

MMIC 이중평형 주파수 혼합기의 선형성 개선을 위한 LO Power 최적화 연구

A Study on Optimization of LO Power for Improving Linearity in MMIC Double Balanced Mixer

김태영*
(Tae-Young Kim)
(Kwangwoon Univ.)

이민재**
(Min-Jae Lee)
(Kwangwoon Univ.)

이종철***
(Jong-Chul Lee)
(Kwangwoon Univ.)

요약

본 논문에서는 이동통신대역에 사용 가능한 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits) 이중평형 주파수 혼합기(Double Balanced Mixer)를 설계하고 LO 전력 최적화에 관한 연구를 다룬다. 본 논문에서 제안한 MMIC 이중평형 주파수 혼합기의 칩 크기는 4×4 [mm²]이며, GaAs 기판을 사용한다. LO power에 대한 최적화 연구는 입력신호의 선형성에 대한 Input IP3(IIP3)에 대해서 진행하며, LO power+16 dBm을 인가했을 때 IIP3성분이 약 23.2dBm을 보여 가장 우수한 특성을 나타내었다.

핵심어 : MMIC, 이중평형, 주파수 혼합기, Lo Power, 최적화

ABSTRACT

In this paper, a MMIC double balanced mixer that can be applied to the tele-communication band is designed and LO power optimization for the mixer is discussed. The chip of the MMIC double-balanced mixer is fabricated on GaAs substrate with the size of 4×4 mm². Optimization study of LO power for the MMIC double-balanced mixer proposed in this paper is conducted for the Input IP3 (IIP3) regarding on the linearity of the input signal. When LO power level of +16 dBm is applied to the mixer, IIP3 is obtained to be approximately 23.2 dBm, which is the most outstanding characteristic.

Key words : MMIC, Double balanced, Mixer, Lo Power, Optimization

† 본 논문은 2015년도 전자파학회 추계학술대회에 발표된 내용을 보완한 것입니다. 본 연구에 많은 도움을 주신 ㈜알에프디엔 씨의 김현진 박사님과 배정형 연구소장님께 감사드립니다.

* 주저자 : 광운대학교 전자공학과 석사과정

** 공저자 : 광운대학교 전자공학과 석사과정

*** 교신저자 : 광운대학교 전자공학과 교수

† Corresponding author : Jong-Chul Lee(Kwangwoon Univ.), E-mail jclee@kw.ac.kr

† Received 9 June 2016; reviewed 7 July 2016; Accepted 1 August 2016

I. 서 론

최근 광대역 이동통신 시스템이 발전하면서 그에 맞는 부품들도 많은 발전을 하고 있다. 그 중에서도 광대역 이중평형 주파수 혼합기(Double Balanced Mixer)가 중요 부품 중 하나로 세계 곳곳에서도 빠르게 발전하는 중이다. 특히, 이중평형 주파수 혼합기는 각 포트간의 격리도가 우수하며, 각종 잡음 및 고조파의 발생을 억제할 수 있다. 또한, 외부의 주파수 여파기가 별도로 필요치 않은 장점을 갖고 있다. 여기에 마천드 발룬을 사용하면 이중평형 주파수 혼합기를 구현하는데 용이하고, 높은 격리도 등의 우수한 특성을 갖는다. 마천드 발룬은 두 개의 결합기로 구성되어 있고, 두 개의 결합량을 크게 함으로써 광대역 특성을 나타낼 수 있다[1-3].

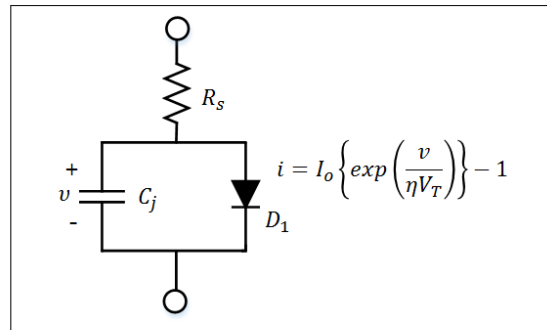
능동소자와 수동소자가 반도체 제작 공법에 의해 GaAs, InP, Si 등의 반도체 기판 상에 일괄적으로 제작된 반도체 집적회로가 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit)이며, 통상적으로 동작 주파수는 마이크로파 또는 밀리미터파 대역이다. GaAs 반도체 기판 상에 제작된 MMIC는 1960년대에 발표되었으며, 본격 상용화하기 시작하면서부터는 무선통신 하드웨어 기술 상 많은 발전을 이루게 되었다. 대표적으로는 PCS, DBS, 위성 DMB를 포함하는 위성방송 송수신 시스템, 자동차 충돌방지 시스템과 군수용 시스템을 포함하는 밀리미터 파 송수신 시스템, 그리고 RFID와 UWB 등 오늘날의 모든 무선통신 시스템에 포함되는 RF 송수신 블록을 구성하는 핵심소자가 MMIC이다[4, 5].

