

Sol-gel 합성에 의한 자성 garnet $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ 의 결정학적 및 Mössbauer 분광학 연구

임영랑 · 김철성

국민대학교 자연과학대학 물리학과 서울 136-702

이재광

건국대학교 자연과학대학 응용물리학과 충북 380-701

(1998년 6월 15일 받음, 1998년 7월 20일 최종수정본 받음)

Single phase garnet $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$)을 ethylene glycol을 용매로 하여 sol-gel 법으로 합성 후 x-ray diffraction, Mössbauer 분광기, vibrating sample magnetometer (VSM)를 이용하여 결정학적 및 자기적 특성을 연구하였다. Y과 Fe의 수화 반응을 통하여 얻은 $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 x-ray 회절 분석 결과는 결정구조가 cubic임을 알 수 있었고 Y에 Bi를 치환한 경우 또한 cubic 구조이었으며 Bi의 치환량이 증가할수록 격자 상수가 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. Bi를 첨가한 $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$)의 단일상의 garnet이 형성되기 시작하는 온도는 800°C 이고 second phase ($BiFeO_3$)가 생성되기 시작하는 온도는 $x=0.75$ 는 1000°C 이며 $x=1.0$ 은 950°C 였다. Mössbauer 분광 실험과 VSM측정 결과 Bi가 치환될 수록 포화 자화 값과 coercivity값이 감소하는 경향을 보였으며 Curie 온도는 Bi의 치환량이 증가할수록 약간 증가하는 경향을 보임을 알 수 있었다.

I. 서 론

자성 garnet $Y_3Fe_5O_{12}$ 이 1956년 Bertaut와 Forrat에 의하여 [1] 개발된 이후, yttrium iron garnet ($YIG, Y_3Fe_5O_{12}$)은 GHz 대역에서 동작할 수 있는 우수한 마이크로파의 특성을 가지고 있어서 여러 연구팀에 의하여 그 제작방법과 성질이 연구되어져 왔고 특히 최근에는 microwave device의 소자로 각광 받고 있다[2-4]. $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 결정 구조는 cubic이며 space group은 $O_h^{10}-Ia3d$ 에 속한다. 단위 세포는 octahedral 16(a), tetrahedral 24(d), 그리고 dodecahedral site 24(c)로 이루어져 있으며 yttrium이온은 24(c)에만 존재하며 iron 이온은 16(a)와 24(d)에 존재하는데 16(a)를 []로 24(d)를 ()로 그리고 24(c)를 { }로 나타낸다면 $\{Y_3\}[Fe_2](Fe_3)$ 로 표시할 수 있다. iron 이온은 +3가로 존재하여 $3d^5$ 의 high spin의 상태로 존재한다. 이온간의 결합은 $Fe^{3+}(a)-O-Fe^{3+}(d)$, $Fe^{3+}(a)-O-Fe^{3+}(a)$, $Fe^{3+}(d)-O-Fe^{3+}(d)$, $Fe^{3+}(a)-O-Y^{3+}$ 그리고 $Fe^{3+}(d)-O-Y^{3+}$ 등의 11가지 결합이 존재하는데 이중 a-d 사이의 iron 결합은 가장 거리가 멀면서도 강한 결합을 하여 superexchange interaction에 가장 큰 영향을 미친다[5]. garnet 결정은 crystal field에 의한 에너지 상태를 가지는데 특

히 tetrahedral site에 의한 결정장은 광자기 현상에 중요한 인자가 된다[6]. 한편, 저온에서의 시료합성이 가능한 sol-gel 방식은 이미 잘 알려진 방법으로서 80년 대말 일본의 연구팀에 의하여 소개된 바 있다[7]. 특히 YIG에 Bi를 치환할 경우 소결 온도는 더욱 낮아지게 되며 Curie온도에 큰 변화가 없다는 장점이 있다. 또한 Bi가 치환됨으로서 $Bi^{3+}-O-Fe^{3+}$ interaction에 의하여 superexchange interaction이 더 강해짐으로 Faraday rotation 효과가 증가한다고 알려져있다[8-10]. 본 연구에서는 Bi 치환량에 따른 garnet-phase가 생성되는 소결 온도의 변화와 자성의 변화를 x-ray, VSM, Mössbauer 분광기를 이용하여 확인하고 특히, YIG에 Bi가 치환됨으로써 microwave device로의 이용에 척도가 되는 포화자화(Ms) 값과 보자력(Hc) 값의 변화를 보고자 한다.

