

접힌 스텝 임피던스 공진기를 이용한 CPW 대역 통과 여파기

정희원 이진택*, 이창언*, 신철재*

Coplanar Waveguide Bandpass Filter Using the Folded-line Stepped-Impedance Resonator

Jin-Taek Lee*, Chang-On Lee*, Chull-Chai Shin* *Regular members*

요약

본 논문에서는 접힌 스텝 임피던스 공진기(SIR)를 사용한 CPW 대역통과 여파기를 제안하였다. 한쪽 끝이 접지된 접힌 스텝 임피던스 공진기의 길이는 coplanar waveguide의 동일 평면상 접지면을 이용하면 $\lambda/8$ 까지 줄일 수 있다. 이것은 일반적인 $\lambda/4$ 스텝 임피던스 공진기를 사용한 대역 통과 여파기와 비교하여 크기를 거의 반으로 줄일 수 있다. 본 논문에서는 제안된 여파기의 등가회로를 유도하고 이를 이용하여 중심주파수 $f_0=5\text{GHz}$ 이고 대역 폭이 3%인 대역통과 여파기를 설계 및 제작하였다. 제작된 4 폴 대역통과 여파기에 대한 측정치가 IE3D의 시뮬레이션 결과 및 등가회로로 계산된 결과와 잘 일치하였다. 제작된 대역통과 여파기는 하모닉 주파수가 $2.5f_0$ 에서 발생하는 좋은 스푸리어스 특성을 가진다. 제안된 접힌 스텝 임피던스 공진기를 이용한 대역 통과 여파기는 MMIC 및 고온 초전도체 여파기 등에 응용될 수 있다.

ABSTRACT

The coplanar waveguide bandpass filter using folded-line stepped-impedance resonators(SIRs) is proposed. The folded-line SIR has about $\lambda/8$ length using the short-circuited end on coplanar waveguide. It make that the bandpass filter has the half size in comparison with general $\lambda/4$ SIR filter. In this paper, we derive the equivalent circuit and design the bandpass filter by using that. We design and fabricate the bandpass filter which has 5 GHz center frequency and 3 % fractional bandwidth. The measurement results for 4-pole folded SIR bandpass filter agreed well with full-wave simulation and equivalent circuit results. The fabricated bandpass filter has a good spurious characteristic, which the harmonic frequency appeared at $2.5f_0$. The proposed folded-line SIR bandpass filter are applicable for MMIC and High-Tc superconducting filters. bandwidth.

Keyword : folded-line SIR, bandpass filter, coplanar waveguide, compact size

I. 서론

대역 통과 여파기는 마이크로웨이브 통신 시스템에서 필수적인 부품이다. 이 여파기는 일반적으로 RF 시스템 종단이나 증폭기, 혼합기 등에 사용된다. 최근 무선 통신과 이동 통신의 급격한 성장은 부품

의 크기, 성능에 있어서 새로운 기술에 대한 요구를 빠르게 증가시키고 있다. 여파기 구조에 있어서 크기는 매우 중요한 문제이며 크기를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 coplanar waveguide에 제작된 대역통과 여파기는 접지면과 신호선의 대칭성을 고려하여 설계하기 때문에 입력 포트에서 출력 포트에 향하는 길이가 폭에 비해

* 이주대학교 전자공학부

논문번호 : #030094-0312, 접수일자 : 2003년 3월 12일

상당히 긴 단점이 있다.^[1-5] 그러나 coplanar waveguide는 동일 평면상에 접지면을 가지고 있어 비아홀이 필요 없이 소형의 $\lambda/4$ 공진기를 쉽게 제작할 수 있으며, 이러한 장점은 MMIC 공정에 쉽게 적용할 수 있다. 그러므로 $\lambda/4$ 스텝 임피던스 공진기는 coplanar waveguide에 쉽게 제작될 뿐만 아니라 소형의 장점이 있어 많이 연구되어지고 있다.^[6-9]

