

激光与光电子学进展

旋转螺旋型中红外手性超材料的宽带圆二向色性

张文涛¹, 施维捷², 郭慧², 闫长春^{2*}¹徐州工程学院物理与新能源学院, 江苏 徐州 221018;²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

摘要 提出了由四个不同旋转方向的氧化铟锡(ITO)螺旋子单元组成的周期性中红外宽带手性结构。模拟结果显示,通过优化子单元螺旋的圈数、螺旋半径、螺距和螺旋线半径,该结构在中红外波段实现了良好的宽带圆二向色性(CD)。与两种非旋转螺旋结构比较发现,ITO旋转螺旋结构的CD带宽更宽。在波长7.95 μm处,ITO旋转螺旋结构获得CD的最大值为0.454,CD的半峰全宽为7.5 μm,波长范围从4.1到11.6 μm。产生宽带CD的原因是四个不同旋转方向的ITO螺旋子单元之间存在较强的耦合。模拟结果还显示,在中红外波段,与金属(金和银)旋转螺旋结构相比,该ITO旋转螺旋结构表现出了良好的宽带CD,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 光学材料; 氧化铟锡; 旋转螺旋结构; 中红外波段; 手性超材料; 圆二向色性

中图分类号 TN214

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0516002

Broadband Circular Dichroism of Rotating Helical-Typed Mid-Infrared Chiral Metamaterials

Zhang Wentao¹, Shi Weijie², Guo Hui², Yan Changchun^{2*}¹School of Physics and New Energy, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou, Jiangsu 221018, China;²Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract A periodic mid-infrared broadband chiral structure is proposed, in which each unit is composed of four indium tin oxide (ITO) helical subunits in different rotating directions. The simulation results show that the flat-topped broadband circular dichroism (CD) can be achieved in the mid-infrared waveband by optimizing the number of helical turns, the helical radius, the pitch of helix, and the wire radius of helix. Compared with the two non-rotating helical structures, the CD band of the ITO rotating helical structure is found to be broader. At the wavelength of 7.95 μm, for the ITO rotating helical structure, the maximum value of CD is 0.454 and the full width at half maximum (FWHM) of CD is 7.5 μm in the wavelength ranging from 4.1 to 11.6 μm. The broadband CD is caused by the strong coupling among the four ITO helical subunits in different rotating directions. The simulation results also show that compared with the gold and silver rotating helical structures, the proposed structure exhibits evidently better broadband CD, which provides a new idea for the design of broadband polarization state control devices in the mid-infrared band.

Key words optical materials; indium tin oxide; rotating helical structure; mid-infrared waveband; chiral metamaterial; circular dichroism

收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2021-09-18; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61771227、62071208)、江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(201910320039Z)

通信作者: *yancc@jsnu.edu.cn

1 引言

中红外激光在通信、医疗、国防等方面有着重要的应用^[1-3]。对中红外激光传输的有效控制,是决定中红外激光能否得到更好应用的重要因素。而中红外激光偏振态的调控是中红外激光传输控制中的关键环节。手性超材料作为一种新型人工电磁材料,被广泛研究,在偏振态调控方面显示出较强的能力^[4-8]。它具有两种重要的性质^[9]:一是光学活性,它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),由于手性超材料对左旋圆偏振光(LCP)和右旋圆偏振光(RCP)吸收不同,所以它表征左旋和右旋圆偏振光之间透过率的差异。由于手性超材料的手性特性只发生在结构的振荡波长附近,目前已报道的手性超材料的响应波长主要分布在微波^[10]、太赫兹^[11]、可见光或近红外区域^[12-18],也有少量报道^[19-22]响应波长分布在中红外波段。对于CD的研究,人们一方面寻求较强的CD响应,由于CD响应取决于手性超材料的单元结构尺寸和周期阵列排布,这类研究的带宽多局限于较窄的波长范围^[23-27]。如何拓展CD响应的带宽,成为CD研究的另外一个方向^[19,28-30]。Gansel等^[19]制备了金单螺旋结构,对垂直通过该结构的圆偏振光透射光谱进行测量,获得了较大带宽的高透比;Zhao等^[28]通过堆叠金纳米棒的方法来获得圆偏振光透射光谱的带宽增加;Ji等^[29]利用类螺旋超材料的堆叠结构实现了宽带圆偏振光的选择;Guo等^[30]设计了一种在正方形底座上伸展出不同半径的弯曲手臂的结构,实现CD带宽的展宽。以上手性超材料主要选用铜、银、金等传统的金属材料。这些金属具有诸多不足^[31],在中红外波段介电常数实部数值过大,化学稳定性较低,与标准硅工艺兼容性较弱,光学特性不可调,这些不足会影响由传统金属构成的中红外波段手性超材料的偏振态调控特性。鉴于传统金属材料的不足,研究者们一直在中红外波段寻找更好的等离激元材料。金属氧化物^[31]在中红外区域展现出金属特性,其具有介电常数实部数值较小,化学稳定性好等优点,可替代金、银等传统的等离激元材料。本课题组曾将中红外等离激元材料氧化铟锡(ITO)制作成L型结构^[22],结果显示该结构在中红外波段相较于传统金属具有更明显的CD。

