

基于超材料的中波红外宽带偏振转换研究

金柯 刘永强 韩俊 杨崇民 王颖辉 王慧娜

Middle-wave infrared and broadband polarization conversion based on metamaterial

Jin Ke Liu Yong-Qiang Han Jun Yang Chong-Min Wang Ying-Hui Wang Hui-Na

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 134201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.134201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.134201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用含二面角误差的角锥棱镜阵列实现反射光束均匀发散的方法

[A method to diverge reflected beam uniformly using cube-corner retroreflector array with dihedral angle tolerances](#)

物理学报.2017, 66(8): 084201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084201>

随机电磁光束经像散透镜后磁场的光谱 Stokes 奇点

[Magnetic spectral Stokes singularities of stochastic electromagnetic beams through an astigmatic lens](#)

物理学报.2016, 65(23): 234201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234201>

自旋-轨道耦合下冷原子的双反射

[Double reflection of spin-orbit-coupled cold atoms](#)

物理学报.2016, 65(16): 164201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164201>

一种基于超材料的宽带、反射型 90° 极化旋转体设计

[Design of broadband reflective 90° polarization rotator based on metamaterial](#)

物理学报.2016, 65(4): 044201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044201>

部分相干刃型位错光束的谱 Stokes 奇点

[Spectral Stokes singularities of partially coherent edge dislocation beams](#)

物理学报.2016, 65(1): 014202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014202>

基于超材料的中波红外宽带偏振转换研究

金柯[†] 刘永强 韩俊 杨崇民 王颖辉 王慧娜

(西安应用光学研究所, 西安 710065)

(2017年1月18日收到; 2017年5月1日收到修改稿)

基于硅纳米块阵列和亚波长金属光栅, 硅纳米块长轴与金属光栅夹角为 45° , 本文设计了一种高效、宽带偏振转换结构. 模拟计算表明该结构实现了线偏振光 90° 旋转, 在 $3.4\text{--}4.5\ \mu\text{m}$ 波段偏振转换率大于60%, 在 $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ 光谱范围内的转换对比率大于 10^4 . 由于该结构光学性能优异, 制备难度低, 可以应用于光传输控制.

关键词: 偏振转换, 亚波长金属光栅, 超材料, 纳米块

PACS: 42.25.Bs, 78.20.Bh, 42.25.Ja, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.66.134201

1 引言

光学偏振技术在光网络和光信息系统中广泛应用^[1,2]. 中波红外是光偏振技术应用的重要波段, 如红外通信、红外预警、红外成像、红外光谱、红外遥感等, 所以对中波红外波段的偏振控制就显得十分重要^[3,4]. 光偏振态转换已经是偏振控制的重要内容, 目前利用双折射材料制作的波片可以把线偏振光转换成椭圆或圆偏振光^[5]. 此外, 利用法拉第磁光效应可以旋转线偏振光的偏振方向, 旋转角与磁感应强度和光穿越介质的长度成正比^[6]. 但是这些器件往往尺寸较大, 不利于光子集成.

超材料通常指人工周期结构, 它具有天然材料所不具备的奇异的电磁特性^[7-10]. 超材料在电磁波偏振态控制和光子集成方面成为非常有潜力的新技术^[11,12]. 利用超材料技术可以使线偏振光的偏振方向旋转已经被证实, 而且控制偏振光的性能显著^[13]. 超材料结构包括亚波长微结构阵列, 具有亚波长狭缝及微孔阵列的金属膜^[14]等. 目前人们对超材料偏振转换器进行了广泛研究. Cong等^[15]利用三层不同方向的金属光栅实现了 90° 偏振转换. Huang等^[16]利用间隔一定距离的SiN膜和金属膜及其上的矩形孔阵列(矩形孔长轴正交)实现了线偏振光 90° 偏振转换. Cheng等^[17]利用

石墨烯超材料设计实现了波段可调的反射偏振转换. Dong等^[18]利用H型结构超表面阵列单元实现了GHz波段的线性极化转换圆极化波. Wu等^[19]提出了一种阵列方形谐振腔, 实现了GHz波段的反射偏振转换. 但是这些方法制作工艺复杂、转换效率低、工作带宽窄, 限制了实际应用.

