

論文97-34D-12-3

$Y_{3-2x}Ca_xSn_xFe_{3.5}Al_{1.5}O_{12}$ 가네트 자성체를 이용한 2GHz대 서큘레이터 구현

(The fabrication of 2GHz Circulator using
 $Y_{3-2x}Ca_xSn_xFe_{3.5}Al_{1.5}O_{12}$ Garnet)

朴正來 * , 金泰洪 * , 田東錫 * , 韓鎮宇 *

(Jung-Rae Park, Tae-Hong Kim, Dong-Suk Jun, and Jin-Woo Hahn)

요약

본 연구에서는 Ca, Sn을 치환한 YIG (Yttrium Iron Garnet)계 세라믹 자성체를 제조하여 2GHz 서큘레이터를 구현하였다. Ca, Sn의 치환량에 따른 YIG 세라믹 자성체의 전기적, 자기적 및 마이크로파 특성을 측정한 결과, 마이크로파대에서 유전율(ϵ')과 투자율(μ')은 각각 16.25, 0.8964이었다. $Y_{2.4}Ca_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{3.5}Al_{1.5}O_{12}$ 의 조성을 가진 자성체를 1400°C에서 소결 제조한 결과, 페리자성공명선폭(ΔH)이 53 Oe이고 포화자화가 375 G인 세라믹 자성체를 제조할 수 있었다. 3차원 유한요소법을 이용한 소프트웨어로 스트립라인 서큘레이터를 중심주파수 2GHz에서 시뮬레이션하였으며, 제조된 세라믹 자성체를 이용하여 스트립라인 서큘레이터를 제작한 결과, 중심주파수 1.855 GHz에서 삽입손실 1.271 dB, 반사손실 23.843 dB이고 격리도가 21.751 dB인 서큘레이터를 제작할 수 있었다.

Abstract

This study was conducted to fabricate 2GHz circulator using Ca, Sn substituted YIG(Yttrium Iron Garnet) ceramics. When the electric, magnetic and microwave properties were measured in Ca, Sn substituted YIG, the measured permittivity and permeability in microwave frequencies were 16.25, 0.8964. For $Y_{2.4}Ca_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{3.5}Al_{1.5}O_{12}$ garnet ceramics sintered at 1400°C, the ferrimagnetic resonance line width(ΔH) at 10 GHz was 53 Oe and saturation magnetization was 375 G. The strip-line circulator was simulated with 3-D FEM(Finite Element Method) software and designed at the center frequency of 2GHz. The fabricated strip-line junction circulator using above YIG ceramics had insertion loss of 1.271dB, return loss of 23.843dB, isolation of 21.751dB at the center frequency 1.855GHz.

I. 서론

1950년대 Geller와 Gilleo에 의해 YIG (Yttrium Iron Garnet)계 세라믹 자성체가 합성된 이후^[1] 마이크로파 영역에서 페리자성공명선폭이 좁고 에너지 손실이 작은 YIG를 마이크로파 부품에 응용하려는 많

은 연구가 수행되어 왔다^{[2], [3]}.

또한 치환형 YIG계 세라믹 자성체를 제조하여 포화자화, 큐리온도 등 자기적 특성 및 복소유전율, 복소투자율, 페리자성공명선폭 등 마이크로파 특성을 조절함으로써 아이솔레이터, 서큘레이터, 위상변위기, 전파흡수체 등 다양한 부품에의 응용을 도모하고 있다^[4-8].

일반적으로 세라믹 자성체를 마이크로파 부품으로 응용하기 위해서는 첫째, 부품의 크기와 구조에 적합한 적당한 포화자화를 가질 것, 둘째, 부품의 온도안정성을 나타내는 포화자화 온도계수(α)가 0.2%/°C이하

* 正會員, 韓國電子通信研究院 通信部品研究室

(Component Technology Development Section, ETRI)

接受日字: 1997年6月12日, 수정완료일: 1997年10月31日

일 것, 셋째, 부품의 마이크로파 손실에 관계되는 페리자성공명선폭(ΔH)이 100 Oe이하일 것 등과 같은 전자기적 특성이 요구되어지고 있다.

본 연구에서는 Ca, Sn을 치환한 YIG계 자성체에서 Ca, Sn 치환량을 변화시켜 자기적 특성 및 마이크로파 특성을 제어하고자 하였으며 3차원 유한요소법을 이용하여 설계한 스트립라인 서클레이터에 적용하여 마이크로파대 서클레이터로의 응용을 확인해 보고자 하였다.

