

两种亚波长金属波片的透射特性对比

陈娟 闫连山 潘炜 罗斌 郭振

(西南交通大学信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)

摘要 综合等效介质理论和表面等离子激元(SPP)Bloch 模型,对比分析了两种新的亚波长光栅结构:二维矩形金属光栅和二维椭圆柱金属光栅。利用时域有限差分(FDTD)算法,对比分析了两种结构的透射率及其相位延迟与入射光波长及偏振角变化的关系,尤其两种结构实现 $\lambda/4$ 波片功能所对应的透射特性。仿真结果表明,当入射光偏振角为 75° 时,两种结构均可实现 $\lambda/4$ 波片功能,此时二维矩形和椭圆柱金属光栅的透射率分别为 0.77 和 0.67,表明二维矩形金属光栅比椭圆柱光栅具有更好的透射效果。对应 550~800 nm 的入射波长,两种光栅在各自允许的入射偏振角范围内均表现了较为平坦的宽带透射特性。

关键词 表面等离子体亚波长光学;双折射效应;二维金属光栅;波片

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0405001

Comparison of Transmission Properties of Two Kinds of Subwavelength Metallic Wave Plates

Chen Juan Yan Lianshan Pan Wei Luo Bin Guo Zhen

(Center for Information Photonics and Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract Based on the equivalent medium theory and surface-plasmon-polariton (SPP) Bloch model, two kinds of novel metallic waveplates are analyzed: two-dimensional rectangular metallic grating and elliptical cylinder metallic grating. First, utilizing the finite-difference-time-domain (FDTD) method, we analyze the relation between characteristics of both waveplates in terms of the transmittance and phase retardation and parameters of the incident light in terms of the wavelength and polarization angle, especially transmission properties of both gratings functioning as quarter-wave plates. Simulation results show that both structures can act as quarter-wave plates when the input polarization angle is 75° . The corresponding transmittances of rectangular and elliptical cylinder gratings are 0.77 and 0.67, respectively. In addition, both gratings exhibit relatively flat transmission spectra within the wavelength range from 550 nm to 800 nm in the presence of different input polarization angles.

Key words surface plasmon subwavelength optics; birefringence effect; two-dimensional metallic grating; wave plates

OCIS codes 050.2065; 240.5445; 240.6680; 090.1970

1 引言

光栅作为常用的光学元件,主要有色散、分束、偏振和相位匹配 4 个基本功能。亚波长一维金属光栅因其具有结构紧凑、易集成、偏振特性好、光谱较宽、透射率和消光比高等特点,已被广泛应用于各种

领域中,如光逻辑功能器件^[1]、传感器^[2]、亚波长波导^[3,4]、滤波片^[5]、光探测器^[6]和偏振分束器^[7]等。目前对二维结构光栅的研究大多局限于二维正方形孔、圆孔阵列的透射研究,而对于二维浮雕性柱状结构的研究相对较少。本文基于一维金属光栅只有

收稿日期: 2011-09-19; 收到修改稿日期: 2011-10-28

基金项目: 国家 973 计划(2011CB301803)和教育部新世纪优秀人才项目(NCET-08-0821)资助课题。

作者简介: 陈娟(1986—),女,硕士研究生,主要从事表面等离子体偏振控制方面的研究。E-mail: guoqiao0722110@163.com

导师简介: 闫连山(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事光子学与通信、光纤传感与检测等方面的研究。

E-mail: lianshanyan@gmail.com(通信联系人)

TM波可以实现大部分透射的物理现象,提出了两种二维金属光栅,即二维亚波长矩形和椭圆柱光栅结构,使得任意线偏振入射光均可实现大部分透射。由于二维矩形金属光栅^[8,9]具有形式双折射效应,可等效为均匀单轴正晶膜层,通过调整光栅在两个方向上的占空比,可以使光栅层获得介于光栅槽和光栅脊之间任何大小的有效折射率,使膜层的设计更加灵活,从而可以克服光学介质薄膜设计时受膜层材料折射率限制的缺陷。亚波长光栅对加工工艺要求较高,与不同占空比要求的二维矩形金属光栅相比,二维椭圆柱金属光栅在加工精度上要求相对较低。

