

二维金属矩形光栅的偏振控制及其透射特性

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 基于一维亚波长金属光栅结构的双折射效应,将等效介质理论(EMT)推广到二维亚波长结构,对一种特定的金属矩形光栅结构进行了分析,实现输入线偏振到输出任意偏振态的控制。利用时域有限差分(FDTD)算法对输出光偏振态及其透射特性进行了仿真。仿真结果表明:通过空间角调制的方法,得到输出光的偏振态理论上可实现全庞加莱球覆盖,并具有较高的透射率。

关键词 表面等离子体亚波长光学;偏振态转换;双折射效应;二维金属矩形光栅;高透射率

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1224001

Arbitrary Polarization Transformation Based on Two-Dimensional Metallic Rectangular Gratings

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 birefringence effect of one-dimensional subwavelength metallic grating and equivalent medium theory (EMT) is generalize to a two-dimensional subwavelength structure to analyze a two-dimensional metallic rectangular gratings in order to realize the control of polarized state from incident linear polarization to output arbitrary polarized state transformation. Finite difference time domain (FDTD) algorithm is performed to analyze properties of polarization and transmittance of the light. Simulation results show that the full Poincaré sphere coverage could be obtained theoretically by space angle modulation, and the high transmittance can be achieved as well.

Key words metallic surface plasmon subwavelength optics; polarization transformation; birefringence effect; two-dimensional metallic rectangular gratings; high transmittance

OCIS codes 240.5445; 240.6680; 050.2065; 090.1970

1 引言

偏振控制作为光网络和光信息系统的关键技术之一,可以广泛地应用在光纤通信、光互联、数据存储和成像等领域。对光偏振态转换和偏振态的描述是偏振光学的重要研究内容^[1,2]。近年来人们越来越关注金属纳米栅条模型的设计及对其特性的研究^[3,4]。其中亚波长一维金属光栅结构因其具有结构紧凑、易集成、偏振特性好、光谱较宽、透射率和消光比较高等特点,已被广泛应用于抗反射^[5]、亚波长波导^[6,7]、滤波片^[8]和光探测器^[9]等领域,而利用亚波长纳米工艺技术制作的表面等离子体偏振(SPP)

器件也引起了人们的研究兴趣。例如,在纳米缝线格偏振器基础上研究的高消光比偏振分束器^[10,11],基于亚波长椭圆纳米孔阵列的可控偏振态传输^[12,13]等。其中一维亚波长偏振分束器只对 TM 波具有较高的透射率,无法实现对任意输入偏振态的透射。亚波长椭圆纳米孔阵列与一维亚波长光栅结构相比,可以使 TE 波实现透射。

鉴于一维金属光栅在偏振控制方面的局限性,本文在一维光栅的基础上,采用文献[14]中提到的等效介质理论(EMT)和薄膜光学的抗反射设计方法,并参考文献[15]给出的二维矩形光栅的最佳优

收稿日期: 2011-06-13; 收到修改稿日期: 2011-07-23

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

作者简介: 陈娟(1986—),女,硕士,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)

化设计参数,如矩形光栅周期、刻槽深度、入射波长和入射角等,建立了二维亚波长金属矩形光栅偏振控制模型。这种矩形光栅可以使得 TE 与 TM 偏振入射波在理论上均可实现较高透射。二维亚波长金属光栅的偏振透射机理源于一维金属光栅,为了讨论方便,将空间角中偏振角的电场矢量分别映射到 x 轴方向与 y 轴方向,将斜入射光分解成 z 轴方向和垂直于 z 轴方向的分量(其中垂直于 z 轴方向的分量可以忽略)。通过空间角调制的方法对输出偏振态变化进行了研究,实现了由线偏振态到任意偏振态的转换。

2 偏振产生原理及其结构

2.1 一维金属光栅偏振效应

图 1 为一维金属光栅,其中 E_{inc} 为入射光电场强度矢量, θ 为斜入射角度, φ 为偏振角(其中 0° 代表 TE 波,即光波电矢量平行于金属光栅刻槽方向; 90° 代表 TM 波,即光波电矢量垂直于金属光栅刻槽方向)。由于金属表面电子在 TE 偏振作用下沿栅条自由振荡,使 TE 偏振的电磁波反射,因此光栅层对 TE 偏振波等效为金属膜; TM 偏振入射时,电子振荡受阻,因此 TM 偏振光能够透过光栅层,光栅层对 TM 偏振波等效为介质膜。如图 2 为当入射光波长 $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$, 栅条周期 $P = 120 \text{ nm}$, 栅条占空比 $f = W/P = 0.6$ 时,一维金属光栅对 TM 波与 TE 波的透射率。