본 논문에서는 LTE 기지국 및 이동통신용 중계기에 사용될 주파수 대역인 1.7~3.0 GHz 대역을 목표로 LO-IF 사이의 높은 격리도를 갖는 MMIC 이중 평형 믹서를 설계하여 LO Power를 +15 dBm부터 +20 dBm까지 조절하면서 주파수 혼합기의 특성변화와 최적화에 대하여 분석을 진행한다.

II. 주파수 혼합기 이론

주파수 혼합기는 주파수의 변환을 위한 비선형 소자(다이오드, 트랜지스터) 특성을 이용한 3-포트 소자이다.

쇼트키 다이오드는 독일의 물리학자 W. H. 쇼트키의 이름에서 유래가 되었다. 쇼트키 다이오드는 전자가 풍부한 n^+ Si 기판(substrate) 위에 형성시키며, 이 위에 박막의 에피층(epi layer)이 증착된다. 그리고 다이오드가 형성되지 않는 부분은 SiO_2 로 격리되며, 다이오드가 형성되는 부분에는 도체를 증착하여 형성된다.



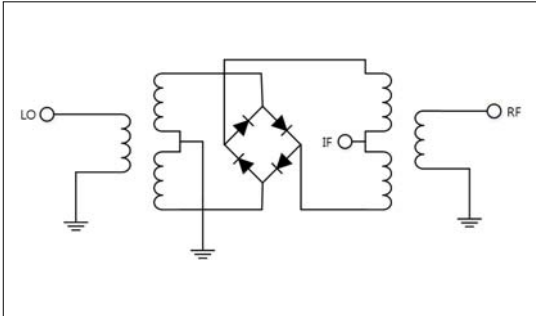
(Fig. 1) Equivalent circuit of a Schottky diode

<Fig. 1>은 그림 2-6은 쇼트키 다이오드의 등가 회로를 나타내었다. R_s 는 도체와 접합으로 발생하는 직렬 저항을 나타내며, C_j 는 접합에 의해 발생하는 공핍영역 커패시턴스를 나타낸다.

여기서 I_o 는 포화전류(Saturation Current), n 은 이상인자 (ideality factor), V_T 는 상수로써 열전압 (Thermal Voltage)을 나타낸다.

본 논문에서 사용된 이중평형 주파수 혼합기는 두 개의 하이브리드(발룬) 결합이나 변압기를 사용하며, RF/LO 단의 고조파 제거 특성과 입/출력 포트 신호의 격리도가 매우 우수하다(Fig. 2). 이는 변환손실 특성이 좋다는 것을 의미하며, 단일 종단 주파수 혼합기나 단일 평형 주파수 혼합기보다 높은 3차 고조파 주파수 차단 특성을 보여준다. 이 혼합

기는 최소 4개의 정합된 비선형 소자(다이오드)와 2개의 발룬 회로로 구성되어 있으며, 안테나에서 신호를 받으면 LO 단에서 나오는 신호와 합 또는 차로 인해 출력하게 된다. 이때, 신호가 180. 위상차가 나도록 출력을 하게 되면 신호의 격리도 및 감쇠 현상을 줄일 수 있다. 때문에 이중평형 주파수 혼합기를 많이 사용하는 이유이다.



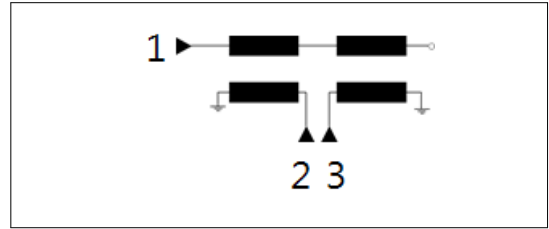
(Fig. 2) Double balanced mixer structure

근대의 마이크로파 시스템들은 실제로 몇 개의 주파수 혼합기와 여파기들을 사용함으로써 기저대역 신호와 RF 신호단의 반송파 주파수의 상향 변환 및 하향 변환을 이루어 낸다.

주파수 혼합기의 종류로는 단일중단, 단일평형, 이중평형 등의 혼합기가 있다[1].

III. 마천드 발룬

마천드 발룬은 불평형 부분과 평형 부분, 2개의 중단 회로, 한 개의 개방회로 부분으로 구성되어 있다(Fig. 3). 각 부분은 중심 주파수의 $\frac{\lambda}{4}$ 의 전기적 길이를 갖는다. 그러므로 전체 부분의 전기적 길이는 $\frac{\lambda}{2}$ 의 길이를 갖는다. 마천드 발룬은 다른 발룬에 비해서 광대역 성능이 좋으며, 설계 시 특성임피던스 Z_{oc} , Z_{oo} 에 덜 민감하다. 하지만 $\frac{\lambda}{4}$ 의 전송선로 길이를 갖기 때문에 크기가 다소 큰 편이며, 낮은 유전율의 기판에서 마이크로스트립 선로 기술로 구현이 어려운 편이다[3].



