

고주파 마그네트론 스퍼터법에 의해 제조된 Yttrium Iron Garnet 박막의 미세구조 및 자기적 특성

박명범 · 김병진 · 조남희

인하대학교 무기재료공학과
인천광역시 남구 용현동 253
(1998년 11월 18일 접수)

Microstructure and Magnetic Characteristics of Yttrium Iron Garnet Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputter

M.-B. Park, B. J. Kim and N.-H. Cho

Department of Ceramic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea
(Received November 18, 1998)

초 록

고주파 마그네트론 스퍼터법을 이용한 YIG(yttrium iron garnet) 박막 제조시 기판유형, 기판온도, 스퍼터전력, 스퍼터가스 등의 증착변수와 증착후 열처리 조건이 YIG 박막의 결정성, 화학조성, 미세구조 그리고 자기적 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 750°C 이상의 온도에서 수행한 증착후 열처리에 의하여 비정질 박막이 결정화되었으며, 특히 GGG (gadolinium gallum garnet) 기판 위에 제조된 박막은 강한 (111) 우선배향성을 나타냈다. 박막 조성은 스퍼터가스 내의 산소분율에 민감하게 영향을 받았으며, 산소분율이 20%인 스퍼터가스를 사용하여 제조된 박막은 $Y_{2.38}Fe_{3.84}O_{12}$ 의 조성을 나타내었다. 증착후 열처리 온도가 900°C로부터 1100°C로 증가함에 따라, GGG 기판 위의 박막의 표면거칠기는 2.5 nm에서 40 nm로 증가하였으나, 보자력과 강자성 공명 선폭은 감소하였다.

ABSTRACT

YIG thin films were grown by rf magnetron sputter techniques. We investigated effects of post-deposition heat-treatment as well as various deposition parameters such as substrate materials, substrate temperature, sputter power, and sputter gas types on the crystallinity, chemical composition, microstructure and magnetic characteristics of the films. Post-deposition heat-treatment over 750°C was applied to crystallize as-prepared amorphous films, and a strong tendency of particular crystallographic planes lying parallel to substrate surface was observed for the heat-treated film on GGG substrate. The chemical composition of the film exhibited a wide range of chemical stoichiometry depending on the oxygen fraction of the sputter gas, and in particular the composition of the film deposited in sputter gas with an oxygen fraction of 20% was $Y_{2.38}Fe_{3.84}O_{12}$. As the temperature of post-deposition heat-treatment increased from 900°C to 1100°C, the surface roughness of the film on the GGG substrate also increased from 2.5 nm to 40 nm, but the coercive force as well as the line width of ferromagnetic resonance decreased.

Key words : YIG, Sputter, GGG, FMR

1. 서 론

통신, 항해, 항공, 레이더 등이 산업구조의 변화와 함께 크게 발달함에 따라, 방대한 정보량을 신속하게 처리하고 지역 및 지형에 제한받지 않는 위성통신의 필요성이 증가하게 되었다. 이러한 통신에는 X-대(8~12 GHz)에 해당하는 마이크로파 사용이 필요하고, 이 주파수 영

역에서 정보를 송신하거나 제어하는 마이크로파 회로 및 시스템의 이용이 증가하고 있으며,¹⁾ 특히 벌크형 페라이트 소자는 마이크로파 회로에서 공진기, 발진기, 격리자 또는 순회자 소자로서 사용되고 있다.²⁾ 최근에는 마이크로파 회로 기술에서 소형화와 집적화가 가능한 평판회로를 사용하는 경향이 증가하고 있으며, 이런 추세에 부응하기 위해서 페라이트 소자들도 단결정이나

소결체의 사용뿐 아니라, 박막재료 사용이 필요하게 되었다.^{3,6)} 특히, YIG(yttrium iron garnet) 소재는 X-대에서 유전손실과 강자성 공명흡수 선폭이 매우 작은 재료로서, 마이크로파 회로에 사용되는 페라이트 박막소재로서의 이용가치로 인해 큰 관심을 모으고 있다.²⁾

YIG 박막을 제조하는 방법으로-단결정 박막은 액상 에피택시법(liquid phase epitaxy),^{3,4)} 다결정 박막은 고주파 마그네트론 스퍼터법(rf magnetron sputter)과 졸-겔법(sol-gel)¹⁰⁻¹²⁾ 등이 이용되고 있다. 이 중 YIG 박막의 액상 에피택시 제조에 관한 연구는 많이 진행되어서 공정이 비교적 잘 알려져 있다.^{3,4)} 반면에 고주파 마그네트론 스퍼터법에 의한 YIG 박막제조에 대한 연구는 1970년대 초반에 시작되었으나 공정변수 제어에 대한 이해 및 우수한 특성을 갖는 박막 제조공정에 관한 보고는 매우 미미한 실정이다.^{7,8)}

스퍼터법에 의한 YIG 박막의 제조시 다원소로 구성된 화합물 박막의 물성을 제어하기 위해서는 박막의 화학조성을 정밀하게 조절할 수 있어야 한다. 그러나 스퍼터법을 이용할 경우 박막의 화학조성이 화합물 타겟의 조성과는 일반적으로 다르게 나타난다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 공정변수의 제어 특히 적당히 스퍼터가스 선정에 관한 연구가 시도되고 있으나 스퍼터가스에 의한 박막조성을 제어하는 과정에서 표면거칠기 및 자기적 특성이 동시에 변화하게 된다.⁵⁾ 따라서, 스퍼터가스의 선정뿐만 아니라 기판의 종류, 열처리 온도, 그리고 스퍼터전력 등의 박막 제조변수에 따른 박막의 결정성, 화학조성, 표면거칠기, 자기적 특성의 변화에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 고주파 마그네트론 스퍼터법을 이용하여 YIG 박막의 증착시 증착공정 변수와 증착후 열처리에 따른 박막의 미세구조, 화학조성, 그리고 자기적 특성을 조사하여 제조공정 변수와 박막의 자기적 특성과의 상호 연관성을 고찰하였다.

