

고유전율의 BMT 기판을 이용한 소형 헤어핀 구조의 듀플렉서 설계

The Compact Hairpin-Shaped Duplexer using a BMT Substrate with a High Dielectric Constant

권구형 · 한상민* · 남 산** · 김영식*

Koo Hyung Kwon · Sang-Min Han* · San Nahm** · Young-Sik Kim*

요 약

본 논문에서는 고유전율의 BMT 물질을 기판에 적용하여 기판 위에 소형화된 평면형 구조의 마이크로웨이브 듀플렉서를 설계, 제작하였다. Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ (BMT)는 품질계수, 온도계수 측면에서 뛰어난 유전 특성을 보이며 유전상수가 23인 고유전 물질로서 회로의 크기를 줄이기 위한 기판에 적용하기가 적합하다. BMT 기판은 tape casting 공정에 의해 제작되었으며, 회로 패턴은 실크 스크린을 이용하여 전극 패턴을 입혔다. Open-loop ring type의 듀플렉서를 BMT 기판 위에 설계, 제작하였으며 유전상수가 6.15인 상용 기판에 동일한 규격의 듀플렉서를 제작하여 비교한 결과, 특성의 저하 없이 약 80 % 정도 크기를 줄일 수 있었다. 따라서 제안된 BMT 기판은 예시된 듀플렉서 소형화를 구현하였으며, 마이크로웨이브 수동 소자의 소형화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

In this paper, a compact planar microwave duplexer on the high dielectric substrate is presented. As the Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ (BMT) has good dielectric performances with a high dielectric constant of $\epsilon_r=23$, it is suitable to apply to a printed circuit board for reducing its circuit size. The BMT substrate is fabricated by using a tape casting fabrication process, and circuit patterns are screen-printed on it by using silver paste. The open-loop ring type duplexer is designed and implemented on the BMT substrate, and it achieves the smaller size by 80 % than one on a commercial substrate ($\epsilon_r=6.15$) without degenerating its performance. Therefore the proposed BMT substrate has provided the miniaturization of the duplexer, moreover it can make a contribution towards reducing the size of microwave passive circuits.

Key words : Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃, BMT Substrate, Tape Casting, Duplexer, Miniaturization

I. 서 론

최근 이동통신의 발달과 더불어 수 GHz 이하 주파수 대역에서의 상업적 응용이 늘어남에 따라 통신 기기의 이동성이 강조되면서, 통신용 단말의 소형

경량화가 주요한 연구 개발의 추이를 이루고 있다. 특히 통신 시스템을 구성하는 부품 가운데 중요 수동 소자인 듀플렉서나 여파기 등은 부피가 매우 크고, 집적화가 힘든 설계상의 어려움을 안고 있다. 현재 RF 시스템에서 보편적으로 사용되고 있는 SAW

LG전자 정보통신(LG Electronics Inc.)

*고려대학교 전파공학과(Department of Radio Sciences and Engineering, Korea University)

**고려대학교 재료공학과(Department of Materials Science and Engineering, Korea University)

· 논문 번호 : 20030530-080

· 수정완료일자 : 2003년 7월 28일

(Surface Acoustic Wave) 여파기는 이용 주파수에 제한이 있을 뿐만 아니라 온도계수가 큰 단점을 지니고 있으며, HTS(High Temperature Superconductor)를 이용한 부품은 저온에서 작동하므로 작은 구조에서의 응용이 쉽지 않다. 최근 부품의 소형화를 위해 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 기술이 연구되고 있으나 설계가 까다롭고 공정이 복잡하며 가격이 비싸다는 단점을 안고 있다. 그 중 마이크로스트립 라인을 이용한 평면형 구조는 초고주파 집적회로에 적용하기가 용이할 뿐만 아니라 가벼운 특징을 보이기 때문에 많은 MIC(Microwave Integrated Circuits) 구조에서 선호되고 있다. 때문에 다양한 형태의 여파기가 연구되었고^{[1]~[4]}, 그 결과 원판·삼각형·사각형·타원·링·헤어핀 등의 구조가 고안되었다. 그러나 마이크로스트립 여파기는 그 크기를 결정하는 파장이 주파수에 의존하기 때문에 설계 방법만으로 여파기를 소형화하는 것은 한계를 갖고 있다. 따라서 유전상수가 크고 공진 주파수의 온도계수가 낮으면서 높은 품질계수를 갖는 물질을 이용한 기판의 개발이 요구되고 있다.

