〈연구논문〉 J. Korean Oph. Opt. Soc., Vol. 11, No. 3, pp. 225-229, July 2006

# 강자성체박막의 회전에 따른 자기저항의 변화

양기원, 박상철*
경운대학교 안경광학과
부산정보대학 안경광학과*

(2006년 5월 13일 받음, 2006년 7월 11일 수정본 받음)

강자성체인 철과 니켈의 박막에서 전류와 자기장이 이루는 각도의 변화에 따른 자기저항의 변화를 관찰하였다. 경사각에 따른 PMR과 NMR의 크기가 같은 $\phi_{mix}$의 변화는 전류에 수직한 자기장의 성분과 평행한 자기장의 성분이 같게 되는 각도에서 자기저항 루프의 역전이 되는 것을 이용하면 $\phi_{mix} = \tan^{-1}(1+\tan\theta)$와 같이 구해진다. 위 관계식은 실험치와 잘 일치함을 보여준다. 반면에 철박막의 경우에는 니켈박막과 자화축이 다르게 나타나서 $\phi_{mix}$가 위 식으로 주어진 관계와 일치하지 않는다.

주제어: 니켈박막, 자기저항, 혼합각

## Ⅰ. 서 론

지금까지의 자기저항연구에서는 자기저항피크(magnetoresistance peak)의 형태나 피크 사이의 간격(Field Difference between Magnetic Peaks; FDMP)에서는 초점을 맞추지 않았다. 이는 이러한 정보가 실제적인 응용에 있어서 어떻게 사용될 수 있는가 하는데 대한 회의적인 시각 때문이다. 그렇지만 최근에는 경사박막에 관한 자기저항에 대한 연구결과가 보고되고 있다.[1-4] 자기저항의 피크사이의 간격에 대한 정보들이 이들 경사박막구조의 실제적인 응용에 있어서는 중요하다는 것을 시사해 주고 있다. 또한 이러한 자성물성에 대한 연구가 재료에 대한 명확한 이해를 바탕으로 안경재료에 대한 더 나은 응용이 가능하리라 생각이 된다.

## Ⅱ. 연구대상 및 방법

박막시료는 99.999%의 고순도 니켈과 철 덩치를 열증착법을 이용하여 증착하였다. 기판으로는 Na함유량이 거의 없는 코닝 7059 유리를 세척하여 사용하였다. Fig. 1에서 증착기는 터보진공펌프계에 의해 진공도가 약 $10^{-8}$ Torr될 때까지 진공을 뽑았으며, 증착시의 진공도는 약 $10^{-7}$ Torr를 유지하였다. 수정발진자방식인 두께측정기(XTM/2 Deposition Monitor)에 의해 증착률과 증착된 두께가 제어되었다. 박막을 증착하기 전에 셔터(shutter)를 닫은 상태에서 시료가 녹을 정도의 전류를 인가하여 시료에 있을 수 있는 불순물을 제거하였다. 박막증착은 0.1Å/sec의 속도로 천천히 이루어졌다. 만약 이 증착률이 변화할 경우에 텅스텐보트에 입력되는 전류의 양을 조절하여 박막의 증착률이 일정하도록 제어하였다.

경사면(박막면)과 자기장(자기장의 방향은 항상 고정)과의 각도인 경사각(앞으로 $\theta$로 표시)을 고정시킨 후 스텝모터를 사용해서 회전각(앞으로 $\varphi$로 표시)을 변화시키면서 시료의 자기저항을 측정하게 된다. 여기서 스텝모터의 각분해능은 약 0.012° 정도이다. 저항의 측정은 4단자측정법(four point)에 의해 이루어진다. 정밀 전류원 장치(HP 6115A)에 의해 시료에 전류가 공급되며 시료에서의 전압강하는 전압측정기(HP 34401A)에 의해 측정된다. 자기저항 loop의 측정과정은 전자석에 공급되는 전류의 양을 변화(자기장의 변화)시키면서 시료의 자기저항을

교신저자 연락처: 박상철. 부산광역시 북구 구포3동 산48-6 부산정보대학 안경광학과
TEL : 051-330-7360, E-mail : eyecareopto@yahoo.co.kr

측정하게 된다. 자기저항 루프의 획득과정에서 자기장의 변화간격은 대략 2G으로 유지하였다.

