

文章编号 1004-924X(2012)07-1525-07

纯金膜表面等离子增强的旋光效应

熊尚^{1,4*}, 罗雪丰², 韩立³

(1. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083; 2. 中航工业 602 所, 江西景德镇 333001;
3. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:为了研究棱镜的磁光特性对系统光学响应的影响,测试了单个 BK7 棱镜在全内反射条件下的旋光角度谱以及 BK7 棱镜与金膜组合构成 Kretschmann 结构的旋光角度谱,并根据传统光学理论分析了光谱的成因。理论分析结果表明:在单个 BK7 棱镜构成的全内反射结构中,棱镜底部对 p 波和 s 波产生的反射系数差异是导致系统进入全内反射临界角之前产生较强旋光效应的主要原因;在 BK7 棱镜与金膜组合构成的 Kretschmann 结构中,棱镜的磁光特性使得光波到达金膜表面之前产生了较小的 s 光分量,金膜表面等离子共振激发削弱了 p 光振幅,两种因素结合产生了一种新的表面等离子共振增强磁光效应的物理机制。实验结果表明:Kretschmann 模式下,26 nm 厚金膜的表面旋光角最大为 1.7°,克服了传统磁光克尔效应响应较弱的缺点。

关键词:表面等离子增强;表面等离子共振;磁光效应;磁光棱镜;Kretschmann 结构

中图分类号:O484.43;O436.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1525

Plasmon enhanced magneto-optical effect on surface of pure gold film

XIONG Shang^{1,4*}, LUO Xue-feng², HAN Li³

1. *Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;*
2. *China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China;*
3. *Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*
4. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: sxiong@semi.ac.cn*

Abstract: To investigate the influence of Magneto Optical(MO) properties of a prism on systematic optical response, the MO spectra of a single BK7 prism under the condition of total internal reflection was measured, and the spectra of Kretschmann configuration composed of the BK7 prism and a gold film was measured also. Then, based on the framework of traditional optical theory, the reasons of these spectra were analyzed explicitly. The theoretical results show that under conditions of total internal reflection, the Kerr rotation of the single BK7 prism increases significantly before the system gets in the critical angle, and the phenomenon comes from the different reflection coefficients between p and s waves. When the BK7 prism with the gold film is combined to form a standard Kretschmann

收稿日期:2012-03-14;修订日期:2012-05-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61090390);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2012CB315702)

configuration, a huge enhancement of Kerr rotation appears at the resonance angle due to the MO capability of BK7 material and the conversion of incident p-polarized wave to surface plasmons. The maximal experimental polar Kerr rotation of the gold film (26 nm) is 1.7° , which overcomes the disadvantage of poor response in the traditional way.

Key words: surface plasmons enhancement; Surface Plasmon Resonance (SPR); magneto-optical effects; magneto-optical prism; Kretschmann configuration

1 引言

表面等离子体波 (surface plasmon wave, SPW) 是自由电子群的集体振荡受到界面阻碍后形成的表面电荷疏密波。当外界电磁波与表面等离子体波的频率相等且沿界面方向上波矢匹配时,电磁激励源和表面等离子体波之间就会产生能量的共振耦合,这种现象称为表面等离子共振 (surface plasmon resonance, SPR)。在金属/电介质体系中,通过表面等离子共振将入射电磁场能量集中在金属表面附近几百纳米区域内,产生巨大的局域电磁场增强现象^[1]。一方面,局域增强的电磁场对金属薄膜表面介电系数的微小变化非常敏感,利用这一特点可以开发出各种表面等离子共振传感器。在过去的二十多年里,SPR 传感技术在生物化学检测领域获得了广泛应用^[2];另一方面,SPR 引发的局域电磁能量集中能够导致许多物理效应的增强^[1],产生一系列新型非线性光学现象。如:表面增强磁光效应^[3-4]、表面增强拉曼散射^[5-6]、表面增强荧光散射^[7-8]、光学透射增强^[9-10]等。

