

논문 2005-42TC-7-6

Tandem 구조를 이용한 V-band 용 CPW 3-dB 방향성 결합기

(V-band CPW 3-dB Directional Coupler using Tandem Structure)

문성운*, 한민*, 백태종*, 김삼동**, 이진구***

(Sung-Woon Moon, Min Han, Tae-Jong Baek, Sam-Dong Kim, and Jin-Koo Rhee)

요약

본 연구에서는 60 GHz 대역의 무선 LAN(Wireless Local Area Network) 시스템에서 Balanced 구조를 갖는 증폭기나 믹서에 응용이 가능한 CPW(Coplanar Waveguide)구조의 Tandem 형 3-dB 방향성 결합기를 설계하고 제작하였다. 이는 기존의 edge-coupled 선로를 이용한 3 dB 결합기가 가지는 제작의 어려움과 방향성의 문제를 개선하기 위해 단일 결합선로를 다단으로 평행하게 연결한 구조이다. 우리는 소자의 크기와 제작의 용이함을 고려해, 결합계수가 -8.34 dB를 갖는 단일 결합선로를 2단으로 평행하게 연결한 구조를 채택하였다. 그리고 기존의 Tandem 결합기 제작에서 사용되어왔던 다층 기판 구조나 본딩 구조가 아닌 에어브리지 구조를 이용하여 단일 평면으로 쉽게 구현할 수 있도록 하였고, V-band(50~75 GHz)내에서 동작할 수 있도록 기생성분을 줄이고 소자 특성을 유지시켰다. 측정결과 V-band에서 완전한 3.5~4 dB의 결합도와 87.5°±1°의 위상차를, 60 GHz 에서는 30 dB 이상의 방향성을 확인하였다.

Abstract

We design and fabricate 3-dB tandem directional coupler using the coplanar waveguide structure which is applicable to balanced amplifiers and mixers for 60 GHz wireless local area network system. The coupler comprises the multiple-sectional parallel-coupled lines to facilitate the fabrication process, and enable smaller device size and higher directivity than those of the conventional 3-dB coupler employing the edge-coupled line. In this study, we adopt the structure of two-sectional parallel-coupled lines of which each single-coupled line has a coupling coefficient of -8.34 dB and airbridge structure to monolithically materialize the uniplanar coupler structure instead of using the conventional multilayer or bonded structure. The airbridge structure also supports to minimize the parasitic components and maintain desirable device performance in V-band (50~75 GHz). The measured results from the fabricated couplers show couplings of 3.5~4 dB and phase differences of 87.5°±1° in V-band range and show directivities higher than 30 dB at a frequency of 60 GHz.

Keywords: V-band, tandem, coupler, coplanar waveguide(CPW), airbridge, edge coupled line.

I. 서론

CPW(Coplanar Waveguide) 구조를 이용한 3 dB 방

향성 결합기는 밀리미터파 대역(30~300 GHz)의 Balanced 증폭기, Balanced 믹서와 같은 회로에서 능동 소자와 쉽게 집적되어 파워를 분배하거나 결합용으로 널리 사용되고 있다. 이미 CPW 구조에서의 3 dB 방향성 결합기는 다양한 형태로 연구되고 있으며, 다른 구조에서의 마찬가지로 주로 결합길이를 $\lambda/4$ 단위로 하고 우-기 모드의 임피던스 값(Z_{0o} , Z_{0e})을 이용해 원하는 결합도와 방향성 및 두 출력의 위상차를 얻는다^[1]. 특히 주로 넓은 대역폭 특성을 얻기 위해, Branch-line, 또는

* 학생회원, ** 정회원, *** 평생회원
동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터
(Millimeter-wave INnovation Technology research center, MINT)

※ 이 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터를 통한 한국과학 재단의 우수 연구센터(ERC) 지원에 의하여 수행되었음.

접수일자: 2005년5월9일, 수정완료일: 2005년6월7일

Ring 하이브리드 결합기보다는 edge-coupled 형태의 결합선로를 이용한 결합기를 일반적으로 선호한다^[2]. 하지만 강한 결합을 얻기 위해 두 선로간의 간격을 매우 작게 해야 하며 따라서 제작의 어려움을 겪을 뿐만 아니라, 그 간격에 민감하게 결합량이 바뀌게 된다. 그리고 우·기 모드간의 위상속도의 차가 증가하면서 결합기의 방향성이 나빠지게 된다. 이는 CPW 구조의 전송선로 상하부 유전율이 다른 물질이기 때문에 나타나는 현상이며 우·기 모드 임피던스 차가 클수록 이런 문제가 두드러진다^[3-4].

