

## FeCo/Pd 초격자 다층박막의 자기 및 자기광학적 특성

김진홍

금성중앙연구소 기초연구실

신성철

한국과학기술원 물리학과

(1993년 1월 27일 받음)

FeCo/Pd 초격자 다층박막의 FeCo 와 Pd sublayer 두께를 각각 2.5 Å 및 10.5 Å로 유지시키면서 FeCo sublayer 의 Fe 조성이 0에서 100% 까지 변화함에 따른 포화자화값, 수직 자기이방성에너지, 보자력 및 Kerr 회전각의 파장 의존성을 조사 하였다. 포화자화값은 Fe 조성이 48 at. % 부근에서 최고치를 보였고, 수직 자기이방성에너지 및 보자력은 Fe 조성의 증가에 따라 단조감소 하였다. Kerr 회전각은 Fe 조성의 증가에 따라 감소하였는데 그 크기 및 변화의 폭은 단파장으로 갈수록 증가하였다.

### I. 서 론

천이금속계 조성변조 초격자 다층박막은 계면에서 생겨나는 표면 자기이방성[1, 2]과 고자기저항[3] 등 흥미로운 현상을 가지고 있음이 알려지게 되고 이를 이용한 광자기 기록재질[4, 5, 6] 및 자기저항 헤드로서의 응용 가능성으로 인해 많은 연구가 되어지고 있다. 특히 천이금속과 Pd, Pt 등의 비자성 귀금속과의 조성변조 초격자 다층박막은 현재 광자기 기록재질로 상용화되고 있는 희토류-천이금속 합금박막에 비해 단파장대역( $\lambda = 4000 \sim 5000 \text{Å}$ )에서 자기광학적 효과가 크고[7] 수명이 훨씬 길기 때문에 차세대 의 고밀도 광자기 기록재질로 주목 받고 있다.

조성변조 Co/Pd 및 Co/Pt 초격자 다층박막의 자기 및 자기광학적 특성은 많은 연구가 수행되어 자기적인 측면에서는 Co/Pd 초격자 다층박막이[1], 자기광학적 측면에서는 Co/Pt 초격자 다층박막의[7] 특성이 우수함은 보고된 바 있으나, Fe 계 초격자 다층박막은 그다지 많은 연구가 행해지지 않은 상태이다. 지금까지 연구된 결과에 의하면, Fe/Pt 초격자 다층박막은[8] 수직 자기이방성을 가지나 Co/Pt 초격자 다층박막에 비해 보자력과 잔류자화값이 작다. Fe/Pd 초격자 다층박막은[2] Co/Pd 초격자 다층박막에 비해 표면 자기이방성에너지는 작고 정상 자기이방성에너지는 크기 때문에 수평 방향의 자화용이축

을 갖는다.

본 연구에서는 FeCo/Pd 초격자 다층박막에서[9] FeCo sublayer 의 Fe 조성을 0에서 100 % 까지 변화시키며 따른 자기 및 자기광학적 특성을 조사함으로써 FeCo/Pd 초격자 다층박막에서 Fe 이 자기 및 자기광학적 특성에 미치는 영향을 조사 하였다.

### II. 실험 방법

FeCo/Pd 초격자 다층박막은 dc-magnetron 스퍼터링 방법으로 제조하였는데, 지름이 2" 인 Pd 타겟과 Fe chip 을 부착한 Co 타겟을 co-sputtering 하면서 기판을 타겟에 번갈아 노출시키는 방법으로 초격자 구조를 만들었다. 각 층의 두께 및 전체 층 수는 기판 holder 에 부착된 stepping 모터 를 이용해 타겟상에 머무는 시간과 전체 회전수를 변화시켜 조절하였다. FeCo sublayer 는 Co 타겟 위에 부착시킨 지름 12mm인 Fe chip의 갯수를 바꾸어 가며 스퍼터링함으로써 조성을 변화시켰다. 특히 Fe chip은 Co 타겟의 race 트랙상에 부착시켰는데, magnetron 스퍼터링의 경우에는 이 트랙을 중심으로 스퍼터링이 일어나기 때문이다. 또한 강자성체인 두 재질간에는 점착제를 별도로 사용할 필요가 없었다. FeCo 및 Pd 타겟에 인가한 power 는 각각 90W 와 100W 로 하였다. 시편은 1" × 1"