본 논문에서는 유전상수가 23으로 유전율이 높고 물성 특성이 우수하지만 아직 기판에 적용된 적이 없는 고유전 물질인 $Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ (이하 BMT)를 이용하여 마이크로스트립 라인 회로를 위한 기판을 제작하였다. BMT 기판은 Tape Casting 기술을 사용하여 1 mm 두께의 기판으로 제작되었으며, 기판 위에 마이크로스트립 라인을 이용한 소형 구조 여파기인 open-loop ring type 대역통과 여파기를 사용하여 듀플렉서를 설계하였다. BMT 기판에 제작된 듀플렉서는 상용 Teflon 기판을 사용한 경우보다 특성의 저하 없이 소형화됨을 확인할 수 있었다.

본 논문은 제1장 서론에 이어, 제2장에서는 BMT의 특성 및 제작 과정에 대해 기술하였으며, 제3장에서는 헤어핀 구조의 open-loop ring type 대역통과 여파기를 이용한 듀플렉서 설계 이론을 제시하였다. 제4장에서는 제작된 듀플렉서의 특성 측정 결과 및 크기를 비교하였으며, 끝으로 5장에서는 결론을 도출하였다.

II. BMT의 특성 및 제작

현재 초고주파 대역의 유전체 공진기에 사용되고 있는 $A^{2+}(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$ type의 복합 페로스카이트 물질은 소형이면서 값이 싸고 견고하며 튜닝이 쉬운 장점을 지니고 있을 뿐만 아니라, 마이크로파 대역에서 우수한 유전 특성을 지니고 있어 그 응용 범위가 확대되고 있으며 특히 초고주파용 유전체 기판으로의 적용 가능성이 매우 높은 물질이라 할 수 있다. 이러한 물질 가운데 BMT와 $Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이 중 BMT는 B', B''자리에 각각 Mg, Ta 원자가 자리한 물질로 불규칙화된 상태에서는 입방구조를 Mg와 Ta가 1:2 규칙화된 상태에서는 육방구조를 갖는 유전 물질이다. 또한 BMT는 품질계수(Quality Factor)×주파수가 100,000 GHz 이상으로 높은 품질계수 특성을 보이며 0에 가까운 낮은 공진 주파수 온도계수를 갖고 있어 온도 변화에 따른 공진 주파수의 변화가 매우 작다^[5].

이러한 BMT 물질을 초고주파용 기판 제작에 적용하였으며, 다음과 같은 tape casting 공정으로 제작되었다. 가공하지 않은 $BaCO_3$, MgO, Ta_2O_5 를 습식으로 24시간 동안 볼 밀링 작업을 수행하고 건조를 한 후에 1200 °C에서 10시간 동안 하소를 한다. 이를 작고 균일한 입자 크기로 만들기 위해 다시 24시간 동안 2차 볼 밀링을 시행한 후, 유기물(바인더, 가소제, 이형제)을 첨가하여 슬러리를 만든다. 그리고 탈포 과정을 거친 다음에 tape casting 방법으로 약 30 μm 두께의 슈트를 얻고 고온, 고압으로 원하는 두께만큼 적층한 후, 이 슈트를 1600 °C에서 10시간 동안 소결하면 일정한 두께의 유전체 기판을 얻을 수 있다. 여기에 실크 스크린을 이용해서 전극패턴(Ag)을 입히고 다시 전극과 후막의 계면을 안정화시키기 위해 800 °C 정도에서 열처리를 해준다. 그러면 BMT 기판의 형성이 완료된다. 본 논문에서는 위의 공정 과정을 통해 두께가 1 mm인 BMT 기판을 제작하였으며 물성 특성을 측정하였다. 우선 1600 °C에서 10시간 정도 소결된 BMT 기판의 미세구조를 보여주는 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진은 그림 1과 같다.