본 논문에서는 공진기의 길이를 줄일 수 있으며 제작상의 편이성도 고려하여 coplanar waveguide 상에서 공진기의 한쪽 끝이 접지된 접힌 스텝 임피던스 공진기를 사용하였다. 공진기의 한쪽 끝이 접지된 접힌 스텝 임피던스 공진기를 사용하면, 약간의 폭의 증가에 비하여 공진기의 길이는 거의 $\lambda/8$ 까지 줄일 수 있다. 공진기의 소형화는 대역 통과 여파기를 일반적인 $\lambda/4$ 스텝 임피던스 공진기를 사용한 여파기에 비하여 거의 반의 크기로 줄일 수 있다. 또한 접힌 스텝 임피던스 공진기를 사용하면, 하모닉 주파수가 약 $2.5f_0$ 에서 발생하는 좋은 스푸리어스 특성을 가진다.

본 논문에서는 중심주파수가 5 GHz 이고 대역폭이 3%인 4폴 대역통과 여파기를 등가회로 및 MoM에 바탕을 둔 EM 시뮬레이터인 IE3D를 사용하여 설계하였다. 여파기 설계시 입력 및 출력포트와의 결합 및 공진기간의 결합을 케페시티브 Π 회로 및 인덕티브 T 회로 형태로 등가화시키고 등가화된 모델을 J 및 K 인버터로 변화시켜 여파기의 등가회로를 구현하고 주파수 특성을 계산 하였다. J 및 K 인버터의 J/Y_0 및 K/Z_0 값을 EM 시뮬레이터를 사용하여 계산된 $[Y]$ 및 $[Z]$ 파라미터를 이용하여 개방 갭의 간격 및 접지된 스텝 폭의 변화에 따라서 추출하였다. 추출된 파라미터 값을 이용하여 여파기 특성에 맞도록 개방 갭의 간격 및 접지된 스텝의 폭을 구하고 이에 기초하여 여파기를 설계하였다. 그리고 등가회로를 이용하여 설계된 여파기의 계산결과와 MoM에 바탕을 둔 시뮬레이터인 IE3D를 이용한 계산 결과를 측정 결과와 비교함으로써 제안된 여파기의 타당성을 검증하였다.

접힌 스텝 임피던스 공진기를 사용한 CPW 대역 통과 여파기는 MMIC 와 고온 초전도체에 응용된다면 소형의 장점과 좋은 주파수 특성을 갖는 여파기로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 접지된 접힌 스텝 임피던스 공진기

그림 1은 한쪽 끝이 접지된 스텝 임피던스 공진기

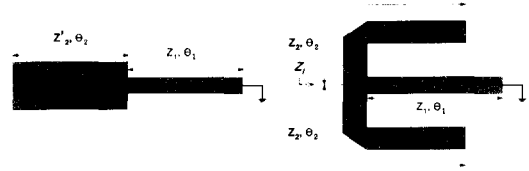


그림 1. 접지된 스텝 임피던스 공진기
(a) 일반적인 스텝 임피던스 공진기
(b) 접힌 스텝 임피던스 공진기

Fig. 1. Short-circuited stepped-impedance resonator(SIR)
(a) General SIR (b) Folded-line SIR

를 나타낸다. 그림 1.(b)의 접힌 스텝 임피던스 공진기는 그림 1(a)의 일반적인 스텝 임피던스 공진기의 확장된 개념으로 고려 될 수 있다. 즉 일반적인 스텝 임피던스의 케페시티브 부분을 임피던스가 $Z'_2=2Z_2$ 이고 길이가 동일한 두 선로로 분리할 수 있다. 그리고 공진기의 소형화를 위해 분리된 두 선로를 그림 1. (b) 처럼 접었다. 이때 접어진 공진기의 한쪽 끝이 접지 된다면, 폭이 약간 늘어나더라도 길이를 거의 $\lambda/8$ 까지 줄일 수 있게 된다. 그림 1(b)에서 접힌 스텝 임피던스 공진기에 대한 Z_i 는 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_i = j \frac{2Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2 - Z_2}{2 \tan \theta_2} \quad (1)$$