그러나 결합길이를 $\lambda/4$ 단위로 서로 평행한 둘 이상의 다단 구조를 가질 경우, 낮은 결합계수로만으로도 충분히 높은 결합력과 방향성을 얻을 수 있다^[5]. 이를 이용한 것이 Tandem 결합기이며 주로 넓은 대역폭 특성이 요구되는 Balanced 구조에 응용이 된다^[6].

Tandem 구조의 결합기는 현재까지 1~5 GHz 대역에서 많이 응용되어 왔으나 밀리미터파 대역(30~300 GHz)에서 응용된 사례가 거의 없다. Tandem 결합기는 전송선로위를 크로스 오버하는 구조가 반드시 필요하여 이를 위해 둘 이상의 층을 이용하거나 본딩을 이용하여 제작하게 된다^[7-8]. 이때 생기는 기생효과와 손실문제가 고주파에서 보다 심각하게 고려되기 때문이다. 본 논문에서는 이런 부분을 에어브리지 공정 기법으로 보완하여 단일 평면으로 쉽게 구현할 수 있도록 하였고 소자의 특성을 유지시켰다. 그리고 60 GHz 무선 LAN (Wireless Local Area Network) 시스템에서 쿼드러춰 하이브리드 결합기로 동작하기 위해 V-band 내에서 일정한 결합도와 90° 위상차, 그리고 최적의 정합조건과 방향성을 갖도록 설계 및 제작하였다.

II. 이론 및 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 결합기를 가역성과 무손실 조건하에 산란행렬로 표현하면 식 (1)과 같다^[1,9-10].

$$\begin{pmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{24} & S_{34} & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

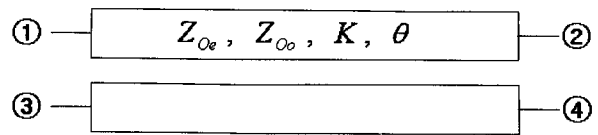


그림 1. 단일 결합선로
Fig. 1. A single-section coupled line.

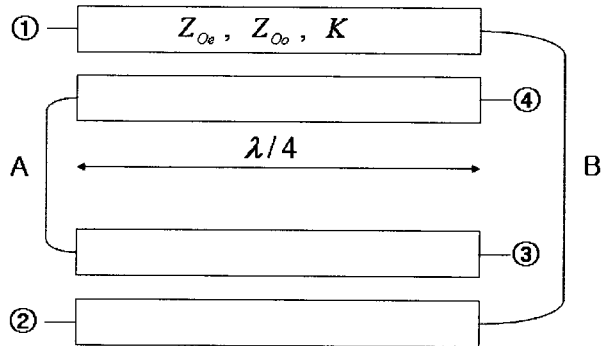


그림 2. 두 개의 평행한 결합선로
Fig. 2. Two-section parallel-coupled lines.

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 통과포트간에 전달되는 전력은 최소가 되고 결합포트간에 전달되는 전력은 최대가 됨을 알 수 있다. 그와 동시에 두개의 출력 신호가 90° 위상차를 갖는 쿼드러춰 하이브리드 결합기가 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 결합을 요구할 경우, 이를 위한 높은 K값(=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^[3-4]. 이는 결합기의 방향성을 떨어뜨리는 효과를 가져온다. 따라서 단일결합선로를 둘 이상의 섹션으로 평행하게 연결하여 낮은 K값으로도 충분히 높은 결합도와 방향성 특성을 얻을 수 있는 구조가 필요하다.

단일 결합선로를 평행하게 N개만큼 다단으로 연결하여 최종 두 출력단으로 동일한 파워가 나오도록 설계한다면 N이 증가할수록 단일 결합선로에서 요구되는 K값

은 점점 작아진다. 그리고 그로 인해 우·기모드의 위상 속도가 비슷해지면서 방향성이 더욱 개선될 것이다^[5]. 그러나 소자의 크기 및 제작가능한 두 선로간의 간격을 고려한다면 적당한 N값을 선택하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 공정오차를 최소화하기 위해 결합선로간의 최소간격을 8 μm 라고 가정하고 소자의 크기를 고려해 그림 2와 같이 두 개의 결합선로를 평행하게 연결한 구조를 채택하였다.

