 제작하였다^[15]. 제작된 MHEMT의 게이트와 소스간의 간격은 0.97 μm이고 드레인과 소스의 간격은 2 μm이다.

제작된 MHEMT의 전압-전류 및 전달 컨덕턴스 특성을 HP사의 4156A DC parameter analyzer를 사용하여 측정하였다. 제작된 MHEMT의 DC 특성 측정 결과를 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 단위 게이트폭이 70 μm 이고 평거 수가 2개인 소자의 편치 오프 전압은 -0.8 V, 드레인 전류밀도 (drain current density)는 V_{gs} = 0 V에서 607 mA/mm이며, 최대 전달컨덕턴스는 V_{ds} = 1.6 V 및 V_{gs} = -0.3 V에서 1015 mS/mm를 얻었다.

RF 측정은 HP8510C와 HP85106D VNA (vector network

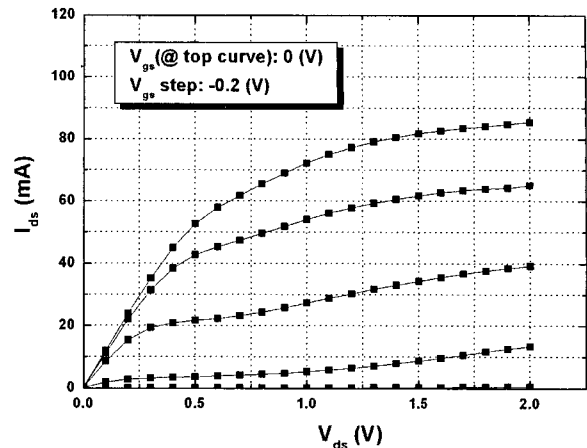


그림 2. 제작된 70 nm × 140 μm MHEMT의 I-V 특성
Fig. 2. I-V characteristics of the fabricated 70 nm × 140 μm MHEMTs.

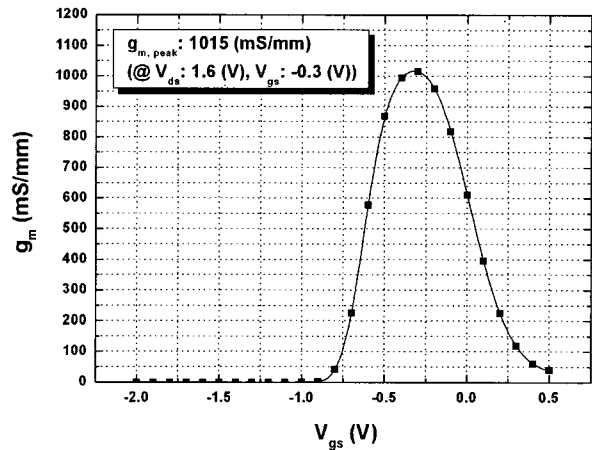


그림 3. 70 nm × 140 μm MHEMT의 전달컨덕턴스 특성
Fig. 3. Transconductance characteristics of the fabricated 70 nm × 140 μm MHEMTs.

analyzer)를 이용하여 측정하였으며 측정 바이어스 조건은 V_{ds} = 1.6 V, V_{gs} = -0.3 V이고, 측정 주파수는 1 ~ 75 GHz 이다. 측정 결과, 330 GHz의 전류이득차단주파수 (f_T: current gain cutoff frequency)와 425 GHz의 최대공진주파수 (f_{max}: maximum oscillation frequency)를 얻었다. 그림 4에 제작된 70 nm MHEMT의 RF 특성을 나타내었다.

III. DAML 기반의 하이브리드 링 결합기

하이브리드 링 결합기는 최근 우리 연구 그룹에서 제안한 DAML 전송선로를 사용하여 구현하였다^[12]. 제안된 구조는 신호선과 접지면 사이에 공기를 유전체로 가지는 마이크로스트립 전송선로로써 마이크로머시닝 기술을 이용한 유전체 지지대를 사용하여 신호선을 공기 중으로

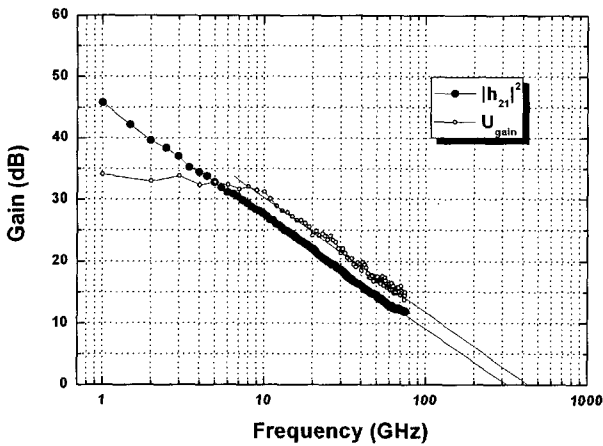


그림 4. 제작된 70 nm × 140 μm MHEMT의 주파수의 함수로서의 U_{gain} 이득과 |h₂₁|² 특성.