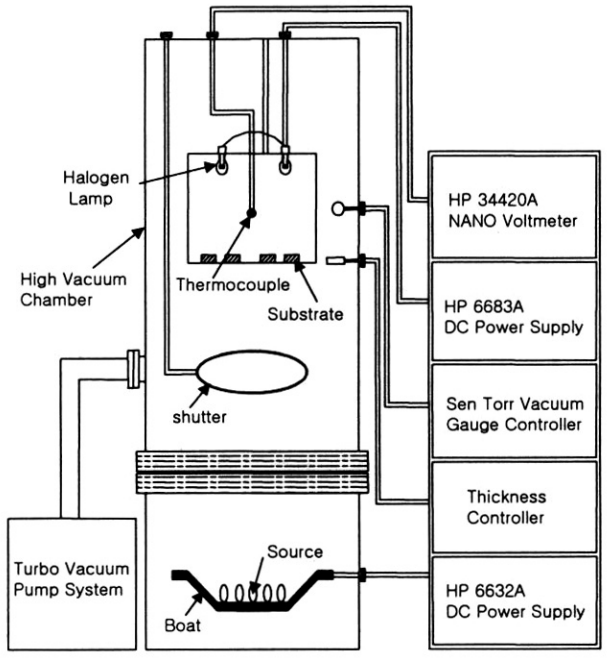


Fig. 1. The schematic figure of a thermal evaporator used for growing the film samples

## Ⅲ. 결과 및 고찰

경사진 박막(Fig. 2(b))에서 자기저항 루프의 회전각에 따른 변화를 관찰하면 기존의 이방성자기저항실험(Fig. 2(a))[3]에서와 동일하게 PMR(Positive magnetor resistance) → NMR(Negative Magneto resistance) 전이 현상을 볼 수 있다. 실제로 기존의 자기이방성실험과 같은 각구조에서 PMR → NMR 전이현상을 관찰한 실험결과도 거의 보고되어 있지 않다.[5-7] NMR 루프는 전류에 수직한 자기장 성분에 의해 형성되고 PMR 루프는 전류에 수평한 자기장성분에 의해 만들어진다. 박막이 회전하게 되면 자기장의 전류에 수평, 수직한 성분이 변하게 되고 이에 따라 PMR과 NMR의 혼합현상이 관찰된다. Fig. 2(a)와 같은 평면구조에서는 $\varphi$=45°에서 PMR과 NMR의 완전혼합이 관찰된다. 반면에 경사진 박막에서는 혼합현상이 외부자기장이 복잡한 형태로 PMR과 NMR에 관련되므로 이러한 PMR--NMR경사각에 복잡한 형태로 의존하게 된다.

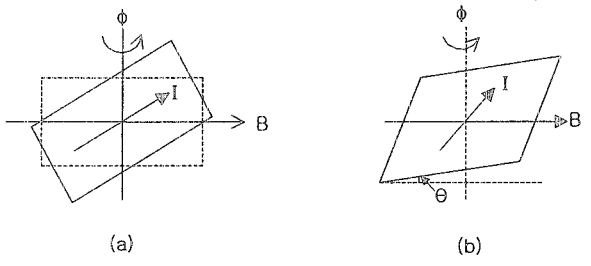


Fig. 2. The angle configurations in (a) conventional AMR measurements and (b) this work.

경사진 박막의 경우 전류에 수직, 수평한 성분을 구하기는 쉽지 않다. Fig. 3에 경사진 박막에서 전류에 수직, 수평한 성분의 자기장을 구분한 것을 보여주고 있다.

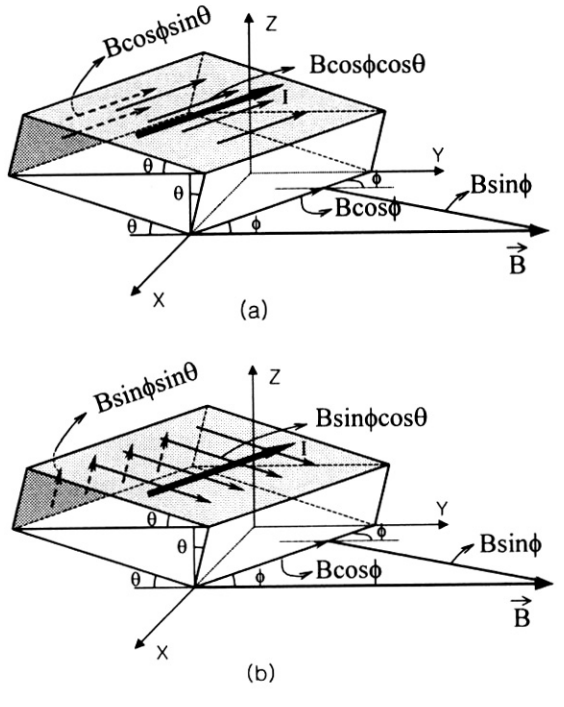


Fig. 3. The decomposition of magnetic field into the components (a) parallel and (b) perpendicular to the current.

