

論文2001-38TC-3-4

고온초전도 헤어핀 콤 여파기의 cascade 구조에 관한 연구 (Cascaded Structure of the High-Temperature Superconducting Hairpin-Comb Filter)

尹錫舜*, 朴熙燦*, 朴益模*, 閔丙喆**, 崔榮煥**, 文勝鉉**,
李昇敏**, 吳炳斗**

(Seok-Sun Yun, Hee-Chan Park, Ikmo Park, Byoung-Chul Min,
Young-Hwan Choi, Seung-Hyun Moon, Seung-Min Lee, and Byung-Du Oh)

요 약

여파기의 스킨트 특성을 향상시키기 위해서 동일한 주파수 특성을 지닌 독립적인 고온초전도 헤어핀 콤 여파기를 효과적으로 cascade하는 방법을 제시하였다. Cascade 여파기는 공진기들을 마름모 형태로 배열한 구조로서 공진기 사이의 교차 결합을 최소화 할 수 있고 한정된 원형의 웨이퍼에 좋은 스킨트 특성을 얻고자 할 때 효과적으로 쓰일 수 있다. 시뮬레이션 결과에 의하면 18 폴 cascade 여파기의 스킨트 특성은 통과 대역 아래쪽과 위쪽에서 40dB/MHz 이상 감소하였다.

Abstract

To improve the skirt characteristic of the high-temperature superconducting filter, we proposed a structure of cascading two independent hairpin-comb filters with an identical frequency response. Resonators of the cascaded filter are arranged in the shape of a diamond so that it minimizes the cross coupling between the resonators. This structure can be used effectively to improve the skirt characteristic of the filter in limited area of a circular wafer. The simulated skirt characteristic of the 18 pole cascaded filter is more than 40dB/MHz attenuation below and above the passband.

I. 서 론

정보 통신 분야의 눈부신 발전에 따라서 고도의 정보화 시대를 맞이하고 있으며 이와 더불어 개인 이동 통신의 수요가 급증하고 있다. 이에 따라서 한정된 주파수 대역의 효율적인 사용이 필요하게 되었고 이를 위해서 좋은 민감도(sensitivity)와 선택도(selectivity)를 지닌 협대역 통과 여파기의 개발이 절실히 요구되고 있다. 고온초전도 마이크로스트립 여파기는 기존의 마이

크로스트립 여파기나 공동(cavity) 여파기에 비해서 매우 낮은 삽입 손실, 가파른 스킨트(skirt) 특성, 저지 대역에서 강한 대역 외 반사 특성 등 우수한 특성을 지니고 있기 때문에 최근 협대역 통과 여파기로 사용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다^{[1]-[9]}.

Elliptic 여파기는 통과 대역 바로 옆에 생기는 전송 영점으로 인해서 좋은 스킨트 특성을 가지게 되며 따라서 Chebyshev 여파기나 Butterworth 여파기에 비하여 주변 다른 주파수 영역과의 간섭을 매우 효과적으로 배제할 수 있다. 그러나 elliptic 여파기는 신호를 전달하는 주된 상호 결합 이외에도 전송 영점을 발생시키는 교차 결합이 필요하다. N개의 공진기가 있을 경우 $N \times N$ 의 결합 행렬이 생기게 되고 공진기의 수가 많을 경우 원하는 여파기의 주파수 특성을 만족하는 교차 결합을 구현하기가 힘들다^{[5],[6],[10]-[13]}. Cascaded

* 正會員, 亞洲大學校 電子工學部
(School of Electronics Engineering Ajou University)

