

含 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ 三明治结构的光学和磁光性质

董丽娟 刘艳红 刘丽想 石云龙*

山西大同大学固体物理研究所, 山西 大同 037009

摘要 利用隧穿机制研究了含磁光金属 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ 的三明治结构(磁光金属嵌入两个磁光光子晶体中)的透射性质和磁光法拉第旋转效应。在含磁光金属的三明治结构中,分别研究了双透射峰和单透射峰两种情况。研究表明,无论是双透射峰还是单透射峰情况,局域在磁光金属和磁光光子晶体界面上的电磁场,都能够同时增强磁光金属的透射和磁光法拉第旋转效应。另外,分析了磁光金属 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ 存在增益时该三明治结构法拉第旋转角达到 -45° 的情况,此性质为设计小型化的磁光隔离器件提供了理论依据。

关键词 材料; 特异材料; 光子晶体; 法拉第旋转效应; 磁光金属

中图分类号 O469

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0416003

Optical and Magneto-Optical Properties in a Sandwiched Structure Containing $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$

Dong Lijuan Liu Yanhong Liu Lixiang Shi Yunlong

Institute of Solid State Physics, Datong University, Datong, Shanxi 037009, China

Abstract The transmission and magneto-optical Faraday rotation effect are studied in a sandwiched structure containing the magneto-optical metal $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ by tunneling mechanism. The double transmission peaks and single transmission peak are discussed in the sandwiched structure, respectively. The results show that the transmission and magneto-optical Faraday rotation effect of both double transmission peaks and single transmission peak in the sandwiched can simultaneously be enhanced due to the slow wave effect of the localized electromagnetic fields at the interface between the magneto-optical metal layer and the magnetophotonic crystals. In addition, Faraday rotation angle -45° is given in our sandwiched when the magneto-optical metal $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ is gained. This property provides a theoretical basis for the design of compact magneto-optical isolation devices.

Key words materials; metamaterials; photonic crystal; Faraday rotation effect; magneto-optical metal

OCIS codes 160.3918; 050.5298; 160.3820; 160.3900

1 引 言

近年来,含磁光介质(Bi:YIG)的磁光光子晶体引起了人们的关注^[1-5]。例如,2010年,Goto等^[4]研究了含双磁光介质缺陷的一维磁光光子晶体的法拉第效应;2012年,Dong等^[5]研究了磁光光子晶体和导电金属氧化物界面的单向Tamm等离子体激元等。然而,Bi:YIG只是磁光介质,它的磁光常数远远小于磁光金属。

磁光金属具有巨大的磁光常数,由于金属的透射光强太小以至于很难利用它的磁光法拉第旋转效应。但是,近些年来,人们逐渐地利用各种方法提高了厚金属膜的透射^[6-11]。例如,人们利用表面等离子体^[6-7]和法布里-珀罗腔^[8-9]共振方式,在纳米尺寸金属结构中增强了透射光;利用量子隧穿机制增强了含金属膜的三层结构中金属的透射率^[10];利用光隧穿机制增强了含厚金属膜的异质结构中金属的透射率等^[12,11]。由此可见,

收稿日期: 2014-09-24; 收到修改稿日期: 2014-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(11104169, 11274207)、教育部科学技术研究重点项目基金(212018)、山西省留学回国人员基金(2012-重点2)、山西省自然科学基金(2013011007-2, 2013021010-5)、山西省高等学校创新人才支持计划

作者简介: 董丽娟(1976—),女,博士,副教授,主要从事人工微结构材料、特异材料和光子晶体等方面的研究。

E-mail: donglijuan_2012@163.com

*通信联系人。E-mail: ylshi238@gmail.com

既然厚金属膜的透射率提高了,那么磁光金属巨大的磁光法拉第旋转效应也可以得到利用。2010年,本课题组研究了含磁光金属的异质结构的透射率和法拉第效应^[12],研究表明,利用光隧穿机制^[13]可以同时提高磁光金属的透射率和法拉第旋转角。但是,在一定的条件下,三明治结构的局域性比异质结构的局域性强^[14]。因此,本文研究了含磁光金属的三明治结构中的透射率和法拉第旋转效应。对于含磁光金属的三明治结构,曾研究了厚金属银膜的法拉第旋转效应^[15],而且只分析了单透射峰的情况,由于金属银的磁光效应很小,法拉第旋转效应无法满足磁光器件的要求。本文分别研究了含磁光金属 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ 的三明治结构中的双透射峰和单透射峰两种情况,同时分析了磁光金属存在增益时该结构法拉第旋转角达到 -45° 的情况。

