

基于氧化铟锡的风扇型中红外手性超材料及其圆二向色性

朱叶欣 李亚楠 施维捷 张文涛 闫长春

Fan-shaped mid-infrared chiral metamaterials based on indium tin oxide and their circular dichroism

ZHU Ye-xin, LI Ya-nan, SHI Wei-jie, ZHANG Wen-tao, YAN Chang-chun

引用本文:

朱叶欣, 李亚楠, 施维捷, 张文涛, 闫长春. 基于氧化铟锡的风扇型中红外手性超材料及其圆二向色性[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 722–727. doi: 10.37188/CO.2019–0190

ZHU Ye-xin, LI Ya-nan, SHI Wei-jie, ZHANG Wen-tao, YAN Chang-chun. Fan-shaped mid-infrared chiral metamaterials based on indium tin oxide and their circular dichroism[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 722–727. doi: 10.37188/CO.2019-0190

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019–0190>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中红外光谱技术对乙醇汽油乙醇含量的检测

Determination of the content of ethanol in ethanol gasoline using mid-infrared spectroscopy

中国光学. 2017, 10(6): 752 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0752>

基于喷涂法制备氧化锡薄膜的钙钛矿太阳能电池

Perovskite solar cells based on a spray-coating tin oxide film

中国光学. 2019, 12(5): 1040 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1040>

氧化石墨烯的多色发光及其在荧光成像中的应用

Multicolor fluorescent emission of graphene oxide and its application in fluorescence imaging

中国光学. 2018, 11(3): 377 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0377>

电磁编码超材料的理论与应用

Theory and application of coding metamaterials

中国光学. 2017, 10(1): 1 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0001>

太赫兹偏振测量系统及其应用

Polarization sensitive terahertz measurements and applications

中国光学. 2017, 10(1): 98 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0098>

基于第一性原理的钙钛矿材料空位缺陷研究

Investigation of self-doping in perovskites with vacancy defects based on first principles

中国光学. 2019, 12(5): 1048 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1048>

基于氧化铟锡的风扇型中红外手性超材料及其圆二向色性

朱叶欣¹, 李亚楠¹, 施维捷¹, 张文涛², 闫长春^{1*}

(1. 江苏师范大学物理与电子工程学院 江苏省先进激光材料与器件
重点实验室, 江苏徐州 221116;
2. 徐州工程学院数学与物理科学学院, 江苏徐州 221111)

摘要:本文设计了一种中红外波段手性超材料以克服传统中红外激光偏振态调控所使用的控制元件体积大、成本高等不足。利用中红外等离激元材料氧化铟锡(ITO)设计风扇型手性结构,并研究了该结构在中红外波段的圆二向色性(CD)。通过改变扇叶层填充材料、扇叶厚度、扇叶大小、扇叶数量以及扇叶的材料,讨论结构的CD变化情况。模拟结果表明:当填充材料为硅、扇叶为6片时,选取合适的扇叶厚度和大小,在5.3 μm附近获得最强的CD信号,为0.052。此外,与贵金属银、金相比,由ITO构成的结构展现出良好的宽带圆二向色性,这为中红外波段宽带偏振态调控器件的设计提供了新的思路。

关键词:氧化铟锡;扇型手性超材料;中红外;宽带;圆二向色性

中图分类号:TN214 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2019-0190

Fan-shaped mid-infrared chiral metamaterials based on indium tin oxide and their circular dichroism

ZHU Ye-xin¹, LI Ya-nan¹, SHI Wei-jie¹, ZHANG Wen-tao², YAN Chang-chun^{1*}

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. School of Mathematics and Physics, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221111, China)

* Corresponding author, E-mail: yhchangchun@163.com

Abstract: A mid-infrared chiral metamaterial was designed to overcome the problems of large volume and high cost of traditional mid-infrared laser polarization state controls, The fan-shaped chiral structure material made of Indium Tin Oxide (ITO) was designed and its Circular Dichroism (CD) characteristics in the mid-infrared band were studied. The CD variation characteristics of the structure were discussed by changing the

收稿日期:2019-09-25; 修订日期:2019-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(No.61771227); 江苏师范大学大学生创新创业训练计划项目(No.XSJXC8049)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61771227); Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students in Jiangsu Normal University (No.XSJXC8049)

filling material, the thickness, the size, the number, and the material of fan blades. The simulation results show that when the filling material is silicon and the number of fan blade is six, the strongest CD signal of 0.052 is obtained near the wavelength of $5.3 \mu\text{m}$ by selecting the appropriate fan thickness and size. Moreover, compared with the silver and gold, the structure made of ITO exhibits broadband circular dichroism, which provides a new idea for the design of broadband polarization-state control devices in the mid-infrared band.

