

含钴阳极氧化铝膜的磁致偏光特性

郑萌萌¹ 刘在国^{1,2} 吴闻迪¹ 宋连科¹ 徐 慧¹

(¹ 曲阜师范大学物理工程学院, 山东 曲阜 273165
² 曲阜师范大学职业与成人教育学院, 山东 曲阜 273165)

摘要 用电化学法制备了高度有序的多孔阳极氧化铝模板, 选用 CoSO_4 溶液为电解液, 用交流电化学沉积法在多孔阳极氧化铝的柱形微孔内制备含钴纳米线有序阵列。分别用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪对多孔阳极氧化铝模板和纳米线阵列的微观形貌和结构进行分析, 结果显示阳极氧化铝膜内确有钴生成, 且钴纳米线中的晶粒在生长过程中有(100)晶面的择优取向。搭建了磁致偏振特性测试系统, 对样品在大范围磁场下的退偏现象进行了测试。结果表明, 含钴阳极氧化铝膜具有磁致偏光效应, 达到磁饱和或接近磁饱和时, 样品的偏振性能最优, 随着磁场的增强, 出现了磁致退偏效应, 并根据实验结果分析了磁致退偏效应的产生机理。

关键词 薄膜; 多孔阳极氧化铝; 纳米线阵列; 磁致偏光; 退偏度

中图分类号 O646; O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0131002

Magnetic Polarization of Co/ PAA in Adjustable Magnetic Field

Zheng Mengmeng¹ Liu Zaiguo^{1,2} Wu Wendi¹ Song Lianke¹ Xu Hui¹

(¹ College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China
² School of Vocational and Adult Education, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)

Abstract Highly ordered porous anodic aluminum oxide (PAA) membranes are prepared by electrochemical method. By alternating current electrodeposition, Co nanowire arrays are fabricated in the porous anodic alumina (PAA) in an electrolyte CoSO_4 . The morphology and microstructures of Co/PAA are characterized by SEM and X-ray diffraction. The results show that Co nanowires are indeed synthesized in porous alumina, and the nanowires have a preferred crystal face (100) during growing. The optical system is established in which the changes of polarization state for sample can be measured. In this optical system, the depolarization effect in Co/PAA which often be used in optical isolator is measured in large variation range of adjustable magnetic field. The experiment result shows that Co/PAA has depolarization effect in adjustable magnetic field, and the polarization performance is best in Co/PAA when it reaches saturated magnetization. The depolarization effect is occurred when the intensity of magnetic field increases over saturation intensity. The principle for magnetic depolarization effect is also given according to the experimental result.

Key words thin film; porous anodic alumina(PAA); nanowire array; magnetic polarization; depolarization ratio

OCIS codes 310.6860; 310.6870

1 引 言

近年来对铁磁金属纳米线的研究吸引了众多研究者的广泛关注, 铁磁金属纳米线具有很高的长径比, 因此它具有显著的磁各向异性, 使其在高密度磁记录领域具有潜在的应用前景^[1~6]。

目前, 通常利用模板法来制备铁磁金属纳米线,

即利用电化学沉积的手段将铁磁金属沉积到多孔模板的纳米孔洞中形成纳米线^[7~12]。实验发现, 含钴多孔阳极氧化铝(Co/PAA)纳米有序阵列复合结构体系具有直接带隙半导体的光学性质, 通过改变 Co 的沉积量可以实现对 Co/PAA 复合结构的光吸收边和反射率的大幅度调制^[13]。

收稿日期: 2010-01-10; 收到修改稿日期: 2010-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(10947108)和山东省自然科学基金(Q2008A05)资助课题。

作者简介: 郑萌萌(1979—), 女, 讲师, 主要从事偏光技术及光谱分析等方面的研究。E-mail: qfzhmm@163.com

实验利用交流电化学沉积方法在阳极氧化铝膜板中制备了钴纳米线,并对样品的结构及连续可调谐磁场下的 Co/PAA 的磁致退偏特性磁性进行了研究。

2 含钴阳极氧化铝膜的制备及表征

2.1 样品的制备

高纯铝[质量分数 $m(\text{Al}) \geq 99.99\%$]经丙酮、乙醇超声清洗后,室温下在高氯酸和乙醇的混合溶液中进行抛光,然后在质量分数为 15% 的稀硫酸溶液中进行一次阳极氧化,氧化电压为 18 V,氧化时间为 20 min。氧化结束后,将样品放入质量分数为 6% 磷酸溶液中去掉第一次氧化产生的无序的氧化铝层。用去离子水反复冲洗后,再次进行阳极氧化,条件与第一次氧化相同,氧化时间为 2 h。实验采用的电解槽是由曲阜师范大学物理电子学专业自行研制的一种电解槽,实验电压由 DH1722-4 型直流稳压电源提供^[14]。

