

논문 2007-44TC-7-16

MIMIC 기술을 이용한 광대역 W-band Tandem 커플러

(Broadband W-band Tandem coupler using MIMIC technology)

이 문 교*, 안 단**, 이 복 형**, 임 병 옥*, 이 상 진*, 문 성 운*, 전 병 철**,
김 용 호***, 윤 진 섭****, 김 삼 동*, 이 진 구*

(Mun-Kyo Lee, Dan An, Bok-Hyung Lee, Byeong-Ok Lim, Sang-Jin Lee, Sung-Woon Moon,
Byoung-Chul Jun, Yong-Hoh Kim, Jin-Seob Yoon, Sam-Dong Kim, and Jin-Koo Rhee)

요 약

본 논문에서는 W-band(75~110 GHz) 주파수 영역에서 동작하는 CPW(Coplanar Waveguide) 구조의 3-dB 방향성 커플러를 MIMIC(Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit) 공정기술로 설계 및 제작하였다. 강한 결합계수 특성을 갖는 edge-coupled CPW 라인은 서로 다른 우·기 모드 위상속도에 의해 좋지 않은 방향성을 갖는다. 이를 극복하기 위하여 같은 우·기 위상속도를 갖는 edge-coupled CPW 라인을 2단으로 평행하게 연결하여 3-dB의 강한 커플링을 유도할 수 있는 Tandem 구조를 W-band에서 제안하였다. 제안된 Tandem 커플러는 기존의 다층기판 구조나 와이어 본딩 구조가 아닌 에어브리지 MIMIC 공정기술을 통해서 단일평면상에 제작되었다. 제작된 커플러는 75~100 GHz의 넓은 주파수 영역에서 2.9~3.6 dB의 결합계수와 91.2±2.9°의 우수한 위상차 특성을 나타내었다.

Abstract

In this paper, we designed and fabricated a 3-dB tandem coupler using air-bridge technology for millimeter-wave monolithic integrated circuits, operating at W-band(75~110 GHz) frequency. Tightly edge-coupled CPW line has low directivity due to different even-mode and odd-mode phase velocity. To overcome this disadvantage, a 3-dB tandem coupler which comprises the two-sectional weakly parallel-coupled lines with equal phase velocity was designed at W-band. The proposed coupler was fabricated using air-bridge technology to monolithically materialize the uniplanar coupler structure instead of conventional multilayer or wire bonded structure. From the measurements, the coupling coefficient of 2.9~3.6 dB and the good phase difference of 91.2±2.9° were obtained in broad frequency range of 75~100 GHz.

Keywords : W-band, Coupler, Tandem, CPW, MIMIC

I. 서 론

최근 W-band에서 신호의 흡수 감쇠가 적은 94 GHz 밀리미터파 레이더 및 센서와 77 GHz 차량 충돌 방지 레이더 등의 응용 연구가 진행되고 있다^[1~2]. 밀리미터파 전력 분배기, 평형 증폭기, 평형 혼합기 등의 회로 설계를 위해서 CPW(coplanar waveguide) 구조의 3-dB 방향성 커플러의 설계가 필요하다. 이미 CPW 구조에서의 방향성 커플러는 다양한 형태로 연구되고 있으며, 다른 구조에서와 마찬가지로 주로 결합길이를 λ

* 학생회원, ** 정회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터

(Millimeter-wave INnovation Technology research center, Dongguk University.)

*** 정회원, 배재대학교 전자공학과

(Dept. of Electronic Engineering, PAICHAI University)

**** 정회원, 서울대학 컴퓨터전자과

(Seoil College)

※ 본 연구는 동국대학교 ERC 센터인 밀리미터파 신기술연구센터(MINT)의 지원에 의하여 수행되었음.

