

70 nm MHEMT와 DAML 기반의 하이브리드 링 커플러를 이용한 우수한 성능의 94 GHz 단일 평형 혼합기

김성찬, 임병옥, 백태종, 신동훈, 이진구

동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터

e-mail: jkrhee@dongguk.edu

High-performance 94 GHz Single Balanced Mixer Based on 70 nm MHEMTs and DAML Technology

Sung-Chan Kim, Byoung-Ok Lim, Tae-Jong Beak,
Dong-Hoon Shin, and Jin-Koo Rhee

Millimeter-wave INnovaton Technology research center (MINT)
Dongguk University

Abstract

We reported 94 GHz, low conversion loss, and high isolation single balanced active-gate mixer based on 70 nm gate length InGaAs/InAlAs metamorphic high electron mobility transistors (MHEMTs). This mixer showed that the conversion loss and isolation characteristics were 2.5 ~ 2.8 dB and under -30 dB, respectively, in the range of 93.65 ~ 94.25 GHz. The low conversion loss of the mixer is mainly attributed to the high-performance of the MHEMTs exhibiting a maximum drain current density of 607 mA/mm, a extrinsic transconductance of 1015 mS/mm, a current gain cutoff frequency (f_t) of 330 GHz, and a maximum oscillation frequency (f_{max}) of 425 GHz. High isolation characteristics are due to hybrid ring coupler which adopted dielectric-supported air-gapped microstrip line (DAML) structure using surface micromachined technology. To our knowledge, these results are the best performance demonstrated from 94 GHz single balanced mixer utilizing GaAs-based HEMTs in terms of conversion loss as well as isolation characteristics.

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) 레이다 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) 혼합기에 비하여 낮은 LO 전력 (power)을 사용하며 변환손실 특성이 우수한 장점이 있다. 높은 격리도 특성은 회로 구조의 복잡성을 고려할 때 단일 평형 (single balanced) 구조를 사용함으로써 얻어질 수 있다.

InP 기반의 HEMT는 GaAs 기반의 HEMT와 비교하여 높은 주파수 특성과 낮은 잡음 (noise) 특성으로

인하여 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 이종접합구조(heterostructure)가 In (indium) 물분율의 넓은 범위에 걸쳐 손상 없이 성장될 수 있으므로 InP 기반의 HEMTs와 비교할 때 동등한 특성을 얻을 수 있다.

본 연구의 목적은 94 GHz 응용을 위하여 낮은 변환손실 특성과 높은 격리도 특성을 동시에 갖는 단일 평형 능동 혼합기를 구현하는 것이다. 이를 위하여 게이트 길이 (gate length)가 70 nm인 MHEMT와 표면 마이크로머시닝 (surface micromachining) 기술을 이용한 하이브리드 링 결합기 (hybrid ring coupler)를 사용하였다.

II. 70 nm MHEMT 특성

혼합기의 낮은 변환손실 특성을 얻기 위하여 HEMT 소자는 낮은 게이트 정전용량 (capacitance) 및 높은 전달컨덕턴스 (transconductance) 특성을 가져야 한다 [6]. 낮은 게이트 정전용량을 위하여 narrow 게이트 리세스 (recess) 식각 (etching) 공정을 사용하는 70 nm 게이트를 소자에 적용하였으며, 높은 전달컨덕턴스 특성을 야기시키는 높은 전자 (electron) 면전하밀도 (sheet density) 위하여 이중 이종접합 구조의 에피 구조를 사용하였다 [7]. 그림 1에 MBE (molecular beam epitaxy) 를 사용하여 (100) GaAs 기판위에 성장된 에피층의 구조를 나타내었다. Hall 측정으로부터 상온 (300K)에서의

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 ¹² /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 ¹² /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. MHEMT 에피층 구조.

2DEG층의 면 전하밀도는 $3.36 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 이고 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 [8]. 제작된 MHEMT의 게이트와 소스간의 간격은 0.97 μm 이고 드레인과 소스의 간격은 2 μm 이다.