2 双透射峰情况

考虑由两个全介质磁光光子晶体与磁光金属 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ 组成三明治结构 $(\text{AB})^N\text{M}(\text{BA})^N$, 周围被空气包围。其中 A 层代表正常材料, B 层代表磁光介质, M 层代表磁光金属, N 代表光子晶体的周期数目。在计算中,选取 A 和 B 材料分别为 SiO_2 和 Bi:YIG, 其中 SiO_2 的折射率为 1.443, Bi:YIG 的光学常数和磁光常数来源于文献[3]。A 层和 B 层的厚度分别为 d_A 和 d_B , 磁光金属的厚度为 d_M 。只考虑光波垂直入射的情况。

对于磁光材料,介电常数是一个张量,表达式为

$$\tilde{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & i\varepsilon_2 & 0 \\ -i\varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

中介质被磁化到饱和,磁化强度 \mathbf{M} 平行于 z 轴。电磁波的传播方向选取 z 方向,由于电磁波是横波,场的偏振面在 xy 平面内,(1)式张量中的 ε_1 和 ε_2 分别对应磁光材料的光学常数和磁光常数。在三明治结构中,磁光介质 B 层和磁光金属 M 层的介电常数都用(1)式来描述,并且传播时的右旋和左旋偏振光的折射率分别是 $n_{\pm} = (\varepsilon_1 \pm \varepsilon_2)^{1/2}$ 。利用 4×4 转移矩阵计算磁光材料的透射率和法拉第旋转角^[3],利用光隧穿机制设计三明治结构中的匹配情况^[13, 15-18]。

用 Drude 模型来描述磁性金属 M 层的参数性质,介电常数张量的对角元光学常数可以表示为

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\omega_{\text{ep}}^2}{\omega^2 + i\omega\gamma_e}, \quad (2)$$

式中 ω_{ep} 是电等离子体频率, γ_e 是耗散系数, $\omega_{\text{ep}} = 1.0086 \times 10^4$ THz, $\gamma_e = 9.077 \times 10$ THz。在计算中,选取共振隧穿的波长 λ 为 631 nm,磁光金属 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ 的光学常数在隧穿波长处与文献[19]中的参数一致 $\varepsilon_1 = -10 + i2.1$,磁光参数取文献[19]中的参数 $\varepsilon_2 = -1.2 + i1.15$ 。

首先,考虑三明治结构中的双透射峰情况。磁光金属被嵌入两个磁光光子晶体内部,在它的前后会出现两个界面模。如果两个界面模相互耦合比较强,将会出现双透射峰。图 1 给出了三明治结构 $(\text{AB})^5\text{M}(\text{BA})^5$ 中所有材料都无损耗和无磁光性质(磁光常数为零)时的双透射峰的曲线变化关系。图中实线代表透射率,虚线代表反射率,且 A 层、B 层和 M 层的厚度分别为 89、55.2、58 nm。可以看到,在满足相位匹配和阻抗匹配

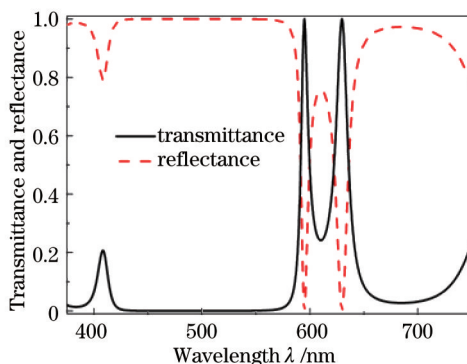


图 1 三明治结构 $(\text{AB})^5\text{M}(\text{BA})^5$ 无损耗和无磁光性质时的反射率和透射率

Fig.1 Reflectance and transmittance of the sandwiched $(\text{AB})^5\text{M}(\text{BA})^5$ without losses and magneto-optical properties

