

引用格式: JING Yueyang, LI Peili, ZHANG Yajie, et al. Liquid Crystal-based Wide-angle Terahertz Tunable Metasurface Absorber[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(10):1052421

井越洋,李培丽,张亚杰,等. 基于液晶的广角太赫兹可调谐超表面吸波器[J]. 光子学报, 2023, 52(10):1052421

基于液晶的广角太赫兹可调谐超表面吸波器

井越洋,李培丽,张亚杰,曹阳,陈羽

(南京邮电大学 电子与光学工程学院,南京 210023)

摘 要:提出了一种结构简单的广角稳定太赫兹可调谐超表面吸波器,利用液晶材料电可调谐的性质,实现超表面吸波器吸收频率的调谐。利用液晶材料介电常数张量进行材料建模,模拟了液晶材料的各向异性特性。为了提高设计效率,得到良好的吸波性能和可调谐性能,利用粒子群算法对超表面吸波器单元结构进行了逆向设计;并对设计的超表面吸波器特性进行研究。结果表明,利用粒子群算法可以高效地逆向设计出性能良好超表面吸波器,当对吸波器施加的电压在 0~10 V 范围内连续调谐时,实现了 TE 模式吸波频率在 404.4~444.4 GHz 范围内连续可调谐,频率可调谐性为 9%,吸收率大于 99%; TM 模式吸波频率在 404.4~425.4 GHz 范围内连续可调谐,频率可调谐性为 4.64%,吸收率大于 99%;当斜入射角度为 60°时,吸收率仍大于 94%,具有大角度入射稳定性和吸收频率稳定性。本文设计的太赫兹超表面吸波器具备高吸收率、大频率可调谐性、广角稳定性和低控制电压等优点,具有广泛的应用价值。

关键词:液晶;超表面;粒子群优化;可调谐;吸波器

中图分类号:TN25

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235210.1052421

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波段指的是波长范围为 30~3 000 μm (频率范围在 0.1~10 THz 之间)的波段^[1],在军事、医疗、工业和通信等领域得到了广泛的应用^[2-4]。然而,自然界中对太赫兹波有响应的材料十分稀少,这阻碍了太赫兹技术的发展。超材料作为具有亚波长谐振单元阵列的人工复合材料,具有天然材料所不具备的独特电磁特性,它的出现为太赫兹器件的发展开辟了新的途径^[5,6]。超表面是超材料的二维形式^[7],相对于超材料具有许多优点,如尺寸小、重量轻,已被应用于透镜^[8]、吸波器^[9]、传感器^[10]、滤波器^[11]和偏振转换器^[12]等方面。

在应用环境多变的情况下,具备工作性能可调控的超表面成为了超表面领域中的研究热点^[13]。石墨烯^[14]、钛酸锶^[15]等材料具有电磁特性可调谐的特点,可以用来实现超表面的电磁特性的调控,从而改变超表面的工作特性,但是这些材料的结构制造以及生产工艺仍然具有挑战性。液晶(Liquid crystal, LC)因其低成本、电磁特性可调谐的特性,成为研究者广泛研究的对象^[16]。通过施加外部偏压来使液晶分子改变偏转方向,可以实现 LC 的等效介电常数的连续调谐。由于液晶器件在较高频率下具有低损耗、低剖面的优点,以及制造的低成本,其在可重构超表面中的应用受到了越来越多的关注。

吸波器(Absorber)可以对某一频率或某些频率的入射电磁波完美吸收,在电磁兼容、电磁屏蔽等领域应用广泛^[17]。而传统吸波材料具有体积大、重量大、稳定性差等缺点,超表面吸波器的出现将解决这些问题。在超表面吸波器中引入液晶材料,可以对超表面吸波器进行调控,从而实现吸波频率可调谐。随着无线电

基金项目:武汉光电国家研究中心 2022 年度开放基金(No. 2022WNLOKF012),江苏省研究生科研创新计划(Nos. KYCX22_0909, KYCX22_0989)