本文提出一种基于超材料的阵列结构, 在硅基底一面设计长方体硅纳米块阵列, 另一面设计亚波长金属光栅, 纳米块长轴与金属光栅夹角 45° . 经过精确的模拟计算, 结果表明设计模型实现了 90° 偏振转换, 在中波红外波段具有偏振转换效率高、波段宽的优点.

2 理论模型

图1为研究模型结构, 其中图1(a)为模型截面示意图, 图1(b)为纳米块阵列示意图. 模型分三层: 上层为长方体硅纳米块阵列, 纳米块高 $3\ \mu\text{m}$, 长 $1\ \mu\text{m}$, 宽 $0.4\ \mu\text{m}$, 纳米块阵列周期为 $1\ \mu\text{m}$; 中间层为硅基底; 下层为金属光栅, 光栅材料为金, 周期 $0.5\ \mu\text{m}$, 厚度 $0.6\ \mu\text{m}$, 占空比0.4, 金属光栅栅条与纳米块长轴夹角为 45° . 入射光为X轴方向偏振的线偏振光, 入射方向沿-Z轴方向. 本文采用时域有限差分(FDTD)法模拟, 由于阵列的周期结构, 计算时Z轴方向采用完全匹配层截断

[†] 通信作者. E-mail: jinkegoodman@163.com

电磁场, X 轴, Y 轴方向采用周期边界条件. 硅的相对介电常数为 11.56, 金的色散采用 Drude 模型, $\varepsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2/(\omega^2 + i\omega/\tau)$, 其中等离子体频率 ω_p 为 1.38×10^{16} rad/s, 自由电子平均碰撞时间 τ 为 33 fs [20].

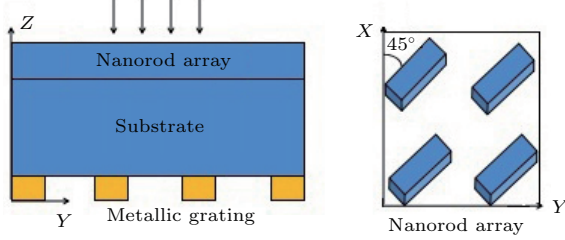


图 1 偏振转换模型

Fig. 1. Structure of polarization transformation.

如图 2 所示, 入射线偏振光 E_x 可分解为垂直纳米块长轴(短轴)分量 E_{\perp} 和平行纳米块长轴分量 E_{\parallel} . 为解释该模型偏振转换原理, 我们采用琼斯矢量描述. X 轴方向的线偏振态为 $\begin{bmatrix} E_x \\ 0 \end{bmatrix}$, 垂直纳米

块长轴的偏振态分量为 $\begin{bmatrix} E_x \sin \theta \sin \theta \\ -E_x \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix}$, 平行于纳米块长轴的偏振态为 $\begin{bmatrix} E_x \cos \theta \cos \theta \\ E_x \cos \theta \sin \theta \end{bmatrix}$, 其中 θ 为纳米块长轴与 X 轴夹角. 由于纳米块在长轴方向和短轴方向的几何尺寸不同, 导致其长轴方向和其垂直方向(短轴方向)的等效折射率不同, 相当于形成了各向异性的双折射效应. 当光透过纳米块时, 就会在两个方向产生相位差 δ . 相位差 δ 与纳米块几何参数及其折射率相关. 偏振方向平行于 X 轴的线偏振光穿过纳米块后的偏振态由 (1) 式计算, 可以看出线偏振光透过纳米块后, 偏振态完全由相位差 δ 和纳米块长轴与 X 轴夹角 θ 确定.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} E_x \cos \theta \cos \theta \\ E_x \cos \theta \sin \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_x \sin \theta \sin \theta e^{-j\delta} \\ -E_x \sin \theta \cos \theta e^{-j\delta} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} E_x \cos \theta \cos \theta + E_x \sin \theta \sin \theta e^{-j\delta} \\ E_x \cos \theta \sin \theta - E_x \sin \theta \cos \theta e^{-j\delta} \end{bmatrix}. \quad (1) \end{aligned}$$

由 (2) 式可以看出仅当 $\delta = \pi$ 及 $\theta = \pi/4$ 时等式成立, 此时光偏振方向从平行于 X 轴的偏振方向完全转换成平行于 Y 轴的偏振方向, 说明入射线偏振光实现了 90° 偏振转换. 所以这就是本文设计模