크기의 유리기판 상에 2.5-Å FeCo/10.5-Å Pd 의 sublayer 두께로 전체를 1100 Å으로 제조하여 x선 회절 실험, 자기 및 자기광학적 특성을 측정하였다. 초격자 다층박막은 base pressure 를  $5 \times 10^{-6}$  Torr로 하고 스파터링 Ar 압력을 10 mTorr 로 유지시키면서 제조하였다. Ar 압력을 10 mTorr 로 선택한 이유는 Ar 압력에 따른 Co /Pd 초격자박막의 특성을 연구한 결과[10] 광자기 기록재료로서 보자력 및 Kerr 회전각의 크기가 이 조건에서 최적이었기 때문이다. 스파터링되는 FeCo 와 Pd 원자의 cross contamination 을 방지하기 위해 Co 와 Pd 타겟 사이에 스테인레스 격막을 설치하고 타겟과 기판 holder 간에는 지름 2" 크기의 구멍이 있는 shutter 를 설치하였다. 시편의 구조 조사를 위해서 Cu-K $\alpha$ ( $\lambda = 1.5492$  Å) 를 이용하여 x선 회절실험을 하였고, 자기적 특성은 VSM(DMS사 제품) 및 자체 제작된 torque magnetometer 를 이용해 조사하였다. 자기광학적 특성 측정은 광원으로 Xe lamp 를 사용한 Kerr spectrometer 를 이용하여 4000 Å, 6330 Å, 7500 Å 파장에서 측정 하였다. FeCo sublayer 의 조성은 atomic absorption spectroscopy 로 조사 하였다.

### III. 결과 및 논의

Table I 은 Co 타겟상의 Fe chip 갯수의 변화에 따라 FeCo sublayer 조성의 변화를 나타낸 것인데, race 트랙 상에 부착한 Fe chip 수에 따라 선형적으로 증가됨을 볼 수있다. 이것은 magnetron 방식에서 스파터링이 주로 일어나는 race 트랙에 위치한 Fe chip 의 갯수가 증가함에 따라 점유하는 면적이 선형적으로 증가하기 때문이다.

Table I. Fe concentrations in FeCo sublayers as a function of the number of Fe chips on the Co target.

number of Fe chips	Fe concentrations in FeCo sublayers
1	11. 5 at. %
2	21. 5 at. %
3	32. 2 at. %
4	47. 9 at. %
5	60. 9 at. %

조성변조 Co /Pd 혹은 Fe /Pd 초격자 다층박막의

구조에 대한 x선 회절실험의 결과는 여러사람에 의해 보고되었다[11, 12]. 본 연구에서는 FeCo sublayer 중 Fe과 Co의 조성을 변화시킨 FeCo /Pd 초격자 다층박막의 구조의 변화를 조사하기 위해 x선 회절실험 하였는데, low angle 실험결과에서는  $\theta = 3.38^\circ \pm 0.25^\circ$ 에서 peak 를 얻어 FeCo 와 Pd bilayer 의 periodicity 가 13.0 Å  $\pm$  1.1 Å 인 초격자 다층박막 구조임을 확인 하였다. 한편, high angle 회절실험에서는 면간거리가 220 Å에 상응하는  $2\theta = 40.50^\circ$  에서 주 peak 를 얻었는데, 이것은 fcc Pd의 (111)의 면간거리 2.246 Å보다는 작고 fcc Co의 (111)의 면간거리 2.047 Å과 bcc Fe의 (110)의 면간거리 2.027 Å에 비해서는 크다. 즉, 9% 정도의 격자 불일치가 있는 FeCo와 Pd 의 계면에서 Pd 의 면간거리는 줄어들고 Fe 와 Co의 면간거리는 늘어난 결과로 보여진다. Noboru Sato[11]는 Co계 초격자 다층박막에서 sublayer 들의 두께비가 다른 시편들을 x선 회절실험한 결과 두께비에 따른 면간거리의 이동을 관측하였다. 본 연구에서와 같이 Pd sublayer 의 두께에 비해 FeCo sublayer 의 두께가 얇을때는 x선 회절 peak에서의 면간거리는 Pd의 면간거리에 가까운 결정구조를 형성하지만, Pd sublayer 의 두께에 비해 FeCo sublayer 의 두께가 두꺼운 경우라면 FeCo의 면간거리에 가까운 결정구조를 형성하게 될 것으로 추측할 수 있다. 또한, 면간거리 1.925 Å에 상응하는  $2\theta = 47.15^\circ$ 에서 주 peak의 20% 정도의 강도를 갖는 peak 를 관측하였는데, 이것은 fcc Pd 의 (200) 결정면에 해당한다. 한편, FeCo sublayer 의 조성 변화에 따른 초격자 다층박막의 결정구조의 변화는 x선 회절실험에서 관측되지 않았는데, FeCo 합금의 경우 조성에 따라 여러종류의 결정상이 나타나게 되지만 2.5 Å으로 거의 단원자층 두께인 FeCo sublayer 의 조성에 따른 결정구조의 변화가 전체 초격자 다층박막의 구조에 미치는 영향은 관측 가능할 정도로 충분히 크지않기 때문인 것으로 생각된다. Sublayer 들의 두께가 더욱 두꺼워지게되면 계면의 영향에서 벗어나 고유의 결정구조를 갖게 되는데, Y. Obi et al. [12]의 결과에 의하면 Fe /Pd 초격자 다층박막에서 Fe sublayer 의 두께가 두꺼운 경우(100-Å Fe /50-Å Pd)는 Pd sublayer 뿐만 아니라 Fe sublayer 의 결정에 의한 peak 가 관측되었고 Fe sublayer 의 두께가 얇을 때에는 Fe의 peak 가 불분명 하였다.