** 正會員, LG 종합기술원
(LG Corporate Institute of Technology)

接受日字: 2000年3月2日, 수정완료일: 2001年2月14日

Triplet(CT) 여파기^{[6],[10]}와 Cascaded Quadruplet(CQ) 여파기^{[6],[11]-[13]} 처럼 공진기 수가 적을 경우에는 필요한 교차 결합을 적절히 이용하여 여파기를 설계하는 것은 크게 어렵지 않다. 그러나 이 경우에도 공진기 수가 각각 3개와 4개이므로 스킵트 특성이 좋은 여파기를 설계하는 것은 한계가 있으며 스킵트 특성을 향상시키기 위해서는 CT 또는 CQ 쌍을 다단으로 연결해야 하며 이것들을 정합시키기가 어렵게 된다. 또한 elliptic 여파기는 통과 대역뿐만 아니라 저지 대역에서도 리플(ripple)이 존재하는데 스킵트 특성을 향상시키기 위해서 전송 영점을 통과 대역에 가깝게 할수록 저지 대역에서의 리플이 높아진다. 따라서 elliptic 여파기로 스킵트 특성과 저지 대역에서의 대역 외 반사 특성을 모두 좋게 하기란 수월하지 않다.

Chebyshev 여파기로 좋은 스킵트 특성을 얻기 위해서는 elliptic 여파기에 비해서 더 많은 공진기가 필요하다. 그러나 여파기를 설계하기가 간편하고 정합을 시키기가 수월하여 오히려 elliptic 여파기보다 많이 사용되고 있다. 실제로 직경이 75 mm인 원형의 웨이퍼에 일반적인 1/2 파장 개방 공진기를 이용한 Cellur 기지국용 19 폴(pole) 여파기를 제작하였으며^[1], 직경이 50mm인 원형의 웨이퍼에 PCS 기지국용 11 폴 헤어핀 콦(hairpin-comb) 여파기를 제작하였다^[2]. Chebyshev 여파기는 옆으로 평행하게 배열된 공진기 수에 비해서 가로 길이가 길어지는 반면에 세로 길이는 일정하기 때문에 가로 길이가 세로 길이에 비해서 긴 직사각형의 구조가 된다. 이러한 긴 직사각형의 구조는 고온초전도 박막이 증착되는 유전체가 직경 50mm와 75mm인 한정된 원형의 웨이퍼(wafer)이므로 공진기 수가 많은 여파기를 설계하기가 힘들어진다. 참고 문헌 [3], [4]에서는 공진기들 사이의 교차 결합을 줄여서 좁은 대역폭과 좋은 스킵트 특성을 지닌 여파기를 구현하고자 직경 50mm인 원형의 웨이퍼 안에 개방 원형 공진기들을 유전체의 가장 자리에 원형으로 배열한 후 유전체의 중심 부분에 구멍을 내고 금속봉을 박은 구조를 사용한 8 폴 여파기를 제작하였다. 그러나 이러한 구조로 여파기를 제작하기 위해서는 많은 공정을 필요로 하기 때문에 여파기의 제작이 힘들어진다.

본 논문에서는 여파기의 스킵트 특성을 향상시키고자 한정된 원형 웨이퍼에 많은 수의 공진기를 가진 여파기를 설계하는 방법에 대하여 연구하였다. 독립적인

헤어핀 콦 여파기^[7]을 설계하는 방법, 두 쌍의 헤어핀 콦 여파기를 배열하고 cascade하는 방법, 그리고 스킵트 특성의 향상을 위한 근접한 공진기 사이에 오프셋을 주는 방법에 대해서 각각 조사하였다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 앞에서 언급한 여파기들이 지닌 문제점을 해결하였고, cascade 부분에 일반적인 1/2 파장 개방 공진기를 이용한 17 폴 cascade 여파기와 CQ 형태의 여파기를 이용한 18 폴 cascade 여파기를 설계하였다.