本文将ITO设计成螺旋结构,结构的每一个单

元由四个尺寸相同的螺旋子单元构成,相邻的螺旋子单元依次旋转 90° 。模拟结果显示该结构具有较大的CD值,也具有明显的CD带宽增宽效果,为实现中红外激光偏振态宽带调控提供了一条有效途径。

2 结构和模拟

如图1所示,本文设计的超材料为周期阵列结构。每个周期单元由四个螺旋子单元构成,每个子单元由结构尺寸相同的螺旋构成,相邻的螺旋子单元依次旋转 90° 。坐标原点位于基底上表面中心,每个螺旋位于每一个四分之一周期的中心。螺旋的组成材料为ITO,基底材料为硅(Si)。四个子单元中的螺旋半径 $R=0.3\ \mu\text{m}$,螺旋线半径 $r=0.2\ \mu\text{m}$,螺距 $p=2.2\ \mu\text{m}$,螺旋圈数 $N=2$,周期 $a=2.4\ \mu\text{m}$ 。该螺旋超材料可以通过已应用于多种复杂螺旋结构制备的激光直写或受激损耗激光光刻技术^[19,32-33]制备。

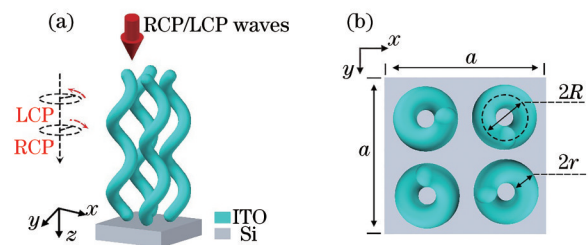


图1 旋转螺旋手性超材料单元结构示意图。(a) 3D视图; (b) 俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of chiral unit cell composed of rotating helix. (a) Three-dimensional view; (b) top view

利用有限差分域(FDTD)软件进行仿真,由于结构具有周期性,因此只需选择一个单元进行模拟。假设RCP与LCP分别沿 z 轴正方向入射。 z 方向上的两个边界设置为完美匹配层(PLMs)边界条件。 x 和 y 方向上的边界,设置为周期性边界条件。衬底Si的介电常数来源于实验数据^[34],ITO的介电常数采用Drude-Lorentz模型^[31]来计算。

3 模拟结果与讨论

通过FDTD模拟,将分别计算出的RCP与LCP的透射光谱代入如下CD公式^[24]

$$S_{\text{CD}} = T_- - T_+, \quad (1)$$

可以得到波长在 $3\sim 13\ \mu\text{m}$ 区间的CD光谱,如图2所示。式中, T_- 、 T_+ 分别代表LCP和RCP的透射

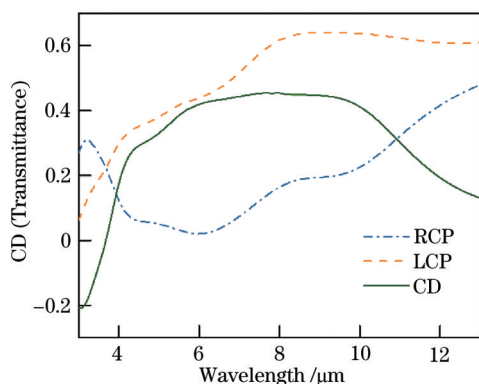


图 2 结构的 CD 和对 RCP 和 LCP 的透射率光谱
Fig. 2 CD and transmittance spectra of structure for RCP and LCP incident waves

率。从图中可以看出,在该波段区间,RCP 与 LCP 的透射率存在明显差异,从而使得结构具有明显的 CD 特性。在波长 $7.95 \mu\text{m}$ 处,CD 达到最大值 0.454。假设 CD 的半峰全宽(FWHM)为 CD 最大值下降到一半时波长的覆盖范围。则该结构 CD 的 FWHM 为 $7.5 \mu\text{m}$,波长范围从 $4.1 \mu\text{m}$ 到 $11.6 \mu\text{m}$ 。且在波长 $3.7 \sim 13.0 \mu\text{m}$ 范围内,LCP 的透射率大于 RCP 的透射率。本文选取的模型为右