접수일자: 2007년5월15일, 수정완료일: 2007년7월2일

1/4 단위로 하고 우·기 모드의 임피던스 값(Z_{0o} , Z_{0e})을 이용해 원하는 결합도와 방향성 및 두 출력의 위상차를 얻는다^[3]. 특히 주로 넓은 대역폭 특성을 얻기 위해 Branch-line, Ring 하이브리드 커플러보다 edge-coupled 형태의 결합선로를 이용한 커플러를 선호한다^[4]. 하지만 강한 결합을 얻기 위해 두 선로간의 간격이 많이 좁아져 제작의 어려움을 겪을 뿐만 아니라 그 간격에 민감하게 결합량이 바뀌게 된다. 또한 그로인해 우·기 모드간의 위상속도의 차가 증가하면서 커플러의 방향성이 나빠지게 된다^[5]. 그러나 결합길이를 $\lambda/4$ 단위로 서로 평행한 둘 이상의 다단 구조를 가질 경우, 낮은 결합계수로만으로도 충분히 높은 결합력과 방향성을 얻을 수 있다^[6]. 이를 이용한 것이 Tandem 커플러이며 주로 넓은 대역폭 특성이 요구되는 Balanced 구조에 응용이 된다^[7]. 저주파 대역에서 Tandem 구조의 커플러는 전송선로 위를 크로스 오버하도록, 주로 와이어 본딩 구조로 구현되어 왔다. 최근에는 와이어 본딩 구조를 MIMIC (Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit) 에어브리지 공법으로 크로스 오버하는 구조가 V-band(50~75 GHz) 무선 LAN(Wireless Local Area Network)용으로 연구되었다^[8].

본 논문에서는 W-band(75~110 GHz) 대역에서 3-dB CPW tandem 커플러를 에어브리지 공정 기법으로 단일 평면상에 쉽게 구현할 수 있도록 하였다. 특히, 77 GHz 및 94 GHz 주파수 대역에서 차량 충돌 방지 레이더나 통신 시스템 회로 등에 응용되도록 직각 위상의 3-dB 커플러를 일정한 결합도와 90° 위상차, 그리고 최적의 정합조건과 방향성을 갖도록 광대역으로 설계 및 제작하였다.

II. Tandem 커플러의 설계

여러 개의 포트를 가지는 수동소자를 설계나 해석함에 있어서 가역성과 무손실 조건은 항상 고려된다. 그림 1과 같이 네 개의 포트로 이루어진 단일 결합선로 구조의 방향성 커플러를 가역성과 무손실 조건하에 산란행렬로 표현하면 식 (1)과 같다.

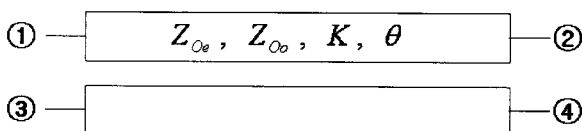


그림 1. 단일 결합선로

Fig. 1. A single-section coupled line.

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{24} & S_{34} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

결합계수 K 와 함께 통과포트(S_{12})와 결합포트(S_{13})간의 산란행렬식은 다음 식 (2)와 (3)과 같이 표현된다. 식 (2)와 (3)을 보면 결합선로의 길이를 $\lambda/4$ 로 취했을 경우 통과포트간의 전달되는 전력은 최소가 되고 결합포트간의 전달되는 전력은 최대가 됨을 알 수 있다. 그와 동시에 두개의 출력 신호가 90° 위상차를 갖는 쿼드러처 하이브리드 커플러가 된다.

$$S_{12} = S_{34} = \frac{\sqrt{1-K^2}}{\sqrt{1-K^2} \cos\theta + j \sin\theta} \quad (2)$$

$$S_{13} = S_{24} = \frac{jK \tan\theta}{\sqrt{1-K^2} + j \tan\theta} \quad (3)$$

그러나 이런 단일 결합선로만으로 3 dB 정도의 강한 결합이 요구될 경우 높은 K 값($=0.707$)으로 인해 실현 불가능한 우·기 모드 임피던스 값을 갖게 되고 두 선로 간격이 매우 좁아진다. 게다가 CPW 구조에서는 높은 결합계수로 인해 우·기 모드의 유효유전율 차이가 심해져서 제작기 다른 위상속도를 유도하게 된다^[5]. 이는 커플러의 방향성을 떨어뜨리는 효과를 가져온다. 따라서 단일결합선로를 둘 이상의 섹션으로 평행하게 연결하여 낮은 K 값으로도 충분히 높은 결합도와 방향성 특성을 얻을 수 있는 구조가 필요하다.