(Fig. 3) Equivalent circuit of Marchand balun

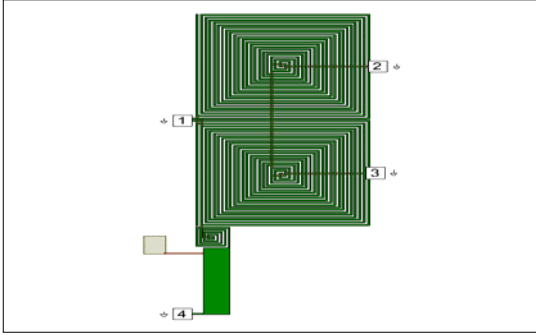
IV. 주파수 혼합기 설계 및 측정

1. 발룬 설계 및 시뮬레이션

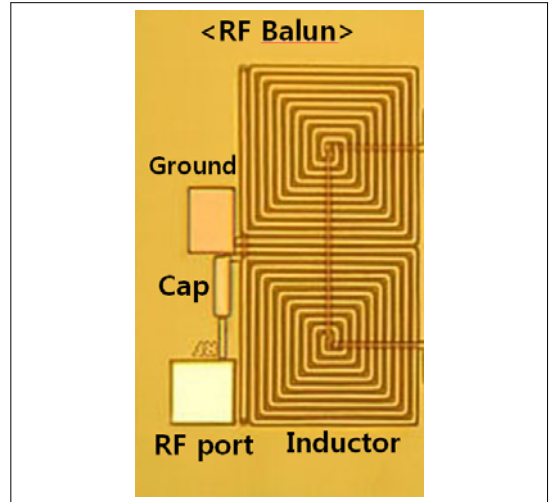
MMIC는 GaAs 기판 위에 MESFET을 주요한 능동소자로 하고 저항과 인덕터, 캐패시터를 수동소자로 집적하여 단일 부품인 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit)로 제작한다. 캐패시터를 예로 들면 캐패시터의 밑판으로 사용되는 첫 번째 금속을 기판위에 증착 후 유전체로 사용될 재료를 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)등의 방법을 이용하여 수천 앵스트롬(Å)의 얇은 두께로 증착한 후 캐패시터의 윗판으로 쓰이는 두 번째 금속을 증착한다. 마지막으로 윗판과 평면형 feed 구조를 연결하기 위해 3차원적 연결구조인 에어브릿지(Air-bridge)를 제작한다. 또한 기판의 위 아래를 연결하는 비아-홀(via-hole), 인덕터, 저항 등도 이러한 방법으로 기판위에 제작과정을 거친다.

먼저 중심주파수를 정한 뒤 $\frac{\lambda}{4}$ 만큼 길이를 계산하는데, 길이가 길수록 낮은 주파수 쪽으로 주파수 이동이 발생하기 때문에 이 점 유의해서 길이를 정한다. 중심 주파수가 2.15 GHz 이므로 이 주파수에 맞는 길이를 계산한다. 이 때 중심주파수가 낮은 쪽에 있으므로 직선으로 마천드 발룬을 설계를 한다면 전체 크기가 커질 것이다. 길이가 길수록 낮은 주파수 쪽으로 주파수 이동이 생기기 때문이다. 본 논문에서는 나선형 형태를 택하여 LO용 및 RF용 마천드 발룬을 설계한다(Fig. 4와 Fig. 6). 여기서 나선형 구조 설계 시 선과 선 사이에 생기는 기생 커패시턴스

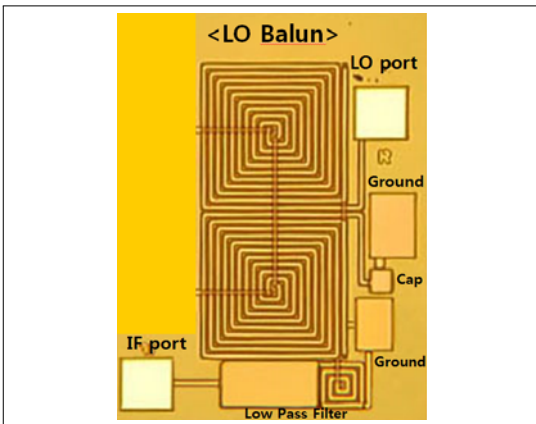
를 생각하여 선의 두께와 선과 선 사이의 간격을 선택해야 한다. 측정에 사용된 PCB 기판은 $\epsilon_r = 2.54$, 두께는 0.54 mm, 금속두께는 0.018 mm이다.