제작된 MHEMT의 DC 특성 측정 결과 단위 게이트 폭이 70 μm 이고 핑거 수가 2개인 소자의 전류 전압 특성 및 전달컨덕턴스 특성으로 핀치 오프 전압은 -0.8 V, 드레인 전류밀도 (drain current density)는 $V_{gs} = 0 \text{ V}$ 에서 607 mA/mm이며, 최대 전달컨덕턴스는 $V_{ds} = 1.6 \text{ V}$ 및 $V_{gs} = -0.3 \text{ V}$ 에서 1015 mS/mm를 얻었으며, 이를 그림 2에 나타내었다. 1 ~ 75 GHz의 범위에서 RF 측정을 하였으며 측정 바이어스 조건은 $V_{ds} = 1.6 \text{ V}$, $V_{gs} = -0.3 \text{ V}$ 이다. 측정 결과, 330 GHz의 전류이득차단주파수 (f_T : current gain cutoff frequency)와 425 GHz의 최대공진주파수 (f_{max} : maximum oscillation frequency)를 얻었다. 그림 3에 제작된 70 nm MHEMT의 RF 특성을 나타내었다.

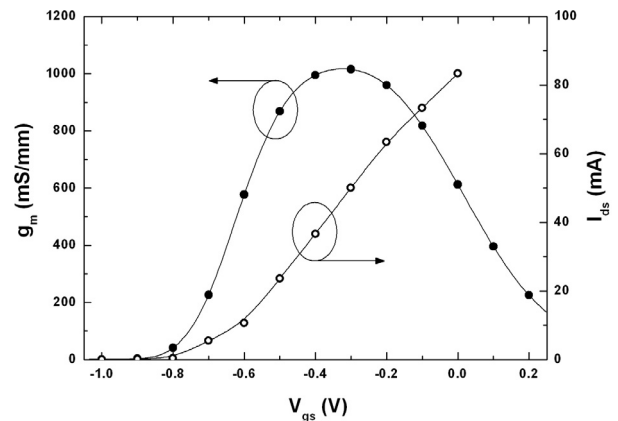


그림 2. 제작된 70 nm MHEMT의 DC 특성

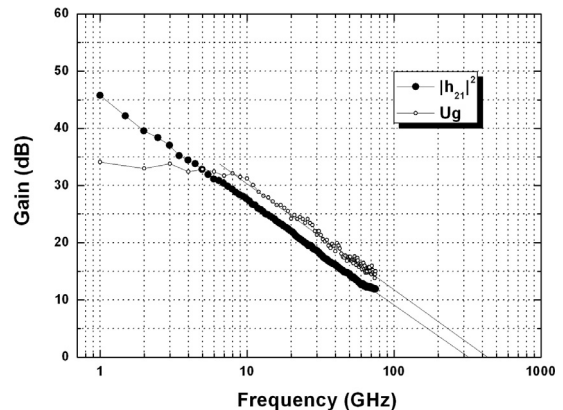


그림 3. 제작된 70 nm MHEMT의 RF 특성

III. 단일 평형 혼합기 특성

단일 평형 혼합기는 MHEMT 소자와 하이브리드 링 결합기의 특성에 기초를 두고 설계하였다. 하이브리드 링 결합기는 최근 우리 연구 그룹에서 제안한 DAML (Dielectric-supported Air-gapped Microstrip Line) 전송선로를 사용하여 구현하였다. 제안된 구조는 신호선과 접지면 사이에 공기를 유전체로 가지는 마이크로스트립 (microstrip) 전송선로써 마이크로머시닝 기술을 이용한 유전체 지지대를 사용하여 신호선을 공기 중으로 띄워 기판 유전체 손실 (substrate dielectric loss) 을 최소화 하였다 [9]. 하이브리드 링 결합기는 94 GHz 에서 DAML의 특성임피던스 (characteristic impedance)와 파장 (wave length)를 고려하여 설계되었다 [10]. 측정 결과, 85 ~ 105 GHz의 범위에서 3.57 ± 0.22 dB의 커플링 손실 (coupling loss)과 3.80 ± 0.08 dB의 삽입손실 (transmission loss) 특성을 얻었으며 94 GHz에서 -34 dB의 격리도 특성을 얻었다. 또한 94 GHz에서 두 개 출력 단자 간 위상차 (phase difference)는 $180^\circ \pm 1^\circ$ 의 특성을 얻었다.