旋螺旋结构,当 RCP 入射时,电磁波的圆极化方向和螺旋结构的旋转方向相同,构成螺旋结构的等离激元材料 ITO 中发生了较强的等离激元振荡,振荡吸收增强。而当 LCP 入射时,电磁波的圆极化方向和螺旋结构的旋转方向相反,ITO 中发生的等离激元振荡较右旋圆偏振入射时弱,吸收也较弱。从而使 LCP 的透射率大于 RCP 的透射率,产生明显的 CD 现象。

对 RCP 和 LCP 垂直入射时,结构中与人射方向垂直平面(xy 平面)的电场强度分布进行了模拟。选取波长 $7.95 \mu\text{m}$,从入射端到出射端每间隔 $0.55 \mu\text{m}$ 选取一个截面,电场强度分布如图 3 所示。从图中可以看出,当 RCP 入射时,结构上端的场强最强,等离激元振荡最为剧烈,自上而下,场强逐渐减弱。而对于 LCP 入射时,结构中上部场强变化不大,结构下部场强最强,等离激元振荡下部最强。比较 RCP 和 LCP 在结构中引起的等离激元振荡,RCP 较 LCP 强,所以结构对 RCP 的吸收比对 LCP 的吸收强,从而产生了明显的 CD 现象。这与图 2 的结果一致,并且螺旋之间存在明显的耦合现象。

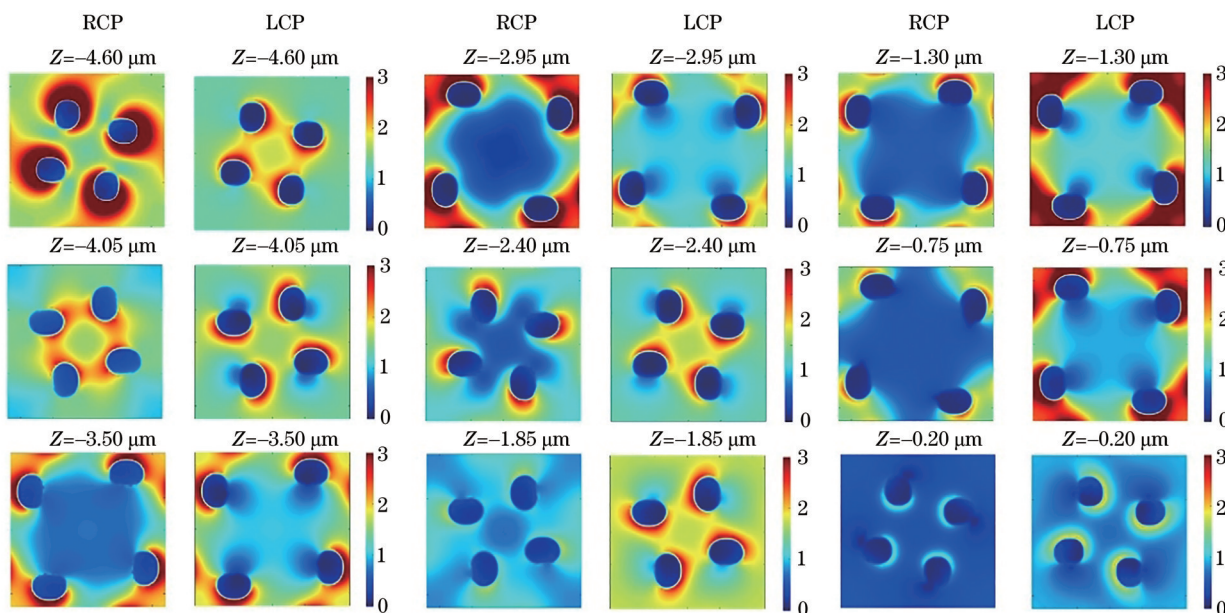


图 3 在 $7.95 \mu\text{m}$ 波长处的 RCP 和 LCP 入射时,垂直入射方向不同水平横截面的电场强度分布
Fig. 3 Distributions of electric field intensities at different cross sections vertical to incident direction under RCP and LCP waves at wavelength of $7.95 \mu\text{m}$

3.1 与单个螺旋结构和不同旋转角度螺旋结构对比

本文构建的模型为同一单元内含有四个结构相同、相邻螺旋旋转角度为 90° 的子单元。为了便

于比较,还模拟了以下两种结构的 CD。结构 1:保持原单元周期,只包含一个子单元结构的单螺旋,单螺旋位于周期的中心;结构 2:四个螺旋结构不发生旋转,即旋转角度为 0° (结构等同于原周期 $1/4$ 的

