

새로운 발룬 회로를 이용한 40 GHz 대역 MMIC 이중 평형 Star 혼합기의 설계 및 제작

Design and Fabrication of 40 GHz MMIC Double Balanced Star Mixer using Novel Balun

김 선 속 · 이 종 환 · 염 경 환

Sun-Sook Kim · Jong-Hwan Lee · Kyung-Whan Yeom

요 약

본 논문에서는 40 GHz 대역 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 이중평형 star 혼합기를 비아 공정이 있는 GaAs substrate(두께 4 mil)상에서 설계 및 제작, 측정하였다. 이중평형 star 혼합기를 구현하기 위해 발룬 회로와 다이오드 설계가 필요했다. 발룬회로는 microstrip과 CPS(Coplanar Strip)를 이용하여 새로운 구조를 제안하여, 2 GHz 대역으로 주파수를 낮추어 새로운 구조의 발룬 성능을 PCB로 제작하여 확인한 바 있다. 이를 바탕으로 40 GHz에서 MMIC 발룬을 설계하였다. 제안된 발룬은 비아 공정이 포함된 MMIC 회로에 적합하며, 이중평형 혼합기 구현에 쉽게 적용 가능하다는 특징이 있다. 다이오드는 p-HEMT를 사용하는 밀리미터파 대역의 다른 MMIC 회로들과의 호환성을 고려하여, p-HEMT 공정을 기반으로 한 쇼트키 다이오드를 설계하였다. 이를 이용한 제안한 발룬회로와 다이오드를 조합하여, 이중평형 star 혼합기를 구현하였다. 혼합기의 측정 결과 LO 전력이 18 dBm일 때, 변환손실 약 30 dB를 얻었다. 이는 p-HEMT의 AlGaAs/InGaAs 층에 의한 다이오드 때문이며, p-HEMT 구조에서 AlGaAs 층을 식각하여 단일 접합 다이오드를 만들면 혼합기의 성능이 개선될 것으로 예상된다.

Abstract

In this paper, MMIC double balanced star mixer for 40 GHz was implemented on GaAs substrate with backside vias. In the design of the MMIC mixer, the design of balun and diode was required. A novel balun structure using microstrip to CPS was presented. The 40 GHz balun was designed based on the design experience of the scale-down balun by 2 GHz. The balun may be suitable for fabrication in MMIC process with backside via and can easily be applied for DBM(Double Balanced Mixer). A Schottky diode was designed and implemented using p-HEMT process considering the compatibility with other high frequency MMIC's fabricated on p-HEMT base process. Finally, the double balanced star mixer was fabricated using the balun and the p-HEMT Schottky diode. The measured performance of mixer shows 30 dB conversion loss at 18 dBm LO power. This insufficient performance is caused by the unwanted diode at AlGaAs/InGaAs junction in vertical structure of p-HEMT. If the p-HEMT's gate is recessed to AlGaAs layer, and so the diode is eliminated, the mixer's performances will be improved.

Key words : Balun, Diode, Mixer, p-HEMT

I. 서 론

마이크로파 대역의 주파수 자원 고갈로 인해, 40 GHz 이상의 밀리미터파가 차세대 무선통신의 주파

「본 연구는 동국대학교 ERC 센터인 밀리미터파 신기술 연구센터의 지원에 의하여 수행되었음.」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea)

· 논문 번호 : 20031106-147

· 수정완료일자 : 2004년 2월 9일

수 자원으로 부각되고 있다. 이에 밀리미터파 대역에 적합한 소자로 p-HEMT(pseudomorphic-High Electron Mobility Transistor)가 널리 쓰이고 있다. p-HEMT는 밀리미터파 대역에서 매우 낮은 잡음 지수, 높은 이득 등으로 인해 저 잡음 증폭기, 전력 증폭기 등 다양한 밀리미터파 대역의 MMIC 회로에 널리 사용되어 왔다. 또한, 밀리미터파 대역의 p-HEMT 증폭기는 비아 공정이 포함되지 않은 CPW 기반으로 설계 제작된 바가 많으나, CPW 선로의 설계자료 부족, 방열 등으로 인해, 대부분 비아가 포함되어 있는 microstrip 기반에서 설계, 제작되고 있다.

