

Research on Optical and Magneto-Optical Characteristics of Thin Films Based on V-Shaped Arrays

Yingying Zhao, Wei Wang, Huaiyong Guo, Dongxue Wang, Bo Xu, Hongyu Tian, Daoyong Li*

College of Physics and Electronic Engineering, Linyi University, Linyi Shandong
Email: lidaoyong@126.com

Received: May 15th, 2020; accepted: May 29th, 2020; published: Jun. 5th, 2020

Abstract

In this paper, the finite-difference time-domain method (FDTD) is used to calculate the transmittance and Faraday angle of the V-shaped hole arrays film with different array periods, dielectric layer thickness, and dielectric refractive index. The calculation results show that the transmission spectrum and Faraday spectrum will obviously redshift with the increase of the array period. The introduction of the dielectric layer improves the transmittance and Faraday angle, and the transmission spectrum and Faraday spectrum can be adjusted by changing the refractive index and thickness of the dielectric layer (NDL). These results have important implications for the design of magneto-optical devices.

Keywords

Finite-Difference Time-Domain Method, Light Transmission, Faraday Rotation

基于V形孔阵结构薄膜的光学与磁光特性研究

赵盈盈, 王伟, 郭怀永, 王冬雪, 徐波, 田宏玉, 李道勇*

临沂大学物理与电子工程学院, 山东 临沂
Email: lidaoyong@126.com

收稿日期: 2020年5月15日; 录用日期: 2020年5月29日; 发布日期: 2020年6月5日

*通讯作者。

摘要

本文利用时域有限差分法(FDTD), 计算了不同阵列周期、介质层厚度、介质折射率对V形孔阵薄膜的透射率和法拉第角。计算结果表明, 透射谱和法拉第谱随阵列周期的增大会发生明显的红移; 介质层的引入提高了透射率和法拉第角, 并且可以通过改变介质层(NDL)的折射率和厚度来调控透射谱和法拉第谱, 这些结果对磁光器件设计具有重要的意义。

关键词

时域有限差分法, 光透射, 法拉第旋转

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

周期性结构薄膜由于能够激发表面等离子激元从而产生许多新奇的光学现象, 如异常光透射、表面拉曼增强等, 在传感器、滤波器等领域具有重要的应用, 因而受到人们的广泛关注[1] [2] [3]。表面等离子激元是光入射到金属与介质分界面时, 金属表面的自由电子发生集体振荡而形成的沿金属表面传播的倏逝波, 根据传播方式分为表面极化等离子激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)和局域表面等离子激元(Localized Surface Plasmon, LSP)两种形式。在贵金属和磁性介质构成的体系中, 表面等离子激元不仅诱导了光学增强, 而且对系统的磁光特性也有重要影响, 这种结合了等离子激元特性和磁光特性的磁等离子激元晶体结构成为近几年的研究热点[4] [5]。

近几年人们提出了许多形状小孔, 例如圆形[6]、矩形[7]、C形孔[8]、L形孔[9]、X形孔[10]等等, 这些小孔均能有效的提高光透过率。其中V形孔和L形孔结构非常的相似, 只是区别小孔的两个臂长是否相等, 有研究表明V形孔的性能要优于L形孔[11], 但对于V形孔的光学特性并没有进行具体的研究。

本文主要研究了V形孔阵结构银膜和铋掺杂钇铝石榴石(Bi:YIG)双层结构以及引入非磁性介电层(NDL)的三层结构模型的光学和磁光特性, 三层结构的透射光谱和法拉第旋转光谱的强度与双层结构相比显著增强, 在此基础上研究了介质层的折射率、厚度、孔阵周期对透射光和法拉第角的影响, 通过参数调控获取最佳探测波段, 该研究为磁光滤波器、磁光传感器等磁光器件的设计具有重要的指导意义。