단일 결합선로를 평행하게 N 개만큼 다단으로 연결하여 최종 두 출력단으로 동일한 파워가 나오도록 설계한다면 N 이 증가할수록 단일 결합선로에서 요구되는 K 값은 점점 작아진다. 그리고 그로 인해 우·기모드의 위상속도가 비슷해지면서 방향성이 더욱 개선될 것이다^[6]. 그러나 소자의 크기, 그리고 제작가능한 두 선로간의 간격을 고려한다면 적당한 N 값을 선택하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 제작가능한 두 선로간의 최소간격을 8 μ m 라고 가정하고 소자의 크기를 고려해 그림 2와 같이 두 개의 결합선로를 평행하게 연결한 구조를 채택하였다.

그림 2에서 입력 ①번 포트로 크기가 1인 신호를 입력하였을 때 식 (2)와 (3)을 이용하여 A와 B를 통해 흐르는 신호와 ②번과 ③번 포트로 나오는 신호를 다음 식 (4)와 (5)와 같이 구할 수 있다.

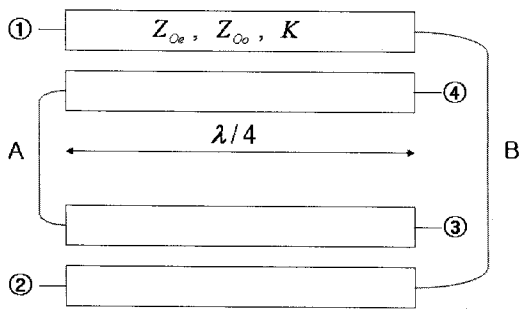


그림 2. 두 개의 평행한 결합선로
Fig. 2. Two-section parallel-coupled lines.

$$A = K \quad B = -j(\sqrt{1 - K^2}) \quad (4)$$

$$\textcircled{2} : K^2 - (1 - K^2) \quad \textcircled{3} : -j2K\sqrt{1 - K^2} \quad (5)$$

두개의 포트에 전력이 전달되기 위해 ②번과 ③번 포트에 나오는 신호의 크기는 같아야 하므로 다음과 같은 방정식(6)이 성립이 된다.

$$8K^4 - 8K^2 - 1 = 0 \quad (6)$$

여러 해 가운데 우리가 원하는 K값은 0.38 이며 이는 단일 결합선로가 단지 -8.34 dB 정도의 낮은 결합력을 요구한다는 것을 알 수 있다. 구한 K값을 가지고 다음과 같은 식 (7)을 통해 우·기 모드의 임피던스 값을 얻을 수 있다.

$$Z_{oe} = Z_0 \sqrt{\frac{1+K}{1-K}} \approx 74.6\Omega$$

$$Z_{oo} = Z_0 \sqrt{\frac{1-K}{1+K}} \approx 33.5\Omega \quad (7)$$

결국 식 (7)에서 구한 우·기 모드의 임피던스 값을 가지고 λ/4 길이를 갖는 단일 결합선로간의 간격을 결정 할 수 있다. 그러나 크로스 오버된 에어브리지 선로를 생각할 경우 단일 결합선로간의 간격이 일정하지 못하므로 식 (7)을 통해서 구한 간격을 기준으로 결합력

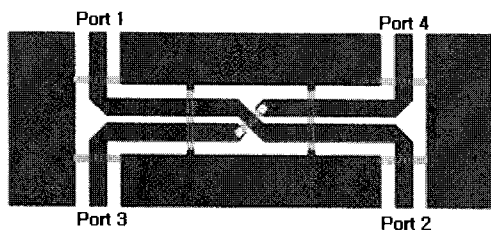


그림 3. 단일 결합선로로 구성된 커플러
Fig. 3. Coupler composed of a single-coupled line.