반면에, p-HEMT를 직접 사용하는 혼합기는 잘 알려져 있지 않다. 이는 p-HEMT의 등가 파라메타의 변수가 많아서 안정적인 혼합기 회로를 구현하기 어려웠기 때문이다. 따라서 p-HEMT를 직접 사용하는 대신에 드레인과 소오스 단자를 연결 다이오드로 사용하여 혼합기를 만든다면, 안정되고 예측 가능한 혼합기 회로를 구성할 수 있고, 이를 바탕으로 보다 큰 MMIC 회로를 안정적으로 구성할 수 있을 것이다.

이와 같이 p-HEMT를 드레인과 소스단자를 연결하여 다이오드로 사용할 경우, 이는 증폭기 소자로 최적화되어 다이오드로서의 차단 주파수 성능이 떨어지게 된다. 이러한 점을 고려 본 논문에서는 혼합기 설계를 위해서 p-HEMT 공정을 기반으로 한 차단 주파수가 개선되는 새로운 p-HEMT 쇼트키 다이오드를 설계 제작하였다.

따라서, 본 논문에서는 설계된 p-HEMT 기반 쇼트키 다이오드와 2 GHz 대역에서 새롭게 제안했던 발룬 구조를 40 GHz 대역으로 설계한 후 조합하여, 40 GHz 대역 이중 평형 star 혼합기를 구현하였다.

II. 40 GHz 대역 발룬회로

40 GHz 대역을 위한 발룬을 MMIC로 프로세싱하기 전에, 새로이 제안한 발룬의 성능 평가를 위해 2 GHz 대역으로 주파수를 낮추어 동작을 확인한 바 있다. 2 GHz 대역의 발룬 회로 측정과 시뮬레이션 결과 평형 포트간의 위상 차는 $180^\circ \pm 1.5^\circ$ 이내이었으며, 진폭 차는 ± 0.2 dB 이내로 일치하였다. 따라서, 40 GHz 대역에서 발룬 회로 설계 시 측정치와 시뮬레이션치가 잘 맞을 것으로 예상된다.

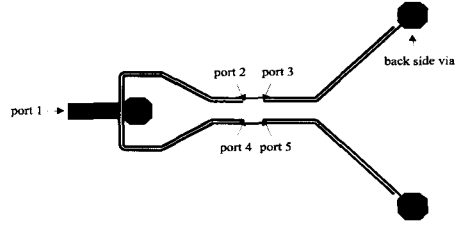


그림 1. 40 GHz 대역 발룬 layout
Fig. 1. Balun layout for 40 GHz.

그림 1은 40 GHz 대역 발룬 회로의 layout을 보였다. MMIC 웨이드 다이오드와의 연결을 위해, 라인에 bending을 주어 조정하였다. 회로의 왼쪽에서 비아 하나를 공유하고, 오른쪽 끝에서는 비아를 각각 사용하여 그라운드로부터의 동일한 시작점을 갖도록 하였다. 선로의 width는 $9 \mu\text{m}$, 선로간의 spacing은 $6 \mu\text{m}$ 이었다.

발룬 회로의 동작을 확인하기 위해 HP ADS2001의 모멘텀 시뮬레이션을 이용하였다. 그림 1에서 port 1에 불평형 신호(unbalanced signal)를 인가했을 경우, 평형 신호(balanced signal)가 port 2와 3에 나타나게 되며, port 2 및 port 3에서 나타나는 신호와 동일한 신호가 port 4와 5에 나타난다.

그림 2는 그림 1의 회로의 평형 포트간의 불평형 정도의 특성을 모멘텀 시뮬레이션한 결과이다.

모멘텀 시뮬레이션 결과, 35~45 GHz 대역 내에서 진폭 불평형 정도는 1 dB 이내였으며, 위상의 불평형 정도는 $180^\circ \pm 2.5^\circ$ 이내였다. 중심 주파수 40 GHz에서 진폭의 불평형 정도가 0.2 dB, 위상 불평형 정도가 $180^\circ \pm 1^\circ$ 이었다.

