

논문 2007-44SD-5-6

# CPW 구조를 이용한 94 GHz Branch-line 대역통과 여파기의 설계 및 제작

## (Design and Fabrication of the 94 GHz Branch-line Bandpass Filter using CPW structure)

권혁자\*, 방석호\*, 이상진\*, 윤진섭\*, 이진구\*\*

(Hyuk-Ja Kwon, Suk-Ho Bang, Sang-Jin Lee, Jin Seob Yoon, and Jin-Koo Rhee)

### 요약

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 동작하는 단일 평면 구조의 회로에 쉽게 집적화 할 수 있는 94 GHz CPW branch-line 대역통과 여파기를 설계 및 제작하였다. 본 논문은 커플링 포트들을 open load stub로 연결하고, 격리 포트를 출력노드로 취하여 branch-line 커플러를 transversal filtering section으로 사용하는 것이다. 94 GHz branch-line 대역통과 여파기를 설계하기 위해서 CPW 라이브러리를 구축하고, branch-line 커플러와 open load stub들의 임피던스 및 길이를 최적화하였다. 제작된 대역통과 여파기의 측정결과, 주파수 94 GHz를 중심으로 11.7 %의 3 dB 상대 대역폭과 2.5 dB의 삽입 손실 특성을 나타내었다. 또한, 94 GHz에서 -18.5 dB의 입출력 반사 손실 특성을 얻었다.

### Abstract

We report the 94 GHz CPW branch-line bandpass filter for planar integrated millimeter-wave circuits. The branch-line coupler operates as a transversal filtering section by connecting the coupling ports to the open load stubs and taking the isolation port as the output node. For design of the 94 GHz branch-line bandpass filter, we built the CPW library and optimized the characteristic impedances and the lengths of the branch-line coupler and the open load stubs. The fabricated 94 GHz bandpass filter exhibits an insertion loss of 2.5 dB with an 11.7 % 3 dB relative bandwidth and the return loss is -18.5 dB at a center frequency of 94 GHz.

**Keywords :** CPW, Bandpass filter, Branch-line coupler, Planar integrated millimeter-wave circuits

## I. 서론

무선 통신 산업의 급속한 발전과 밀리미터파 위성 통신 및 레이더 시스템 등의 사용을 위해서, 밀리미터파 대역을 이용한 부품 개발의 요구가 증가되고 있다. 특히, 94 GHz 주파수는 대기 내에서 적은 감쇠 특성으로

인해, FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave) 레이더 시스템과 같은 군사용 응용에 주목받고 있다.

평면 구조를 갖는 대역통과 여파기는 밀리미터파 회로의 중요한 부품으로서 연구 및 개발되고 있다. 왜냐하면 밀리미터파 회로에서 평면 구조는 간단한 공정 및 저가격화의 장점을 가지고 있기 때문이다. 평면 구조를 갖는 전형적인 전송선로에는 microstrip line, micromachining 공정법을 이용해서 만든 elevated microstrip line, 그리고 CPW (CoPlanar Wave guide)가 있다. CPW와 비교하여, microstrip line과 micromachining 공정법을 이용해서 만든 elevated

\* 정회원, \*\* 평생회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터

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

※ 본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 (MINT)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 (ERC) 지원금에 의해 수행되었습니다.

접수일자: 2007년1월25일, 수정완료일: 2007년4월26일

microstrip line은 완전한 평면 구조를 갖는 전송선로가 아니다. 그 이유로는, microstrip line의 접지 면은 기판의 바닥에 위치하고 있으며, micromachining 공정법을 이용해서 만든 elevated microstrip line은 접지 면으로부터 신호 선로가 공기 중으로 올라가는 형태이기 때문이다. 그래서 microstrip line 및 micromachining 공정법을 이용해서 만든 elevated microstrip line을 이용한 대역통과 여파기는 공정이 복잡하고 단일 평면 구조를 갖는 밀리미터파 회로에 집적화 하는 것이 어렵다. 그러나 CPW는 완전한 평면 구조이며, short와 shunt 선로를 구현하는 것이 쉽고 낮은 전파 손실 특성을 나타낸다. 또한, CPW 파라미터들은 기판 두께에 민감하지 않다. 따라서 CPW는 밀리미터파 대역에서 동작하는 단일 평면 구조의 회로에 널리 사용되어 진다<sup>[1-3]</sup>.