Fig. 4. Typical U_{gain} gain, |h₂₁|² characteristics as function of frequency for the fabricated 70 nm × 140 μm MHEMTs.

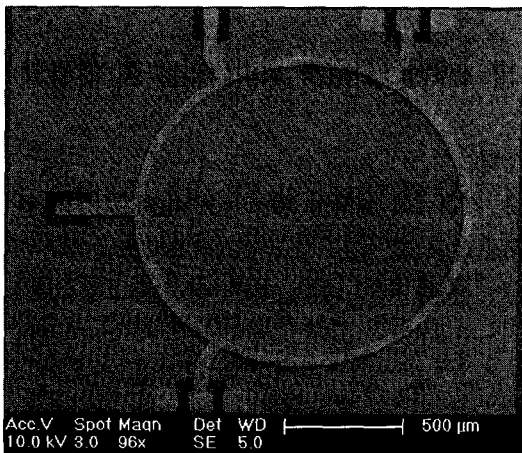


그림 5. 제작된 DAML 기반의 하이브리드 링 결합기
Fig. 5. SEM photography of the fabricated DAML-based hybrid ring coupler.

떡잎 기판 유전체 손실 (substrate dielectric loss)을 최소화 하였다.

하이브리드 링 결합기는 94 GHz에서 DAML의 특성임피던스 (characteristic impedance)와 파장 (wave length)을 고려하여 설계되었다. 70 Ω과 50 Ω의 특성 임피던스를 얻기 위하여 29 μm와 50 μm의 라인 폭을 갖는 DAML을 사용하였으며 중심주파수에서의 파장은 2.92 mm, 두 개의 출력 단자 (port) 사이의 위상차는 180°이다.

설계된 결합기는 GaAs 기판위에 제작되었으며 제작 과정이 일반적인 MIMIC 기술과 호환 가능하므로 평면 구조의 MIMIC와 쉽게 집적될 수 있다. 그림 5에 제작된 결합기의 사진을 나타내었으며 결합기의 반경은 730 μm이다.

제작된 결합기는 Anritsu사의 ME7808A VNA를 사용

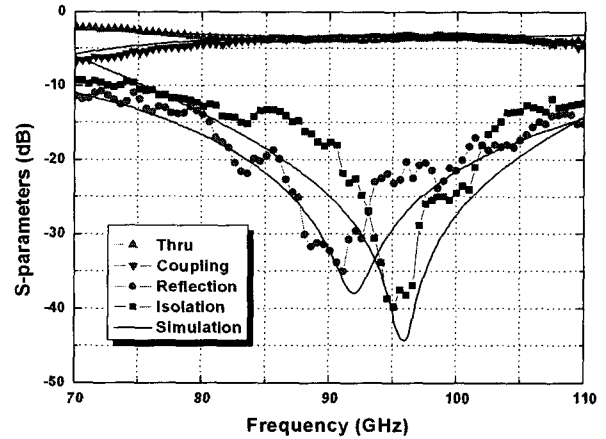


그림 6. 제작된 DAML 기반의 하이브리드 링 결합기의 주파수 특성

Fig. 6. Measured results compared with the simulated results of the fabricated hybrid ring coupler.

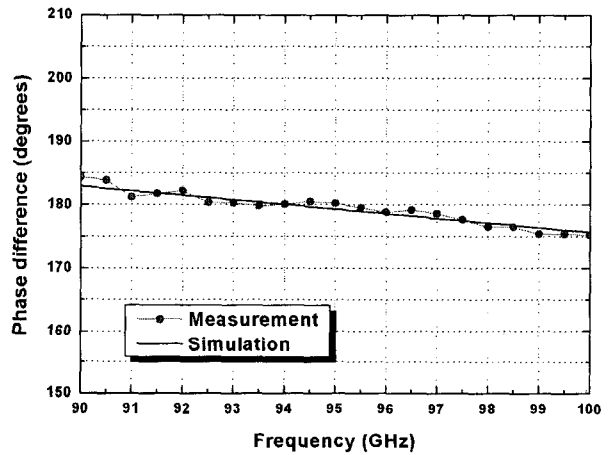


그림 7. 제작된 DAML 기반의 하이브리드 링 결합기의 두 출력단자 사이의 위상차 특성

Fig. 7. Measured results compared with the simulated results for phase differences between two output port.

