

대역 가변형 초광대역 단일 평형 체배기의 설계

Design of a Band-Tunable Ultra-Wideband Single-Balanced Doubler

김인복 · 김영곤 · 장태경 · 송선영 · 김강욱

In Bok Kim · Young Gon Kim · Tae Gyoung Jang · Sun Young Song · Kang Wook Kim

요 약

본 논문에서는 초광대역 특성을 가지는 평면형 대역 가변 체배기의 설계 과정을 소개하고 있다. 제안된 체배기에서는 초광대역 마이크로스트립-CPS 전이 구조(발룬)를 입력단의 정합 회로로, 초광대역 마이크로스트립-CPW 전이 구조를 출력단의 정합 회로로 사용하였다. 입력단에 사용된 발룬 구조로 인해 다이오드에 바이어스를 가할 수 있는데, 구현된 체배기의 대역 가변은 다이오드에 인가되는 전압을 가변함으로써 얻을 수 있다. 바이어스 전압이 -0.6 V일 때 체배기의 동작 주파수는 $10\sim 20$ GHz, 인가 전압이 $-0.2\sim -0.4$ V일 때 동작 주파수는 $10\sim 30$ GHz, 인가 전압이 0 V일 때 동작 주파수는 $20\sim 30$ GHz로 변함을 확인하였다. 또한, 구현된 체배기의 변환 손실은 최대 15 dB 이고, 입력 주파수의 역압 특성은 평균 30 dB 이상이 되는 우수한 특성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, design and the implementation method of a band-tunable ultra-wideband planar doubler are described. Microstrip-to-CPS(balun) transition and Microstrip-to-CPW transition are respectively used for input/output matching circuits for the doubler. The input balun structure allows to apply diode bias, and the doubler output frequency is tunable by changing the diode bias voltage. With the bias voltage of -0.6 V, the measured operating frequency band of the implemented doubler is $10\sim 20$ GHz, with the bias voltage of $-0.2\sim -0.4$ V, the operating frequency band is $10\sim 30$ GHz, and with 0 V bias, the operating frequency band is $20\sim 30$ GHz. The doubler provides conversion loss of less than 15 dB and fundamental frequency suppression of 30 dB.

Key words : Doubler, Transition, Coplanar Stripline(CPS), Schottky Diode, Broadband

I. 서 론

마이크로파 혹은 밀리미터파 통신 시스템에 있어서, 낮은 위상잡음을 가진 안정된 신호원은 필수적이다. 그러나 트랜지스터를 이용하여 구현된 발진기의 경우, 밀리미터파 혹은 마이크로파의 높은 주파수대역까지 저위상의 안정된 신호원을 직접 구현하기는 매우 어렵다. 이러한 경우에 낮은 주파수에서의 안정된 신호원을 체배기를 사용하여 높은 주파수의 신호원으로 구현을 하게 된다.

일반적으로 쇼트키 다이오드 체배기는 FET, 바랙

터 다이오드 체배기에 비해서 넓은 대역의 성능을 가진다. FET 체배기의 경우, 대역폭과 변환 손실간의 trade-off가 생기게 된다. 또한, 바랙터 다이오드 체배기의 경우 본연적으로 협소한 대역을 가지고 있다. 따라서 광대역 시스템의 요구에 따라서 넓은 대역의 성능을 위해서는 쇼트키 다이오드 체배기의 구현이 필수적이라고 할 수 있다^[1].

마이크로스트립 평면상에 구현된 넓은 대역의 쇼트키 다이오드 체배기는 보통 사용된 발룬에 의해서 대역폭과 변환 손실에 제한을 가진다. 참고문헌 [2]에서는 Marchand 발룬을 입력단과 출력단으로 사용