II. 실험방법

1. 시편 제조

출발원료로서 고순도(99.9%)의 CaCO_3 , SnO_2 , Y_2O_3 , Al_2O_3 , $\alpha-\text{Fe}_2\text{O}_3$ 를 사용하여 일정한 배합비 ($\text{Y}_{3-2x}\text{Ca}_x\text{Sn}_x\text{Fe}_{3.5}\text{Al}_{1.5}\text{O}_{12}$)로 청량하였고, 이온교환수와 혼합하여 polyethylene용기와 ZrO_2 볼을 사용하여 16시간 혼합한 후 건조하고 1200°C에서 2시간동안 하소하여 가네트상의 분말을 제조하였다.

하소한 분말은 자동유발기를 사용하여 1시간동안 분쇄하였으며 1500 kg/cm²의 성형압으로 원통형태의 성형체를 제조하였다. 또한 당 실에서 개발한 회전연마방법^[9]에 의해 지름 1mm이하의 구를 제조하여 마이크로파 특성 측정에 활용하였다. 소결온도는 1300~1500°C로 변화시켜 2시간동안 유지시켰고 공기중에서 5 °C/min의 승온 및 냉각 과정을 거쳐 소결체를 제조하였다.

2. 특성 측정

소결체의 결정상 생성을 확인하기 위하여 X-선 회절분석 실험을 행하였고 결정상 미세구조를 관찰하기 위하여 SEM(Scanning Electron Microscope) 분석 실험을 수행하였다.

포화자화($4\pi \text{ Ms}$), 포화자화 온도계수(α) 등 자기적 특성을 분석하기 위해서 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 사용하여 상온 및 고온에서 측정하였다. 포화자화 온도계수는 다음과 같은 관계식에 의해 계산하였다.

$$\alpha = \frac{4\pi \text{Ms}(25^\circ\text{C}) - 4\pi \text{Ms}(125^\circ\text{C})}{4\pi \text{Ms}(25^\circ\text{C})} \times 100$$

여기서,

$4\pi \text{Ms}(25^\circ\text{C})$: 25°C에서 소결체의 포화자화

$4\pi \text{Ms}(125^\circ\text{C})$: 125°C에서 소결체의 포화자화

마이크로파 특성인 복소유전율, 복소투자율을 측정하기 위해서 사각형 공진기를 사용하여 공진기 섭동법으로 분석하였다^[10]. 복소유전율을 측정하기 위해서 사각형 공진기의 TE101 공진모드를 이용하였으며 그림 1에 공진시 전자장 특성을 나타내었다. 시편을 공진기 내부 중앙에 위치시켰을 때 전기장이 최대가 되고 자기장이 최소가 됨을 알 수 있다.

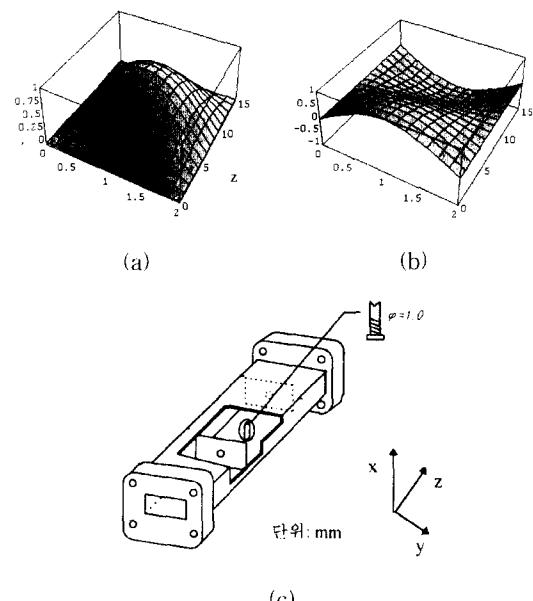


그림 1. TE101 공진모드의 전자장 분포

(a) 전기장 (b) 자기장 (c) 사각형 공진기

Fig. 1. Electromagnetic field of TE101 resonant mode. (a) Electric field (b) Magnetic field (c) Rectangular cavity

복소 투자율을 측정하기 위해서 TE104 공진모드를 이용하였으며 그림 2에 공진시 전자장 특성을 나타내었다. 시편을 공진기 내부 중앙에 위치시켰을 때 자기장이 최대가 되고 전기장이 최소가 됨을 알 수 있다.

