

# Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub> 颗粒膜中磁光克尔效应的增强\*

郑卫民<sup>1)</sup> 王辉<sup>3)</sup> 王松有<sup>2)</sup> 褚君浩<sup>1)</sup> 陈良尧<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海, 200083;

<sup>2)</sup>复旦大学物理系, 上海, 200433;

<sup>3)</sup>上海交通大学应用物理系, 上海, 200030;

0482.55  
0484.4

**摘要:**通过 Ar 离子束溅射仪制备了 Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub> 磁性颗粒膜样品, 并且分别在 100, 250, 400, 500 C 下进行了退火, 利用磁光克尔谱仪、椭圆偏振光谱仪对上述系列样品的光学常数、复介电函数、磁光克尔参数在室温下进行了测量, 实验结果表明随着退火温度的升高, 磁光克尔旋转角  $\theta_k$  和椭圆率  $\epsilon_k$  增大, 并且在 Ag 的等离子吸收边附近出现了大的类共振增强峰, 峰的位置随退火温度的升高发生红移, 通过实验数据分析, 这种类共振磁光点克尔效应增强是由于 Ag 陡峭的等离子振荡边作用的结果。

**关键词:**磁光克尔效应, 磁性颗粒膜, 等离子边。

## THE MAGNETO-OPTICAL KERR EFFECT ENHANCEMENT IN Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub> GRANULAR FILMS\*

ZHENG Wei-Min<sup>1)</sup> WANG Hui<sup>3)</sup> WANG Song-You<sup>2)</sup> CHU Jun-Hao<sup>1)</sup> CHEN Liang-Yao<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2)</sup> Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>3)</sup> Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** The magneto-optical Kerr effect enhancement in Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub> granular magnetic films annealed at 100, 250, 400, 500 C was studied. The optical constants, the complex dielectric function and magneto-optical Kerr parameters were measured at room temperature. The strong Kerr effect enhancement was observed around the Ag plasma edge. With the annealing temperature increasing, the values of the Kerr rotation  $\theta_k$  and Kerr ellipticity  $\epsilon_k$  increase, the resonance-like peaks appear in the Kerr rotation, and the peak positions are shifted toward the low energy region. From the analysis of the experiment data, it is concluded that the magneto-optical Kerr effect enhancement is due to the presence of the steep plasma edge.

**Key words** magneto-optical Kerr effect, magnetic granular films, plasma edge.

### 引言

由于磁光克尔效应在高密数据存储设备和光开关器件等方面重要的应用价值, 进一步推动了对磁光效应物理机制深入地研究和对新型磁光材料的探索<sup>[1~3]</sup>. 颗粒膜是将微颗粒嵌埋于与其不相容的金属或绝缘体中构成的一类复合薄膜, 是一种新型材料. 它的组元和组元含量的比例以及制备工艺等参数的变化, 直接影响其物理性质, 因此可以在很宽范围内人为地控制颗粒膜的微观结构和物理性质. 最近, 我们在对一系列磁性金属颗粒膜的磁光效应研究过程中发现: 对于低组份 Co<sub>x</sub>Ag<sub>100-x</sub> 颗粒膜系列样品, 随着退火温

度的升高, 磁光克尔旋转角  $\theta_k$  增大, 并且在 Ag 的等离子吸收边附近出现了大的类共振增强峰, 峰的位置随着退火温度升高具有红移现象. 在同一系列样品的克尔椭圆率测量中也观察到这种现象, 但对其物理机制仍不清楚. 进一步地研究磁性颗粒膜磁光效应, 对短波范围内的磁光存储技术有着重大的意义.

### 1 样品制备与测量

本文采用计算机控制的 Ar 离子束溅射仪制备 Co<sub>x</sub>Ag<sub>100-x</sub> 系列样品. 系统背景真空度为  $5 \times 10^{-5}$  Pa, 溅射过程中 Ar 气压强为  $2.5 \times 10^{-2}$  Pa, 其中颗粒膜的靶是采用在 Co 靶上贴 Ag 片, 调整二者的相对面积,

\* 国家杰出青年科学基金(编号 69425004)和上海市自然科学基金资助项目

稿件收到日期 1999-04-30, 修改稿收到日期 1999-07-19

\* The project supported by the Shanghai Natural Science Foundation and Outstanding Youth Science Foundation of China