이때 공진은 $Z_i=0$ 일 때 발생하게 된다. 그러므로 접힌 스텝 임피던스 공진기의 공진 조건은 식(2)와 같이 된다.

$$\frac{Z_2}{2Z_1} = \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2 \quad (2)$$

식 (2)에서 $\theta = \theta_1 = \theta_2$ 로 모든 길이가 동일하다고 가정하면 식 (2)은 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{Z_2/2Z_1} \quad (3)$$

또한, $Z_2=2Z_1$ 로 두 부분으로 분리될때의 조건을 적용하면 공진기의 길이는 $\theta = \theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ 로 나타내어진다. 공진기의 길이는 Z_2/Z_1 가 작아질수록 짧아지게 된다. 그리고 접어진 선로와 중앙선로의 커플링 효과로 인하여 공진기의 길이에 영향을 미치며 이것은 EM 시뮬레이션을 통하여 고려될 수 있다.

III. 대역 통과 여파기 설계

그림 2는 접힌 스텝 임피던스 공진기를 이용한 4 폴 대역통과 여파기를 나타낸다. 여파기는 두께 $h=0.635$ mm 이고 비유전율 $\epsilon_r=10.2$ 인 기판에 coplanar waveguide 형태로 설계하였다.

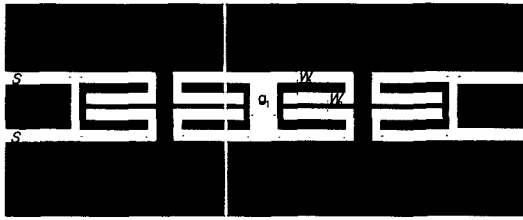


그림 2. 접힌 스텝임피던스 공진기를 사용한 4 폴 CPW 대역 통과 여파기 구조
Fig 2. Structure of 4-pole coplanar waveguide bandpass filter using folded-line SIR

그림 2에서 입력과 출력에 특성임피던스 50Ω 을 적용하기 위해 신호선 폭은 1.4 mm 이고 접지면과 접지면의 사이는 2.2 mm로 하였다. 입력과 출력은 개방된 갭을 이용하여 커플링 시켰다. 그리고 첫 번째와 두 번째 공진기는 접지된 인덕티브 스텝의 폭에 의해서 커플링이 좌우되며, 두 번째와 세 번째 공진기는 개방된 캐패시티브 갭의 간격에 의해서 조절된다.

그림 3(a)는 제안된 4 폴 대역통과 여파기의 등가회로이며, 구조의 대칭성을 고려하여 반쪽 부분만을 나타내었다. 그림에서 보듯이 개방된 갭은 Π 형태의 캐패시티브 성분으로 나타낼 수 있으며, 접지된 스텝은 T 형태의 인덕티브 성분으로써 나타낼 수 있다.^[6-8]

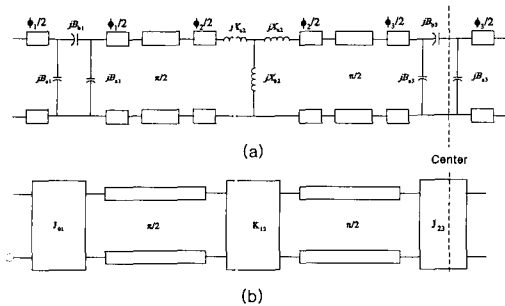


그림 3. (a) 4 폴 대역 통과 여파기의 등가회로
(b) J, K 인버터를 갖는 등가회로
Fig 3. (a) Equivalent circuit of the 4-pole bandpass filter
(b) Equivalent circuit with J, K inverter

또한, 그림 3 (b)는 기존의 여파기 synthesis 방법으로 설계하기 위하여 J와 K인버터를 갖는 등가 회로로 나타낸 것이며, 여기서 공진기는 $\lambda/2$ 전송선로로써 표현하였다.