单螺旋)。将它们的 CD 与原结构的 CD 进行比较,结果如图 4 所示。结构 1 即同周期的单螺旋结构, CD 峰值出现在波长 $5.60 \mu\text{m}$ 处,其值为 0.430 , CD 的 FWHM 为 $3.2 \mu\text{m}$, 波长范围从 $4.3 \mu\text{m}$ 到 $7.5 \mu\text{m}$ 。结构 2 即保持原单元周期、四个螺旋结构不发生旋转的结构, CD 峰值出现在 $4.97 \mu\text{m}$ 处,数值为 0.431 , CD 的 FWHM 为 $2.9 \mu\text{m}$, 波长范围从 $3.5 \mu\text{m}$ 到 $6.4 \mu\text{m}$ 。与这两种结构相比,图 1 原结构宽带效果明显增强, CD 的 FWHM 分别为两者的 2.34 倍和 2.58 倍。另外,图 4 还列出另外两种不同旋转角度的螺旋结构,即在结构 2 的基础上,保持其

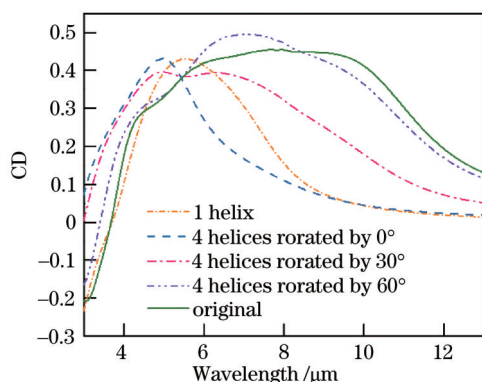


图 4 原结构、同周期单一螺旋结构和不同旋转角度螺旋结构的 CD

Fig. 4 CD properties of original structure, same periodic single helical structure and different angle rotating helical structures

中一个子单元不变,其他三个子单元依次沿顺时针方向在上一螺旋的基础上分别旋转 30° 和 60° 。图中结果显示,这两种旋转螺旋结构虽然较结构 1 和结构 2 这两种非旋转螺旋的 CD 带宽有所增加,但 CD 的宽带不如图 1 原结构理想。

同时也对 RCP 和 LCP 垂直入射时,结构 2 与入射方向垂直平面 (xy 平面) 的电场强度分布进行了模拟。选取波长为 $4.97 \mu\text{m}$ (结构 2 的 CD 峰值对应的波长),从入射端到出射端每间隔 $0.55 \mu\text{m}$ 选取一个截面,电场强度分布如图 5 所示。从图中可以看出,与图 3 的电场分布相似,当 RCP 入射时,结构上端的场强最强,等离激元振荡最为剧烈,自上而下,场强逐渐减弱,结构最下端,电场基本减弱为零。而对于 LCP 入射时,结构场强分布变化不大,电场在下端略有增强。从图 5 中还可以看出, RCP 和 LCP 与结构 2 相互作用,引起的等离激元振荡主要集中在单一螺旋中,而引起相邻螺旋之间的相互作用较弱,螺旋之间不存在明显的耦合现象。对于旋转螺旋结构,螺旋子单元之间发生相互旋转,使得螺旋之间的距离减小或增大(相同的 xy 平面,见图 3)。同周期的螺旋子单元距离减小,螺旋之间相互作用增强,螺旋之间存在较强的耦合现象。同周期的螺旋子单元距离增大,使得螺旋与相邻周期的螺旋距离减小,螺旋之间的相互作用同样增强,耦合现象明显,如图 3 所示。因此,旋转螺旋结构区别

