

## 광 CT용 자성 가넷 막의 에피택시 육성 및 평가

조재경\*

경상대학교 공과대학 전기전자공학부, 공학연구원, 경남 진주시 가좌동 900번지, 600-701

(2007년 10월 9일 받음, 2007년 12월 11일 최종수정본 받음)

본 논문에서는 출발원료 배합비 및 육성 파라미터가 LPE(Liquid Phase Epitaxy)법으로 육성된 자성 가넷 막의 특성에 미치는 영향을 조사하여, 광 CT의 페러데이 회전자용으로 적합한 막의 육성 조건을 제시한다. 막을 평가하기 위하여 조사한 특성은 막후, 표면 모폴로지, X 선 회절, 격자상수, 막과 기판(단결정 비자성 가넷 웨이퍼) 사이의 격자상수의 부정합, 페러데이 회전각 등이었다. 또한, 육성된 자성 가넷 막을 이용하여 광 CT를 제작하고, 성능을 평가했다.

주제어 : 단결정 자성 가넷 막, 에피택시 육성, 광 CT, 페러데이 회전각, LPE

### I. 서 론

산업이 발전함에 따라 전력수요가 증가되어 송배전 계통의 고전압화 및 대용량화가 진행되어 왔다. 이에 따라 송배전 계통의 전류를 측정하는 CT(Current Transformer, 변류기)도 고전압 및 대전류 하에서 사용될 수 있도록 연구 개발되어 왔다. 기존의 CT는 자기코어에 코일을 감은 것으로서, 도선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자장이 자기코어의 자속을 변화시키고, 이 자속 변화에 의해 유도(전자기유도)되는 기전력에 의해 상기 코일에 전류가 발생하는 것을 이용하여 도선의 전류를 측정한다. 따라서, 기존의 CT는 송배전 계통이 고전압화되면 절연을 위하여 대형화 고가화된다는 단점이 있다.

이에 비해 광 CT는 도선의 전류를 절연체인 센싱부의 빛의 성질 변화를 이용하여 측정하며, 절연체인 광섬유 케이블을 이용하여 센싱된 신호를 전송하므로 절연의 측면에서 매우 유리하다. 또한 광 CT는 동작대역폭이 크고, 경량이며 소형이고, 사고시에도 위험성이 상대적으로 적다는 장점을 가지고 있다[1].

광 CT는 지난 30년간 연구되어 왔으므로, 여러 종류의 것들이 연구개발되어 왔다. 예를 들면, 단결정 자성 가넷 결정 막을 페러데이 회전자(자장에 의해 빛의 편광면을 회전시키는 소자, 페러데이 셀이라고도 함)로 사용하는 것, 반자성 납 유리를 페러데이 회전자로 사용하는 것, 광섬유 자체를 페러데이 회전자로 사용하는 것, 광섬유에 자기변형 피복을 입히거나 자기변형 원통에 광섬유를 감아서 전류에 의한 자장에 의해 광섬유가 변형되어 위상차가 발생하는 것을 이용하는 것 등이 알려져 있다[2].

이 중에서 단결정 자성 가넷 막을 사용하는 광 CT는, 광

CT 일반이 지니고 있는 장점이외에, 감도가 높고, 제작이 용이하며, 소형, 경량이라는 장점을 지니고 있다. 그러나, 광 CT용 양질의 단결정 자성 가넷 막의 제조방법은 다양한 공정 파라미터의 엄밀한 제어를 필요로 하는 고도의 기술로서 잘 알려져 있지 않으며, 각 공정 파라미터의 역할 또한 명확하게 알려져 있지 않다.

이에 본 논문에서는 광 CT용 단결정 자성 가넷 막을 LPE(Liquid Phase Epitaxy)법으로 육성하여, 양질의 단결정 자성 가넷 막이 얻어지는 제조 조건을 명확히 하고, 각 공정 파라미터의 역할을 고찰하며, 육성한 막을 사용하여 광 CT를 제작하여, 특성을 평가한다.

### II. 광 CT의 동작원리

Fig. 1은 본 연구에 사용된 광 CT의 개략적 구조를 나타낸다. 광원으로는 파장 850 nm의 LED(Light Emitting Diode)를 사용했다. 광원으로부터 나온 광은 광섬유를 경유한 후, 로드렌즈에 의해서 평행광이 되고, PBS(Polarizing Beam Splitter)에 의해 90도 굴절되면서 직선편광이 되어 페러데이 회전자(FR, Faraday Rotator)로 사용된 자성 가넷 막을 투과한다. 이 때 자성 가넷 막은 측정하고자 하는 도체의 교류 전류에 의해 만들어지는 자장에 비례하여 광의 편광면을 회전시킨다. 이때 편광면이 회전된 각을 페러데이 회전각  $\theta_F$ 라고 하며, 다음 식으로 주어진다.

$$\theta_F = V H t \cos \theta$$

여기서  $V$ 는 베르데(Verdet) 상수,  $H$ 는 자장의 세기,  $t$ 는 페러데이 회전자(자성 가넷 막)의 두께,  $\theta$ 는 광의 진행방향과 자장이 이루는 각도이다[3].