II. 실험사항

시료의 합성은 sol-gel 방식에 의하여 합성하였다. 순도 99.9% 이상의 iron nitrate $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, yttrium nitrate $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ 그리고 bismuth nitrate $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ 를 ethylene glycol 용매에 녹여 12시간 stirring하

여 gel화된 상태의 용액을 250 °C에서 건조시켜 amorphous 상태의 powder를 얻었다. 이들 powder 시료를 750 °C 이상의 온도에서 8시간 annealing하여 단일상의 yttrium iron garnet 시료를 얻을 수 있었다. 시료의 결정구조를 확인하기 위하여 $\text{CuK}\alpha$ 선을 사용하는 Philips 사 X'Pert(PW1827) X-선 회절기를 이용하여 X-선 회절도를 취하였으며, scanning 속도를 매분당 0.25 도로하여 분해능을 증가시켰다. Mössbauer 스펙트럼은 전기역학적 등가속도형 Mössbauer 분광기[11]로 취하였으며, γ 선원은 Dupont 회사 제품의 Rh금속에 들어있는 실온상태의 30 mCi의 ^{57}Co 단일 선원을 사용하였다. 시료두께의 균질성과 열전도를 위해 전체 시료량을 40 mg으로 하여 두께 0.005 인치 직경 1인치의 Be판을 양면에 막아서 사용하였다. 저온 실험을 위해서는 APD사 CS-202 displax 장치와 DMX-20 Mossbauer vacuum shroud를 이용하였고 온도 측정을 위해 silicon diode를 사용하였으며 온도 오차는 ± 0.05 K였고 10^{-6} torr 이상의 진공 도를 유지하였다. VSM

은 Lake Shore 7300을 이용하여 실온부터 750 K 사이의 온도 영역에서 외부 자기장을 10 kOe 인가하여 자기 모우멘트를 측정하였다.

III. 결과 및 분석

Fig. 1과 Fig. 2는 열처리 온도에 따른 자성 garnet $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 와 $\text{Y}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ powder 시료의 x-ray 회절도이다. 다양한 열처리 온도에 따른 x-ray 회절 실험 결과 garnet $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x=0.0, 0.5, 0.75, 1.0$) 시료들은 모두 700 °C부터 부분적으로 garnet phase가 생성되기 시작하였으며 순수한 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 의 경우 900 °C에서 순수한 garnet 결정이 생성됨을 확인할 수 있었으며 700 °C 이하에서 열처리한 시료는 amorphous 상태로 존재하며 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 상이 존재함을 알 수 있었다. $\text{Y}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 의 경우 800 °C에서 단일상의 garnet phase가 형성되기 시작하였고 950 °C부터 second phase(BiFeO_3)가 형성되기 시작하였음을 알 수 있었다.

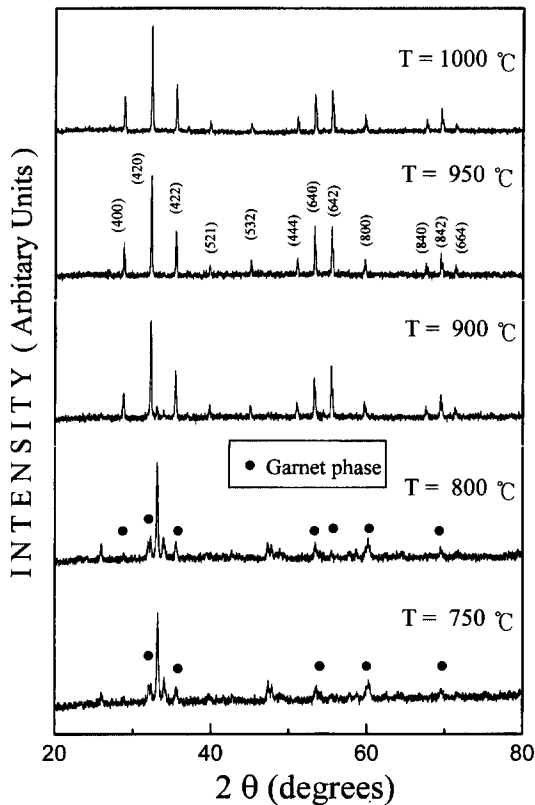


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ annealed at different annealing temperature.