Key words: ITO; fan-shaped chiral metamaterials; mid-infrared; broadband; circular dichroism

1 引言

手性超材料是近年发展起来的一种人工电磁材料,它具有两种重要性质^[1-4]:一是光学活性,用以表征线偏光通过手性超材料时偏振面的旋转能力;二是圆二向色性(CD),由于手性超材料对右旋和左旋圆极化波的吸收不同,所以利用 CD 表征右旋和左旋圆极化波之间透过率的差异。这两个性质使得手性超材料在电磁波偏振调控方面具有广泛应用,特别是在生物科学领域的手性分子传感方面具有巨大的应用潜力。受手性超材料结构电磁振荡的影响,手性超材料的手性特性往往只发生在结构的振荡频率附近,已证实手性超材料的响应频率主要分布在微波^[5]、太赫兹^[6]和可见光或近红外区域^[7-15],很少有工作报告响应频率分布在中红外波段的情况^[16-18]。中红外激光在国防、医疗、通信等方面有着重要的应用。能否对中红外激光传输进行有效控制决定了中红外激光能否得到更好的应用。对中红外激光偏振态的调控是中红外激光传输控制的关键环节。传统的中红外激光偏振态调控方法主要包括采用工作中红外波段的波片进行偏振态调控。该方法明显的不足是所使用的控制元件体积大、成本高、难以集成。此外,在已报道的中红外手性超材料中,作为等离子体振荡的材料往往选择金、银或铜等传统金属,这些金属具有诸多不足^[19]:在中红外波段它们的介电常数实部数值过大、化学稳定性较低、与标准硅制造工艺兼容性较弱、光学特性不可调等。这些不足决定了使用传统金属难以制作出性能良好的中红外波段手性超材料。已经有文献证明氧化锡铟(ITO)在中红外区域展现出了较低损耗的等离子体振

荡^[19],可作为性能良好的中红外等离子体材料。

本文选取 ITO 作为等离子体材料,设计风扇型手性结构,模拟结果显示,在中红外波段,相较于金、银两种金属材料,该结构展现出良好的宽带圆二向色性。这为中红外波段宽带偏振态调控器件的设计提供了新的思路。

2 ITO 的风扇型中红外手性超材料结构

所设计的结构为周期性手性结构,其中一个单元如图 1 所示。

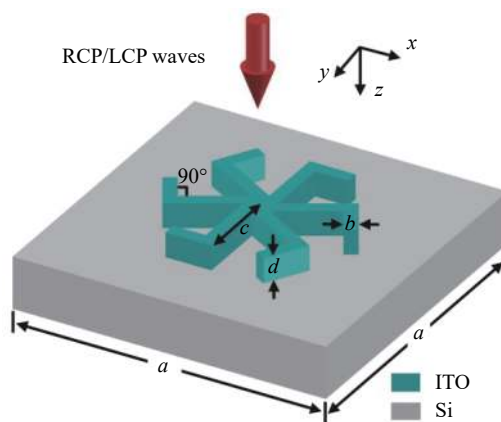


图 1 由 6 个相同的 ITO 扇叶组成的手性结构单元示意图
Fig. 1 Schematic diagram of a chiral structural unit composed of six identical ITO fan blades

该单元由 6 个相同且对称分布的扇叶组成,扇叶的旋转角度为 60° 。每片扇叶形状相同,每一个扇叶的高度和宽度均匀。均为“L”形,拐角为 90° 。扇叶材料为中红外等离子体材料 ITO,扇叶置于硅衬底上。结构参数分别如下:扇叶厚度 $d=400 \text{ nm}$,扇叶宽度 $b=100 \text{ nm}$,扇叶的臂长 $c=$