그림에서 보이는 바와 같이 BMT는 균일하고 치밀한 미세구조를 가지고 있고 소결 상태도 양호함을 알 수 있다. 평균 2.5 μm의 균일한 결정립 크기를 갖

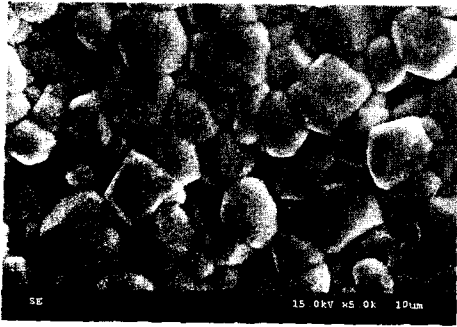


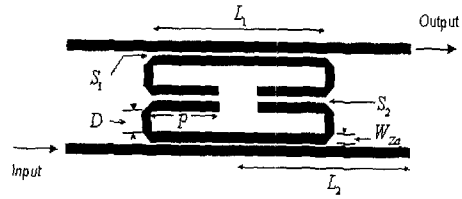
그림 1. BMT 시편의 SEM 사진
Fig. 1. SEM micrograph of the BMT specimen.

고 있으며, 다른 이차상은 관찰되지 않았다.
BMT 기판의 손실계수를 얻기 위해 C-V 측정으로 부터 0.0001 이하의 우수한 손실계수를 얻을 수 있었 으며 또한 약 23의 유전상수를 얻었다.

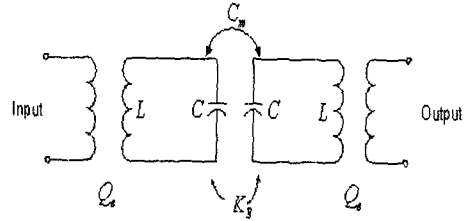
Ⅲ. BMT 기판을 이용한 듀플렉서 디자인

본 장에서는 BMT 기판에 적용할 open-loop ring type의 소형 헤어핀 여파기를 이용한 평면형 듀플렉서를 무선 LAN이나 휴대 인터넷을 사용할 수 있는 주파수 대역에서 설계하였다. 송신부와 수신부의 중심 주파수는 각각 2.32 GHz, 3 GHz이고 대역폭은 송신단이 300 MHz, 수신단이 390 MHz로 설정되었다. 마이크로스트립 라인을 이용한 평면형 여파기는 파장에 비례하는 길이를 갖는 공진기를 이용한 것으로 큰 유전율의 기판을 사용할 경우 높은 유효 유전율로 인해 공진기의 크기를 줄일 수 있다. 따라서 유전율이 큰 물질에 적절한 설계 방식을 사용하여 상용 기판에 비해 특성의 저하가 없으며 소형화된 여파기를 구현하였다.

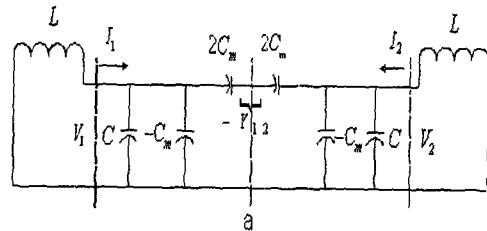
Open-loop ring type 여파기의 그림과 등가 회로, 설계 이론은 다음과 같다^{[6],[7]}. 그림 2(a)는 공진기와 급전선로 간의 결합효과를 이용한 헤어핀 타입의 대역통과 여파기를 나타내고 있다. 이는 그림 2(b)와 같은 인덕터와 캐패시터를 이용한 등가 회로로 나타 낼 수 있으며, 여기서 Q_e 는 외부 양호도, K_e 는 두 공진기 사이의 결합계수를 나타낸다. 그림 2(c)는 결합효과가 발생하는 공진기 부분을 등가 회로로 나타낸 것이다. 등가 회로에서 보이는 바와 같이 2개의 공진기가 결합하는 개방 선로 쪽에 최대 전계 분포를



(a) 공진기와 급전선로 간의 결합효과를 이용한 여파기
(a) Bandpass filter using the coupling effect between resonators and feeding lines



(b) 등가 회로
(b) Equivalent circuit of the open-loop ring type bandpass filter



(c) 결합효과 발생부분의 등가 회로
(c) An alternative form of the equivalent circuit to represent the electric coupling

그림 2. Open-loop ring type 대역통과 여파기
Fig. 2. Open-loop ring type bandpass filter.