目前,已有大量文献报道了表面等离子增强的磁光现象。其中,文献[11-15]的研究结果表明 SPR 的激发能够增强系统的极向克尔旋光效应;文献[15-18]的研究结果表明横向克尔效应中,吸收率相对变化率在表面等离子共振点附近产生极值现象。Prashant K. Jain 等^[19]在实验中观察到金包裹磁赤铁矿 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) 纳米颗粒表面增强的磁光法拉第光谱。在等离子激元材料和磁光材料复合构成的磁光等离子体系中,贵金属与铁磁金属混合结构成为 SPR 增强磁光效应的常用研究平台^[3,15-17]。这是因为贵金属能够支持 SPW 的

长程传播,但磁光能力很弱,而铁磁金属的特性刚好相反。因此,在贵金属薄膜中嵌入铁磁层形成磁光/等离子系统既能支持 SPW 的传播,也具有较强的磁光响应能力。在这些研究中,通常将磁光响应增强的物理机理归结为金属表面等离子共振激发对铁磁性材料的电磁增强。

在有关表面等离子增强磁光克尔效应的研究中,棱镜耦合型 Kretschmann 配置模式^[1]是常用的表面等离子激发结构。棱镜的作用在于增大入射光波矢,使其与金属薄膜/空气界面 SPW 波矢匹配。因此,目前公开文献报道中,没有涉及棱镜自身磁光特性对光波传播的影响。在本文的研究中,我们采用具有一定磁光特性的 BK7 玻璃材质制作棱镜,与金膜组合构成 Kretschmann 结构,并观察到了一种特殊的 SPR 增强的磁光效应。

2 实验装置和测试原理

如图 1 所示,SPR 增强磁光克尔效应测试系统实际上是角度扫描型 SPR 谱仪和传统表面磁光谱仪的组合,图 2 是其实物照片。表面等离子激发采用 Kretschmann 模式,系统主要观察在磁场影响下反射光波偏振面随入射角变化的关系。光源为 He-Ne 激光器 ($\lambda=632.8\text{ nm}$),光波经起偏器调制为 P 偏振状态。在 BK7 等腰直角棱镜的底

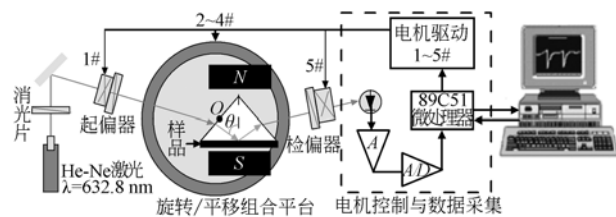


图 1 表面增强磁光效应谱仪组成原理图

Fig. 1 Block diagram of surface plasmon enhanced polar MO Kerr effect measuring system

面进入全内反射后,产生的消逝场穿透样品薄膜。并在特定的入射角情况下,激发金属薄膜与空气界面的 SPR。我们设计的运动控制机构,使得样品测试点在角度扫描过程中始终位于棱镜底部样品基片的中心^[20],保证了测试过程的一致性。



图 2 表面增强磁光效应谱仪实物图

Fig. 2 Picture of surface plasmon enhanced polar MO Kerr effect measuring system

磁光效应测试采用极向克尔配制模式,即外界磁场矢量平行于入射面并与 SPW 波矢垂直。棱镜和样品位于 C 形永磁磁路的气隙当中,气隙处的磁场强度为 0.5 T。在实验过程中,入射角的改变由安装有步进电机的旋转平台精确控制,扫描范围 35~55°,扫描间隔为 0.5°;反射光偏振轴的指向通过旋转检偏器获得。

3 实验结果与理论分析

由于 BK7 棱镜具备一定的磁光特性^[21],所以实验及理论分析采取从简单到复杂,逐次研究单个棱镜、棱镜/金膜结构在全内反射条件下光波传播变化的物理过程,以确定各种介质在系统旋光响应中的作用。对于光波在每一种配置结构中的各个传播环节,都采用传统的光学理论给出了详尽的分析计算。并根据最终的实验测试光谱验证理论模型。

3.1 全内反射条件下棱镜的旋光效应及理论模型

如图 3 所示,棱镜处于磁场强度为 B 的均匀磁场中。p 偏振光波从 O_1 点进入棱镜,在底边 O_2 点反射后,从棱镜另一边 O_3 透射出棱镜。 O_1 点入射角为 θ ,折射角为 θ_1 ; O_2 点入射角为 θ_m 。光波在棱镜中的传播过程可分为 5 个子物理过程:(1) O_1 点的透射;(2) $O_1 O_2$ 传播过程的法拉第旋光效应;(3) O_2 点的反射;(4) $O_2 O_3$ 路径中的法拉第旋光效应;