2. 실험 및 분석방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 rf magnetron 스퍼터 장치의 개략도이다. 확산펌프를 이용하여 10^{-6} Torr의 반응실 진공도를 유지시킨 후, Ar-O₂ 혼합가스를 스퍼터가스로 사용하고자 반응실 내로 주입시켰다. 여기에서 스퍼터가스의 산소분율(R%)은 반응실 내로 유입되는 Ar-O₂ 스퍼터가스 중 산소가 차지하는 비율을 의미하며, 아래의 식에 의해 표현된다.

$$R\% = \frac{O_2}{Ar + O_2} \times 100$$

가압소결에 의해서 제조된 Y₃Fe₅O₁₂(99.9%, CERAC)

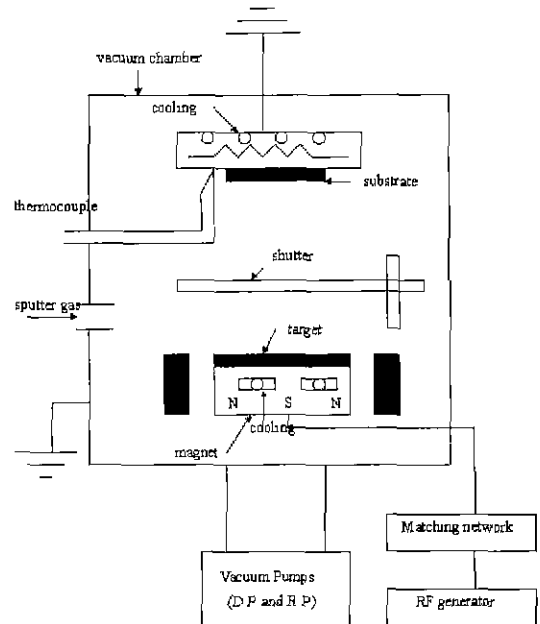


Fig. 1. Schematic diagram of the RF magnetron sputter system.

세라믹 소결체를 스퍼터타겟으로 이용하였고, GGG(gadolinium gallium garnet), 실리콘 웨이퍼, 그리고 광학용 슬라이드 유리(DCIC, U.S.A.) 등을 기판재료로 이용하였다. 타겟과 기판 사이의 거리는 4.5 cm를 유지하였고, 증착시 반응실 내의 진공도는 3 mTorr이었으며, 에비스퍼터는 10분 동안 행하였다. 증착후 열처리는 공기분위기에서 600~1200°C 범위에서 3시간 행하였다.

Table 1. Preparation Conditions of the YIG Thin Film

Sputtering and annealing parameter	Experimental condition
Target	Y ₃ Fe ₅ O ₁₂
Oxygen fraction of sputter gas(R%)	0, 3.3, 20, 30
Substrate materials	GGG, Si wafer, Glass
Sputter power(watt)	100~250
Background pressure(Torr)	1×10^{-6}
Working pressure(Torr)	3×10^{-3}
Substrate temperature(°C)	R.T.~500
Presputter time(min)	10
Deposition time(hour)	1, 2
Annealing temperature(°C)	600~1200
Annealing atmosphere	air
Annealing time(hour)	3

구체적인 박막 제조 및 열처리 공정변수를 Table 1에 요약하였다.

박막두께 측정은 Ellipsometer(Plas-Mos, SD2302)를 사용하였으며, 주사전자현미경(Hitachi, X-650)을 이용한 박막 파단면 조사에 의해 Ellipsometer로 측정된 박막의 두께를 보정하였다. 박막의 결정상태와 우선배향성을 조사하기 위해서, 박막용 X-선 회절분석(Philips, PW3719)을 이용하였다. 회절분석시 Cu 타겟을 사용하였으며, 회절각(2θ)은 $25\sim 60^\circ$ 이었다. 박막표면의 형상과 거칠기를 분석하기 위해 AFM(atomic force microscopy: Topometrix, ACCUREX)을 이용하였다.

박막의 화학조성분석은 RBS(Rutherford backscattering spectroscopy) 기법을 사용하였다. 분광기의 입사 입자는 2 MeV 운동에너지를 갖는 He^{2+} 이었고, 검출 산란각은 170° 이었으며, RUMP 프로그램을 이용한 시뮬레이션에 의해 박막의 화학조성을 구하였다.¹³⁾ 이때 오차는 약 3%이다.