本文采用文献[10]中提到的等效介质理论和薄膜光学的抗反射设计方法,设计了工作波长 $\lambda_0 = 0.55 \mu\text{m}$ 的二维亚波长矩形金属光栅,给出了二维矩形金属光栅的最佳优化设计参数。同时根据Sarrazin等^[11,12]研究的二维椭圆孔阵列设计了工作波长为 $\lambda_0 = 0.6 \mu\text{m}$ 的二维椭圆柱金属光栅结构。由于这两种金属光栅的结构参数是经过优化得到的,因此主要对比分析入射波长和入射偏振角等参数变化对两种金属光栅结构透射特性的影响。

2 两种结构模型对比与原理分析

波长为 $0.55 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 的激光广泛应用于数据存储、光纤通信、激光陀螺和光学传感等领域。当入射光照射到金属表面上时,光子和金属表面激发电子的相互作用产生了表面等离子效应。光子和表

面等离子体的耦合与传输取决于入射光的频率、激发的波矢和入射电磁场的偏振态。其中入射光的偏振态决定了与周期相关的 Brillouin 区域在不同方向上表面等离子激元(SPP)的激发和传播。

2.1 二维矩形金属光栅的等效介质理论

亚波长金属光栅是指光栅周期远小于入射光波长($\Lambda \ll \lambda_0$),此时光栅衍射效率相对稳定,且只存在零级衍射传播波,其余级次均为不携带能量的倏逝波。对于二维亚波长矩形金属光栅,其结构模型如图1所示, Λ 为二维矩形金属光栅两个方向上的周期, a_x 、 a_y 为光栅脊宽度。光栅区包含了光栅脊和光栅槽两种介质的周期分布,折射率分别为 n_r 和 n_g 。亚波长二维矩形金属光栅的优化设计参数参考文献[8,9]:周期 $\Lambda = 0.12 \mu\text{m}$,铝金属(介电常数 $\epsilon = -43.83 + i12.81$)光栅刻槽深度(金属层厚度)为 $0.14 \mu\text{m}$,占空比 $f_x = a_x/\Lambda = 0.90$, $f_y = a_y/\Lambda = 0.66$,入射光波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 。根据等效介质理论,对于某一线偏振态,二维矩形金属光栅可以等效为栅条方向分别沿 y 轴和 x 轴方向的一维光栅,其等效折射率为^[13]

$$\begin{cases} n'_{\text{TM}} = [f_x n_{\text{TE}}^2 + (1 - f_x) n_g^2]^{1/2} \\ n'_{\text{TE}} = [f_y n_{\text{TM}}^2 + (1 - f_y) n_g^{-2}]^{-1/2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $n_{\text{TM}} = [f n_r^2 + (1 - f) n_g^2]^{1/2}$, $n_{\text{TE}} = [f n_r^{-2} + (1 - f) n_g^{-2}]^{-1/2}$ 则分别为一维光栅的等效折射率, f 为占空比($f = a/\Lambda$)。通过调整光栅两个方向上的占空比和材料折射率等参数,可以控制入射光的传播及其相移。