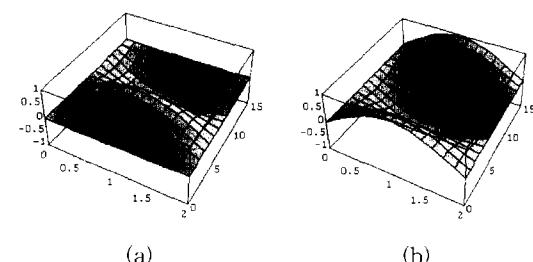


그림 2. TE104 공진모드의 전자장 분포 (a) 전기장 (b) 자기장

Fig. 2. Electromagnetic field of TE104 resonant mode. (a) Electric field (b) Magnetic field

자성체의 마이크로파 손실을 나타내는 페리자성공명 선폭(ΔH)을 측정하기 위해서 사각형 공진기를 자기장의 세기를 변화시킬 수 있는 전자석 내에 위치시키고 자기장의 세기에 따른 복소 투자율의 허수부(μ)의 변화를 측정하였다. 모든 측정 시스템은 그림 3과 같아 컴퓨터에 의해 제어되고 측정된 결과는 자동으로 분석하였다.

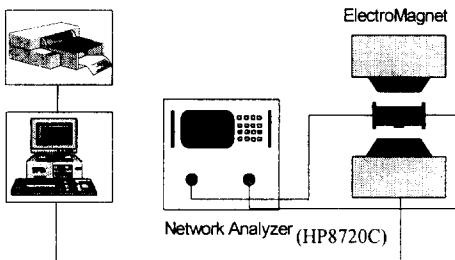


그림 3. 페리자성공명선폭 측정장치 구성도

Fig. 3. Scheme of measuring device for ferrimagnetic resonance line width.

III. 실험결과 및 고찰

1. 결정구조 분석

Ca , Sn 의 치환량에 따른 소결체의 결정상(phase) 생성을 확인하기 위하여 그림 4와 같이 X-선 회절 분석을 수행하였는데 적정소결밀도를 가지는 $1400^{\circ}C$ 에서 소결시 치환량이 증가됨에 따라 2차상인 $Sn_3Fe_2Y_3O_{12}$ 상이 형성되어 있음을 확인할 수 있었다.

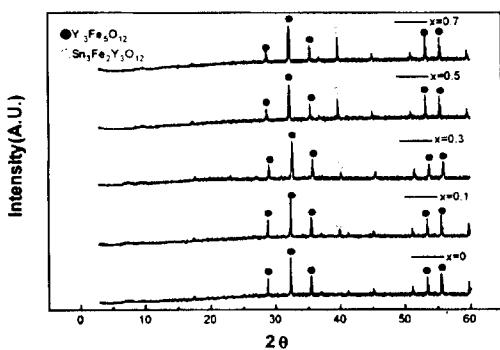


그림 4. Ca, Sn의 치환량에 따른 X-선 회절도형

Fig. 4. XRD patterns of Ca, Sn substitutions in YIG ceramics.

제조된 소결체의 미세구조를 분석하기 위해 그림 5와 같이 SEM을 통해 관찰하였는데 Ca , Sn 의 치환량

이 증가됨에 따라 결정립의 크기가 $12\mu m$ 에서 $6\mu m$ 까지 감소되었다. $x=0.3$ 일 때 치밀화가 잘 이루어져 있었고 그 이상 치환시 X-선 회절분석에 나타난 2차상이 결정립 성장으로 인해 결정립계에 형성되어 있음을 확인할 수 있었다.

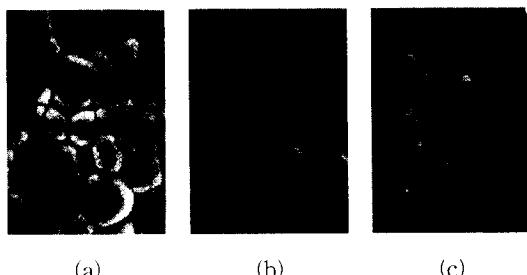


그림 5. Ca , Sn 의 치환량에 따른 미세구조 변화(소결 온도= $1400^{\circ}C$) (a) $x=0$, (b) $x=0.3$, (c) $x=0.7$

Fig. 5. Microstructure of YIG ceramics substituted with Ca , Sn (sintering temperature= $1400^{\circ}C$) (a) $x=0$, (b) $x=0.3$, (c) $x=0.7$

2. 자기적 특성 분석

소결체의 소결온도 및 Ca , Sn 치환량에 따른 포화자화 특성을 VSM을 이용하여 측정하였는데 그 결과는 그림 6과 같았다. 소결온도가 증가됨에 따라 포화자화가 증가되다가 감소되는 경향을 보여주었으며 소결밀도의 경향과 흡사하게 $1400^{\circ}C$ 에서 최대 포화자화를 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 Ca , Sn 의 치환량이 증가됨에 따라 포화자화가 감소하고 있었으며 적정 소결온도인 $1400^{\circ}C$ 소결시 치환량이 증가됨에 따라 480G에서 300G까지 변화하였다. 이는 X-선 회절분석에서 확인한 바와 같이 Sn 이온이 Fe 이온과 치환된 2차상이 형성됨에 따라 자성체의 자기모멘트를 감소시켰기 때문이었다.