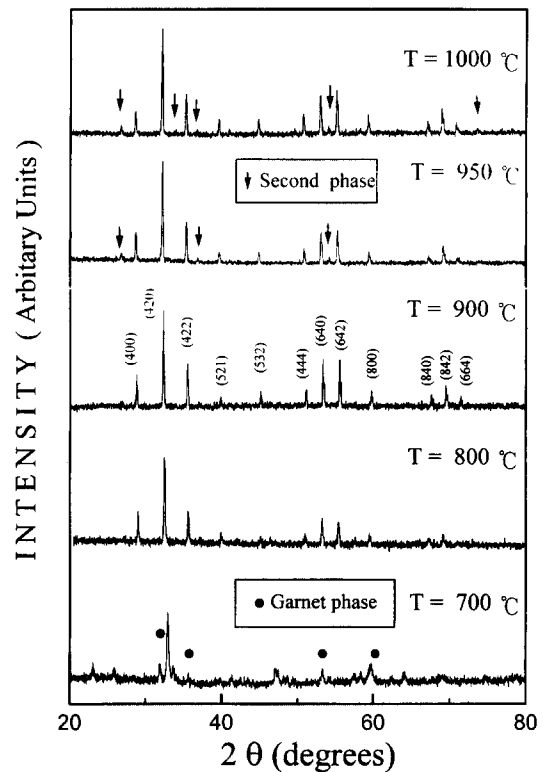


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of $\text{Y}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ with different annealing temperature.

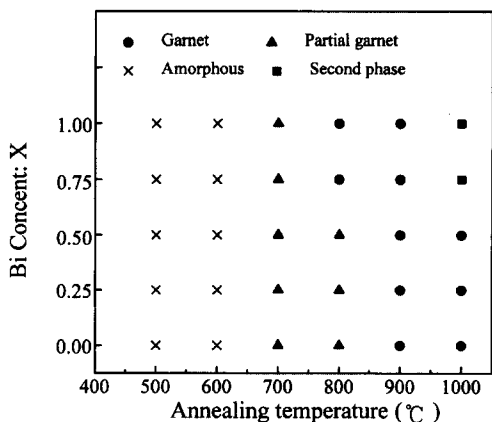


Fig. 3. Crystallographic phase as a function of the Bi content and annealing temperatures for $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$).

Bi 첨가에 따른 garnet phase 및 second phase의 생성은 도는 Fig. 3에 제시하였다. 순수한 garnet $Y_3Fe_5O_{12}$ 를 얻기 위한 annealing 온도는 900 °C이나 Bi가 1.0 치환된 $Y_2BiFe_5O_{12}$ garnet은 800 °C에서 순수한 상을 얻을 수 있었기에 yttrium iron garnet에 Bi를 치환함으로써 annealing 온도를 낮출 수 있음을 확인할 수 있었고 이는 Matsumoto 등[13]에 의하여 합성된(Y; Bi)IG의 합성 온도에 관한 결과와 거의 일치함을 알 수 있었다.

900 °C에서 열처리한 $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 결정 구조는 cubic이다. 여기에 Bi를 첨가한 $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x=0.0, 0.5, 0.75, 1.0$)의 결정 구조도 모두 cubic임을 확인하였다. 또한 x-ray 회절선에 Miller 지수를 붙인 후 얻은 결정 상수 값을 computer에 의해 최소 자승법으로 맞추어서 격자상수를 구하였으며 이 결과 $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 격자 상수는 $a_0 = 12.380 \text{ \AA}$ 이며 Bi가 0.25 첨가된 경우는 $a_0 =$

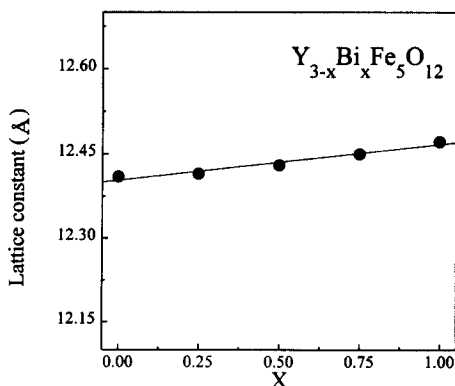


Fig. 4. Lattice constant dependence on the Bi content.