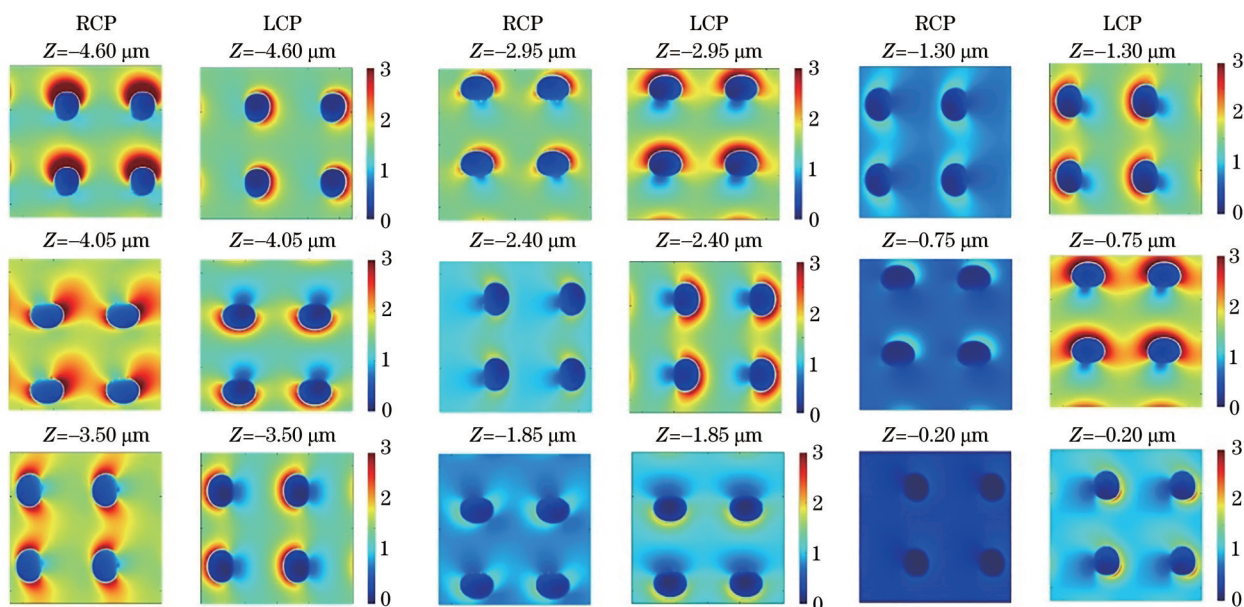


图 5 在 $4.97 \mu\text{m}$ 波长处的 RCP 和 LCP 入射时,结构 2 垂直入射方向不同水平横截面的电场强度分布

Fig. 5 Distributions of electric field intensities of structure 2 at different cross sections vertical to incident direction under RCP and LCP waves at wavelength of $4.97 \mu\text{m}$

于单一螺旋的是,螺旋子单元之间存在较强的耦合作用。正是螺旋之间强烈的耦合作用拓宽了旋转螺旋的 CD 带宽,这也是旋转螺旋结构较结构 2 产生 CD 的带宽更宽的原因。

3.2 改变圈数

改变图 1 结构中螺旋的圈数,分别为 1、2 和 3 圈,其他结构参数不变。分别模拟其 CD,结果如图 6 所示。图中显示,随着圈数的增加,CD 值逐渐增大,CD 的带宽随圈数的变化明显。圈数 $N=1$ 的旋转螺旋结构 CD 出现两个峰值,而对于圈数更高的旋转螺旋,这两个 CD 峰值演化到一个 CD 宽带中。为了加深对三种情况 CD 的理解,图 7 显示了 RCP 和 LCP 入射不同圈数结构的透射光谱。从图中可以看出随着圈数的增加,结构对 RCP 的透射率不断降低。而圈数的增加也使 LCP 的透射率降低,但影响弱于 RCP。因此,圈数增加,CD 数值增加。

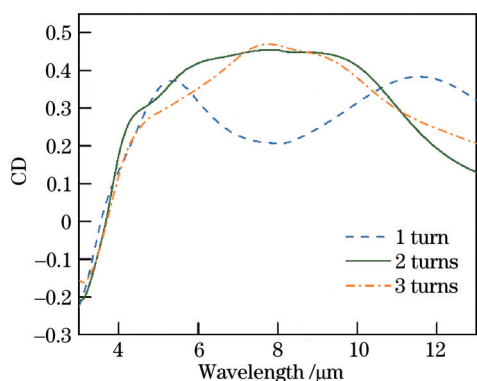


图 6 螺旋圈数分别为 1、2 和 3 圈时,结构的 CD 特性
Fig. 6 CD properties of structures with 1, 2, and 3 turns of helices, respectively

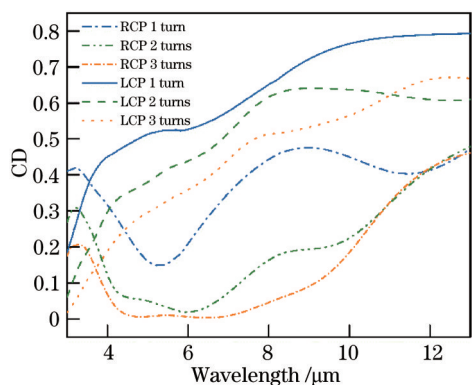


图 7 螺旋圈数分别为 1、2 和 3 圈时,结构的 RCP 和 LCP 的透射光谱
Fig. 7 Transmittance spectra of structures for LCP and for RCP waves when turn numbers of helices are 1 turn, 2 turns, and 3 turns, respectively

此外,随着圈数的增加,右螺旋结构对偏振态相匹配的 RCP 入射波宽阻带效果越明显。因此,受上述原因共同作用, $N=2$ 的旋转螺旋结构具有更优良的宽带 CD 特性。