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

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

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

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

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

식 (6)의 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.

$$Z_{\infty} = Z_0 \sqrt{\frac{1+K}{1-K}} \approx 74.6 \Omega \quad Z_{\infty} = Z_0 \sqrt{\frac{1-K}{1+K}} \approx 33.5 \Omega \quad (7)$$

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 선로

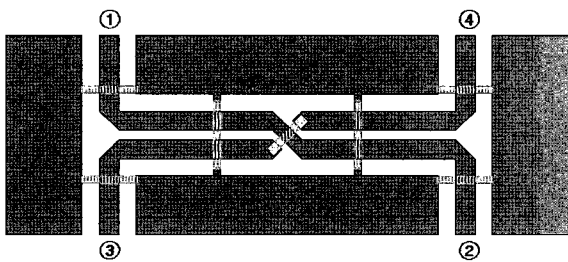


그림 3. 단일 결합선로로 구성된 결합기
Fig. 3. Coupler composed of a single-coupled line.

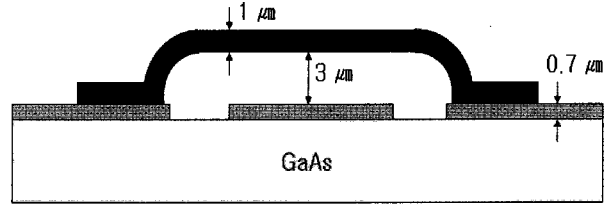


그림 4. 에어브리지 선로
Fig. 4. Airbridge line.

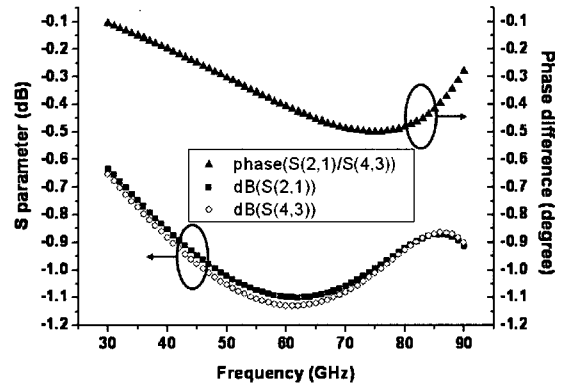


그림 5. 에어브리지를 포함한 단일 결합선로로 구성된 결합기의 계산된 결과
Fig. 5. Calculated results of the single-coupled line with an airbridge.

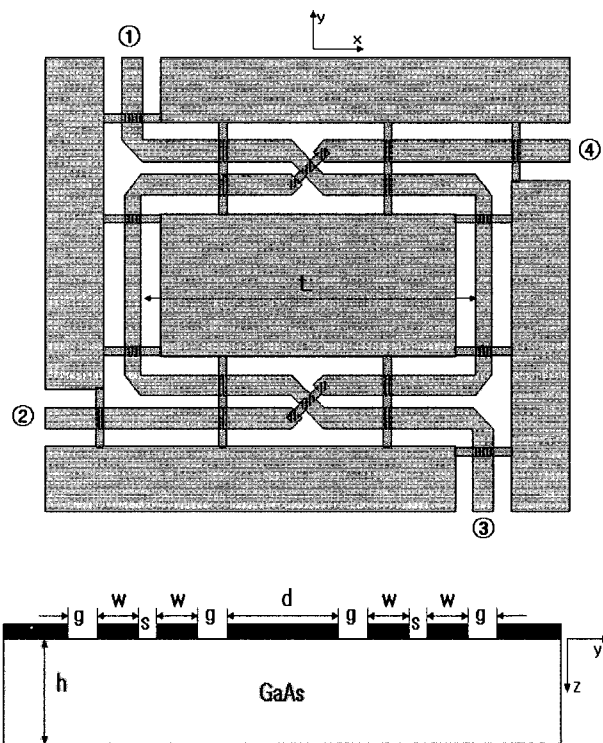


그림 6. CPW Tandem 결합기 레이아웃
Fig. 6. Layout of CPW Tandem coupler.