박막의 자기적 특성 측정은 진동시편 자력계(TOEL, VSM-P7-15 Model)와 전자스핀 공명분석기(Bruker, ESP 300 series)를 이용하여 행하였다. 진동시편 자력 분석은 상온에서 ± 100 Oe 범위의 인가자장에서 40 Oe/mm의 자장 증감속도로 행하였다. 전자스핀 공명 분석은 상온에서 9.77 GHz의 주파수와 5.02 mW의 전력을 가지는 고주파를 사용하여 행하였으며, 이때 최고 자장은 8000 Oe이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 박막 성장

Fig. 2는 기판온도와 스퍼터전력에 따른 박막의 두께

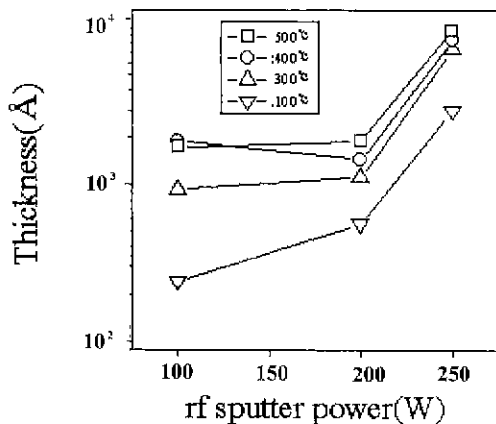


Fig. 2. Variation of thickness for YIG thin films with substrate temperature and rf power. The films were deposited on glass substrate for 1 h.

를 나타내고 있다. 스퍼터전력이 100 W(watt)로부터 200 W로 증가시, 기판온도가 100°C 인 경우, 박막두께가 2배 정도 증가하였으나, 그 외의 온도에서는 박막두께의 변화가 거의 없었다. 반면에 스퍼터전력이 200 W에서 250 W로 증가시, 박막두께는 모든 기판온도에서 5~6배 정도 각각 증가함을 알 수 있다. 스퍼터 전력이 증가함에 따라 일반적으로 플라즈마의 밀도는 증가되며, 따라서 박막의 증착속도가 증가하게 되는데, 특히 특정한 스퍼터 전력범위에서 이차전자의 모멘텀 전달 및 스퍼터 가스의 이온화 급증에 의해 플라즈마 밀도가 급격하게 증가하게 된다.¹⁴⁾ 본 실험조건에서 200~250 W 범위

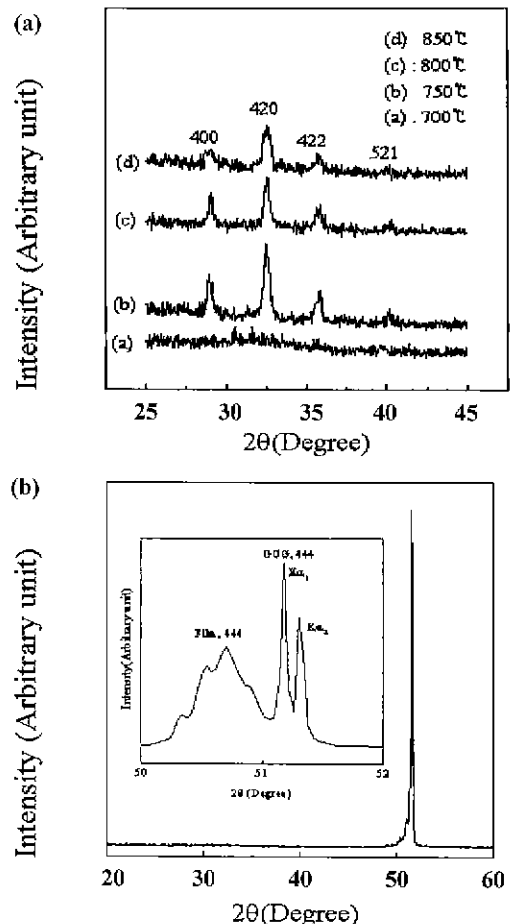


Fig. 3. XRD patterns of YIG thin films. (a) The films were deposited on Si at 500°C and then annealed at each temperature for 3 h. (b) The films were grown on GGG at 500°C and then annealed at 1000°C . The inset is an enlarged view of the XRD pattern in a diffraction angle of 50 to 52° .

서 스퍼터 전력의 증가에 따라서 플라즈마의 밀도가 크게 증가한 것으로 생각된다. 스퍼터 전력이 낮은 경우에는 높은 경우와 비교시, 기판 온도에 따른 박막증착 속도의 차이가 크음을 알 수 있다. 반면에 400~500°C의 기판온도에서는 박막증착 속도가 온도변화에 거의 무관함을 보인다. 이 온도 범위에서, 박막 표면에서의 흡착과 탈착율이 온도 변화에 따른 차이를 거의 나타내지 않는 것으로 여겨진다.

Fig. 3은 증착후 열처리한 시편으로부터 기록된 XRD θ -2 θ 패턴이다. 증착시 비정질이던 Si 기판 위의 박막은 750°C 이상의 온도에서 열처리함에 따라 다결정 상태가 되었다. 열처리 온도가 750°C에서 850°C로 높아짐에 따라 피크의 선폭이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 기판의 Si 원자가 박막으로 확산됨에 기인하는 것으로 여겨진다.⁷⁾ Si 기판 위에 증착된 박막의 결정성을 향상시키는 적절한 열처리 온도는 750°C라고 여겨진다. 증착시 비정질이던 GGG 기판 위의 박막은 1000°C에서 열처리 함에 따라, 강한 (111) 우선배향성을 나타냈다.