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, 그때의 드레인 전류는 5 mA 이다.

단일 평형 혼합기의 MHEMT를 사용하는 능동 소자 부분을 위한 첫 번째 층은 본 연구 그룹에서 사용하는 표준 MMIC 공정 과정을 이용하여 제작하였다. 하이브리드 링 결합기를 구현하기 위한 DAML 구조는 MMIC 회로의 첫 번째 층 위에 3차원적으로 집적 되었다. DAML구조의 제작 과정은 일반적인 MMIC 기술과 호환이 가능하며, 더욱이 DAML 구조의 접지면은 CPW 구조를 사용하여 제작되는 MMIC의 접지면과 동일한 접지면을 사용하므로 DAML을 사용하여 구현된 수동 소자는 평면 구조인 MMICs와 쉽게 집적될 수 있다. DAML 구조의 제작은 낮은 온도($T < 120$

$^\circ\text{C}$)에서 수행되며 MMIC 회로의 성능을 감소시킬 수 있는 건식 식각 공정과 같은 공정과정이 필요 없으므로, DAML 구조를 형성하는 두 번째 층을 위한 공정 과정은 첫 번째 층의 MMIC 회로에 전혀 영향을 주지 않는다. 그림 4에 제작된 단일 평형 혼합기의 SEM 사진을 나타내었으며 전체 칩 크기는 $1.8 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$ 이다. DAML 구조의 하이브리드 링 결합기가 평면구조의 MMIC에 안정적으로 집적 되어 있는 것을 확인할 수 있다.

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

그림 5에 RF 및 LO 입력 전력 (input power)에 대한 변환손실 (conversion loss) 특성을 나타내었다. 단일 평형 혼합기의 측정결과 94 GHz의 RF 주파수, -10 dBm의 RF 전력, 94.2 GHz의 LO 주파수 및 6 dBm의 LO 전력을 인가하였을 때 2.5 dB의 변환손실 특성을 얻었다. 그림 6에 RF 주파수에 대한 변환손실과 LO 주파수에 대한 격리도 특성을 나타내었다. -10 dBm의 RF 전력 및 0 dBm의 LO 전력을 인가하였을 때 93.65 GHz에서 94.25 GHz의 범위에서 2.5 ~ 2.8 dB의 변환손실과 -30 dB 이하의 격리도 특성을 얻었다. 개발된 단일 평형 혼합기의 낮은 변환손실은 우수한 성능의 70 nm MHEMT에 기인하며 높은 격리도 특성은 하이브리드

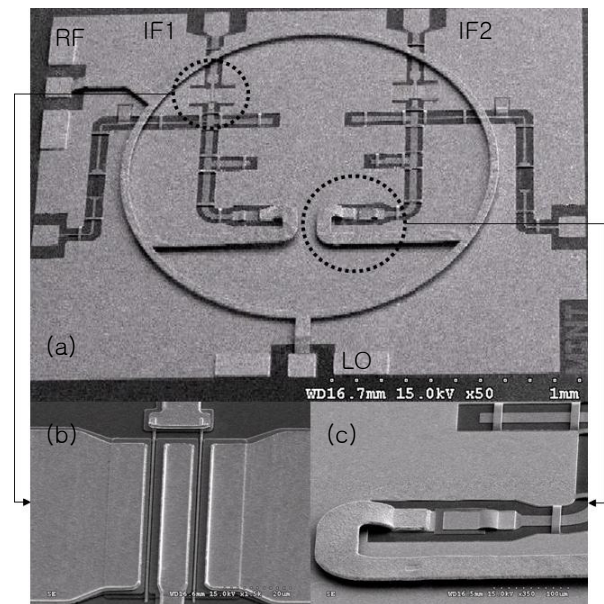


그림 4. 제작된 단일 평형 혼합기; (a) 전체 모습, (b) 70 nm MHEMT 부분, (c) DAML-to-CPW 천이 (transition) 부분.