2. 结构模型与计算方法

磁等离子激元结构模型如图1所示, 上层是带V形孔阵的银膜, 阵列呈二维方阵的排列方式, 阵列周期P分别取450 nm、475 nm、500 nm, 孔的臂长L固定为200 nm, 臂宽W固定在50 nm, 银膜的厚度h取值为50 nm; 最下层薄膜为铋掺杂石榴石(Bi:YIG), 其厚度t取值为100 nm; 在这两层薄膜中间引入了一层非磁性介电层(NDL), 其厚度d分别取值50 nm、75 nm和100 nm, 折射率n分别取值取值1.9、2.0和2.1。计算采用时域有限差分(FDTD)方法, 为了减少计算工作量, 采用一个周期性单元为模拟计算区域, 周期性边界条件在x轴和y轴方向分别采用布洛赫周期条件, 沿z轴方向采用完美匹配层, 以减少边界反射的影响。接收器放在远离模型850 nm处, 入射光采用平面波垂直照射, 偏振方向沿x轴方向(p偏振光

或 TM 偏振)。当 p 偏振光穿过磁光介质时, 由于磁性薄膜 Bi:YIG 中介电常数非对角元非零, 导致透射光的偏振面发生偏转, 电场将在 x 和 y 方向上分别产生 E_p 和 E_s 两种分量, 法拉第角或克尔角可用下式表示:

$$\tilde{\theta} = \arctan\left(\frac{\tilde{E}_s}{\tilde{E}_p}\right) = \theta + i\varepsilon$$

θ 代表法拉第角或克尔角, ε 代表椭圆率。

银薄膜的介电张量选择了 FDTD 数据库里(Johnson and Christy)模型的介电函数。当磁化方向沿着 z 轴方向即垂直表面磁化时, Bi:YIG 薄膜的介电张量可写为[12]:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & -ig & 0 \\ ig & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix},$$

其中 $\varepsilon = 5.5 + i0.0025$, $g = 0.01 - i0.015 \times 10^{-2}$ 。

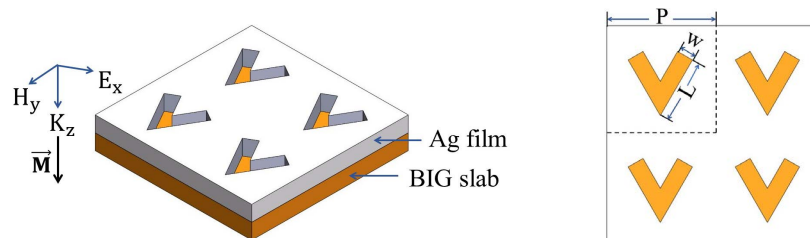


Figure 1. Structure diagram of double-layer heterogeneous membrane of periodic nanopore array

图 1. 周期纳米孔阵列的双层异质膜结构图

3. 计算结果及讨论

3.1. 双层结构 Ag/Bi:YIG 阵列周期对透射谱和法拉第角的影响

图 2 给出了 Ag/Bi:YIG 双层结构($L = 200$ nm, $W = 50$ nm, $h = 50$ nm, $t = 100$ nm)在三个周期 450 nm、475 nm、500 nm 下的透射谱和法拉第谱。计算发现, 在 800~1200 nm 的波段范围内, Ag/Bi:YIG 双层膜的透射谱中出现两个共振透射峰, 短波位置的峰透射率虽然比长波位置的透射率小, 但比较尖锐, 并且随着周期的增加峰值变大比较明显, 对调控器件的制备非常有利。长波位置的透射率较短波位置增大很多, 例如周期 450 nm 时透射率几乎达到 41.5%, 在周期增大占空比变小的情况下, 透射率的峰值几乎没有发生变化, 例如在周期 500 nm 时透射为 40.5%, 孔面积占比为 6.6%, 增强因子达到 6.14, 增强透射非常明显。此外, 随着周期的增加, 两个共振透射峰的位置都发生了红移, 这是由于等离激元的激发波长与周期存在以下关系[13]:

$$\lambda_{spp}(i, j) = \frac{P}{(i^2 + j^2)^{1/2}} \left(\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m}{\varepsilon_d + \varepsilon_m} \right)^{1/2}$$