II. 여파기 구조

본 논문에서는 직경 50mm인 원형의 웨이퍼 안에 최대한 좋은 스킵트 특성을 지닌 여파기를 설계하기 위해서 고온초전도 헤어핀 콦 여파기를 cascade 형태로 배열하였다. 일반적으로 여파기의 주파수 특성이 $H_1(f)$ 인 경우 동일한 여파기를 cascade하면 그 주파수 특성은 다음과 같다.

$$H(f) = |H_1(f)|^2 e^{j2\pi f\tau} \quad (1)$$

여기서 τ 는 첫 번째 여파기의 출력단에서 그 다음 여파기의 입력단까지 신호가 도달하는데 걸리는 지연 시간이다. 식 1에서 보면 $f\tau$ 가 정수이면 위상 부분은 0이 되며 로그(log) 축에서 여파기의 주파수 특성은 2 배로 증가된다.

그림 1은 본 논문에서 제안한 여파기의 구조로서 (a), (b), (c), 3부분으로 나눌 수 있다. 여파기의 위, 아래에 있는 공진기 배열 (a), (b)는 cascade 여파기를 구성하기 위한 두 개의 독립적인 여파기들이다. 이들 (a), (b)는 동일한 주파수 특성을 지니고 있으며 헤어핀 콦 여파기를 조금 변형시킨 구조이다. 독립적인 헤어핀 콦 여파기를 cascade할 때 여파기의 위, 아래에 있는 헤어핀 공진기의 배열은 헤어핀 공진기의 중간 부분이 마주 보고 있는 형태 또는 헤어핀 공진기의 개방 종단 부분이 마주 보고 있는 형태가 가능하다. 본 논문에서는 공진기 사이의 교차 결합을 줄이고 스킵트 특성을 향상시키기 위해서 위, 아래에 있는 각각의 공진기들이 개방 종단 부분을 마주 보고 있게 배열하였고 독립적인 헤어핀 콦 여파기를 구성하는 공진기들 사이에 약간의 오프셋을 주었다.

여파기를 구성하는 공진기 중에서 오른쪽 부분에 있

는 공진기 (c)는 각각의 독립적인 여파기 (a), (b)를 cascade하기 위해서 이용한 공진기이다. Cascade에 필요한 공진기의 배열에는 그림 1에 있는 일반적인 1/2 파장 개방 공진기외에 헤어핀 공진기 사이의 전기적 결합과 자기적 결합 등이 있다. 그림 1의 여파기 구조는 위, 아래로는 대칭적인 공진기 배열을 갖는 반면, 여파기 중심으로부터 좌, 우로 있는 공진기는 그 거리가 약간 비대칭이다. 이는 여파기의 오른쪽 부분에 있는 cascade를 위한 공진기의 영향에 기인한 것이다.

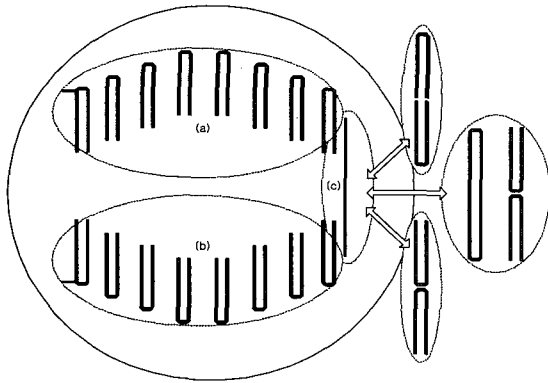


그림 1. 헤어핀 콤 여파기의 cascade 구조
Fig. 1. Cascaded structure of the hairpin-comb filter.

III. 결합 계수

본 논문에서는 헤어핀 콤 여파기를 cascade하기 위해서 헤어핀 공진기 사이의 결합 계수를 이용하였다. 이는 여파기를 구성하는 공진기의 구조와 그 배열이 점점 더 복잡할수록 등가 회로를 이용하여 여파기를 설계하는 것보다 공진기 사이의 결합 계수를 이용하여 여파기를 설계하는 것이 효과적이기 때문이다^[14]. 그림 2는 헤어핀 공진기 사이의 여러 가지 결합을 나타내고 있다. 일반적으로 헤어핀 공진기 사이의 결합에는 전기적 결합과 자기적 결합 그리고 이 두 가지가 혼합된 혼합 결합이 있다. 헤어핀 공진기의 전기적 결합은 공진기의 개방 중단 부분을 마주 보게 배열하였을 때 발생하는데 그 이유는 공진기가 공진시에 개방 중단 부분에서 전기장이 최대가 되기 때문이다. 또한 자기적 결합은 헤어핀 공진기의 중간 부분이 마주 보고 있는 형태로 공진시 공진기의 중간 부분에서 가장 강한 자기장을 형성하기 때문이다. 혼합 결합 2는 헤어핀 공진