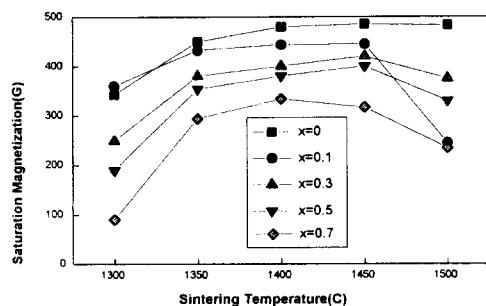


그림 6. Ca, Sn의 치환량에 따른 포화자화 변화

Fig. 6. The change of saturation magnetization of Ca , Sn substitutions in YIG ceramics.

소결체의 포화자화 온도계수를 분석하기 위하여 VSM내에서 승온시켜 측정하였다. 그림 7에 소결온도 및 Ca, Sn치환량에 따른 측정된 결과를 나타내었다. 소결온도가 증가됨에 따라 포화자화 온도계수가 감소하다가 1400°C 이상 소결시 서서히 증가함을 알 수 있었다. 또한 Ca, Sn치환량이 증가됨에 따라 $x=0.3$ 까지는 포화자화 온도계수가 감소되다가 그이상 치환시 증가함을 알 수 있었다. $x=0.5$ 이상 치환하였을 때는 포화자화 온도계수가 0.2%/°C 이상이 되었으며, 치환량이 증가됨에 따라 온도에 따른 포화자화 변화폭이 커지는 것을 확인할 수 있었다.

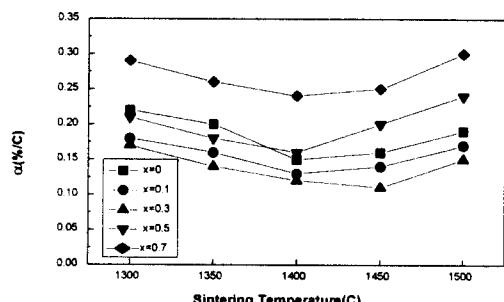


그림 7. Ca, Sn의 치환량에 따른 포화자화 온도계수 변화

Fig. 7. The change of temperature coefficient of saturation magnetization of Ca, Sn substitutions in YIG ceramics.

3. 마이크로파 특성 분석

마이크로파 전자기적 특성인 복소 유전율과 투자율을 측정하기 위해서 구형의 시편을 사각형 공진기의 중앙에 위치시키고 TE10n 공진모드를 이용하였다. 측정된 결과는 공진기 섭동법으로 분석되었으며 복소 유전율을 측정하기 위해서 전기장이 최대가 되는 $n=$ 홀수인 공진모드를 이용하였고, 복소 투자율을 측정하기 위해서 자기장이 최대가 되는 $n=$ 짝수인 공진모드를 활용하였다. 그림 8에 Ca, Sn 치환량에 따른 복소 유전율의 변화를 나타내었는데 복소 유전율을 측정하기 위해서 6.8019 GHz인 TE101공진모드를 이용하였다. 그 결과 복소 유전율의 실수부는 치환량이 증가됨에 따라 증가하다가 서서히 감소되는 경향을 볼 수 있었으나 그 폭은 1~3정도로 그리 크지 않았고 13.3~16.7정도의 범위를 가지고 있었다. 복소 유전율의 허수부는 치환량에 관계없이 거의 일정하였고 0.2부근의 측정값을 얻을 수 있었다.

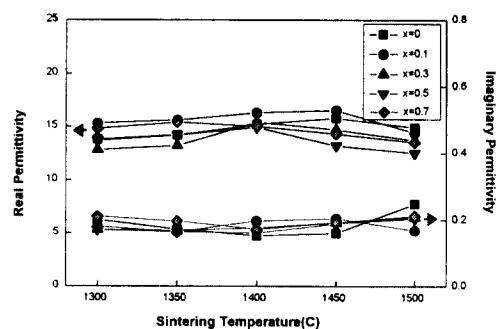


그림 8. Ca, Sn의 치환량에 따른 복소유전율 변화

Fig. 8. The change of complex permittivity of Ca, Sn substitutions in YIG ceramics.