대역통과 여파기를 설계함에 있어서, 주된 문제는 낮은 삽입 손실 특성과 spurious 신호 및 대역폭 밖의 노이즈를 효율적으로 차단하는 예리한 차단 특성을 실현하는 것이다<sup>[4]</sup>. 낮은 삽입 손실 및 높은 선택도를 갖는 94 GHz CPW 대역통과 여파기를 설계하기 위해서, branch-line 커플러를 기반으로 한 대역통과 여파기를 설계하는 새로운 대안이 제안되었다. 이것은 커플링 포트들을 open load stub로 연결하고, 격리 포트를 출력 노드로 취하여 branch-line 커플러를 transversal filtering section으로 사용하는 것이다<sup>[5]</sup>.

본 논문에서는, 단일 평면 구조를 갖는 밀리미터파 회로에 쉽게 집적화 할 수 있는 높은 선택도, 낮은 삽입 손실, 저가격, 그리고 간단한 구조를 갖는 94 GHz CPW branch-line 대역통과 여파기를 설계 및 제작하였다.

## II. 대역통과 여파기의 설계

### 1. Branch-line 커플러를 기반으로 한 대역통과 여파기

그림 1은 branch-line 커플러를 기반으로 한 대역통과 여파기의 회로도를 보여준다. 그림 1을 통해, transversal filtering section은 전형적인 branch-line 커플러로 구성됨을 알 수 있다. Branch-line 커플러의 커플링 포트 (포트 2, 포트 3)들은 open load stub들로 연결되며, RF 출력 노드 (포트 4)는 격리 포트이다. Branch-line 커플러의 길이와 특성 임피던스는  $L_1, L_2$  그리고  $Z_1, Z_2$ 이다. Open load stub들의 길이와 특성 임피던스는  $L_3, L_4$  그리고  $Z_3, Z_4$ 이다.

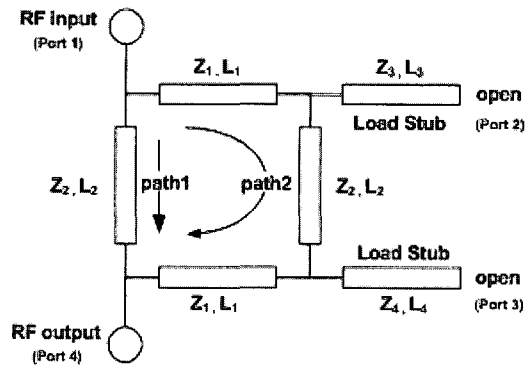


그림 1. Branch-line 커플러를 기반으로 한 대역통과 여파기 회로도

Fig. 1. Bandpass filter circuit based on the branch-line coupler.

이 대역통과 여파기는 입력 신호로부터 path1로 전달된 신호와 path2로 전달된 신호가 feedforward 재결합함으로써 주파수를 선택한다. 이것은 중심 주파수에서는 constructive interference를 유지하고, 대역폭 밖의 주파수에서는 power transmission zeros를 생성하는 것이다. 이를 통해 예리한 대역통과 필터링 응답이 얻어진다.

Branch-line 커플러를 이용한 대역통과 여파기의 초기 값은  $Z_1 = Z_0 / \sqrt{2}$  이고  $Z_2 = Z_0$ 이며,  $Z_0$ 은 reference 임피던스이다. Open load stub들의 특성 임피던스  $Z_3$ 와  $Z_4$ 의 초기 값은  $Z_0$ 과 같으며, 커플러의 RF 입력 포트 (포트 1)와 RF 출력 포트 (포트 4)는 임피던스  $Z_0$ 으로 매칭되어 진다. 커플러의 길이는  $L_1 = L_2 = \lambda/4$  이다. Open load stub들의 길이  $L_3$ 과  $L_4$ 는 다음의 식과 같으며, 초기 값으로  $L_3 = \lambda/4, L_4 = 5\lambda/4$  ( $m=1, m=2$ )로 설정하였다.

$$L_3 = \frac{m\lambda}{4} \quad m \in N \quad (1)$$

$$L_4 = \frac{(m+2n)\lambda}{4} \quad m, n \in N \quad (2)$$

Open load stub들의 길이는 예리한 선택도 필터링 응답을 얻는데 중요하다<sup>[6]</sup>.