이 -8.34 dB 가 나오도록 간격을 수정해야 한다. 또한 에어브리지를 통해 흐르는 신호와 일반 전송선로를 통해 흐르는 신호를 비교 하여 에어브릿지가 미치는 간섭 효과를 검증할 필요가 있다. 이는 그림 3과 같이 단일 결합선로로 구성된 커플러에서 통과포트간의 크기와 위상차를 계산하여 확인 할 수 있다. 계산에 앞서 에어브리지 조건은 본 공정에서 이미 안정화 된 기준에 맞추

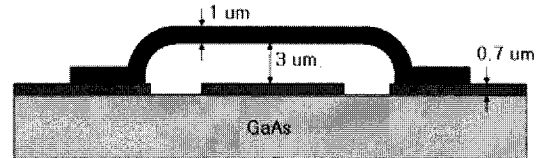


그림 4. Tandem 커플러를 위한 에어브리지 구조
Fig. 4. Air-bridge structure for a tandem coupler.

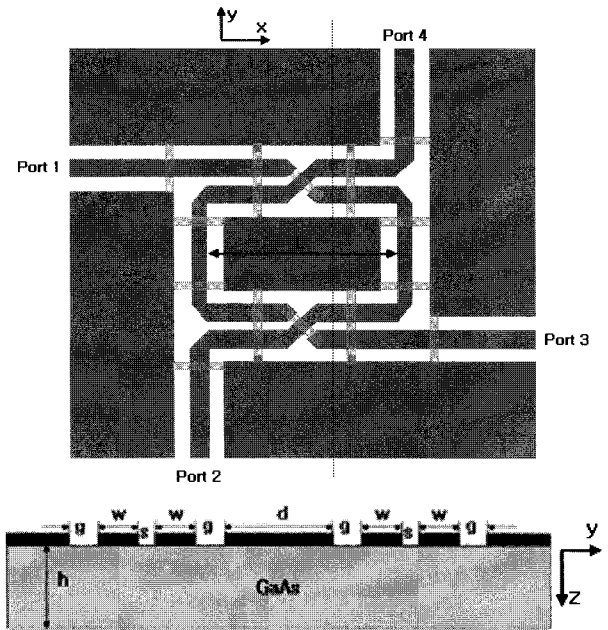
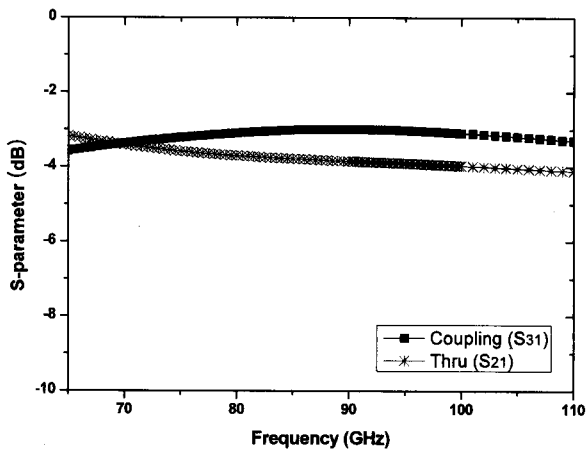


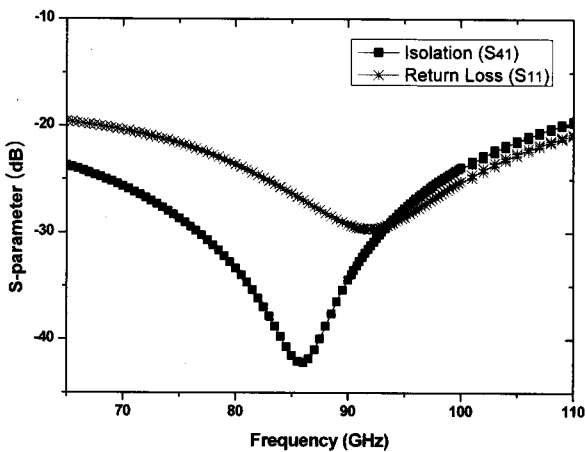
그림 5. CPW Tandem 커플러 레이아웃
Fig. 5. The layout of CPW Tandem coupler.