기의 전기적 결합과 자기적 결합이 서로 혼합된 것으로서 이 두 가지 결합이 서로 상쇄되는 형태이며, 혼합 결합 1은 전기적 결합과 자기적 결합이 서로 중첩되는 형태이다^{[11], [12]}.

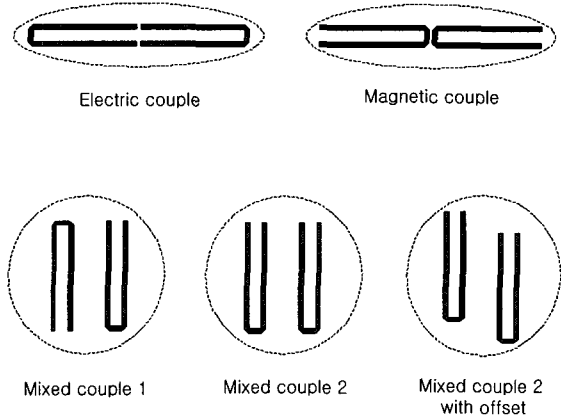


그림 2. 헤어핀 공진기 사이의 결합
Fig. 2. The couple between the hairpin resonators.

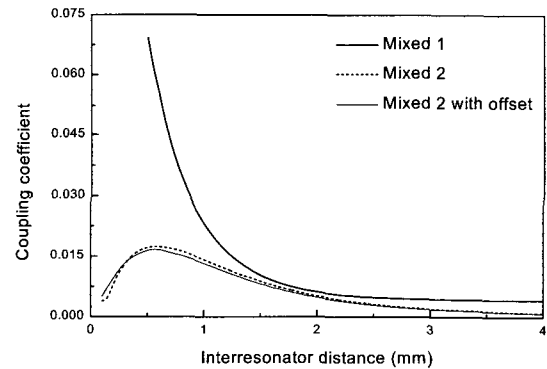


그림 3. 혼합 결합에 대한 결합 계수
Fig. 3. The coupling coefficient of the mixed couple.

그림 3은 참고 문헌 [14]의 방법과 같이 시뮬레이션 (simulation)을 통해서 구한 헤어핀 공진기 사이의 혼합 결합에 대한 결합 계수이다. 이 시뮬레이션에서 사용한 기판의 비유전율은 23.7이었고, 기판의 두께는 0.5mm 이며, 마이크로스트립을 구성하는 금속은 초전도 박막으로 하였다. 그림 3에서 보듯이 공진기 사이의 거리가 동일할 때 혼합 결합 1의 결합 계수는 혼합 결합 2의 값보다 더 큰 값을 가진다. 이는 두 가지 혼합 결합이 동일한 결합 계수를 가졌을 경우 혼합 결합 1이 혼합 결합 2에 비해서 공진기 사이가 더 넓어야 하

는 것을 의미한다. 협대역 여파기를 설계하기 위해서는 공진기 사이의 결합이 작아야 하는데 혼합 결합 2를 이용한 헤어핀 콤 여파기는 혼합 결합 1을 이용한 헤어핀 라인(hairpin-line) 여파기에 비해서 혼합 결합 2가 지닌 작은 결합 계수 때문에 협대역 여파기를 설계하기가 용이하다.