Received 1999-04-30, revised 1999-07-19

制备不同组分的  $\text{Co}_x\text{Ag}_{100-x}$  颗粒膜. 利用台阶仪测定淀积率为  $0.09\text{nm/s}$ , 然后控制溅射时间, 可以准确地控制膜的厚度. 所有膜的厚度皆控制在  $200\text{nm}$ , 淀积在  $\text{Si}(100)$  衬底上. 退火过程是在相同的真空腔中进行, 每块样品分别在某一恒定温度下退火  $1\text{h}$ . 通过扫描电子显微镜 (SEM) 分析每块样品的组份, 利用 X 射线衍射分析样品的结构特征; 通过透射电子显微镜 (TEM) 观察  $\text{Co}_x\text{Ag}_{100-x}$  样品中  $\text{Co}$  颗粒大小和随退火温度的变化; 磁光极克尔旋转角  $\theta_k$  和椭圆率  $\epsilon_k$  通过磁光极克尔谱仪获得, 外加磁场为  $795.7\text{KA/m}$ , 方向与膜面垂直. 有效复介电函数和光学常数都用椭圆偏振光谱仪测量, 精度为  $0.01$ , 入射角  $70^\circ$ , 能量为  $1.5\sim 4.5\text{eV}$ . 整个测量过程在室温下由计算机控制<sup>[1]</sup>.

## 2 实验结果与讨论

图 1 为  $\text{Co}$  含量  $2\text{at}\%$  的  $\text{Co}_2\text{Ag}_{98}$  样品经不同温度退火后测量的 XRD 图象. 对于制备态样品, 观察到了具有面心立方结构、(111) 结构多晶  $\text{Ag}$  颗粒的 (111)、(200)、(220)、(311) 衍射峰. 随退火温度的升高, 又出现了  $\text{Ag}$  的 (222)、(311)、(422) 衍射峰, 并且  $\text{Ag}$  (111)、 $\text{Ag}$  (200) 和  $\text{Co}$  (111)、 $\text{Ag}$  (220)、 $\text{Ag}$  (311) 衍射峰变得更加尖锐, 这表明退火处理增强了两相分离, 同时  $\text{Ag}$  颗粒和  $\text{Co}$  平均颗粒尺寸增大. 由 Scherrer 公式<sup>[2]</sup> 计算了 (111) 面法线方向上  $\text{Ag}$  平均颗粒尺寸的变化: 制备态为  $52\text{nm}$ , 经  $500\text{C}$  退火后变成  $80\text{nm}$ .

通过 TEM 我们也观察了  $\text{Co}$  颗粒随退火温度的变化. 在制备态样品中  $\text{Co}$  颗粒以各种不同的形状随机地埋在  $\text{Ag}$  基质中, 被  $\text{Ag}$  基质包围而相互分离.  $\text{Co}$  颗粒的平均尺寸约为  $8\text{nm}$ . 随退火温度增加,  $\text{Co}$  颗粒明显变大, 表面变得光滑, 形状几乎呈球形或椭圆形, 颗粒的平均尺寸在  $500\text{C}$  退火温度下约为  $12\text{nm}$ .

图 2 是  $\text{Co}_2\text{Ag}_{98}$  在不同退火温度下克尔旋转角  $\theta_k$

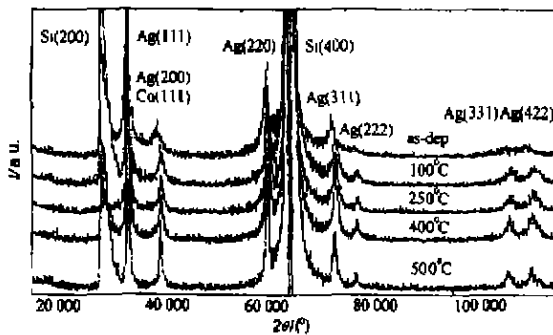


图 1 不同退火温度下  $\text{Co}_2\text{Ag}_{98}$  样品的 XRD 图  
Fig. 1 XRD patterns of  $\text{Co}_2\text{Ag}_{98}$  samples as a function of annealing temperatures