为了更好地电镀金属柱,在室温下进行浸泡扩孔。扩孔处理后,撤掉直流电源,用去离子水反复冲洗后,放入硫酸钴电解液,电解液的组成为 $\text{CoSO}_4 \cdot$

$7\text{H}_2\text{O}$ (40 g/L), $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ (30 g/L), H_3BO_3 (5 ml/L) 的混合溶液,pH 值 2.0~2.5,然后在膜板两端接交流电源,工作电压为 20 V,工作频率为 200 Hz,反应在 0 °C 下进行。反应结束后,把样品放入去离子水中煮沸 20 min,这样在膜表面会形成一层水封膜;再将样品置于液溴和甲醇的混合液中浸泡,去掉铝基底,最后用去离子水反复冲洗,以清除吸附在膜表面和内部的电解液,增强膜的化学稳定性,这样就得到了含钴阳极氧化铝膜。

2.2 样品的形貌特征

在样品表面喷一层导电金箔,用 JSM-6700 型扫描电子显微镜(SEM)观察样品的 SEM 照片如图 1 所示。由图 1(a)可以看出阳极氧化铝膜的孔洞分布均匀,孔径约为 25 nm,孔心距约为 45 nm;由图 1(b)可以看出,孔轴与其表面垂直,孔与孔之间相互平行,孔通道之间无交叉现象,具有良好的线栅结构,可以用来制备高度有序的纳米线和纳米管阵列。用 1 mol/L 的 NaOH 溶液腐蚀掉多孔铝层,使 Co 纳米线露出,其状态如图 1(c)所示,Co 纳米线因失去多孔铝支撑而倒伏,纳米线结构均匀,直径在 20~25 nm,与 PAA 模板的孔径基本一致。

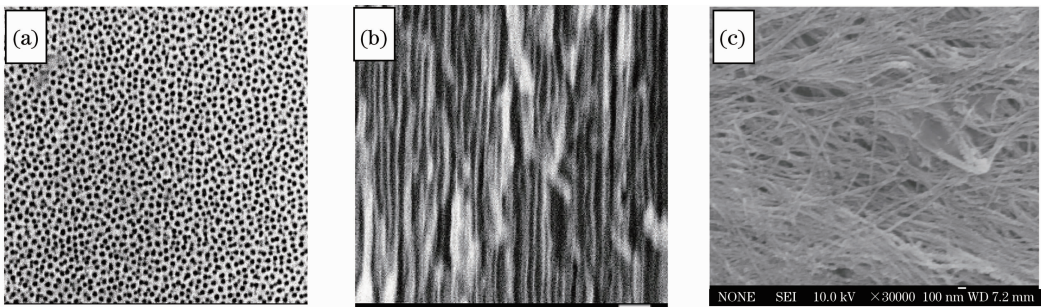


图 1 样品的 SEM 图像。(a) PAA 表面,(b) PAA 截面,(c) 钴纳米线

Fig. 1 SEM of the samples. (a) surface of PAA, (b) cross section of PAA, (c) Co nanowires

2.3 样品的 X 射线衍射检测

利用 X 射线衍射(XRD)技术对材料进行分析,可以得到材料的物相组成,晶格类型、晶格常数及晶粒取向等结构问题,XRD 测量的基本原理是布拉格方程:

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (1)$$

式中 d 为原子面间距, θ 为衍射角, λ 为入射 X 射线的特征波长,X 射线衍射仪测得的是相对强度 I 和衍射角 θ 的关系图,及衍射峰的位置。由(1)式可计算出晶面间距 d ,利用晶面间距 d 和相对强度,对照 PDF 卡片可以定性确定样品的物相组成,晶粒取向和晶格类型等。

用北大青鸟电子集团生产的 BDX3200 型 X 射线多晶衍射仪测试样品的 X 射线衍射图谱如图 2

所示。可以看出 2θ 在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间存在非晶态 Al_2O_3 的特征谱线, 2θ 为 41.6° 和 44.8° 处分别对应