하여 측정하였다. 2 단자 VNA 측정시스템을 사용하여 하이브리드 링 결합기의 4 단자 특성을 측정을 해야 하므로 측정 단자의 위치가 서로 다른 3개의 동일한 결합기를 제작하여 측정하였다. 제작된 DAML 기반의 하이브리드 링 결합기의 주파수 특성과 두 출력단자 사이의 위상차 특성을 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다. 측정결과, 85 GHz ~ 105 GHz의 범위에서 3.57 ± 0.22 dB의 커플링 손실 (coupling loss)과 3.80 ± 0.08 dB의 삽입 손실 (transmission loss) 특성을 얻었으며 94 GHz에서 -34 dB의 격리도 특성을 얻었다. 또한 92.5 GHz ~ 96.5 GHz의 범위에서 두 개 출력 단자 간의 위상차 (phase difference)는 180° ± 1°의 특성을 얻었다.

IV. 단일 평형 혼합기

제작된 하이브리드 링 결합기를 이용하여 단일 평형 혼합기를 설계하기 위하여 Agilent ADS 설계 툴(tool)을 사용하였다. 단일 평형 혼합기는 70 nm MHEMT 소자, MIM (metal-insulator-metal) 캐패시터 (capacitor) 와 Ti 박막저항(Ti-thin-film-resistor) 등의 수동소자, CPW, DAML 전송선로 라이브러리(library)를 사용하여 설계 하였으며 RF, LO와 IF 주파수는 각각 94 GHz, 94.2 GHz와 200 MHz가 되도록 설계 되었다. 매칭(matching) 회로와 IF 단자는 CPW 전송선로를 사용하여 설계하였으며 RF와 LO 단자는 우수한 RF-LO 격리도 특성을 얻기 위하여 DAML 구조를 채택한 하이브리드 링 결합기를 사용하여 설계 하였다. 혼합기에 사용된 MHEMT 소자의 바이어스(bias) 조건은 $V_{ds} = 1.5$ V 및 $V_{gs} = -0.7$ V이며, 그 때의 드레인 전류는 5 mA이다.

단일 평형 혼합기의 MHEMT를 사용하는 능동 소자 부분을 위한 첫 번째 층은 본 연구 그룹에서 사용하는 표준 MIMIC 공정 과정을 이용하여 제작하였다[16]. 하이브리드 링 결합기를 구현하기 위한 DAML 구조는 MIMIC 회로의 첫 번째 층 위에 3차원적으로 집적되었다. DAML구조의 제작 과정은 일반적인 MIMIC 기술과 호환이 가능하며, 더욱이 DAML 구조의 접지면은 CPW 구조를 사용하여 제작되는 MIMIC의 접지면과 동일한 접지면을 사용하므로 DAML을 사용하여 구현된 수동 소자는 평면 구조인 MIMICs와 쉽게 집적될 수 있다. DAML 구조의 제작은 낮은 온도($T < 120$ °C)에서 수행되며 MIMIC 회로의 성능을 감소시킬 수 있는 건식 식각 공정과 같은 공정과정이 필요 없으므로, DAML 구조를 형성하는 두 번째 층을 위한 공정 과정은 첫 번째 층의 MIMIC 회로에 전혀 영향을 주지 않는다. 그림 8에 제작된 단일 평형 혼합기의 SEM 사진을 나타내었으며 전체 칩 크기는 1.8 mm × 2.1 mm이다. DAML 구조의 하이브리드 링 결합기가 평면구조의 MIMIC에 안정적으로 집적 되어 있는 것을 확인할 수 있다.