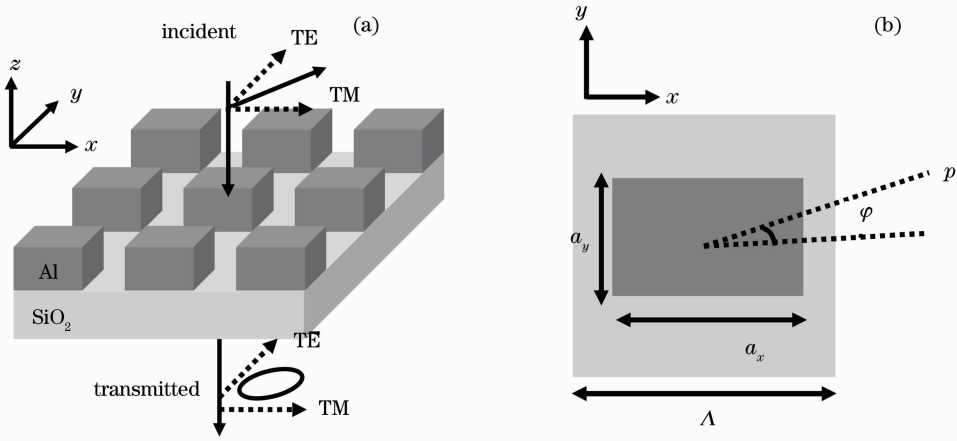


图1 二维矩形金属光栅结构模型

Fig. 1 Schematic view of two-dimensional rectangular metallic grating

2.2 二维椭圆柱金属光栅的理论模型

研究入射光波长和偏振角分别对周期性二维椭圆纳米柱金属膜透射特性的影响,图2为二维周期

性椭圆柱金属光栅结构。椭圆柱金属光栅分布方向为:椭圆柱主轴的长轴方向与 x 轴方向夹角为 30° ,椭圆柱 z 轴方向与坐标 z 轴方向平行。椭圆柱光栅在 x 、 y

轴两个方向上的周期均为 $\Lambda = 0.108 \mu\text{m}$, 其中椭圆柱金属光栅沿主轴 (ξ, η) 半径长分别为 $0.07 \mu\text{m}$ 和

$0.02 \mu\text{m}$, 金属铝膜(介电常数 $\epsilon = -51.27 + i17.42$) 厚度为 $0.135 \mu\text{m}$ 。

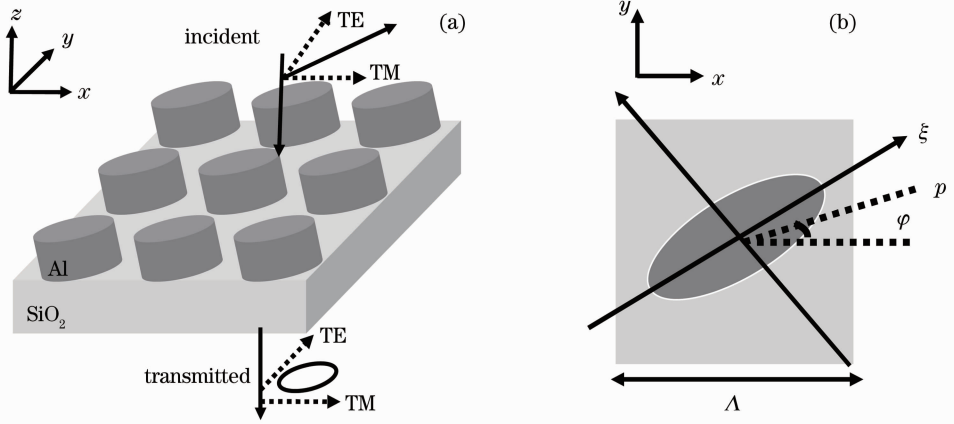


图 2 二维椭圆柱金属光栅结构模型

Fig. 2 Schematic view of two-dimensional elliptical cylinder metallic grating

周期结构表面的 SPP 电场分布为^[12]

$$E_{\text{sp}}(x, y) = U_{k_{\text{sp}}}(\xi, \eta) \exp\{i[k_{\text{sp}}^{(x)}x + k_{\text{sp}}^{(y)}y]\}, \quad (2)$$

式中 $U_{k_{\text{sp}}}(\xi, \eta)$ 包含阵列的周期和 SPP Bloch 函数, k_{sp} 是 Bloch 波的波矢量。基于对称性考虑, 坐标轴 (ξ, η) 和 (x, y) 是相互独立的。在垂直入射的情况下, 周期结构的金属表面 SPP 波矢量为

$$k_{\text{sp}} = \pm p \frac{2\pi}{D} \mathbf{u}_x \pm q \frac{2\pi}{D} \mathbf{u}_y, \quad (3)$$

式中 \mathbf{u}_x 和 \mathbf{u}_y 为周期结构的单元格矢量, D 为周期(假定 x 和 y 轴方向上的周期相等), p 和 q 对应 SPP Brillouin 区域不同方向上相应的整数。在垂直入射情况下, 如果入射光电场在 SPP 传播方向上有分量, 即有 $Ek_{\text{sp}} \neq 0$, 则不同方向上的耦合效应正比于 $|p \sin \varphi + q \cos \varphi|$, 其中 φ 为入射偏振光与 x 轴的夹角。

