≪연구논문≫ Journal of The Korean Magnetics Society, Volume 8, Number 2, April 1998

광자기 전류 자장 센서용 가넷 박막의 제조 및 센서 특성

김덕실 · 조재경
경상대학교 공과대학 전자재료공학과, 항공기부품기술연구센터
경남 진주시 가좌동 900

(1997년 11월 27일 받음, 1998년 3월 23일 최종수정본 받음)

LPE법으로 양질의 단결정 Bi, Gd : YIG 막을 GCMZGG 기판상에 성장시켜 자기, 광자기 및 센서특성을 조사했다. 제조한 막은 히스테리시스가 거의 없는 직선성이 양호한 연자성 특성을 나타냈고, 상온에서의 포화 Faraday 회전각은 45°, 포화자장은 약 1.1 kOe, 베르데 상수는 5.6°/(cm, Oe)이었으며, 베르데상수의 온도의존성은 0 ℃-100 ℃에서 약 0.0056°/(Oe, cm, ℃)로 우수한 특성을 나타냈다. 또한, 제조한 막을 사용하여 센서특성을 측정한 결과 전류의 세기가 3 A-300 A 에서 양호한 직선성이 얻어졌다.

I. 서 론

기존의 송전선용 대전류 측정방식으로는, 코일이 감긴 토로이드형의 철심을 송전선이 관통하게끔 장착한후 송전선에 흐르는 전류에 의해 발생된 자장을 전자유도 법칙을 이용하여 전류로 환산하는 변류계 (Current transformer, CT)가 사용되어 왔다. 이러한 유도 코일을 이용한 방식은, 송전선 주위의 전자 유도에 의한 잡음때문에 신뢰성이 떨어지고, 고장시의 펄스성 전류의 측정이 불가능하며, 측정하려는 전류의 세기에 따라 권선수가 각기 다른 변류계를 사용해야 한다는 불편이 있고, 대전류용의 경우 가격이 매우 비싸다는 단점을 가지고 있다. [1]

이러한 문제점들을 해결하기 위해서 광자기 전류 자장 센서의 개발이 활발히 진행되어 왔다. 광자기 전류 자장 센서는 전자유도 장해를 받지않고 펄스 전류도 용이하게 측정 할 수 있다는 점이외에도, 전기 절연성이 뛰어나고 감도가 높고 비접촉식으로 측정 할 수 있으며, 측정 범위가 매우 넓고, 센서의 소형화가 가능하며, 측정한 데이터의 전송 및 처리가 용이하다는 장점을 가지고 있기 때문이다. [1]

광자기 전류 자장 센서는 Fig. 1과 같이 송전선을 감싸는 자기 코아(core)에 센서헤드가 부착된 형태를 가지며, 센서헤드는, 광원(LED), 광섬유(optical fiber), 로드렌즈(rod lens), 편광자(PBS), 광자기 재료(garnet film), 검광자(PBS), 로드렌즈(rod lens), 광검출기(Ph. D)로 구성되어 있으며, 광원에서 나온 빛은 화살표로 나타낸 것 같은 경로를 통해 광검출기로 들어가고, 작동 원리는 다음과 같다. 송전선에 전류가 흐르면 자장이 발생되는데, 이 자장은 광자기 재료를 자화시킨다. 이때, 광원으로부터 나온 빛을 편광자를 통과시켜 직선 편광을 만든후, 광자기 재료에 조사하면, 광자기 재료가 자화된 정도에 비례하여 편광면이 회전한다(광자기 효과). 이 빛을 검광자에 통과시켜, 편광면이 회전된 정도를 빛의 세기로 바꾼후 광검출기를 이용하여 전압 신호로 측정한다. [2]