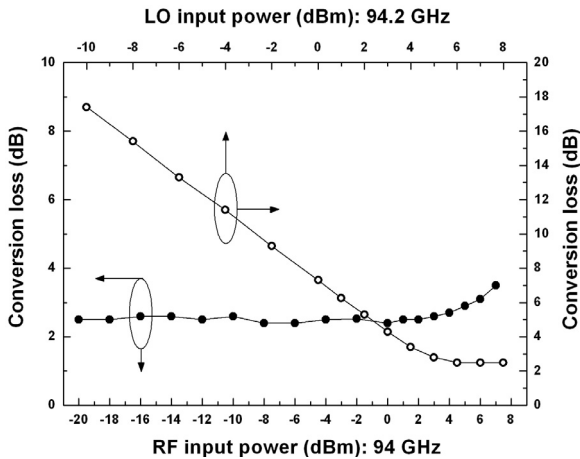


그림 5. RF 및 LO 입력 전력에 대한 변환손실 특성.

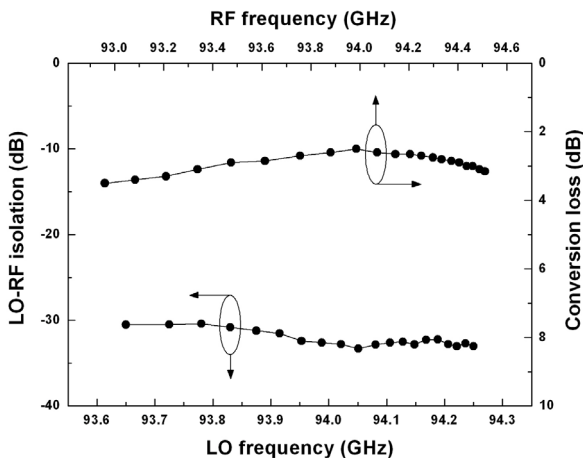


그림 6. 주파수에 대한 변환손실 및 격리도 특성.

링 결합기에 기인한다.

결합손실 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 있으며, 본 논문에 사용된 DAML 구조는 일반적인 MMIC 기술과 호환이 가능하므로 DAML을 이용한 다양한 수동소자들을 능동 MMIC와 집적화함으로써 우수한 성능의 고 집적화된 MMIC의 구현이 가능할 것으로 사료된다.

IV. 결론

본 논문에서는 94 GHz 대역 시스템의 응용을 위하여 70 nm MHEMT와 DAML 기반의 하이브리드 링 결합기를 동일 기판위에 집적하여 낮은 변환손실과 높은 격리도 특성을 동시에 갖는 단일 평형 능동 혼합기를 구현하였다. 70 nm MHEMT는 1015 mS/mm의 전달컨덕턴스 특성과 330 GHz와 425 GHz의 전류이득차단주파수와 최대공진주파수 특성을 나타내었다. 단일 평형 혼합기의 측정 결과, 6 dBm의 LO 전력을 인가하였을 때 2.5 dB의 낮은 변환손실 특성을 얻었으며 93.65 ~ 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.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Science and Engineering Foundation under the Engineering Research Center (ERC) program through the Millimeter-wave INnovation Technology (MINT) Research Center, Dongguk University.

참고문헌

- [1] Kwo Wei Chang, et al., IEEE Trans. MTT, Volume 39, Number 12, 1991, pp. 1972-1979
- [2] A. R. Barnes, et al., IEEE MTT-S Digest, 2002, pp. 1867-1870
- [3] Robinder S. Virk, et al., IEEE MTT-S Digest, 1997, pp. 435-438
- [4] P. M. Smith, et al., IEEE GaAs IC Symposium, 25th. Annual Tech. Dig., 2003, pp. 21-24
- [5] C. S. Whelan, et al., Indium Phosphide and Related Materials, 2000, pp. 337-340
- [6] Stephen A. Maas, *Microwave Mixers*, Boston·London: Artech House, 1993
- [7] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, NewYork·Chichester·Brisbane·Toronto·Singapore: JOHN WILEY & SON, 1981
- [8] S. C. Kim, et al., J. Vac. Sci. Technol. B, Volume 22, Number 4, Jul/Aug 2004, pp. 1807-1810
- [9] H. S. Lee, et al., IEE Electronics Lett., Volume 39, Issue 25, 2003, pp. 1827-1828
- [10] Sung-Chan Kim, et al., IEEE MWCL, Volume 15, Issue 10, 2005, pp. 652-654