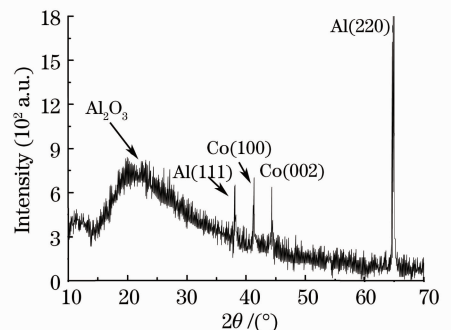


图 2 Co/PAA 的 X 射线衍射图谱

Fig. 2 XRD spectrum of Co/PAA

钴六角密堆结构的(100)和(002)晶面衍射峰,且Co(100)峰在这两个峰中占主导,这说明阳极氧化铝膜上确有钴生成,且模板的微孔中沉积金属微粒Co后,具有一定的结晶取向^[15]。 2θ 为 38.55° 和 65.22° 时分别对应Al(111)和(220)晶面衍射峰。这是由于阳极氧化铝膜很薄、易碎,本文没有将膜从铝基底上取下,而是将膜和铝基底一块进行X射线测试,所以在样品的X射线图谱中出现了Al的晶面衍射峰。

3 含钴阳极氧化铝膜磁致偏振特性测试

3.1 磁致偏振特性测试系统

为测定含钴阳极氧化铝膜在不同磁场下的磁致

偏振特性,搭建了磁致偏振特性测试系统^[16]。该测试系统采用了偏光测试实验中常用的消光法:将样品置于两偏光镜之间,对磁光晶体逐渐加大磁场,旋转检偏镜,利用消光位置测量检偏器转过的角度,并记录不同磁场下透射光强的最大值和最小值,得到法位第(Faraday)旋转角及其他参数。

实验装置及光路如图3所示,测试系统中光源波长为670 nm,两只偏光镜选用原则是透射比高、消光比好,并且透射光束偏离角小于 $1'$,此处选用的起偏镜与检偏镜分别是经过严格挑选的格兰·泰勒棱镜和格兰·汤普森棱镜;电磁铁与直流电源是专为磁致偏振特性测试定做的,直流磁场可调范围是 $0\sim 1200$ mT。

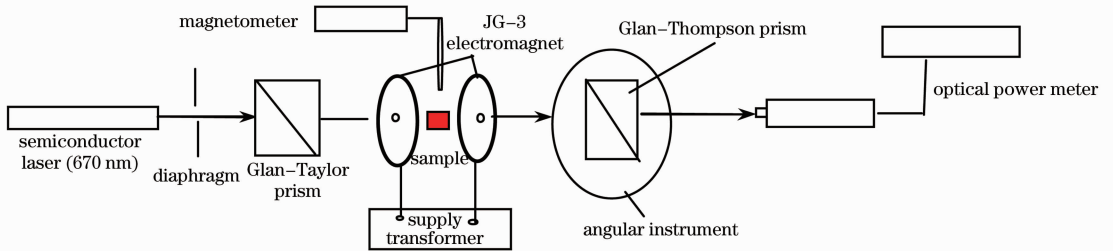


图3 磁致偏光测试系统装置及光路图

Fig. 3 Devices and beam path of measuring the performance of magnetic-polarization system

3.2 磁致偏振特性的测试

偏振度是定量描述光的偏振程度的物理量。若光束振幅最大方向上的光强为 I_{\max} ,与此垂直方向上的光强为 I_{\min} ,则偏振度定义为

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

对于线偏振光, $P=1$;对于部分偏振光, $0 < P < 1$ 。若入射到磁场中含钴阳极氧化铝膜的线偏振光透射后变为部分偏振光,测量中将表现为透射光波偏振度的降低,说明含钴阳极氧化铝膜对线偏振光产生了退偏作用。将Co/PAA的这种效应称为磁致退偏效应。退偏度一般是用来对器件将线偏振光变换为非线偏振光作定量描述的,退偏度的定义式为

$$D_R = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% \quad (3)$$

此处引入退偏度则是表征磁致退偏效应的强弱,它是由具有磁光特性的物质本身所固有的圆二向色性^[17]及其他磁光效应产生的一种与磁场相关的效应。这种效应的直接表现就是透射光波光强和偏振态的变化,即线偏振光通过磁性介质后,如果是理想的旋转器,透射仍为线偏振光,与光波传播方向

垂直的平面内光强分布为:光矢量振动方向光强最大,与之垂直方向光强为零,此时无退偏效应,退偏度为零;考虑二向色性后,透射光不再是好的线偏振光,退偏度介于 $0\sim 1$ 之间。