편광면이 회전된 광은 45° 돌려서 설치된 PBS(검광자)를

\*Tel: (055) 751-5364, E-mail: jkcho@gnu.ac.kr

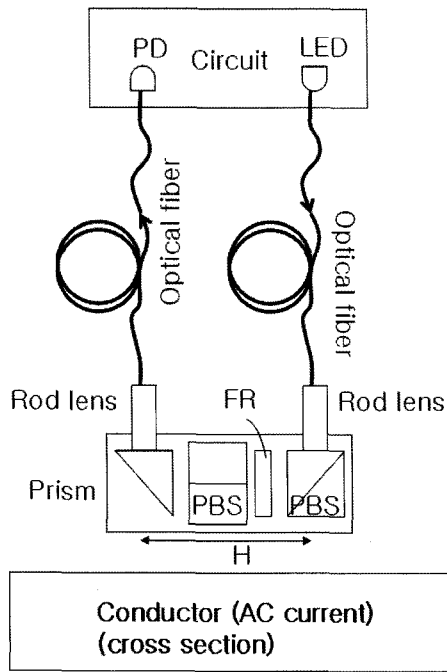


Fig. 1. 광 CT의 구조를 나타내는 개략도.

가치면서 광 강도로 변환된다. 이 때 PBS를 45° 돌려서 설치한 것은 광학바이어스를 걸어서, 광 CT의 동작점을 선형적인 영역으로 이동시키기 위함이다. 참고로, PBS가 45° 회전되어 있으므로, 페러데이 회전각이 +45° 일 때 최대의 출력이 얻어지고, -45° 일 때 최소의 출력이 얻어진다.

광 강도로 변환된 광은 프리즘에 의해 90° 굴절된 후, 로드렌즈에 의해 집속되어 광섬유를 통과한 후 포토다이오드(PD)에 이르러서 광전변환되어 전기신호(전류)로 바뀐다. 이 전류 신호는 신호처리 회로(Circuit)에 의해서 전압 신호로 변환되고, 필터를 이용하여 직류성분과 교류성분으로 나누어진 후, (교류성분/직류성분)의 연산을 거치고, 증폭되어 최종 출력전압이 얻어진다. (교류성분/직류성분)의 연산을 수행하는 이유는 광원의 강도 변화가 출력값에 영향을 미치지 않게 하기 위함이다[3].

### III. 실험

#### 1. 자성 가넷 막의 육성 및 특성 측정 방법

화학식  $R_3Fe_5O_{12}$ (R; 희토류, Y, 또는 Bi 이온)로 표시되는 자성 가넷 막을 LPE(Liquid Phase Epitaxy)법을 이용하여 육성했다.

출발 원료로는 Table I에 나타낸 것과 같은 분말들을 사용했다. 이 분말들을 Table I에 나타낸 중량비로 평량한 후, 볼 밀로 12시간 혼합하였다. Table I에서, 앞의 세 원료( $Gd_2O_3$ ,  $Y_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ )는 자성가넷의 구성 이온을 포함하는 원료이며,

Table I. 출발원료 분말 배합비(중량비).

	$Gd_2O_3$	$Y_2O_3$	$Fe_2O_3$	$Bi_2O_3$	PbO	$B_2O_3$
wt%	0.41	0.31	6.07	42.86	48.21	2.14

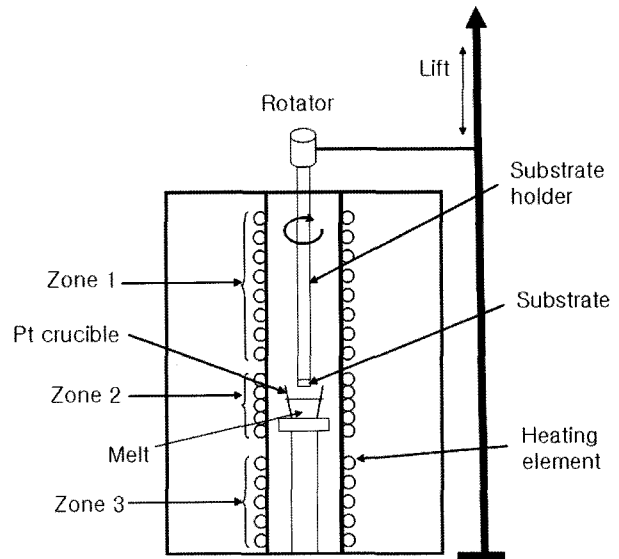


Fig. 2. LPE 장치의 구조를 나타내는 개략도.