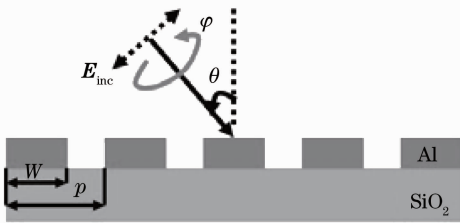


图 1 亚波长金属光栅结构模型图

Fig. 1 Schematic view of subwavelength metallic grating

光在金属表面会发生双折射,使光的传播方向和折射率出现“反常”。因此可将一维亚波长金属光栅等效为一个双折射膜,通过调整光栅的占空比,理论上可以使光栅层具有介于光栅槽和光栅脊之间的任意有效折射率。当亚波长金属光栅的周期小于入射光的波长时,光栅衍射效率相对稳定,且只存在零级衍射,其余级次均为不携带能量的倏逝波。根据麦克斯韦方程的边界条件,可以得出不同偏振态的光(TM 波和 TE 波)在光栅界面上的等效折射

率^[16]:

$$\begin{cases} n_{TM} = [fn_r^2 + (1-f)n_g^2]^{1/2} \\ n_{TE} = [fn_r^{-2} + (1-f)n_g^{-2}]^{-1/2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 n_{TM} 为 TM 偏振光的折射率; n_{TE} 为 TE 偏振光的折射率; n_r 为光栅脊折射率; n_g 为光栅槽折射率, $f = W/P$ 为光栅的占空比; W 为金属光栅脊宽度; P 为光栅周期。由(1)式可见,由于 TE 偏振和 TM 偏振在波光栅区具有不同的膜层特性,不同的有效折射率,并且产生形式双折射效应,因此亚波长金属光栅表现出明显的偏振性能^[17,18]。通过调整光栅 x 轴方向上的占空比,材料的折射率等参数,可以控制入射光的传播及其相移。

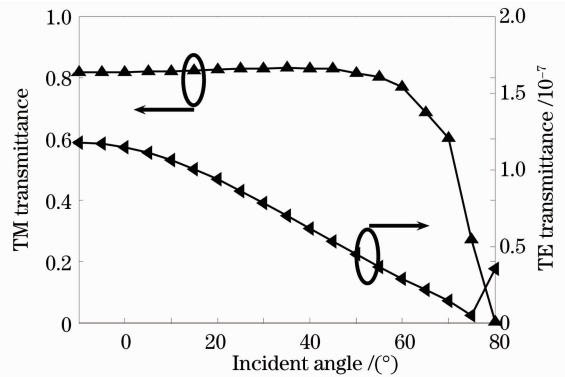


图 2 TM 光波与 TE 光波随着斜入射角度变化的透射率
Fig. 2 Transmittance of TM and TE wave versus incident angles

2.2 二维金属矩形光栅偏振效应

为了使入射光在 TE 和 TM 偏振态下同时具有较高的透射率,在一维金属光栅的理论基础上根据矩形结构在两个方向上的对称性,设计了周期性亚波长二维矩形光栅模型,如图 3 所示。研究了当入射光为线偏振光时,其通过二维金属矩形光栅的偏振和透射特性。