YIG, GGG, Si의 열팽창 계수는 각각 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $9.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $4.68 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이며,^{5,9,12)} GGG 기판의 YIG 박막과의 열팽창 계수의 차이는 매우 작다. 또한 GGG 기판의 격자상수(12.376 Å)는 YIG의 격자상수(12.3774 Å)와 거의 유사하다. 본 실험에서 사용한 GGG 기판은 (111) 표면 방향을 갖는 단결정 기판이며, 따라서 증착후 열처리시 GGG 기판 위에 증착된 박막이, Si 기판 위에 증착된 박막과는 달리, 기판 표면에 평행하게 (111) 면이 놓이는 우선배향성을 나타내는 다결정 박막이 되는 것으로 여겨진다.

3.2. 박막조성 및 미세구조

Fig. 4는 두 유형의 스퍼터가스(R=0, 20%)를 이용하여 각각 제조된 박막으로부터 기록된 RBS 결과이다. 박막증착시 스퍼터가스의 산소분율이 0%, 3.3%, 20%, 30% 일 경우, RBS 결과를 바탕으로한 시뮬레이션¹⁴⁾으로부터, 박막조성은 각각 $\text{Y}_{4.35}\text{Fe}_{6.82}\text{O}_{12}$, $\text{Y}_{1.78}\text{Fe}_{3.56}\text{O}_{12}$, $\text{Y}_{2.88}\text{Fe}_{3.84}\text{O}_{12}$, $\text{Y}_{2.99}\text{Fe}_{3.67}\text{O}_{12}$ 이었다. Fig. 5는, 스퍼터가스 내의 산소분율에 따른, 박막을 구성하는 양이온(Y, Fe)과 음이온(O)의 비를 보여주고 있다. R값이 0%로부터 3.3%로 증가시, (Y+Fe)/O 비는 약 절반 정도로 감소하였다. 반면에 R값이 3.3%로부터 증가시, (Y+Fe)/O 비는 0.47로부터 다소 증가하는 경향을 보인다. 이런 현상은 순수한 아르곤을 스퍼터가스로 사용한 경우 타겟 내의 양이온(Y+Fe)이 음이온(O)보다 스퍼터효율이 크며, 따라서 증착한 박막의 화학조성은 타겟조성보다 양이온/음이온 비가 크게 나타나며, 즉 양이온 과잉 박막이 얻어지는 것으로 여겨진다.¹⁵⁾ 스퍼터가스 내에 산소를 미량 혼합하게 되면, 혼

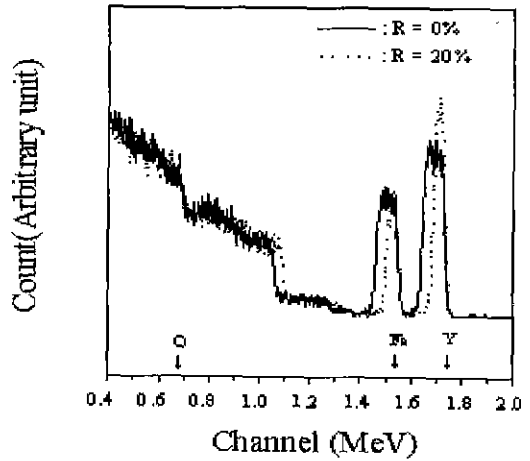


Fig. 4. RBS spectra of YIG thin films. The films were deposited in sputter gas with oxygen fractions of 0% and 20%, respectively.

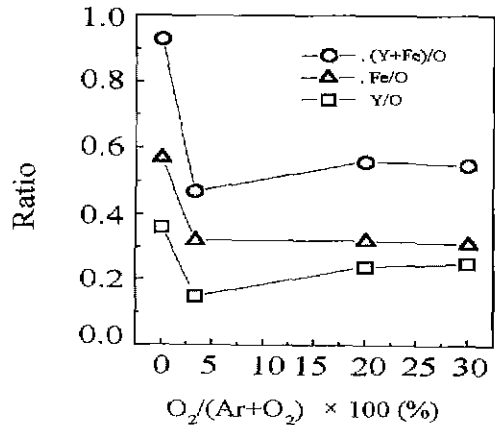


Fig. 5. Variation of cation/anion ratio for YIG thin films with R value.

합된 산소는 산화물 타겟의 표면과 반응을 하여서 산소 과잉의 얇은 층을 만들고, 이 층이 스퍼터되어서 플라즈마 내의 산소 이온 또는 산소 분자의 흐름을 증가시켜, 최종적으로 성장한 박막내의 양이온(Y+Fe)/음이온(O)의 비를 감소시키게 된다.^{14-16,21)} 스퍼터가스 내의 산소량을 점차 증가시킨 경우, 타겟 표면에 생성되는 산소 과잉층이 포화되고, 혼합된 산소는 기판표면과 화학반응을 하는 것으로 여겨진다.^{15,18,21)} 즉 스퍼터가스 내의 산소량 증가에 따른 박막 내의 음이온(O)의 증가는 둔화되고, 박막의 조성은 타겟의 조성과 거의 같아지는 결과가 나타난다.^{14,15,19)} 본 실험에서는 R=20% 조건에서, YIG 박막의 조성이 타겟의 조성과 유사한 $\text{Y}_{2.88}\text{Fe}_{3.84}\text{O}_{12}$ 을 나타내었다.