제작된 MIMIC 단일 평형 혼합기는 Cascade사의 on-wafer probing 시스템을 이용하여 측정하였다. 측정을 위한 94 GHz 대역의 RF 및 LO 신호는 Quinstar 94 GHz VCO와 Millitech W-band variable attenuator를 사용하여 구현하였으며 180° 위상차를 갖고 있는 두 개의 IF 출력 신호들은 MIMIC 외부의 발륜을 이용하여 측정

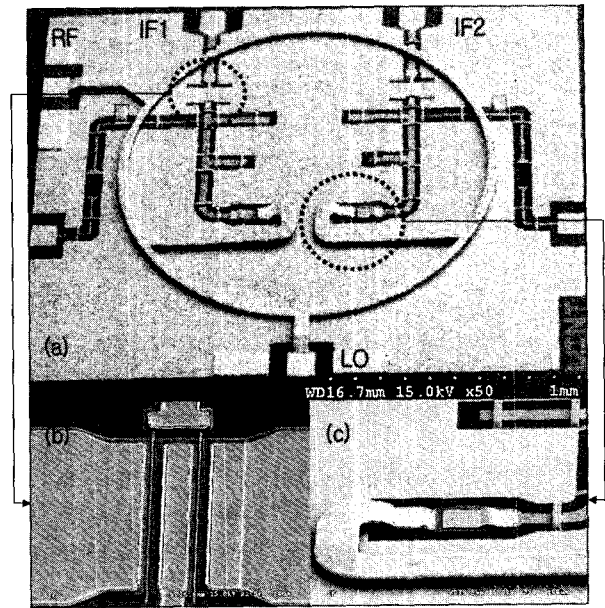


그림 8. 제작된 단일 평형 혼합기; (a) 전체모습, (b) 70 nm MHEMT 부분, (c) DAML-to-CPW 천이 부분
Fig. 8. SEM photography of the fabricated single balanced mixer: (a) overview, (b) 70 nm MHEMT, (c) DAML-to-CPW transition part.

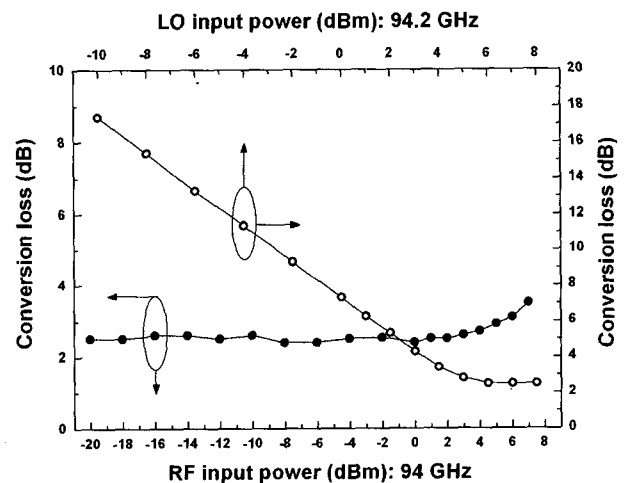


그림 9. RF 및 LO 입력 전력에 대한 변환 손실 특성
Fig. 9. Conversion loss characteristics versus RF and LO input power (at an LO frequency of 94.2 GHz, an RF frequency of 94 GHz).

하였다.

그림 9에 RF 입력 전력과 LO 입력 전력에 대한 변환 손실 특성을 나타내었다. 단일 평형 혼합기의 측정 결과, 94 GHz의 RF 주파수, -10 dBm의 RF 전력, 94.2 GHz의 LO 주파수 및 6 dBm의 LO 전력을 인가하였을 때 2.5 dB의 변환 손실 특성을 얻었다. 그림 10에 RF 주파수에 대한 변환 손실과 LO 주파수에 대한 격리도 특성을 나타내었다. -10 dBm의 RF 전력 및 0 dBm의

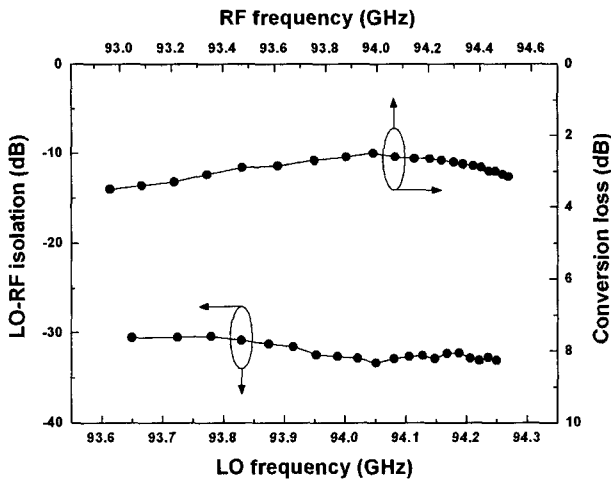


그림 10. 주파수에 대한 변환 손실 및 격리도 특성
 Fig. 10. Conversion loss and isolation characteristics versus frequencies (at a RF power of -10 dBm, an LO power of 0 dBm).