500 nm, 结构周期为 $a=2 \mu\text{m}$, 假设扇叶层之间空隙处的填充材料为空气。

3 模拟与结果

假设入射光分别为右旋圆极化(RCP)光和左旋圆极化(LCP)光, 且沿 Z 轴正方向入射。模拟时使用 FDTD Solutions 商业软件(加拿大 Lumerical Solution 公司), Z 轴方向上的两个边界面设置成完美匹配层边界条件, 考虑结构具有周期性, 所以将 X 轴和 Y 轴方向的两对边界面设置成周期性边界条件。衬底硅的介电常数来源于实验数据^[20]。ITO 选择 10% 掺杂。假设 ITO(10%)色散介电常数在 $2\sim 10 \mu\text{m}$ 也同样满足 Drude-Lorentz 模型, 计算公式^[19]如下:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_b - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma_p) + f_1 \omega_1^2 / (\omega_1^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_1)$$

其中, ε_b 为无限远处的介电常数; ω_b 为等离子体共振频率; γ_p 为等离子体碰撞频率; f_1 为 Lorentz 项权重; ω_1 为 Lorentz 谐振子强度; γ_1 为振动谱宽。选定 $\varepsilon_b=3.528$, $\omega_p=1.78 \text{ eV}$, $\gamma_p=0.155 \text{ eV}$, $f_1=0.388 4$, $\omega_1=4.210 \text{ eV}$, $\gamma_1=0.091 9$ 。

计算前在模型中合适的位置设置好监视器, 用于监测右旋、左旋光透射系数随波长变化的情况。利用 CD 的计算公式 $CD=|T_+|^2-|T_-|^2$, 其中 T_+ 、 T_- 分别是 RCP 光和 LCP 光的透射系数, 可以得到圆二色性随波长的变化关系, 如图 2 所示。从图中可以看出, 在这个中红外波段, 结构展示出明显的圆二向色性, 在不同波段, 右旋圆偏振光和左旋圆偏振光的透过率强弱不同。波长在 $2\sim 3.5 \mu\text{m}$ 时, CD 为负值, 表明该波段, 右旋圆偏振光的透过率小于左旋圆偏振光的透过率; 波长在 $3.5\sim 5.4 \mu\text{m}$ 时, CD 为正值, 最大值为 0.02, 表明该波段, 右旋圆偏振光的透过率大于左旋圆偏振光的透过率; 而波长在 $5.4\sim 10 \mu\text{m}$ 之间, CD 又变为负值, 最大负值为 0.021, 表明该波段, 右旋圆偏振光的透过率又小于左旋圆偏振光的透过率。究其原因, 一方面是由于构成结构的 ITO 在这些波段中发生了等离激元振荡, 另一方面, 由于结构是手性分布, 致使等离激元振荡在不同波段、不同圆偏振光的作用下, 透过率有所差异。

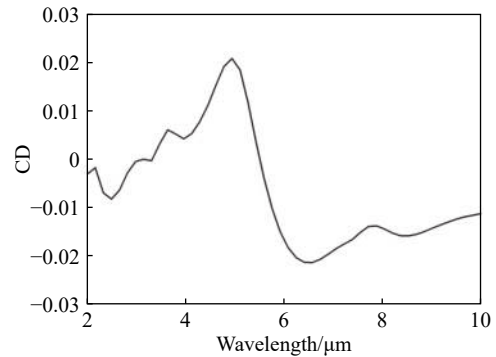


图 2 圆二色性与波长的关系

Fig. 2 Circular dichroism as a function of wavelength

3.1 填充材料变化

将扇叶层之间空隙处的填充材料由空气改变为硅, 其它条件不变, 模拟结构的 CD 特性。模拟结果如图 3 所示。为了便于比较, 图中将填充层为空气的 CD 曲线一同显示。比较发现, 填充层为硅时, 结构仍然具有 CD 特性, 与填充层为空气的情况相比, 其 CD 响应更强, 在 $5.3 \mu\text{m}$ 波长附近, 峰值达到 0.052。由此可知, 选择合适的填充层材料可以实现不同强度的 CD。当填充材料为硅时, 在圆偏振光入射下, 结构中的 ITO 发生了等离激元振荡, 诱发与其相连的硅发生极化振荡现象, 总的振荡引起右旋和左旋圆偏振光入射时透过率差异的增大, 从而导致填充材料为硅时 CD 变强。