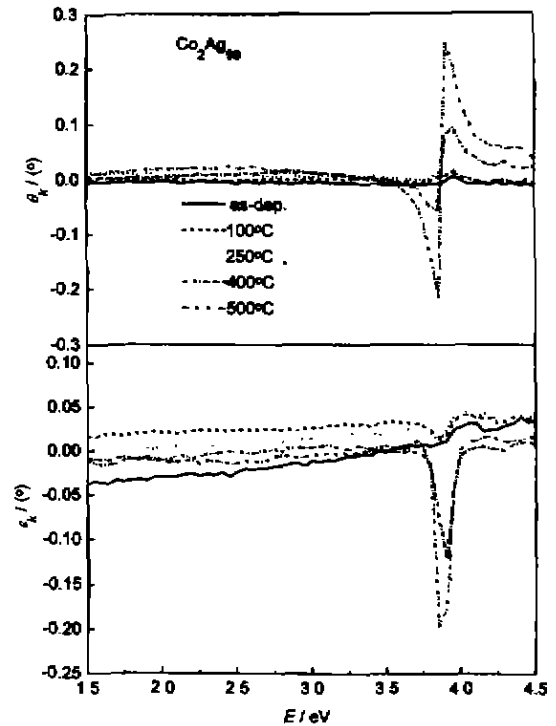


图 2 不同退火温度下  $\text{Co}_2\text{Ag}_{98}$  的室温磁光克尔谱  
Fig. 2 Measured spectra of the MOKE at room temperature for the samples  $\text{Co}_2\text{Ag}_{98}$  with different temperatures

和椭圆率  $\epsilon_k$  随入射光能量变化的测量谱. 从图可见, 对于制备态样品, 在整个光能量测量范围内,  $\theta_k$  和  $\epsilon_k$  小几乎为零, 但随退火温度的升高  $\theta_k$  和  $\epsilon_k$  的绝对值增加, 并且在  $\text{Ag}$  的等离子吸收边附近  $\theta_k$  和椭圆率  $\epsilon_k$  出现了增强峰. 对于  $400\text{C}$ 、 $500\text{C}$  退火样品  $\theta_k$  增强峰变成了类共振增强形状, 在  $500\text{C}$  时  $\theta_k$  达到最大为  $0.25^\circ$ , 是制备态样品的  $50$  倍.  $\theta_k$  和  $\epsilon_k$  的增强峰随退火温度的升高出现红移.

为了细致研究这种在磁性金属颗粒膜中磁光克尔增强效应, 需要从理论上进行探讨. 根据两相模型复克尔旋转角可表示为<sup>[6]</sup>

$$\theta_k + i\epsilon_k = \frac{\epsilon_{xy}}{\sqrt{\epsilon_{xx}(1 - \epsilon_{xx})}} \quad (1)$$

这里的  $\epsilon_{xy} = \epsilon_{xy1} + i\epsilon_{xy2}$  为复介电张量的非对角元相. 根据式 (1) 得

$$\left. \begin{aligned} \theta_k &= \frac{A\epsilon_{xy1} + B\epsilon_{xy2}}{A^2 + B^2}, \\ \epsilon_k &= \frac{-A\epsilon_{xy2} + B\epsilon_{xy1}}{A^2 + B^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $A = n^2 - 3nk^2 - n$ ,  $B = -k^3 + 3n^2k - k$ . 方程 (2) 中的非对角元  $\epsilon_{xy}$  和光学常数  $n, k$  如果用有效非对角元

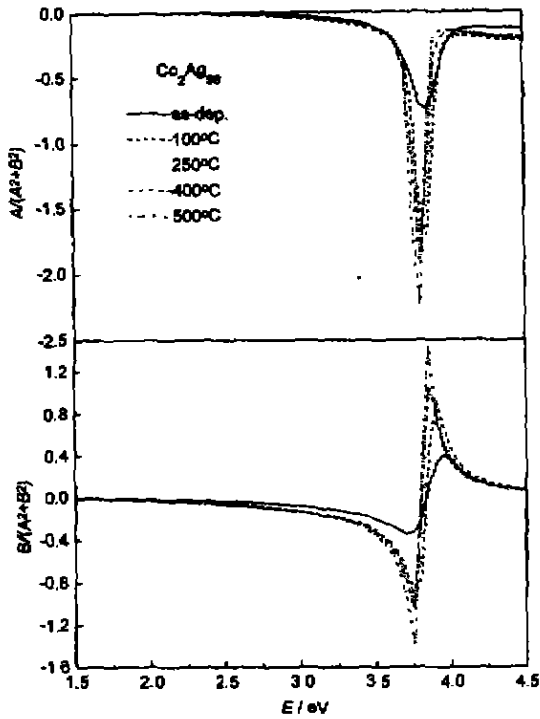


图3 Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub>的前因子  $A/(A^2+B^2)$  和  $B/(A^2+B^2)$  计算谱  
Fig. 3 The calculated prefactors  $A/(A^2+B^2)$  and  $B/(A^2+B^2)$  for Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub>