III. 쇼트키 다이오드

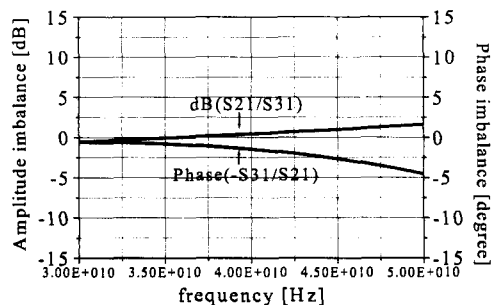


그림 2. 평형 포트간의 불평형 정도
Fig. 2. Imbalance between balanced ports.

Maas^[1]와 Ryu^[2]는 변형된 HBT 공정을 사용한 쇼트키 다이오드를 설계하여, star 혼합기에 적용하였다. 하지만, 정확한 구조 및 공정 패턴에 대한 정보를 얻을 수 없었으며, 또한 이는 p-HEMT를 사용한 다른 고주파 대역 MMIC 회로들과 호환되지 않게 된다. p-HEMT 공정에서의 다이오드는 게이트 단자를 anode로, 드레인과 소오스 단자를 연결하여 cathode로 사용함으로써, 쉽게 구현할 수 있다. 이를 다이오드로 사용할 경우, 증폭기로 사용할 때 고주파 특성을 위해 p-HEMT의 게이트를 가늘게 구현하는데, 이로 인한 게이트 단자에서의 높은 저항과 fringing 캐패시턴스로 인해, 게이트와 동일한 면적을 갖는 쇼트키 다이오드보다 차단 주파수 특성이 낮을 것이다. 따라서, 이러한 점들을 감안하여 그림 3과 같이 총면적(6 μm^2)이 같은 쇼트키 다이오드를 설계하였다.

그림 3에서 mesa 위에 게이트 metal로 쇼트키 접합을 만든 후, first metal로 anode에 연결하고, 나머지 mesa 영역에 ohmic metal을 올린 후 다시 first metal을 사용 cathode로 연결하였다.

그림 4는 parameter analyzer HP4156B의 장비를 이용하여, 제작 다이오드의 DC를 측정된 데이터이다. 그림 4(a)는 V_g 를 -1~1 V까지 변화시키면서 측정된 전류 특성을 보인 것이고, 그림 4(b)는 0~1 V까지 변화시키면서 측정된 전류를 로그 스케일로 보인 것이다.

그림 5는 다이오드의 바이어스 전압이 0 V일 때의 network analyzer를 사용한 S 파라메타 측정값을 0.2~50 GHz의 주파수에 대해 보였다.

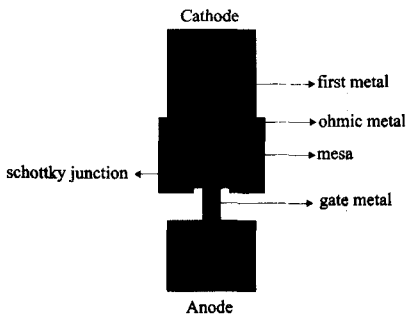
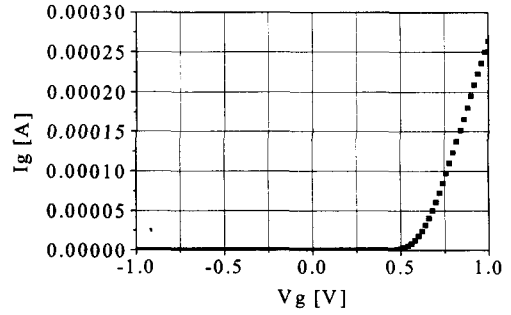
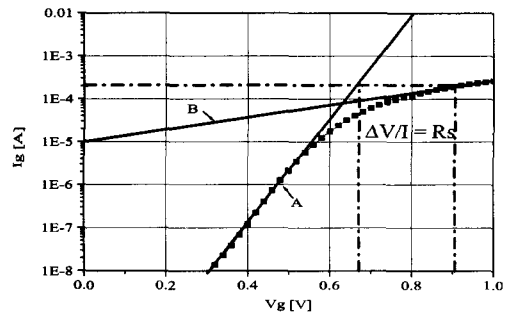


그림 3. p-HEMT 공정을 이용한 쇼트키 다이오드 레이아웃

Fig. 3. Schottky diode layout using p-HEMT process.