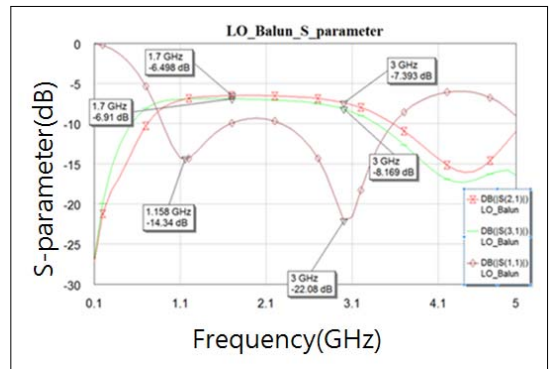
〈Fig. 4〉 LO balun structure



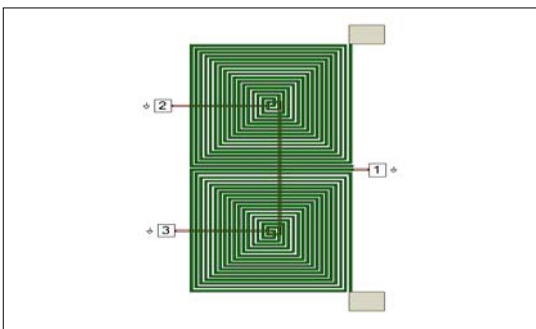
〈Fig. 7〉 RF balun schematic



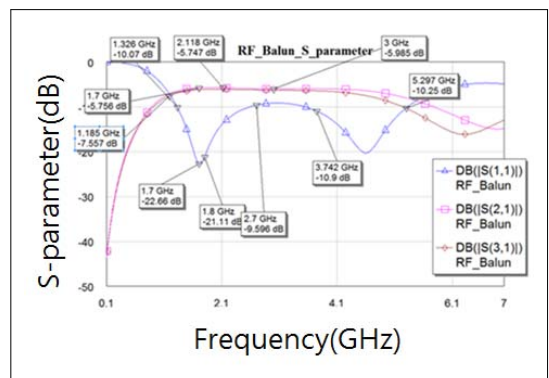
〈Fig. 5〉 LO balun schematic



〈Fig. 8〉 S-parameter characteristics for LO balun

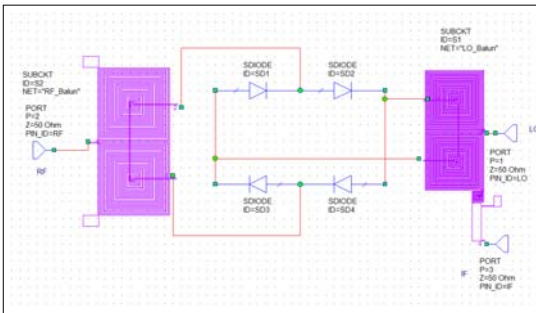


〈Fig. 6〉 RF balun structure



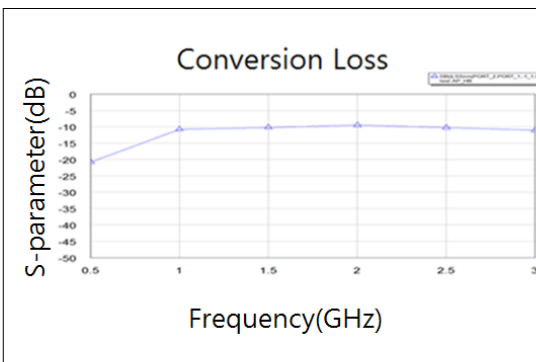
〈Fig. 9〉 S-parameter characteristics for RF balun

<Fig. 5>와 <Fig. 7>은 각각 LO 발룬 및 RF 발룬의 Layout schematic 그림이다. 또한 <Fig. 8>과 <Fig. 9>는 각각 LO, RF 발룬의 S-parameter 특성에 관한 그래프이다. 본 논문에서 제안한 주파수 대역이 1.7~3.0GHz인데, 조금 더 넓은 1.1~5.0GHz 대역을 나타내고 있다. 그러므로 본 발룬은 주파수 혼합기를 설계할 때 적용이 가능하다. 본 논문에서 설계한 발룬의 대역폭은 RF 발룬 128%(1.1~5 GHz), 위상차는 $\pm 2^\circ$ 이며, LO 발룬 126%(0.8~3.5 GHz), 위상차는 $\pm 4^\circ$ 로 나타났다.