경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

· 논문 번호 : 20090529-06S

· 수정완료일자 : 2009년 8월 3일

한 이중 평형 체배기를 구현하여 16~40 GHz의 출력 주파수에서 12 dB 변환 손실을 얻었다. 그러나 입력주파수에 대한 역압 특성이 20 dBc로써 높은 격리도를 얻지 못하였다. 참고문헌 [3]에서는 6~13 GHz의 대역을 가지는 발륜을 이용하여 MIC 평형 체배기를 6.5~13 GHz의 대역에서 구현하였고, 바이어스 전압에 따른 변환 손실의 변화를 살펴보았다. 참고문헌 [4]에서는 마이크로스트립-CPW 전이 구조를 이용하여 출력주파수 6~18 GHz의 체배기를 구현하였고, 마이크로스트립-슬롯선로의 전이 구조를 이용하여 출력주파수 10~27 GHz의 체배기를 얻었다. 현재 상용으로 판매하고 있는 초광대역 체배기는 평형판 발륜을 입력단과 출력단에 사용하여 이중 평형 체배기를 구현한다. 이중 평형 발륜을 사용하게 되면 기판의 위, 아랫면을 동시에 사용하여야 하므로, 기판을 뚫어 수직으로 다이오드를 장착하게 된다. 따라서 다이오드의 정밀한 장착을 위해 숙련된 기술자의 수공이 필요하므로 대량 생산의 어려움이 있다.

본 논문에서는 광대역의 마이크로스트립-CPS 전이 구조(발륜)^[5]와 마이크로스트립-CPW 전이 구조^[6]를 이용하여 바이어스 전압에 따라 대역을 조절할 수 있는 대역 가변형 초광대역 단일 평형 체배기를 설계하고 제작하였다. 또한, 제안된 단일 평형형 초광대역 발륜을 사용함으로써 다이오드 장착의 어려움도 해결하였고 대역폭의 제한도 해결하였다.

II. 본 론

2-1 두 종류의 초광대역 전이 구조

본 논문에서는 체배기의 입력단으로 마이크로스트립-CPS의 전이 구조를 사용하였고, 출력단으로 마이크로스트립-CPW 전이 구조를 사용하였다. 발륜이란 균형(balanced) 신호를 불균형(unbalanced) 신호로 변환해 주는 회로 또는 구조물을 통칭한다. 또는 그 반대의 변환 기능을 할 때도 마찬가지로 발륜이라고 부른다. 그림 1은 입력 정합에 사용된 초광대역 마이크로스트립-CPS 발륜의 구조이다. 이 발륜은 마이크로스트립과 CPS 선로 간에 임피던스 정합을 최적화하고 필드 정합을 자연스럽게 하도록 설계되었다. 접지면은 필드 정합과 임피던스 정합을 위하여 최적화된 테이퍼 선로구조(Klopfenstein taper) 형태를 사

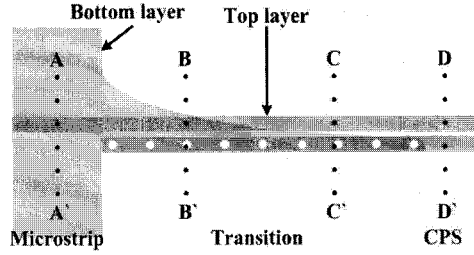


그림 1. 초광대역 마이크로스트립-CPS 전이 구조
Fig. 1. Ultra-wideband microstrip-to-CPS transition(balun).

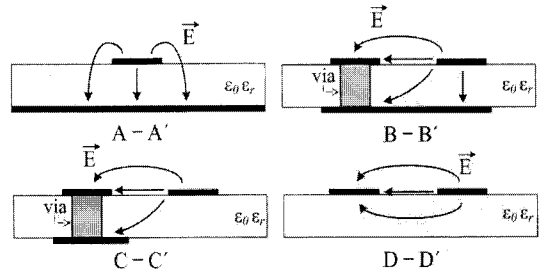


그림 2. 발륜 각 부분에 따른 전계 분포 모양
Fig. 2. Electric field lines at each cross-section along the balun.

용하였다^[5]. 그림 2는 발륜의 전장의 분포의 변화 모습이다. 본 전이 구조를 위한 시뮬레이션은 3-D EM 시뮬레이터인 CST Microwave StudioTM를 사용하였으며, 기판으로는 Rogers사의 8 mil 두께의 RO4003[®] ($\epsilon_r=3.38$)을 사용하였다.