(a) 게이트 전압 전류 특성
(a) I_g - V_g characteristic



(b) 게이트 전압 전류(log 스케일) 특성
(b) $I_g(\log \text{ scale})$ - V_g characteristic

그림 4. 다이오드 DC 특성
Fig. 4. DC characteristics of diode.

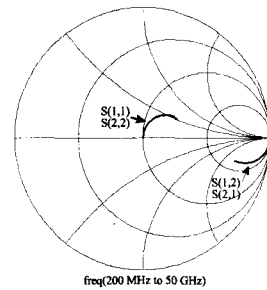


그림 5. 다이오드의 S 파라메타 측정
Fig. 5. S parameter's measurement of diode.

스미스 차트상에 나타난 S 파라메타 값들은 다이오드 측정을 위해 불가피하게 추가된 PAD와 입출력 line에 대해 보상하여 다이오드만의 S 파라메타를 보였다. 보상 방법은 입출력 line 길이와 같은 Thru와 Thru의 반쪽 패턴이 open된 Reflect와 Thru에 약간의 길이를 추가한 Line 패턴을 측정한 후, Pozar^[5]의 수식을 이용하였다.

측정값의 다이오드 등가 회로 값을 구하기 위해

측정 S 파라메타 특성과 다이오드 등가 모델의 S 파라메타와 특성이 같도록 ADS2001에서 최적화를 수행하였으며, 수행 결과 R_s 가 177.78 Ω , C_j 가 21 fF 이었다.

그림 4(b)를 이용해서 A 직선에서 deviation된 부분이 R_s 에 의해 나타난다고 하고, 값을 구하면 약 1370 Ω 의 큰 값이 나오게 된다. 이는 network analyzer와 측정된 값에 비해 큰 차이를 보이고 있다.

이것에 대한 설명으로는 그림 6과 같이 p-HEMT와 수직적 구조가 같기 때문에, 그림 4(b)의 낮은 전압에서 그림 6의 A에서처럼 metal/AlGaAs 쇼트키 다이오드와 AlGaAs/InGaAs에 의한 역 방향의 다이오드가 더 보이게 된다. B의 경우 연결상 역 바이어스(reverse bias)로 되어 있지만, 이것은 bias에 의한 contact potential의 변화가 심하여 정 바이어스(forward bias)된 것으로 고려할 수 있다^{[3],[4]}. 따라서, p-HEMT 공정으로 얻어지는 그림 6과 같이 다이오드는 방향이 같은 다이오드는 두 개의 다이오드와 R_s 가 직렬로 연결된 것으로 볼 수 있다.

이상을 고려하면 그림 4(b)의 I-V 곡선에서 직선 B 부분은 R_s 에 의한 것이 아니고, 이는 AlGaAs/InGaAs의 다이오드에 기인한 것으로 볼 수 있다. 이때 직선 A의 η_1 (ideality factor)이 1.23이며, I_{s1} (saturation current)는 0.24 pA, B의 η_2 는 7.95이며, I_{s2} 는 약 80 uA 정도가 된다.

이것을 확인하기 위하여 다이오드에 DC 전압을 2 V까지 확장하여 재 측정하였고, 그 결과를 그림 7에 보였다. 측정 결과 약 215 Ω 으로 S 파라메타로 추출해낸 R_s 와 유사한 값을 보인다.

따라서, R_s 는 그림 4(b)에서의 A의 deviation에 의

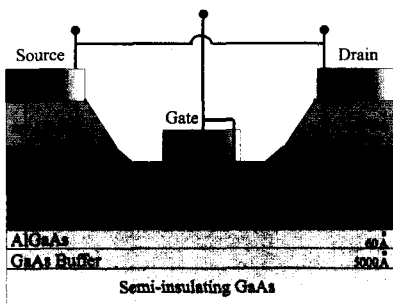


그림 6. p-HEMT 쇼트키 다이오드의 수직적 구조
Fig. 6. Vertical structure of p-HEMT schottky diode.