LO 전력을 인가하였을 때 93.65 GHz ~ 94.25 GHz의 범위에서 2.5 dB에서부터 2.8 dB의 변환 손실과 -30 dB 이하의 격리도 특성을 얻었다.

개발된 단일 평형 혼합기의 낮은 변환 손실은 우수한 성능의 70 nm MHEMT에 기인하며 높은 격리도 특성은 하이브리드 링 결합기에 기인한다. 결합 손실 및 격리도 특성을 고려할 때, 본 논문에서 개발된 혼합기의 특성은 지금까지 보고된 GaAs 기반 HEMT 소자들을 사용하는 94 GHz 대역용 혼합기 중에 가장 우수한 결과이다.

이러한 측정 결과로부터, 개발된 단일 평형 혼합기는 94 GHz용 FMCW 레이다 응용과 같은 밀리미터파 시스템에 충분히 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 본 논문에 사용된 DAML 구조는 일반적인 MIMIC 기술과 호환이 가능하므로 DAML을 이용한 다양한 수동소자들을 능동 MIMIC와 동일 기판 상에 집적화함으로써 우수한 성능의 고 집적화된 MIMIC의 구현이 가능할 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 논문에서는 94 GHz 대역 시스템의 응용을 위하여 70 nm MHEMT와 DAML 기반의 하이브리드 링 결합기를 동일 기판위에 집적하여 낮은 변환 손실 특성과 높은 격리도 특성을 동시에 갖는 단일 평형 능동 혼합기를 구현하였다.

제작된 70 nm MHEMT는 607 mA/mm의 드레인 전류밀도, 1015 mS/mm의 전달컨덕턴스 특성과 330 GHz

와 425 GHz의 전류이득차단주파수와 최대공진주파수 특성을 나타내었다. DAML 기반의 하이브리드 링 결합기는 85 GHz ~ 105 GHz의 범위에서 3.57 ± 0.22 dB의 커플링 손실과 3.80 ± 0.08 dB의 삽입 손실 특성을 얻었으며 94 GHz에서 -34 dB의 격리도 특성을 나타내었다. 단일 평형 혼합기의 측정 결과, 6 dBm의 LO 전력을 인가하였을 때 94 GHz의 주파수에서 2.5 dB의 낮은 변환 손실 특성을 얻었으며 93.65 GHz ~ 94.25 GHz의 범위에서 -30 dB 이하의 높은 격리도 특성을 얻었다.

결합 손실 및 격리도 특성을 고려할 때, 본 논문에서 개발된 혼합기의 특성은 지금까지 보고된 GaAs 기반 HEMT 소자들을 사용하는 94 GHz 대역용 혼합기 중에 가장 우수한 결과물이다.

참 고 문 헌

- [1] K. W. Chang, H. Wang, K. L. Tan, S. B. Bui, T. H. Chen, G. S. Dow, J. Berenz, T. N. Ton, D. C. Garske, T. S. Lin, and L. C. T. Liu, "A W-Band Monolithic Downconverter," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 39, no. 12, pp. 1972-1979, 1991.
- [2] A. R. Barnes, P. Munday, R. Jennings, and M. T. Moore, "A Comparison Of W-band Monolithic Resistive Mixer Architectures," in *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 1867-1870, 2002.
- [3] R. S. Virk, L. Tran, M. Matloubian, M. Le, M. G. Case, and C. Ngo, "A Comparison of W-band MMIC Mixers Using InP HEMT Technology," in *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 435-438, 1997.
- [4] P. M. Smith, D. Dugas, K. Chu, K. Nichols, K. G. Duh, J. Fisher, L. MtPleasant, D. Xu, L. Gunter, A. Vera, R. Lender, and D. Meharry, "Progress in GaAs Metamorphic HEMT Technology For Microwave Applications," in *Proc. IEEE GaAs IC Symp.*, pp. 21-24, 2003.
- [5] 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, 2000.
- [6] 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," in *IEEE MTT-S Dig.*, vol. 3, pp. 1881-1884, 2001.
- [7] G. E. Ponchak, and A. N. Downey, "Characterization