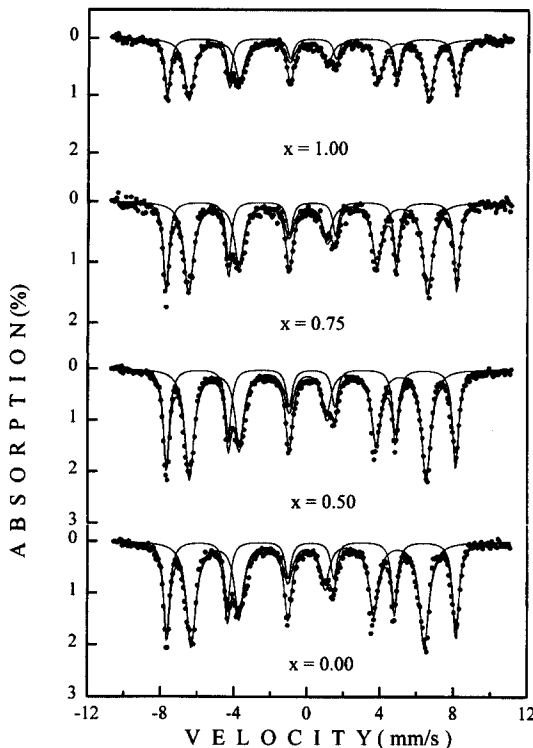


Fig. 5. Mössbauer spectra of $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$) at room temperature.

12.392 Å, 0.5 첨가된 경우는 $a_0 = 12.399 \text{ \AA}$, 그리고 0.75와 1.0이 첨가된 경우는 각각 $a_0 = 12.450 \text{ \AA}$ 과 $a_0 = 12.471 \text{ \AA}$ 이었다. 이로써 yttrium iron garnet에서 Bi^{3+} 가 Y^{3+} 에 치환되면서 격자 상수가 선형적으로 증가하여 Vegard의 법칙을 만족함을 알 수 있었으며 이를 Fig. 4에 제시하였으며 이는 Mizuno와 Gomi 등의 결과와 잘 일치하였다[12].

Fig. 5는 $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$)의 실온에서 측정된 Mössbauer spectrum을 나타낸다. 단위포내의 garnet은 24(c), 16(a)와 24(d)의 세 site가 존재하지만 Fe는 16(a)와 24(d)site에만 존재하므로 이들 spectrum의 분석은 2set의 6 Lorentzian으로 분석하였다. 분석결과는 Table I에 나타내었다. Y에 Bi를 치환한 경우 초미세 자기장 값들은 큰 변화를 보이지 않으며 이성질체 이동 값은 16(a)-site인 경우 0.22-0.25 mm/s, 24(d)-site인 경우 0.02-0.03 mm/s를 나타내었다. 이 값은 상온에서 α -Fe에 대한 상대 값으로 $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ 시료들은 16(a)-site 및 24(d)-site 모두 Fe^{3+} 이온 상태임을 알 수 있었다. 순수한 $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 12 K 부

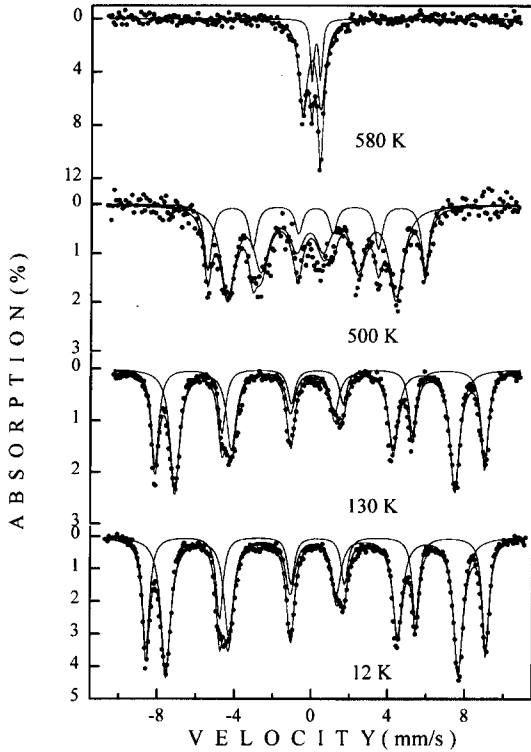


Fig. 6. Mössbauer spectra of $Y_3Fe_5O_{12}$ measured from 12 K to Curie temperature.