그림 4 (a)는 대역통과 여파기에서 입·출력 포트에서의 커플링과 두 번째와 세 번째 공진기간의 커플링을 좌우하는 개방된 갭을 나타낸다. 전송선로의 폭은 개방된 갭의 종단에 해당되는 공진기의 접히는 부분의 폭으로 하였다. 그림 4 (b)는 개방된 갭에 대한 등가회로이며 앞의 여파기 등가회로에서 보듯이 Π 형태의 캐패시티브 성분으로 구성되어 있다. 등가회로의 B_a, B_b 는 EM 시뮬레이터에 의해 계산된 [Y] 파라미터를 이용하여 구할 수 있다. 순수한 개방된 갭에 대한 값만을 추출하기 위하여 기준선을 개방 갭의 종단인 A와 B로 놓고 전체 회로에 대한 값에서 양쪽의 coplanar waveguide 전송선로에 대한 값을 빼고 계산하였다. 이렇게 구해진 B_a, B_b 를 이용하여 여파기 구현을 위한 J 인버터의 $J/Y, \phi$ 값을 구할 수 있다.^[10] 그림 4(c)는 개방된 갭의 간격에 대한 $J/Y, \phi$ 값을 나타낸다.

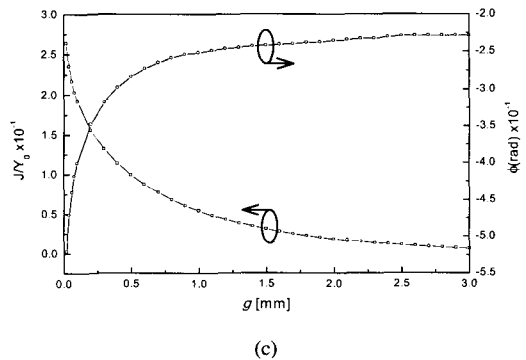
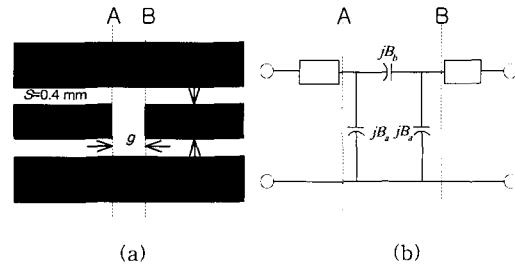


그림 4. (a) 개방된 갭 (b) 등가 회로
(c) 갭 간격에 따른 $J/Y, \phi$ 변화값
Fig. 4. (a) open gap (b) Equivalent circuit
(c) Variation of J/Y and ϕ versus the gap width.

그림 5(a)는 여파기에서 첫 번째와 두 번째의 공진기의 커플링을 좌우하는 접지된 스텝브를 나타낸다. 그림 5(b)는 접지된 스텝브에 대한 등가회로이며, T 형태의 인덕턴스 성분으로써 구성되어 있다. 등가회로의 X_a , X_b 값은 J 인버터와 동일한 방법으로 EM 시뮬레이터에 계산된 [Z] 파라미터를 이용하여 구할 수 있다. 여기에서도 순수한 접지된 스텝브에 대한 값을 추출하기 위하여 기준선을 스텝브 종단에 A와 B로 놓고 전체 회로에 대한 값에서 양쪽의 coplanar waveguide 전송선로에 대한 값을 빼고 계산하였다. 이렇게 구해진 X_a , X_b 를 이용하여 여파기 구현을 위한 K 인버터의 K/Z, θ 를 구할 수 있다.[10] 그림 5(c)는 접지된 스텝브의 폭에 대한 K/Z, θ 값을 나타낸다.

본 논문에서는 접힌 스텝 임피던스 공진기를 이용하여 중심주파수 $f_0=5\text{GHz}$ 이고 대역폭이 3%인 대역 통과 여파기를 설계하였다. 4폴 Chebyshev 형태의 대역 통과 여파기를 구현하기 위한 값은 J와 K 인버터의 값은 $J_{01}/Y=J_{45}/Y=0.18$, $K_{12}/Z=K_{34}/Z=0.028$, $J_{23}/Y=0.02$ 이다. 위의 해당되는 값을 그림 4와 그림 5를 이용하여 개방된 갭의 간격과 접지된 스텝브의