<Fig. 10> The proposed structure of a double balanced mixer

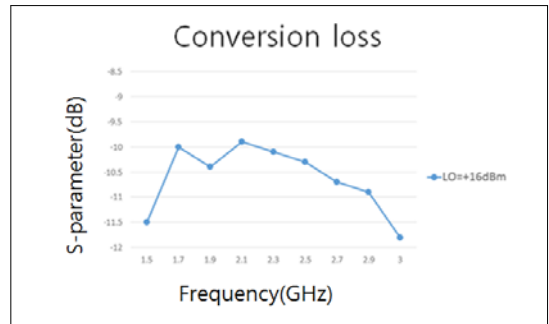
<Fig. 10>은 본 논문에서 제안한 이중평형 주파수 혼합기의 구조를 나타냈다. 3포트로 이루어져 있으며 LO, RF 포트 쪽에 각각 LO 발룬, RF 발룬을 연결한 모습이다.



<Fig. 11> Simulation results of conversion loss for the mixer

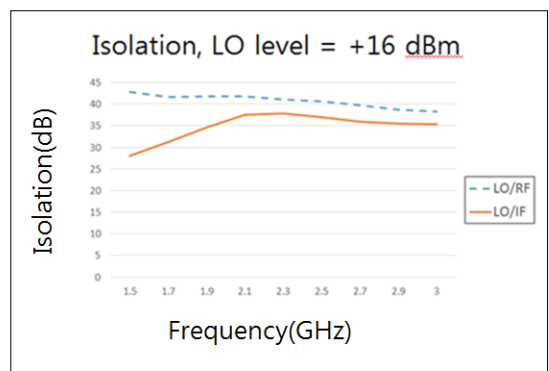
<Fig. 11>은 제안한 주파수 혼합기의 LO level을 +16dB 인가했을 때 도출한 변환손실시뮬레이션 결과이다. 이 때, 최고점은 2GHz에서 9.5dB를 보였고, 최저점은 3GHz에서 11.2dB를 보였으며, 평균 9.8dB를 보였다.

2. MMIC 이중평형 주파수 혼합기 측정



<Fig. 12> Measurement results of conversion loss for the mixer

<Fig. 12>는 제안한 주파수 혼합기의 LO level을 +16dBm을 인가했을 때 실제 측정한 변환손실 결과 그래프이다. 1.5GHz~3GHz대역에서는 평균 약 10.4dB로 나타났고, 이동통신대역인 1.7GHz~2.7 GHz에서 평균 10.2dB를 보였다. LO level을 +15 dBm~+20dBm까지 인가했을 때 LO level이 높을수록 변환손실의 특성이 우수하다는 것을 보였다.

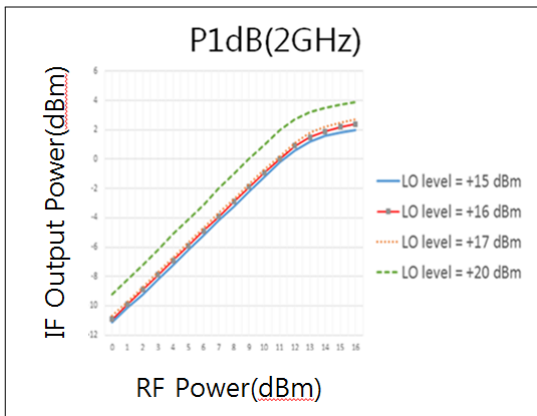


<Fig. 13> Measurement results of isolation for the mixer

<Fig. 13>은 LO level +16dBm을 인가했을 때 도출한 주파수 혼합기의 격리도 측정결과 그래프이다. LO/RF 격리도 최고점은 42.8dB이고 최저점은 38.3dB을 나타냈고, LO/IF 격리도 최고점은 37.9dB이고 최저점은 28.1dB을 나타냈다. 평균적으로 LO/RF 격리도는 40.9dB, LO/IF 격리도는 35dB를 나타냈다. 식 (1), (2)는 격리도를 구하는데 사용되는 공식이다[1].

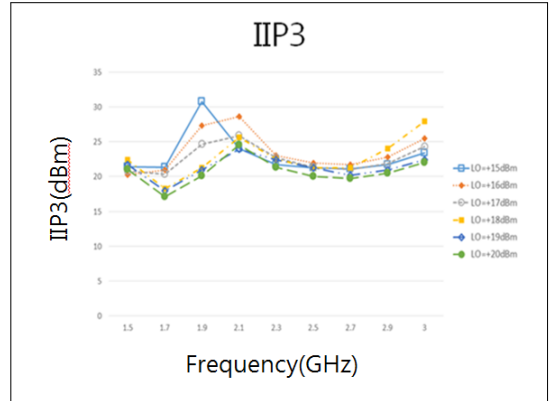
$$Isol_{LO/RF} = \frac{LO \text{ power present at the RF port (at } f_{LO})}{LO \text{ power entering the LO port (at } f_{LO})} \dots (1)$$

$$Isol_{LO/IF} = \frac{LO \text{ power present at the IF port (at } f_{LO})}{LO \text{ power entering the LO port (at } f_{LO})} \dots (2)$$