Fig. 6은 증착후 열처리한 시편으로부터 기록된 AFM

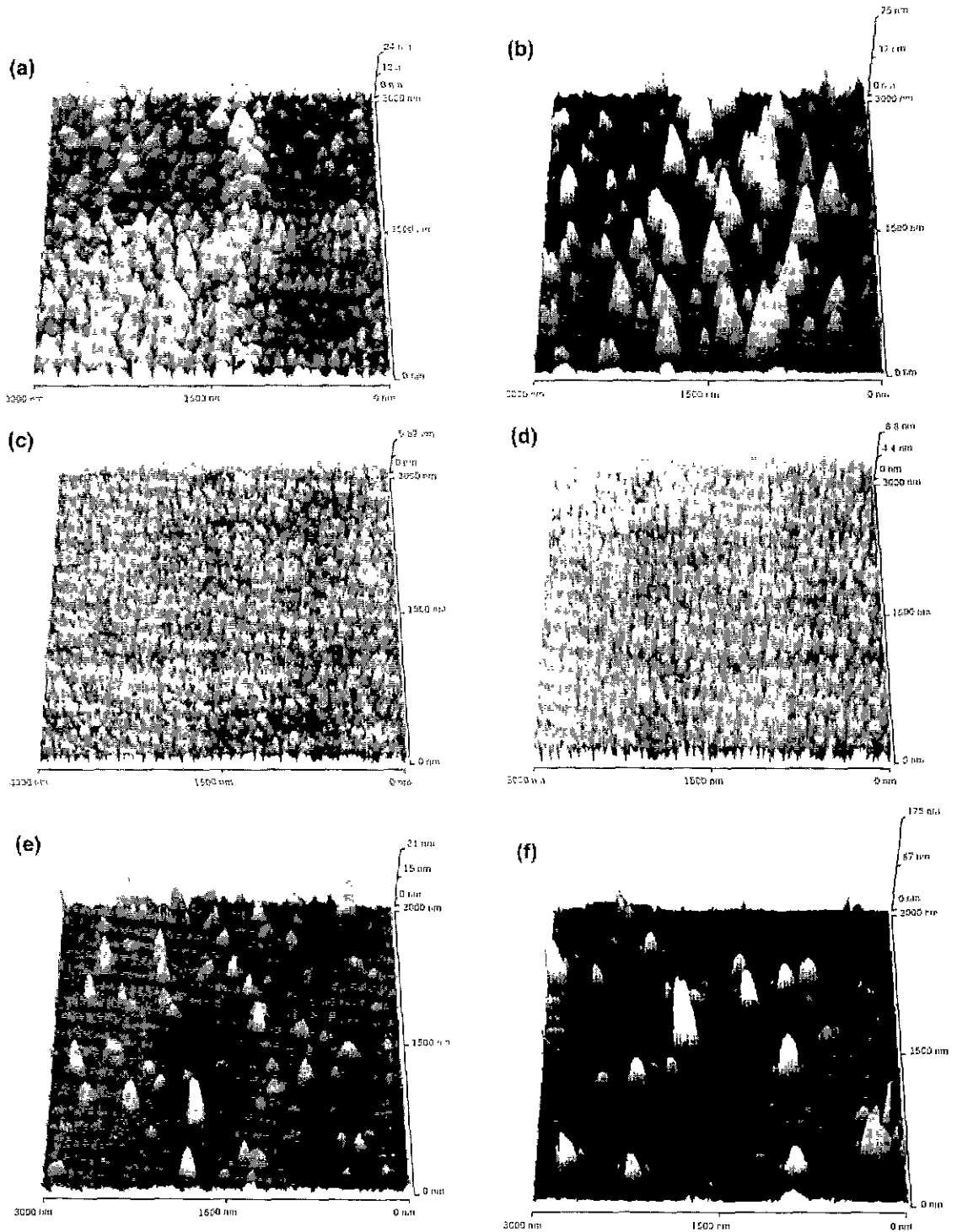


Fig. 6. AFM images of YIG thin films. The films were produced at various preparation conditions. The substrate, oxygen fraction(R%) and the temperature of post-deposition heat-treatment were (a) Si, 0% and 900°C, (b)Si, 20% and 900°C, (c) GGG, 0% and 900°C. (d) GGG, 20% and 900°C, (e) GGG, 20% and 1000°C and (f) GGG, 20% and 1100°C.