的条件下^[15],金属M层两边界面模的透射率都可以达到1,反射率达到0,隧穿波长分别为596 nm和631 nm。在隧穿波长处,电磁波能量全部进入三明治结构中。然而,当考虑了材料B层和M层损耗和磁光性质后,反射率会增大,透射率会减小,磁光法拉第旋转效应会产生,如图2(a)和(b)所示。在图2中,除了损耗和磁光常数以外,其他参数与图1中的参数一样。从图2(a)可以看到,由于损耗和磁光性质的影响,反射率无法达到0,入射的电磁波无法全部进入三明治结构中。由于材料层B和M都具有磁光性质,所以从图2(b)可以看到,在相应的波长处出现了两个法拉第旋转角比较大的峰。因为损耗和磁光性质会引起金属的透射率的变化,而透射率的变化会引起法拉第旋转角的变化,而且损耗和磁光性质随着频率的变化而变化^[20],影响也不一样,因此考虑了损耗和磁光性质,将会导致最大透射峰与法拉第旋转角的最大值有所偏移。从图2可以看到,因为损耗和磁光性质的介入,法拉第旋转角对应的波长与透射率峰值对应的波长有所偏差,分别由原来的596 nm和631 nm变为了592 nm和622 nm。图中可以看到,最大透射率分别达到了0.22和0.4,最大法拉第旋转角分别达到了 -19° 和 -15° 。同时,计算了双透射峰波长处对应的电磁场分布情况,如图3(a)和(b)所示。从图中可以看到,在透射峰的对应该波长处,电磁场的能量都分别局域在光子晶体与磁光金属的界面上,正是这个原因导致了磁光金属的透射率和法拉第旋转效应的增强。

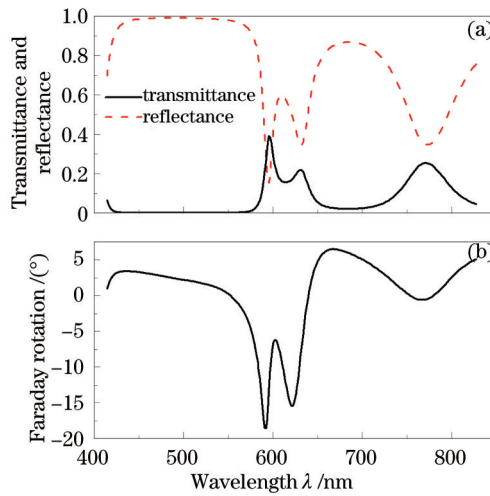


图2 (a) 三明治结构 $(AB)^5M(BA)^5$ 实际参数时双透射峰的反射率和透射率; (b) 法拉第旋转角

Fig.2 (a) Reflectance and transmittance of the sandwiched $(AB)^5M(BA)^5$ with fact parameter for double modes; (b) Faraday rotation angles

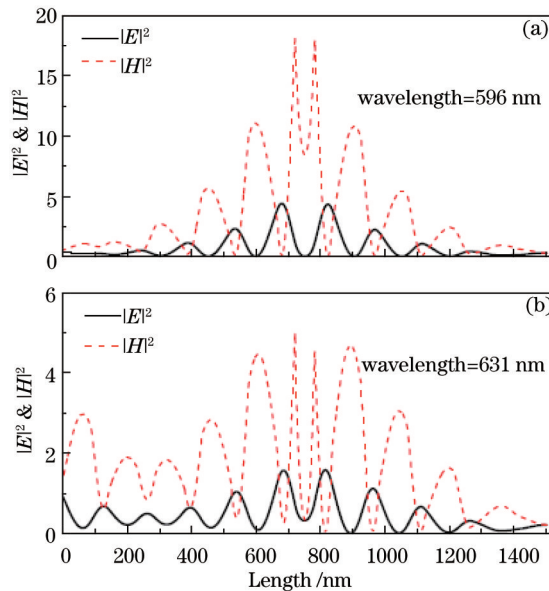


图3 对应于图2(a)中隧穿波长处的电场强度(实线)和磁场强度(虚线)分布

Fig.3 Electric field (solid lines) and magnetic field (dashed lines) distribution corresponding to Fig.2(a) at the tunneling wavelength

3 单透射峰情况

现在,考虑三明治结构中的单透射峰情况。如果两个界面模相互耦合比较弱,双透射峰将会合并为一个峰。图4(a)给出了三明治结构 $(AB)^5M(BA)^5$ 采用实际参数时的单透射峰的曲线变化关系。图中实线代表透射率,虚线代表反射率,且M层的厚度为90 nm,其余所有的参数都与图2一样。可以看到,由于金属层厚度的增加,界面模之间的耦合作用变弱,透射峰由原来的两个峰值合并为一个,单峰对应的波长是611 nm,该波长处于双透射峰对应的波长之间。从图4(b)可以看到,在相应的波长处出现了一个法拉第旋转角最大的值,该值达到了 -27° 。由于损耗和磁光性质的影响,对应波长稍微移动了一些,变为601 nm。同样,单峰值对应的法拉第旋转角的增加也是由于电磁场的能量局域在磁光金属和光子晶体的界面上导致的,并且场的局域强度在双透射峰值场强对应的局域强度之间。