본 발륜의 시뮬레이션 결과를 그림 3에서 보여주고 있는데, 삽입 손실 1 dB 이하, 반사 손실 15 dB 이

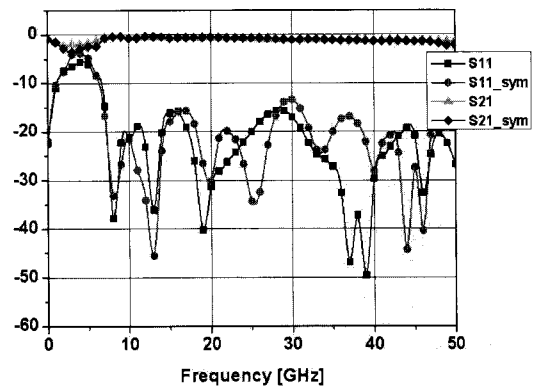


그림 3. 마이크로스트립-CPS 전이 구조(발륜)의 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation result of microstrip-CPS transition(balun).

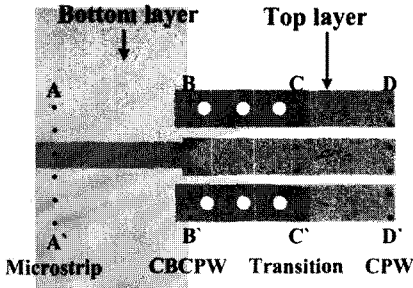


그림 4. 초광대역 마이크로스트립-CPW 전이 구조
Fig. 4. Ultra-wideband microstrip-to-CPW transition.

상의 동작 주파수 범위는 10~50 GHz 이상의 초광대역 임을 확인할 수 있다. 또한, 대칭적 구조와 비대칭적 구조의 시뮬레이션 결과가 비슷하게 얻어졌는데, 이는 발룬의 균형이 잘 이루어졌음을 간접적으로 나타내고 있다.

그림 4는 본 논문에서 체배기의 출력단으로 사용된 마이크로스트립-CPW 전이 구조이다. 이 전이 구조 또한 마이크로스트립-CPS 발룬의 설계와 유사하게 접지면의 형상을 자연스럽게 전계 변환과 최적화된 임피던스 정합을 이루도록 설계를 하였다^[6].

그림 5는 이 전이 구조의 각 부분에서의 전계 분포를 보여준다. 마이크로스트립 선로의 전계는 거의 수직으로 형성되어 있으며, CPW의 전계는 거의 수평으로 이루어져 있다. 이 전이 구조는 서로 다른 전계분포를 자연스럽게 전이를 하기 위해 접지면의 모양을 변화시켰다. 또한, CPW 선로의 임피던스는 전이 구조의 길이 방향으로 Klopfenstein's taper가 되도록 하여 임피던스 정합이 최적화 되도록 설계하였다. 시뮬레이션은 CST Microwave StudioTM를 사용하였으며, 기판으로는 Rogers사의 8 mil 두께의 RO4003[®] ($\epsilon_r = 3.38$)을 사용하였다.

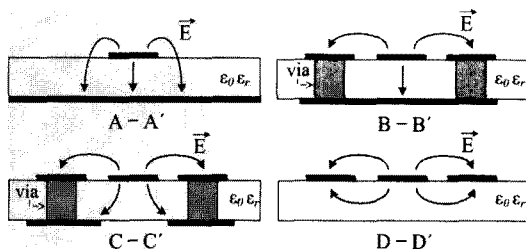


그림 5. 전이 구조의 각 부분에 따른 전계 분포 모양
Fig. 5. Electric field lines at each cross-section along the transition.

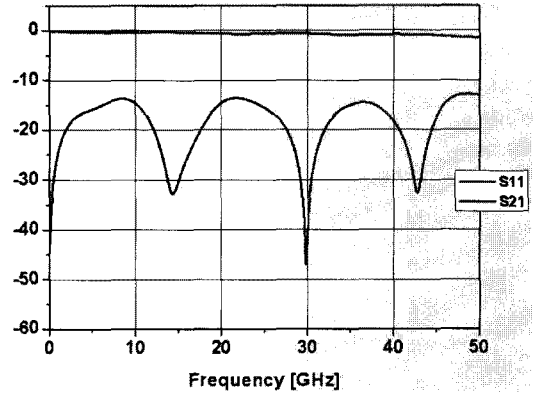
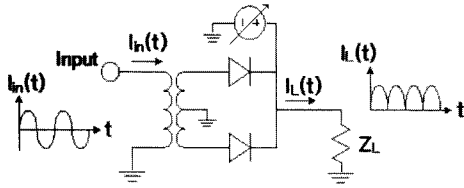


그림 6. 마이크로스트립-CPW 전이 구조의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation result of microstrip-CPW transition.