(5) O_3 点的透射过程。棱镜的旋光效应主要在于分析清楚每一个子过程中 p 波和 s 波变化情况。

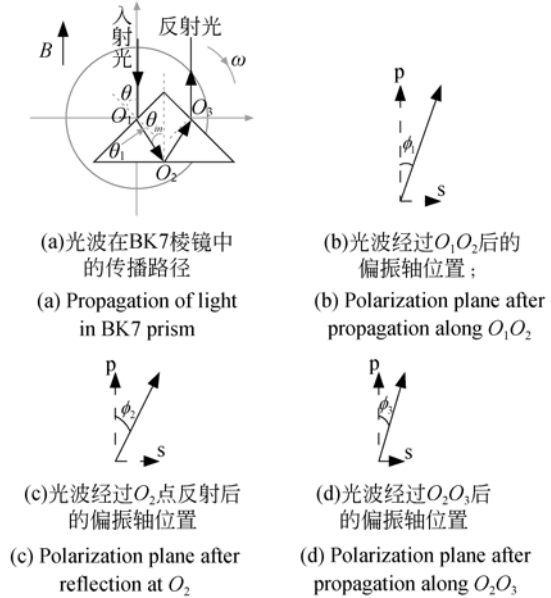


图 3 全内反射条件下棱镜旋光效应的光路分析

Fig. 3 Analysis of optical path of rotation effect in prism under total internal reflection

(1)在 O_1 点处,入射光为 p 偏振波,透射不改变光波偏振面。因此,折射后不产生 s 光。

(2)光波在 $O_1 O_2$ 路径的传播过程中,路径 $O_1 O_2$ 长度会随着棱镜的旋转发生变化。设底边边长为 1,由三角形内角正弦定理可知路径长度 $O_1 O_2$ 与底边入射角 θ_m 关系为:

$$O_1 O_2 = \frac{1}{2(\cos \theta_m + \sin \theta_m)}. \quad (1)$$

磁场方向平行于入射面法线方向,则磁场在 $O_1 O_2$ 路径上的分量大小为 $B \cdot \cos \theta_m$ 。BK7 棱镜维尔德常数 $V = 4.07 \text{ rad/T} \cdot \text{m}^{[21]}$ 。则光波经过 $O_1 O_2$ 路径后偏振面旋转角度为:

$$\varphi_1 = V \cdot B \cos \theta_m \cdot O_1 O_2. \quad (2)$$

代入相关常数得到 φ_1 随底边扫描角度 θ_m 变化曲线如图 4(a) 所示。

(3)设 O_1 点折射后 p 光波的振幅始终为 1,光波沿 $O_1 O_2$ 传播中的法拉第旋光效应使得偏振面旋转 φ_1 角度,因而到达 O_2 点的光波含有 s 光波分量。由矢量分解可知,到达 O_2 点后 p 光振幅为 $\cos \varphi_1$, s 光振幅为 $\sin \varphi_1$ 。光波在 O_2 点反射后, p 光振幅为 $r_p \cos \varphi_1$, s 光振幅为 $r_s \sin \varphi_1$ 。其中 r_p 和 r_s 分别为

O_2 点 p 光和 s 光的振幅反射系数:

$$r_p = \begin{cases} \frac{\cos \theta_m - n_p \cos \theta_T}{\cos \theta_m + n_p \cos \theta_T}, & \theta_m < \theta_c \\ 1, & \theta_m \geq \theta_c \end{cases}, \quad (3)$$

$$r_s = \begin{cases} \frac{n_p \cos \theta_m - \cos \theta_T}{n_p \cos \theta_m + \cos \theta_T}, & \theta_m < \theta_c \\ 1, & \theta_m \geq \theta_c \end{cases}. \quad (4)$$