FeCo sublayer 중 Fe 조성 변화에 따른 자기적 및 자기광학적 특성의 변화는 현저히 컸는데, 먼저 포화 자화값의 Fe 조성의존도를 Fig. 1에 보였다.

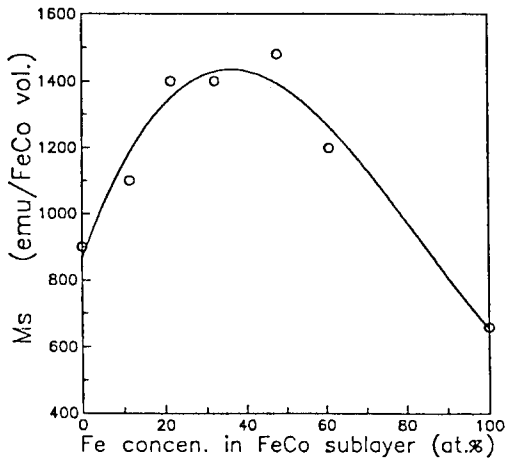


Fig. 1. Dependence of the saturation magnetization of FeCo/Pd multilayer thin films on the Fe concentration in the FeCo sublayer.

FeCo/Pd 초격자 다층박막의 포화자화값은 FeCo sublayer 중 Fe 조성이 48 at.% 부근에서 최고치를 보였다. Fe 조성변화에 대한 FeCo layer의 포화자화값의 변화는 Fig. 1에서 보는 것처럼 FeCo 합금에서 잘 알려진 Slater-Pauling 곡선과 유사한 경향을 보인다[13]. FeCo/Pd 초격자 다층박막과 FeCo 합금의 포화자화값을 비교할 필요가 있는데, Co 나 Fe 과 같은 강자성 재질에 의해 Pd 원자의 4d 전자가 분극되어 포화자화값이 커지게 된다는 보고가 많았다[12, 14]. 이러한 현상은 강자성체 가까이 있는 상자성 재질에서 일어나는 현상으로, 초격자 다층박막의 경우 전체 두께가 일정할 때 천이금속 sublayer 두께가 얇아 계면을 많이 형성할수록 그 효과가 증대된다. R. H. Victora *et al.* [14]의 결과에 의하면 1층 Co/4층 Pd의 초격자 다층구조에서 Co 층과 첫번째와 두번째 인접한 Pd 원자들은 각각  $0.25\mu_B$  및  $0.31\mu_B$ 의 자화가 유도됨을 밝혔는데, 강자성체인 Co 원자가 Co/Pd 초격자 다층박막에서 갖는 자화값인  $2.0\mu_B$ 과 비교했을 때 비교적 큰 값이다. 본 연구의 FeCo/Pd 초격자 다층박막에서는 Fe이 전혀 들어가지않은 Co/Pd 초격자 다층박막에서는 Pd의 유도자화에 의해 순수 Co 박막에 비해 포화자화값의 증가효과를 확인할 수 있었으나 Fe이 첨가된 조성 영역에서는 이를 확인할 수 없었다. F. J. A. den Broeder *et al.*[15]의 결과에 의하면 Fe/Pd 초격자 다층박막의 포화자화값이 순수  $\alpha$ -Fe에 비해 약 20% 정도 더 큼을 관측하였다. 그 원인으로 는 Fe에 근접한 Pd의 유도자화 때문이거나 또는

antiferromagnetism의 자기적 특성을 갖는  $\gamma$ -Fe이 ferromagnetism이 되기때문인 것으로 설명 하였다. Fig.1의 대부분의 영역에서 포화자화값은 bulk의 값보다 작운데, 이는 비교적 높은 스파터링 압력인 10 mTorr에서 제조한까닭에 초격자박막의 밀도가 낮기 때문으로 이해할 수 있다.