$\epsilon_{xy}$  和有效光学常数  $n_e, k_e$  代替,那么该方程仍适合于磁性颗粒膜系统<sup>[7]</sup>.从方程(2)可见:分母是  $n_e, k_e$  的六次方项,分子是三次方项, $n_e$  和  $k_e$  的减少也能给出磁光克尔效应的增强,为此计算了方程(2)中的前因子  $A/(A^2+B^2)$  和  $B/(A^2+B^2)$ ,如图3所示.

从图3可见,前因子  $A/(A^2+B^2)$  和  $B/(A^2+B^2)$  分别在 Ag 等离子振荡边附近,出现了增强峰和类共振增强峰,并且随着退火温度升高增强峰加强,峰变得愈加尖锐,峰的位置出现了红移.在 Ag 的等离子振荡边邻域之外,前因子  $A/(A^2+B^2)$  和  $B/(A^2+B^2)$  几乎都接近于零.

由方程(2)可知,非对角元  $\epsilon_{xy} = (\epsilon_{xy1e} + i\epsilon_{xy2e})$  对磁光克尔效应增强也起着重要作用,它来源于电子带带之间的跃迁和带内的跃迁.为此根据所测量的有效光学常数和有效磁光参数,我们也计算了非对角元  $\epsilon_{xy}$  的实部  $\epsilon_{xy1e}$  和虚部  $\epsilon_{xy2e}$  谱,如图4所示.由图4可见,随退火温度的升高, $\epsilon_{xy1e}$  和  $\epsilon_{xy2e}$  分别在 Ag 的等离子振荡边附近也出现了类共振增强峰和增强峰.虽然  $\epsilon_{xy1e}$  和  $\epsilon_{xy2e}$  的绝对值在 1.5~3.0eV 能量范围内数值比较大,但  $\theta_k$  和  $\epsilon_k$  却没有显著的增强,因为在这个能量范围内的前因子  $A/(A^2+B^2)$  和  $B/(A^2+B^2)$  是很小的.

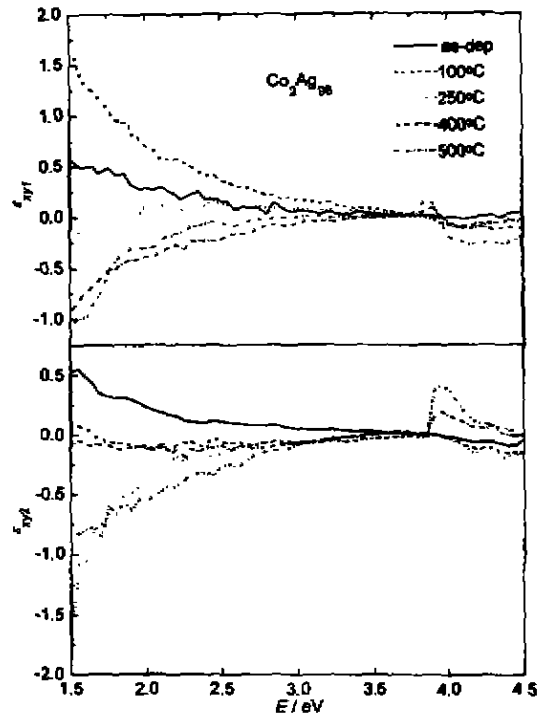


图4 Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub>的非对角元  $\epsilon_{xy} (= \epsilon_{xy1e} + i\epsilon_{xy2e})$  计算谱  
Fig. 4 The calculated spectra of  $\epsilon_{xy} (= \epsilon_{xy1e} + i\epsilon_{xy2e})$  for sample Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub>

为研究退火温度对等离子振荡边的影响,根据所测量的复介电函数,计算了 Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub> 退火系列样品的体能量损失函数谱  $\text{Im}(-1/\epsilon_e)$ ,如图5所示.对金属材料而言,在体能量损失函数谱中尖锐的峰所对应的位置为等离子振荡能量.在图5中制备态样品的等离子振荡能量为 3.8eV,随退火温度的升高,能量损失峰增强,峰变得尖锐,峰的位置发生红移(500 C 退火样品的等离子振荡能量为 3.75eV).根据 XRD 数据分析,Ag