나타내므로 그 부분에서 전기적 에너지가 저장되며 L 과 C 는 자기 인덕턴스와 자기 캐패시턴스이고 C_m 은 결합 효과로 인하여 발생하는 상호 캐패시턴스이다. 여기서 공진기 사이에 전기 장벽(Electric Wall)이 생기는 기수 모드(Odd Mode)와 자기 장벽(Magnetic Wall)이 발생하는 우수 모드(Even Mode)로 나누어 생각할 수 있으며, 각각의 공진 주파수는 아래의 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_m)}} \quad (1)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C-C_m)}} \quad (2)$$

여기서 f_e 는 기수 모드에서의 공진 주파수를 나타내며, f_m 은 우수 모드인 경우의 공진 주파수이다. 두 식을 이용하여 두 공진기 사이의 결합계수 K_E 를 식(3)과 같이 얻을 수 있다.

$$K_E = \frac{f_m^2 - f_e^2}{f_m^2 + f_e^2} = \frac{C_m}{C} \quad (3)$$

또한 급전선로에 의해 발생하는 외부 양호도 Q_e 를 식 (4)에 의해 얻을 수 있다.

$$Q_e = \frac{f_0}{\Delta f_{3dB}} \quad (4)$$

여기서 Δf_{3dB} 는 여파기의 3-dB 대역폭을 의미하며 f_0 는 중심 주파수이다. 이러한 특성을 만족하는 여파기를 설계하기 위해서는 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 총 7개의 변수가 있으며 각각의 설계 과정은 다음과 같다. 우선 결합계수 K_E 와 외부 양호도 Q_e 는 다음과 같은 식을 만족한다.

$$K_E = -\frac{FBW}{\sqrt{g_1 g_2}} \quad (5)$$

$$Q_e = \frac{g_0 g_1}{FBW} \quad (6)$$

여기서 FBW (Fractional Bandwidth)는 부분 대역폭으로서 $\Delta f_{3dB}/f_0$ 로 정의되고 설계 값은 송수신단 모두 13%이며, 식에서 음의 부호는 전기적 결합을 나타낸다. 또한 Maximally Flat type의 2단 여파기 설계를 위한 단위계수 $g_n(n=0, 1, 2, 3)$ 의 값은 다음과 같다^[8].

$$g_0 = g_3 = 1, g_1 = g_2 = 1.4142 \quad (7)$$

따라서 식 (7)의 값을 식 (5), 식 (6)에 각각 대입하여 위에서 제시한 송수신단의 설계 규격을 만족하는 K_E 와 Q_e 값을 구하였으며, 그 결과 값은 각각 -0.092, 8.78이 된다. 다음으로 이 값을 만족시키기 위한 K_E 와 Q_e 는 결합계수를 결정하는 S_2 와 대역폭을 결정하는 주요 요소인 S_1 에 의해 각각 정해진다. 따라서 S_1 과 S_2 를 각각 변화시켜가면서 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 위에서 구한 K_E (-0.092)와 Q_e (8.78)값을 만족하는 S_2 와 S_1 의 값을 찾을 수 있다. 다음으로 L_1 은 공진기 일부의 길이로 부하 캐패시턴스가 없을 경우 $\lambda_g/2$ 이나 open-loop ring type의 경우 부하 캐패시턴스가 존재하기 때문에 이보다 짧아지게 되며, $\lambda_g/4$

표 1. Open-loop ring type 여파기의 각 변수들 값
Table 1. Parameters for the open-loop ring type bandpass filter.