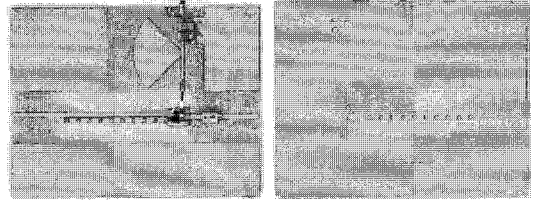
시뮬레이션의 결과로서 본 전이 구조는 그림 6과 같이 DC 근처부터 50 GHz 이상의 초광대역 영역에서 1 dB 이하의 삽입 손실을 가짐을 알 수 있다.

2-2 대역 가변형 주파수 체배기 설계

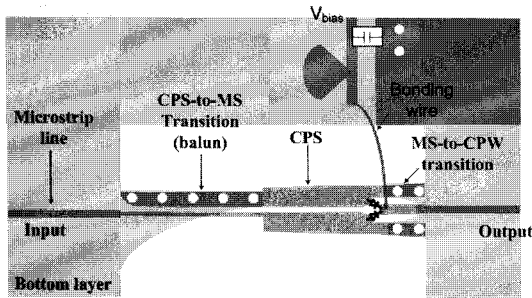
그림 7(a)에서는 제안된 단일 평형 체배기의 등가 회로와 출력 전류를 나타내었다. 입력단으로 정현파 신호가 입력되면 매 반주기의 신호가 다이오드를 온과 오프시키면서 그림과 같은 전파정류된 출력 신호가 나오게 된다. 그림 7(b)에서는 제안된 체배기의 레이아웃을 나타내었다. 입력단의 마이크로스트립 선로의 신호는 초광대역 발룬에 의해 CPS 선로로 최적으로 전이가 된다. 이로 인해 발생된 CPS의 균형 모드(balanced mode)의 신호가 두 다이오드에 전달이 된다. 이때 다이오드를 통해 홀수차 하모닉(balanced mode)과 짝수차 하모닉(unbalanced mode) 성분의 신호가 발생되는데, 출력단의 CPW 선로로는 짝수차 하모닉 성분 즉 불균형 모드만이 전파할 수 있고, 홀수차 하모닉 성분(균형 모드)은 전파할 수 없다. 이때 모드 억압을 위해 CPW의 균형 모드의 임피던스를 140 Ω 이 되도록 설계를 하였으며, CPW의 불균형 모드의 임피던스는 60 Ω 이 되도록 설계를 하였다. 또한, CPS의 홀수 모드 임피던스를 최대한 줄여서 출력단과 입력단의 정합을 이루도록 하였다. 이로써 우리가 원하는 짝수 하모닉을 얻어낼 수가 있다. 또한, 입력단의 발룬과 출력단의 인덕터 혹은 스텝에 의해 DC 전류 경로를 자연스럽게 구성하였다.



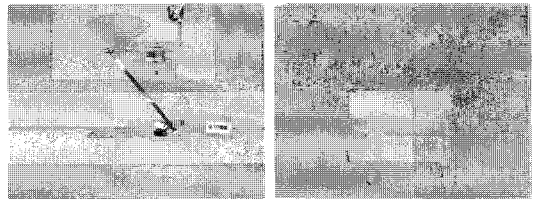
(a) 제안된 체배기 등가회로
(a) The equivalent circuit of doubler



(a) RO4003 8 mil에 제작된 체배기
(a) Fabricated doubler in RO4003 8 mil



(b) 제안된 체배기 레이아웃
(b) The proposed layout of doubler



(b) RT/Duroid 6010 10 mil에 제작된 체배기
(b) Fabricated doubler in RT/Duroid 6010 10 mil

그림 7. 제안된 단일 평형 체배기 구조
Fig. 7. The proposed structure of single-balanced of doubler.

III. 제작 및 측정 결과

바이어스 회로는 마이크로스트립 Radial 스텝과 금 본딩선(bonding wire)을 이용하여 CPW 신호선에 연결하였다. 이때 사용된 본딩선의 너비는 10 mil이며, 선의 길이에 따라 차이가 있으나 비교적 높은 인덕턴스 성분을 가지므로 RF 신호를 격리시킬 수 있다.