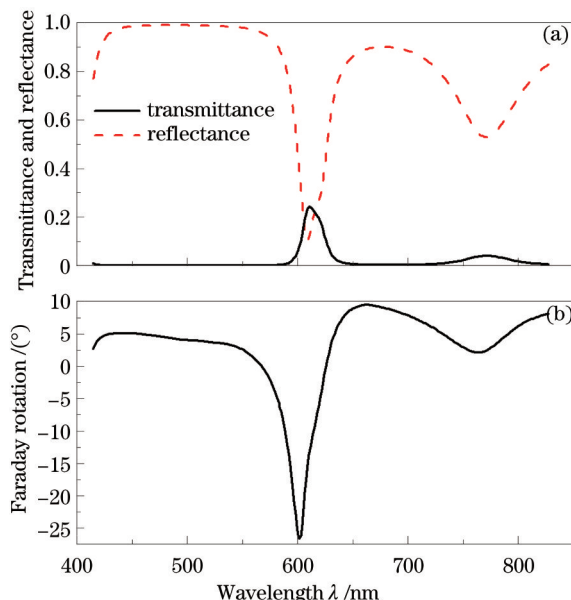


图4 (a) 三明治结构 $(AB)^5M(BA)^5$ 采用实际参数时单透射峰的透射率和反射率; (b)法拉第旋转角

Fig. 4 (a) Reflectance and transmittance of the sandwiched $(AB)^5M(BA)^5$ with fact parameter for single mode; (b) Faraday rotation angles

4 增益情况

磁光隔离器件要求磁光材料的法拉第旋转角度 $\pm 45^\circ$, 因此需要通过增益补偿来提高磁光材料的法拉第

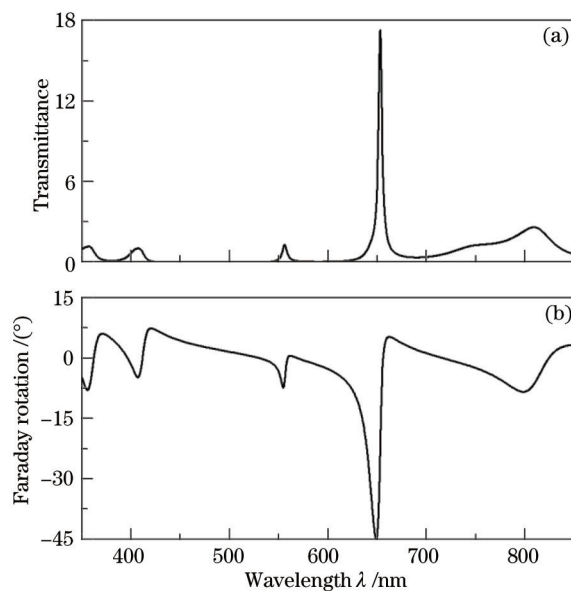


图5 (a) 三明治结构 $(AB)^5M(BA)^5$ 在有增益时单透射峰的透射率; (b)法拉第旋转角

Fig.5 (a) Transmittance of the sandwiched $(AB)^5M(BA)^5$ with the gain; (b) Faraday rotation angles

旋转角度。在磁光金属的光学常数复数中,增益的符号与损耗相反。在这里,只考虑单透射峰时增益的情况。无增益时金属层的光学常数可以表示为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1r} + i\varepsilon_{1i}$ (ε_{1r} 是光学常数的实部, ε_{1i} 是光学常数的虚部), 光学常数复数在隧穿波长处取实际参数^[19]。如果考虑增益时,金属层的光学常数虚部应该改变符号成为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1r} - i\varepsilon_{1i}$, 在隧穿波长 631 nm 处为 $\varepsilon_1 = -10 - i2.1$, 其余参数与图 4 中的参数一样。图 5 给出了考虑增益时的透射率和法拉第旋转角随波长的变化曲线。可以看到,由于增益的补偿效应,法拉第旋转角达到了 -45° 。