폭을 구할 수 있다. 또한 공진기의 길이는 식 (4)로부터 구할 수 있다.[10]

$$l_i = \frac{\lambda_g}{2\pi} \theta_i, \quad \theta_i = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}(\phi_i + \phi_{i+1}) \quad (4)$$

여기서 l_i 는 일반적인 스텝 임피던스 공진기의 길이이며, 접힌 스텝 임피던스 공진기의 길이는 l_i 의 반으로 계산할 수 있다. 위의 식에서 θ_i 는 그림 4와 그림 5에서 여파기 특성을 위해 구해진 갭의 간격과 스텝브의 폭에 해당되는 값이다.

앞에서 구해진 여파기 변수를 정리하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1. 4폴 대역통과 여파기의 설계 변수

표 1. Design parameter of 4-pole bandpass filter

	[mm]				
w	1.4	s	0.4	d_1	0.7
w_1	0.5	g_0	0.1	$l_1=l_4$	2.75
w_2	0.5	g_1	2.5	$l_2=l_3$	2.95

IV. 대역 통과 여파기 제작 및 측정

앞에서 설계된 4폴 대역통과 여파기를 포토리토그라피 과정을 거치고 에칭을 이용하여 제작하였으며 필터의 전체 크기는 접지면을 포함하여 $12 \times 25 \text{ mm}^2$ 이다. 그림 6은 제작된 4폴 대역통과 여파기의 사진이다.

제작된 여파기는 HP 8510C vector network analyzer를 이용하여 측정 하였다. 그림 7(a)는 통과 대역 근처에서 대역통과 여파기의 주파수 응답 특성을 나타낸다. 실선은 등가회로로 구성된 여파기에 대한 계산결과로써 손실을 고려하지 않은 조건하의 결과이며, 사선은 MoM에 바탕을 둔 시뮬레이션인

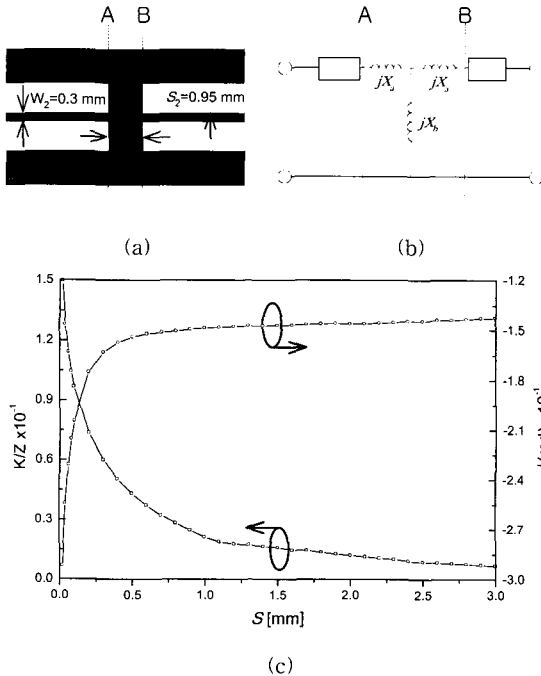


그림 5. (a) 접지된 스텝브 (b) 등가회로

(c) 스텝브 폭에 따른 K/Z, θ 변화값

Fig. 5. (a) Shorted stub (b) Equivalent circuit

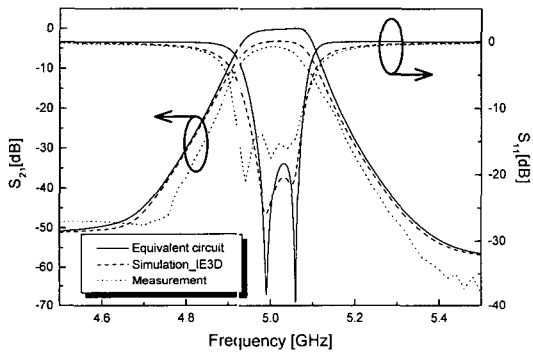
(c) Variation of K/Z and θ versus the stub width