뒤의 세 원료( $Bi_2O_3$ , PbO,  $B_2O_3$ )는 공용 현상을 이용하여 혼합 분말의 용점을 낮추기 위한 플럭스에 해당된다. 단  $Bi_2O_3$ 는 자성 가넷의 구성 이온이면서 동시에 플럭스의 역할도 수행한다[4].

혼합된 분말을 백금도가니에 넣고, Fig. 2과 같은 수직형 LPE로의 중앙에 설치하여 1000 °C까지 온도를 올려서 분말을 녹여 용융액(Melt)을 만들고, 용융액이 잘 섞이도록 알루미늄 봉에 3개의 백금 봉이 장착된 교반기(기판 홀더도 동일한 형태임)로 약 60분간 교반했다. 그 후 용융액을 육성온도(750~850 °C)까지 서냉하여 과포화 용융액 상태로 유지했다.

LPE로를 포함하는 LPE 단결정 육성장치는 자체 설계하여 외주 제작했으며, LPE 로는 자성 가넷 막을 육성시키는 중앙부의 온도를 정밀하게 제어할 수 있도록 3 부분(Zone 1, 2, 3)으로 나누어 열선이 설치되어 각 부분의 온도를 달리 제어할 수 있도록 설계했으며, 교반기(또는 기판 홀더)를 장착하는 LPE 장치의 윗부분에는 모터를 설치하여 교반기(또는 기판 홀더)를 회전 운동과 상하 운동시킬 수 있도록 제작됐다.

한편 기판으로는, (111) 면이 표면과 평행하고, 격자상수가 1.2493 nm이며, 두께가 500  $\mu\text{m}$ 인 CMZGGG( $Gd_{3-x}Ca_xGa_{5-(x+2y)}Mg_yZr_{x+y}O_{12}$ , Calcium Magnesium Zirconium substituted Gadolinium Gallium Garnet) 단결정 웨이퍼를 사용했다. 기판은 사용 전에 다음과 같이 세정했다. 우선 80 °C의

실험실용 세제로 세척한 후, 증류수에 넣고 초음파 세척을 하고, 아세톤, 알콜에서 초음파 세척을 했다. 이와 같이 세척된 기판을 기판 홀더에 장착했다. 장착된 기판을 다시 아세톤, 알콜, 증류수 순으로 초음파 세척을 한 후, 마지막으로 질소 가스로 불어서 건조시켰다.

기판이 장착된 기판 홀더를 LPE 장치 상부의 모터에 장착하고, 기판을 내려서 LPE 로의 상부에 위치한 예열부(zone 1)의 위쪽에 위치하게 하여 수 분 동안 유지시켜서 예열했다. 그 후, 기판을 LPE로의 중앙부로 내려서 과포화 용융액의 표면에서 약 3 cm 위쪽까지 접근시킨 다음 약 5분간 유지시켰다. 이는 기판의 온도를 용융액의 온도까지 올려서 기판과 용융액이 열평형을 이루도록 하기 위함이다. 그 다음 기판이 용융액의 중간 부분에 잠기도록 기판을 내려서 자성 가넷 막의 육성을 시작했다. 육성 중에는 기판을 75 rpm으로 2초 주기로 시계 방향 및 반 시계 방향으로 교대로 회전시켜서, 용융액이 기판 전체에 골고루 접촉되도록 했다. 이와 같이 하여 원하는 육성 시간만큼 자성 가넷 막을 육성시킨 후, 막이 육성된 기판을 용융액 바로 위로 올린 후, 400 rpm으로 30초간 회전시켜서 표면에 부착되어 있는 플럭스를 제거했다. 그 다음 빠른 속도로 LPE로 상부의 예열부까지 올려 잔여 플럭스를 가능한한 급냉시켰다. 이는 플럭스 속에서 자발 핵 생성이 일어나는 것을 억제하기 위함이다. 이 때 LPE로 밖으로 꺼내는 등 급냉이 지나치면 막과 기판이 열쇼크에 의해 깨지는 경우가 많았다. 그 다음 LPE로의 전원을 끄고 실온까지 냉각시켰다.

막이 육성된 기판이 장착된 기판 홀더를 LPE 장치로부터 탈착하여, 막이 육성된 기판을 홀더로부터 분리시킨 후, 80 °C, 50 % 질산 용액에 담가서 표면에 남아있는 플럭스를 제거했다.

육성된 가넷 막의 막후는 마이크로미터로 측정했으며, 결정 구조는 XRD(X-Ray Diffractometer)를 이용하고 Cu K $\alpha$  선을 사용하여 분석했으며, 페러데이 회전각은 페러데이 스펙트로미터를 이용하여 측정했다.