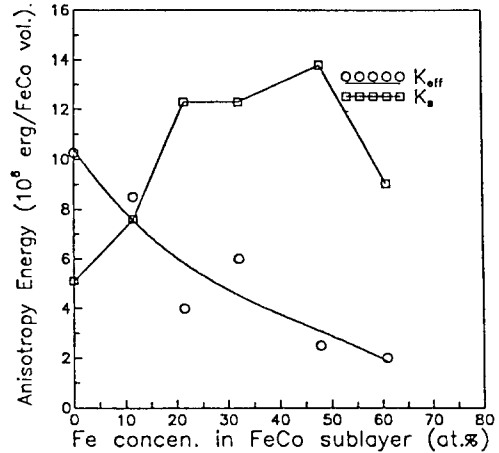


Fig. 2. Dependence of the effective anisotropy energy constant,  $K_{eff}$  and the shape anisotropy energy constant,  $K_s$  of FeCo/Pd multilayer thin films on the Fe concentration in the FeCo sublayer.

Fig. 2는 FeCo/Pd 초격자박막을 torque magnetometer를 이용해 측정된 effective 자기이방성에너지  $K_{eff}$ 와 형상 자기이방성에너지  $K_s (=2\pi M_s^2)$ 의 FeCo sublayer 중 Fe 조성에 관한 의존도이다.

Fe 조성이 61 at.%에 이를때까지 수직 자기이방성을 보였고, Fe/Pd 초격자 다층박막은 수평 자기이방성을 보임을 관측하였다.  $K_{eff}$ 는 수직 자기이방성에너지와 형상 자기이방성에너지와의 차로 Fig.2에서 FeCo sublayer의 Fe 조성이 증가함에 따라 점진적으로 감소함을 볼 수 있었다. 수직 자기이방성의 주된 원인은 Neel이 처음 제안한 계면에서의 broken symmetry에 의한 표면 자기이방성에 기인하는데, 계면의 상태를 sharp하게 적층할수록 그 값은 커지게 된다[2]. 부피 자기이방성에너지에는 demagnetizing energy, magnetocrystalline energy, magnetoelastic energy 등이 있는데, 이중 demagnetizing energy는 수평방향의 자화를 유도하는 것이다. H. J. G. Draaisma *et al.*[2]의 결과에 의하면

Fe/Pd 초격자 다층박막은 Co/Pd 초격자 다층박막에 비해 수직 자기이방성의 원인이되는 표면 자기이방성에너지의 크기는 작고 부피 자기이방성에너지는 음의 큰 값을 가져 수평 자기이방성을 보이는데, 이중 magnetocrystalline energy 와 magnetoelastic energy 의 기여는 작지만 demagnetizing energy 의 기여는 커서 수평 자기이방성의 주된 원인으로 설명 하였다. 그러므로 FeCo/Pd 초격자 다층박막의 FeCo sublayer 의 Fe 조성이 증가됨에 따라  $K_{eff}$  가 작아지는 본 연구의 결과는 표면 자기이방성에너지의 감소 및 형상 자기이방성에너지의 증가때문으로 여겨진다.

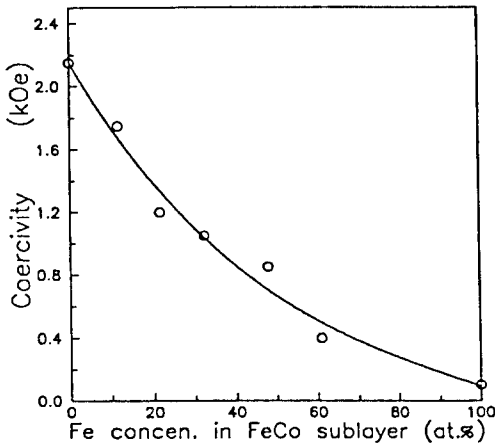


Fig. 3. Dependence of the coercivity of FeCo/Pd multilayer thin films on the Fe concentration in the FeCo sublayer.