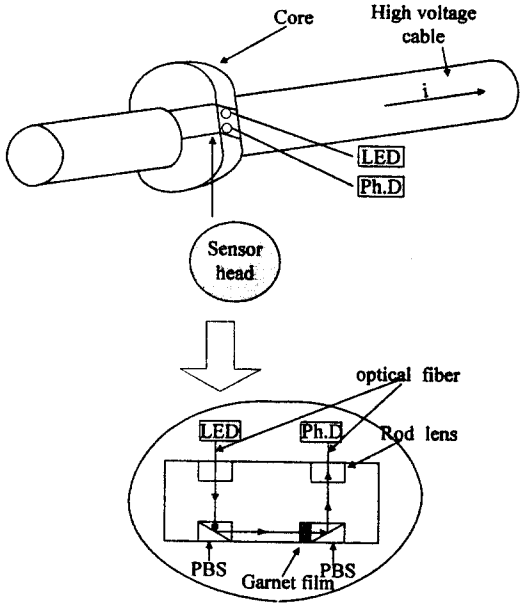

Fig. 1. Schematic diagram of magneto-optic electrical current and magnetic field sensor.

광자기 전류 자장 센서의 핵심부품은 광자기재료로써 그 성능지수 *FOM*(Figure of merit)는 다음과 같이 나타낼 수 있다. [1]

$$FOM = V(\lambda, T)/a(\lambda, T)$$

여기서, V는 재료의 베르데(Verdet)상수이고, a는 흡광계수로, 둘다 광원의 파장 λ와 온도 T의 함수이다. 베르데상수란, 단위길이당, 단위자장당의 투과광에 대한 광자기 회전각(Faraday 회전각)를 말한다.

따라서, 광자기 전류 자장 센서용 재료로써 요구되는 특성으로는 1) 베르데 상수가 크고, 2) 삽입손실(광흡수)가 작아야하며, 3) 자기 히스테리시스가 작고, 포화자장이 크며, 4) 베르데 상수의 온도 의존성이 작아야 한다는 점등을 들 수 있다. 이중 1), 2)는 큰 신호를 얻기 위함이고, 3)은 센서로써의 직선성 및 넓은 측정범위을 확보하기 위함이며, 4)는 광자기 전류 자장 센서가 주로 옥외에서 사용되므로 기온등의 변화에 의존하지 않아야 하기 때문이다.

이러한 요구조건들을 고려하여, 광자기 전류 자장 센서용 재료로써, 자성가넷 박막이 활발히 연구개발되고 있다. [1, 3, 4] 그 이유는, 자성가넷이, 1), 2)의 조건 면에서 뛰어난 재료이기 때문이다. 또한, 가넷에 Bi를 치환하면 성능지수가 크게 증가하는 것이 알려져 있으므로 [5], 현재, 연구개발의 초점은 Bi치환 가넷 박막에 모아져있다. 본 연구에서는, Wada [6] 등이 베르데 상수의 온도계수가 가장 작은 것으로 보고한 $Bi_{1.3}Gd_{0.4}Y_{1.3}Fe_5O_{12}$ 막을 LPE법으로 제조하여, 자기 및 광자기 특성을 조사하고, 센서를 구성하여 센서 특성을 조사했다.

Ⅱ. 실 험 방 법

단결정 가넷 박막을 액상 에피탁시(LPE)법으로 성장시켰다. 온도 제어 정밀도 1 ℃의 3-zone 전기로를 사용했고, flux로는 $PbO\text{-}Bi_2O_3\text{-}B_2O_3$를, 기판으로는 단결정 GCMZGG ($(GdCaMg)_3(ZrGa)_5O_{12}$) wafer(직경 1 inch, 격자상수 : 1.2497 nm)를 사용하여, 800 ℃에서 단결정 Bi 및 Gd 치환 YIG(Bi, Gd : YIG)을 성장시켰다. 제조한 박막의 화학 조성은 XRF로 측정한 결과 $Bi_{1.3}Gd_{0.4}Y_{1.3}Fe_5O_{12}$ 이었고, 막후는 micrometer로 측정한 결과 약 75 μm 이었으며, 막 성장 속도는 약 1 μm/min 이었다.

제조한 박막의 Faraday 히스테리시스 루우프, Faraday 회전각 및 포화자장의 온도 의존성을 Faraday loop tracer를 사용하여 파장 0.85 μm에서 최대 인가 자장 3 kOe를 막면에 수직으로 인가하여 측정했다. 제조한 막의 질을 평가하기 위해서 상자성 자기공명(EPR, Electron Paramagnetic Resonance)장치를 사용하여, 마이크로파 주파수 9.8 GHz에서 인가자장을 변화시키며 자기공명 흡수선의 반치폭을 측정했다.