其中, P 是阵列周期, i 和 j 是整数, 表示透射波的级次, ε_d 和 ε_m 分别表示介质和金属的介电常数。由公式看出, SPPs 的激发波长与周期成正比关系, 周期增大透射峰的位置就会向长波方向发生移动。穿孔膜的周期性允许入射光激发在银膜的两个表面上公认的表面等离子共振以及每个 V 形孔中的局部表面等离子共振(LSPR) [14]。因此, 周期性阵列增强透射可归因于银膜表面的表面等离激元极化子和孔内部的局部等离共振[12] [15]。

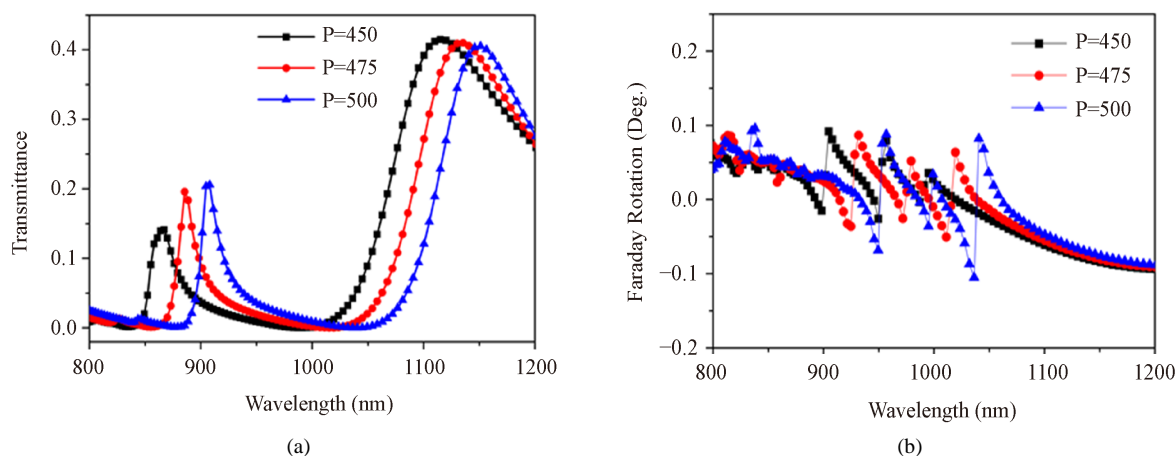


Figure 2. The double-layer structure Ag/Bi:YIG ($L = 200$ nm, $W = 50$ nm) at different periods P : (a) Transmission spectrum and (b) Faraday deflection angle

图 2. 双层结构 Ag/Bi:YIG ($L = 200$ nm, $W = 50$ nm)在不同周期 P 下的: (a) 透射谱和(b) 法拉第偏转角

由图 2(b)可以看出, 法拉第谱会出现明显的振荡, 在振荡中心位置会发生法拉第角符号的翻转, 这对磁光传感器的研制非常有利。磁光效应的产生是由于外界磁场导致 TM-TE 模式的相互转换, 也就是说法拉第偏转角会发生改变, 当 TM 和 TE 模式相速度相等的情况下, 法拉第偏转角才会达到最大[16]。此外, 随着周期的增大法拉第谱也会发生明显的红移, 同时会出现更多的震荡峰, 如周期为 500 nm 时, 透射峰的位置在 910 nm 和 1150 nm 位置处, 而法拉第震荡峰的位置在 960 nm、1000 nm 和 1050 nm 等三个位置, 这种位置的不一致性对同时获得较大透射率和法拉第角的获取非常有利, 因而可以通过调节阵列周期获得较大透射率和法拉第角。