Fig. 3 은 FeCo/Pd 초격자 다층박막의 FeCo sublayer 의 Fe 조성에 따른 보자력의 의존도이다. Fe 조성의 증가에 따라 수직 자기이방성에너지의 감소와 더불어 보자력의 크기도 단조적인 감소현상을 보였다. 보자력과 최소 자구의 크기는 반비례의 관계에 있고, 주변 자기장에 대한 자구의 안정성의 관점에서 본다면 보자력이 큰 기록매체가 유리하다.

Fig. 4 는 FeCo sublayer의 Fe 조성의 증가에 따른 Kerr 회전각의 변화 및 광원의 파장에 대한 Kerr 회전각의 의존성을 보였다. FeCo/Pd 초격자 다층박막의 FeCo sublayer 의 Fe 조성이 증가함에 따른 자기광학적 효과를 측정할 결과 Fe 조성이 32 at.% 부근에 이를때까지는 Kerr 이력곡선의 squareness 는 1 즉, 포화 Kerr 회전각의 크기와 잔류 Kerr 회전각의 크기는 같았다. 이와같이 squareness 가 1인 특성은 큰 판독신호를 얻기위

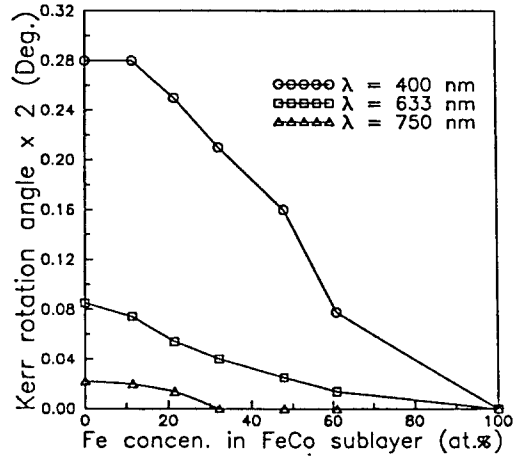


Fig. 4. Dependence of the Kerr rotation angle of FeCo/Pd multilayer thin films on the Fe concentration in the FeCo sublayer at the wavelengths of 400 nm, 633 nm, and 750 nm.

한 광자기기록 재질로서의 필요 요건이다. FeCo sublayer 의 Fe 조성이 48 at.% 이상에서 61 at.% 에 이르기까지는 잔류 Kerr 회전각이 포화 Kerr 회전각 보다 작은 결과를 보였는데, 이는 외부 자기장이 작용하지 않는 상태에서 stripe 자구가 형성되기 때문으로 보여진다. Fe 조성이 증가함에 따라 Kerr 회전각은 전 파장 영역에서 감소하는 경향을 보였지만 광원의 파장이 단파장으로 감에 따라서는 크게 증가하였고 그 변화의 폭도 훨씬 컸다. 한편, 희토류-천이금속 합금박막 뿐 아니라 천이금속계 초격자 박막등 광자기 기록재질의 Kerr 효과는 천이금속의 자화에 비례함과 더불어 천이금속에 의해 유도되는 Pd, Pt 등의 자화의 기여가 있음이 알려져 있다[16]. 그렇지만 Fig. 4 에서는 FeCo sublayer 의 Fe 조성이 증가됨에 따라 Kerr 회전각은 단조적인 감소를 보이고 있어, 지금까지 알려진 Kerr 효과의 원인과는 다른 원인이 있음을 생각할 수 있다. 특히 Fe/Pd 초격자 박막은 전 파장 영역에서 Kerr 회전각이 전혀 없는 결과를 보였다. T. Sugimoto *et al.*[16] 은 순수 Co 및 Fe 박막의 Kerr spectrum 을 보였는데, 전 파장 영역에서 Kerr 회전각은 0.2°가 넘었다. 따라서 FeCo/Pd 초격자 다층박막에서 Fe 이 증가함에 따라 Kerr 회전각의 크기가 감소하고, Fe/Pd 초격자 다층박막의 Kerr 효과가 없는 이유는 Fe 과 Pd 이 서로 상쇄하는 방향으로 Kerr 효과가 작용하고 있기 때문으로 생각할 수 있다.