사진이다. 산소가 혼합된 스퍼터 가스(R=20%)를 사용하여 제조된 박막의 표면거칠기는 순수한 아르곤 가스를 스퍼터가스로 이용하여 제조된 박막의 표면거칠기보다 크게 나타난다. 특히 Si 기판 위의 박막의 표면 거칠기는, 스퍼터가스 내에 산소가 혼합(R=20%)될 경우, 약 6배 정도 증가하였다. 이는 스퍼터가스 내의 산소 양이 많아지게 되면, 이들 산소가 기판 표면과 반응을 하는 과정에서 박막에 충격을 가하여 박막의 표면거칠기를 증가시킨 것으로 여겨진다.^{16,17)}

한편, Si 기판 위의 박막의 표면거칠기는 GGG 기판 위의 박막의 표면거칠기보다 크게 나타난다. 이는 GGG 기판이 Si 기판과 비교하여 YIG 결정과 격자 일치가 더 잘 되므로, 입자 핵생성 에너지가 작고, 따라서 초기 핵생성 밀도가 높아서, 성장된 입자도 작게 나타나는 것으로 여겨지며,¹⁷⁾ 결과적으로 Si 기판 위의 박막에 비하여서 표면 거칠기가 작은 것으로 생각된다.

Fig. 6(d)-(f)는 GGG 기판 위에 제조된 박막을 900~1100°C에서 열처리한 후, 이들 표면으로부터 기록된 AFM 사진이다. 열처리 온도가 900°C로부터 1100°C로 증가시, 입자는 90 nm로부터 300 nm로 커졌으며, 표면의 거칠기는 2.5 nm로부터 40 nm로 증가하였다(Fig. 7). GGG 기판 위에서 증착된 박막이 열처리될 경우, 강한 (111) 우선배향성을 보이며, 결과적으로 열처리 온도의 증가에 의해서 입자크기 및 표면거칠기가 크게 증가하는 것으로 여겨진다.

3.3. 자기적 특성

Fig. 8은 GGG 기판 위의 박막으로부터 기록된 자화 곡선과 강자성 공명 선평이다. 본 실험에서 사용된 박막

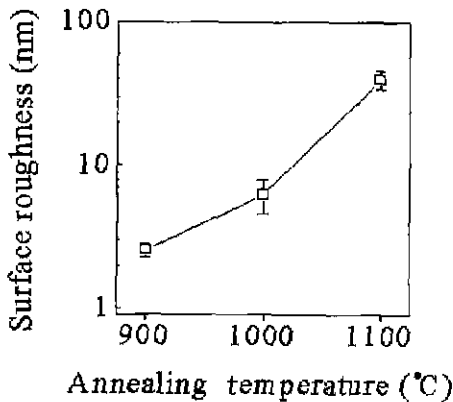


Fig. 7. Variation of surface roughness for YIG thin films with annealing temperature. The films were deposited on GGG in sputter gas with an oxygen fraction of 20%.

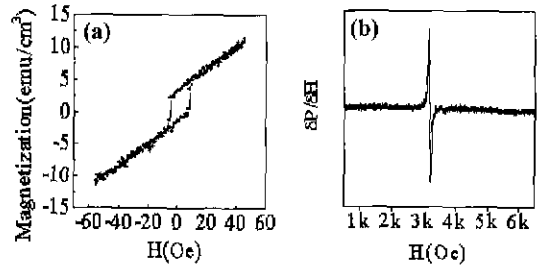


Fig. 8. Magnetization characteristics of YIG thin film. (a) Magnetization curve (b) the first derivative absorption line shape. The film was deposited on GGG at 500°C and then annealed at 1000°C.

Table 2. Coercive Force(Hc) and Ferromagnetic Resonance Line Width(ΔH) of the YIG Thin Film

Substrate materials	Si wafer		GGG		
Oxygen fraction of sputter gas(R%)	0	20	20		
Annealing temperature(°C)	900		900	1000	1100
Hc(Oe)	27.0	19.0	6.87	5.15	2.05
ΔH (Oe)	196.29	161.13	93.75	49.81	41.02

의 제조조건에 따른 보자력과 강자성 공명 선평을 Table 2에 나타내었다. Si 기판 위의 박막은 GGG 기판 위의 박막과 비교시, 기판과의 격자상수와 열팽창 계수의 차이가 2배 정도 크므로 박막 내에서 발생하는 응력이 상대적으로 크게 나타나리라 여겨지며,^{9,23)} 따라서 보자력이 수 배 정도 크게 나타나는 것으로 사료된다. GGG 기판 위에 증착된 박막의 열처리온도가 900°C로부터 1100°C로 증가시, 이들 박막의 보자력은 6.87 Oe로부터 2.05 Oe로 감소하였다. 앞 절에서 언급되었듯이, GGG 기판 위의 박막이 증착후 열처리될 경우, 열처리 온도가 증가하면서 강한 (111) 우선배향성 때문에 표면 거칠기가 증가하였다. 박막표면의 거칠기가 커지면 표면부분에서의 자구력 고착이 증가하고, 따라서 자장에 따른 자구의 움직임이 어려워져 보자력이 증가하게 된다. 그러나 이 시편에서는 열처리 온도가 높아짐에 따라 입자크기가 증가하고 박막 내의 응력이 감소하며, 이러한 현상은 표면거칠기의 증가에 따른 보자력 증가를 상쇄하고, 결과적으로 이 시편의 보자력이 감소한 것으로 사료된다.^{10,23)}

M. Gomi의 연구보고에 의하면, 스퍼터법에 의해서 유리기판 위에 제조된 다결정 박막의 보자력은 약 100 Oe의 값을 나타냈으며,⁵⁾ J. P. Krumme가 스퍼터 에피택시에 의해서 GGG 계열의 단결정 기판 위에 제조한