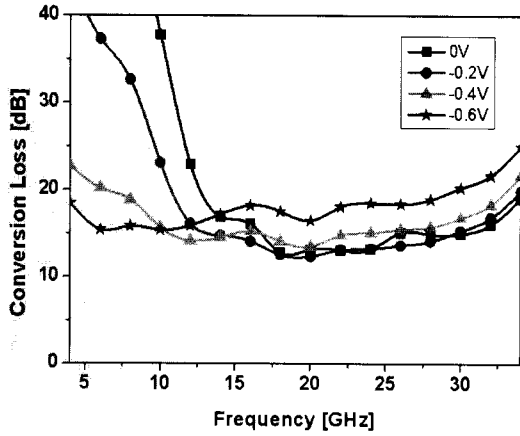
체배기 제작에 사용된 기판은 Rogers사의 RO4003 8 mil 기판과 RT/Duroid 6010 10 mil 기판이 사용되었다. 사용된 다이오드는 M/A-COM사의 GaAs flip-chip diode MA4E1317($C_j=0.02$ pF, $R_s=4$ Ω)이며, CPS와 CPW 선로 사이에 장착되었다. 그림 8과 같은 레이아웃으로 두 가지 종류의 체배기가 제작되었는데, RO4003 8 mil 기판으로 제작된 체배기는 가로 24 mm, 세로 18 mm이고, RT/Duroid 6010 10 mil의 기판으로 제작된 체배기는 가로 15 mm, 세로 14 mm이다. 제작된 체배기의 입력 신호로는 +15 dBm의 전력을 인가하여 체배기의 다이오드가 동작하도록 하였다. 스펙트럼 분석기(Agilent E4448A)를 사용하여 출력 신호를 측정하였는데, 변환 손실, 입력 주파수 억압 및 3차 하모닉 성분의 특성을 측정하였다.

그림 8. 제작된 체배기
Fig. 8. Fabricated doubler.

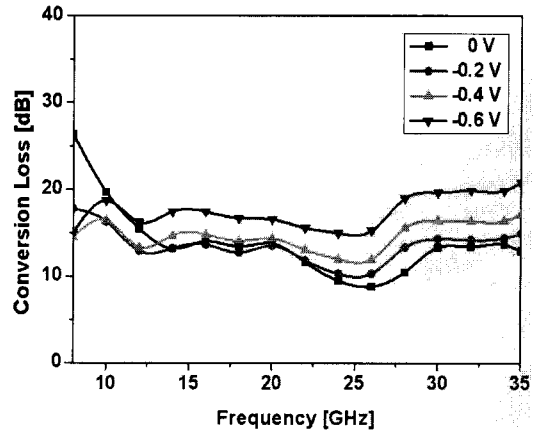
바이어스 전압의 변화에 따른 체배기 동작 주파수 대역 변화를 측정된 것을 그림 9(a)와 10(a)에 나타내었다. RO4003 8 mil 기판과 RT/Duroid6010 10 mil 기판으로 구현한 두 체배기가 비슷한 결과를 가졌다. 즉, 기판의 유전율의 변화에도 체배기의 성능에는 거의 변화가 없음을 알 수가 있다. 바이어스 전압이 0 V일 경우 변환 손실이 15 dB 이하가 되는 주파수 대역이 20~30 GHz가 되고, -0.2~0.4 V가 인가되었을 때 10~30 GHz 대역을 가졌다.

제작된 체배기의 입력 주파수에 대한 억압도에 대한 측정을 그림 9(b) 및 그림 10(b)에서 보여주는 데, 평균 30 dB 이상의 높은 억압도의 특성을 보여주고 있다. 또한, 3차 고조파 성분의 억압도는 그림 9(c) 및 그림 10(c)에서 보여주듯이 평균 45 dB 이상의 높은 억압도를 가진 특성을 보여주었다.