### IV. 결 론

2.5-Å FeCo / 10.5-Å Pd 초격자 다층박막의 Fe 조성이 0 에서 100% 까지 변화할 때 자기 및 자기광학적 특성을 고찰하였다. FeCo sublayer 중 Fe 조성이 약 48 at. % 부근에서 포화자화값은 최고치를 보였고 포화자화값의 Fe 조성에 대한 의존도는 FeCo 합금과 유사한 거동을 보였다. Fe 조성이 증가하면서 표면 자기이방성에너지는 감소하고 형상 자기이방성에너지가 증가하여 수직 자기이방성에너지는 줄어들고, Fe /Pd 초격자 다층박막은 수평 자기이방성을 보였다. Fe 조성의 증가에 따라 수직 자기이방성에너지의 감소와 더불어 보자력은 단조감소 하였다. Kerr 회전각은 Fe 조성이 증가하면서 점차적으로 감소하였고, 광원의 파장이 단파장으로 가면서 그 크기 및 Fe 조성 의존성은 증가하였다.

### 감사의 글

본 연구는 금성사, 한국과학재단, 한국과학기술연구원의 연구비 지원으로 이루어 진것임을 밝히며, 이에 감사드립니다. Kerr spectrometer 사용에 도움을 준 대구대학교 최영준 교수님, 이정구씨 및 x선 회절실험에 도움을 준 금성중앙연구소 분석실 권현자씨께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

[ 1 ] P. F. Carcia, J. Appl. Phys. **63**, 5066(1988).  
 [ 2 ] H. J. G. Draaisma, W. J. M. de Jonge and F. J. A. den Broeder, J. Magn. Magn. Mater. **66**, 351(1987).

[ 3 ] B. A. Gurney, P. Baumgart, D. R. Wilhoit, B. Dieny, V. S. Speriosu, J. Appl. Phys. **70**, 5867(1991).  
 [ 4 ] S. Hashimoto and Y. Ochiai, J. Magn. Magn. Mater. **88**, 211(1990).  
 [ 5 ] S. -C. Shin and A. C. Palumbo, J. Appl. Phys. **67**, 317(1990).  
 [ 6 ] S. -C. Shin Jpn. J. Appl. Phys. **28**, suppl. 28-3, pp. 11(1989).  
 [ 7 ] S. Hashimoto, Y. Ochiai and K. Aso, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L1824(1989).  
 [ 8 ] T. Katayama, Y. Suzuki, Y. Nishihara, T. Sugimoto and M. Hashimoto, J. Appl. Phys. **69**, 5658(1991).  
 [ 9 ] S. -C. Shin IEEE Trans. Mag. **28**, 2776(1992) .  
 [ 10 ] 김진홍, 신성철, 한국자기학회지, 2, 119(1992).  
 [ 11 ] Noboru Sato, J. Appl. Phys. **64**, 6424(1988).  
 [ 12 ] Y. Obi, Y. Kawano, Y. Tange and H. Fujimori, J. Magn. Magn. Mater. **93**, 587(1991).  
 [ 13 ] B.D.Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Reading, MA:Addison-Wesley, 1972, p146.  
 [ 14 ] R. H. Victora and J. M. MacLaren, J. Appl. Phys. **69**, 5652(1991).  
 [ 15 ] F. J. A. den Broeder, H. C. Donkersloot H. J. G. Draaisma and W. J. M. de Jonge ,J. Appl. Phys. **61**, 4317(1987).  
 [ 16 ] T. Sugimoto, T. Katayama and Y. Suzuki and Y. Nishihara, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L2333 (1989).

## Magnetic and Magneto-Optical Properties of FeCo /Pd Multilayers

J. -H. Kim

GoldStar Central Research Lab.

S. -C. Shin

Department of Physics, KAIST

(Received 27 January 1993)

We have investigated the dependence of the magnetization, anisotropy, coercivity, and Kerr rotation on the Fe concentration in FeCo /Pd multilayer thin films, where the Fe concentration in the FeCo sublayer varied between 0 and 100% with maintaining the same sublayer thickness of 2.5Å FeCo and 10.5Å Pd. The maximum saturation magnetization was observed at the Fe concentration of about 48at. % in the FeCo sublayer. Perpendicular magnetic anisotropy and coercivity of the FeCo /Pd multilayer thin film decreased monotonically with increasing the Fe concentration. The Kerr rotation angle also decreased with increasing the Fe concentration and the amount of variation was remarkably changed with decreasing the light wavelength.