이 그림에서 자기장은 선속으로 표시됨에 유의하여야 할 것이다. 그림에서 보듯이 전류에 평행한 자기장 성분은 $B(\cos\phi\sin\theta+\cos\phi\cos\theta)$이고 전류에 수직한 성분은 $B(\sin\phi\cos\theta+\sin\phi\sin\theta)$와 같이 구해진다. 전류에 수직한 성분 중에서 $B\sin\phi\sin\theta$항은 전류와 박막면에 모두 수직이다. 박막에 수직한 방향은 거대한 반자화 효과가 존재한다. 따라서 위의 박막에 수직한 자기장성분은 얇은

박막인 경우에는 자기저항피크에 영향을 주지 않는다. 두 자기장 성분이 일치하는 각도에서 PMR과 NMR 루프에 완전히 혼합되고 이 혼합각 $\phi_{mix}$는

$$\phi_{mix} = \tan^{-1}(1+\tan\theta) \qquad \text{식 (1)}$$

와 같이 구해진다. 아래에서 자기저항곡선에서부터 혼합각 $\phi_{mix}$를 어떻게 구하는지 보기로 하자. 자기저항 루프에서 PMR부분과 NMR부분의 기준점에서의 진폭을 구하여 이를 회전각에 따라 그리면 두 진폭이 일치하는 각을 구할 수 있다. 이 각을 $\phi_{mix}$로 둘 수 있는 것이다. 다른 경사각 $\theta$에 대해서도 앞에서 설명한 바와 같이 $\phi_{mix}$를 구할 수 있다. 이렇게 구한 $\phi_{mix}$를 경사각 $\theta$에 따라 그린 것이 Fig. 4이다. 식 (1)로 주어지는 예측값을 구하여 Fig. 4에 굵은 직선으로 표시해 두었다.

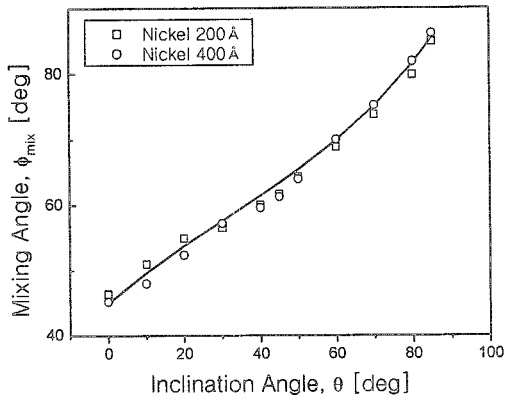


Fig. 4. The variation of $\phi_{mix}$ as a function of $\theta$. The bold solid line represents the curve of Eq. 4–1.

경사진 철박막의 경우도 니켈박막과 마찬가지의 방법에 의해 $\phi_{mix}$를 구할 수 있다. 이렇게 구한 $\phi_{mix}$의 경사각 $\theta$에 따른 변화가 Fig. 5에 니켈박막에 대한 값들과 함께 그려져 있다. 큰 각도에서는 반자화 효과 때문에 자화에 영향을 주지 못하는 박막평면에 수직인 자기장 성분이 크고 박막평면에 인가되는 요소가 작다. 그러므로 박막의 자화축의 영향을 적게 받기 때문에 철과 니켈박막의 $\phi_{mix}$의 차이가 $\theta$가 0°일 때보다 적게 나타난다. 그림에서 보듯이 니켈박막의 경우보다 대체로 $\phi_{mix}$의 값이 작다는 것을 볼 수 있다. 그러나 $\theta$가 증가함에 따라 이 차이는 점차로 줄어든다. 이는 경사각이 큰 경우에는 박막평면 방향으로의 자기장 성분이 아주 작아지므로 두 박막의 경우 조건이 동일해지기 때문이다.

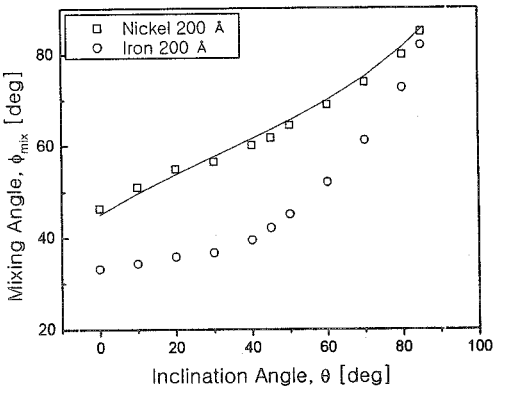


Fig. 5. The variation of $\phi_{mix}$ as a function of $\theta$. Note the difference between the data for the nickel and iron films.