	송신단	수신단
$L_1(\text{mm})$	9.75	7.2
$L_2(\text{mm})$	9.75	7.2
$S_1(\text{mm})$	0.3	0.25
$S_2(\text{mm})$	0.8	0.7
$P(\text{mm})$	4.4	3.3
$D(\text{mm})$	0.53	0.53
$W_{Z0}(\text{mm})$	0.31	0.31

에서 최적화 되므로 여파기의 크기를 줄일 수 있게 된다. L_2 는 직렬 스테르브로 $\lambda_g/4$ 일 때 입력 임피던스가 중심 주파수에 대해 0에 가까운 값을 갖게 된다. P 는 공진기 사이의 부하 캐패시턴스를 조절하여 중심 주파수를 조절할 수 있으며, D 는 공진기 일부의 물리적·전기적 길이로서 실험적인 방법을 통해 여파기 규격에 맞는 값을 결정하였다. 마지막으로 W_{Z0} 는 1 mm 두께의 50옴 선 폭이며 계산결과 0.31 mm이다. 위의 순서에 의해 설계된 open-loop ring type 듀플렉서의 설계 결과를 표 1에 나타내었다.

IV. 제작 및 실험 결과

본 장에서는 제3장에서 설계된 소형 헤어핀 구조의 대역통과 여파기를 이용하여 듀플렉서를 제작하였다. 여파기는 Maximally Flat 특성으로 설계되었고, 동일한 규격의 듀플렉서를 유전상수가 23이며 두께가 1 mm인 BMT 기판과 유전상수가 6.15, 두께가 1.27 mm인 Duroid 6006 상용 기판에 각각 제작하여 특성과 크기를 비교하였다. 한편 BMT 기판에 제작된 듀플렉서의 급전선로 50옴 선 폭이 310 μm 정도로 매우 좁아 중심 핀 폭이 127 μm 인 SMA 커넥터를 사용하였다. 설계에 사용된 규격은 표 2와 같다.

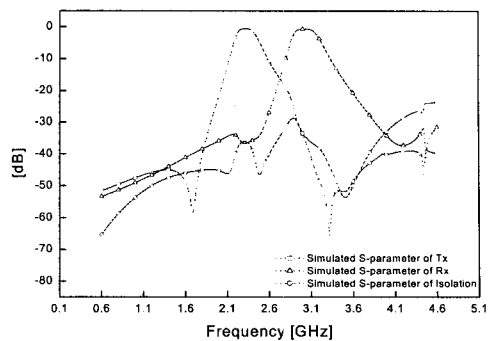
우선 Duroid 6006 기판에 제작된 듀플렉서의 S-parameter 시뮬레이션 결과와 측정 결과, 그리고 시간 지연 (Delay) 측정 결과를 아래의 그림 3에 보였다. 송신단은 중심 주파수 2.3 GHz에서 삽입 손실이 1.19 dB, 대역폭이 304 MHz이었으며 수신단에서는 3 GHz의 중심 주파수에서 1.25 dB의 삽입 손실과

표 2. Open-loop ring type 듀플렉서 설계 규격
Table 2. Specifications of the open-loop ring type duplexer.

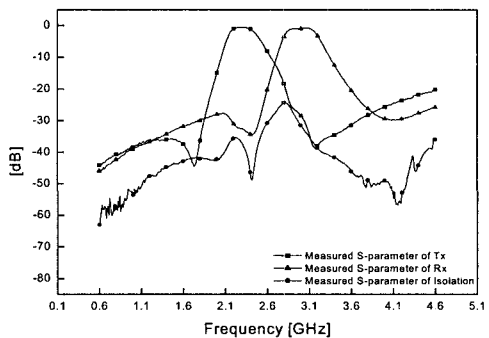
	송신단	수신단
중심 주파수	2.32 GHz	3 GHz
대역폭	300 MHz	390 MHz
삽입 손실	1 dB	1 dB
격리도	40 B 이상	35 dB 이상

395 MHz의 대역폭을 보였다. 여기서 약 0.2 dB의 삽입 손실 오차는 커넥터의 손실에 의한 것이다. 또한 격리도 특성은 송신단에서 약 40 dB, 수신단에서 35 dB 정도로 측정되었으며 시간 지연은 송신단에서는 2.5 ns 이하, 수신단에서는 2.0 ns 이하의 지연 특성을 나타내었다. 따라서 Duroid 6006 기판에 제작된 듀플렉서는 설계 규격과 동일함을 알 수 있다.