터 Curie 온도까지 여러 온도에서 취한 Mössbauer spectrum 중 대표적인 것들을 Fig. 6에서 보여주고 있으며 computer로 분석한 값을 Table II에 나타내었다. 12 K부터 Curie 온도까지는 2 set의 6 Lorentzian으로 분석하였으며 Curie 온도에서는 2 set의 2 Lorentzian으로 분석하였다. 12 K에서의 octahedral 16(a) site의 초미세 자기장 값이 553 kOe이고 tetrahedral 24(d) 값이 475 kOe로 전형적인 Fe^{3+} 이온을 보여주고 있다. 전기 이중극자 분열 값은 온도에 거의 무관하게 영의 값을 가지며 이성질체 이동 값은 온도가 상승함에 따라 일적으로 감소하는 2차 Doppler 효과를 만족함을 알 수 있었다. 이러한 2차 Doppler 효과란 원자핵이 γ -ray를 되튔없이 방출할 때 방출된 γ -ray 에너지는 에너지 보존 법칙에 의하여 감소하며 대신 원자의 운동 에너지는 δE 만큼 증가하게 되는데 반면 흡수체에서는 운동 에너지가 δE 만큼 감소하고 δ -ray 에너지는 증가하게 되는데 이때 δ 선원과 흡수체에 온도차가 존재하면 온도 의존 함수인 δE 로 인해 Mössbauer spectrum의 이동이 존재하게 되어 생기는 현상이다. Fig. 7은 온도에 따른 16(a)와 24(d) site의 이성질체 이동 값의 변화율 $d\delta/dT$ 값을 나타낸 것이다. $d\delta/dT$ 값이 77 K부터 500 K까지의 온도영역에서 직선의 기울기가 16(a) site는

Table I. Lattice parameter (a_0), magnetic hyperfine field (H_M), quadrupole splitting (ΔE_Q), isomer shifts (δ), magnetization (M_s), coercivity (H_c) at room temperature and Curie temperature (T_c) for $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$

x	a_0 (Å)	H_M (kOe)		ΔE_Q (mm/s)		δ (mm/s)		M_s (emu/g)	H_c (Oe)	T_c (K)
		16(a)	24(d)	16(a)	24(d)	16(a)	24(d)			
0.00	12.380	491	398	0.041	0.013	0.28	0.050	32.9	54.1	580
0.25	12.392	492	407	-0.02	0.001	0.25	0.024	23.8	32.6	587
0.50	12.399	491	402	-0.02	0.003	0.22	0.027	25.5	20.3	592
0.75	12.450	493	406	-0.02	0.006	0.23	0.025	24.3	17.2	603
1.00	12.471	492	407	-0.02	0.001	0.25	0.030	25.7	14.5	590

Table II. Mössbauer parameters for $Y_3Fe_5O_{12}$. H_M is the hyperfine field, ΔE_Q is the quadrupole splitting, δ is the isomer shift.

T (K)	H_M (kOe)		ΔE_Q (mm/s)		δ (mm/s)	
	16(a)	24(d)	16(a)	24(d)	16(a)	24(d)
12	553	475	0.041	0.057	0.44	0.18
77	551	472	0.070	0.074	0.43	0.17
130	544	462	0.071	0.068	0.41	0.15
180	534	447	0.072	0.076	0.38	0.12
230	519	429	0.056	0.066	0.33	0.07
295	491	398	0.041	0.013	0.28	0.05
400	440	350	0.044	0.026	0.23	0.01
500	352	272	0.024	0.056	0.20	-0.08
580	-	-	0.445	0.941	0.15	-0.12

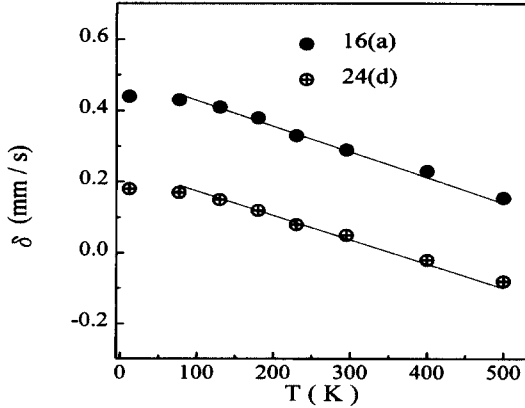


Fig. 7. Dependence of isomer shifts, δ , on the measuring temperature for $Y_3Fe_5O_{12}$.