## Ⅳ. 결 론

강자성체인 철과 니켈의 박막에서 전류와 자기장이 이루는 각도에 따른 자기저항의 변화를 관찰하였다. 경사진 박막의 경우 자기저항 루프는 PMR과 NMR의 신호가 섞여 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 경우 회전각에 따른 자기저항 피크간격의 형태는 두 신호가 섞여 복잡한 신호의 형태가 되므로 정량적으로 분석할 수는 없다. 그러나 경사각이 클 경우 자기저항 피크간격은 크게 증가하는 것은 위 90° 경사각의 경우와 동일하다는 것을 알 수 있었다. 니켈박막의 경우 $\varphi$가 증가할수록 자기저항 loop에서 PMR에서 NMR로 전이가 일어나며 두 신호가 완전히 섞이는 각도 $\phi_{mix}$는 경사각에 의존한다. 경사각에 따른 $\phi_{mix}$의 변화는 전류에 수직한 자기장의 성분과 평행한 자기장의 성분이 같게 되는 각도에서 자기저항 루프의 역전이 되는 것을 이용하면 $\phi_{mix} = \tan^{-1}(1+\tan\theta)$와 같이 구해진다. 위 관계식은 실험치와 잘 일치함을 보여준다. 반면에 철박막의 경우에는 니켈박막과 다르게 $\phi_{mix}$가 위 식으로 주어진 관계와 일치하지 않음을 보여주었다. 이에 대한 이유는 니켈박막의 경우에는 박막면이 자화용이축인 [111]방향으로 나타나지만 철의 경우에는 중간자화용이축인 [110]로 나타나기 때문이라고 생각된다. 그러나

경사각이 커짐에 따라 철박막의 경사각에 따른 $\phi_{mix}$는 이론식의 값에 접근하게 되는데 이는 경사각이 0° 인 경우에는 박막면방향으로 자기장이 인가되어 박막면이 중간용이축이라는 사실이 $\phi_{mix}$에 큰 영향을 주지만 경사각이 90° 인 경우에는 자기장이 박막면에 수직으로 인가되므로 박막면이 중간용이축이라는 사실이 $\phi_{mix}$ 값에 큰 영향을 주지 않게 되기 때문이다. 안경재료에 많이 사용하는 위의 실험에서 설명한 니켈과 철박막에 대한 자성물성에 대한 연구가 새로운 안경테를 제작하고 응용하는데 많은 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌


[1] Woosik Gil, Detlef Gorlitz, Michael Horisberger, Jurgen Kotzler, "Magneto-resistance anisotropy of olycrystalline cobalt films : Geometrical-size and domain effects", Phys. Rev. B., 72:134-401(2005).

[2] Jurgen Kotzler, Woosik Gil, "Anomalous Hall resistivity of cobalt films : Evidence for the intrinsic spin-orbit effect", Phys. Rev. B., 72: 60-412(2005).

[3] 이일수, 양기원, 홍성욱, 황문정, 김찬, 김상보, 이의완, 이상윤, 김동락, "강자성 박막니켈에서 자기저항의 박막 면과 자기장사이의 각도에 따른 변화", 새물리, 40:144-148(2000).

[4] Ilsu Rhee and Chan Kim, "Angle Dependence of Magnetoresistance Peaks in Thin nickel Films", IEEE Transactions on Magnetics, 37(2):1032-1035(2001).

[5] Ilsu Rhee and Kiwon Yang, "Grain Size effect on the Magnetoresistance Peaks in thin Nickel films", Journal of the korean Physcial Society, 37(6):360-363(2000).

[6] Ilsu Rhee and Kiwon Yang, "Magnetoresistance Oscillations in Thin Inclined Magnetic Films", Journal of the korean Physcial Society, 39(6): 1055-1059(2001).

[7] Ilsu Rhee and Kiwon Yang, "Angle and thickness dependence of magnetoresistance peaks in thin nickel films", Solid State Communications, 116:181-186(2000).

# Magnetoresistance Variation for Rotation in Ferromagnetic Thin Films

Ki-Won Yang and Sang-Chul Park*

Department of Ophthalmic Optics, Kyungwoon University

*Department of Ophthalmic Optics, Busan College of Information Technology

(Received May 13, 2006 : Revised manuscript received July 11, 2006)

In our angle configuration, several peculiar characteristic behaviors of MR could be observed. the mixing of positive MR(PMR) and negative MR(NMR) in the inclined sample was observed. The complete mixing angle, $\phi_{mix}$ as a function of inclination angle, $\theta$ was observed to fit well to the relation of $\phi_{mix} = \tan^{-1}(1+\tan\theta)$ in nickel films. The above theoretical relation was obtained by decomposing the magnetic field into the components parallel and perpendicular to the current flow and identifying $\phi_{mix}$ as the angle satisfying that the above two components of magnetic field were identical. We also observed that the data of $\phi_{mix}$ did not satisfy the above theoretical relation in the iron film. This was explained by the fact that the growth direction in the iron film was an intermediate direction of magnetization, while the growth direction in the nickel film was an easy axis of magnetization.

Key words: Nickel Thin Film, Magnetoresistance(MR), Mixing Angle