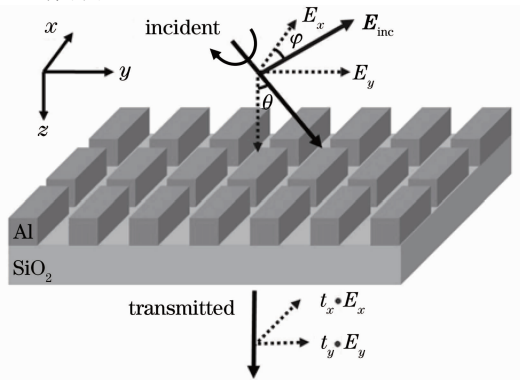


图 3 二维金属矩形光栅结构模型

Fig. 3 Schematic view of two-dimensional metallic rectangular gratings

图3中入射光为线偏振光, θ 为光传播方向与 z 轴的夹角, 偏振角 φ 为入射光电场矢量 \mathbf{E}_{inc} 在 oxy 面上的投影与 x 轴的夹角, t_x 和 t_y 分别为入射光偏振分量沿 x 轴和 y 轴方向的透射系数。设入射光沿 x 轴方向偏振为 TE 波, 沿 y 轴方向偏振为 TM 波。当旋转角变化时, 偏振角与斜入射角同时围绕 z 轴方向旋转变化。亚波长二维金属矩形光栅结构设计参考文献[15]中的参数, 其中光栅周期 $P = 120 \text{ nm}$, x 轴方向上占空比为 $f_x = W_x/P = 0.9$, y 轴方向上占空比为 $f_y = W_y/P = 0.55$, 金属 Al 光栅刻槽深度为 140 nm , 衬底 SiO_2 折射率 $n_s = 1.4$, 入射光(幅值为 1 Vm^{-1} , 波长为 $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$)以 45° 线偏振斜入射到二维矩形光栅结构上, 斜入射角度变化范围为 $0^\circ \sim 85^\circ$ 。与正方形结构[19]相比, 矩形光栅的等效介电常数跟偏振态有关, 且具有形式双折射现象。对于某一线偏振态, 二维矩形光栅可以分别等效为栅条方向沿 y 轴和 x 轴方向的一维光栅, 其等效折射率为

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

式中 $n_{\text{TE}}, n_{\text{TM}}$ 由(1)式可以得到。垂直入射光的电场在 x 轴和 y 轴方向分量可以表示为[20]

$$\mathbf{E}_{\text{inc}} = E_{\text{inc}} \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

则零阶透射电场分量可以表示为

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} E_{x\text{-out}} = t_x E_x \\ E_{y\text{-out}} = t_y E_y \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 t_x 和 t_y 分别表示入射光偏振分量沿着 x 轴和 y 轴方向的透射系数, 它们与二维金属矩形光栅的结构参量、折射率和入射角有关。由于零阶透射可以表示为

$$T = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{\epsilon_v}} \frac{1}{|\mathbf{E}_{\text{inc}}|^2} (|E_{x\text{-out}}|^2 + |E_{y\text{-out}}|^2), \quad (5)$$

将(3)和(4)式代入(5)式得出

$$T = T_{90^\circ} + (T_{0^\circ} - T_{90^\circ}) \cos^2 \varphi, \quad (6)$$

式中 $T_{0^\circ} = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{\epsilon_v}} |t_x|^2$, $T_{90^\circ} = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{\epsilon_v}} |t_y|^2$, ϵ_s 和 ϵ_v 分别为衬底和空气的介电常数。同时透射电场分量 E_y 和 E_x 的相位差可表示为

$$\delta = \arg(E_{y\text{-out}}/E_{x\text{-out}}). \quad (7)$$

庞加莱球是一种表示任意偏振态的图示法, 任意状态的偏振光在庞加莱球上都有唯一的点与之对应, 球面上全部点的集合代表了所有各种可能的偏

振态。采用空间角调制的方法仿真出(4)和(7)式中透射光的 $E_{x\text{-out}}$ 和 $E_{y\text{-out}}$ 分量及其相位差 δ , 再归一化为斯托克斯矢量, 从而将输出偏振态表示在庞加莱球上[21,22]。

3 仿真与分析

参考文献[11,15]的参数选取 550 nm 作为工作波长, 并利用时域有限差分(FDTD)算法进行仿真。当入射光通过亚波长结构后, 双折射效应也会使透射光偏振态出现相应变化。当入射光为 $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ 的 45° 线偏振光, 通过使用针对不同的斜入射角度将旋转角从 0° 逐渐变化到 180° 的空间角调制方法, 计算透射光的偏振态在庞加莱球上对应的示意点。

在计算机仿真中, 金属矩形阵列的周期、 x 轴和 y 轴方向上的占空比、槽深及衬底的厚度均为恒定的参量。通过改变光波斜入射到亚波长结构的空间角度, 计算透过衬底输出光的偏振态。如图4所示入射光空间角变化时(斜入射角从 $0^\circ \sim 85^\circ$ 变化的同时, 其空间旋转角从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 也作相应变化), 得到透射光在庞加莱球上的偏振态分布图, 几乎实现了全部覆盖的效果。图4表示庞加莱球上不同面上的偏振态分布。同时仿真数据表明, 当斜入射角 θ 比较大时, 透射光在庞加莱球上分布不均匀, 输出偏振态不稳定。