第一作者:井越洋,1021020709@njupt.edu.cn

通讯作者:李培丽,lipl@njupt.edu.cn

收稿日期:2023-07-29;录用日期:2023-10-18

<http://www.photon.ac.cn>

技术和智能雷达技术的发展,基于液晶材料的可调谐超表面吸波器成为了当前研究的热点。

2018年,YIN Zhiping等^[18]提出了一种基于液晶的偏振无关双波段可调谐超表面吸波器,两个波段的调谐范围分别为261.5~271 GHz和290.8~304.8 GHz,两个吸收峰的频率可调谐性($f_{\text{mod}} = \Delta f/f_{\text{max}}$)为3.51%和4.59%,最大吸收率分别为97.1%和95.3%;但斜入射时吸收频率出现较大的偏移,而且在30°时的吸收率下降到80%以下,在60°时的吸收率下降至75%。同年,该团队设计了一种基于聚合物网络液晶(Polymer Network Liquid Crystal, PNLC)的太赫兹频段可调谐超材料吸波体^[19],吸波器的吸收频率调谐范围为405.0~416.5 GHz调谐,频率可调谐性为2.8%。2021年DENG Guangsheng等^[20]设计了一种基于液晶的具有宽带吸收的可调谐超材料吸波器,频率调谐范围为119.9~130 GHz,频率可调谐性为7.8%,吸收率大于90%。2022年该团队设计了一种基于聚合物网络液晶的可调谐超表面吸波器^[21],吸收峰频率调谐范围为102.2~112.7 GHz,频率可调谐性为9.3%,当斜入射角达到60°时,吸收率在90%以上。上述研究中,在模拟液晶材料介电常数时,均等效为各向同性材料进行研究,忽略了偏振特性对吸收率的影响。

本文提出一种基于液晶的广角稳定太赫兹可调谐超表面吸波器,其单元结构的表面由两个方形环嵌套组成的方形环谐振器,结构简单,易于制备。对液晶材料介电常数进行各向异性建模,并利用液晶材料介电常数可电调谐的特点实现超表面吸波器的吸收频率可调谐。为了提高设计效率,并得到良好的吸波性能和可调谐性能,利用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对超表面单元结构的参数进行逆向设计。研究了超表面吸波器垂直入射时的吸收特性、频率可调谐性和偏振特性,以及不同入射角度下的电磁波吸收特性。利用谐振器理论和阻抗匹配理论,分析了吸波器的完美吸收的原理和大角度入射时的吸收情况。

1 结构设计

提出的超表面吸波器单元结构如图1(a)所示。该结构由上下石英层、金谐振器层、向列相液晶层(LC)、金反射板和涂敷在金属内侧的聚酰亚胺(PI)层构成。其中,石英顶板层和底板层用于支撑材料;PI层的作用是在没有偏置电场的情况下,使液晶分子平行于石英层表面;金谐振器层和金反射板层用作施加偏置电压的电极。金属层厚度 $h_M=0.3 \mu\text{m}$,PI层的厚度 $h_P=0.09 \mu\text{m}$,单元周期长度 $p=200 \mu\text{m}$ 。石英顶板和底板层的厚度为 h_Q 。如图1(b)为金谐振器层的形状及尺寸参数,该层由两个正方形环组成,外环较宽外边缘与单元边界对齐,内环较窄, a 为内环内径, w 为内外环间距, g 为内环宽度。