**2. 광 CT 제작 및 특성 평가 방법**

육성된 자성 가넷 막 중에서 포화 페러데이 회전각이 45 도인 것을 선정하여, 광 CT의 페러데이 회전자로 사용했다. 제작한 광 CT는 Fig. 1과 같은 구조이었다. 로드렌즈, PBS(Plarizing Beam Splitter), 페러데이회전자(FR), PBS, 프리즘, 로드렌즈의 광축 정렬은 다음과 같이 했다. 방진 광학 테이블 상에 설치된 5축(x, y, z, x-tilt, y-tilt) 스테이지에 상기 광학 부품들을 위치시키고, 5축 스테이지에 장착되어 있는 마이크로미터들을 조작하여 광축을 정렬한 후, 광학 부품들을 케이스에 자외선 경화 광학 접착제를 이용하여 고정시

켰다.

이와 같이 제작한 광 CT를 60 Hz의 교류전류원에 연결된 도전위에 설치하고, 전류 값을 변화시키며 출력전압의 선형성 및 선형성 오차를 오실로스코프로 관찰하며, 표준CT와 비교하여 측정했다.

**IV. 결과 및 고찰**

**1. 자성 가넷 막의 육성 및 특성**

Fig. 3는 육성 시간을 80분으로 했을 때의 육성 온도에 따른 가넷 막의 막후(*t*)를 나타낸다. 그림에서와 같이 막후는 육성 온도가 증가함에 따라 단조 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 육성 온도가 증가하면 용융액의 과포화 정도가 감소하여 육성 속도가 둔화되기 때문으로 생각된다.

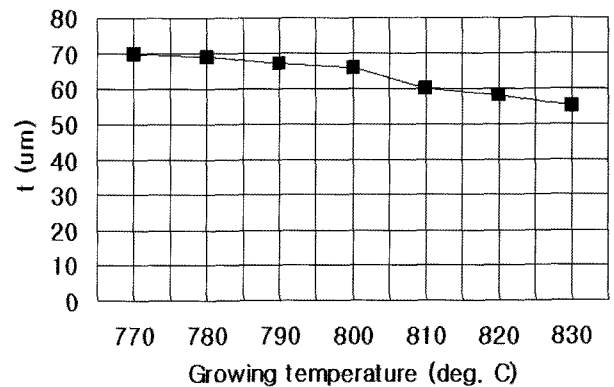


Fig. 3. 육성 시간이 80분이었을 때의 육성온도에 따른 가넷 막의 막후(*t*).

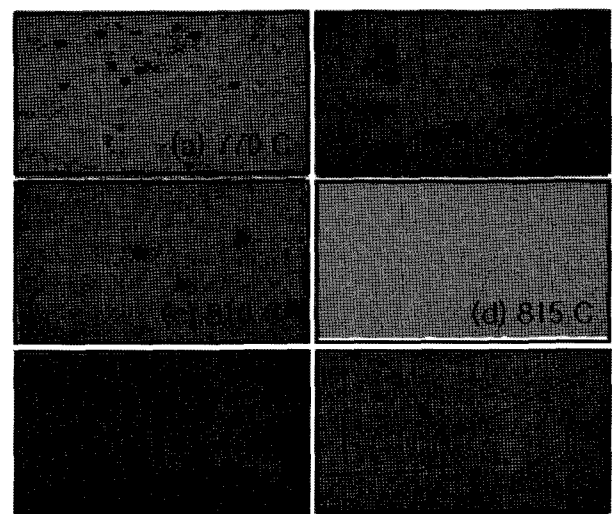


Fig. 4. 육성 온도 (a) 770 °C, (b) 790 °C, (c) 810 °C, (d) 815 °C, (e) 820 °C, (f) 830 °C에서 육성된 자성 가넷 막의 광현미경 표면 사진.

Fig. 4는 육성 시간을 80분으로 하고, 육성 온도를 달리하여 육성시킨 가넷 막의 광 현미경에 의한 표면 사진을 나타낸다. 그림에서 보듯이 810°C(a, b, c) 이하에서 육성시킨 막에는 석출 결합들이 관찰되었다. 이는 이 영역에서는 용융액의 과포화 정도가 너무 커서 용융액으로부터 자발 핵 생성이 일어난 것으로 추정된다. 815~820°C(d, e) 영역에서는 경면의 표면을 갖는 양질의 막이 얻어졌다. 830°C(f) 이상에서는 크랙이 관찰되었다. 이는 후술하는 것과 같이 이 영역에서는 가넷 막이 인장 응력을 과도하게 받기 때문으로 생각된다.