3.3 改变螺旋半径

分别将图 1 结构中的螺旋半径缩小 80% 和扩大 1.2 倍,其他参数不变,研究螺旋半径变化对结构 CD 的影响。结构的 CD 模拟结果如图 8 所示。从图中可以看到,随着螺旋半径的增大,CD 的响应波长发生红移现象;反之,发生蓝移。并且,随着螺旋半径的增大,宽带范围也逐渐增大。根据螺旋天线理论^[35],螺旋天线的工作波长范围满足

$$\lambda \in 2\pi R \left[\frac{3}{4}, \frac{4}{3} \right]. \quad (2)$$

因此随着螺旋半径的增大,工作波长出现了红移。

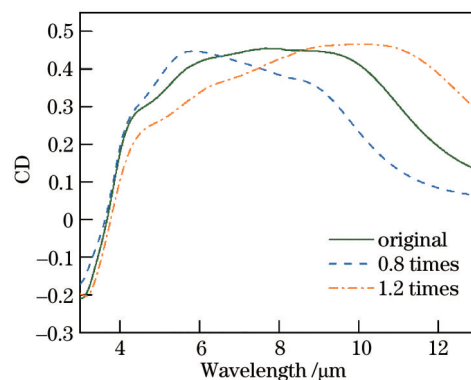


图 8 螺旋半径分别为原结构半径的 0.8 和 1.2 倍时,结构的 CD 特性
Fig. 8 CD properties of structures when helical radii are 0.8 and 1.2 times of original radius, respectively

3.4 改变螺距

保持其他参数不变,改变图 1 结构中螺旋结构的螺距,分别取螺距为 2.0、2.2、2.4 μm ,模拟结构的 CD,结果如图 9 所示。从图中可以看出,CD 的带宽随着螺距的增加发生红移,CD 值随着螺距的增加略有增加。这可以解释为,当光入射到螺旋超材料时,会在结构表面激励出表面电流,由于螺旋之间的相互作用引起表面电流之间的相互吸引或排斥,使其在 xy 平面投影的电流环半径发生变化。表面电流在 xy 平面投影的电流环半径随着螺距的增加而增加^[36],等同于螺旋半径增加,因此 CD 带宽红移。又由于随着螺距增大,RCP 和 LCP 的透射率都降低,但 LCP 降低幅度小于 RCP,CD 值略微增大。

3.5 改变螺旋线半径

改变图 1 结构中螺旋线半径,分别取螺旋线半

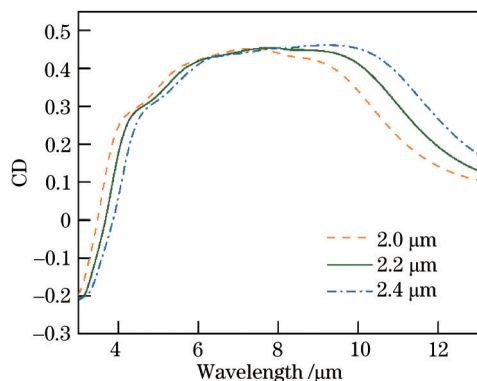


图 9 螺距分别为 2.0、2.2、2.4 μm 时,结构的 CD 特性
Fig. 9 CD properties of structures with different pitches of helices of 2.0, 2.2 and 2.4 μm, respectively

径为 0.15、0.20 和 0.25 μm,其他参数不变,结构的 CD 模拟结果如图 10 所示。随着螺旋线半径的增加,结构的尺寸也逐渐增加,CD 的响应波长向长波方向移动,发生红移现象。

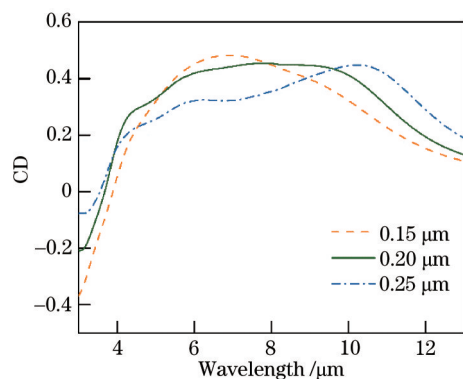


图 10 螺旋线半径分别为 0.15、0.20、0.25 μm 时,结构的 CD 特性

Fig. 10 CD properties of structures with different wire radii of 0.15, 0.20, and 0.25 μm, respectively.