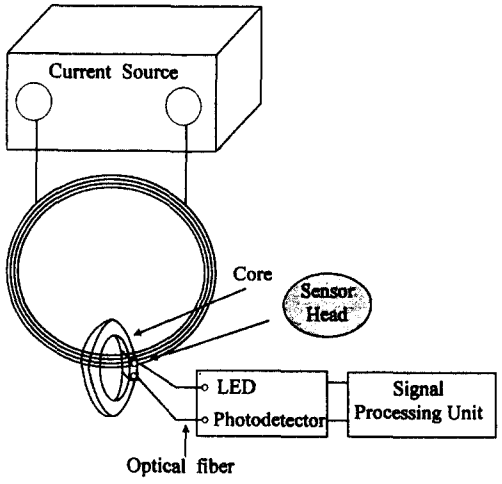

Fig. 2. Schematic diagram of sensor property measurement system.

또한, 막을 성장시킨후 기판 뒷면에 반사방지막으로 MgF_2 박막을 진공증착시킨후, 센서헤드에 장착하여 코아를 결합한 다음 Fig. 2와 같은 장치를 이용하여 센서특성을 측정했다. 그림에서 current source는 60 Hz의 교류 전류원이고, 여기에 원형으로 나타낸 권선수 10회의 전선을 연결시켰다. 권선수를 10회로 한 것은 자장의 세기를 10배로 하여 측정을 용이하게 하기 위함이다. 이 전선을 송전선의 모형으로 하여, 이 전선이 센서 코아를 관통하게 설치한후, 교류 전류원의 세기를 변화시키면서, 센서로부터 얻어지는 신호를 측정했다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

Fig. 3는 제조한 막을 EPR을 이용하여 자기공명 흡수라인을 측정한 것으로 그림에는 미분한 형태를 나타냈다. 그림으로부터 측정한 반치폭은 약 3 Oe이었다. 통상 Bi와 Gd 등을 치환한 YIG 막의 자기공명 흡수 반치폭이 수 10 Oe-수 100 Oe인 것[7]과 비교하면 본 실험에서 제조한 막은 결함이 적고 막질이 우수함을 알 수 있다.

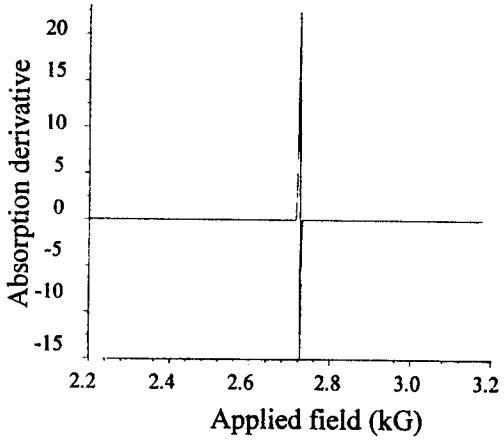

Fig. 3. Magnetic resonance aborption derivative of Bi, Gd : YIG films traced at 9.8 GHz by sweeping magnetic field.

Fig. 4에 실온에서 측정한 Faraday 히스테리시스 루우프를 나타냈다. 그림에서 보듯이 제조한 막은 히스테리시스가 거의 없고 직선성이 양호한 연자성 특성을 나타내고, 포화 Faraday 회전각 $\theta_{F(sat)}$은 45°, 포화자장 H_S는 약 1.1 kOe 임을 알 수 있다. 센서의 광검출기에 유입되는 빛의 강도, 즉 신호의 크기는 $\cos^2(\theta_F+\psi)$에 비례한다. [8] 여기서, θ_F는 Faraday 회전각을 나타내고, ψ는 편광자와 검광자의 투과축 사이의 각도를 나타낸다. $\cos^2(\theta_F+\psi)$를 ψ의 함수로 보고 미분하여 최대가 되는 ψ 값을 구하면 45°가 된다. 따라서, 통상, 신호의 크기를 최대로 하기 위해 ψ를 45°로 맞춘다. 그러므로, 신호의 크기에 비례하는 $\cos^2(\theta_F+\psi)$ 함수의 제1상한의 값을 모두 사용하기 위해서는 θ_F가 0°-45° 사이(따라서, $\theta_{F(sat)}$은 45°, $\theta_F+\psi$ 는 0°-90° 사이)에서 변화시키는 것이 요구되는데, 본 실험의 시료의 경우 이 조건이 달성된 것을 알 수 있다.