根据上式计算得到反射后 p 光和 s 光的振幅反射系数随 θ_m 变化关系如图 4(b) 所示。在全内反射临界角左边, s 光反射系数高于 p 光反射系数。进入全内反射状态后, 两者的反射系数均为 1。反射后光波偏振面相对于 p 光轴夹角为:

$$\varphi_2 = \arctan \frac{r_s \sin \varphi_1}{r_p \cos \varphi_1}. \quad (5)$$

计算结果如图 4(c) 所示。反射后光波振幅为:

$$I_B = \sqrt{(r_p \cos \varphi)^2 + (r_s \sin \varphi)^2}. \quad (6)$$

(4) 考虑到理想模型中 $O_1 O_2$ 与 $O_2 O_3$ 传播路径关于底边中线的对称性, 光波沿 $O_1 O_2$ 与 $O_2 O_3$ 传播后光波偏振面旋光角大小相等, 旋光方向相反。因此, 光波经过 $O_2 O_3$ 路径到达 O_3 点后, 偏振面相对于 p 光轴夹角变为 $\Phi_2 - \Phi_1$ 。由矢量分解得到 O_3 点 p 光振幅为 $I_B \cos(\Phi_2 - \Phi_1)$, s 光振幅为 $I_B \sin(\Phi_2 - \Phi_1)$ 。

设 O_3 点 p 光和 s 光振幅透射系数分别为 t_p 和 t_s , 有:

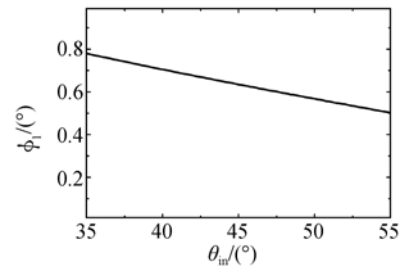
$$\begin{cases} t_p = \frac{2n_p \cos \theta_1}{\cos \theta_1 + n_p \cos \theta} \\ t_s = \frac{2n_p \cos \theta_1}{n_p \cos \theta_1 + \cos \theta} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: θ 为 O_3 点的透射角度。则经过 O_3 点透射后 p 光振幅为 $I_B t_p \cos(\Phi_2 - \Phi_1)$, s 光振幅为 $I_B t_s \sin(\Phi_2 - \Phi_1)$ 。透射后光波偏振面与 p 光夹角:

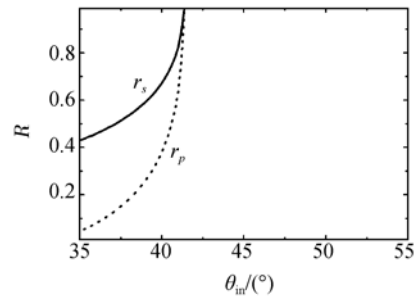
$$\varphi_3 = \arctan \left[\frac{t_s \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{t_p \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \right]. \quad (8)$$

综合以上各式, 得到纯 BK7 棱镜旋光效应随入射角度变化关系如图 4(d) 中实线所示。图 4(d) 中 Δ 点划线为实验测试数据。从图中可以看出, 理论模拟结果与实验结果基本一致。因此, BK7 棱镜各界面上发生的反射和透射对 p 波和 s 波比例的变化均有影响, 光波在 BK7 棱镜内部的传播受到磁光法拉第效应影响使偏振面发生旋

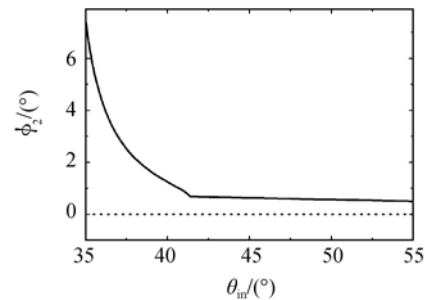
转。同时, 图 3(d) 中棱镜的旋光效应在全内反射临界角左边入射角越小, 旋光角越大, 而在全内反射临界角右边旋光角接近 0° 。这主要是由于棱镜底边 O_2 点处, 在临界角左边入射角越小, p 波反射率趋近于 0, s 波与 p 波反射率差值越大。而进入全内反射后, O_2 点 p 波和 s 波反射系数均为 1, 由棱镜本身磁光特性引起的沿 $O_1 O_2$ 与 $O_2 O_3$ 传播路径产生的法拉第旋转角相互抵消, 使系统对外的旋光角度变为 0 。