그림 4는 앞에서와 동일한 방법으로 구한 헤어핀 공진기 사이의 전기적 결합과 자기적 결합의 결합 계수이다. 이러한 결합 계수 값은 elliptic 여파기와 같이 여러 가지 교차 결합이 필요한 경우 이용할 수 있다.

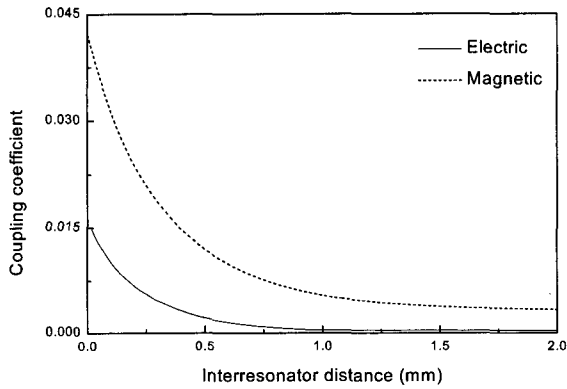


그림 4. 전기적 결합과 자기적 결합에 대한 결합 계수
Fig. 4. The coupling coefficient of the electric couple and magnetic couple.

IV. 여파기 설계와 결과

대역 통과 여파기는 여파기의 중심 주파수, 대역폭, 저지 대역에서의 대역 외 반사 특성, 통과 대역에서의 삽입 손실 등을 고려해서 저역 통과 여파기의 원형(prototype)을 결정하고 그것을 주파수 변환해서 설계한다^[15].

일반적으로 여파기의 스킨트 특성은 가장 근접한 공진기 외에 다른 공진기 사이의 결합인 교차 결합이 줄어들어 따라서 좋아진다^{[3],[4],[6]}. 공진기 사이의 교차 결합이 크면 신호는 공진기 사이의 교차 결합을 통해서 짧은 거리로 전파할 수 있다. 따라서 통과 대역에서의 신호가 아닌 통과 대역 외의 신호가 전파하게 되고 저지 대역의 신호는 충분히 감쇄하지 않게 되며 이러한 현상으로 인해서 스킨트 특성과 저지 대역에서의 대역 외 반사 특성이 나빠지게 된다. 그러므로 교차 결합을

줄이기 위한 노력은 스킨트 특성을 더 좋게 하기 위한 필수 조건이라 할 수 있다. 본 논문에서는 공진기 사이의 교차 결합을 최소화하여 스킨트 특성을 향상시키기 위해서 다음과 같은 방법으로 여파기를 설계하였다. 우선 3장에서 구한 혼합 결합 2의 결합 계수를 이용하여 cascade 여파기에서 위쪽과 아래쪽에 배열되는 독립적인 헤어핀 콤 여파기를 초기 설계하였다. 3장의 그림 3에서 보면 혼합 결합 2에 오프셋을 준 배열이나 오프셋을 주지 않은 배열의 결합 계수가 거의 같은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 공진기 사이에 약간의 오프셋을 주면 여파기의 반사 손실 특성에는 거의 변함이 없는 반면, 공진기들 사이의 결합이 줄어서 스킨트 특성을 좋게 할 수 있기 때문에 여파기를 설계할 때 스킨트 특성을 향상시키고자 하는 경우 효과적으로 이용할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 앞에서 설계된 독립적인 헤어핀 콤 여파기를 구성하는 가장 근접한 공진기 사이에 오프셋을 준 공진기 배열을 이용하였다. 이렇게 설계된 두 개의 독립적인 헤어핀 콤 여파기를 배열할 경우에도 위, 아래에 있는 공진기들 사이의 교차 결합을 고려해야 한다. 공진기들이 아주 멀리 떨어진 경우 헤어핀 공진기 사이의 전기적 결합이나 자기적 결합은 거의 무시할 수 있을 정도로 작은 값이지만, 공진기가 여러 개 배열된 본 논문의 여파기 구조에서는 무시할 수 없을 정도의 값이 된다. 본 논문에서는 두 개의 동일한 헤어핀 콤 여파기를 헤어핀 공진기의 개방 종단 부분이 마주 보도록 배열하였는데 이러한 이유는 3장의 그림 4에서 보듯이 헤어핀 공진기의 전기적 결합이 자기적 결합보다 작아서 교차 결합을 줄일 수 있고 스킨트 특성을 향상시킬 수 때문이다.