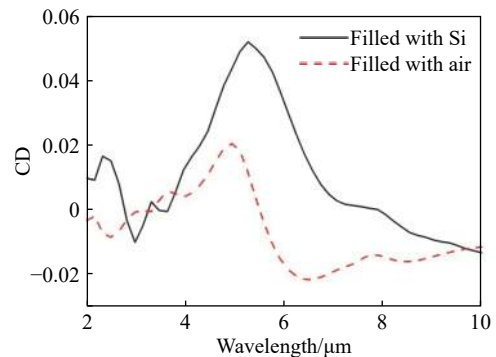


图 3 填充层为硅和空气时圆二色性与波长关系

Fig. 3 Circular dichroism as a function of wavelength when the fan blade layer is filled with Si and air, respectively

3.2 扇叶厚度变化

考虑到填充层材料为硅时具有更强的 CD 响应, 所以设定填充层材料为硅不变。其它条件不变, 令扇叶厚度 d 分别为 200、300、400、500 和 600 nm, 对结构的 CD 进行模拟, 模拟结果如图 4 所示。

可以看出,厚度对结构的 CD 有较大的影响,当厚度为 400 nm 时,CD 信号的峰值达到最大。也就是说,要获得大的 CD 响应,存在扇叶厚度的最优值。

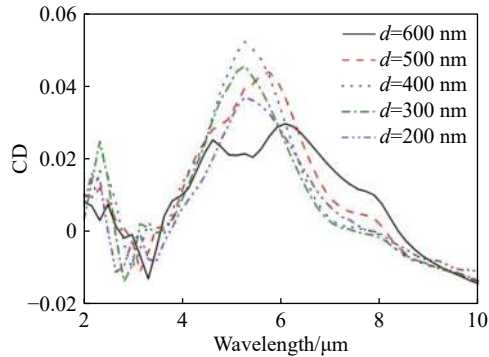


图4 扇叶厚度变化时圆二色性随波长变化图

Fig. 4 Circular dichroism as a function of wavelength when the thickness of the fan blades is changed

3.3 扇叶大小变化

保持填充层材料为硅。将所有扇叶相对于原来在 xy 平面上的尺寸缩小 0.5 倍和放大 1.5 倍,其它的条件与原来相同,研究扇叶大小变化对结构 CD 的影响,模拟结果如图 5 所示。

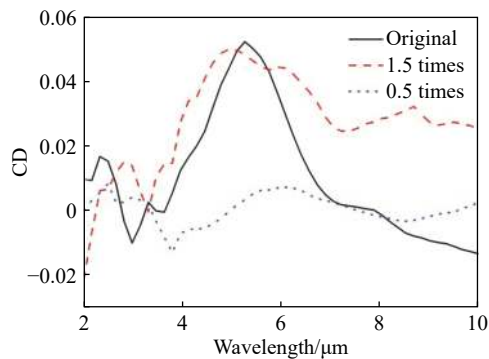


图5 扇叶大小变化时圆二色性随波长变化图

Fig. 5 Circular dichroism as a function of wavelength when the size of the fan blades is changed

由图 5 可以看出,扇叶大小对结构的 CD 有较大的影响,当尺寸缩小到原来的 0.5 倍时,结构的圆二色性几乎消失,原因是尺寸减小,振荡位置向短波长方向移动,但是由于振荡波长变小尤其是小于临界值时按 Drude-Lorentz 模型^[19] 计算可得临界值为 1.4 μm ,ITO 的金属特性不再显现,此时等离子元振荡不再发生,CD 响应也会随之消失。当尺寸增大到原来尺寸 1.5 倍时,在 6~10 μm 波段之间,圆二色性响应相较于原尺寸明显变