3 仿真与分析

利用时域有限差分(FDTD)算法进行了仿真分析, 主要参数采用了第 2 节中提到的两种金属光栅的优化结果, 对比分析了二维矩形金属光栅和二维椭圆柱金属光栅在不同情况下的透射特性。

3.1 两种光栅透射率和相位延迟与入射光偏振角的关系

仿真了入射光分别通过二维矩形金属光栅(入射光波长为 550 nm)与二维椭圆柱金属光栅(入射光波长为 600 nm)结构后透射光的相位延迟与透射率。图 3(a), (b) 分别表示了二维矩形金属光栅和椭圆柱金属光栅的透射率和相位延迟与入射光偏振角之间的关系。对于二维矩形金属光栅结构, 当偏振角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内变化时, 其透射率变化呈正弦趋势, 在 90° 偏振角时透射率达到最大。由于双

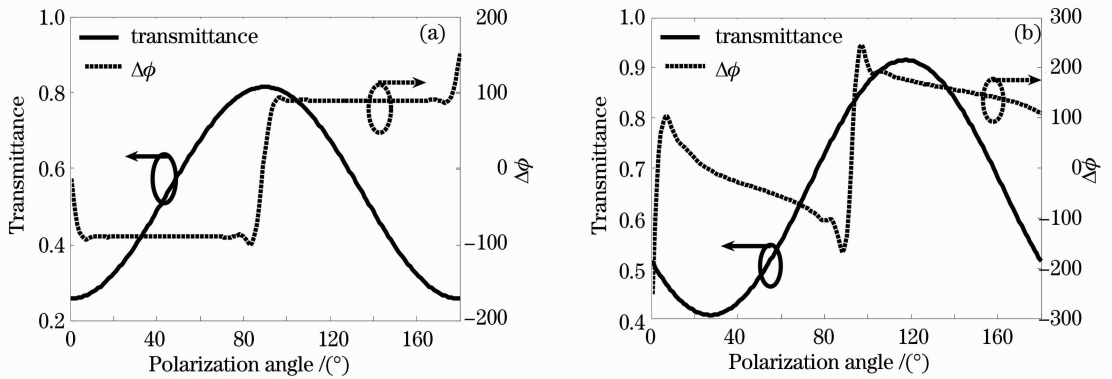


图 3 (a)二维矩形金属光栅和(b)二维椭圆柱金属光栅结构透射率与相位延迟随着入射光偏振角变化的关系
Fig. 3 Transmittance and phase retardation versus input polarization angle for two-dimensional (a) rectangular and (b) elliptical cylinder metallic gratings

折射的原因,入射光偏振角的变化不会影响透射光的相位差,因此相位差的绝对值基本保持 90° 不变。而对于二维椭圆柱金属光栅结构,对应 5° 和 75° 的偏振入射角分别产生了 90° 和 -90° 相位差,此时相应的透射率分别为 0.48 和 0.67。

从图 3 可以看出,当入射光偏振角在一定范围内时,两种光栅结构的透射光相位延迟对偏振角变化比较敏感。当偏振角为 75° 时,两种光栅结构均可实现常用的偏振器件之一,即 $\lambda/4$ 波片(对应 -90° 相位差)的功能。

3.2 两种光栅透射谱的对比

一般来讲,光子器件的宽谱特性对不少应用来讲较为重要。图 4 进一步讨论了对应于可以实现

$\lambda/4$ 波片功能的情况下(入射光偏振角 75°),这两种光栅透射率和相位差随着入射光波长的变化关系。从图 4 可以看出,两种金属光栅在入射波长为 $550\sim 800$ nm 时,均可达到平坦透射的效果。从图 4(a) 可以看出二维矩形光栅的透射率范围在 $0.66\sim 0.79$ 之间,对应相位差范围在 $-33^\circ\sim -120^\circ$ 之间;从图 4(b) 可以看出二维椭圆柱金属光栅的透射率范围在 $0.60\sim 0.72$ 之间,而对应相位差范围则在 $-80^\circ\sim -120^\circ$ 之间。两种金属光栅结构在入射光波长范围内均达到了透射峰值,所对应的峰值透射率分别为 0.79(二维矩形)和 0.72(二维椭圆柱),实现了透射增强效果。