헤어핀 콤 여파기를 cascade하기 위해서 본 논문에서는 일반적인 1/2 파장 개방 공진기와 CQ 형태의 여파기를 이용하였다. 여기서 주위 해야 할 사항은 독립적인 여파기를 cascade할 경우 두 개의 독립적인 여파기를 cascade하기 위해서 사용된 공진기의 영향으로 인하여 달라지는 여파기의 주파수 특성이다. 따라서 cascade를 위해서 사용된 공진기가 미치는 결합을 고려해야 하고, 이러한 이유로 독립적인 헤어핀 콤 여파기의 오른쪽 부분에 있는 공진기 사이의 거리는 이론적으로 계산된 거리보다 조금씩 떨어져야 한다. 또한 직접 결합(direct-couple)을 이용해서 신호를 인가하는 경우에 비해서 결합이 약해지기 때문에 cascade를 위한 공진기와 그 앞쪽에 있는 공진기, 즉 독립적인 헤어

핀 콤 여파기의 마지막 공진기, 사이의 거리는 여파기의 급전선 쪽에 있는 첫 번째 공진기와 그 다음 공진기 사이의 거리에 비해서 가까워져야 한다. 즉 사이 결합(gap-couple)을 이용해서 신호를 인가할 경우와 비슷하게 cascade를 위한 공진기와 그 바로 앞에 있는 공진기 사이의 거리는 다른 공진기 사이의 거리보다 짧아지게 된다. 실제로 여파기의 반사 손실 특성은 이들 cascade 부분에 있는 공진기 사이의 거리에 영향을 많이 받는데 이는 cascade 부분이 첫 번째 단자 쪽의 신호를 두 번째 단자 쪽으로 전달하는데 중요한 역할을 하기 때문이다.

본 논문에서는 효율적인 공간 사용이나 전력 용량, 공진기의 Q 등을 고려하여 헤어핀 공진기를 설계하였는데 헤어핀 공진기를 이루는 라인(line)의 폭은 0.3mm 이었고, 헤어핀 공진기를 이루는 평행한 라인의 간격은 1.3mm 이었다. 비유전율이 23.7 이고 두께가 0.5mm인 직경 50mm의 유전체(LaAlO₃) 안에 두 개의 독립적인 헤어핀 콤 여파기를 cascade 하기 위해서 CQ 형태의 여파기를 이용한 경우 18개, 일반적인 1/2 파장 개방 공진기를 이용한 경우 17개의 공진기를 사용하였고 중심 주파수가 1.773GHz, 통과 대역이 8 MHz인 여파기를 초기 설계하였다. 고온초전도 여파기를 설계할 경우, 일반 도체를 이용한 마이크로스트립 여파기와는 다르게 고온초전도 박막의 매우 낮은 표면 저항, kinetic inductance 등을 고려해야 한다^{[8],[9]}. 따라서 본 논문에서는 초기 설계된 여파기들을 최적화하기 위해서 고온초전도 여파기의 종합적인 전자기파 현상을 고려할 수 있는 모멘트 법(method of moments)에 근거한 fullwave 시뮬레이터인 IE3D를 사용하였다.