<Fig. 14> Measurement results of P1dB for the mixer

<Fig. 14>는 제안한 주파수 혼합기를 RF주파수가 2GHz로 지정했을 때의 P1dB를 측정된 결과 그래프이다. LO 주파수를 1.9GHz로 설정하고 LO Power level은 +15, +16, +17, +20dBm으로 나누어 설정했다. RF 주파수는 2GHz로 설정하고 RF Power level은 +0dBm ~ +16dBm까지 변화를 주면서 IF 출력 측정을 진행했다. 이 때 +16dBm에서는 입력 P1dB가 약 2.4dBm이고, 출력 P1dB는 약 16dBm으로 나타났다[6, 7].



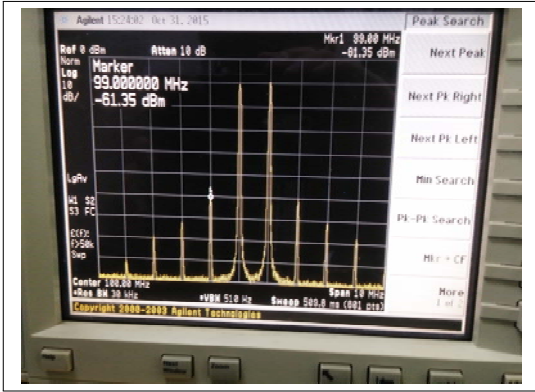
<Fig. 15> Measurement results of IIP3 for the mixer

<Fig. 15>는 제안한 주파수 혼합기의 LO level 별로 실제 측정된 IM3성분을 식 (3)에 대입하여 값을 구한 Input IP3(IIP3) 그래프이다. 2-tone 입력 신호를 인가하여 3차 상호 왜곡 신호의 출력 특성(IM3)을 측정 후 얻은 결과로 식 (3)을 통해 계산한다[1].

$$IIP3(dBm) = P_{IN}(dBm) + \frac{|IMD|(dB)}{2} \dots (3)$$

계산 결과 LO level이 +15dBm일 땐 평균 23dBm, +20dBm일 땐 평균 20dBm을 보였다. LO level 최적화 값인 +16dBm을 인가했을 땐 평균 23.2dBm을 보여 가장 우수한 특성으로 나타났다. IIP3 성분이 높은 값일수록 IM3(3차 상호 변조)가 원신호보다 작다는 것을 의미하고 이는 곧 원신호에 대한 왜곡이 적어진다는 것을 뜻한다. 그리고 LO Power level이 높아질수록 IMD 특성이 좋아지는데 이는 상호 변조 왜곡의 식을 통해 입력신호가 증가함에 따라 3배씩 상승하기 때문이다. 또한 식 (1)을 통해서 알 수 있듯이, PIN은 RF Power를 의미하고 LO Power level을 조절하면 변환손실과 IM3성분이 변하게 되고, IMD 특성은 LO Power level을 +16dBm

인가했을 때 가장 우수하게 나타나므로 LO Power level을 +16dBm 인가했을 때 IIP3 특성이 가장 우수하게 나타난 것을 확인하였다.



<Fig. 16> Photograph of the IMD measurement results

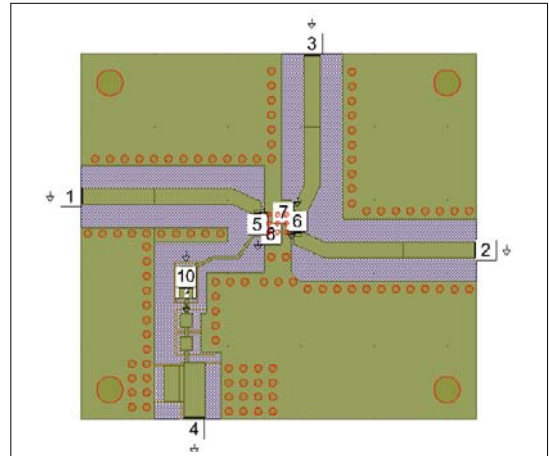
<Fig. 16>은 Input IP3를 도출하기 위한 실제 IMD의 측정된 결과 모습이다. RF 주파수 2.1 GHz, LO 주파수 2GHz, Spectrum analyzer의 중심 주파수는 100MHz로 설정하고 측정을 수행하였다. LO level을 +17dBm으로 인가했을 때 모습인데 IM3 성분은 Marker1에 표시된 61.3dBm으로 나타났다.