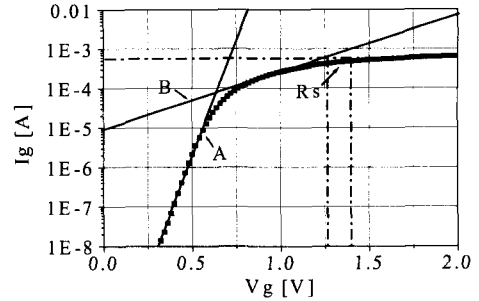


그림 7. p-HEMT 쇼트키 다이오드의 특성
Fig. 7. Characteristic of p-HEMT schottky diode.

한 것이 아니며, 또한 p-HEMT에서 쇼트키 다이오드를 구현할 경우 직렬 저항과 두 개의 다이오드가 연결되어 그림 7과 같은 곡선이 나올 수밖에 없게 된다.

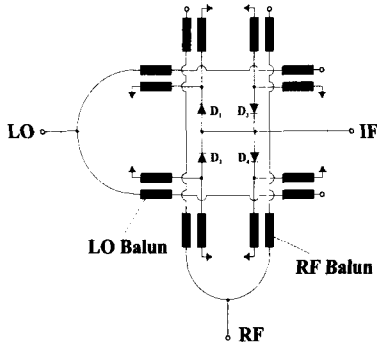
IV. MMIC Mixer의 설계 및 측정 결과

그림 8은 혼합기를 간략화 시킨 회로와 제작된 혼합기 사진이다. 혼합기에서 강한 LO 신호의 영향을 덜 받도록 하기 위해 LO 포트에 대해 RF와 IF 포트를 90°가 되도록 배치하였다. RF와 LO의 평형 신호 인가를 위해 그림 1과 같이 동일한 2개의 발륜을 사용하였다. 쿼드의 중앙에서 IF 출력을 얻어 대칭성이 우수할 것으로 보인다.

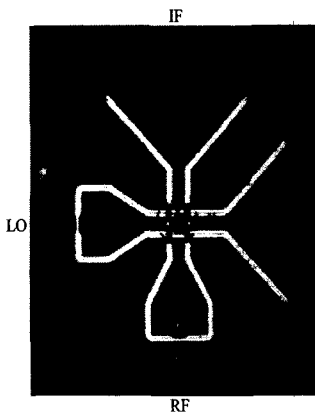
그림 9는 혼합기의 power 측정 전에, 쿼드 다이오드의 동작 유무를 판단하기 위해, DC 측정을 수행하였다.

그림 9와 같은 환경에서 parameter analyzer HP-4156B를 이용하여, 그림 8(a)의 IF 포트에 전압을 -1 ~ 1 V까지 변화시키면서 그라운드 포트에서 전류를 측정하였다. 역 바이어스에서 -방향의 두 개의 다이오드가 동작하고, 정 바이어스에서 +방향의 두 개의 다이오드가 동작한다. 그림 10의 I-V 커브를 이분하면, +와 -방향의 다이오드 하나씩에 대해 I_s 와 η 를 구할 수 있다.

그림 11은 다이오드에서 추출한 다이오드 파라메타 값들을 이용하여 LO 전력에 따른 변환손실을 시뮬레이션한 값이다. A는 S 파라메타 측정값에서 추출한 R_s 와 직렬로 하나의 쇼트키 다이오드가 연결되어 있는 다이오드 모델에 대한 것이고, B는 A에 AlGaAs/InGaAs에 의한 다이오드가 직렬로 추가 연결되어 있는 다이오드 모델에 대한 것이고, C는 B의



(a) 간략회로도
(a) Simplified circuit



(b) 제작된 사진
(b) Photograph

그림 8. 이중평형 주파수 혼합기 간략회로도 및 사진
Fig. 8. The simplified circuit and the manufactured photograph of double balanced star mixer.

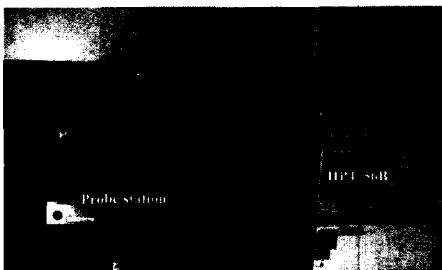


그림 9. Star quad 다이오드 측정을 위한 장비도
Fig. 9. Setup of the equipments for star quad's DC measurement.