实验中,在选定的每一磁场强度下,旋转检偏器(图3中的Glan-Thompson棱镜)一周,得到两个极大值和两个极小值,然后分别取平均作为 I_{\max} 和 I_{\min} ,代入(3)式,得出相应磁场强度下线偏振光经过被测Co/PAA样品的退偏度。

被测样品的退偏度与外加磁场强度的关系曲线如图4所示。图中虚线标出的是该样品的饱和磁场强度(由该样品的旋光角随外加磁场强度变化的实验测出)。图中曲线表明,线偏振光入射到Co/PAA复合结构的退偏效应随着外加磁场强度的增加,磁致退偏效应开始减弱;在该样品将达到磁饱和时(磁场达到25 mT),磁致退偏效应达到最弱;随着磁场强度的增加,磁致退偏效应开始缓慢增大,直到磁场达到200 mT以后,退偏度曲线起伏不大,也就是说磁致退偏效应几乎不再随外加磁场强度的增大而增强,不妨将此时的磁场强度称为磁致退偏饱和磁场强度。

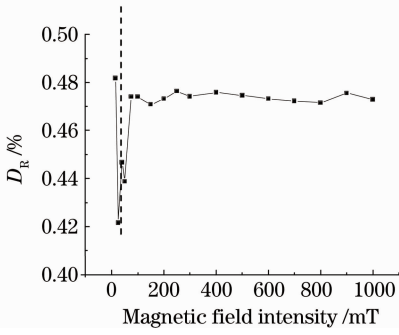


图 4 Co/PAA 退偏度随磁场变化的关系曲线
Fig. 4 Relation of Co/PAA depolarization ratio and magnetic field intensity

4 理论分析

当一束偏振光沿外加磁场方向(或磁化强度方向)通过介质时,偏振面发生旋转的现象称为法拉第效应,根据其产生机理,又称磁致圆双折射。在产生偏振面旋转的同时,也伴有对左、右旋圆偏振光的不同吸收,即磁致圆二向色性。磁致圆二向色性的存在是介质中产生退偏效应的根本原因。

令 x, y, z 为空间坐标轴,在磁光效应中,当磁场方向与光波传播方向均平行 z 轴时,根据张量的性质,介电常量张量 $\boldsymbol{\epsilon}$ 可表示为^[19]

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & i\delta & 0 \\ -i\delta & \epsilon_x & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

当介质存在吸收时, δ 为复数,对于没有吸收的介质 δ 为实数。设入射的线偏振光波为

$$\begin{cases} E = E_0 \exp[i(kz - \omega t)] = E_0 \exp\left[i\omega\left(\frac{n}{c}kz - t\right)\right] \\ H = H_0 \exp[i(kz - \omega t)] = H_0 \exp\left[i\omega\left(\frac{n}{c}kz - t\right)\right] \end{cases}, \quad (5)$$

式中 k 为波数, n 为介质的折射率,将(4),(5)式代入麦克斯韦方程,

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{H} = -\boldsymbol{\epsilon} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \end{cases} \quad (6)$$

得到描述各种磁光效应的基础公式

$$\begin{bmatrix} n^2(1-\alpha^2) - \epsilon_x & -n^2\alpha\beta - i\delta & -n^2\alpha\gamma \\ -n^2\alpha\beta + i\delta & n^2(1-\beta^2) - \epsilon_x & -n^2\beta\gamma \\ -n^2\alpha\gamma & -n^2\beta\gamma & n^2(1-\gamma^2) - \epsilon_x \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = 0, \quad (7)$$

式中 α, β, γ 分别表示波矢相对于 x, y, z 轴的方向余弦。

对于光波在各向均匀同性介质中的传播,有 $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \epsilon$ 。对于法拉第效应情形,由(7)式可得

$$\begin{cases} n_{\pm} = \epsilon \pm \delta \\ E_y = i\mu E_x \end{cases}. \quad (8)$$

与 n_+ 对应的 $E_y = -E_x$ 为右旋圆偏振光,与 n_- 对应的 $E_y = E_x$ 为左旋圆偏振光。两圆偏振光无相互作用地以两种不同的速度 c/n_- 和 c/n_+ 向前传播,如介质无吸收,出射后仅存在相位差,从而合成的仍为线偏振光,只是其偏振面相对于入射线偏振光发生了一定的旋转,此即法拉第效应。但由于在实际情形中,介质对光波存在吸收,故折射率通常是复数,并且磁光晶体对左、右旋圆偏振光的吸收率 α_L, α_R 并不完全相同,这导致了晶体对圆偏振光吸收的不同。用两吸收率之差 $\Delta\alpha = \alpha_L - \alpha_R$ 定量描述圆二向色性。此时偏振光进入介质后分解成的两个圆偏振光可以有相位差和不等振幅,如图 5 所示。根据矢量合成法则,利用旋转矢量图,可以求得合矢量