型中 X 轴与纳米块长轴夹角为 45° 的原因.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} E_x \cos \theta \cos \theta + E_x \sin \theta \sin \theta e^{-j\delta} \\ E_x \cos \theta \sin \theta - E_x \sin \theta \cos \theta e^{-j\delta} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ E_x \end{bmatrix}. \quad (2) \end{aligned}$$

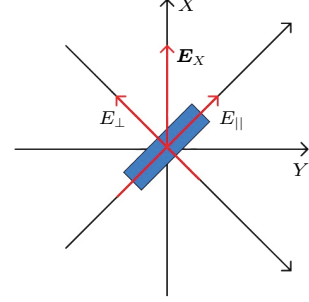


图 2 入射光的纳米块长轴和短轴分量示意图

Fig. 2. Schematic of components along long- and short-axis.

由于同时满足相位差 $\delta = \pi$ 的波段非常窄, 这样其他频率的光只有部分实现了 90° 偏振转换. 此外, 硅折射率在中波红外约 3.5, 导致硅-空气界面的反射率高达 30%. 为了提高偏振转换后的透射光对比率及其透过率, 我们在基底背面设计了亚波长金属光栅, 栅条方向平行于入射偏振光偏振方向. 这样经过 90° 偏振转换的偏振光可以透过金属光栅, 偏振方向没有转换的光被反射. 我们采用有效介质理论设计金属光栅来提高透过率 [21]. 对于偏振方向垂直光栅的透射光, 金属光栅等效薄膜的折射率为 $n = n_w n_f [(1-f)n_f^2 + f n_w^2]^{-1/2}$, 其中, n_w 为金属折射率, n_f 为光栅槽介质折射率, f 为金属光栅占空比. 这样我们按照光学薄膜理论设计合适占空比的金属光栅作为硅的减反射膜层, 金属光栅等效薄膜的折射率满足 $n = \sqrt{n_r n_s}$, n_r 为空气折射率, n_s 为基底折射率. 为了使反射率最小, 金属光栅厚度应满足 $h = \lambda_0/(4n)$, λ_0 为中心波长.

3 结果与分析

图 3 为透射光中不同偏振分量的透过率. T_x 为透射光中偏振方向平行于 X 轴的线偏振光透过率, 即偏振方向平行入射光偏振方向时光的透过率; T_y 为透射光中偏振方向平行于 Y 轴的线偏振光透过率, 即偏振方向垂直于入射光偏振方向时光的透过率. 从图 3 可明显看出峰值波长 $3.698 \mu\text{m}$ 处透过率

达到87%, 在3.6—3.9 μm 波段透过率 T_y 大于80%, 3.4—4.5 μm 波段透过率 T_y 大于60%, 3.2—4.8 μm 波段透过率 T_y 大于40%. 可见采用本文设计的模型结构可以实现宽带、高效的90° 偏振转换. 从图4可以看出, 透射光不同偏振分量透过率 T_y 和 T_x 在3—5 μm 光谱范围内的对比率大于 10^4 , 说明本文提出的模型结构经90° 偏振转换后偏振光的偏振度非常高.

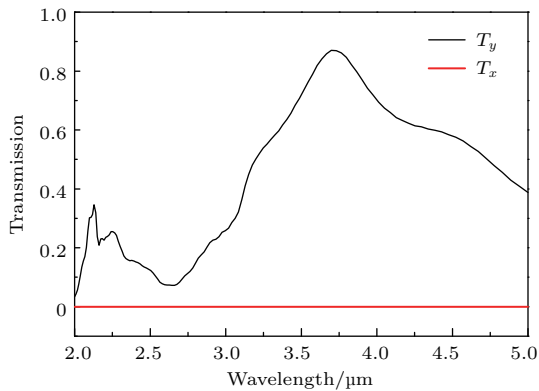


图3 (网刊彩色) 透射光中不同偏振分量的透过率
Fig. 3. (color online) Transmission of different polarization components.

