

## YIG 박막의 수직이방성 (Perpendicular anisotropy of YIG films)

장 평우

청주대학교 응용과학부

### I. 서론

yttrium iron garnet(YIG)은 우수한 광학특성과 고주파에서의 자기 특성으로 고주파부품, 광학응용기기 등에서 다양한 형태로 사용되어지고 있고, 크기 역시 벌크에서 100 nm의 박막까지 다양하다. 고상 에피택시법은 상온에서 비정질의 Fe-Y-O박막을 GGG (gadolinium gallium garnet)기판에 증착한 뒤 700 °C이상에서 열처리를 하여 에피택시박막을 얻는 방법으로 공정이 단순하면서도 우수한 박막을 얻을 수 있다는 장점이 있다[1]. YIG 박막은 벌크재료에는 없는 흥미로운 자기적 특성을 가지고 있으며, 특히 자기공명현상(FMR, ferromagnetic resonance)의 연구용으로 모범 재료이긴 하지만 벌크 재료에 비해 FMR 특성을 제외하고는 다양하게 조사되어 있지 않다.

에피택시 성장한 YIG박막의 특성 중 응용 상 그리고 자기학의 관점에서 흥미로운 것은 GGG 기판과 YIG 박막의 격자상수의 차이가 0.02%임에도 박막의 열처리온도, 시간 그리고 두께 등이 달라짐에 따라 수직이방성의 유도된다는 것이다. 본 연구에서는 고상에피택시법으로 성장한 YIG 박막의 단면을 투과전자현미경으로 관찰하여 수직이방성의 원인을 조사하고, 수직이방성을 가진 박막의 이력곡선 형태와 초기자화율의 온도에 따른 변화를 연구하였다. 아울러 이 결과를 이용하여 YIG 에피택시 박막의 큐리온도를 손쉽게 측정할 수 있는 방법을 제시하였다.

### II. 실험 방법

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>분말을 분쇄, 혼합, 소결 및 가공공정을 통해 YIG 타겟을 제작하고 2 인치의 구리판에 은분말 페이스트로 부착하여 rf 마그네트론 스파터장치에서 비정질 박막을 제작하였다. 기판으로는 YIG와 결정구조가 같고 격자상수가 거의 일치하는 GGG를 사용하였다.

제작된 0.8 - 2.6 μm의 Fe-Y-O 비정질박막을 대기 중에서 700, 1050 °C에서 1 시간 열처리하여 에피택시 성장을 시킨 후 노속에서 냉각시켰다. 박막의 결정구조와 에피택시는 XRD(x-ray diffraction)로 단면미세조직은 투과전자현미경으로 관찰하였다. 박막의 자화특성은 벡터 진동시료형자력계 (vibrating sample magnetometer, VSM)로 상온에서 390 °C까지 측정하였다.

### III. 결과 및 고찰

그림 1, 2는 각각 700와 1050 °C에서 열처리된 두께 2.2, 0.8 μm 박막의 단면조직사진이다. 700 °C에서 열처리된 시편의 기판부근에서 완벽한 에피택시성장이 일어났음을 SAD(selected area diffraction) 패턴에서 관찰할 수 있었다. 그러나 기판에서 멀어짐에 따라 에피택시가 불완전해지고 박막의 윗부분에서는 다른 방위를 가진 결정립이 성장하였다. 특히 많은 전위(dislocation)가 관찰됨으로써 이들 전위들에 의해 응력이 완화되었음을 확인할 수 있었다. 이에 반해 1050 °C에서 열처리된 시편에서는 높은 온도로 인해 박막전체에 걸쳐 완벽한 에피택시성장이 일어났으며 아울러 전위 밀도도 매우 낮았다. 이 때문에 기판과 박막의 계면에서 생성된 응력이 박막 내에서 완화되지 못하여 수직이방성이 유도된 것으로 판단된다.

그림 3은 측정온도에 따른 박막의 이력곡선변화를 나타내었고, 그림 4에는 온도에 따른 포화자장(또는 이방성자장)의 변화를 나타내었다. 그림 3에서 200 °C까지는 수직이방성을 가진 형상이 나타나나 230 °C이상에서는 수직이방성이 없는 형상을 하고 있다. 그림 4에서는 온도가 증가함에 따라 포화자장이 거의 직선적으로 감소하고 있으며, 수직이방성이 존재할 경우는 결정용이방향인  $[111]$ ,  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ ,  $[11\bar{1}]$ 의 면내 투영방향이 자화용이 방향이 되므로 자장이 인가되면 자벽이동에 의해 자화가 진행되면서 비가역 자화과정을 거쳐 박막 면에는  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ ,  $[1\bar{1}\bar{1}]$ ,  $[11\bar{1}]$  세 종류의 자구가 남게 되어 이후 자화는 자화벡터의 회전에 의해 진행된다.

YIG 에피택시박막에 수직이방성이 유도되나 그 크기가 결정자기이방성보다 매우 작으면서 또 앞에서 언급한 이력곡선의 형태로 확인될 경우 VSM으로 쉽게 결정자기이방성을 측정할 수 있다.