3.2. 介质层的引入对透射谱和法拉第偏转角的影响

我们以双层结构为基础, 在银膜和 Bi:YIG 薄膜之间引入一个额外的非磁性介质层(NDL)构建三层结构的薄膜体系, NDL 的厚度 d 为 50 nm, 折射率为 2.0, 其它参数同二层结构完全相同, 探究介质层对透射率和法拉第的影响。

图 3 给出了三层结构不同阵列周期的透射谱和法拉第旋转谱。比较图 2(a)和图 3(a)发现, 三层结构的透射率在短波位置出现明显增强, 周期为 500 nm 的透射率超过了 55%, 与二层结构相比增强近 3 倍, 长波位置的透射率也由 40% 增大到 60%, 增强也非常明显。随着周期增大, 短波段的透射峰增大, 而长波段的透射峰值则变小, 表现出不同的变化规律。此外, 引入介质层后两个共振透射峰的位置相对于双层结构都向短波方向发生了移动, 两个波段的共振透射峰也变得更加尖锐, 对于带通滤波器的设计更为有利。图 3(b)给出了三种周期的法拉第谱, 在加入 NDL 层后其峰值也明显增大, 周期 500 nm 时的法拉第偏转角达到 0.2 度, 增强近 1 倍。三种周期的法拉第谱红移现象非常明显, 在振荡中心位置发生的法拉第翻转也显示出很强的规律性, 区分度改善很多。

3.3. 介质层折射率对透射谱和法拉第角的影响

下面我们研究 NDL 折射率对透射谱和法拉第谱的影响。以周期为 450 nm 的结构为例, 固定介质层的厚度为 50 nm, 介质的折射率 n 分别取 1.9、2.0 和 2.1。从图 4(a)可以看出, 两个共振透射峰出现红移, 同时这些峰的强度随 n 的增加而减小。对入射光的束缚由 NDL 层和 Bi:YIG 薄膜组成时, NDL 折射率的增加会使光程变长。图 4(b)给出了法拉第谱随 NDL 折射率的变化情况, 我们发现, 随着折射率的增加,

法拉第谱的共振峰也出现明显的红移,且振荡峰非常明显。透射光谱和法拉第旋转的变化对NDL的折射率都很敏感,因此可以通过调节NDL的折射率来选择最佳的探测波长,以便获得较大的透射率和法拉第角。

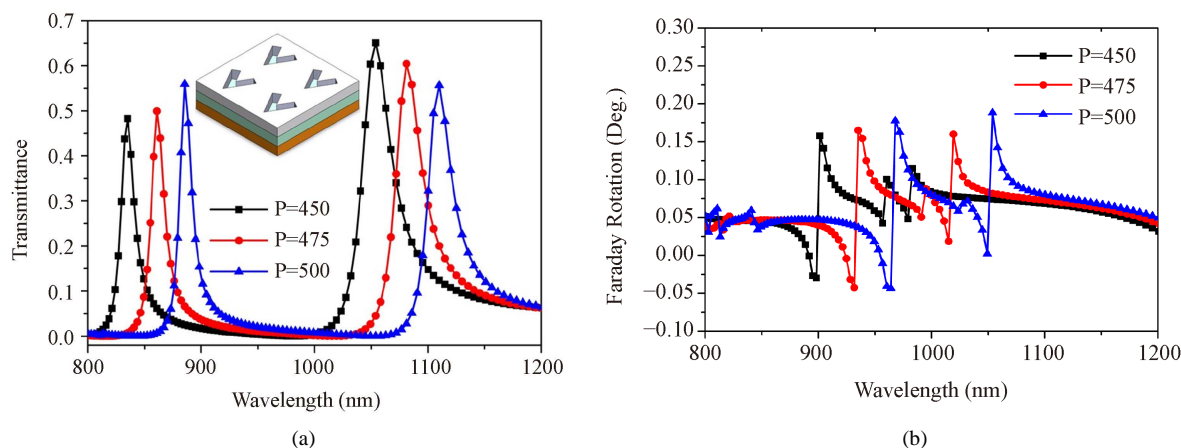


Figure 3. The three-layer structure Ag/NDL/Bi:YIG ($L = 200$ nm, $W = 50$ nm) at different periods P : (a) Transmission spectrum and (b) Faraday deflection angle