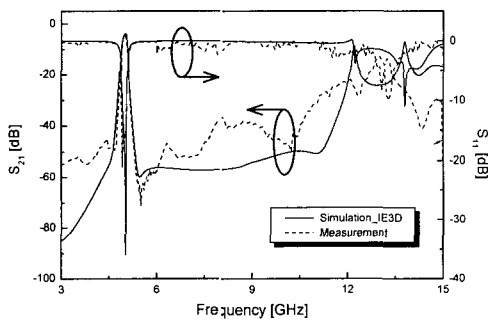
그림 6. 제작된 4폴 대역통과 여파기의 사진

Fig. 6. Photograph of the fabricated 4-pole bandpass filter.

IE3D를 이용 도체를 그리로 가정하여 손실을 고려한 상태의 결과로써 등가회로의 결과와 비교하여 통과대역에서 삽입손실이 약 3dB의 차이를 보였다. 점선은 대역통과 여파기를 제작하여 측정된 실험결과로써 손실을 고려하여 IE3D로 시뮬레이션한 결과와 유사함을 알 수 있다. 그림 7(b)는 동일한 여파기에 대해서 광대역에 걸친 여파기의 주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 보듯이 전체적으로 시뮬레이션 결과가 측정 결과에 비하여 저지대역에서의 반사 손실이 높으나 전체적인 특성은 유사하게 나타남을 알 수 있다. 반사손실의 차이는 SMA 컨넥터에 대한 반사손실을 고려하지 않은 결과로 사료된다. 앞에서 언급한 바와 같이 하모닉 주파수도 $2.5f_0$ 에서 발생하는 좋은 스푸리어스 특성을 가짐을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 7. 대역통과 여파기의 주파수 응답 특성
 (a) 통과 대역 특성 (b) 광대역 특성
 Fig 7. Frequency response of the bandpass filter
 (a) Passband characteristic
 (b) Wideband characteristic

V. 결 론

본 논문에서는 접힌 스텝 임피던스 공진기를 이용한 coplanar waveguide 대역통과 여파기를 설계 제작하였다. 제안된 대역통과 여파기는 기존의 CPW $\lambda/4$ 스텝 임피던스 공진기를 사용한 여파기보다 크기를 거의 반으로 줄일 수 있는 장점을 가졌다. 또한 하모닉 주파수가 기본 주파수의 2.5배에 해당되는 주파수에서 발생하는 좋은 스푸리어스 특성을 가졌다. 중심 주파수 $f_0=5$ GHz, 대역폭이 3%이고 chebyshev 특성을 갖는 4폴 대역통과 여파기를 제작하였으며 측정된 결과와 계산된 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 이 제안된 접힌 스텝 임피던스 공진기를 이용한 대역통과 여파기는 MMIC나 고온 초전도에 응용되면 소형의 장점과 좋은 주파수 응답 특성을 갖을 것으로 기대 된다.

참 고 문 헌

- [1] M. L. Her and C. M. Chang, "Analysis of slot loaded end-coupled resonator CPW bandpass filters," *Asia-Pacific Microwave conference Proc.*, vol. 1, pp. 326-329, Dec. 2001.
- [2] F. L. Lin and R. B. Wu, "Comparative performance of three different CPW bandpass filters," *IEEE MTT-S Int. Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 813-816, June 1997.
- [3] F. L. Lin, C. W. Chiu, and R. B. Wu, "Coplanar waveguide bandpass filter- A ribbon-of-brick-wall design," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, No. 7 pp. 1589-1596, July 1995.
- [4] T. M. Weller, "Edge-coupled coplanar waveguide bandpass filter design," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, No. 12, pp. 2453-2458, Dec. 1995.
- [5] X. Wu, I. Awai, Z. Yan, K. Wada, and T. Moriyoshi, "Quality factors of coplanar waveguide resonators," *IEEE MTT-S Int. Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 670-673, June 1999.
- [6] Z. Ma, H. Susuki, and Y. Kobayashi, "A low-loss 5 GHz bandpass filter using HTS coplanar waveguide Quarter-wavelength reson-