포화자화의 회전에 의해 자화가 진행되고 <111>이 자화용이방향일 경우 결정자기이방성  $K_2$ 를 무시하면 이방성자장은  $H_k=4K_1/3M_s$ 로 주어지고 이식은 용이방향으로부터 어떤 면으로 회전을 하더라도 유효하다[2]. 그림 5에는 이 식으로부터 구한 이방성자장을 나타내었는데 실험결과와 거의 일치하며 YIG (111) 에피택시박막에서 수직이방성이 유도되었을 경우 VSM으로 결정이방성상수  $K_1$ 을 쉽게 측정할 수 있음을 알 수 있다.

보자력은 재료의 미세구조도 영향을 받지만 일차적으로 이방성상수, 포화자화 등과 같이 intrinsic 한 성질의 영향을 크게 받는다. 이방성상수와 포화자화가 결정하는 자기변수로는 초자화율이 대표적인 것으로 온도에 따른 변화는 Hopkinson 효과로 알려져 있으며  $\chi \propto M_s/\sqrt{K}$ 로 간단히 주어진다[3]. 그림 5는 온도에 따른 초자화율의 변화를 측정한 것으로 0.5 Oe의 자장을 인가한 상태에서 온도에 따른 자기모멘트 변화를 측정하여 구하였으며, Hopkinson식의 초자화율에 사용한 결정자기이방성상수는 Rodrigue의 결과를 인용하였고[4], 포화자화는 본 실험에서 직접 측정하였다. 그림 5에서 Hopkinson의 식이 측정결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

GGG기판에 성장한 YIG박막의 고온에서의 자기특성, 특히 큐리온도를 측정할 때 상자성인 GGG기판의 큰 자화로 인해 어려움이 있다. 그런데 그림 5의 큐리온도부근에서 자화율이 급격히 저하되는 것을 이용하면 이러한 박막의 큐리온도를 비교적 정확히 측정할 수 있다. 이 Hopkinson효과를 이용하여 10 Oe이하의 낮은 자장에서 자기모멘트를 측정하면 그림 6에서와 같이 용이하게 측정할 수 있다.

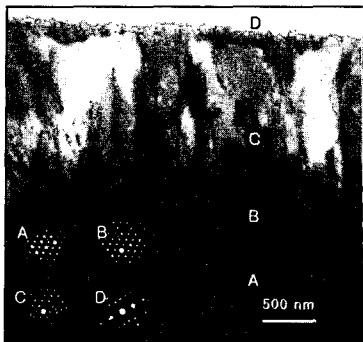


Fig. 1 TEM image of YIG films annealed at 700°C in the air.

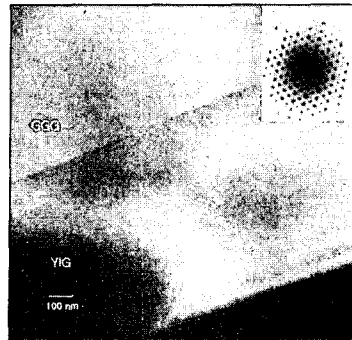


Fig. 2 TEM image of YIG films annealed at 1050°C in the air.

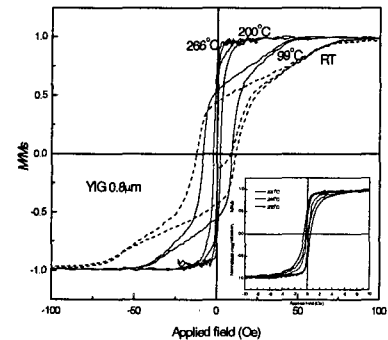


Fig. 3 VSM hysteresis loops of SPE YIG film measured at different temperature.

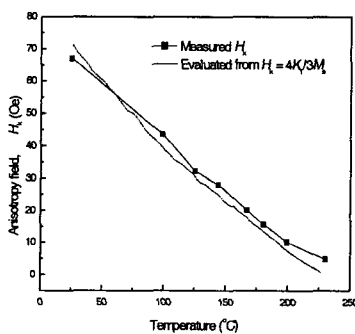


Fig. 4 Variation of anisotropy field of SPE YIG film with temperature

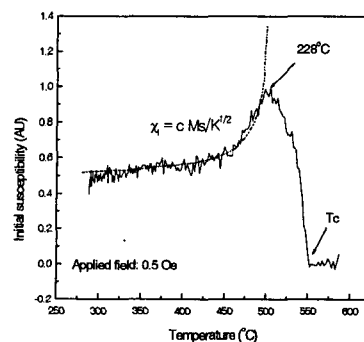


Fig. 5 Variation of initial susceptibility SPE YIG film with temperature.

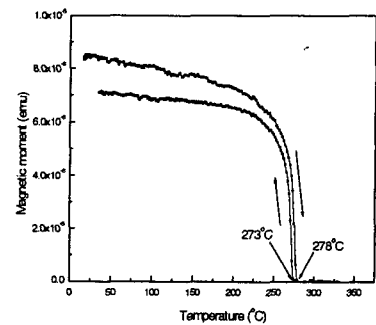


Fig. 6 Sharp decrease of magnetization just below Curie temperature.

#### IV. 참고문헌

- [1] Pyung Woo Jang and Ji Young Kim, IEEE Trans. Magn., **37**(4), 2438(2001)
- [2] B. D. Culity, Introduction to magnetic materials, Addison-Wesley, London(1972), p.233
- [3] Soshin Chikazumi, Physics of ferromagnetism, Clarendon press, Oxford(1997), pp.480-486
- [4] G. P. Rodrigue, H. Meyer, and R. V. Jones, J. Appl. Phys., **Supp.31**, 376S(1960)