두 개의 다이오드에 각각 병렬로 연결되어 있는 측정된 S 파라메타에서 추출한 C₁를 갖는 다이오드 모델을 사용하여, 시뮬레이션치를 보였다.

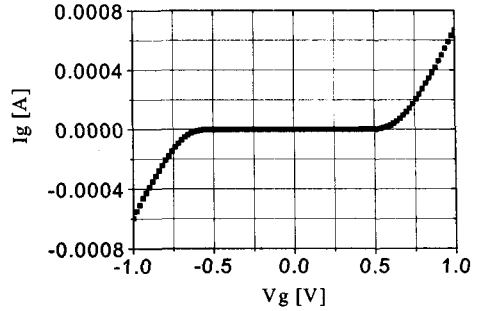


그림 10. Star quad 다이오드의 I-V 특성
Fig. 10. I-V characteristics of star quad diode.

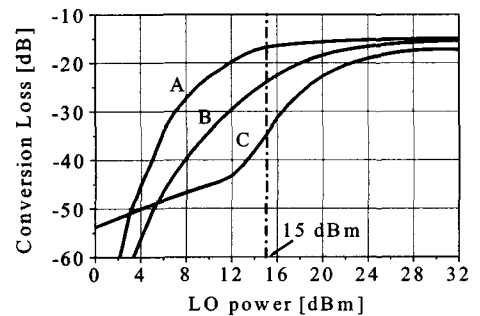


그림 11. LO 전력에 따른 변환 손실 시뮬레이션
Fig. 11. Simulation of conversion loss vs. LO power.

이때, RF 주파수는 38 GHz로, LO 주파수는 40 GHz로 고정된 후, LO 전력을 0 dBm부터 35 dBm까지 변화시켰다. B는 A보다 AlGaAs/InGaAs에 의한 다이오드 때문에 변환 손실 곡선이 오른쪽으로 이동하여 원하는 변환 손실을 얻기 위해 더 높은 LO 전력이 필요함을 알 수 있었다. C는 캐패시턴스의 영향으로 낮은 LO 전력에서 캐패시턴스에 의한 믹싱으로 변환 손실 기울기가 작아지며, A, B 다이오드 모델을 사용한 혼합기에 비해 훨씬 큰 LO 전력이 필요함을 알 수 있었다.

그림 12는 제작된 혼합기의 칩들에 대한 변환손실의 시뮬레이션 결과 및 측정 그래프이다. 그림 12에서 synthesized sweeper의 전력이 충분하지 않아 LO 전력을 증폭기 HP83050A를 이용하여, 4 dBm에서 18 dBm까지 변화시키며, 변환 손실을 측정하였다. 이때, RF 주파수는 38 GHz로, LO 주파수는 40 GHz로 고정하였다. 또한, 시뮬레이션 결과는 그림 10에서 구한 I_g와 η 를 이용하여 다이오드를 모델링하여 시뮬레이션 하였으며, 그 값을 측정치와 비교

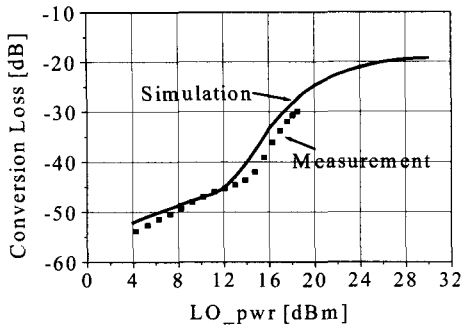


그림 12. 측정치와 시뮬레이션치 비교
 Fig. 12. Comparison of the measured and the simulation results.

하였다. 시뮬레이션치로 예측해 보았을 때, AlGaAs/InGaAs 층으로 인한 다이오드 때문에 LO 전력이 30 dBm이 되어도 변환손실이 17.2 dB 정도로 낮았다.