그림 9에 Ca, Sn 치환량에 따른 복소 투자율의 변화를 나타내었는데 복소 투자율을 측정하기 위해서 10.014 GHz인 TE104공진모드를 이용하였다. 그 결과 복소 투자율의 실수부와 허수부는 치환량이 증가됨에 따라 감소하다가 증가함을 볼 수 있었고, 적정소결온도인 1400°C에서는 실수부는 0.89~1.10, 허수부는 0.028정도로 거의 일정함을 알 수 있었다. 소결온도 및 치환량에 따른 복소 투자율의 실수부와 허수부의 측정값은 0.89~1.42, 0.02~0.035로서 그 편차가 크지 않았다.

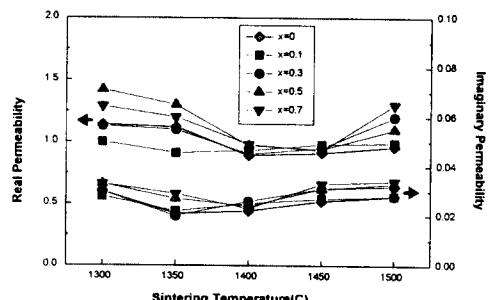


그림 9. Ca, Sn의 치환량에 따른 복소투자율 변화

Fig. 9. The change of complex permeability of Ca, Sn substitutions in YIG ceramics.

마이크로파 부품의 손실과 관계되는 페리자성공명선폭을 측정하기 위해서 마이크로파와 정자기장이 서로 직교할 수 있는 사각형 공진기의 TE104 공진모드를 이용하였고, 시편에 0~5000 Oe의 정자기장을 인가하였으며 지름 1mm이하의 구형 시편을 공진기내 중앙에 위치시켰다. 측정 및 결과분석은 컴퓨터에 의해 자동으로 제어되었으며 시편 크기에 따른 측정결과의 신뢰도를 분석한 결과, 구형의 지름크기가 감소함에 따

라 페리자성공명선폭도 감소되다가 지름 1mm이하에서 안정된 측정값을 얻을 수 있었다. 그림 10에 Ca, Sn 치환량에 따른 페리자성공명선폭의 변화를 나타내었는데 치환량이 증가됨에 따라 $x=0.3$ 까지 감소되다가 다시 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 이 때 측정된 페리자성공명선폭은 53 Oe였다. 이는 페리자성공명선폭에 치환된 조성 및 미세구조가 주요한 영향을 미치는데 Ca, Sn 치환량이 과다해짐에 따라 결정립계에 2차상의 형성으로 인해 결정내부에 잔류응력을 발생시켜 공공을 생성하였기 때문으로 생각되었다. 이상의 실험 결과, 기존의 YIG자성체에 비해 페리자성공명선폭과 포화자화 온도계수가 작은 Ca, Sn치환형 자성체를 제조할 수 있었다.

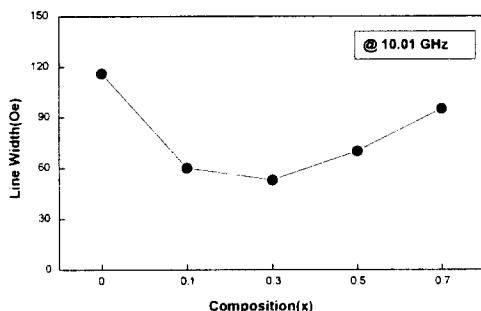
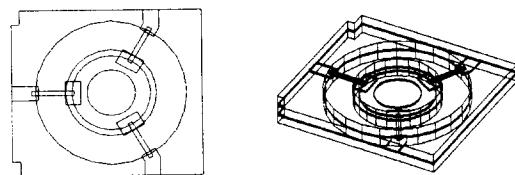
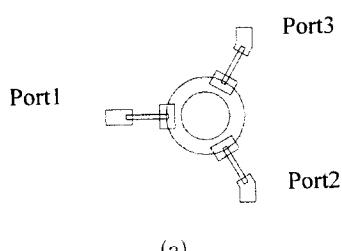


그림 10. Ca, Sn의 치환량에 따른 페리자성공명선폭 ($Y_{3-2x}Ca_xSn_xFe_{3.5}Al_{1.5}O_{12}$)

Fig. 10. Ferrimagnetic resonance line width of Ca, Sn substitutions in YIG ceramics ($Y_{3-2x}Ca_xSn_xFe_{3.5}Al_{1.5}O_{12}$).

4. 서큘레이터 설계 및 특성 측정

스트립라인 서큘레이터의 설계는 1960년대부터 원형공진기 해석을 통해 알려져왔다^{[11][12]}. 스트립라인 서큘레이터구조는 그림 11과 같이 각 페라이트 기판의 한 면이 접지된 상하 페라이트 디스크내에 50포트, $\lambda/4$ 트랜스포머, 원형고리 공진기로 구성된 중심도체를 삽입하고 접지판 외부에 영구자석을 부착한 구조로 되어있다.