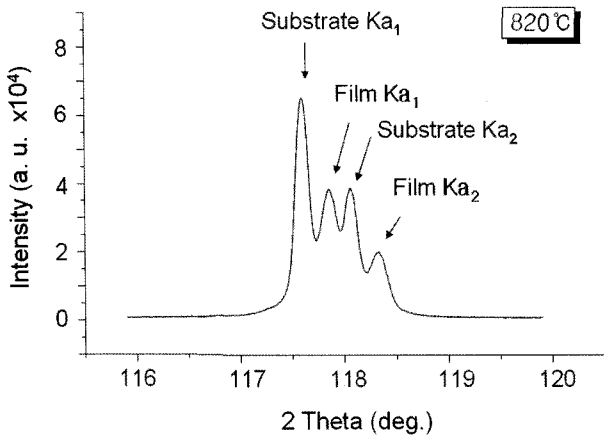


Fig. 5. 820°C에서 육성된 자성 가넷 막의 XRD 다이어그램.

Fig. 5은 육성 시간을 80분으로 하고, 820°C에서 육성된 가넷 막의 (888)면의 XRD 다이어그램을 나타낸다. 그림에서와 같이 (888) 라인이 선명하게 나타나고,  $Ka_1$  라인과  $Ka_2$  라인이 선명하게 분리되는 것으로부터, 육성된 막은 기판 위에 에피택시 육성된 것으로 생각된다. 또한, 그림에는 나타나지 않았지만, 육성 온도가 증가함에 따라 가넷 막의 (888) 라인의 2θ 값은 각도가 큰 쪽으로 이동했다.

XRD 다이어그램들로부터 가넷 막의 격자상수( $a_f$ )를 계산하여 Fig. 6에 나타냈다. 가넷 막의 격자상수는 육성 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 비교를 위하여, 기판(GCMZGG,  $a_s = 1.2493$  nm)의 격자상수를 점선으로 나타냈다. 앞에서 기술한 것과 같이 830°C 이상에서 육성된 가넷 막들에서는 크랙이 발견되었는데(Fig. 4), 그 이유는 이 영역에서는 가넷 막과 기판과의 격자상수 부정합이 크고, 또한, 가넷 막의 격자상수가 기판의 그것 보다 상당히 작으므로, 가넷 막에 인장 응력이 작용하기 때문으로 생각된다. 일반적으로 막들은 압축 응력에 비해 인장 응력에 의해서 쉽게 크랙이 발생되는 것이 알려져 있다. 육성 온도 820°C 이하에서도 가넷 막과 기판과의 격자상수 부정합은 존재하나, 크랙을 발생시킬 정도의 인장 응력을 발생시키지는 않는 것으로 생각된다.

아울러, 가넷 막의 격자상수가 육성 온도가 증가함에 따라 감소하는 것은 Bi 이온의 치환량이 감소하기 때문으로 생각된다. 육성 온도가 증가함에 따라서 Bi 이온의 치환량이 감소하는 이유는 육성온도가 증가하면 막 중의 Bi 이온이 용융액속으로 재용융되는 경향이 증가하기 때문으로 생각된다. Bi 이온의 이온 반경은 Bi 이온과 함께 가넷 결정 구조내의 12면체 양이온 자리를 점유하는 다른 이온들(Gd, Y 이온)의 그것 보다 크므로, Bi 이온의 치환량이 감소하면, 가넷 막의 격자상수는 감소한다[5].

이상에서와 같이, 광 CT용으로 사용할 수 있는 석출 결합과 크랙이 없는 양질의 가넷 막은 육성 온도 815~820°C 사이의 좁은 영역에서 얻어짐을 알 수 있다. 그러나 이 영역의 온도에서 육성된 가넷 막도, 위에서 언급한 것과 같이 막과 기판 간의 격자상수 부정합에 의해, 크랙은 발생되지 않았지만 인장 응력을 받고 있는 것으로 생각된다. 그리고 820°C에서 육성시킨 가넷 막의 화학조성을 ICP로 분석해 본 결과,

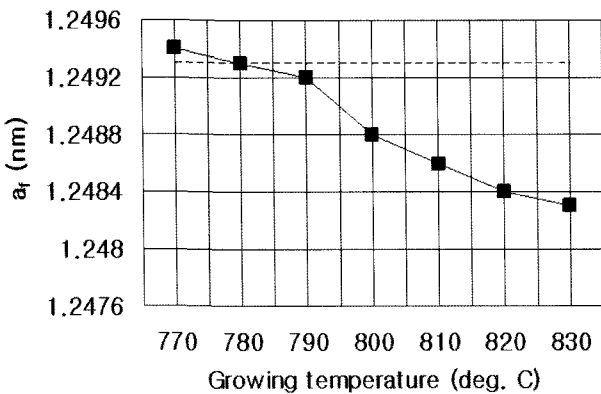


Fig. 6. 육성온도에 따른 가넷 막의 격자상수( $a_f$ ). 점선은 기판의 격자상수를 나타낸다.

Table II. 용융액 중의  $B_2O_3$  함량에 따른 육성된 가넷 막의 화학조성. 참고로 육성온도와 막후도 같이 나타냈음.