표 1. 각 파라미터 값

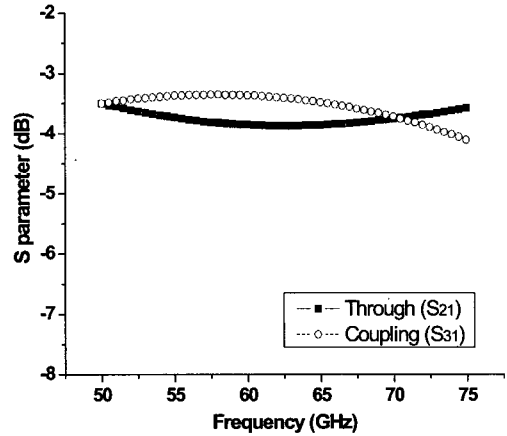
Table 1. Parameters of CPW Tandem couplers.

ϵ_r (기판유전율)	12.9
h	680 μm
Loss Tangent	0.003
Metal thickness	0.7 μm
L	420 μm
w	26 μm
g	22 μm
s	14 μm
d	171 μm

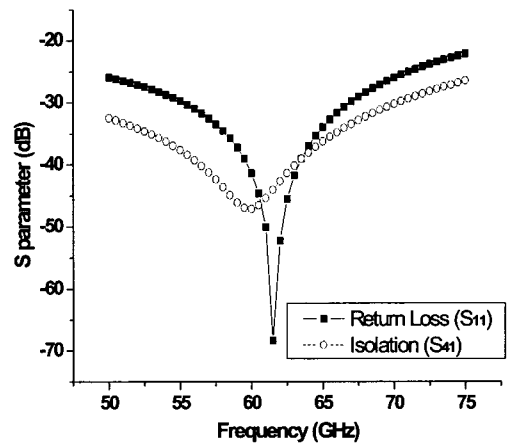
의 경우 단일 결합선로간의 간격이 일정하지 못하므로 식 (7)을 통해서 구한 간격을 기준으로 결합력이 -8.34 dB 가 나오도록 수정해야 한다. 또한 에어브리지를 통해 흐르는 신호와 일반 전송선로를 통해 흐르는 신호를 비교 하여 에어브리지가 미치는 간섭효과를 검증할 필요가 있다. 이는 그림 3과 같이 단일 결합선로로 구성된 결합기에서 통과포트간의 크기와 위상차를 계산하여 확인 할 수 있다. 계산에 앞서 에어브리지 조건은 본 공정에서 이미 안정화 된 기준에 맞추기 위하여 그림 4와 같이 first metal 로부터 3 μm 떨어져있고 두께가 1 μm 인 골드(gold)로 구성하도록 하였다.

그림 5는 그림 3의 레이아웃을 HFSS 시뮬레이션 틀에 적용시켜 통과포트간의 크기와 위상차를 계산한 값이다. 일반 전송선로를 통해 흐르는 신호와 에어브리지를 통해 흐르는 신호를 각각 S_{21} 과 S_{43} 로 표현할 수 있다. 두 신호를 60 GHz 를 중심으로 100 % 주파수 대역폭 내에서 분석한 결과 신호의 크기는 최대 0.05 dB, 위상은 최대 0.5° 정도의 극히 적은 오차를 확인하였다. 위의 분석을 바탕으로 그림 6과 같이 두께가 680 μm 인 GaAs 기판위에 CPW 구조로 구현하였다. 이때 h, L, w, g, s 및 d의 파라미터들은 그림 6에 정의되었다. 표 1은 각 파라미터 값들을 표현한 것이다.

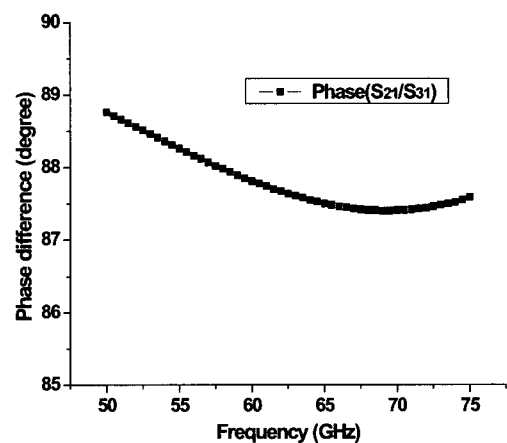
w와 g, 그리고 s의 값은 앞의 이론에서 얻어낸 우기 모드의 임피던스 값을 기준으로 결정된 값이며, 결합선로의 길이 L은 60 GHz에서의 $\lambda/4$ 길이와 에어브리지로 크로스 오버된 선로를 같이 고려한 값이다. 본 공정에서 안정된 결합선로간의 최소 간격을 8 μm 라고 할 때, 표 1의 s의 값(14 μm)은 적절한 값을 알 수 있다. 길이 d 의 값은 60 GHz 에서의 결합도에는 거의 영향을 미치지 않는다. 단지 그 길이에 따라 각 포트별 정합특