3.6 改变子单元的螺旋半径和螺旋圈数

此外还模拟了具有不同螺旋半径和圈数的旋转螺旋结构的 CD 特性。即在图 1 结构的基础上,分别改变四个螺旋子单元的螺旋半径,分别取 0.25、0.30、0.35、0.40 μm,其他参数保持不变,构成具有不同螺旋半径的旋转螺旋结构。同样在图 1 结构的基础上,分别改变四个螺旋子单元的螺旋圈数,分别取 1.5、2、2.5、3 圈,其他参数保持不变,构成具有不同螺旋圈数的旋转螺旋结构。结果如图 11 所示,从图中可以看出,子单元的螺旋半径和螺旋圈数对 CD 均会产生一定的影响。子单元的螺旋半径变化,CD 带宽有所增加。子单元的螺旋圈数不同,CD 峰值增加,但带宽减小。

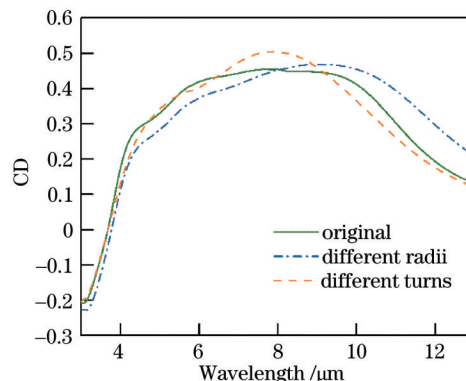


图 11 子单元的螺旋半径分别为 0.25、0.30、0.35、0.40 μm 和旋转圈数分别为 1.5、2、2.5、3 圈时,结构的 CD 特性
Fig. 11 CD properties of structures when helical radii of subunit cells are 0.25, 0.30, 0.35, and 0.40 μm, and helical turns of subunit cells are 1.5, 2, 2.5, and 3, respectively

3.7 改变螺旋结构的组成成分

改变图 1 旋转螺旋结构的成分,用金 (Au) 和银 (Ag) 替代 ITO,其他参数不变,比较三种材料对结构 CD 的影响。Au 和 Ag 的介电常数来源于实验数据^[34]。结构的 CD 模拟结果如图 12 所示。从图中可以看出,当材料变为金和银时,两种材料结构的 CD 曲线与 ITO 结构的 CD 曲线相比,其 CD 曲线振荡较多,所以 CD 带宽较窄。因此,要获得宽带的 CD 特性,需要选择由 ITO 材料构成。此外,两种材料结构的 CD 曲线几乎重合,这是由于两种材料的介电常数在该波段变化很小,导致等离激元共振行为几乎相同。

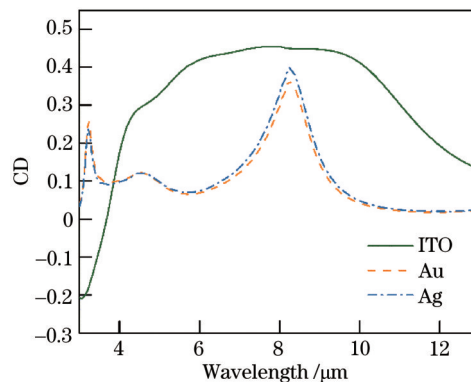


图 12 结构材料分别为 ITO, Au 和 Ag 时,结构的 CD 特性
Fig. 12 CD properties of structures with different components consisting of ITO, Au and Ag, respectively

4 结 论

提出了由四个旋转角为 90° 的 ITO 螺旋子单元

组成的周期性手性结构,实现了中红外波段的宽带 CD。改变每个子单元螺旋的圈数、螺旋半径、螺距和螺旋线半径,模拟结果显示,结构的 CD 受到较大的影响,通过优化螺旋结构参数,可以实现良好的宽带 CD。将此结构和同周期的单螺旋和非旋转的四螺旋结构进行比较,发现 ITO 旋转螺旋结构的 CD 带宽更宽。在波长 $7.95\ \mu\text{m}$ 处,获得 CD 的最大值为 0.454, CD 的 FWHM 为 $7.5\ \mu\text{m}$ 。同时也将 ITO 旋转螺旋与金属(金和银)旋转螺旋进行了比较,模拟结果发现,在中红外波段,金属螺旋结构的 CD 振荡较强,而 ITO 螺旋结构却表现出良好的宽带 CD。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。