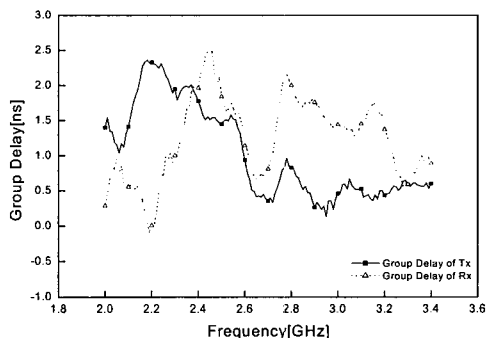
다음으로 BMT 기판에 제작된 듀플렉서의 측정 결과를 시뮬레이션 결과와 함께 아래의 그림 4에 보였다. 송신단의 경우 중심 주파수 2.29 GHz에서 삽입 손실은 1.28 dB이며 대역폭은 311 MHz를 나타내었고, 수신단의 경우 2.93 GHz의 중심 주파수에서 1.39 dB의 삽입 손실과 380 MHz의 대역폭을 나타내었다. 설계 값에 비해 중심 주파수는 송신단과 수신단에서 각각 30 MHz, 70 MHz 낮아졌으며 삽입 손실은 각각 0.3 dB, 0.4 dB 정도 증가하였다. 대역폭의 경우 송신단에서는 11 MHz 늘어났으며, 수신단에서는 10 MHz가 줄어들었다. 이는 BMT 기판 제작 과정에서 발생한 기판 두께의 변화, 커넥터로 인한 손실, 여파기를 제작할 때 발생한 마이크로미터 단위의 간격 오차 때문에 각각 발생한 것으로 추정된다. 그러나 적은 오차로 설계 값과 일치하는 결과임을 알 수 있다. 또한 듀플렉서를 지날 때 발생하는 시간 지연은 송신단에서는 2.5 ns 이하, 수신단의 대역폭 내에서는 2.0 ns 이하의 시간 지연 특성을 나타내었다. 이는 휴대 단말기용 IF SAW 여파기의 시간 지연 기준 1 μs 이하에 비해 낮은 값으로 낮은 시간 지연 특성을 보임을 알 수 있다. 따라서 각각의 듀플렉서를 통과할 때 신호 위상 지연의 양이 적기 때문에 듀플렉서에 의한 송수신 신호의 왜곡 정도는 작게 된다. 주파수 응답 역시 여파기가 전기적 결합의 특성을 보이므로 attenuation pole이 통과대역 아래쪽에



(a) S-parameter(시뮬레이션 결과)
(a) S-parameter(simulated results)



(b) S-parameter(측정 결과)
(b) S-parameter(measured results)

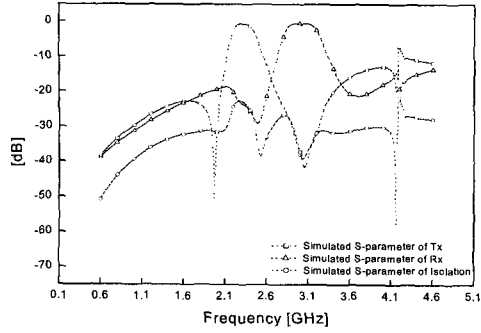


(c) 시간 지연(측정 결과)
(c) Group delay(measured results)

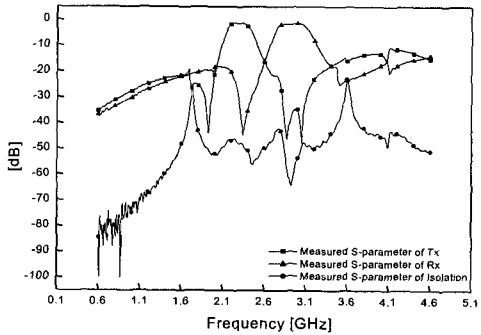
그림 3. Duroid 6006 기판에 제작된 open-loop ring type 듀플렉서의 시뮬레이션 결과 및 측정 결과

Fig. 3. Simulated and measured results of the open-loop ring type duplexer fabricated on the Duroid 6006 substrate.