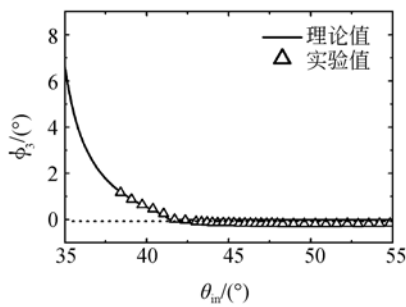
(a) 光波沿 $O_1 O_2$ 传播时法拉第旋光角随 θ_m 的变化
(a) Variation with the incidence angle θ_m of the Faraday rotation



(b) O_2 点 p 波和 s 波反射率随入射角变化曲线
(b) Reflection coefficients of p and s wave at O_2



(c) O_2 点反射光偏振角与 θ_m 的关系
(c) Polarization plane of reflected beam at O_2



(d) O_3 点透射后光波旋光角随 θ_m 变化曲线

(d) Polarization plane of transmitted light at O_3

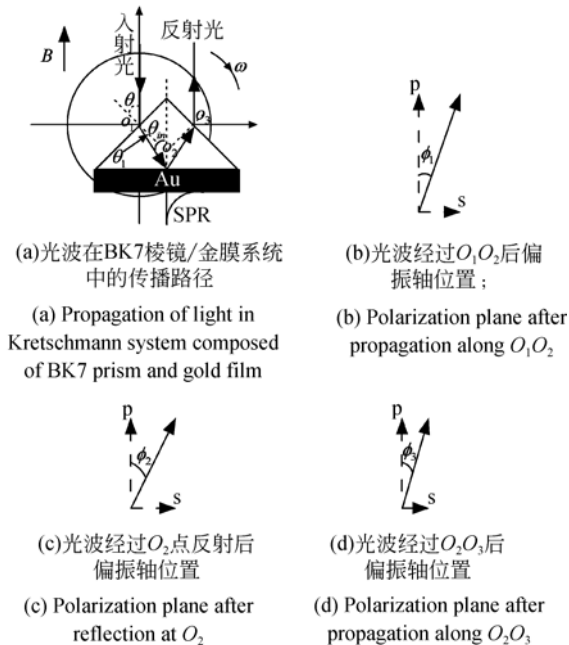
图 4 全内反射条件下棱镜旋光效应的数据分析

Fig. 4 Data analysis of the rotation effect in prism under the condition of total internal reflection

3.2 Kretschmann 模式下金膜表面旋光效应机理分析

考虑到单个棱镜的旋光效应是由于底部 O_2 点处 p 波和 s 波反射率差异造成的,在棱镜/金膜系统中,原因同样可能在于薄膜对于 p 波和 s 波的反射差异。

按照单个棱镜系统的分析思路研究棱镜/金膜系统的旋光角度谱产生原因,将整个光波传播



(a)光波在BK7棱镜/金膜系统中的传播路径

(a) Propagation of light in Kretschmann system composed of BK7 prism and gold film

(b)光波经过 O_1O_2 后偏振轴位置;

(b) Polarization plane after propagation along O_1O_2

(c)光波经过 O_2 点反射后偏振轴位置

(c) Polarization plane after reflection at O_2

(d)光波经过 O_2O_3 后偏振轴位置

(d) Polarization plane after propagation along O_2O_3

图 5 Kretschmann 模式下棱镜/金膜系统旋光效应的光路分析

Fig. 5 Analysis of optical path of the rotation effect in Kretschmann system composed of BK7 prism and gold film

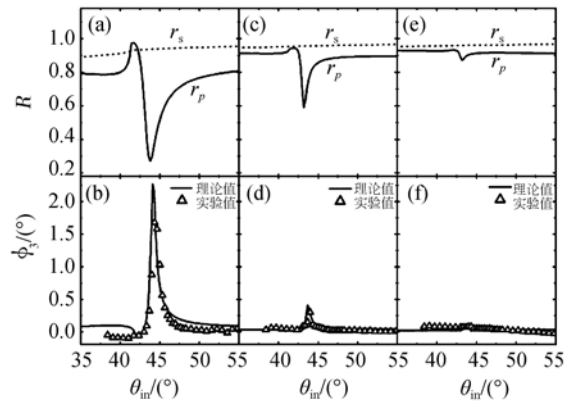


图 6 不同厚度金膜表面 p 波和 s 波的振幅反射系数 [(a) 26 nm; (c) 55 nm; (e) 80 nm] 及对应的旋光角度谱 [(b) 26 nm; (d) 55 nm; (f) 80 nm]

Fig. 6 (a), (c), (e) are reflection coefficients of p and s wave at the interface of BK7 prism and different thick [(a) 26 nm, (c) 55 nm, (e) 80 nm] gold film. (b), (d), (f) are spectra of Kretschmann systems composed of BK7 prism and different thick [(b) 26 nm, (d) 55 nm, (f) 80 nm] gold film.