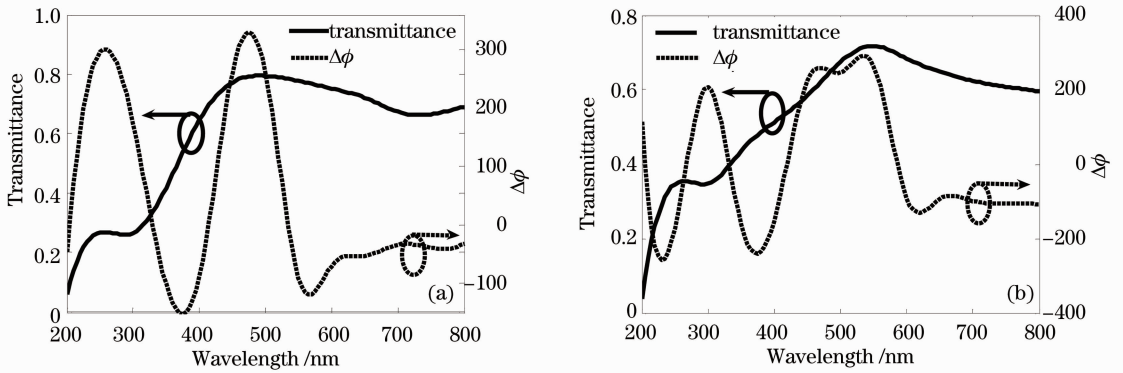


图 4 (a)二维矩形金属光栅和(b)二维椭圆柱金属光栅结构时透射率与相位延迟随着入射光波长变化的关系
Fig. 4 Transmittance and phase retardation versus incident wavelength for two-dimensional (a) rectangular and (b) elliptical cylinder metallic gratings

图 5 进一步仿真了对于不同的入射光偏振角,二维矩形金属光栅[图 5(a)]与二维椭圆柱金属光栅[图 5(b)]透射谱的变化情况。由于两种光栅在两个方向上的结构对称性,将二维矩形金属光栅入射光偏振角变化范围设在 $15^\circ\sim 95^\circ$ 之间,而对于二维椭圆柱金属光栅,其入射光偏振角变化范围设在

$35^\circ\sim 135^\circ$ 之间(此处将椭圆柱金属光栅结构的长主轴方向设定为与 x 方向的夹角为 30°)。对比图 5(a)和图 5(b)可以得出,随着入射光偏振角的增大(如 $65^\circ\sim 95^\circ$ 之间),二维矩形金属光栅的透射谱峰值出现蓝移且逐渐趋于平坦。对二维椭圆柱金属光栅来说,当偏振角逐渐增大时(如 $85^\circ\sim 135^\circ$ 之

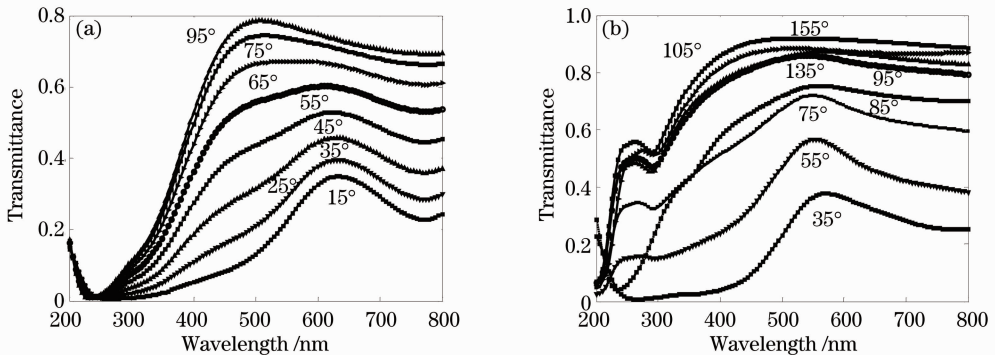


图 5 (a)二维矩形金属光栅和(b)二维椭圆柱金属光栅结构的透射谱随入射光偏振角的变化趋势
Fig. 5 Transmittance spectra at different input polarization angles for two-dimensional (a) rectangular and (b) elliptical cylinder metallic gratings