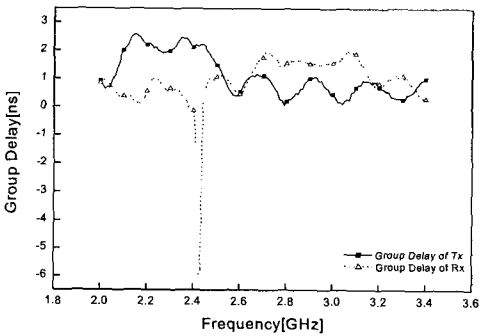
발생하였다. 대역폭 내에서 송신단의 경우 약 50 dB, 수신단의 경우 53 dB의 높은 격리도 특성을 보여 송



(a) S-parameter(시뮬레이션 결과)
(a) S-parameter(simulated results)



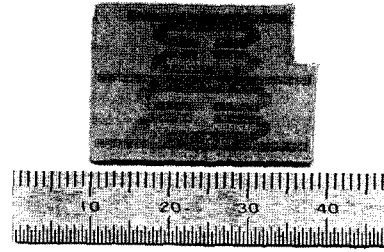
(b) S-parameter(측정 결과)
(b) S-parameter(measured results)



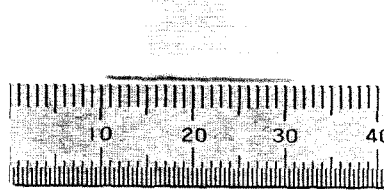
(c) 시간 지연(측정 결과)
(c) Group delay(measured results)

그림 4. BMT 기판에 제작된 open-loop ring type 듀플렉서의 시뮬레이션 결과 및 측정 결과
Fig. 4. Simulated and measured results of the open-loop ring type duplexer fabricated on the BMT substrate.

수신 신호 사이에 서로 간섭하는 현상이 줄어 우수한 신호 선택성을 나타내었다. 위에서 보는 바와 같이 BMT 기판에 제작된 듀플렉서는 Duroid 6006을



(a) Duroid 6006 기판에서의 듀플렉서
(a) Duplexer implemented on the Duroid 6006 substrate



(b) BMT 기판에서의 듀플렉서
(b) Duplexer implemented on the BMT substrate

그림 5. 제작된 듀플렉서
Fig. 5. Photographs of the duplexer.

사용했을 경우보다 삽입 손실은 유전체 손실(dielectric loss)에 의해 약 0.1 dB 정도 하락한 반면 격리도 특성은 오히려 10 dB 이상 상승되었으며 시간 지연의 특성은 대역폭 내에서 동일함을 알 수 있다. 따라서 BMT를 사용하여 구현한 듀플렉서의 경우 상용 기판에 제작한 경우보다 전체적인 특성의 저하가 없음을 알 수 있다.