(a)



(b)



(c)

그림 7. V-band 용 3-dB Tandem 결합기의 시뮬레이션 특성: (a) S_{21} 과 S_{31} , (b) S_{11} 과 S_{41} , (c) S_{21} 과 S_{31} 의 위상차

Fig. 7. Calculated results of the V-band 3-dB Tandem coupler: (a) S_{21} and S_{31} , (b) S_{11} and S_{41} , (c) Phase differences between S_{21} and S_{31} .

성과 격리도가 달라진다. 표 1의 d의 값(171 μm)은 60 GHz에서 S_{11} 과 S_{41} 이 최저값이 되도록 ADS 툴의 파라미터 스윙을 통해 얻어낸 결과이다.

이 레이아웃을 HFSS 툴에 적용시켜 V-band 내에서의 결합도와 정합특성, 격리도와 두 출력간의 위상차를 계산하여 그림 7과 같은 결과를 얻었다.

V-band 내에서 결합도(S_{31})는 -3.35 dB에서 -4 dB까지, S_{21} 은 -3.5 dB에서 -3.87 dB까지 완만한 특성을 보인다. 그리고 60 GHz에서 40 dB 이상의 우수한 방향성과 정합특성을 보인다. 2번과 3번 포트에 나오는 두 출력의 위상차는 그림 7-(c) 와 같이 V-band 내에서 $88^\circ \pm 0.6^\circ$ 로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이런 특성이라면 충분히 60 GHz 무선 LAN 시스템에 효율적으로 응용할 수 있을 것이다.

III. 제작 및 측정 결과

그림 8과 9는 2절의 설계에 따라 제작된 60 GHz 에서 동작하는 Tandem 결합기와 크로스 오버된 에어브리지의 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진이다.

측정 주파수 대역은 V-band(50~75 GHz)이며 2포트 측정장비를 이용하여 4포트 측정을 실시하였다. 측정포트 이외 나머지 두개 포트는 Agilent WR-15 50 Ω 로 정합시켰다. 실질적으로 V-band 내에서 Agilent WR-15 50 Ω 를 측정하였을 경우 반사계수가 20 dB 밑으로 떨어지므로 정합된 나머지 포트에서의 반사는 무시하였다. 그림 10은 결합도, 격리도, 정합특성 및 위상차를 측정한 결과이다.

측정 결과 결합도는 60 GHz에서 -3.5 dB, V-band 내에서는 -3.5 dB 에서 -4 dB 사이에 존재하며, 반사손실과 격리도는 60 GHz에서 35 dB 이상, V-band 내에서는 20 dB 이상의 특성을 보인다. 특히 60 GHz 중심으로 10% 대역(57 GHz ~ 63 GHz) 내에서 30 dB 이상의 방향성을 얻었다. 또한 위상차도 $87.5^\circ \pm 1^\circ$ 정도의 특성을 보여 90° 로 일정하게 유지됨을 확인하였다. 따라서 V-band 내에서 3-dB 방향성 결합기로 사용하기에 충분한 성능으로서 만족할 만하다. 여기서 시뮬레이션 값과 비교했을 때 결합도 특성은 비슷하나 정합특성과 격리도 특성에 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 선로의 꺾는 부분에서 발생하는 불연속 정합 효과와 에어브리지 선로에 의한 예측하기 힘든 기생성분의 영향 때문

이라고 생각된다. 예를 들어 에어브리지선로와 바로 밑의 선로 간격(3 μm)은 edge-coupled 선로간의 간격(14 μm)에 비해서 매우 작을뿐만 아니라 공정시 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 오차를 감수해야 하는데, 이는 얻고자 하는 결합기 특성