### 2. 94 GHz CPW 대역통과 여파기의 설계

94 GHz CPW 대역통과 여파기는 시뮬레이터 ADS를 이용하여 설계 및 최적화를 하였다. CPW 라이브러리 구축을 위해 33, 50  $\Omega$ 의 특성임피던스를 갖는 선로를 설계 및 제작하였으며, 각 특성 임피던스 라인의 Curve, Tee의 불연속 특성에 대한 모델을 구축하였다.

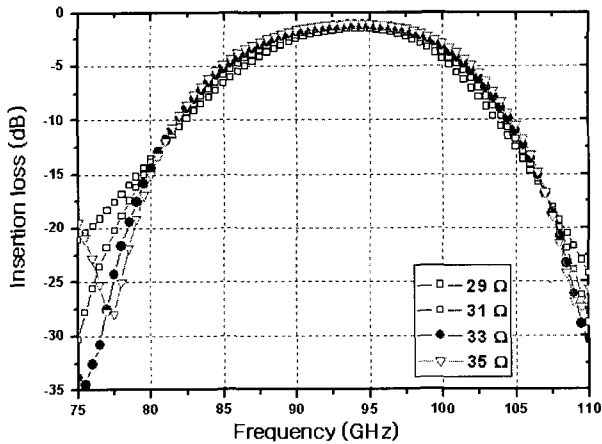


그림 2. 특성 임피던스  $Z_1$  의 변화에 따른 시뮬레이션 된 삽입손실 특성

Fig. 2. Simulated insertion loss versus frequency for different characteristic impedances  $Z_1$ .

표 1. 94 GHz CPW 대역통과 여파기의 파라미터 값  
Table 1. Parameters of the 94 GHz CPW bandpass filter.

상대 유전율 ( $\epsilon_r$ )	12.9	
기판 두께 (h)	680 $\mu\text{m}$	
Loss tangent	0.003	
Metal thickness	0.7 $\mu\text{m}$	
33 $\Omega$ CPW 전송선로	Width	75 $\mu\text{m}$
	Gap	12 $\mu\text{m}$
50 $\Omega$ CPW 전송선로	Width	26 $\mu\text{m}$
	Gap	22 $\mu\text{m}$
Branch-line 커플러의 최적화된 길이	$L_1$	325 $\mu\text{m}$
	$L_2$	306 $\mu\text{m}$
open load stub들의 최적화된 길이	$L_3$	300 $\mu\text{m}$
	$L_4$	1480 $\mu\text{m}$

대역통과 여파기는 낮은 삽입 손실, 높은 선택도, 그리고 좋은 스퀘트 특성을 갖도록 하기 위해 특성 임피던스  $Z_1$ 을 최적화하였다. 그림 2는 특성 임피던스  $Z_1$ 의 변화에 따른 대역통과 여파기의 시뮬레이션 된 삽입손실 특성을 보여준다.

특성 임피던스  $Z_1$ 의 변화에 따라 삽입손실 및 스퀘트 특성이 변화함을 알 수 있으며, 낮은 삽입손실과 예리한 스퀘트 특성을 고려하여  $Z_1$ 의 임피던스는 33  $\Omega$ 으로 선택하였다. 대역통과 여파기의 설계된 특성 임피던스는  $Z_1 = 33 \Omega$ ,  $Z_2 = Z_3 = Z_4 = 50 \Omega$ 이다.