마지막으로 Duroid 6006 기판과 BMT 기판에 각각 제작된 듀플렉서의 크기를 비교하였다. 아래의 그림 5는 각각의 기판에 제작된 듀플렉서의 실측 사진을 보이고 있다. Duroid 6006 기판에 제작된 듀플렉서는 크기가 $27.0 \text{ mm} \times 28.8 \text{ mm} = 777.6 \text{ mm}^2$ 이었으며, BMT 기판에 제작된 경우는 $19.5 \text{ mm} \times 8.1 \text{ mm} = 158.3 \text{ mm}^2$ 의 면적으로 나타났다. 이는 전체 면적을 약 80% 정도 줄인 크기이다. 따라서 BMT 기판을 이용한 듀플렉서의 구현은 상용 고유전율 기판을 사용한 경우보다 마이크로스트립 구조의 수동 소자 소형화에 더 큰 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 고유전율의 기판을 사용하여 헤어핀 구조의 소형 듀플렉서를 설계, 제작하였다. 제작된 소형 듀플렉서는 송수신단에서 각각 중심 주파수 2.29 GHz, 2.93 GHz에서 311 MHz, 380 MHz의 대역폭과 약 1.3 dB의 삽입 손실 특성을 보였다. 또한 같은 특성을 갖는 듀플렉서를 유전상수가 6.15이고, 두께가 1.27 mm인 상용 기판에 제작하여 크기를 비교한 결과, 특성 저하 없이 80 %의 면적 감소를 얻을 수 있었다. 제시된 듀플렉서는 이론적인 결과와 실험적인 결과가 거의 일치함을 보여 BMT 기판 특성이 제작 주파수 대역에서 동일한 특성을 유지하면서 여파기의 소형화에 기여할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 고유전율의 기판을 이용한 마이크로스트립 회로는 비교적 큰 유전체 손실계수와 공정상의 어려움을 갖고 있으나, 적절한 설계 방식을 통해 다양한 종류의 소형 적접화가 용이한 수동 소자를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Levy, S. B. Cohn, "A History of Microwave Filter Research, Design, and Development", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 32, no. 9, pp. 1055-1067, Sep. 1984.
- [2] C. Yu, K. Chang, "Transmission Line Analysis of a Capacitively Coupled Microstrip-Ring Resonator", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 11, pp. 2018-2024, Nov. 1972.
- [3] E. G. Cristal, S. Frankel, "Hairpin Line and Hybrid Hairpin Line/Half Wave Parallel Coupled Line Filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 20, no. 11, pp. 1991-1996, Nov. 1972.
- [4] M. Sagawa, K. Takahashi and M. Makimoto, "Miniaturized Hairpin Resonator Filters and Their Application to Receiver Front-End MIC's", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 37, no. 12, pp. 1991-1996, Dec. 1989.
- [5] K. Matsumoto, T. Hiuga, K. Takada and H. Ichimura, "Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ Ceramic with Ultra-Low Loss at Microwave Frequencies", in *Proc. 6th symp. Appl. Ferroelectrics*, pp. 118, 1986.
- [6] J. Hong, M. J. Lanscaster, "Theory and Experiment of Novel Microstrip Slow-Wave Open-Loop Resonator Filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 12, pp. 2358-2365, Dec. 1997.
- [7] 권구형, 한상민, 김민한, 남 산, 김영식, "고유전율의 BMT 기판을 이용한 소형 헤어핀 구조의 대역통과 여파기", 한국통신학회 하계종합학술대회 논문초록집, vol. 25, pp. 350, 2002.
- [8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd edit., Addison Wiley: New York, 1998.

권 구 형



스텝

2001년 2월: 고려대학교 전기전자전파 공학부 (공학사)
 2003년 2월: 고려대학교 전파통신공학과 (공학석사)
 2003년 2월~현재: LG전자 정보통신 [주 관심분야] RF 수동소자 및 시

한 상 민



[주 관심분야] 능동 직접 안테나, 위상 변위 안테나, 유전체 수동소자

1996년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
 1998년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
 2003년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)
 2003년 10월: UCLA

남 산



1983년: 고려대학교 재료공학과 (공학사)

1990년: University of Maryland (공학박사)

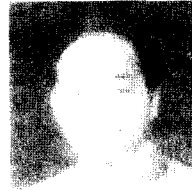
1991년 1월~1991년 12월: University of Maryland (Post-doctorial Researcher)

1992년 1월~1995년 2월: ETRI 선임연구원

1995년 3월~1996년 2월: 계명대학교 공과대학 재료공학과 전임강사

1996년 3월~현재: 고려대학교 공과대학 재료공학부 부교수

김 영 식



1973년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)

1977년 8월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)

1986년 5월: University of Massachusetts at Amherst, ECE (공학석사)

1988년 5월: University of Massachusetts at Amherst, ECE (공학박사)

1978년 3월~1982년 1월: 홍익공업대학 전자과 조교수

1989년 2월~1993년 2월: ETRI 이동통신연구단 무선기술 연구실 실장

1993년 2월~현재: 고려대학교 전자통신공학과 교수

[주 관심분야] 안테나, 초구조파 소자 및 회로