(b) (c)

그림 11. 서큘레이터의 구조

(a) 공진기 패턴 (b) 서큘레이터의 평면도 (c) 서큘레이터의 3차원 구조

Fig. 11. The structure of circulator.

(a) Resonator pattern (b) Base plane of circulator (c) 3-D structure of circulator.

3차원 파동방정식은 다음 식과 같으며 투자율은 페라이트가 자화되지 않았을 때 $\mu_{eff}=1$ 의 값을 가지고 자화시에는 외부자계 Hdc와 페라이트의 자화도 및 페리자성공명선폭과 주파수에 의해 3차원 텐서가 된다.

$$\begin{aligned} (\nabla^2_{x,y,z} + k_{eff}^2)E_{x,y,z} &= 0 \\ k_{eff}^2 &= \omega^2 S_0 S_{eff} \mu_0 \mu_{eff} \\ \mu_{eff} &= 1 \text{ (비자화 영역)} \\ \mu_{eff} &= \frac{\mu^2 - \chi^2}{\mu} \text{ (자화 영역)} \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } ||\mu|| = \begin{vmatrix} \mu & -j\chi & 0 \\ j\chi & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

이 때, 페라이트의 자화 공진주파수는 $\omega_m = \gamma (4\pi Ms)$, 자화율(gyromagnetic ratio, γ)은 $\gamma = 2.8 \times 10^6$ (Hz/Oe)이다. 이것은 페라이트의 포화자화의 변화에 의해 결정되어진다. 공진주파수는 $\omega_o = \gamma H_0$ 로 나타내어지며, 여기서 $H_0 = (H_a - N_z) 4\pi Ms$, N_z 는 비자화 텐서(demagnetization tensor)이다. 서큘레이터의 삽입손실에 영향을 미치는 손실계수(damping term : α)는 $\alpha = \gamma \Delta H/2$, 즉, 페라이트의 페리자성공명선폭 변화에 의해 결정되어진다.

투자율 μ 와 복소수 변수 χ 는 외부자계세기(Ha), 페라이트의 포화자화($4\pi Ms$) 그리고 손실계수(α) 변화에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\mu = \left\{ 1 + \frac{(\omega_o + j\alpha)\omega_m}{(\omega_o + j\alpha)^2 - \omega^2} \right\}$$

$$\chi = \frac{\omega_m \omega}{(\omega_o + j\alpha)^2 - \omega^2}$$

설계시 고리형 공진기의 고리폭이 W_r 이고, 공진기의 전체 길이($L=1$)는 중심주파수 f_0 에서 한 파장이

되게 하였다. θ 는 입출력 포트간의 전기적 길이를 나타내는 파라미터이며 주파수의 함수이다. 중심주파수 f_0 에서 θ 는 각각의 i 의 합으로, 그림 12와 같이 $\theta_{1+} \theta_2 + \theta_3 = 360^\circ$ 가 되도록 하였다.

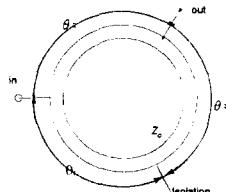


그림 12. 원형 고리형 공진기의 구조
Fig. 12. The structure of circular ring resonator.

고리형 공진기를 등가적인 3개의 전송선로로 해석하면 그림 13과 같이 나타나고, 공진기의 각 포트간 길이는 3 대칭되도록 하였다.

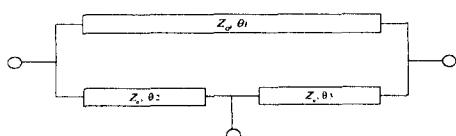


그림 13. 고리형 공진기의 전송선로 등가회로
Fig. 13. The equivalent circuit of transmission line in the circular ring resonator.

고리형 공진기 고리 전송선로 길이 $|l|$ 는 $\theta_1 = \beta l = 120^\circ = \sqrt{\epsilon_e \mu_e \chi_o} l$ 의 관계를 이용하여 계산하면 다음 식과 같은 결과가 구해진다.

$$l = \frac{120^\circ (\pi / 180^\circ)}{\sqrt{\epsilon_e \mu_e \chi_o}}$$

외부자계가 가해진 아이솔레이터의 등가회로는 그림 14와 같이 나타내어진다. 고리형 공진기가 Gyrator 형태로 변환되고, 외부자계세기와 페라이트의 포화자화, 페리자성공명선폭에 따라 텐서가 발생하며, 이것으로 신호의 흐름이 회전하게 하였다.

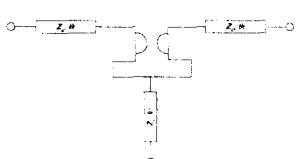


그림 14. 고리형 서클레이터의 등가회로
Fig. 14. The equivalent circuit of ring type circulator.