<Table 1>은 발표된 논문들과 본 논문에서 제안한 광대역 이중평형 주파수 혼합기의 특성 비교표이다. 본 논문에서 제안한 MMIC 이중평형 주파수 혼합기는 변환손실은 최대 2.4 dB의 차이를 보였으

<Table 1> Comparison of characteristics for the broadband double balanced mixer

Item	LO to RF Isolation	LO to IF Isolation	Conversion Loss	Frequency	Type
Ref.[8]	24dB	24dB	10.2dB	2.5~7GHz	MMIC
Ref.[9]	46dB	36dB	9.8dB	7~12GHz	HBT
Ref.[10]	20dB	25dB	10dB	1.4~4.1GHz	Microstrip
Ref.[11]	38dB	24dB	13.8dB	28~36GHz	pHEMT
Ref.[12]	35dB	32dB	11dB	8~20GHz	pHEMT
This work	40.9dB	35dB	10.4dB	1.5~3.0GHz	MMIC

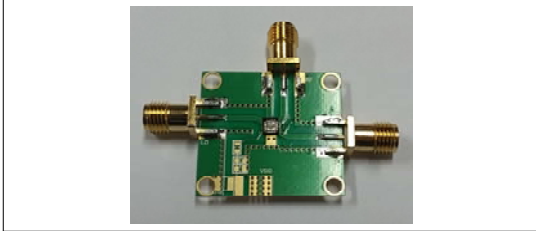
며, 격리도를 비교했을 때, LO/RF는 최대 16.9 dB 높게 나타났고, LO/IF는 최대 약 9 dB 높게 나타났습니다. [9]번 논문이 가장 우수한 특성을 나타내었고, 변환 손실외격리도 특성은 [9]번 논문을 제외한 나머지 논문들에 비해 특성이 우수하게 나타났습니다.



<Fig. 17> PCB structure for the mixer

<Fig. 17>은 제안한 주파수 혼합기의 PCB 기판 구조를 나타냈다. 1번 포트는 LO단, 3번 포트는 RF 단, 2번 포트는 IF단으로 설정했다. 4번 포트는 전원을 인가할 수 있는 바이어스 단이지만 제안한 주파수 혼합기에서는 별도의 바이어스를 필요로 하지 않는다. 5, 6, 7, 8번은 주파수 혼합기 칩의 출력포트와 대응되도록 미리 포트를 정해놓은 것이다.

9, 10번은 바이어스가 인가됐을 때 필요한 칩 커패시터 자리아지만 앞서 언급한 것처럼 바이어스가 필요 없기 때문에 칩 커패시터도 필요 없다.



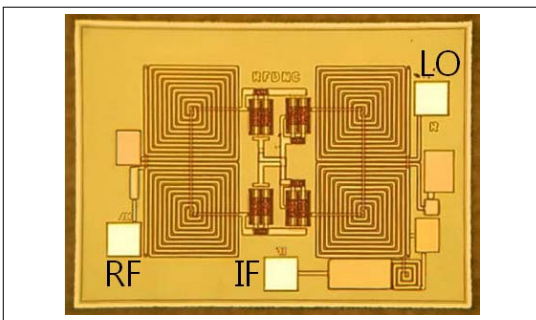
<Fig. 18> MMIC double balanced mixer

<Fig. 18>은 실제로 제작된 MMIC 이중평형 주파수 혼합기의 모습이다. <Fig. 14>를 토대로 제작된 것이며 가운데는 MMIC 공정을 이용하여 설계한 주파수 혼합기 칩이 심어져 있고, LO, RF, IF 단에는 각각 포트가 연결되어 있다. 각 모서리부분에는 지그(jig)와 연결할 수 있게 나사구멍을 뚫었다. VDD는 전원을 연결할 수 있는 부분이지만 <Fig. 15>에서 언급했듯이 별도로 바이어스가 인가할 필요가 없어서 납땜 작업을 하지 않았다. 작은 구멍들은 접지를 할 수 있도록 만든 비아-홀(via-hole)들이다.

<Table 2> Comparison of characteristics with this work and the HMC316

Item	LO to RF Isolation	LO to IF Isolation	Conversion Loss	IP3	Frequency	Type
HMC316	38dB	28dB	8dB	25dBm	1.6~3.2GHz	MMIC
This Work	40.9dB	35dB	10.4dB	23.2dBm	1.5~3GHz	MMIC

<Table 2>는 IIP3 특성 비교를 위해 목표로 잡았던 ‘Analog Device’사의 HMC316과의 특성 비교표이다. 본 논문에서 제안한 MMIC 이중평형 주파수 혼합기와 비교했을 때 주파수대역의 거의 비슷하며, 격리도 특성에서는 HMC316보다 우수한 수치를 보였다. 가장 중요한 IIP3 특성을 비교했을 때 HMC316은 25dBm을 보였고, 본 논문에서 제안한 주파수 혼합기의 최적화된 IIP3특성은 23.2dBm을 보여, 약 1.8dBm의 차이를 보여 목표 수치에 거의 근접하게 도출되었다. 다만 차이가 있다면 HMC316은 LO level이 +17dBm일 경우이고, 제안한 주파수 혼합기는 LO level이 +16dBm이라는 점이다.