포화자장 H_S 가 크면 측정할 수 있는 전류의 범위가 커지는데, 본 실험에서 얻은 포화자장은, Kamada[9] 등이 $(TbY)_3Fe_5O_{12}$ 막에 대해 보고한 값 1.1 kOe와 동일하고, Itoh[10] 등이 $(BiGdY)_3Fe_5O_{12}$ 막과 $(BiGdLaY)_3(FeGa)_5O_{12}$ 막에 대해 각각 보고한 1.5 kOe와 0.5 kOe 사이의 값이다.

히스테리시스 루우프가 직선이라고 가정하고 계산한 베르데 상수, 즉 $V=\theta_{F(sat)}/H_S$ 는 5.6°/(Oe, cm)으로, Wada 등[6]이 보고한 동일 조성의 막의 베르데 상수 5.0°/(Oe, cm) 보다 큰 값을 얻었다. 베르데 상수가 크면 감도가 크므로 응용상 유리한데, 큰 베르데 상수를 나타내는 원인으로는 본 실험에서 제조한 막이 자기공명 특성에서도 언급했듯이 결함이 적으므로 자벽의 이동이 보다 자유롭기 때문으로 추정된다.

Fig. 5는 Faraday 회전각의 온도 의존성을 나타낸다. 그림으로부터 Faraday 회전각은 온도가 증가함에 따라 단조감소 하여, 약 300 ℃에서 영이 되는 것으로부터 제조한 막의 큐리 온도는 약 300 ℃임을 알수 있다. Fig. 6에는 포화자장의 온도 의존성을 나타냈다. 포화자장도 온

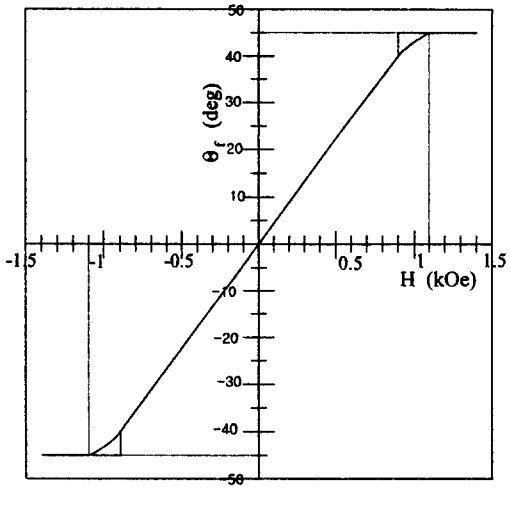

Fig. 4. Faraday hysteresis loop of Bi, Gd : YIG film traced at 25 ℃.

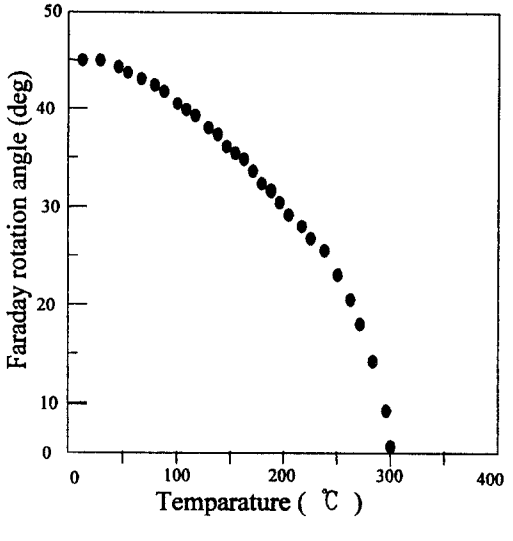

Fig. 5. Temperature dependence of Faraday rotation angle of Bi, Gd : YIG film.