도체의 두께가 0.2mm이고, 접지판 사이의 거리가 2.2mm, 고리의 내경과 외경이 5mm, 7.5mm, 결합포트의 너비가 4mm, 트랜서포머의 너비와 길이 0.8mm, 7mm, 50 스트립의 넓이는 2.6mm이다. 중심주파수 1.855GHz에서 $4\pi Ms = 375G$, $H = 53Oe$, $\mu_{eff} = 0.65$, $\omega_0 = 0.44GHz$, $w_m = 6.6GHz$, $k/u = 0.58$ 공진기에 대해 외부자계의 인가에 의한 서클레이터의 특성은 중심주파수 1.855GHz에서 대역폭 30MHz, 삽입손실 0.9dB, 반사손실 22dB, 격리도 28dB의 특성이 3차원 유한요소법으로 얻어졌다.

페리자성공명선폭이 작은 0.3mol% Ca, Sn 치환한 YIG자성체를 설계한 스트립라인 서클레이터에 적용하여 마이크로파대 서클레이터 특성을 측정해 보았다. 제작된 서클레이터와 측정에 사용된 세라믹 자성체의 특성을 그림 15과 표 1에 나타내었다.

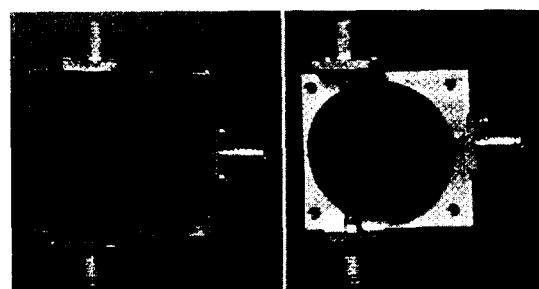


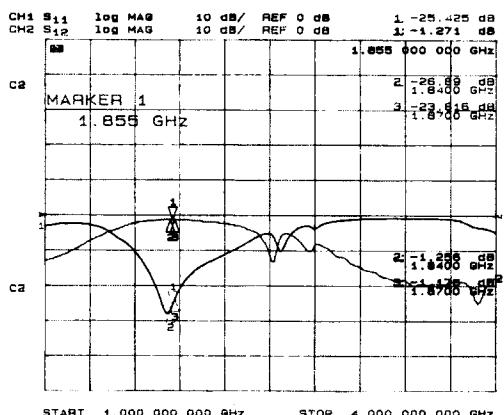
그림 15. 제작된 서클레이터
Fig. 15. The fabricated circulator.

표 1. 서클레이터용 Ca, Sn 치환 YIG자성체
Table 1. The characteristics of YIG ceramics substituted with Ca, Sn in circulator.

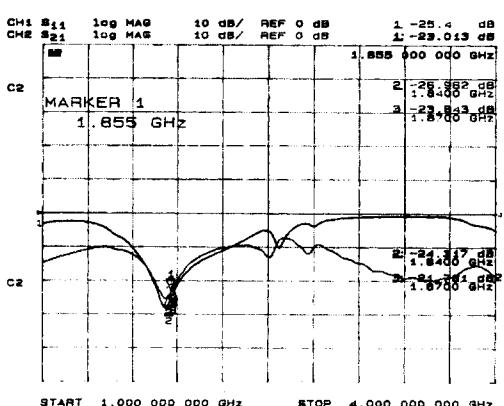
Parameter	value (unit)
Dielectric constant	16.25
$\tan \delta$	0.01
Magnetization	375 (G)
ΔH	53 (Oe)
Applied magnetic	400 (Oe)
Ferrite thickness	1 (mm)
Conductor thickness	0.2 (mm)

서클레이터에 인가된 자계의 세기는 400 Oe였고 자성체의 두께는 1mm, 스트립라인의 폭은 0.2mm였다. 구현된 서클레이터의 특성을 측정한 결과는 그림 16과 같았고, 중심 주파수 1.855 GHz에서 삽입손실

1.271 dB, 주파수 대역폭(Bandwidth)이 30 MHz에 서 반사손실 23.843 dB, 격리도 21.751 dB를 얻을 수 있었다.



(a)



(b)

그림 16. 스트립라인 서큘레이터 특성

- (a) 삽입손실(S_{21}) 및 반사손실(S_{11}) (b) 반
사손실(S_{11}) 및 격리도(S_{12})

Fig. 16. Characteristics of strip-line junction circulator.