-0.00071 mm/s·K, 24(d) site는 -0.00048 mm/s·K로 24(d) site 값이 16(a) site 값보다 크며 이 값들은 inverse spinel ferrite의 일반적 특징인 A-site(Td)의 기울기 값이 B-site(Oh) 값보다 더 큰 경우[14]와 정 반대의 현상을 보이였다. 16(a) site의 경우 $-3R/2MC = -0.00073$ mm/s·K의 이론치를 잘 만족함을 알 수 있다.

Fig. 8은 $Y_3Fe_5O_{12}$ 시료의 환산 초미세 자기장 값 $H_{hf}(T)/H_{hf}(0)$ 에 대한 환산 온도 T/T_c 의 그래프를 보여 주며 그래프가 $S=5/2$ 의 Brillouin 곡선을 만족하므로 Fe가 모두 +3가의 high spin상태로 존재함을 알 수 있다. 그래프에서 점은 Mössbauer 실험 값이고 실선은 이론 값을 나타내고 있다. 이 경우 결정장에 의한 ground state에서의 Fe의 에너지는 weak field로 $^6A_{1g}$ 로 존재하게 된다[15].

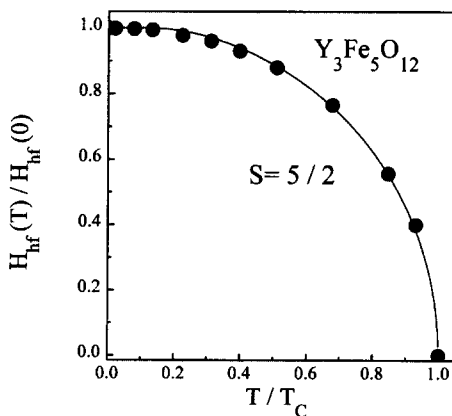


Fig. 8. Reduced magnetic hyperfine field $H_{hf}(T)/H_{hf}(0)$ against reduced temperature T/T_c for $Y_3Fe_5O_{12}$.

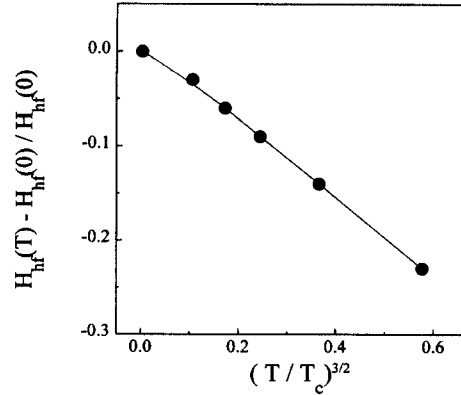


Fig. 9. Fractional change of the average magnetic hyperfine field, H_{hf} , as a function of $(T/T_c)^{3/2}$ for $Y_3Fe_5O_{12}$.

Fig. 9은 spin wave theory에 의하여 $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 $T/T_c < 0.7$ 범위내의 온도영역에서 평균 초미세 자기장의 온도에 따른 변화를 절대영도에 대한 값에 대한 비로 나타내고 있다. 초미세 자기장은 온도 증가와 더불어 감소하는데 그 식은 다음과 같다[16].

$$\frac{H_{hf}(T) - H_{hf}(0)}{H_{hf}(0)} = -B_{3/2} \left(\frac{T}{T_c}\right)^{3/2} - C_{5/2} \left(\frac{T}{T_c}\right)^{5/2} \quad (1)$$

여기서 T_c 는 Curie온도이며 $H_{hf}(T)$ 는 온도 T 에서의 초미세 자기장이고, $H_{hf}(0)$ 는 절대 영도에서의 초미세 자기장 값이다.

초미세 자기장 실험 값에 (1)식을 최소 자승 법으로 계산한 결과 $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 경우 spin wave 상수 $B_{3/2} = 0.27 \pm 0.05$, $C_{5/2} = 0.19 \pm 0.05$ 이였으며 이 값은 α -Fe ($B_{3/2} = 0.11$) 및 Ni ($B_{3/2} = 0.12$)에 비하여 큰 값을 가지는데 이는 장파장의 spin wave가 ultra-fine garnet 결정 내에서 잘 여기 됨을 보여준다.