间),在 550~800 nm 范围内也可以保持较高的平坦透射。

4 结 论

综合等效介质理论和简单的 SPP Bloch 模型,给出了二维矩形金属光栅和二维椭圆柱金属光栅的优化设计参数,结合 FDTD 算法,仿真对比了这两种结构在实现 $\lambda/4$ 波片时透射率的大小。仿真结果表明,固定结构参数的二维矩形金属光栅在入射光波长为 550 nm 时,透射光相位差对偏振角变化不敏感,可以实现 $\lambda/4$ 波片功能。而二维椭圆柱金属光栅在入射光(波长为 600 nm)偏振角为 5° 和 75° 时可以实现 $\lambda/4$ 波片功能。对应 75° 偏振角入射情况,二维矩形金属光栅和二维椭圆柱金属光栅结构的透射率分别为 0.77 和 0.67,可见二维矩形金属光栅比二维椭圆柱金属光栅具有更高的透射率。本文同时还对比了二维矩形金属光栅与二维椭圆柱金属光栅在不同入射光偏振角时透射率随着波长的变化关系,仿真得出两种金属光栅随着入射光偏振角的增大,在入射波段 550~800 nm 范围内均可以实现较为平坦的透射。

参 考 文 献

- 1 C. J. Min, P. Wang, C. C. Chen *et al.*. All-optical switching in subwavelength metallic grating structure containing nonlinear optical materials [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(8): 869~871
- 2 G. Della Valle, T. Søndergaard, S. I. Bozhevolnyi. High-Q plasmonic resonators based on metal split nanocylinders [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **80**(23): 235405
- 3 P. Berini, R. Charbonneau, S. Jetté-Charbonneau *et al.*. Long-range surface plasmon-polariton waveguides and devices in lithium niobate [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(11): 113114

- 4 G. Veronis, S. H. Fan. Guided subwavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3359~3361
- 5 Zhou Yun, Ye Yan, Shen Shuo *et al.*. Research on the characteristics of sub-wavelength grating color filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0123003
周云,叶燕,申溯等.亚波长光栅结构彩色滤波片的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0123003
- 6 Yang Yisu, Huang Yongqing, Huang Hui *et al.*. Design of photodetector with subwavelength grating structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2351~2357
杨一粟,黄永清,黄辉等.一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2351~2357
- 7 Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Research on sub-wavelength grating polarizing beam splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2690~2694
郭楚才,叶卫民,袁晓东等.亚波长光栅偏振分束器的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2690~2694
- 8 Hengyi Li, Xianggang Luo, Lianshan Yan *et al.*. Polarization and transmission properties through metamaterial-based three-dimensional plasmonic structure [J]. *IEEE Photon. J.*, 2011, **3**(3): 400~406
- 9 Chen Juan, Yan Lianshan, Pan Wei *et al.*. Arbitrary polarization transformation based on two-dimensional metallic rectangular gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1224001
陈娟,闫连山,潘炜等.二维金属矩形光栅的偏振控制及其透射特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1224001
- 10 H. J. Zhao, S. L. Yang, D. Zhang *et al.*. Design of polarizing beam splitters based on subwavelength metal grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6236~6241
赵华君,杨守良,张东等.亚波长金属偏振分束光栅设计分析[J]. *物理学报*, 2009, **58**(9): 6236~6241
- 11 R. Gordon, A. G. Brolo, A. McKinnon *et al.*. Strong polarization in the optical transmission through elliptical nanohole arrays [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(3): 0374011
- 12 J. Elliott, I. I. Smolyaninov, N. I. Zheludev *et al.*. Polarization control of optical transmission of a periodic array of elliptical nanoholes in a metal film [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1414~1416
- 13 J. Y. Wan, T. Konishi, T. Hamamoto *et al.*. Polarization-multiplexed diffractive optical elements fabricated by subwavelength structures [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(1): 96~100

栏目编辑:李文喆