5 结 论

研究了磁光金属嵌入两个磁光光子晶体的三明治结构的透射率和磁光法拉第旋转效应。在该三明治结构中,两个界面模相互耦合作用的强弱不同会出现双透射峰和单透射峰情况。根据光隧穿机制,分别讨论了三明治结构中出现双透射峰和单透射峰的情况。研究表明,无论是在双透射峰时还是在单透射峰时,三明治结构的透射率和法拉第旋转效应都会同时增强,这是由于电磁场局域在磁光金属与磁光光子晶体界面上的缘故。同时,计算了磁光金属存在增益时三明治结构的透射率和法拉第旋转角度,该角度达到了 -45° , 为设计小型化磁光隔离器件提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 T Goto, A V Baryshev, M Inoue, *et al.*. Tailoring surfaces of one-dimensional magnetophotonic crystals: optical Tamm state and Faraday rotation [J]. *Phys Rev B*, 2009, 79(12): 125103.
- 2 T Goto, A V Dorofeenko, A M Merzlikin, *et al.*. Optical Tamm states in one-dimensional magnetophotonic structures [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101(11): 113902.
- 3 M Inoue, K Arai, T Fujii, *et al.*. Magneto-optical properties of one-dimensional photonic crystals composed of magnetic and dielectric layers [J]. *J Appl Phys*, 1998, 83(11): 6768-6770.
- 4 T Goto, A V Baryshev, K Tobinaga, *et al.*. Faraday rotation of a magnetophotonic crystal with the dual-cavity structure [J]. *J Appl Phys*, 2010, 107(9): 09A946.
- 5 H Y Dong, J Wang, T J Cui. One-way Tamm plasmon polaritons at the interface between magnetophotonic crystals and conducting metal oxides [J]. *Phys Rev B*, 2013, 87(4):045406.
- 6 L Salomon, F Grillot, A V Zayats, *et al.*. Near-field distribution of optical transmission of periodic subwavelength holes in a metal film [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(6): 1110-1113.
- 7 L Martín-Moreno, F J García-Vidal, H J Lezec, *et al.*. Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(6): 1114-1117.
- 8 Y Takakura. Optical resonance in a narrow slit in a thick metallic screen [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(24): 5601-5603.
- 9 F Yang, J R Sambles. Resonant transmission of microwaves through a narrow metallic slit [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(6): 063901.
- 10 I R Hooper, T W Preist, J R Sambles. Making tunnel barriers (including metals) transparent [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97(5): 053902.
- 11 G Q Du, H T Jiang, Z S Wang, *et al.*. Heterostructure-based optical absorber [J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(9): 1757-1762
- 12 L J Dong, H T Jiang, H Chen, *et al.*. Tunnelling-based Faraday rotation effect enhancement [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2011, 44(14): 145402.
- 13 A Alù, N Engheta. Pairing an epsilon-negative slab with a mu-negative slab: resonance, tunneling and transparency [J]. *IEEE Trans Antennas & Propag*, 2003, 51(10): 2558-2571.
- 14 G Q Du, H T Jiang, L Wang, *et al.*. Enhanced transmittance and fields of a thick metal sandwiched between two dielectric photonic crystals [J]. *J Appl Phys*, 2010, 108(10): 103111.
- 15 Dong Lijuan, Du Guiqiang, Yang Chengquan, *et al.*. Magneto-optical Faraday rotation effect enhancement of a thick metal Ag [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(16): 164210.
董丽娟, 杜桂强, 杨成全, 等. 厚金属 Ag 膜的磁光法拉第旋转效应的增强[J]. *物理学报*, 2012, 61(16): 164210.
- 16 J Y Guo, Y Sun, Y W Zhang, *et al.*. Experimental investigation of interface states in photonic crystal heterostructures [J]. *Phys Rev E*, 2008, 78(2): 026607.
- 17 Chen Zefeng, Han Peng, Chen Yihang. Photonic band gap splitting based on optical Tamm states of photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5):0516002.
陈泽锋, 韩鹏, 陈溢杭. 基于光子晶体塔姆态的带隙分裂[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0516002.
- 18 Chen Xianfeng, Zhang Huixia, Wang Guang, *et al.*. Design of omnidirectional filter using single-negative materials [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4):0406004.
陈宪锋, 张辉霞, 王光, 等. 利用单负材料设计全向滤波器[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0406004.
- 19 S Y Wang, W M Zheng, D L Qian, *et al.*. Study of the Kerr effect of $\text{Co}_x\text{Ag}_{100-x}$ granular films [J]. *J Appl Phys*, 1999, 85(8): 5121-5123.
- 20 H Kato, T Matsushita, A Takayama, *et al.*. Theoretical analysis of optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals [J]. *J Appl Phys*, 2003, 93(7): 3906-3911.

栏目编辑: 刘丰瑞