<Fig. 19> Microscope of the fabricated MMIC double balanced mixer

<Fig. 19>은 본 논문에서 제안한 MMIC 이중평형 주파수 혼합기의 실제 GaAs 칩 접사 사진이다.

V. 결론

본 논문에서는 MMIC 이중평형 주파수 혼합기를 설계하여 LO power 최적화에 대한 연구를 진행하였다. 기판은 GaAs 기판을 사용하여 설계를 진행하였으며, 일반적인 마친드 발문을 설계 후 제안한 이중평형 주파수 혼합기에 적용하여 주파수 혼합기를 설계 완료 뒤 측정을 진행했다. 혼합기의 주파수 대역은 1.5GHz~3.0GHz이고, 현재 사용하고 있는 LTE 이동통신 대역인 1.7GHz~2.7GHz 대역에서도 적용 가능하다. LO power level은 +15dBm~+20dBm 총 6 단계별로 인가하였으며, 최적화 목표는 상용되고 있는 ‘Analog Device’사의 HMC316로 정했다. 최적화 목표 특성은 IIP3로 입력신호의 선형성을 나타내는 중요한 특성으로써 높은 수치일수록

우수한 특성을 나타낸다. 이는 신호간의 간섭을 최소화화를 위해서다. HMC316의 IIP3 수치는 25dBm을 보였고, 본 논문에서 제안한 주파수 혼합기는 23.2dBm을 보여 목표인 HMC316의 데이터와 근접한 수치로 나타났다.

본 연구 결과는 차세대 이동통신 및 LTE 대역의 중계기에 적용이 가능할 것이며, 추후 LO단에 안정적으로 +17dBm이 증폭할 수 있는 Amp를 설계한 뒤 주파수 혼합기 칩 안에 집적화한다면 적은 LO power로도 주파수 혼합기를 동작할 수 있고, 칩 설계 및 제작비용도 절약할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] Pozar D. M.(2005), *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, 3rd Ed.
- [2] Mass S. A(1993), *Microwave Mixers*, Artech House, 2nd edition..
- [3] Mongia R. K., Bahl I. J., Bhartia P. and Hong J.(2007), *RF and Microwave Coupled-line Circuits*, Artech House, 2nd Ed.
- [4] Yoon Y.(2005), *RF Active Circuits Design and Applications*, Hongreung Pub. Co.
- [5] Robertson I. D. and Lucyszyn S.(2001), *RFIC and MMIC Design and Technology*, IEE, Chap. 7.
- [6] mini-circuit(2015), Understanding Mixer-terms defined, and measuring performance, pp.1-11, Available:<http://www.minicircuits.com/app/AN00-009.pdf>.
- [7] mini-circuit(2015), Improve two-tone, third-order intermodulation testing, pp. 1-5, Available:<http://www.minicircuits.com/app/AN00-008.pdf>.
- [8] Dai W.(2014), "A 2.5 to 7 GHz wideband double-balanced mixer chip," *Proc. IEEE Int. Conf. Communication Problem-Solving*, pp.628-630.
- [9] Michaelsen R., Johansen T., Tamborg T. and Zhurbenko V.(2013), "A passive X-band double balanced mixer utilizing diode connected SiGe HBTs," *Proc. IEEE European Microwave Integrated Circuits Conf.*, pp.188-191.
- [10] Han S., Yun T., Nam H., Lee, I. and Lee, J. C.(2007), "A wideband double balanced diode mixer using a vertical coupling Marchand balun," *Proc. Korea Institute of Communication Sciences*, vol. 35, pp.814-817.
- [11] Lin C. H., Chiu J. C., Lin M., Lai Y. A. and Wang Y. H.(2007), "A variable conversion gain star mixer for Ka-band applications," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp.802-804.
- [12] Jeong J., Yom I. and Yeom K.(2009), "An active IF balun for a doubly balanced resistive mixer," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 19, no. 4. pp.224-226.

저자소개



김 태 영(Kim, Tae-Young)
2014년 2월 광운대학교 전자융합공학과 공학사
2016년 2월 광운대학교 전파공학과 공학석사
e-mail : robotex1@naver.com



이 민 재(Lee, Min-Jae)
2016년 2월 광운대학교 전파공학과 공학석사
e-mail : xenadu2@gmail.com



이 중 철(Lee, Jong-Chul)
1989년 12월 : Arizona State Univ., Dept. of Electrical Engineering(공학석사)
1994년 05월 Texas A&M Univ., Dept. of Electrical Engineering(공학박사)
1994년 06월~1996년 02월 : 현대전자 광소자 개발실 선임연구원
1996년 03월~현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수
e-mail : jcleee@kw.ac.kr