过程同样分为 5 个子物理过程,如图 5 所示。在 O_1 点以及 O_1O_2 传播路径上发生的物理过程与纯棱镜系统完全相同。经过 O_1O_2 路径后,光波偏振面与 p 光轴之间夹角如图 4(a) 所示。棱镜/金膜系统与纯棱镜系统的差异在于金膜表面等离子体波的激发对 p 波产生强烈的吸收,而 s 波的反射率不受表面等离子激发的影响。由于入射光波与表面等离子体波的耦合程度与厚度有密切关系,因此选用 3 个不同厚度 (26、55、80 nm) 金膜样品验证棱镜/金膜系统旋光效应来自于 SPR 吸收效应的设想。

根据多层薄膜光学理论,可计算得到 3 个不同厚度金膜样品表面对 p 波和 s 波的振幅反射系数,如图 6 (a)、(c)、(e) 所示^[22]。光波经过 O_2O_3 路径,在 O_3 点透射后旋光角 Φ_3 如图 6 (b)、(d)、(f) 所示。从图中可以看出,随着膜层厚度增加,表面等离子共振强度变弱,入射光波与表面等离子转化程度减小,p 光反射率逐渐增大,与 s 光反射系数差值缩小。因此,SPR 强烈,p 波吸收率越大,共振角附近棱镜/金膜系统的旋光效应越明显。

4 结 论

研究分析表明 Kretschmann 系统中的每一层介质都参与了对光波偏振面旋转的影响。BK7 棱镜自身的磁光能力使得线偏振光波到达棱镜底部时产生了较小的 s 光分量,金属薄膜表面 SPR 吸收效应对 p 光分量振幅影响较大。棱镜自身的磁光能力与 SPR 对 p 光的吸收作用结合,使整个系统表现出较强的旋光能力。而且表面等离子

共振越强烈,光波偏振面旋转越大。Kretschmann 模式下金膜表面旋光效应机理研究实验中,采用 26 nm 金膜系统的旋光极值为 1.7° ,理论模拟表明最高可以达到 2.5° 。因此,采用磁光棱镜和金属薄膜组合形成的 Kretschmann 系统能够克服传统表面磁光克尔反射结构响应较弱的缺点,使系统的旋光能力得到极大增强。在今后的研究中,我们将通过优化 SPR 来增强系统的旋光能力。

参考文献:

- [1] RAETHER H. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings* [M]. Berlin: Springer Tracts in Modern Physics, 1988.
- [2] HOMOLA J, YEE S S, GAUGLITZ G. Surface plasmon resonance sensors; review [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 1999,54(1-2):3-15.
- [3] GONZALEZ D J B, GARCIA J M, GARCIA M A, *et al.*. Plasmon-enhanced magneto-optical activity in ferromagnetic membranes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009,94(26):263101.
- [4] LIU Z, SHI L, SHI Z, *et al.*. Magneto-optical Kerr effect in perpendicularly magnetized Co/Pt films on two-dimensional colloidal crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2009,95(3):032502.
- [5] NIE S M, EMERY S R. Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering [J]. *Science*, 1997,275(5303):1102-1106.
- [6] WANG W, LI ZH P, GU B H, *et al.*. Ag@SiO₂ core-shell nanoparticles for probing spatial distribution of electromagnetic field enhancement via surface-enhanced raman scattering [J]. *ACS Nano*, 2009,3(11):3493-3496.
- [7] LIM S Y, KIM J H, PARK C B, *et al.*. Gold nanoparticle enlargement coupled with fluorescence quenching for highly sensitive detection of analytes [J]. *Langmuir*, 2009,25(23):13302-13305.
- [8] POMPA P P, MARTIRADONNA L, TORRE A D, *et al.*. Metal-enhanced fluorescence of colloidal nanocrystals with nanoscale control [J]. *Nature Nanotechnology*, 2006,1(2):126-130.
- [9] LIU H T, LALANNE P. Microscopic theory of the extraordinary optical transmission [J]. *Nature*, 2008,452(7188):728-731.
- [10] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F, *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998,391(6668):667-669.
- [11] GONZALEZ D J B, MARTIN A G, CEBOLLA-DA A, *et al.*. Plasmonic Au/Co/Au nanosandwiches with enhanced magneto-optical activity [J]. *Small*, 2008,4(2):202-205.
- [12] RICHARD N, DEREUX A, BOURILLOT T, *et al.*. Kerr and Faraday rotations of magneto-optical multilayers under the condition of total internal reflection [J]. *Physica Status Solidi a-Applied Research*, 1999,175(1):225-232.
- [13] ARMELLES G, GONZALEZ D J B, MARTIN G A, *et al.*. Localized surface plasmon resonance effects on the magneto-optical activity of continuous Au/Co/Au trilayers [J]. *Optics Express*, 2008,16(20):16104-16112.
- [14] RICHARD N, DEREUX A, DAVID T, *et al.*. Magneto-optical effects in multilayers illuminated by total internal reflection [J]. *Physical Review B*, 1999,59(8):5936-5944.
- [15] VILA E F, SUEIRO X M B, DIAZ G J B, *et al.*. Surface plasmon resonance effects in the magneto-optical activity of Ag-Co-Ag trilayers [J]. *Ieee Transactions on Magnetics*, 2008,44(11):3303-3306.
- [16] GONZALEZ D J B, MARTIN G A, ARMELLES G, *et al.*. Surface-magnetoplasmon nonreciprocity effects in noble-metal/ferromagnetic heterostructures [J]. *Physical Review B*, 2007,76(15):153402-1-8.

- [17] FERREIRO V E, GONZALEZ D, FERMENTO R, *et al.*. Intertwined magneto-optical and plasmonic effects in Ag/Co/Ag layered structures [J]. *Physical Review B*, 2009,80(12):125132.
- [18] CLAVERO C, YANG K, SKUZA J R, *et al.*. Magnetic field modulation of intense surface plasmon polaritons [J]. *Optics Express*, 2010,18(8):7743-7752.
- [19] JAIN P K, YAN H X, WALSWORTH R, *et al.*. Surface plasmon resonance enhanced magneto-optics (SUPREMO): faraday rotation enhancement in gold-coated iron oxide nanocrystals [J]. *Nano Letters*, 2009,9(4):1644-1650.
- [20] 罗雪丰,韩立. SPR 谱仪的研制及在磁光复合薄膜测试中的应用 [J]. *现代科学仪器*, 2010,10(5):52-56.
- LUO X F, HAN L. Development of angular SPR spectrometer and application in investigation of compound magneto-optical films [J]. *Modern Scientific Instrument*, 2010,10(5):52-56. (in Chinese)
- [21] 杨中民. 全光纤传感用磁光玻璃的研究进展[J]. *中国稀土学报*, 2003,21(2):115-122.
- YANG ZH M. Overview of reearch on magneto-optical glass applied to all-optical fiber sensor [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2003,21(2):115-122. (in Chinese)
- [22] LUO X F, HAN L. A universal model of surface plasmon resonance characteristics for isotropic multilayer films [C]. 2010 *IEEE Youth Conference on Information, Computing and Telecommunications*, 2010:263-266.

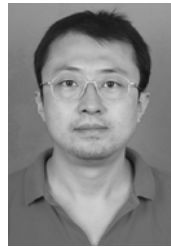
作者简介:



熊 尚(1984—),男,湖南汨罗人,博士研究生,2007年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事光学传感器的研究。E-mail: sxiong@semi. ac. cn



罗雪丰(1982—),男,湖南益阳人,博士,工程师,2011年于中科院电工研究所获得博士学位,主要从事新型磁光传感器的研究。E-mail: 597278259@qq. com



韩 立(1970—),男,甘肃兰州人,博士,研究员,1999年于清华大学凝聚态物理专业获得博士学位,2000~2002年在清华大学力学系博士后流动站工作,主要从事微纳加工装备和微纳检测设备的研究。E-mail: lihan@mail. iee. ac. cn