在实现全偏振态转换的情况下, 对其输出光的透射率进行了分析。如图5随着斜入射角 θ 的增加, 使得光波的传播矢量在沿 z 轴方向上的分量减小, 因此透射率开始逐渐下降; 对于同一斜入射角其旋转角为 45° 时达到偏振透射的峰值, 旋转角为 135° 时达到偏振透射的最小值。由于入射光初始偏振态为 45° 线偏振, 旋转角的变化会使偏振角作相应变化, 当旋转角为 45° 时, 此时入射光的偏振态投影到 oxy 面上为沿着 y 轴方向(等效为 TM 波)。在上述等效 TM 波垂直入射的情况下(入射角 $\theta = 0^\circ$), 其透射率达到最大, 约为 0.815 。与偏振透射峰值对应, 当旋转角为 135° 时(等效为 TE 波)达到偏振透射的最小值, 同样在垂直入射的情况下大约为 0.257 。综上仿真分析可以看出, 与一维金属光栅相比, 二维金属矩形光栅 TE 波跟 TM 波均具有较高透射率。

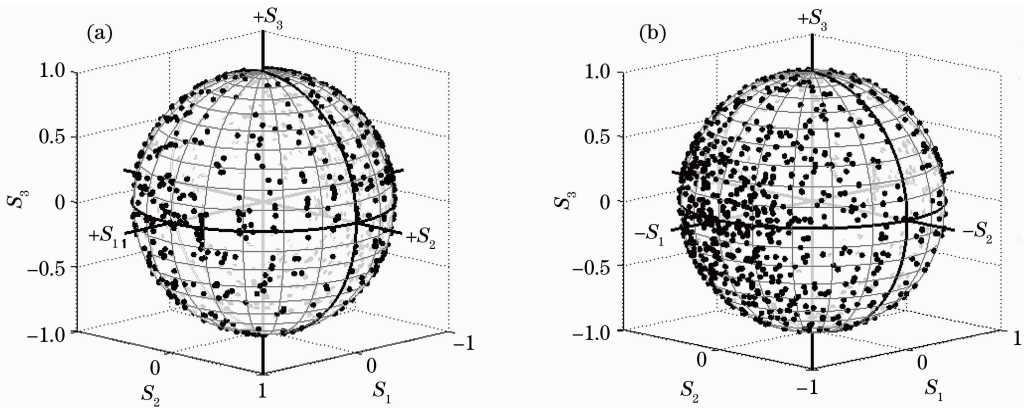


图 4 (a) S_1 和 S_2 正半轴附近, (b) S_1 和 S_2 负半轴附近庞加莱球面上点的偏振态分布

Fig. 4 Distribution of polarization states on the Poincaré sphere near (a) positive half axes of S_1 and S_2 , (b) negative half axes of S_1 and S_2

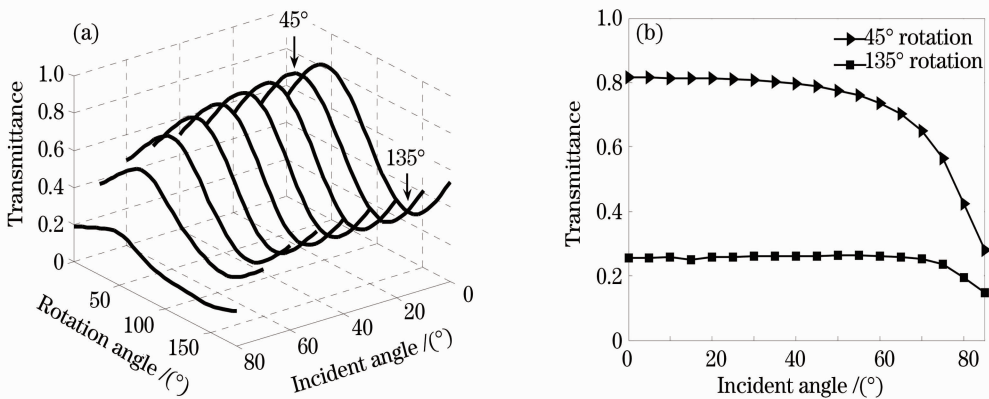


图 5 透射率随入射光空间角的变化关系

Fig. 5 Transmittance versus space angle of the incident light

4 结 论

亚波长一维金属光栅的形式双折射效应对 TE 偏振表现为金属膜特性,可以实现高反射;而对于 TM 偏振则表现为介质膜特性,可实现高透射。将 EMT 和薄膜光学的抗反射设计方法结合起来,研究了基于 550 nm 工作波长的二维亚波长矩形阵列光栅,给出了矩形光栅的设计参数,通过空间角调制的方法,分析了输出偏振态在庞加莱球上的分布,实现了由线偏振到全偏振态的控制。并研究了二维亚波长矩形阵列光栅的透射特性,同时实现了 TE 偏振和 TM 偏振模式下的高透射调制。