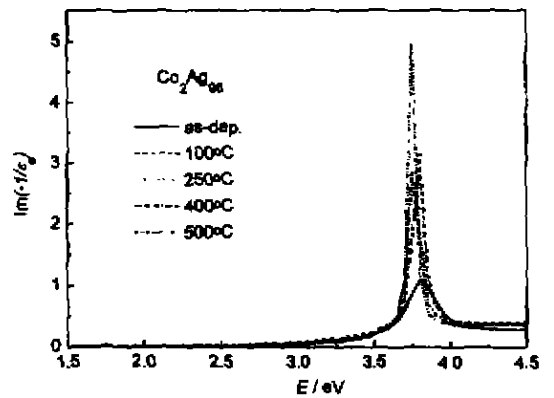


图5 不同退火温度下 Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub> 样品体能量损失函数计算谱  
Fig. 5 Calculated spectra of the volume energy loss function  $\text{Im}(-1/\epsilon_e)$  for samples Co<sub>2</sub>Ag<sub>98</sub>

的[111]晶面间距 $d$ 不同于单层Ag膜在该方向的晶面间距(0.236nm),但随退火温度的增加 $d$ 逐渐接近于0.236nm。一般来讲晶面间距的变化往往伴随晶格常数的变化,晶格常数的改变又会导致能带结构的变化。退火处理微调Ag的能带结构致使Ag的等离子振荡边的位置和振荡强度有所改变,当然更细致的解释还需要进一步的理论计算。

从上述实验现象和理论分析的结果可以看出:在 $\text{Co}_2\text{Ag}_{98}$ 磁性颗粒膜中等离子振荡对磁光克尔效应的增强起着重要的作用,退火处理微调了Ag的等离子振荡边位置和吸收强度,导致了 $\epsilon_{xx}$ 的前因子 $A/(A^2+B^2)$ 和 $B/(A^2+B^2)$ 在Ag的等离子振荡能量附近产生突变,致使克尔旋转角 $\theta_k$ 和椭圆率 $\epsilon_k$ 在此处出现了大的增强现象。

### 3 结论

通过Ar离子束溅射仪制备了 $\text{Co}_2\text{Ag}_{98}$ 系列样品,分别在100、250、400、500℃下进行了1h退火,并利用椭圆光谱仪和磁光克尔谱仪测量了光学常数和磁光参数。实验结果发现:随退火温度的升高,在Ag的等离子边附近,克尔旋转角 $\theta_k$ 和椭圆率 $\epsilon_k$ 分别出现了大的类共振增强。通过数值计算分析,这种磁光克尔效应的

增强是Ag的等离子振荡作用的结果,退火处理微调了Ag的等离子振荡的强度和位置。

### REFERENCES

- [1] ZHAI Hong-Ru, MIAO Yong-Zhi, LU Mu, *et al.* Magneto-optical effect in multilayer films, *Progress in Physics* (翟宏如, 苗永志, 鹿牧, 等. 金属多层膜中的磁光效应, 物理学进展), 1993, 13(1,2): 215
- [2] Reim W, Schoenes J, Vogt O. Magneto-optical investigation of the electronic and magnetic structure of  $\text{UaS Se}_1$ , *Phys. Rev. B*, 1984, 29: 3252
- [3] Toshihazu Katayama, Yoshishige Suzuki, Hiroyuki Awano, *et al.* Enhancement of the magneto-optical Kerr rotation in Fe/Cu bilayered films, *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 60: 1426
- [4] Chen L Y, Feng X W, Su Y, *et al.* Design of a scanning ellipsometer by synchronous rotation of the polarizer and analyzer, *Appl. Opt.*, 1994, 33: 1299
- [5] Barnard J A, Hossain S, Parker M R, *et al.* Giant magnetoresistance in sputtered Co-Ag alloy thin films, *J. Appl. Phys.*, 1994, 73: 6327
- [6] Feil H, Haas C. Magneto-optical Keer effect, enhanced by the plasma resonance of charge carriers, *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 85: 65
- [7] Weller D, Reim W. Spectroscopic study of potential magneto-optical storage layers. *Appl. Phys. A*, 1989, 49: 599