도가 증가함에 따라 단조 감소함을 알 수 있다. Fig. 5와 6으로부터 각 온도에서의 베르데 상수 $V(T)=\theta_{F(sat)}(T)/H_s(T)$를 계산한 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서부터 0 ℃-100 ℃ 에서의 베르데 상수의 온도계수 $TCV=(V_{max}-V_{min})/V_{max}$ 는 약 0.0056°/(Oe, cm, ℃)로 양호한 온도 안정성을 나타냄을 알 수 있다. 이 값은 Wada 등[6]의 보고한 0.005°/(Oe, cm, ℃)와 유사한 값이다. 베르데 상수의 온도 의존성을 직선이라고 가정하고 계산하면 −20 ℃ −100 ℃에서의 온도계수는 약 0.006°/(Oe, cm, ℃)이 될 것으로 추정된다.

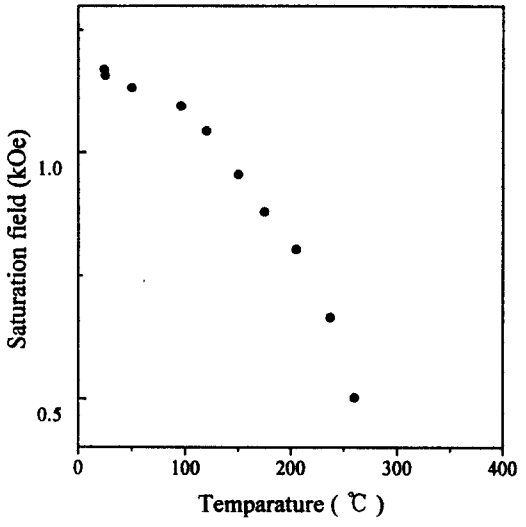

Fig. 6. Temperature dependence of saturation field of Bi, Gd : YIG flim.

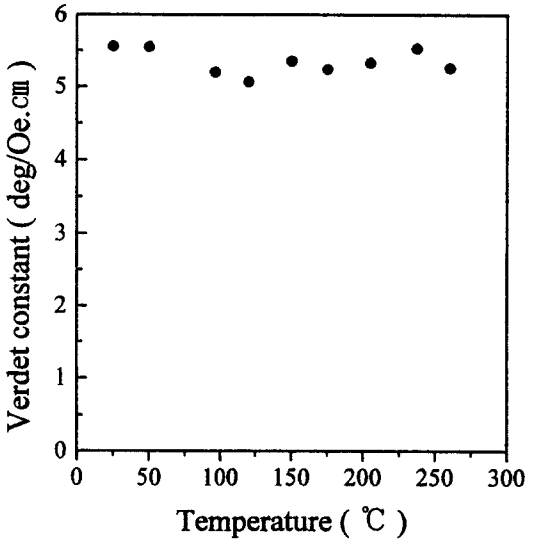

Fig. 7. Temperature dependence of Verdet constant of Bi, Gd : YIG film. It is assumed that the Faraday loop is linear up to saturation.

Fig. 8은 앞에서 언급한 센서 특성 측정 장치(Fig. 2)를 사용하여, 전류의 세기를 증가시키며, 광검출기의 출력을 조사한 결과이다. 전류의 세기가 약 3 A 이상에서는 양호한 직선성이 얻어지는 것으로부터 우수한 센서 특성을 나타냄을 알 수 있다. 그림에는 나타내지 않았지만, 양호한 직선성은 300 A 까지 얻어 졌다.