$B_2O_3$ content in melt (wt%)	Growing temperature (°C)	Film thickness ( $\mu$ m)	Film composition
2.14	820	60	$Bi_{0.61}Pb_{0.02}Y_{1.10}Gd_{1.27}Pt_{0.02}Fe_{4.98}O_{12}$
2.14	820	100	$Bi_{0.58}Pb_{0.02}Y_{1.00}Gd_{1.40}Pt_{0.02}Fe_{4.98}O_{12}$
3.5	800	70	$Bi_{0.82}Pb_{0.02}Y_{0.66}Gd_{1.56}Pt_{0.02}Fe_{4.98}O_{12}$
3.5	800	100	$Bi_{0.85}Pb_{0.02}Y_{0.60}Gd_{1.53}Pt_{0.02}Fe_{4.98}O_{12}$
3.5	800	130	$Bi_{0.90}Pb_{0.02}Y_{0.51}Gd_{1.57}Pt_{0.02}Fe_{4.98}O_{12}$

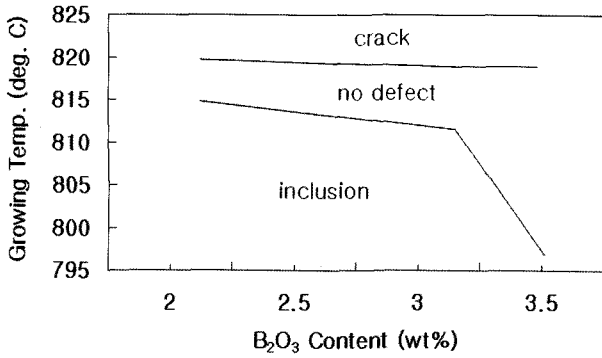


Fig. 7. 용융액 내의 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량에 따른 육성된 가넷 막의 결함 유무. crack은 크랙이 발생된 육성온도 영역을 나타내고, inclusion은 석출결함이 관찰된 육성온도 영역을 나타내며, no defect는 양질의 막이 얻어진 육성온도 영역을 나타낸다. 크랙과 석출결함 여부는 광 현미경을 이용하여 관찰했다.

Table II에 나타낸 것과 같이, Bi 함유량이 0.58~0.61 f.u. (formular unit) 로 작아서 단위 길이당의 페러데이 회전각이 작아, 광 CT로 제작시 감도가 낮을 것으로 예상된다.

이에, 위의 육성온도 보다 낮은 온도에서 양질의 가넷 막을 육성시키기 위하여, 용융액 중의 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량을 증가시켜는 실험을 수행했다. 이 때 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 증가되면 증가된 만큼 PbO의 함량을 감소시켰다. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 플럭스로서 함량이 증가 되면 용융액의 점도를 감소시키는 역할을 하는 것이 알려져 있다[5]. Fig. 7은 플럭스 내의 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량을 변화시켰을 때, 크랙이 발생하는 육성온도 영역(crack)과 석출 결함이 발생하는 육성온도 영역(inclusion)을 각 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량에 대해 나타낸 것이다. 따라서 그림에서 이 두 영역을 제외한 육성온도 영역(no defect)이 크랙과 석출 결함이 없는 양질의 막이 얻어지는 육성온도 영역이다. 그림으로부터, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 2.14 wt% 일 때에는 양질의 막이 얻어지는 육성온도 영역은 815~820 °C이며, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 3.21 wt%의 경우에는 812~819 °C이며, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 3.5 wt% 일 때에는 797~818 °C이었다.

이와 같이 용융액 내의 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 증가되면 양질의 막이 얻어지는 육성온도 영역이 낮아지고 넓어지는 것을 알 수 있다. 이는 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 증가되면 용융액의 점도가 낮아져서, 용융액이 보다 낮은 온도에서도 자발 핵 생성을 동반하지 않고 과포화 용융액 상태를 유지하기 때문으로 생각된다.

B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량을 3.5 wt%로 하여 800 °C에서 육성시킨 가넷 막의 화학조성을 ICP로 분석한 결과를 Table II에 나타냈다. 표에서 보듯이 이 경우의 막 중의 Bi 함량은 0.82~0.90 f.u.로, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 2.14 wt% 인 용융액을 이용하여 820 °C에서 육성시킨 막의 Bi 함량 0.58~0.61 f.u.(Table II 참조)보다 큰 값이 얻어짐을 알 수 있다. 따라서, 기판과 막 사이의 격자상수 부정합도 상대적으로 감소하여, 막에 가해지는 인장