표 1은 94 GHz CPW 대역통과 여파기의 상대 유전율  $\epsilon_r$ , 기판 두께 h, loss tangent, metal thickness, 50  $\Omega$ 과 33  $\Omega$  CPW 전송선로의 width와 gap, 그리고 branch-line 커플러와 open load stub들의 최적화 된 길

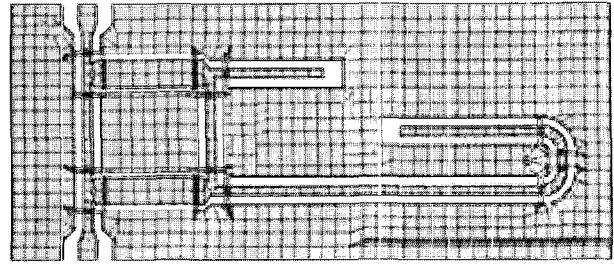


그림 3. 94 GHz CPW 대역통과 여파기의 레이아웃  
Fig. 3. Layout of the 94 GHz CPW bandpass filter.

이를 보여준다. 전송선로의 길이 및 간격 등은 ADS 프로그램의 LineCalc을 이용하여 계산하였다.

설계된 대역통과 여파기의 전체 회로 패턴은 Momentum™ 시뮬레이션을 통하여 검증하고 최적화를 수행하였다. 그림 3은 94 GHz CPW 대역통과 여파기의 레이아웃을 보여준다.

### III. 대역통과 여파기의 실험 결과

94 GHz CPW 대역통과 여파기의 제작은 개발된 MINT 표준 공정을 통하여 제작되었다<sup>[7]</sup>. 그림 4는 제작된 대역통과 여파기의 칩 사진이며, 칩의 크기는  $0.6 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 이다.

제작된 대역통과 여파기의 특성은 75~110 GHz의 주파수 영역에서 Anritsu ME7808A vector network analyzer를 이용하여 분석하였다. 그림 5는 94 GHz CPW 대역통과 여파기의 시뮬레이션 된 S-parameter 특성과 측정 된 S-parameter 특성의 비교 결과를 나타내었다. 또한, 그림 6은 94 GHz CPW 대역통과 여파기의 측정 된 위상 특성을 보여준다.

94 GHz CPW 대역통과 여파기의 S-parameter 특성 측정 결과 11.7 %의 3 dB 대역폭을 얻었다. 또한, 삽입 손실은 중심주파수 94 GHz에서 2.5 dB의 특성을 나타내었으며, 입출력 반사 손실은 -18.5 dB이다. 표 2는

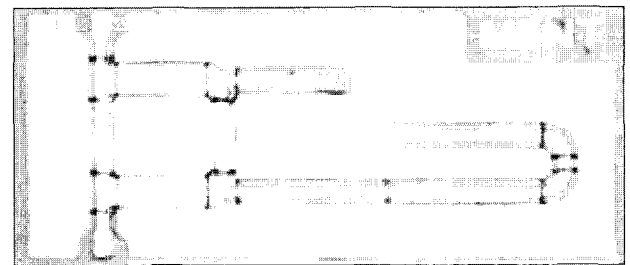


그림 4. 제작된 94 GHz CPW 대역통과 여파기의 사진  
Fig. 4. Photograph of the fabricated 94 GHz CPW bandpass filter.

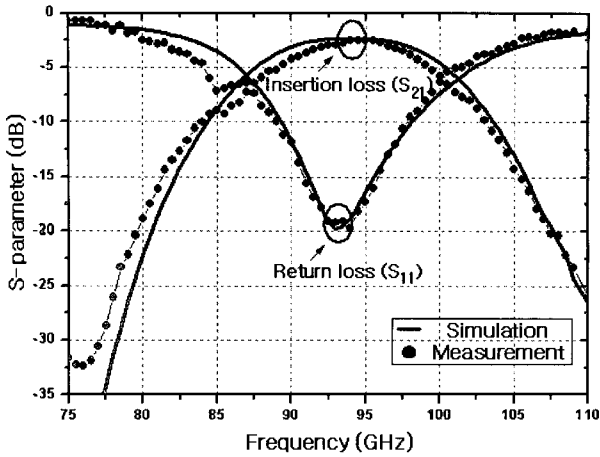


그림 5. 94 GHz CPW 대역통과 여파기의 시뮬레이션 및 측정된 S-parameter 특성 결과

Fig. 5. Simulated and measured S-parameter of the 94 GHz CPW bandpass filter.