端点的轨迹是一个椭圆,这说明出射光变为一椭圆偏振光,即线偏振光退偏为椭圆偏振光。若定义复折射率为 $n_{\pm} = n'_{\pm} + in''_{\pm}$,则两个圆偏振光的振幅衰减分别依赖 n''_+, n''_- ,即相应地依赖于 ϵ 和 δ 定义的复数的虚部。

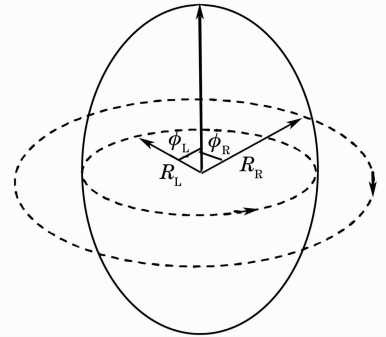


图 5 两振幅及相位不等的左、右旋圆偏振光合成椭圆偏振光

Fig. 5 Composite elliptical polarized light from left and right circularly polarized light when their amplitude and phase are different

实验证明含钴阳极氧化铝膜具有和磁光晶体相同的特性,即磁致偏光效应^[18]。并且,这种退偏效应会随着磁场变化而变化。通常退偏效应会在晶体磁化饱和后随磁场增大而增强,这可以从两个方面进行分析:一方面,磁化饱和后磁场增加会引起左、右旋圆偏振光吸收系数之差 $\Delta\alpha = \alpha_- - \alpha_+$ 的增大,导致出射椭圆偏振光的椭圆率增大,从而发生退偏现象;另一方面,由于光波传播方向不可能与磁场严格平行,磁场总会在垂直光波传播方向上具有分量,这就会导致磁致线双折射与磁致线二向色性的产生。在小磁场区域这种现象还不明显,但在大磁场区域开始发生明显作用,其作用结果就是引起透射椭圆偏振光椭圆率增大,椭圆率增大必然会导致透射光偏振度的降低,从而出现退偏现象。

5 结 论

用阳极氧化的方法制备规则有序的多孔铝薄膜,采用交流电沉积的方法,制备了含钴的阳极氧化铝复合结构。SEM 图像和 XRD 图谱显示,的确在阳极氧化铝模板中生成了钴纳米线,并具备一定的结晶取向。

搭建了磁致偏振测试系统,并在连续变化的磁场空间内测试了含钴阳极氧化铝复合结构的磁致偏振效应。在接近磁饱和时,样品具有最佳的退偏度,之后随着磁场强度的增强,样品出现了磁致退偏效应,在磁场强度超过 200 mT 时,样品的退偏度基本保持不变。含钴阳极氧化铝复合结构的磁致偏振效应是两种因素共同作用的结果,一种是内在因素磁致圆二向色性,另一种外在因素是由光波传播方向与磁场方向不一致所导致的磁致线双折射与线二向色性,二者共同影响 Co/PAA 复合结构的退偏度。正因为如此,含钴的阳极氧化铝复合材料在磁场空间内使用时,应尽可能的减小外加磁场的大小,以避免大磁场下退偏效应的增加。

另外含钴的阳极氧化铝复合材料具备线栅结构,可以作为制备微偏振器的材料,对于其光学特性的测试也是新的研究课题。

参 考 文 献

- 1 D. J. Sellmyer, M. Zheng, R. Skomski. Magnetism of Fe, Co and Ni nanowires in self-assembled arrays[J]. *J. Phys. Condens. Mat.*, 2001, **13**(25): 433~460
- 2 T. M. Whimery, J. S. Jiang, P. C. Searson *et al.*. Fabrication and magnetic properties of arrays of metallic nanowires[J]. *Science*, 1993, **261**(5126): 1316~1319
- 3 A. Fert, L. Piraux. Magnetic nanowires[J]. *J. Magn. Magn.*