그림 5는 CQ 형태의 여파기를 이용한 18 폴 cascade 여파기의 주파수 특성으로서 시뮬레이션 결과이다. Cascade 여파기의 주파수 특성에서 가장 특이한 점은 통과 대역의 위쪽에 전송 영점이 생긴 것이다. 여파기의 주파수 특성에서 전송 영점이 생기는 이유는 여파기 구조의 어느 부분에서 교차 결합이 존재하기 때문이다. 즉 여파기의 주된 주파수 특성을 결정하는 공진기 배열의 위상 곡선과 동일한 위상 곡선을 지닌 공진기 배열이 있어서 교차 결합이 생기게 되면 이 공진기 배열은 주된 공진기 배열에 양의 결합을 일으켜서 통과 대역의 위쪽에 전송 영점을 발생시킨다^{[5],[6],[10]-[13]}. 또한 주된 공진기 배열의 위상 곡선과 반대의 위상 곡선을 지닌 공진기의 배열에 의한 교차 결합은

음의 결합을 일으켜서 통과 대역의 아래쪽에 전송 영점을 발생시킨다^{[5],[6],[10]-[13]}. 본 논문에서 제안한 여파기의 주파수 특성을 보면 여파기의 위쪽과 아래쪽에 마주 보고 있는 공진기들 사이의 전기적 결합으로 인해서 교차 결합이 생기기 때문에 통과 대역의 위쪽에 전송 영점이 생기는 것을 알 수 있다. 실제로 멀리 떨어진 두 개의 공진기 사이의 전기적 결합은 매우 작지만 18 폴 cascade 여파기는 여러 개의 공진기가 합쳐진 형태이기 때문에 전송 영점이 나타나게 된다.

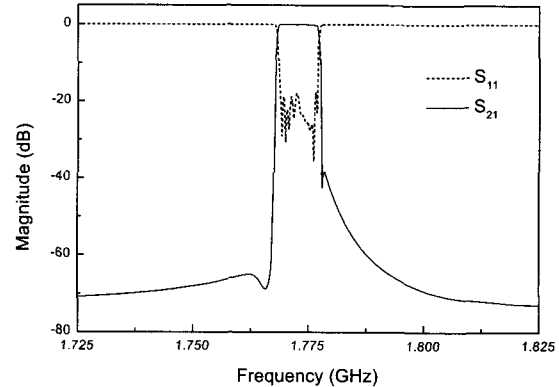


그림 5. 18 폴 cascade 여파기의 주파수 특성
Fig. 5. The frequency characteristics of the 18 pole cascade filter.

18 폴 cascade 여파기의 중심 주파수는 1.773GHz 이었고 대역폭은 8MHz 이었다. 통과 대역에서 최소 삽입 손실은 0.01dB 정도로 나타났으며 평균 리플은 0.1dB 정도였다. 또한 약 20dB 정도의 반사 손실 특성을 지니고 있었으며 정합이 잘 되었음을 알 수 있었다. 가장 중요하게 고려한 여파기의 스키트 특성은 통과 대역 아래쪽과 위쪽에서 약 45dB/MHz, 41dB/MHz 정도로 가파르게 감소하고 있었다. 17폴 cascade 여파기의 스키트 특성은 통과 대역 아래쪽과 위쪽에서 약 41dB/MHz, 약 38dB/MHz 정도로 감소하는 것을 알 수 있었고 그 외의 주파수 특성은 18 폴 cascade 여파기와 거의 같았다.

V. 결 론

본 논문에서는 외부 신호의 간섭을 최소화하기 위해서 여파기의 스키트 특성을 향상시키는 방법에 대해서 연구하였다. 동일한 주파수 특성을 지닌 독립적인 여파