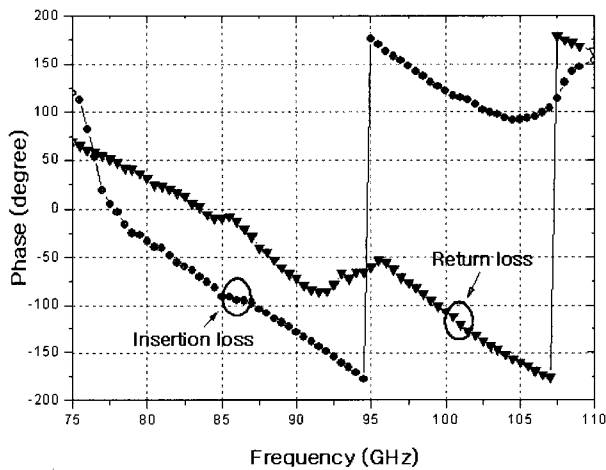


그림 6. 94 GHz CPW 대역통과 여파기의 측정된 위상 특성 결과

Fig. 6. Measured phase characteristics of the 94 GHz CPW bandpass filter.

설계 및 제작된 94 GHz CPW 대역통과 여파기와 보고되었던 대역통과 여파기들의 주된 특성 비교 결과를 보여준다. 비교결과, 제작된 94 GHz CPW 대역통과 여파기는 비슷하거나 더 우수한 성능을 나타내었다. 또한, 보고되었던 대역통과 여파기들은<sup>[8-10]</sup> 단일 평면 구조를 갖는 밀리미터파 회로에 집적화 및 제작이 어려운 몇몇의 단점을 가지고 있다. 즉, 본 논문에서 제안된 대역통과 여파기는 집적화와 저격화의 장점을 가지고 있다. 따라서 설계 및 제작된 94 GHz CPW 대역통과 여파기는 밀리미터파 대역에서 동작하는 단일 평면 구조의 회로에 쉽게 집적화 할 수 있다.

표 2. 94 GHz CPW 대역통과 여파기와 보고되었던 대역통과 여파기의 비교

Table 2. Comparison of the 94 GHz bandpass filters with the reported data.

Ref.	전송선로 형태	중심 주파수 (GHz)	삽입 손실 (dB)	대역폭 (%)
[8]	Micromachined line	94.7	3.4	6.1
		94.3	2.2	11.3
		94.4	0.6	16.4
[9]	Micromachined line	95	2.2	12.5
		95	1.4	17.7
		95	3.6	6.1
[10]	Semilumped CPW	97	2.7	10
This work	CPW	94	2.5	11.7

#### IV. 결 론

본 논문에서는 CPW 구조를 이용한 94 GHz branch-line 대역통과 여파기를 설계 및 제작하였다. Branch-line 커플러는 커플링 포트들을 적절한 길이를 갖는 open load stub로 연결하고, 격리 포트를 출력 노드로 취함으로써 transversal filtering section으로 동작한다. 94 GHz CPW 대역통과 여파기를 설계하기 위해서, CPW 라이브러리를 구축한 후 branch-line 커플러 및 open load stub들의 특성 임피던스와 길이를 최적화하였다. 또한, 설계된 전체 회로 패턴은 Momentum<sup>TM</sup> 시뮬레이션을 통하여 검증하고 최적화를 수행하였다.

제작된 대역통과 여파기는 중심주파수 94 GHz에서 11.7%의 3 dB 상대 대역폭과 2.5 dB의 삽입 손실 특성을 나타내었다. 그리고 94 GHz에서 -18.5 dB의 입출력 반사 손실 특성을 얻었으며, 시뮬레이션 결과와 측정 결과는 거의 일치하였다.