따라서, p-HEMT 환경에서 쇼트키 다이오드를 구현할 경우 단일 접합 쇼트키 다이오드로 만든 것보다 파라메타 값들이 나빠서 약 10 dB 정도의 변환손실을 얻기 위해 큰 LO 전력이 필요하다. LO 전력을 줄이기 위해 그림 6에서와 같이 게이트 식각을 하여 단일 쇼트키 접합이 되도록 한다면, well에 의한 다이오드가 보이지 않으므로 혼합기 구현이 가능할 것으로 예측된다. 하지만, 현재의 공정 기술로서는 p-HEMT 공정에 별도의 process 추가가 필요하게 되고, 할 수 있다 하더라도 AlGaAs 층을 식각하여 well을 형성하는 InGaAs 층에 도달했다는 상태 파악이 어려워서 매우 난해한 공정으로 칩마다 균일하며 안정된 특성을 얻기 어려울 것으로 예상된다. 따라서, 현재로서는 p-HEMT와 동일한 수직적 구조에서는 40 GHz 대역 star 혼합기에 적합한 쇼트키 다이오드를 구현하기 어려웠다.

V. 결 론

본 논문에서는 발룬회로는 비아 공정을 포함하는 microstrip 환경에 적합하도록, Chang의 Mouw의 hybrid junction을 이용한 발룬 구조를 수정했었던 새로

운 발룬 구조와 p-HEMT 쇼트키 다이오드를 조합하여, 40 GHz 대역의 MMIC 이중 평형 star 혼합기를 구현하였다. 모멘텀 시뮬레이션 결과 40 GHz 중심 주파수에서 위상의 불평형 정도가 $180^\circ \pm 1^\circ$ 이었으며, 진폭의 불평형 정도가 약 0.2 dB 정도였다. 새롭게 제안한 발룬은 이중평형 혼합기에 적용하기 편이 하며, 현재 대부분의 회로가 microstrip 환경에서 구축되므로, 다른 소자들과 융통성 있게 호환 가능하다.

밀리미터파 대역에서 p-HEMT가 널리 사용되고 있으므로, p-HEMT를 사용하는 MMIC 소자들과의 호환성을 위해, p-HEMT 환경에서 쇼트키 다이오드를 설계하였다. 하지만, 현재로서는 p-HEMT와 동일한 수직적 구조로는 단일 쇼트키 접합을 만들 수 없으며, 혼합기에 적용하기 위해서는 높은 LO 전력이 필요하다. 따라서, star 혼합기에 적용하기에는 부적합하였다. p-HEMT의 구조적 개선이 필요한데, 이는 게이트를 InGaAs층까지 깊게 식각하여 단일 쇼트키 접합이 되도록 한다면 가능할 것이다.

참 고 문 헌

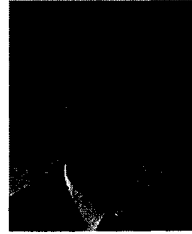
- [1] S. A. Maas, "A broadband planar, doubly balanced monolithic Ka-band diode mixers", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-41, pp. 2330-2335, Oct. 1993.
- [2] Y. I. Ryu, K. W. Kobayashi and A. K. Oki, "A monolithic broadband doubly balanced EHF HBT star mixer with novel microstrip baluns", in *IEEE Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuit Symp. Dig.*, pp. 119-122, 1995.
- [3] C. H. Chen, "A new and simple model for GaAs heterojunction FET gate characteristic", *IEEE Trans. on electron devices*, vol. 35, no. 5, May 1988.
- [4] S. A. Wartenberg, "The epHEMT gate at microwave frequencies", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 51, no. 6, Jun. 2003.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1998.

김 선 숙



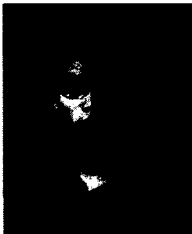
2000년 2월: 한밭대학교 정보통신 공학과 (공학사)
2002년 3월~현재: 충남대학교 전 파공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템

염 경 환



1976년~1980: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
1980년~1982월: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학석사)
1982년~1988년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학박사)
1988년 3월: 금성전기(주) 소재부품 연구소 선임연구원(MIC 팀 팀장)
1990년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원
1991년 5월: 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원
1991년 8월: (주) LTI
1995년 10월: 충남대학교 전파공학과 조교수
1999년 10월~현재: 충남대학교 전파공학과 부교수
[주 관심분야] 마이크로파 회로 및 시스템

이 종 환



1998년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2000년 3월~현재: 충남대학교 전 파공학과 박사과정
[주 관심분야] 초고주파 능동회로 및 시스템, MMIC 설계