- Mater.*, 1999, **200**(1-3): 338~358
- 4 P. Aranda, J. M. Garcia. Porous membranes for the preparation of magnetic nanostructures [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2002, **249**(1-2): 214~219
- 5 Wang Guangjian, Guo Yajie, Yang Zhenxing *et al.*. Preparation and spectroscopic characterization of ZnO/MCM-41 composite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1315~1319
王广健, 郭亚杰, 杨振兴等. ZnO/MCM-41 复合材料的制备及其光谱性质[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1315~1319
- 6 Li Jingzhen. Optical Hand Book[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1984. 538~541
李景镇. *光学手册*[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1984. 538~541
- 7 Qing Donghuan, Wang Chengwei, Li Hulin *et al.*. Preparation and magnetic research of Co-Ni alloy nanowires array[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(1): 144~148
覃东欢, 王成伟, 力虎林等. Co, Ni 合金纳米线有序阵列的制备与磁性研究[J]. *物理学报*, 2001, **50**(1): 144~148
- 8 He Junpeng, Zhang Yueguang, Shen Weidong *et al.*. Optical properties of Al₂O₃ thin film fabricated by atomic layer deposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 277~282
何俊鹏, 章岳光, 沈伟东等. 原子层沉积制备 Al₂O₃ 薄膜的光学性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 277~282
- 9 Li Yan, Sun Xiaowei, Wang Jian *et al.*. Comparison between the optical properties of Ni/AAO and Co/AAO nano-array composite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 77~82
李燕, 孙小伟, 王建等. Ni, Co /AAO 纳米有序阵列复合结构光吸收特性的比较研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 77~82
- 10 Shi Huigang, Fu Junli, Xue Desheng. Magnetic properties of amorphous Fe_{89.7}P_{10.3} alloy nanowire arrays [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3862~3865
史慧刚, 付军丽, 薛德胜. 非晶 Fe_{89.7}P_{10.3} 合金纳米线阵列的磁性研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(8): 3862~3865
- 11 Zhang Weiguo, Li Weixiang, Zhang Lu *et al.*. Electrodeposition of ordered arrays of multilayered Cu/Ni nanowires by dual bath technique [J]. *Acta Phys. Chim. Sinica*, 2006, **22**(8): 977~980
张卫国, 李伟祥, 张璐等. 双槽法电沉积 Cu/Ni 多层纳米线有序阵列[J]. *物理化学学报*, 2006, **22**(8): 977~980
- 12 Liu Qingfang, Wang Jianbo, Peng yong *et al.*. Fabrication and mossbauer study of arrays of Fe-Ni nanowires[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(10): 2008~2011
刘青芳, 王建波, 彭勇等. 铁镍合金纳米线阵列的制备与穆斯堡尔谱研究[J]. *物理学报*, 2001, **50**(10): 2008~2011
- 13 Li Yang, Wang Chengwei, Tian Jun *et al.*. Optical properties of ordered Co/AAO nano-array composite structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5): 1594~1598
李燕, 王成伟, 田军等. 钴/氧化铝纳米有序阵列复合结构的光学特性研究 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(5): 1594~1598
- 14 Zheng Mengmeng, Wu Fuquan, Liu Zaiguo *et al.*. Optical properties of Cu-Co arrays in porous alumina template [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 277~280
郑萌萌, 吴福全, 刘在国等. 铜钴合金纳米有序阵列的光学特性 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 277~280
- 15 Meng Fanbing, Hu Haining, Li Yangxian *et al.*. X-ray diffraction investigation of single-crystal Co nanowires [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(1): 384~388
孟凡斌, 胡海宁, 李养贤等. 一维 Co 单晶纳米线的 X 射线研究 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(1): 384~388
- 16 Wang Jiming, Wu Fuquan, Feng Taizhong *et al.*. Test system for polarization characteristic of magneto-optic crystal in magnetic field [J]. *J. Qufu Normal University (Natural Science)*, 2004, **30**(3): 51~53
王吉明, 吴福全, 封太忠等. 磁光晶体磁致偏振特性测试实验系

- 统[J]. 曲阜师范大学学报, 2004, **30**(3): 51~53
- 17 E. Milani. Intrinsic limit of magneto-optical isolators because of magnetic circular dichroism [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(27): 5217~5220
- 18 Wu Fuquan, Wang Jiming, Feng Taizhong *et al.*. Depolarization effect of magneto-optic crystal GdYBiG in adjustable magnetic field[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1347~1350
- 吴福全, 王吉明, 封太忠 等. 磁光晶体 GdYBiG 的磁致退偏效应[J]. 中国激光, 2004, **31**(11): 1347~1350
- 19 Liu Gongqiang, Le Zhiqiang, Shen Defang. Magneto-optics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2001. 30~55
- 刘公强, 乐志强, 沈德芳. 磁光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001. 30~55