参 考 文 献

1 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978. 182~190
 玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1978. 182~190
 2 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. Ellipsometry and Polarized Light [M]. Zhang Minji et al. Transl. Beijing: Science Press,

1986. 31~34, 72, 73
 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. 椭圆偏振测量术和偏振光 [M]. 张民基等译. 北京: 科学出版社, 1986. 31~34, 72, 73
 3 Zhang Liang, Li Chengfang. Polarization effect of 150 nm subwavelength aluminum wire grating in near infrared [J]. Chinese J. Lasers, 2006, **33**(4): 467~471
 张亮, 李承芳. 150 nm 亚波长铝光栅的近红外偏振特性[J]. 中国激光, 2006, **33**(4): 467~471
 4 Zhou Yun, Shen Su, Ye Yan et al.. Research on the characteristics of subwavelength metal grating polarization with a high refractive-index dielectric layer [J]. Acta Optica Sinica, 2010, **30**(4): 1158~1161
 周云, 申溯, 叶燕等. 带有高折射率介质层的金属光栅偏振器特性的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1158~1161
 5 Cao Zhaoliang, Lu Zhenwu, Li Fengyou et al.. Design consideration of two-dimensional anti-reflective subwavelength periodic gratings [J]. Opt. & Precision Engng., 2002, **10**(6): 537~541
 曹召良, 卢振武, 李凤友等. 二维抗反射亚波长周期结构光栅的设计分析[J]. 光学精密工程, 2002, **10**(6): 537~541
 6 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
 7 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
- 8 Zhou Yun, Ye Yan, Shen Su *et al.*. Research on the characteristics of sub-wavelength grating color filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 01230031
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): 01230031
- 9 Yang Yisu, Huang Yongqing, Huang Hui *et al.*. Design of photodetector with subwavelength grating structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2352~2357
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): 2352~2357
- 10 Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Research on sub-wavelength grating polarizing beam splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2690~2695
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): 2690~2695
- 11 S. W. Ahn, K. D. Lee, J. S. Kim *et al.*. Fabrication of a 50 nm half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2005, **16**(9): 1874~1877
- 12 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
- 13 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
- 14 Zhao Huajun, Yang Shouliang, Zhang Dong *et al.*. Design of polarizing beam splitters based on subwavelength metal grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6236~6242
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): 6236~6242
- 15 H. Li, X. Luo, L. Yan *et al.*. Polarization and transmission properties through metamaterial-based three-dimensional plasmonic structure[J]. *IEEE Photon. J.*, 2011, **3**(3): 400~406
- 16 D. L. Brundrett, E. N. Glytsis, T. K. Gaylord. Subwavelength transmission grating retarders for use at 10.6 μm [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(31): 6195~6202
- 17 F. Romanato, K. H. Lee, G. Ruffato *et al.*. Sensitivity enhancement in grating coupled surface plasmon resonance by azimuthal control[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(11): 111103
- 18 M. R. Shcherbakov, M. I. Dobynde, T. V. Dolgova *et al.*. Full poincaré sphere coverage with plasmonic nanoslit metamaterials at fano resonance[J]. *Phys. Rev. B.*, 2010, **82**(19): 1934021
- 19 Chen Sihai, Cheng Zhijun, Huang Guang *et al.*. Design and fabrication of subwavelength antireflection gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1359~1361
陈四海, 程志军, 黄光等. 亚波长消反射光栅[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1359~1361
- 20 M. Sarrazin, J. P. Vigneron. Polarization effects in metallic films perforated with a bidimensional array of subwavelength rectangular holes[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **240**(1-3): 89~97
- 21 G. Yuri, B. Gabriel, N. Avi *et al.*. Optical properties of polarization-dependent geometric phase elements with partially polarized light[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **266**(2): 365~375
- 22 N. Avi, B. Gabriel, K. Vladimir *et al.*. Spiral phase elements obtained by use of discrete space-variant subwavelength gratings[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **251**(4-6): 306~314

栏目编辑: 李文喆