图 3. 三层结构 Ag /NDL/Bi:YIG ($L = 200$ nm, $W = 50$ nm)在不同周期 P 下的: (a) 透射谱和(b) 法拉第偏转角

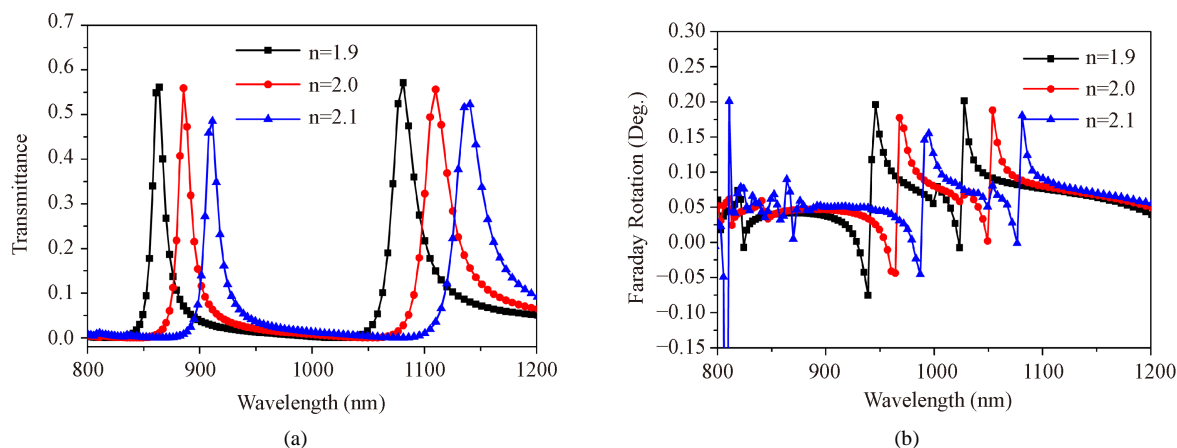


Figure 4. Under the condition of period $P = 500$ nm and NDL thickness $d = 50$ nm, the size of NDL refractive index (n) is changed. (a) Transmission spectrum; (b) Faraday deflection angle

图 4. 在周期 $P = 500$ nm、NDL 厚度 $d = 50$ nm 条件下, 改变 NDL 折射率(n)的大小。(a) 透射谱; (b) 法拉第偏转角

3.4. 介质层厚度对透射光和法拉第偏转角的影响

接下来,我们固定阵列周期为 500 nm,介质层折射率 n 取值 2.0,研究 NDL 的厚度 d 对透射谱和法拉第光谱的影响。由图 5(a)发现,NDL 厚度在 50 nm 和 75 nm 时,透射谱和法拉第谱区别不大,厚度增加到 100 nm 时,红移现象比较明显,此外当厚度增大到 75 nm 和 100 nm 时,在短波长位置处还出现了新的透射峰。由图 5(b)看出,每个法拉第谱在计算波段内都有四个明显的共振区域,随着周期增大,与透射谱类似,法拉第谱也出现明显的红移现象。比较发现,透射谱中新增的共振峰,相应的法拉第谱中新增了一个共振区。当 NDL 的厚度发生改变时,透射光谱和法拉第角发生了明显变化,所以 NDL 厚度对于有效的 TM-TE 模式转换非常重要[17]。因此,选择合适的介电膜厚度可以获得增强的法拉第效应和高的透射率。