표 1. 각 파라미터 값
Table 1. Parameters of CPW Tandem couplers.

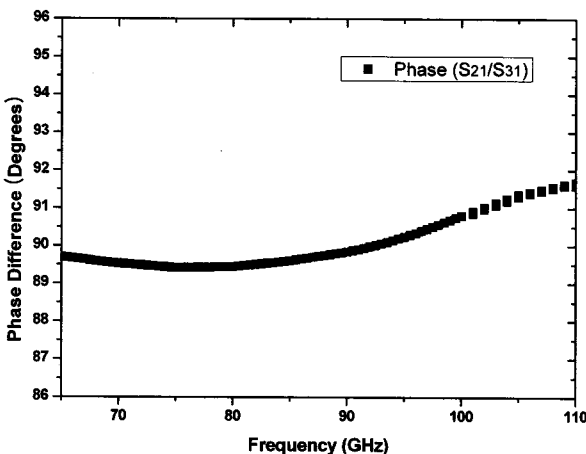
구 분	파라미터 값
ϵ_r (기판유전율)	12.9
h	680 um
Loss Tangent	0.003
Metal thickness	0.7 um
L	268 um
w	26 um
g	22 um
s	14 um
d	108 um



(a)



(b)



(c)

그림 6. W-band 용 3-dB Tandem 커플러의 시뮬레이션 특성: (a) S₂₁과 S₃₁, (b) S₁₁과 S₄₁, (c) S₂₁과 S₃₁의 위상차

Fig. 6. The computed result of the W-band 3-dB Tandem coupler: (a) S₂₁ and S₃₁, (b) S₁₁ and S₄₁, (c) Phase differences between S₂₁ and S₃₁.

기 위하여 그림 4와 같이 First metal로부터 3 um 떨어져있고 두께가 1 um 인 골드(gold)로 구성하도록 하였다.

그림 5는 680 um 두께의 GaAs 기판위에 구현된 CPW tandem 커플러와 이를 y축(점선) 방향으로 자른 단면도를 보여준다. 여기서 w는 선로의 선포, g는 GND와 선로 사이의 거리, s는 커플링 라인 사이의 간격을 나타낸다. 표 1은 각 파라미터 값들을 표현한 것이다. w와 g, 그리고 s의 값은 앞의 이론에서 얻어낸 우-기 모드의 임피던스 값을 기준으로 결정된 값이며, 결합선로의 길이 L은 94 GHz에서의 λ/4 길이와 에어브리지로 크로스 오버된 선로를 같이 고려한 값이다. 본 공정에서 실현가능한 결합선로간의 최소 간격은 8 um 라고 가정한 상태에서 표 1의 s의 값(14 um)은 적절한 값을 알 수 있다. 길이 d의 값은 94 GHz에서의 결합도에는 거의 영향을 미치지 않는다. 단지 그 길이에 따라 각 포트별 정합특성과 격리도가 달라진다. 표 1의 d의 값(108 um)은 94 GHz에서 S11과 S41이 최저값이 되도록 ADS 툴의 파라미터 스위치를 통해 얻어낸 결과이다. 그림 6은 W-band 내에서의 결합도와 정합특성, 격리도와 두 출력간의 위상차를 계산한 결과이다.

W-band 내에서 결합도(S31)는 -2.9 dB에서 -3.3 dB 까지, S21은 -3.5 dB에서 -4.1 dB까지 완만한 특성을 보인다. 그리고 방향성과 정합특성은 전대역에서 20 dB 이상의 양호한 방향성과 정합특성을 보인다. 2번과 3번 포트에 나오는 두 출력의 위상차는 그림 6-(c)와 같이 W-band 내에서 약 91.2°±2.9° 정도로 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

III. Tandem 커플러의 제작 및 측정

그림 7은 제작된 W-band Tandem 커플러의 전면 사진과 크로스 오버된 에어브리지 부분의 확대된 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진이다. 칩 면적은 0.45 mm × 0.41 mm 이다.