强。原因是结构的尺寸越大,振荡位置越向长波长方向移动,因此具有明显的 CD 响应波长向更长的波长方向移动。

3.4 扇叶数量变化

保持填充层材料为硅。改变扇叶数量,分别将原来的 6 个扇叶变为 3 个和 12 个。扇叶的分布均匀,其它的条件与原来相同。它们的 CD 变化关系如图 6 所示。从图中可以看出,扇叶的数量对结构的 CD 影响很大,当扇叶数量达到 12 时,圆二向色性明显变弱,甚至消失。原因是扇叶变多,等离子元振荡的有效区域变大,所以,无论是右旋还是左旋,圆偏振光入射时,结构的损耗都变大,从而削弱了结构的 CD 信号。

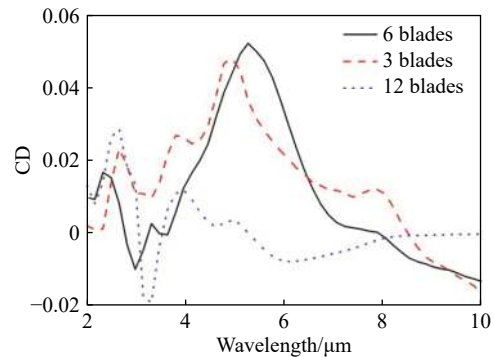


图6 扇叶数量变化时圆二色性随波长的变化图

Fig. 6 Circular dichroism as a function of wavelength when the number of the fan blades is changed

3.5 等离子元材料变化

保持填充层材料为硅。将扇叶的材料分别变为银和金,其它的条件与原来相同,分别研究结构的 CD,模拟结果如图 7 所示。

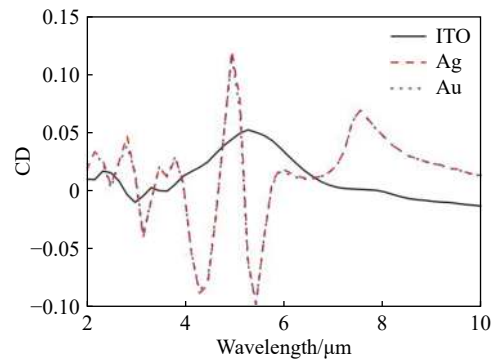


图7 扇叶材料变化时圆二色性变化关系图

Fig. 7 Circular dichroism as a function of wavelength when the material of the fan blades is changed

可以看出,当材料变为银或金时,两种材料结构的 CD 几乎不变,这是由于这两种材料的介电常数在该波长区间变化很小,导致等离共振行为几乎不变。它们的 CD 振荡相较于 ITO 材料结构变多,这是因为在该波段金银的折射率实部较 ITO 大的多,折射率的实部大会使得波传播过程中振荡更快,从而导致它们的 CD 响应宽度变窄。上述实验证明采用 ITO 材料的结构在中红外波段具有宽带的 CD 特性。

4 结 论

为了克服传统中红外激光偏振态调控所使用的控制元件体积大、成本高、难以集成等不足,本

文设计了中红外波段手性超材料。将中红外等离激元材料 ITO 引入到手性超结构中,并将其设计成风扇型,从数值上研究了结构的圆二向色性。数值结果显示,在中红外波段,结构展示出 CD 特性。要获得强的 CD 信号,除了优先选择填充材料外,还存在最佳的结构厚度、风扇大小和叶片数量组合。当填充材料为硅、扇叶为六片时,选取合适的扇叶厚度 400 nm 和扇叶的臂长 750 nm,在 5.3 μm 附近获得最强的 CD 信号,为 0.052。与贵金属银、金制成的手性结构相比,银或金结构的 CD 信号振荡多,带宽窄,而由 ITO 构成的结构则展现出良好的宽带圆二向色性。这种设计思想为中红外波段宽带偏振态调控器件的设计提供了新的思路。

参考文献:

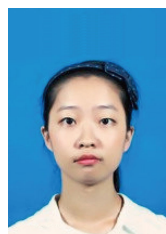
- [1] BISWAS S, DUAN J, NEPAL D, *et al.*. Plasmonic resonances in self-assembled reduced symmetry gold nanorod structures[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(5): 2220-2225.
- [2] HUANG L L, CHEN X Z, BAI B F, *et al.*. Helicity dependent directional surface plasmon polariton excitation using a metasurface with interfacial phase discontinuity[J]. *Light Science & Applications*, 2013, 2(3): e70.
- [3] LIN J, MUELLER J P B, WANG Q, *et al.*. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons[J]. *Science*, 2013, 340(6130): 331-334.
- [4] RICCIARDI A, CONSOLES M, QUERO G, *et al.*. Versatile optical fiber nanoprobe: from plasmonic biosensors to polarization-sensitive devices[J]. *Acs Photonics*, 2014, 1(1): 69-78.
- [5] ROGACHEVA A V, FEDOTOV V A, SCHWANECHE A S, *et al.*. Giant gyrotropy due to electromagnetic-field coupling in a bilayered chiral structure[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(17): 177401.
- [6] ZHANG S, PARK Y-S, LI J, *et al.*. Negative refractive index in chiral metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(2): 023901.
- [7] FANG Y, VERRE R, SHAO L, *et al.*. Hot electron generation and cathodoluminescence nanoscopy of chiral split ring resonators[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8): 5183-5190.
- [8] FU T, QU Y, WANG T R, *et al.*. Tunable chiroptical response of chiral plasmonic nanostructures fabricated with chiral templates through oblique angle deposition[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(2): 1299-1304.
- [9] HE Y, LARSEN G K, INGRAM W, *et al.*. Tunable three-dimensional helically stacked plasmonic layers on nanosphere monolayers[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(4): 1976-1981.
- [10] HE Y Z, LAWRENCE K, INGRAM W, *et al.*. Strong local chiroptical response in racemic patchy silver films: enabling a large-area chiroptical device[J]. *Acs Photonics*, 2015, 2(9): 1246-1252.
- [11] KOLKOWSKI R, PETTI L, RIPPA M, *et al.*. Octupolar plasmonic meta-molecules for nonlinear chiral watermarking at subwavelength scale[J]. *Acs Photonics*, 2015, 2(7): 899-906.
- [12] BOCHENKOV V E, SUTHERLAND D S. Chiral plasmonic nanocrescents: large-area fabrication and optical properties[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27101-27108.
- [13] MARK A G, GIBBS J G, LEE T C, *et al.*. Hybrid nanocolloids with programmed three-dimensional shape and material composition[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(9): 802-807.
- [14] HAN C, YANG L, YE P, *et al.*. Three dimensional chiral plasmon rulers based on silver nanorod trimers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10315-10325.

- [15] GOERLITZER E S A, MOHAMMADI R, NECHAYEV S, *et al.*. Large-area 3D plasmonic crescents with tunable chirality[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(15): 1801770.
- [16] GANSEL J K, THIEL M, RILL M S, *et al.*. Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer[J]. *Science*, 2009, 325(5947): 1513-1515.
- [17] SCHNELL M, SARRIUGARTE P, NEUMAN T, *et al.*. Real-space mapping of the chiral near-field distributions in spiral antennas and planar metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(1): 663-670.
- [18] ZHANG S J, LI Y, LIU Z-P, *et al.*. Two-photon polymerization of a three dimensional structure using beams with orbital angular momentum[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(6): 061101-061104.
- [19] NAIK G V, SHALAEV V M, BOLTASSEVA A. Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(24): 3264-3294.
- [20] LYNCH D W, HUNTER W R. *Handbook of Optical Constants of Solids*[M]. Academic, 1985.

作者简介:



朱叶欣(1998—)女,江苏盐城人,本科,主要从事微纳结构材料的设计及其电磁调控特性研究。E-mail: 1027781149@qq.com



李亚楠(1998—)女,江苏南京人,大学生,主要从事微纳结构材料的设计及其电磁调控特性研究。Email: 3131857055@qq.com



张文涛(1976—),女,江苏徐州人,讲师,2007年于中国矿业大学获得硕士学位,主要从事微纳结构材料及器件方面的研究。Email: zhangwentao@xzit.edu.cn



闫长春(1972—),男,江苏新沂人,教授,1996年于徐州师范大学获得学士学位;2000年于苏州大学获得硕士学位;2009年于东南大学获得博士学位;主要从事微纳结构材料及器件方面的研究。E-mail: yhchangchun@163.com