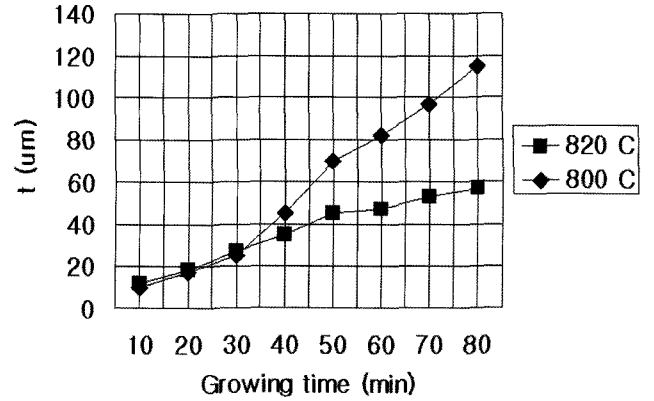


Fig. 8. 육성온도 800 °C와 820 °C일 때의 성장 시간에 따라 얻어지는 막후(*t*) 비교.

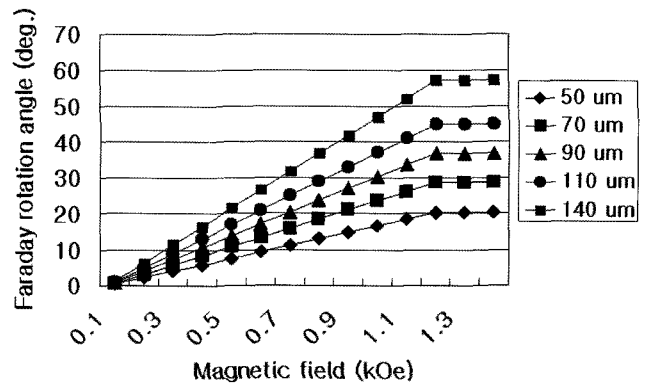


Fig. 9. 막후에 따른 페러데이 회전각.

응력이 상대적으로 작을 것으로 생각된다. 또한, 광 CT로 제작 시 감도도 증가할 것으로 예상된다. 이와 같이 800 °C에서 육성시킨 막의 Bi 함량이 증가하는 이유는, 앞에서 기술한 것과 같이, 육성온도가 낮을수록 막 내의 Bi 이온이 재용되는 경향이 감소하기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 용융액 내의 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 2.14 wt%이며 육성온도가 820 °C인 경우와 용융액 내의 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 3.5 wt%이며 육성온도가 800 °C인 경우에 대하여, 육성시간에 따른 막후(*t*)의 변화를 나타냈다. 그림에서 보듯이 육성온도가 상대적으로 낮은 800 °C의 경우가 막의 육성 속도가 더 빠른 것을 알 수 있다. 이것은 이 경우가 과포화도가 더 크므로 막의 석출(추적) 속도가 크기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 9은 800 °C에서 육성된 막후가 서로 다른 가넷 막들에 대해 자장을 인가하면서 페러데이 회전각을 측정된 결과를 나타낸다. 이 측정에 사용된 파장은 850 nm이었다. 막후에 관계없이 포화 자장은 약 1.2 kOe이었으며, 포화되기 전까지는 선형성을 나타냈다. 그림에서 보듯이 막후가 증가함에 따라, 기울기가 커지는 것으로부터, 베르데상수가 증가되는 것

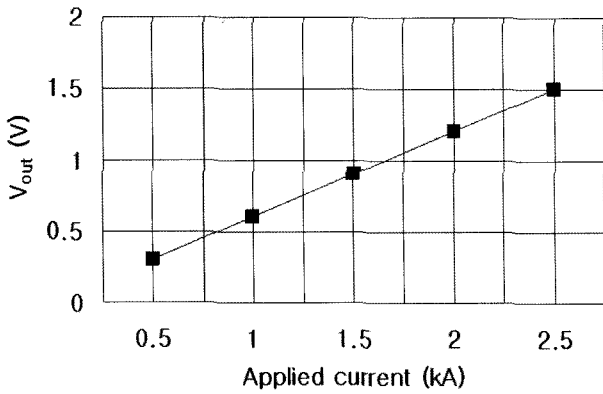


Fig. 10. 전류에 따른 광 CT의 출력전압( $V_{out}$ ).

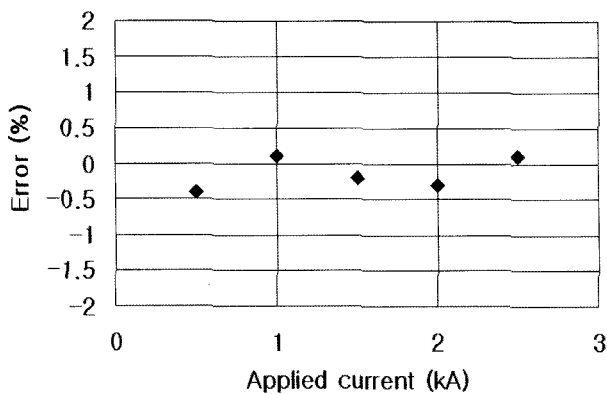


Fig. 11. 전류에 따른 광 CT의 출력전압의 선형성 오차(Error).