$Y_3Fe_5O_{12}$ 의 온도에 따른 Mössbauer spectrum의 공명 흡수 면적으로부터 YIG의 Debye 온도를 결정할 수 있었다. Debye 온도를 결정하기 위해 되됨없는 확률 (recoil free fraction) f 에 Debye 모델을 도입하면 다음과 같이 된다[17].

$$f = \exp\left[-\frac{3E_R}{2k_B\Theta} \left(1 + \frac{4T^2}{\Theta^2} \int_0^{\Theta/T} \frac{xdx}{e^x - 1}\right)\right] \quad (2)$$

여기서 E_R 은 14.4 keV γ -선에 대한 ^{57}Fe 의 되됨에너지이고 Θ 는 Debye 온도이며, k_B 는 Boltzmann 상수를 나타낸다. 온도 T 에서 Mössbauer spectrum의 전체 공

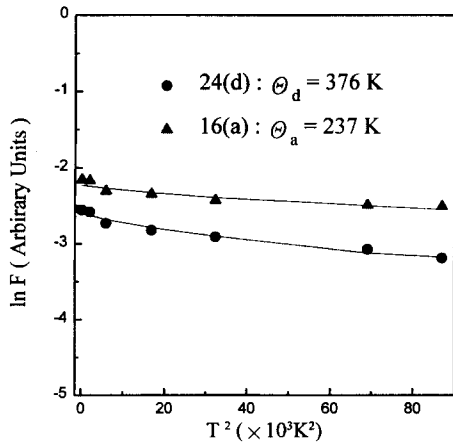


Fig. 10. Natural logarithm of the absorption area, F , vs T^2 for the spectra of $Y_3Fe_5O_{12}$.

명 흡수 면적 F 는 f 에 비례하므로 $\ln f = \ln F + const.$ 의 형태로 쓸 수 있다. 원자의 질량을 m , 원자간 거리를 R_0 라고 할 때 고체의 녹는 온도 $T_s \propto m \cdot \theta \cdot R^2$ 에 비례하므로 Debye 온도는 물체의 굵기를 나타낸다고 할 수 있다. $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 Debye 온도는 24(d)site인 경우 376 K이며 16(a) site인 경우 237 K였고 이를 Fig. 10에 나타내었다.

한편, Bi가 첨가되면서 Bi의 치환 량이 증가할수록 단일상의 garnet phase의 합성 온도가 낮아짐을 확인할 수 있었으나 Bi의 치환량이 $x=1.0$ 치환 될 때 annealing 온도가 지나치게 높은 경우에 x-ray 회절 도에서 순수한 garnet phase 이외에 $BiFeO_3$ 의 phase도 함께 존재함을 알 수 있었다. 이는 자화값을 더욱 감소시키는 경향을 띄게 되는데 Bi의 치환 량이 $x=0.25$ 와 0.5의 경우 단일 상이 형성되는 annealing 온도는 1000 °C이나 $x=0.75$ 와 1.0 치환될 때는 이 온도에서 second phase가 존재하게 된다. 일반적으로 microwave device의 소자에서 요구하는 자기적 특성은 높은 포화 자화값과 낮은 coercivity값이다. 900 °C와 1000 °C에서 열처리한 $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ 시료의 VSM을 이용한 포화자화 값과 coercivity 값은 Fig. 11과 Table 1에 나타내었다. 이 경우 포화 자화값이 Matsumoto 등이 제시한 $x=0.0$ 인 순수한 YIG의 28 emu/g 그리고 Bi가 $x=1.0$ 치환된 시료의 23 emu/g에 비해서 약 11 % 증가하였음을 확인하였다. Bi의 치환 량이 증가할수록 포화 자화값은 줄어들었으나 대신 garnet상의 생성온도가 낮아지는 효과를 가져왔다. 또한 이 경우 coercivity 값이 현저히 감소하

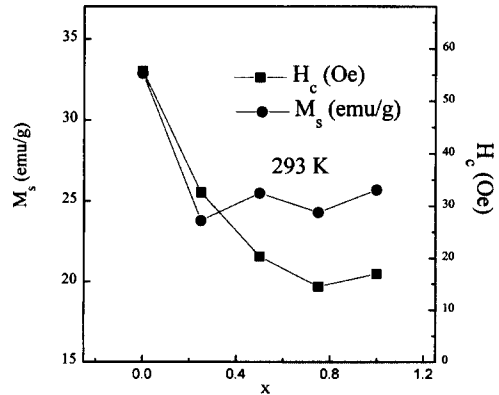


Fig. 11. Temperature dependence of the magnetization and coercivity of 10 kOe for $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$).