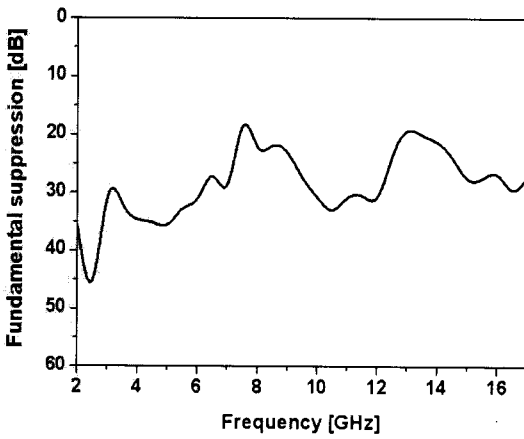
표 1과 같이 이전에 구현된 참고문헌 [2]~[4]에서의 체배기의 성능과 비교할 때 본 연구를 통해 구현된 체배기가 입력 주파수 억압도 및 3차 고조파 주파수의 억압도의 성능에서 매우 우수한 것을 알 수 있다. 바이어스 전압의 변화에 따른 입력 주파수 및 3차 고조파 주파수 억압도는 거의 동일하게 측정되었다. 입력단과 출력단으로 사용된 마이크로스트립-CPS 및 마이크로스트립-CPW 전이 구조의 초광대역 대역 특성에 비해 구현된 체배기의 동작 주파수



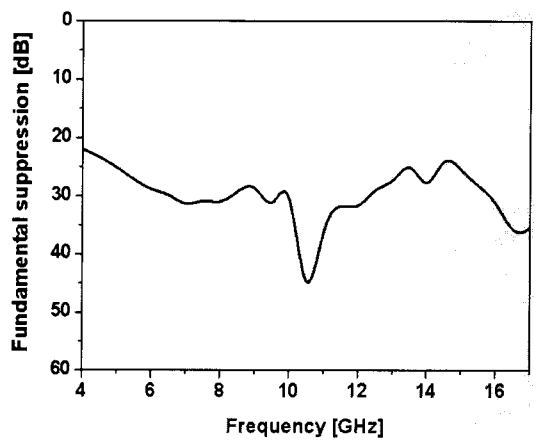
(a) 전압 인가에 따른 변환 손실 특성
(a) The characteristic of conversion loss at various voltage



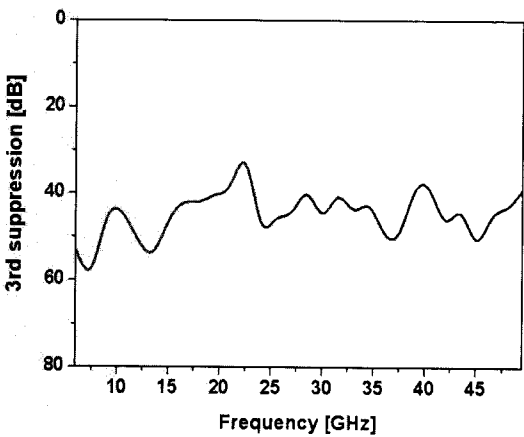
(a) 전압 인가에 따른 변환 손실 특성
(a) The characteristic of conversion loss at various voltage



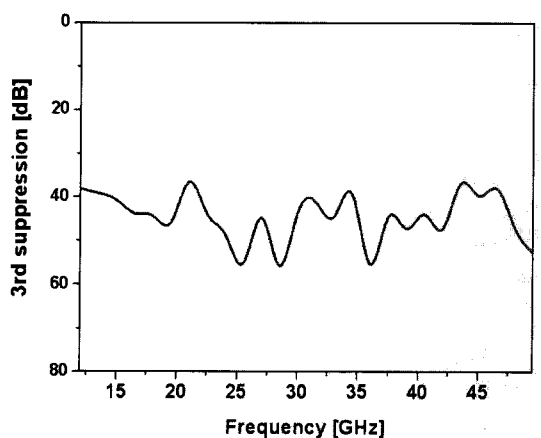
(b) 입력 주파수 억압 특성
(b) The characteristic of fundamental suppression



(b) 입력 주파수 억압 특성
(b) The characteristic of fundamental suppression



(c) 3rd 하모닉 억압 특성
(c) The characteristic of 3rd suppression



(c) 3rd 하모닉 억압 특성
(c) The characteristic of 3rd suppression

그림 9. 측정된 결과(RO4003 8 mil)
Fig. 9. Measured result(RO4003 8 mil).

그림 10. 측정된 결과(RT/Duroid 6010 10 mil)
Fig. 10. Measured result(RT/Duroid 6010 10 mil).

참 고 문 헌

표 1. 변환 손실 및 억압 특성 비교

Table 1. Comparison of the characteristics for the conversion loss and suppression.