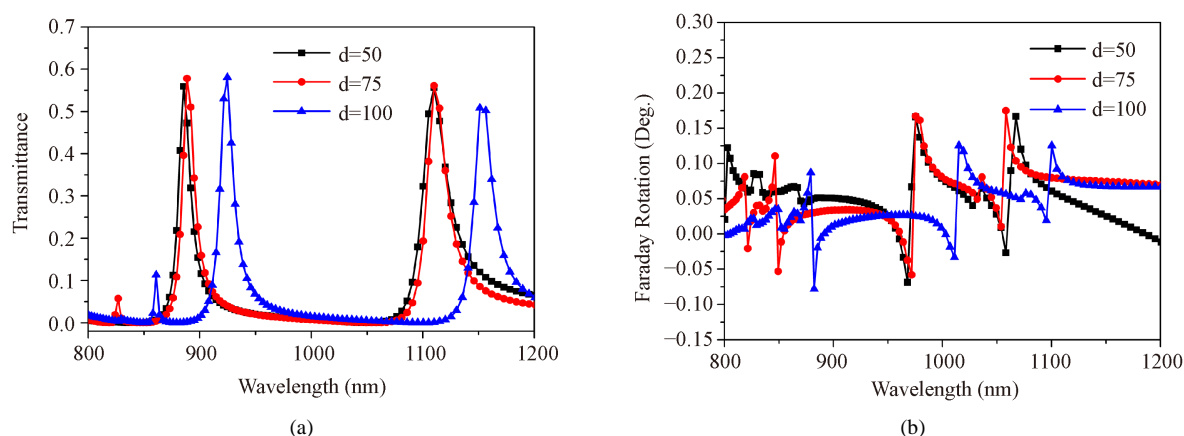


Figure 5. Under the condition of period $P = 500$ nm and NDL refractive index $n = 2$, change the thickness (d) of NDL. (a) Transmission spectrum; (b) Faraday deflection angle

图 5. 在周期 $P = 500$ nm、NDL 折射率 $n = 2$ 条件下，改变 NDL 的厚度(d)的大小。(a) 透射谱；(b) 法拉第偏转角

4. 总结

本文利用时域有限差分法研究 V 形孔阵结构银膜和铋掺杂钇铝石榴石双层结构以及引入非磁性介电层(NDL)的三层结构的光学和磁光特性。模拟结果表明引入 NDL 对入射光和法拉第偏转角有极大地增强作用，这是表面等离子效应和波导效应共同作用的结果。本文分析了小孔的周期、介质层的折射率和厚度等因素对光透射和法拉第的影响，对 V 形孔在纳米对磁光传感器、隔离器等磁等离子体领域具有一定的指导意义。

基金项目

山东省高等学校科技计划项目(J18KB102)，国家级大学生创新创业训练计划项目(201910452030)。

参考文献

- [1] Matsumoto, A., Ikeda, S., Harada, A. and Kataoka, K. (2003) Glucose Responsive Polymer Bearing a Novel Phenyl Borate Derivative as a Glucose-Sensing Moiety Operating at Physiological pH Conditions. *Biomacromolecules*, **4**, 1410-1416. <https://doi.org/10.1021/bm034139o>
- [2] Li, L., Jiang, G., Du, X., Chen, H., Liu, Y., Huang, Q., Kong, X. and Yao, J. (2015) Preparation of Glucose-Responsive and Fluorescent Micelles via a Combination of Raft Polymerization and Chemoenzymatic Transesterification for Controlled Release of Insulin. *RSC Advances*, **5**, 75766-75772. <https://doi.org/10.1039/C5RA15281J>
- [3] Jiang, G., Jiang, T., Chen, H., Li, L., Liu, Y., Zhou, H., Feng, Y. and Zhou, J. (2015) Preparation of Multi-Responsive Micelles for Controlled Release of Insulin. *Colloid and Polymer Science*, **293**, 209-215. <https://doi.org/10.1007/s00396-014-3394-6>
- [4] Temnov, V.V. (2012) Ultrafast Acousto-Magneto-Plasmonics. *Nature Photonics*, **6**, 728-736. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.220>
- [5] Bant, J.C., Meneses-Rodríguez, D., Garcia, F., Gonzalez, M.U., Garcia-Martin, A., Cebollada, A. and Armelles, G. (2012) High Magneto-Optical Activity and Low Optical Losses in Metal-Dielectric Au/Co/Au-SiO₂ Magneto Plasmonic Nano Disks. *Advanced Materials*, **24**, OP36-OP41. <https://doi.org/10.1002/adma.201103634>
- [6] Lomakin, V. and Michielssen, E. (2005) Enhanced Transmission through Metallic Plates Perforated by Arrays of Sub-wavelength Holes and Sandwiched between Dielectric Slabs. *Physical Review B*, **71**, Article ID: 235117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.235117>
- [7] van der Molen, K.L., Segerink, F.B. and Hulst, N.F.V. (2004) Influence of Hole Size on the Extraordinary Transmission through Subwavelength Hole Arrays. *Applied Physics Letters*, **85**, 4316-4318. <https://doi.org/10.1063/1.1815379>
- [8] Shi, X.L., Thornton, R.L., et al. (2002) A Nano-Aperture with 1000 \times Power Throughput Enhancement for Very Small Aperture Laser System (VSAL). *Proceedings of SPIE*, **4342**, 320-326. <https://doi.org/10.1117/12.453378>