는 결과를 얻을 수 있었다. VSM으로 측정된 $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 Curie 온도는 580 K이며 Y대신 Bi가 치환됨에 따라 Curie 온도는 580 K에서 603 K로 다소 증가하였다. Y대신 Bi를 $x=1$ 로 치환함에 따라 포화 자화값 (M_s)은 21 % 감소하였으나 대신 coercivity (H_c)값은 72 % 감소를 가져옴으로써 YIG에서 Bi농도가 H_c 제어에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 또한 기존의 solid-solid reaction에 의한 시료제조 방식의 경우 1350 °C에서 24시간 annealing하여 단일상의 garnet을 얻을 수 있는 반면 sol-gel 방식에 의한 시료 제조법으로는 900 °C에서 단일상의 garnet을 얻을 수 있었으므로 annealing 온도를 약 450 °C 낮추는 효과를 가져올 수 있었으며 여기에 Bi를 치환함으로써 annealing 온도가 전반적으로 더욱 낮아짐을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 97년도 대학기초 연구지원 사업과 한국과학재단(97-0702-0401-5) 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] F. Bertaut and F. Forrat, *Compt. Rend.* **242**, 382 (1956).
- [2] K. Hisataka, I. Matsubara, K. Maeda, H. Yasuoka, H. Mazaki and K. Vematsu, *J. Magn. Magn. Mater.* **140-144**, 2127 (1995).
- [3] Carl E. Patton, *J. Appl. Phys.* **41**, 1637 (1970).
- [4] P. W. Peterman, M. Ye, and P. E. Wigen, *J. Appl.*

- Phys. **76**, 6886 (1994).
- [5] S. Geller, and M. A. Gilleo, J. Phys. Chem. Solids **3**, 30 (1957).
- [6] M. Ku era, M. Maty . Jr, J Magn. Magn. Mater. **140-144**, 2105 (1995).
- [7] K. Yamaguchi *et al*, J. Magn. Soc. Jpn. **12**, 343 (1988).
- [8] P. Hansen, W. Torksdorf, K. Witter and J. M. Robertson, IEEE Trans. Magn. Mag. **20** 1099 (1984).
- [9] Soshin Chikazumi, Physics of Ferromagnetism, Clarendon Press, Oxford(1997) p. 208.
- [10] M. Gomi, T. Okazaki, and M. Abe, IEEE Trans. on Mag. **23**, 2967 (1987).
- [11] C. S. Kim, H. M. Ko, M. Y. Ha and J. Y. Park, IEEE Trans. on Mag. **27**, 5456 (1991).
- [12] T. Mizuno, M. Gomi, IEEE Trans. on Mag. **22**, 1236 (1986).
- [13] K. Matsumoto, K. Yamaguchi and T. Fujii, IEEE Trans. on Magn. in JPN **6**, 614 (1991).
- [14] B. J. Evans and S. S. Hafner, J. Phys. Chem. Solids **29**, 1573 (1968).
- [15] M. A. Gilleo, Ferromagnetic Insulators; Garnet, North-holland Publishing Company, Amsterdam (1980) p. 46.
- [16] C. L. Chien and Hasegawa, Phys. Rev. **B16**, 2115 (1977).
- [17] H. N. Ok, K. S. Baek, E. C. Kim and C. S. Kim, Phys. Rev. **B48**, 3212 (1993).

Crystallographic and Mössbauer Studies of Magnetic Garnet $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ by a Sol-Gel Method

Young Rang Uhm, Chul Sung Kim

Department of Physics, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

Jae-Gwang Lee

Department of Applied Physics, Kunkok University, Chungbuk 380-701, Korea

(Received 15 June 1998, in final form 20 July 1998)

Crystallographic and magnetic properties of single phase garnet $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$) were studied by using x-ray diffraction, Mössbauer spectroscopy and vibrating sample magnetometer (VSM). Ultra-fine polycrystalline cubic samples have been prepared by sol-gel method. The lattice constant increase linearly with increasing an amount of Bi. Annealing temperature was larger than 800 °C for the growth of a single-phase garnet powder. The second phase of garnet, $BiFeO_3$, was at 1000 °C for $x=0.75$, and 950 °C for $x=1.00$. From Mössbauer spectroscopy and VSM measurements, the magnetization and the coercivity were decreased and the Curie temperature $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$) was slightly increased as increasing the Bi content.