박막의 보자력은 약 1.0 Oe의 값을 가졌다.⁹⁾ 본 연구에서, Si 기판 위에 제조된 박막의 보자력은 M. Gomi의 유리 위에 제조된 박막의 보자력에 비하여서 약 1/5배의 값을 가진다. 본 실험에서 GGG 기판 위에 제조된 다결정 박막의 보자력은 J. P. Krumme가 스퍼터 에피택시에 의하여 제조한 박막의 보자력보다 수 배 정도 크고, M. Gomi에 의해서 제조된 무작위 배열된 미세구조를 갖는 박막의 보자력의 1/수십 배의 값을 가진다. 이는 본 연구에서 GGG 기판 위에 제조된 박막이 강하게 (111) 우선배향 되어진 다결정 박막이며, 따라서 단결정 박막과 무작위 배열된 미세구조를 갖는 다결정 박막이 보이는 보자력의 중간 정도의 값을 나타내는 것으로 여겨진다. 특히, GGG 기판 위에 1100°C에서 열처리 한 박막은 J. P. Krumme에 의해 제조된 단결정 박막의 보자력과 거의 유사하였다.

Table 2에서 보이듯이, R=20%인 스퍼터가스를 사용하여 제조된 박막의 강자성 공명 선폭은 R=0%인 스퍼터 가스를 사용하여 증착시킨 박막의 강자성 공명 선폭보다 작다. 이는 산소가 스퍼터가스 내에 혼합될 경우, 박막의 표면거칠기는 증가하지만, 박막의 화학조성이 타겟의 화학 조성과 가까워지며, 따라서 격자 내의 결함량이 감소할 것으로 여겨지고, 결과적으로 강자성 공명 선폭이 상대적으로 감소하는 것으로 사료된다. 이러한 스퍼터가스의 영향은 보자력의 크기에도 동일한 결과를 가져오는 것으로 여겨진다. R=20%인 스퍼터가스를 이용하여 제조된 박막의 보자력이 R=0%인 스퍼터가스를 이용하여 제조된 박막의 보자력의 70% 값을 보인다.

GGG 기판 위에 제조된 박막이 900~1100°C에서 열처리된 경우, 열처리 온도의 증가에 따라 강자성 공명 선폭이 감소하였다. 본 실험에서 이들 열처리 온도의 변화에 따른 결정화도의 차이는 발견하지 못하였으나, 이들 시편으로부터 기록된 AFM 사진(Fig. 6)으로부터 열처리 온도의 증가에 따른 박막의 치밀화는 예상할 수 있다. 박막의 표면거칠기는 열처리 온도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 보이나, 입자성장에 의한 입계감소, 박막의 치밀화에 따른 기공제거 등에 기인하여서 강자성 공명 선폭이 감소한 것으로 사료된다.²³⁾

LPE 법에 의해 제조된 단결정 박막의 강자성 공명 선폭은 수 Oe 정도의 값을 가진다.^{3,4,9,21)} 스퍼터법, 졸-겔법 등에 의해서 제조된 다결정 박막의 경우 수십 Oe~수백 Oe 정도의 값을 가진다.^{5-8,11,12)} 본 연구에서 Si 기판 위에서 제조된 박막의 강자성 공명 선폭은 약 150~200 Oe이며, 전형적인 다결정 박막의 값을 나타내었다. 본 실험에서 GGG 기판 위에 제조된 박막은 강한 (111) 우선배향성을 갖는 다결정막으로 단결정 박막과 다결정 박막의 강자성 공명 선폭의 중간 정도의 값을 보였으며,

증착후 열처리 조건에 민감한 변화를 나타내었다.

4. 결 론

스퍼터기법을 이용하여 YIG 박막을 증착하였으며, 박막의 증착 공정변수와 증착후 열처리조건에 따른 박막의 결정상태, 미세구조, 그리고 화학조성을 분석하고 자기적 특성과의 관계를 고찰하였다.

증착후 열처리에 의해, Si 기판 위의 비정질 박막은 다결정상으로 변하였고, GGG 기판 위의 박막은 강한 (111) 우선배향성을 갖는 다결정 박막이 되었다. 스퍼터가스 내의 산소 함유량에 따라 박막의 화학조성이 변화하였으며, R=20%인 스퍼터 가스를 이용시에 타겟의 조성과 가장 유사한 화학조성인 $Y_{2.88}Fe_{3.84}O_{12}$ 을 나타내었다.