을 알 수 있으며, 광 CT에 사용시 감도가 증가될 것으로 예상된다.

## 2. 광 CT의 특성

육성된 가넷 막중에서 막후가 110  $\mu\text{m}$ 인 것의 포화 페러데이 회전각이 약 45° 이므로(Fig. 9 참조), 이 막을 페러데이 회전자로 선정하여, 광 CT를 제작하고 특성을 평가했다. 교류전류원에 연결된 도선에 장착된 광 CT는 sin 커브의 출력 전압을 나타냈다. (그림으로 나타내지는 않았음.) 이 sin 커브로부터 출력전압의 실효치( $V_{out}$ )를 계산하여 Fig. 10에 나타냈다. 그림에서 보듯이 출력전압은 전류 값에 대해 선형적이었으며, 제작한 광 CT의 선형성 오차는 Fig. 11에 나타낸 것과 같이  $\pm 0.5\%$  이내 이었다.

## V. 결 론

광 CT용 자성 가넷 막을 LPE법으로 CMZGGG 기판 상에 에피택시 육성시켰다. 육성온도가 낮을 때에는 과포화도가 커서 자발 핵 생성에 의한 석출결함이 관찰되었으며, 한편, 육성온도가 높을 때에는 막의 격자상수가 기판의 격자 상수보다 매우 작아져서 막이 인장 응력을 받아 크랙이 발생되었다. 석출결함이나 크랙이 없는 양질의 막은 좁은 육성온도 영역에서만 얻어졌다. 예를 들어  $\text{B}_2\text{O}_3$  함량이 2.14 wt%인 용융액을 사용하였을 경우에는 육성온도 815~820 °C에서 양질의 막이 얻어졌다. 용융액 중의  $\text{B}_2\text{O}_3$  함량을 증가시키면 양질의 막이 얻어지는 육성온도 영역이 낮아지고 넓어지는 경향을 보였다. 이는  $\text{B}_2\text{O}_3$  함량이 증가되면 용융액의 점도가 낮아져서, 용융액이 보다 낮은 온도에서도 자발 핵 생성을 동반하지 않고 과포화 용융액 상태를 유지하기 때문으로 생각된다. 구체적으로는  $\text{B}_2\text{O}_3$  함량이 3.21 wt% 일 때의 양질의 막이 얻어지는 육성온도는 812~819 °C이었으며,  $\text{B}_2\text{O}_3$  함량이 3.5 wt% 일 때에는 797~818 °C이었다.  $\text{B}_2\text{O}_3$  함량이 3.5 wt% 인 용융액을 이용하여 800 °C에서 육성시킨 막은 용융액의 과포화도가 커서 막 육성 속도가 상대적으로 컸으며, 막 중의 Bi 함량도 상대적으로 커서, 큰 단위 길이 당 페러데이 회전각이 얻어졌다. 포화 페러데이 회전각이 45°인 막후 110  $\mu\text{m}$ 의 막을 선정하여 광 CT를 제작하여 선형성을 평가한 결과 오차  $\pm 0.5\%$  내의 양호한 선형성을 나타냈다.

## 참고문헌

- [1] P. Niewczas, W. I. Madden, A. Cruden, and J. R. McDonald, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, **50**(5), 1071 (2001).
- [2] Y. N. Ning, Z. P. Wang, A. W. Palmer, and K. T. V. Grattan, Rev. Sci. Instrum., **66**(5), 3097 (1995).
- [3] K. Kyuma and M. Hushita, Optical fiber sensor (In Japanese), Johozoshakai, Tokyo (1987) pp. 110~238.
- [4] P. Hansen, K. Witter, and W. Tolksdorf, Physical Review B, **27**(11), 6608 (1983).
- [5] P. Hansen, and J.-P. Krumme, Thin Solid Films, **114**, 69 (1984).

## Epitaxial Growth and Evaluation of Magnetic Garnet Films for Optical Current Transducers

Jae Kyong Cho\*

*Department of Electrical and Electronic Engineering, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, 900 Gazwa,  
Jinju, Gyeongnam 600-701, Korea*

(Received 9 October 2007, in final form 11 December 2007)

This paper describes the effect of the mixing ratio of starting materials and the growth parameters of magnetic garnet films by LPE on the properties of the films and suggests the conditions to obtain the films suitable for the Faraday rotators of the optical CTs. The properties of the films investigated for the evaluation of the films were thickness, surface morphology, X-ray diffraction, lattice constant, lattice mismatch between film and substrate (single crystal nonmagnetic wafer), and Faraday rotation angle. Optical CTs have been fabricated and evaluated using the films grown.

**Keywords** : single crystal magnetic garnet film, LPE, Faraday rotation angle, optical current transducer