측정은 Anritsu사의 ME7808A VNA(Vector Network Analyzer)를 이용하여 0.03 - 110 GHz 주파수 범위에서 2포트로 측정하였으며, 이때 나머지 포트는 50 Ω Ti 저항으로 정합하였다. 그림 8은 결합도와 격리도, 위상차를 측정된 결과이다. 측정 결과 결합도는 77 GHz에서 -3.04 dB와 94 GHz에서 -3.01 dB의 특성을 나타내었으며, W-band 내에서는 -2.9 dB에서 -3.6

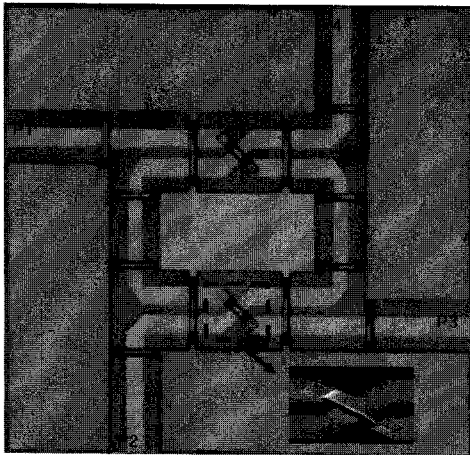


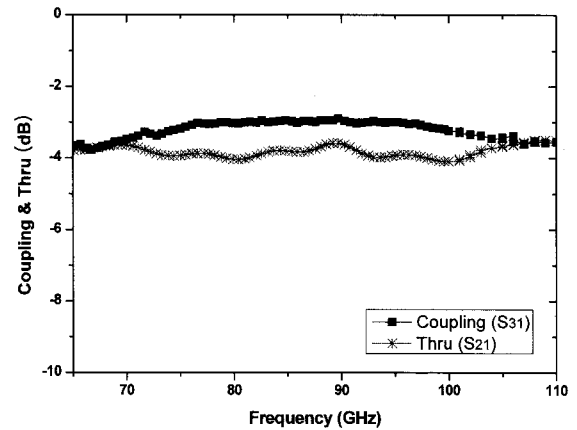
그림 7. 제작된 W-band Tandem 커플러의 사진
 Fig. 7. The photograph of fabricated W-band Tandem coupler.

dB 사이에 값을 나타내었다. 반사손실과 격리도는 77 GHz에서 29 dB 이상과 94 GHz에서 22 dB 이상의 양호한 특성을 보였고, W-band 내에서는 17 dB 이상의 특성을 갖었다. 또한 위상차는 W-band에서 $91.2^\circ \pm 2.9^\circ$ 정도의 특성을 보였으나, 77 GHz와 94 GHz에서는 각각 89.7° 와 90.1° 우수한 위상차 특성을 나타내었다. 따라서 주요 응용 주파수 대역인 77 GHz 대역과 94 GHz 대역에서 3-dB 커플러로 사용하기에 충분한 성능으로 만족할 만하다.

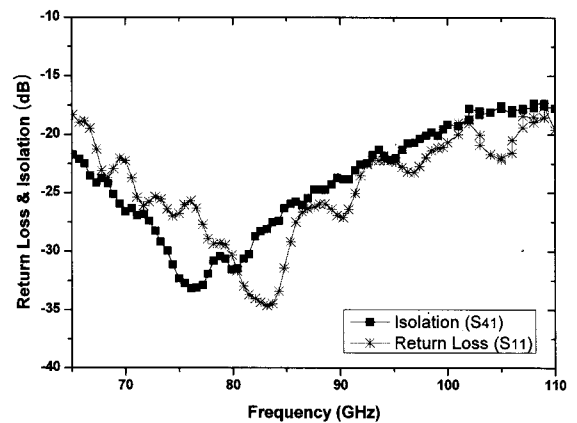
여기서 그림 6의 시뮬레이션 값과 비교했을 때 결합도 특성은 비슷하나 정합특성과 격리도 특성이 약 10 GHz 정도 주파수 이동되었음을 알 수 있었다. 이는 측정시 정합저항으로 사용되었던 Ti 저항의 공정오차와 에어브리지 부분의 공정 높이오차 $3 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 에 의한 broadside 커플링 효과가 있었을 것으로 예상된다.