Si 기판 위에 제조된 박막은, GGG 기판 위의 박막에 비하여, 보자력이 높게 나타났다. 이러한 차이는 Si 기판 위의 다결정 박막이 갖는 무작위 배향성 또는 상대적으로 큰 응력에 의해 발생하는 것으로 여겨진다. 열처리 온도가 증가시, GGG 기판 위에 증착된 박막의 보자력 및 강자성 공명 선폭이 감소하였으며, 이는 박막의 입자성장과 치밀화에 따른 격자결합의 감소에 기인한 것으로 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 국방 과학 연구소의 연구비(ADD-96-7-3, 1996) 지원으로 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. I. Bahl, Microwave Solid State Circuit Design, Chap. VII, John Wiley & Sons, New York, 1988.
2. Y. Konishi, Microwave Intergrated Circuit, 550, Marcel Dekker, New York, 1991.
3. P. Hansen, K. Witter and W. Tolksdorf, "Magnetic and Magneto-Optic Properties of Lead- and Bismuth-Substituted Yttrium Iron Garnet Films," *J. Appl. Phys.*, **55**, 1052 (1984).
4. M. Ramesh, D. M. Gaultieri, S. D. Shilliman, J. Peruyero and D. D. Stancil, "Effect of Sodium Doping of Rare-earth Iron Garnet Films on Magnetic and Magneto-Optic Properties," *J. Appl. Phys.*, **70**, 6289 (1991).
5. M. Gomi, T. Tanida and M. Abe, "rf Sputtering of Highly Bi-Substituted Garnet Films on Glass Substrates for Magneto-Optic Memory," *J. Appl. Phys.*, **57**, 3888 (1985).
6. T. Hirano, T. Namickawa and Y. Yamazaki, "Magneto-Optical Properties of Ca-Substituted Bi-YIG Sputtered Films," *J. Appl. Phys.*, **70**, 6292 (1991).

7. E. Swatzky and E. Kay, "Some Magnetic and Structural Properties of Epitaxial Garnet Films Prepared by rf Sputtering," *J. Appl. Phys.*, **40**, 1460 (1969).
8. E. Swatzky and E. Kay, "Magnetic and Structural Properties of Epitaxial and Polycrystalline GdIG Films Prepared by rf Sputtering," *J. Appl. Phys.*, **42**, 367 (1969).
9. J. P. Krumme, V. Doormann, B. Streka and K. Witter, "Magnetoelastical and Optoelastic Coupling in (111)- and (110)-Oriented Bismuth-Iron Garnet Films Prepared by Sputter Epitaxy," *J. Appl. Phys.*, **62**, 3879 (1987).
10. K. Matsumoto, S. Sasaki, Y. Yamanobe, K. Yamaguchi, T. Fujii and Y. Asahara, "Bismuth- and Aluminum-Substituted YIG Single Crystal Films on Modified Gadolinium Gallium Garnet Single Crystal Substrate," *J. Appl. Phys.*, **70**, 1624 (1991).
11. J. Cho, M. Gomi and M. Abe, "Microstructure and $\text{Bi}_{1.5}\text{Y}_{1.5}\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ Films Made by Pyrolysis," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**, 2069 (1988).
12. P. Vaqueiro, M. A. Lopez-Quintela, J. Rivas and J. M. Grenche, "Annealing Dependence of Magnetic Properties in Nanostructured of Yttrium Iron Garnet Prepared by Citrate Gel Process," *J. Magn. Magn. Mater.*, **169**, 56 (1997).
13. L. R. Doolittle, "Algorithms for the Rapid Simulation of Rutherford Backscattering Spectra," *Nucl. Inst. Meth.*, **B9**, 334 (1985).
14. S. Maniv and W. D. Westwood, "Discharge Characteristics for Magnetron Sputtering of Al in Ar and Ar/O₂ Mixtures," *J. Vac. Sci. Technol.*, **17**, 743 (1980).
15. C. R. Aita, "In Situ Sputter Deposition Discharge Diagnostics for Tailoring Ceramic Film Growth," *J. Vac. Sci. Technol.*, **A16**, 1303 (1998).
16. C.-C. Lee, D. T. Wei, J.-C. Hsu and C.-H. Shen, "Influence of Oxygen on Some Oxide Films Prepared by Ion Beam Sputter Deposition," *Thin Solid Films*, **290**, 88 (1996).
17. C.-A. Anderson, N. M. D. Brown, N. Cui, Z. Liu, A. McKinley and C. G. H. Walker, "Studies of the Evolution of the Topography of Selected Materials as a Function of Etching in Reactive and Non-Reactive rf Plasmas," *Surf. Coat. Technol.*, **97**, 151 (1997).
18. D. Rhdde, H. Kersten, C. Eggs and R. Hippler, "Thin Film Deposited by Reactive Magnetron Sputtering: On the Influence of Target Oxidation and Its Effect on Surface Properties," *Thin Solid Films*, **305**, 164 (1997).
19. G. Mohan Rao and S. Mohan, "Studies on Glow-Discharge Characteristics during dc Reactive Magnetron Sputtering," *J. Appl. Phys.*, **69**, 6652 (1991).
20. H. Patel, M. Saif and H. Memarian, "Reactive Sputter Deposition of Indium Tin Oxide Films onto Polymeric Webs Using Optical Emission Spectroscopy and Mass Spectroscopy as Process Monitoring and Control," *Surf. Coat. Technol.*, **94**, 583 (1997).
21. M. K. Jayaraj, S. Loreti, A. Agati and A. Parretta, "Influence of Oxygen Partial Pressure and Heat Treatment on the Properties of Reactively Sputtered In_2O_3 Films," *Phys. Stat. Sol.*, **155**, 115 (1996).
22. D. R. Lide, CRC Handbook of Chemistry and Physics 74th Edition, 12-79, CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London and Tokyo, 1993.
23. W. H. de Roode and C. A. P. W. van de Pavert, "Annealing Effects and Charge Compensation Mechanism in Calcium-Doped $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ Films," *J. Appl. Phys.*, **55**, 3115 (1984).