图5为透射光在纳米块长轴和短轴的场分量之间产生的相位差. 从图中可以看出相位差 $\delta = \pi$ 在峰值波长 3.698 μm 处, 而且随着波长增加相位差线性下降. 这是因为纳米块长轴和短轴方向的等效折射率为定值(忽略硅折射率色散影响), 所以在这两个方向的光程差也为定值, 在光程差一定时, 随着波长增加相位差将减小.

图6(a)为峰值波长 3.698 μm 的入射偏振光电场矢量在纳米块阵列上表面的一个阵列周期内的

分布图, 图6(b)为峰值波长 3.698 μm 的入射偏振光透过纳米块阵列后的电场矢量在一个阵列周期内的分布图. 其中图6(a)的电场矢量分布基本平行于 X 轴, 图6(b)的电场矢量分布基本平行于 Y 轴. 说明入射光的偏振方向旋转了90°, 从平行于 X 轴方向偏振态转换为平行 Y 轴方向偏振态.

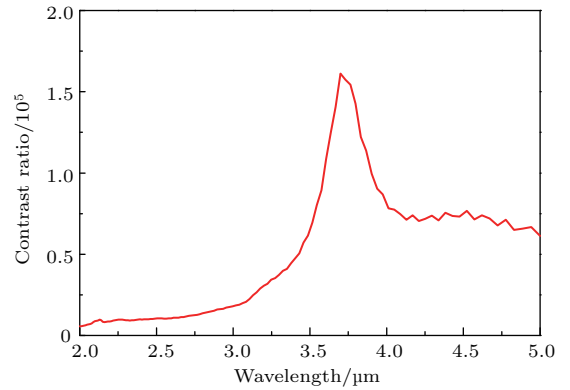


图4 透过率 T_y 和 T_x 的对比率
Fig. 4. Calculated transmission contrast ratio.

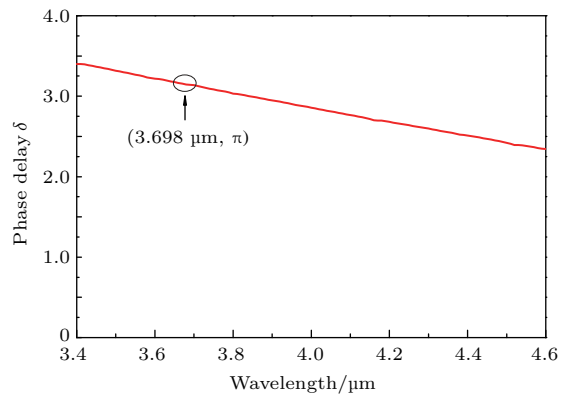


图5 纳米块长轴和短轴两个场分量的相位差 δ
Fig. 5. Transmittance phase difference δ between the two field components.

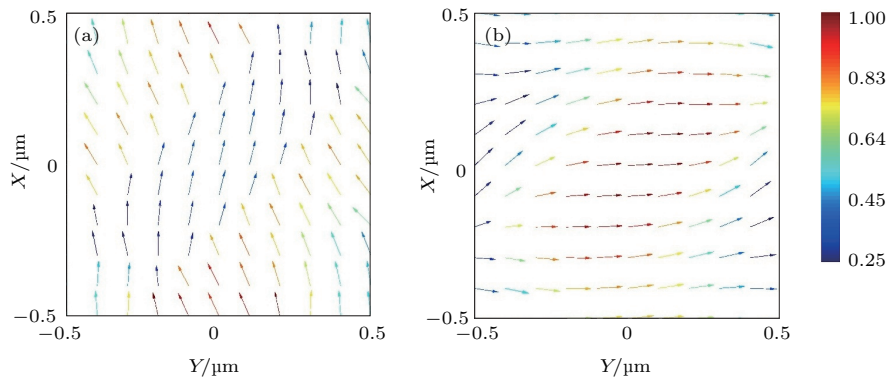


图6 (网刊彩色) (a) 峰值波长时在纳米块上的表面电场矢量分布; (b) 峰值波长时透过纳米块后的电场矢量分布
Fig. 6. (color online) (a) Distribution of electric field vector on the surface of nanorod at the peak wavelength; (b) distribution of electric field vector through the nanorod at the peak wavelength.