- Of Thin Film Microstrip Lines On Polyimide," *IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B*, vol. 21, no. 2, pp. 171-176, 1998.
- [8] S. Yang, Z. Hu, N. B. Buchanan, V. F. Fusco, J. A. C. Stewart, Y. Wu, B. M. Armstrong, G. A. Armstrong, and H. S. Gamble, "Characteristics Of Trenched Coplanar Waveguide For High-Resistivity Si MMIC Applications," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 46, no. 5, pp. 623-631, 1998.
- [9] Y. C. Shih, and T. Itoh, "Broadband Characterization of Conductor-backed Coplanar Waveguide Using Accurate On-wafer Measurement Techniques," *Microw. J.*, pp. 95-105, April 1991.
- [10] Y. W. Kwon, H. T. Kim, J. H. Park, and Y. K. Kim, "Low-loss Micromachined Inverted Overlay CPW Lines With Wide Impedance Ranges And Inherent Airbridge Connection Capability," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 59-61, 2001.
- [11] S. V. Robertson, A. R. Brown, L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, "A 10-60-GHz Micromachined Directional Coupler," *IEEE Microw. Theory Tech.*, vol. 46, no. 11, pp. 1845-1849, 1998.
- [12] 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 Electron Lett.*, vol. 39, no. 25, pp. 1827-1828, 2003.
- [13] Stephen A. Maas, *Microwave Mixers*. Boston-London: Artech House, 1993.
- [14] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. NewYork-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore: JOHN WILEY & SON, 1981.
- [15] S. C. Kim, B. O. Lim, H. S. Lee, T. J. Beak, D.-H. Shin, and J. K. Rhee, "50 nm InGaAs/InAlAs/ GaAs Metarmorphic High Electron Mobility Transistors Using Double Exposure at 50 kV Electron-beam Lithography Without Dielectric Support," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 22, no. 4, pp. 1807-1810, Jul/Aug 2004.
- [16] 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, no. 3, pp. 231-236, March 2005.

 저 자 소 개



김 성 찬(정회원)
 1999년 동국대학교 전자공학과
 공학사 졸업
 2001년 동국대학교 전자공학과
 공학석사 졸업
 2006년 동국대학교 전자공학과
 공학박사 졸업

2006년 3월~현재 동국대학교 밀리미터파 신기술
 연구센터 박사 후 연구원

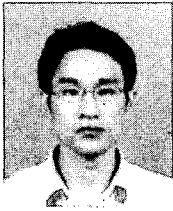
<주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제작>



안 단(정회원)
 1998년 동국대학교 전자공학과
 공학사 졸업
 2000년 동국대학교 전자공학과
 공학석사 졸업
 2006년 동국대학교 전자공학과
 공학박사 졸업

2006년 3월~현재 동국대학교 밀리미터파 신기술
 연구센터 박사 후 연구원

<주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>



임 병 옥(학생회원)
 2000년 한경대학교 전자공학과
 공학사 졸업
 2002년 동국대학교 전자공학과
 공학석사 졸업
 2002년 3월~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정
 <주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제작>



백 태 종(학생회원)
 2003년 중부대학교 정보통신
 공학과 공학사 졸업
 2005년 동국대학교 전자공학과
 공학석사 졸업
 2005년 9월 ~ 현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정
 <주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제작>



신 동 훈(정회원)
 1982년 동국대학교 물리학과
 이학사 졸업
 1984년 동국대학교 물리학과
 이학석사 졸업
 1999년 런던대학교 전기전자
 공학과 공학박사 졸업
 1999년~현재 동국대학교 밀리미터파 신기술
 연구센터 연구교수
 <주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제작>



이 진 구(정회원)-교신저자
 1969년 국립항공대학교
 전자공학과 공학사 졸업
 1975년 서울대학교 전자공학과
 공학석사 졸업
 1982년 Oregon State University
 전기공학과 공학박사 졸업
 1985년 Cray Research, USA, Research Scientist
 1985년 Microwave Semiconductors, USA,
 Senior Engineer
 1990년~1991년 University of Michigan,
 Visiting Research Scientist
 1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수
 1995년~현재 한국 전자파학회 이사
 1999년~현재 동국대학교 밀리미터파 신기술
 연구센터 소장
 2004년 대한전자공학회 수석부회장
 2005년 대한전자공학회 회장
 <주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제작>