설계 및 제작된 94 GHz CPW 대역통과 여파기는 간단한 구조로 구현이 가능하고, 낮은 삽입 손실 및 양호한 선택도의 특성을 보여준다. 또한, 그것은 단일 평면 구조를 갖는 밀리미터파 회로에 쉽게 집적화 할 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] Dan An, Bok Hyung Lee, Yeon Sik Chae, Hyun Chang Park, Hyung Moo Park, and Jin Koo Rhee, "Low LO Power V-band CPW Down-Converter Using a GaAs PHEMT," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 41, no. 6, pp. 1013-1016, Mar. 2002.
- [2] Bok Hyung Lee, Dan An, Mun Kyo Lee, Byeong Ok Lim, Sam Dong Kim, and Jin Koo Rhee, "Two stage broadband high gain W-band amplifier using 0.1- $\mu$ m metamorphic HEMT technology," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 25, no. 12, pp. 766-768, Dec. 2004.
- [3] R. A. Pucel, "Design considerations for monolithic microwave circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. MTT-29, pp. 513-534, June 1981.
- [4] I.C. Hunter, L. Billonnet, B. Jarry, and P. Guillon, "Microwave filters-Applications and technology," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 794-805, Mar. 2002.
- [5] L. C. Chao, "N-way branch line directional couplers," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 74, pp. 93-96, June 1974.
- [6] Roberto Gomez-Garcia, Jose I.Alonso, and Daniel Amor-Martin, "Using the Branch-Line directional Coupler in the Design of Microwave Bandpass Filters," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 53, no. 10, pp. 3221-3229, Oct. 2005.
- [7] Tae-Sin Kang, Seong-Dae Lee, Bok-Hyoung Lee, Sam-Dong Kim, Hyun-Chang Park, Hyung-Moo Park, and Jin-Koo Rhee, "Design and Fabrication of a Low-Noise Amplifier for the V-Band," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 42, no. 4, pp. 1013-1016, 2002.
- [8] Stephen V.Rhbertson, Linda P.B. Katehi, and Gabriel M.Rebeiz, "Micromachined Self-Packaged W-band Bandpass Filters," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1543-1546, 1995.
- [9] Stephen V.Rhbertson, Linda P.B. Katehi, and Gabriel M.Rebeiz, "Micromachined W-band Bandpass Filters," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 44, no. 4, pp. 598-606, April 1996.
- [10] Farshid Aryanfar, and Kamal Sarabandi, "Characterization of Semilumped CPW Elements for Millimeter-wave Filter Design," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 53, no. 4, pp. 1288-1293, April 2005.

— 저 자 소 개 —



권혁자(정회원)  
 2005년 동국대학교 전자공학과  
 (공학사),  
 2007년 동국대학교 전자공학과  
 (공학석사)  
 <주관심 분야 : 밀리미터파 수동  
 소자 및 MMIC 설계>



방석호(정회원)  
 2006년 배재대학교 정보통신  
 공학과 (공학사),  
 2006년~현재 동국대학교  
 전자공학과 석사과정  
 <주관심분야 : 밀리미터파 수동소  
 자 및 MMIC 설계>

윤진섭(정회원)  
 2001년 1월 대한전자공학회 논문지  
 제 38 권 SD편 제 1호 참조



이상진(정회원)  
 2003년 중부대학교 정보통신학과  
 (공학사),  
 2005년 동국대학교 전자공학과  
 (공학석사),  
 2005년~현재 동국대학교  
 전자공학과 박사과정  
 <주관심분야 : 밀리미터파 수동소자 및 MMIC  
 설계>



이진구(평생회원)  
 1969년 국립항공대학교  
 전자공학과 (공학사),  
 1975년 서울대학교 전자공학과  
 (공학석사),  
 1982년 Oregon State Univ.  
 전기공학과 (공학박사),  
 1985년 Cray Research Scientist,  
 1985년 Microwave Semiconductors, USA,  
 Senior Engineer,  
 1995년~현재 한국 전자파학회 이사,  
 2005년 대한전자공학회 회장  
 1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수  
 1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장  
 <주관심분야 : MMIC설계, 소자 모델링>