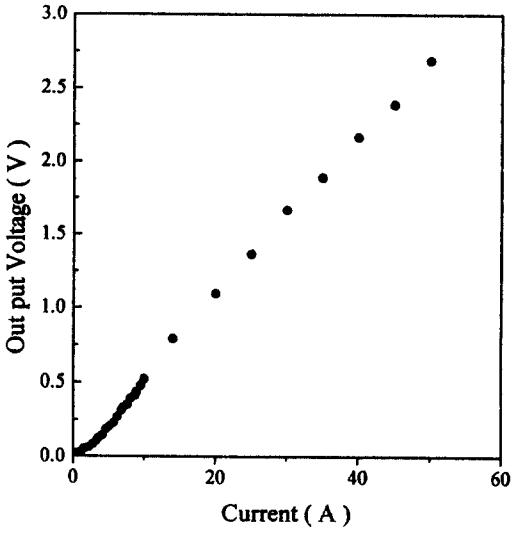

Fig. 8. Sensor signal as a function of current measured by using the system shown.in Fig. 2.

Ⅳ. 결 론

LPE법으로 양질의 단결정 Bi, Gd : YIG 막을 GCMZGG 기판상에 성장시켜 광자기 특성 및 센서특성을 측정했다. 제조한 막은 히스테리시스가 거의 없고 직선성이 양호한 연자성 특성을 나타냈으며, 상온에서의 포화 Faraday 회전각은 45°, 포화자장은 약 1.1 kOe, 베르데 상수는 5.6°/(cm, Oe)이었으며, 베르데 상수의 온도의존성은 0 ℃-100 ℃에서 약 0.0056°/(Oe, cm, ℃)로 우수한 특성을 나타냈다. 또한, 제조한 막을 사용하여 센서특성을 측정한 결과 전류의 세기가 3 A-300 A 에서 양호한 직선성이 얻어졌다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(951-0801-019-2) 및 한국과학재단의 지역협력연구센터 연구과제 연구비의 지원에 의한 것이며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] P. I. Nikitin, A. N. Grigorenko and A. I. Savchuk, Sensors and Materials, **4**, 205 (1993).

[2] W. Tolksdorf and C. -P. Klages, Thin Solid Films, **114**, 33 (1984).

[3] O. Kamada, H. Minemoto and S. Ishizuka, J. Appl. Phys. **61**, 3268 (1987).

[4] N. Itoh, H. Minemoto, D. Ishiko and S. Ishizuka, IEEE, Trans. Magn. **6** (1995).

[5] P. Hansen, W. Tolksdorf and K. Witter, IEEE, Trans. Magn. **MAG-20**, 1099 (1984).

[6] M. Wada, H. Fudo, S. Eagwa, S. Ishizuka, D. Ishiko and N. Itoh, T. Iee Japan, **112-C**, 793 (1992) (In Japanese).

[7] H. Stumpf and K. Wildermuth, Vieweg Tracts in Pure and Applied Physic, Volume 5, Lengericher Handelsdruckerei, Lengerich, Germany-West, p. 176 (1981).

[8] J. Cho, Doctoral disertation, Tokyo Institute of Technology, Physical Electronics, p. 18 (1991) (In Japanese).

[9] O. Kamada, H. Minemoto and S. Ishizuka, J. Appl. Phys. **61**, 3268 (1987).

[10] N. Itoh, H. Minemoto, D. Ishoko and S. Ishizuka, IEEE Trans. Magn. **31**, 3191 (1995).

Fabrication and Sensor Properties of Garnet Thin Films for Magneto-Optic Electrical Current and Magnetic Field Sensor

Duksil Kim and Jaekyong Cho

Department of Electronic Materials Engineering,

Research Center for Aircraft Parts Technology,

Gyeongsang National University, Chinju 660-701

(Received 27 November 1997, in final form 23 March 1998)

High quality single crystal Bi, Gd : YIG films have been grown on GCMZGG wafers by LPE techniques. The magnetic, magneto-optic and sensor properties of the films have been investigated. The films showed high linearity with almost no hysteresis, saturaton Faraday rotation angle of 45°, saturation field of about 1.1 kOe, Verdet constant of 5.6°/(Oe, cm) at room temperature, and temperature coefficient of Verdet constant of 0.0056°/(Oe, cm, ℃) in the range of 0 ℃~100 ℃. The sensor made out of the film exhibited highly linear signal in the range of 3 A-300 A.