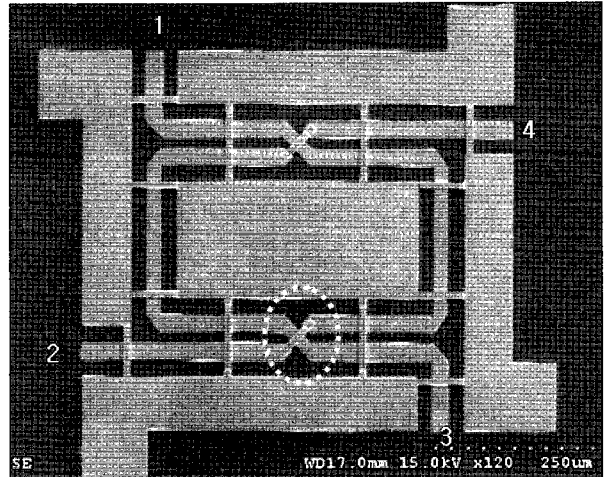


그림 8. 제작된 Tandem 결합기의 SEM 사진
Fig. 8. SEM photograph of the fabricated Tandem coupler.

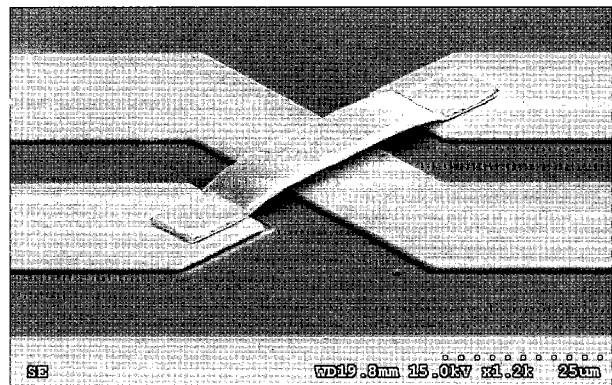
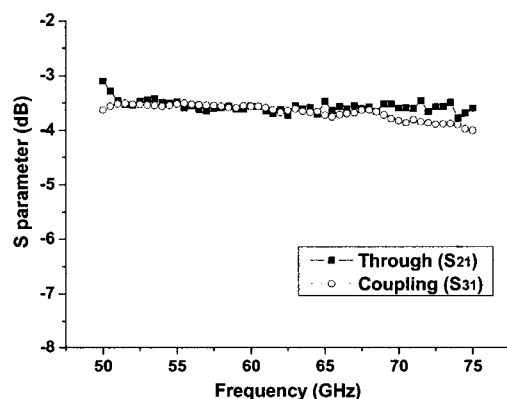
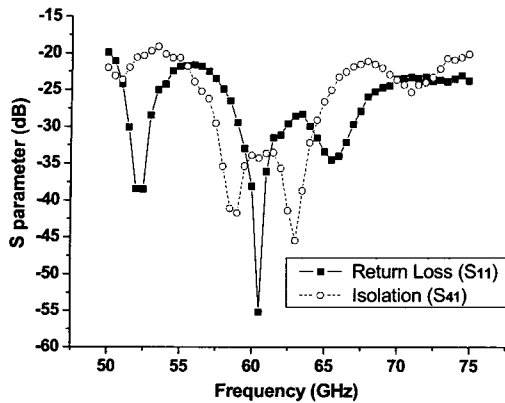


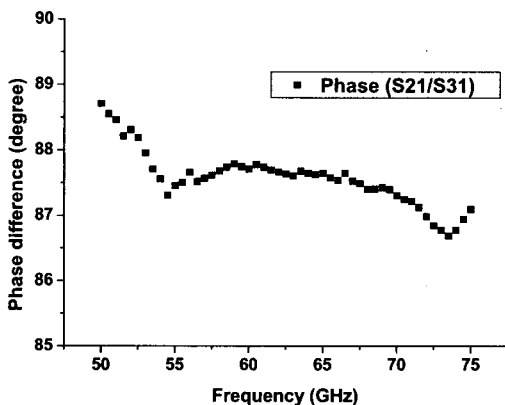
그림 9. 제작된 에어브리지 선로의 SEM 사진
Fig. 9. The SEM photograph of the fabricated airbridge line.



(a)



(b)



(c)

그림 10. 제작된 V-band 용 3-dB Tandem 결합기 측정결과 : (a) S_{21} 과 S_{31} , (b) S_{11} 과 S_{41} , (c) S_{21} 과 S_{31} 의 위상차

Fig. 10. The measured results of the fabricated V-band 3-dB Tandem coupler : (a) S_{21} and S_{31} , (b) S_{11} and S_{41} , (c) Phase differences between S_{21} and S_{31} .