图7为不同硅纳米块高度下的透过率,可见随着纳米块高度增加,峰值波长红移.这是因为纳米块高度增加,满足相位差 $\delta = \pi$ 的波长随着增大.图8为不同硅纳米块宽度下的透过率,可见随着纳米块宽度增加,峰值波长红移.这表明通过调节纳米块高度及宽度就可以调节偏振转换波段.从图7和图8可以看出,在每条曲线最高透射峰右侧有一个明显的透射谷.这是因为对于硅基底,纳米块阵列可以等效为一层低折射率膜层,当等效层光学厚度满足 $\lambda/2$ 整数倍时,透过率为极小值.在其他波长时等效层对基底有增透作用,在满足 $\lambda/4$ 奇数倍时为透射极大值.所以透射谷为此处波长满足纳米块等效层光学厚度等于 $\lambda/2$ 整数倍所致.

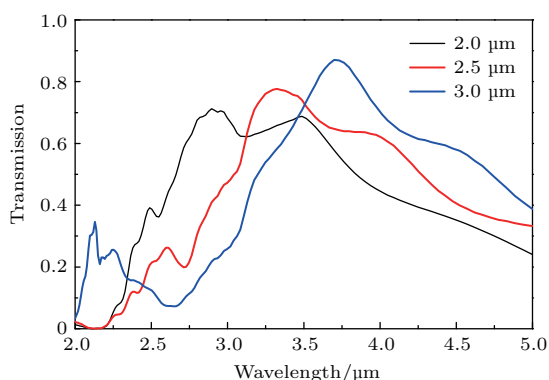


图7 (网刊彩色) 不同硅纳米块高度下的透过率
Fig. 7. (color online) Transmission at different heights of silicon nanorod.

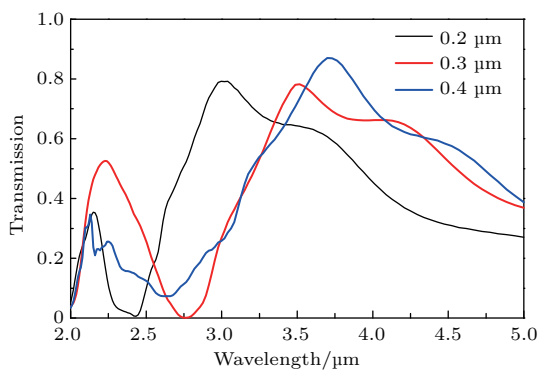


图8 (网刊彩色) 不同硅纳米块宽度下的透过率
Fig. 8. (color online) Transmission at different widths of silicon nanorod.

4 结 论

在硅基底两个表面分别设计硅纳米块阵列和亚波长金属光栅,硅纳米块长轴与金属光栅夹角为

45°.通过精确的FDTD模拟计算,结果表明该结构实现了偏振光90°偏振转换,并且这种结构在中波红外区域具有偏振转换效率高、波段宽、对比率高的优点.本文所提结构光学性能优异,制备难度低,对于光传输控制有重要的应用价值.