IV. 결 론

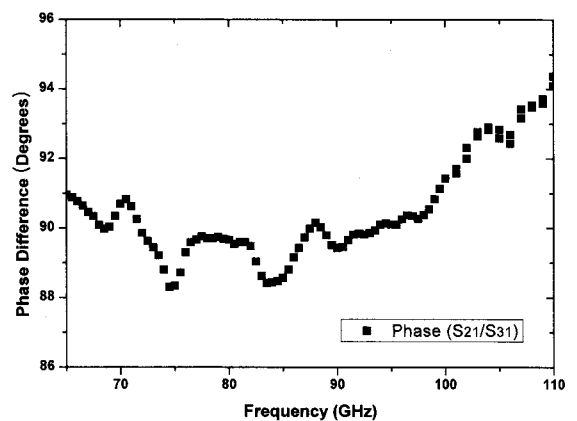
본 논문에서는 77 GHz와 94 GHz에서 응용이 가능한 W-band 3-dB 방향성 커플러를 GaAs 기판 위에 CPW 전송선로와 에어브리지 구조를 이용하여 Tandem 구조로 설계 및 제작하였다. 측정결과 W-band 대역 내에서 2.9~3.6 dB의 결합도, 17 dB 이상의 반사손실 및 격리도, $91.2^\circ \pm 2.9^\circ$ 의 위상차 특성을 얻었다. 또한 방향성 특성은 77 GHz 중심으로 10% 대역 내에서 25 dB 이상과, 94 GHz 대역에서 19 dB의 값을 얻었다. 본 논문에서 제작된 W-band 용 커플러는 GaAs 기판의 HEMT와 같은 능동 소자와 쉽게 Balanced 구조로 집적되어 W-band MMIC에 응용할 수 있을 것으로 사료된다.



(a)



(b)



(c)

그림 8. 제작된 W-band 용 3-dB Tandem 커플러 측정결과 : (a) S₂₁과 S₃₁, (b) S₁₁과 S₄₁, (c) S₂₁과 S₃₁의 위상차

Fig. 8. The measured result of the fabricated W-band 3-dB Tandem coupler : (a) S₂₁ and S₃₁, (b) S₁₁ and S₄₁, (c) Phase differences between S₂₁ and S₃₁.

참고 문헌

[1] B.H. Lee, D. A, M.K. Lee, B.O. Lim, J.H. Oh, S.D. Kim, J.K. Rhee, J. D. Park, and S.Y. Yi, "Low Conversion Loss and High LO-RF Isolation 94-GHz Active Down Converter" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 54, No. 6, pp. 2422-2430, June 2006.

[2] J.D. Park and W.J. Kim "An Efficient Method of Eliminating the Range Ambiguity for a Low-Cost FMCW Radar Using VCO Tuning Characteristics" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 54, No. 10, pp. 3623-3629, Oct. 2006.

[3] David M. Pozar, Microwave Engineering, WILEY, 1998.

[4] Ramesh K. Gupta, "Impedance-Transforming 3-dB 90° Hybrids" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-35, No. 12, pp. 1303-1307, Dec. 1987.

[5] S.S. Bedair and I. Wolff, "Fast and Accurate Analytic Formulas for Calculating the Parameters of a General Broadside-Coupled Coplanar Waveguide for (M)MIC Applications" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 37, No. 5, pp. 843-850, May 1989.

[6] Cho J.-H, Hwang H.-Y, Yun S.-W, "A Design of Wideband 3-dB Coupler With N-Section Microstrip Tandem Structure" IEEE Microwave Wireless Components Letters., Vol. 15, pp. 113-115, Feb. 2005.

[7] J.P. Shelton, J. Wolfe, and R. Von Wagoner, "Tandem couplers and phase shifters for multi-octave bandwidth," Microwaves, vol. 4, pp. 14-19, Apr. 1965.

[8] S.W. Moon, M. Han, J.H. Oh, J.K. Rhee, and S.D. Kim, "V-Band CPW 3-dB Tandem Coupler Using Air-Bridge Structure" IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 16, No. 4, pp. 149-151, April 2006.