-
- [9] Xu, J.Y., Xu, T.J., *et al.* (2005) Design Tips of Nanoapertures with Strong Field Enhancement and Proposal of Novel L-Shaped Aperture. *Optical Engineering*, **44**, Article ID: 0018001. <https://doi.org/10.1117/1.1825446>
- [10] Wang, Y.K., Qin, Y. and Zhang, Z.Y. (2014) Extraordinary Optical Transmission Property of X-Shaped Plasmonic Nanohole Arrays. *Plasmonics*, **9**, 203-207. <https://doi.org/10.1007/s11468-013-9613-z>
- [11] 王国军, 吴世法, 李旭峰, 徐晨彪, 潘石. 在 A-SNOM 中 L-V 形纳米小孔的优化设计[J]. 电子显微学报, 2009, 28(2): 122-126.
- [12] Belotelov, V.I., Doskolovich, L.L. and Zvezdin, A.K. (2007) Extraordinary Magneto-Optical Effects and Transmission through Metal-Dielectric Plasmonic Systems. *Physical Review Letters*, **98**, Article ID: 077401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.077401>
- [13] Kofke, M.J., Waldeck, D.H., Fakhraai, Z., Ip, S. and Walker, G.C. (2009) The Effect of Periodicity on the Extraordinary Optical Transmission of Annular Aperture Arrays. *Applied Physics Letters*, **94**, Article ID: 023104. <https://doi.org/10.1063/1.3067835>
- [14] Wu, S., Wang, J., Yin, X.G., Li, J.Q., Zhu, D., Liu, S.Q. and Zhu, Y.Y. (2009) Enhanced Optical Transmission: Role of the Localized Surface Plasmon. *Applied Physics Letters*, **94**, Article ID: 023101.
- [15] Kreilkamp, L.E., Belotelov, V.I., Chin, J.Y., Neutzner, S., Dregely, D., Wehlius, T., Akimov, I.A., Bayer, M., Stritzker, B. and Giessen, H. (2013) Waveguide-Plasmon Polaritons Enhance Transverse Magneto-Optical Kerr Effect. *Physical Review X*, **3**, Article ID: 041019. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.3.041019>
- [16] van der Molen, K.L., Koerkamp, K.K., Enoch, S., Segerink, F.B., van Hulst, N.F. and Kuipers, L. (2005) Role of Shape and Localized Resonances in Extraordinary Transmission through Periodic Arrays of Subwavelength Holes: Experiment and Theory. *Physical Review B*, **72**, Article ID: 045421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.045421>
- [17] Belotelov, V.I., Doskolovich, L.L. and Zvezdin, A.K. (2007) Extraordinary Magneto-Optical Effects and Transmission through Metal-Dielectric Plasmonic Systems. *Physical Review Letters*, **98**, Article ID: 077401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.077401>