기를 적절히 cascade할 경우 거의 2 배로 향상된 스킨트 특성을 얻을 수 있는데 본 논문에서는 독립적인 헤어핀 콤 여파기를 공진기 사이의 결합을 이용하여 cascade하는 방법을 제시하였다. Cascade 여파기는 한정된 원형의 웨이퍼에 많은 수의 공진기들을 마름모 형태 배열함으로써 공진기 사이의 교차 결합을 최소화할 수 있었고, 공진기 수의 증가로 인해서 좋은 스킨트 특성을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] D. Zhang, G.-C. Liang, C. F. Shih, Z. H. Lu, and M. E. Johansson, "A 19-pole cellular band-pass filter using 75-mm-diameter high-temperature superconducting thin films," *IEEE Microwave and Guided-wave Letters*, vol. 20, pp. 405-407, Nov. 1995.
- [2] H. T. Kim, B.-C. Min, Y. H. Choi, S.-H. Moon, S.-M. Lee, B. Oh, J.-T. Lee, I. Park, and C.-C. Shin, "A compact narrowband HTS microstrip filter for PCS applications," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 9, pp. 3909-3912, June 1999.
- [3] G. Tsuzuki, M. Suzuki, N. Sakakibara, and Y. Ueno, "Narrow-band 2GHz superconducting filter," in *1998 Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 1509-1512.
- [4] G. Tsuzuki, M. Suzuki, N. Sakakibara, and Y. Ueno, "Novel superconducting ring filter," in *1998 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 1, pp. 379-382.
- [5] J.-F. Liang, C.-F. Shih, Q. Huang, D. Zhang, and G.-C. Liang, "HTS microstrip filters multiple symmetric and asymmetric prescribed transmission zeros," in *1999 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 4, pp. 1551-1554.
- [6] J.-S. Hong, M. J. Lancaster, J.-C. Mage, "Cross-coupled HTS microstrip open-loop resonator filter on LAO substrate," in *1999 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 4, pp. 1559-1562.
- [7] G. L. Matthaei, N. O. Fenzi, R. J. Forse, and S. M. Rohlfing, "Hairpin-comb filters for HTS and other narrow-band applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, pp. 1226-1231, Aug. 1997.
- [8] G. L. Matthaei and G. L. Hey-Shipton, "Concerning the use of high-temperature superconductivity in planar microwave filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 1287-1994, July 1994.
- [9] M. J. Lancaster, *Passive Microwave Device Applications of High-Temperature Superconductors*. Cambridge University Press, 1997.
- [10] C.-C. Yang and C.-Y. Chang, "Microstrip cascade trisection filter," *IEEE Microwave and Guided-wave Letters*, vol. 9, pp. 271-273, July 1999.
- [11] J. S. Hong and M. J. Lancaster, "Cross-coupled microstrip hairpin-resonator filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, pp. 118-122, Jan. 1998.
- [12] J.-S. Hong and M. J. Lancaster, "Couplings of microstrip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, pp. 2099-2109, Dec. 1996.
- [13] R. Levy, "Direct synthesis of cascaded quadruplet (CQ) filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, pp. 2940-2945, Dec. 1995.
- [14] P. Pramnack, "Compact 900-MHz hairpin-line filters using high dielectric constant microstrip line," *Int. J. of Microwave and Millimeter-wave Comp.-Aided Eng.*, vol. 4, pp. 272-281, 1994.
- [15] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. Norwood, MA: Artech House, 1980.

저 자 소 개

尹錫舜(正會員) 第36卷 D編 第12號 參照
현재 삼성전자 무선사업부 연구원



朴熙燦(學生會員)
1999년 2월 아주대학교 전자공학부
학사. 2001년 1월~현재 아주대학
교 전자공학부 석사과정. 관심분야
: 마이크로스트립 필터, Scanning
Microwave Microscope

朴益模(正會員) 第36卷 D編 第12號 參照
현재 아주대학교 전자공학부 부교수

閔丙喆(正會員) 第36卷 D編 第12號 參照
현재 LG 전자기술원 연구원

崔榮煥(正會員) 第36卷 D編 第12號 參照
현재 LG 전자기술원 소자재료 연구소 책임연구원

文勝鉉(正會員) 第36卷 D編 第12號 參照
현재 LG 전자기술원 책임연구원

李昇敏(正會員) 第36卷 D編 第12號 參照
현재 LG 종합기술원 책임연구원

吳炳斗(正會員) 第36卷 D編 第12號 參照
현재 LG 전자기술원 수석연구원