参考文献

- [1] Zhao H J, Yang S L, Zhang D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6236 (in Chinese) [赵华君, 杨守良, 张东 2009 物理学报 **58** 6236]
- [2] Chen J, Yan L S, Pan W, Luo B, Guo Z 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 1224001 (in Chinese) [陈娟, 闫连山, 潘炜, 罗斌, 郭振 2011 光学学报 **31** 1224001]
- [3] Sundaram C M, Prabaharan K, Anbarasan P M, Rajesh K B, Musthafa A M 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 64203
- [4] Dong C, Li B, Li H X, Liu H, Chen M Q, Li D D, Yan C C, Zhang D H 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 74201
- [5] Wang P, Shang Y P, Li X, Xu X J 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 116002 (in Chinese) [王鹏, 尚亚萍, 李霄, 许晓军 2015 中国激光 **42** 116002]
- [6] Li C Z, Wu B J 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 3153 (in Chinese) [李崇真, 武保剑 2010 光学学报 **30** 3153]
- [7] Han J F, Cao X Y, Gao J, Li S J, Zhang C 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 044201 (in Chinese) [韩江枫, 曹祥玉, 高军, 李思佳, 张晨 2016 物理学报 **65** 044201]
- [8] Wang G D, Liu M H, Hu X W, Kong L H, Cheng L L, Chen Z Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017802
- [9] Fan Y N, Cheng Y Z, Nie Y, Wang X, Gong R Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 067801
- [10] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [11] Yang H H, Cao X Y, Gao J, Liu T, Li W Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064103 (in Chinese) [杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 刘涛, 李文强 2013 物理学报 **62** 064103]
- [12] Li S J, Gao J, Cao X Y, Zhang Z, Zheng Y J, Zhang C 2015 *Opt. Express* **23** 3523
- [13] Huang Ch P 2015 *Opt. Express* **23** 251150
- [14] Genet C, Ebbesen T W 2007 *Nature* **445** 39
- [15] Cong L, Cao W, Zhang X, Tian Z, Han J, Zhang W 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 171107
- [16] Huang C P, Wang Q J, Yin X G, Zhang Y, Li J Q, Zhu Y Y 2014 *Adv. Opt. Mater.* **2** 723
- [17] Cheng H, Chen S Q, Yu P, Li J X, Xie B Y, Li Z C, Tian J G 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 223102
- [18] Dong G X, Shi H Y, Xia S, Li W, Zhang A X, Xu Z, Wei X Y 2016 *Chin. Phys. B* **25** 084202
- [19] Wu J L, Lin B Q, Da X Y 2016 *Chin. Phys. B* **25** 088101
- [20] Zhu Z H, Liu K, Xu W, Luo Z, Guo C C, Yang B, Ma T, Yuan X D, Ye W M 2012 *Opt. Lett.* **37** 4008
- [21] Liao Y L, Zhao Y 2014 *Opt. Quant. Electron.* **46** 641

Middle-wave infrared and broadband polarization conversion based on metamaterial

Jin Ke[†] Liu Yong-Qiang Han Jun Yang Chong-Min Wang Ying-Hui Wang Hui-Na

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

(Received 18 January 2017; revised manuscript received 1 May 2017)

Abstract

The polarization state is one of the most important basic properties of the electromagnetic wave. Researchers have made great efforts to manipulate it. Control of the polarization state of an electromagnetic wave is a promising promotion for figuring out many practical engineering problems in infrared remote sensing, optical communication and infrared target recognition. In this paper, we propose a wide-band and high-efficient linear-polarization converter on the basis of the metamaterial, which is comprised of silicon nanorod array and subwavelength metal grating that can realize a 90° polarization converter of linearly polarized light and is composed of silicon nanorod array cascade subwavelength metal grating: on one side of design located is the cuboid silicon nanorod array, on the other side of the design the subwavelength metallic grating on the silicon substrate, and the angle between silicon nanorod array and subwavelength metal grating is 45°. Because of the difference in geometrical dimension between the long axis and the short axis of the nanorod, results of the equivalent refractive index of the long axis direction and the short axis direction are different, and the anisotropic birefringent effect is formed. Based on the Jones matrix, the feasibility of polarization converter is described. The polarization converter efficiency and polarization state of the structure are simulated and analyzed by the finite-difference time-domain method. And the variation characteristics of polarization converter transmittance are simulated under several nanorod with different heights and widths. In order to improve the contrast ratio and the transmission, the effective medium theory is used to design the metal grating for improving the transmission. According to the theory of optical thin film, we design the subwavelength metal grating with suitable duty cycle as the anti-reflection coating. The simulation results show that the structure can realize 90° rotation of linearly polarized light, the polarization converter efficiency is greater than 60% in a spectral range of 3.4–4.5 μm and the contrast ratio is greater than 10⁴ in a spectral range of 3–5 μm. This structure can effectively realize the 90° polarization conversion in the spectral range of medium wave infrared and has the advantages of high conversion efficiency and high contrast ratio. In addition, the range of spectral of polarization conversion can be changed by adjusting the height and width of the nanorod. It can be applied to optical transmission control of optical network and optical information system, because of its excellent optical performance with the advantages of high polarization conversion efficiency and wide band in the mid-infrared waveband and low preparation difficulty.

Keywords: polarization converter, subwavelength metal grating, metamaterial, nanorod

PACS: 42.25.Bs, 78.20.Bh, 42.25.Ja, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.66.134201

[†] Corresponding author. E-mail: jinkegoodman@163.com