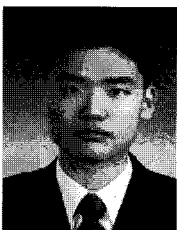
저자 소개



이 문 교(학생회원)
 1999년 배재대학교 전자공학과
 공학사
 2001년 동국대학교 전자공학과
 공학석사
 2001년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정
 <주관심분야 : 무선통신 시스템, MIMIC 설계 및
 소자 모델링>



안 단(정회원)
 1998년 동국대학교 전자공학과
 공학사
 2000년 동국대학교 전자공학과
 공학석사
 2006년 동국대학교 전자공학과
 공학박사
 2006년~현재 동국대학교 밀리미터파 신기술
 연구센터 연구교수
 <주관심분야 : 마이크로파 소자 및 회로설계,
 MIMIC 설계 및 소자 모델링>



이 북 형(정회원)
 1999년 동국대학교 전자공학과
 공학사
 2001년 동국대학교 전자공학과
 공학석사
 2006년 동국대학교 전자공학과
 공학박사
 2006년~현재 동국대학교 밀리미터파 신기술
 연구센터 연구교수
 <주관심분야 : 밀리미터파 소자 및 회로 설계 제
 작>



임 병 옥(학생회원)
 2000년 한경대학교 전자공학과
 공학사
 2002년 동국대학교 전자공학과
 공학석사
 2002년~현재 동국대학교
 전자공학과 박사과정
 <주관심분야 : MIMIC 부품 설계 및 제작>

저 자 소 개



이 상 진(학생회원)
 2003년 중부대학교 정보통신 공학과 공학사
 2005년 동국대학교 전자공학과 공학석사
 2005년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 반도체 및 RF 집적회로 설계, MIMIC를 이용한 통신 모듈설계, 플립칩기술과 wire bonding 기술을 이용한 패키징>



문 성 운(학생회원)
 2004년 동국대학교 전자공학과 공학사
 2006년 동국대학교 전자공학과 공학석사
 2006년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 초고주파회로 및 Radar 시스템 설계>



전 병 철(정회원)
 1999년 한경대학교 전자공학과 공학사
 2001년 동국대학교 전자공학과 공학석사
 2004년 (주)아이티에프 연구원

2004년~현재 밀리미터파 신기술연구센터 연구원

<주관심분야 : MIMIC 부품 설계 및 제작>



김 용 호(정회원)
 1975년 연세대학교 물리학과 이학사
 1985년 University of Wyoming 전기 및 컴퓨터공학과 공학석사
 1998년 충남대학교 전자공학과 공학박사

1985년~1990년 한국전자통신연구원 연구원

2000년~2001년 San Diego State University Visiting Professor

1990년~현재 배재대학교 전자공학과 교수

윤 진 섭(정회원)

제 38 권 SD편 제 1호 참조



김 삼 동(정회원)
 1983년 서울대학교 금속공학과 졸업(공학사),
 1986년 서울대학교 금속공학과 대학원 석사과정(공학석사),
 1992년 Department of Materials Science & Engineering Stanford University 박사과정(공학박사),

1994년 스탠포드 대학교, Solid State Electronic Lab. Post-Doctorate,

1999년 현대 전자 메모리 선행기술 연구부 박막 연구실 책임 연구원,

1999년~현재 동국대학교 전자공학과 교수

<주관심분야 : 미소고체전자 현상 분석>



이 진 구(정회원)
 1969년 국립항공대학교 전자공학과 공학사
 1975년 서울대학교 전자공학과 공학석사
 1982년 Oregon State University, 전기공학과 공학박사
 1985년 Cray Research, USA, Research Scientist
 1985년 Microwave Semiconductors, USA, Senior Engineer
 1990~1991년 University of Michigan, Visiting Research Scientist

1995년~현재 한국 전자과학기술회 이사

2005년~2006년 대한전자공학회 회장

1985년~현재 동국대학교 공과대학 전자공학과 교수

1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장

<주관심분야: MMIC 설계, 소자 모델링>