	[2]	[3]	[4]	본 논문
출력 주파수 대역(GHz)	16~40	13~26	10~27	10~30
변환 손실(dB)	Typ. 12	Typ. 13	Typ. 11	Typ. 13
입력 주파수 억압 특성(dB)	Typ. 30	Typ. 25	Typ. 20	Typ. 30
3차 고조파 억압 특성(dB)	Typ. 30	Typ. 25	Typ. 20	Typ. 45

대역이 줄어든 이유는 바이어스를 위해 사용된 스텝 및 본당선의 임피던스 특성이 매우 광대역이지 않기 때문이다. 추후 40 GHz 이상까지 동작하는 광대역 원추형 인덕터(broadband conical inductor)를 사용함으로써 특성을 개선시킬 예정이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 소형이면서 평면(planar)형인 대역 가변형 초광대역 단일 평형 체배기의 설계를 제안하였다. 두 가지 종류의 초광대역 전이 구조로 구성되었으며, 넓은 대역 가변 범위를 가지면서도 비교적 낮은 변환 손실 및 높은 입력 주파수의 억압 특성을 가졌다. 입력단에 발륜을 사용함으로써 입력과 출력단이 DC적으로 격리됨으로 출력단 다이오드에 전압 인가가 가능하였으며, 인가 전압에 따라 대역의 변화가 가능함을 확인하였다. 제안된 체배기는 다양한 대역 가변 특성을 필요로 하는 응용 시스템에 적용될 수 있을 것이다.

[1] A. M. Pavio, S. D. Bingham, R. H. Halladay, and C. A. Saphashe, "A distributed broadband monolithic frequency multiplier", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, p. 503, 1988.

[2] S. A. Mass, Y. Ryu, "A broadband, planar monolithic resistive frequency doubler", *IEEE 1944 Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium*, pp. 175-178, 1994.

[3] H. Ogawa, A. Minagawa, "Uniplanar MIC balanced multiplier-a proposed new structure for MIC's", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 35, pp. 1363-1368, Dec. 1987.

[4] R. Bitzer, "Planar broadband MIC balanced frequency doublers", *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 273-276, Jun. 1991.

[5] Y. G. Kim, D. S. Woo, K. W. Kim, and Y. K. Cho, "A new ultra-wideband microstrip-to-CPS transition", *IEEE Int'l. Symp. Microwave, Honolulu, HI.*, pp. 1563-1566, Jun. 2007.

[6] Y. G. Kim, K. W. Kim, and Y. K. Cho, "An ultra-wideband Microstrip-to-CPW transition", *IEEE Int'l. Symp. Microwave, IEEE 2008 MTT-S Conference Proceeding*, pp. 1079-1082, Jun. 2008.

[7] Marek T. Faber, Jerzy Chramiec, and Miroslaw E. Adamski, *Microwave and Millimeter-wave Diode Frequency Multipliers*, Artech House, 1995.

김 인 복



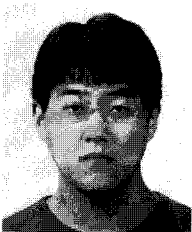
2008년 2월: 경북대학교 전자전기 컴퓨터학부 (공학사)
2008년 3월~현재: 경북대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 다이오드 검파기, 믹서 및 주파수 체배기

송 선 영



2008년 2월: 한밭대학교 정보통신 컴퓨터학부 (공학사)
2009년 3월~현재: 경북대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 믹서 및 주파수 체배기

김 영 곤



2006년 2월: 경북대학교 전자전기 컴퓨터학부 (공학사)
2008년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2008년 3월~현재: 경북대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 초광대역 발룬, 광대역 믹서 및 주파수 체배기

김 강 욱



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1987년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1996년 7월: University of California, Los Angeles. 전자공학과 (공학박사)
1987년~1990년: 한국전기연구소 연구원
1996년~1998년: University of California Los Angeles. post-doctor 연구원
1998년~1999년: P-Com, Inc. 마이크로파 설계연구원
1999년~2001년: Narda DBS Microwave, RF 설계연구원
2001년~2005년: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수
2006년~현재: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수
2007년 5월~현재: 이엠와이즈통신(주) 대표이사
[주 관심분야] 마이크로파 통신시스템 및 서브시스템, 마이크로파 및 밀리미터파 부품 및 패키징, 무선통신용 안테나, 전자기 상호 작용 및 전자기 수치 해석

장 태 경



2008년 2월: 경북대학교 전자전기 컴퓨터학부 (공학사)
2008년 3월~현재: 경북대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 안테나