에 민감하게 변화를 줄 것이다. 이러한 기생성분들과 그것이 미치는 영향에 대해서 정확히 모델화 하는 연구가 앞으로 필요하다.

IV. 결 론

중심주파수가 60 GHz 이고 V-band 내에서 동작이 가능한 3-dB 방향성 결합기를 GaAs 기판 위에 CPW 전송선로를 이용하여 Tandem 형태로 설계하고 제작하였다. 기존의 edge-coupled 선로가 갖는 문제점을 개선하고자 다단으로 평행하게 결합선로를 연결하여 낮은 결합계수를 유도하는 Tandem 구조를 채택하였다. 이를 통하여 두 선로간의 간격을 넓히고 우·기모드간의 임피

던스차를 줄여 방향성을 향상시킬 수 있다. 또한 Tandem 결합기의 크로스 오버를 구현하기 위해 기존에 사용되었던 다층 기판이나 본딩을 이용하지 않고 에어브리지 선로를 이용해 단일 평면구조를 채택하였다. 측정결과 V-band 내에서 3.5~4 dB의 결합도, 20 dB 이상의 반사손실 및 격리도, 약 90°의 일정한 위상차 특성을 얻어냈다. 또한 60 GHz 중심으로 10% 대역(57~63 GHz) 내에서는 30 dB 이상의 방향성 특성을 얻었다. 이는 V-band 용 결합기로서 충분한 성능을 보여준다. 특히 GaAs 기판의 HEMT와 같은 능동 소자와 쉽게 Balanced 구조로 집적되어 60 GHz 무선 LAN에 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] David M. Pozar, "Microwave Engineering 2nd E", ILEY, 1998.
- [2] Ramesh K. Gupta, "Impedance-Transforming 3-dB 90° Hybrids" *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-35, No. 12, pp. 1303-1307, Dec. 1987.
- [3] Rainee N. Simons, "Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems", WILEY, 2001, pp. 182-202.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] R. E. Hayes, J.W. Gippich and M.G. Hershfeld, "A stripline re-entrant coupler network for cofired multilayer microwave circuits," *IEEE MTT-S Digest*, vol. 2, pp. 801-804, June. 1965.
- [8] T. Y. Chang, C. L. Liao, and C. H. Chen, "Novel uniplanar tandem couplers," in *Proc.*

32nd Eur. Microwave conf., pp. 127-130, 2002.

- [9] J. Reed and G. Wheeler, "A method of analysis of symmetrical four-port networks," *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-4, pp. 246-252, Oct.1956.
- [10] G. Matthaei, L. Young, and E. Jones, *Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and coupling Structures*. New York:McGraw-Hill, 1964.

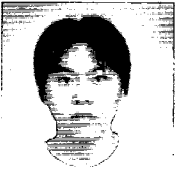
저 자 소 개



문 성 운(정회원)
2004년 2월 동국대학교
전자공학과 (공학사)
2004년 3월~현재 동국대학교
전자공학과 석사과정
<주관심분야 : 밀리미터파 RF 수
동소자 및 MMIC 설계>



한 민(정회원)
2003년 2월 동국대학교
전자공학과 (공학사)
2003년 3월~현재 동국대학교
전자공학과 석사과정
<주관심분야 : 밀리미터파 소자
및 회로 설계 제작>



백 태 중(정회원)
2003년 2월 중부대학교
정보통신공학과 (공학사)
2003년 3월~현재 동국대학교
전자공학과 석사과정
<주관심분야 : MEMS 공정 설계,
E-Beam Lithgraphy>



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 스텐포드 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 전자
공학과 졸업(공학사),
1975년 서울대학교 전자공학과
석사과정(공학석사),
1982년 Oregon State Univ. 전기
공학과 (공학박사),

1985년 Cray Research Scientist,
1985년 Microwave Semiconductors, USA,
Senior Engineer,
1995년~현재 한국 전자과학회 이사,
1985년~2003년 대한전자공학회 부회장
2004년~2005년 대한전자공학회 수석부회장
2005년~현재 대한전자공학회 회장
1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수
1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장
<주관심분야 : MMIC설계, 소자 모델링>