参 考 文 献

- [1] Yuan Y, Chai X L, Yang C A, et al. 2.75- μm mid-infrared GaSb-based quantum well lasers with quinary alloy barrier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701026.
袁野, 柴小力, 杨成奥, 等. 2.75 μm 中红外 GaSb 基五元化合物势垒量子阱激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701026.
- [2] Nie H K, Ning J, Zhang B T, et al. Recent progress of optical-superlattice-based mid-infrared optical parametric oscillators[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501008.
聂鸿坤, 宁建, 张百涛, 等. 光学超晶格中红外光参量振荡器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501008.
- [3] Wang Q, Qi L, Wang R Y, et al. Research progress of mid infrared laser via intra-pulse difference frequency generation of femtosecond laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1700001.
王庆, 漆磊, 王润雨, 等. 飞秒激光脉内自差频产生中红外激光研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1700001.
- [4] Höfllich K, Feichtner T, Hansjürgen E, et al. Resonant behavior of a single plasmonic helix[J]. Optica, 2019, 6(9): 1098-1105.
- [5] He C, Sun T, Guo J J, et al. Chiral metalens of circular polarization dichroism with helical surface arrays in mid-infrared region[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(24): 1901129.
- [6] Khorashad L K, Besteiro L V, Correa-Duarte M A, et al. Hot electrons generated in chiral plasmonic nanocrystals as a mechanism for surface photochemistry and chiral growth[J]. Journal of the American Chemical Society, 2020, 142(9): 4193-4205.
- [7] Droulias S, Bougas L. Surface plasmon platform for angle-resolved chiral sensing[J]. ACS Photonics, 2019, 6(6): 1485-1492.
- [8] Kaschke J, Blome M, Burger S, et al. Tapered N-helical metamaterials with three-fold rotational symmetry as improved circular polarizers[J]. Optics Express, 2014, 22(17): 19936-19946.
- [9] Tanaka K, Arslan D, Fasold S, et al. Chiral bilayer all-dielectric metasurfaces[J]. ACS Nano, 2020, 14(11): 15926-15935.
- [10] Rogacheva A V, Fedotov V A, Schwanecke A S, et al. Giant gyrotropy due to electromagnetic-field coupling in a bilayered chiral structure[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(17): 177401.
- [11] Zhang S, Park Y S, Li J, et al. Negative refractive index in chiral metamaterials[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(2): 023901.
- [12] Fang Y R, 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.
- [13] Fu T, Qu Y, Wang T K, et al. Tunable chiroptical response of chiral plasmonic nanostructures fabricated with chiral templates through oblique angle deposition [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(2): 1299-1304.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Bochenkov V E, Sutherland D S. Chiral plasmonic nanocrescents: large-area fabrication and optical properties[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 27101-27108.
- [17] Han C R, Yang L C, Ye P, et al. Three dimensional chiral plasmon rulers based on silver nanorod trimers [J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10315-10325.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Zhu Y L, Cao B W, Li J W, et al. L-shaped ITO structures fabricated by oblique angle deposition technique for mid-infrared circular dichroism[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33243-33250.
- [23] Kwon D H, Werner P L, Werner D H. Optical planar chiral metamaterial designs for strong circular dichroism and polarization rotation[J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 11802-11807.
- [24] Wu S, Qu P P, Liu J Q, et al. Giant circular dichroism and its reversal in solid and inverse plasmonic gammadion-shaped structures[J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27763-27770.
- [25] Fasold S, Linß S, Kawde T, et al. Disorder-enabled pure chirality in bilayer plasmonic metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1773-1778.
- [26] Qu Y, Huang L S, Wang L, et al. Giant circular dichroism induced by tunable resonance in twisted Z-shaped nanostructure[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5480-5487.
- [27] Wang Y E, Qi J W, Pan C P, et al. Giant circular dichroism of large-area extrinsic chiral metal nanorecents[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 3351.
- [28] Zhao Y, Belkin M A, Alù A. Twisted optical metamaterials for planarized ultrathin broadband circular polarizers[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 870.
- [29] Ji R N, Wang S W, Liu X X, et al. Broadband circular polarizers constructed using helix-like chiral metamaterials[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(31): 14725-14729.
- [30] Guo J C, Kim J Y, Yang S S, et al. Broadband circular polarizers via coupling in 3D plasmonic meta-atom arrays[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(5): 1286-1292.
- [31] Naik G V, Shalaev V M, Boltasseva A. Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(24): 3264-3294.
- [32] Gansel J K, Latzel M, Frölich A, et al. Tapered gold-helix metamaterials as improved circular polarizers[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(10): 101109.
- [33] Kaschke J, Wegener M. Gold triple-helix mid-infrared metamaterial by STED-inspired laser lithography[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 3986-3989.
- [34] Palik E D. *Handbook of optical constants of solids* [M]. New York: Academic Press, 1997.
- [35] Kraus J D, Marhefka R J. *Antennas: for all applications* [M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [36] Yu Y, Yang Z Y, Li S X, et al. Higher extinction ratio circular polarizers with hetero-structured double-helical metamaterials[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10886-10894.