- (a) Insertion loss(S_{21}) and return loss(S_{11})
(b) Return loss(S_{11}) and isolation(S_{12})

IV. 결 론

마이크로파대 서큘레이터에 활용가능한 Ca, Sn치환 YIG 세라믹 자성체를 제조하여 구조적, 자기적 및 마이크로파 특성을 분석하고 서큘레이터에 적용하여 서큘레이터 특성을 평가하였다.

1. Ca, Sn치환 YIG의 포화자화는 치환량이 증가됨

에 따라 감소하고 있었으며 포화자화 온도계수는 0.3 mol% 치환될 때까지 감소하다가 증가되었다.

2. 마이크로파대 복소유전율과 투자율은 공진기 섭동법을 이용하여 측정되었는데 유전율(ϵ)은 13.3~16.7였고 투자율(μ)은 0.89~1.42정도로 크게 변화하지 않았다.

3. 마이크로파대 페리자성공명선폭을 측정하기 위해 사각형 공진기에 마이크로파와 정자기장을 수직으로 인가하였으며 공진기 섭동법에 의해 해석하였다. 측정 결과 0.3 mol% Ca, Sn 치환한 자성체에서 53 Oe의 공명선폭을 얻을 수 있었다.

4. 이상의 전자기적 특성을 가진 세라믹 자성체를 당실에서 설계한 스트립라인 서큘레이터에 적용한 결과, 중심주파수 1.855 GHz에서 삽입손실 1.271 dB, 대역폭이 30 MHz인 지점에서 반사손실 23.843 dB이고 격리도 21.751 dB인 서큘레이터를 제작할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] E. P. Wohlfarth, Ferromagnetic materials, North-Holland Pub. Co., vol. 2, pp. 1-54, 1980.
- [2] J. F. Dillon, Jr., Ferrimagnetic resonance in yttrium iron garnet, *Phys. Rev.*, vol. 105, pp. 261-264, Jan., 1957.
- [3] G. P. Rodrigue, J. E. Pippin, W. P. Wolf and C. L. Hogan, Ferrimagnetic resonance in some polycrystalline rare earth garnets, *IRE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-6, pp. 83-91, Jan., 1958.
- [4] C. L. Hogan, The Ferromagnetic Faraday effect at microwave frequencies and its applications, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 31, pp. 1-31, Jan., 1952.
- [5] M. L. Kales, H. N. Chait and N. G. Sakiotis, A nonreciprocal microwave component, *J. Appl. Phys.*, vol. 24, pp. 816-817, Mar., 1953.
- [6] J. H. Rowen, Ferrites in microwave applications, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 32, pp. 1333-1369, Jun., 1953.
- [7] A. G. Fox, S. E. Miller and M. T. Weiss, Behavior and applications of ferrites in

- the microwave region, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 34, pp. 5-103, Jan., 1955.
- [8] N. G. Sakiotis and H. N. Chait, Properties of ferrites in waveguide, *Proc. IRE*, vol. 41, pp. 87-93, Jan., 1953.
- [9] 박정래, 김태홍, 이상석, 최태구, 세라믹 구조물의 구형 미세 연마 장치, 특허출원 제 16712호, 1997
- [10] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison Wesley, pp. 371-377, 1990
- [11] Bosma, On stripline circulator at UHF, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-12, pp. 61-72, 1964.
- [12] C. E. Fay, and R. L. Comstock, Operation of the Ferrite Junction Circulator, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-13, pp. 15-27, 1965.

저자소개



朴正來(正會員)

1988년 서울대학교 금속공학과(공학사). 1990년 서울대학교 금속공학과(공학석사). 1992년 ~ 1993년 포항공과대학 재료금속과 위촉연구원. 1993년 ~ 현재 한국전자통신연구원 통신부품연구실 연구원. 주관심분야는 고주파특성측정, 고주파소자용 소재설계, 고주파소자설계등입니다.

田東錫(正會員) 第33卷 5號 A編 參照



金泰洪(正會員)

1985년 경북대학교 금속공학과(공학사). 1985년 ~ 1987년 포항제철 근무. 1989년 경북대학교 금속고약과(공학석사). 1989년 ~ 현재 한국전자통신연구원 통신부품연구실 선임연구원. 주관심분야는 고주파특성측정, 고주파소자용 소재설계, 고주파소자설계등입니다.



韓鎮宇(正會員)

1986년 서울대학교 무기재료공학과(공학사). 1988년 서울대학교 무기재료공학과(공학석사). 1995년 서울대학교 무기재료공학과(공학박사). 1995년 ~ 1996년 한국과학기술연구원 Post-Doc. 1996년 ~ 현재 한국전자통신연구원 통신부품연구실 선임연구원. 주관심분야는 고주파특성측정, 고주파소자용 소재설계, 고주파소자설계등입니다.