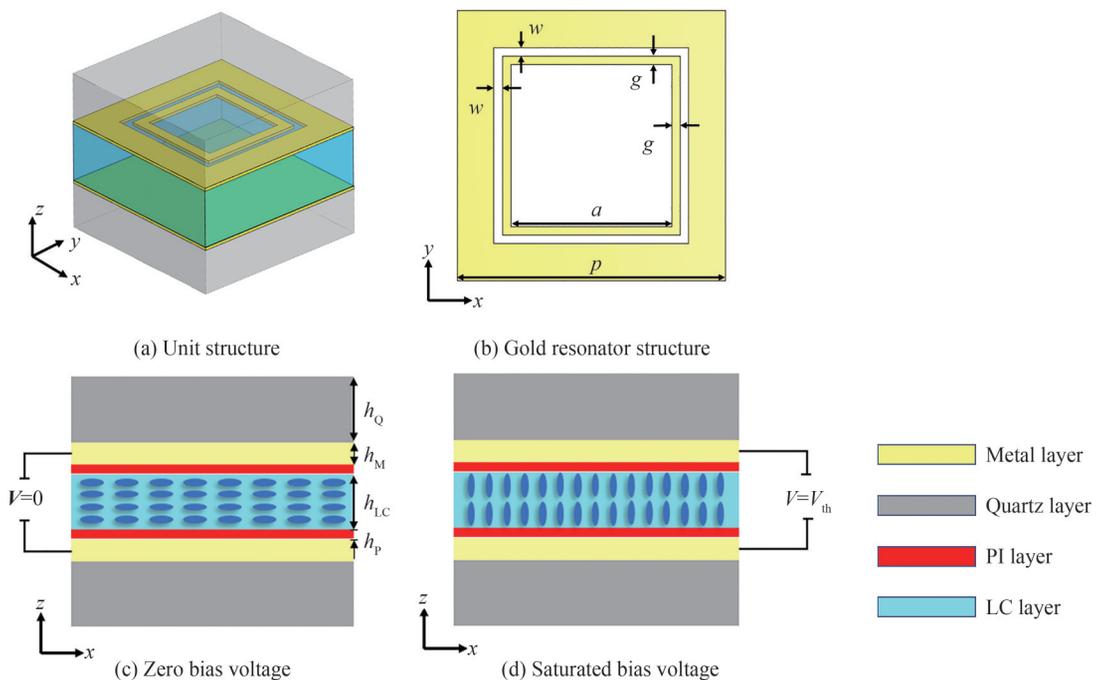


图1 超表面单元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the metasurface unit structure

选用HFUT-HB01^[22]型号的液晶材料,其损耗正切为 $\tan\delta=0.02$,具有介电常数调谐范围大、控制电压小等优点。液晶分子的偏转可以通过顶部金谐振器和底部金反射板之间的电压来控制。如图1(c)所示,在未加偏置电压时,LC分子由于PI层的摩擦作用,使其平行于金属层,垂直于电场方向,这种状态下LC层的介电常数 $\epsilon_{\perp}=2.47$ 。在金谐振器层与金反射板上施加偏置电压时,LC分子会受到PI层以及电场的共同作用。随着施加的偏置电压提高,PI层作用力的影响逐渐减小。达到一定偏置电压后LC分子近似平行于电场分布,如图1(d)所示,此时的电压称为此结构的饱和电压 V_{th} 。所用型号的液晶 $V_{th}=10V$,此时LC层的介电常数 $\epsilon_{//}=3.6$ 。

LC层为各向异性材料,其介电张量为^[23]

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中各分量为

$$\begin{cases} \epsilon_{11} = \epsilon_2 + \delta \cos^2 \varphi \\ \epsilon_{22} = \epsilon_2 + \delta \sin^2 \varphi \\ \epsilon_{33} = \epsilon_1 + (\epsilon_3 - \epsilon_1) \cos^2 \theta \\ \epsilon_{12} = \epsilon_{21} = 0.5\delta \sin 2\varphi \\ \epsilon_{13} = \epsilon_{31} = 0.5(\epsilon_3 - \epsilon_1) \sin 2\theta \cos \varphi \\ \epsilon_{23} = \epsilon_{32} = 0.5(\epsilon_3 - \epsilon_1) \sin 2\theta \sin \varphi \\ \delta = \epsilon_1 \cos^2 \theta + \epsilon_3 \sin^2 \theta - \epsilon_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中,角度 θ 表示液晶分子偏转角, φ 表示LC指向矢的投影与入射电磁波偏振方向投影的夹角,即方位角;
 $\epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_{\perp}, \epsilon_1 = \epsilon_{//}$

因此,将偏置电压在0V与 V_{th} 之间变化,可以实现液晶分子的偏转角度 θ 的线性变化,从而实现液晶层的介电常数张量变化,进而导致超表面反射系数等工作特性的变化。

在仿真分析中,超表面吸波器对波的吸收率定义为

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (3)$$

式中, S_{11} 为反射系数, S_{21} 为透射系数。在该结构中,由于反射板的存在使得透射系数 S_{21} 几乎为零。因此吸收率可以简化为

$$A = 1 - |S_{11}|^2 \quad (4)$$

2 结构优化

首先探究超表面吸波器吸收率的影响因素。在不加偏置电压,电磁波垂直入射的条件下,令 $a=125 \mu\text{m}$, $w=10 \mu\text{m}$, $g=10 \mu\text{m}$, $h_q=150 \mu\text{m}$, $h_{lc}=60 \mu\text{m}$,图2给出了谐振器结构参数和顶部石英层厚度对吸收率的影响。从图2中可以看出,当内环的内径 a 增大时,峰值吸收频率点向低频处偏移,吸收率缓慢增大;随着内外环间距 w 的增大,超表面吸波器的吸收率先变大后减小,且吸收频率先蓝移后红移;当内环宽度 g 增大时,峰值吸收频率点向低频处偏移,同时超表面吸波器的吸收率也发生改变;改变顶部石英层厚度 h_q 的大小,超表面吸波器的吸收率和吸收频率均受到影响;改变顶部石英层厚度 h_{lc} 的大小,超表面吸波器的吸收率和吸收频率呈周期变化。因此,对方形谐振器的内环内径 a 、内外环间距 w 、内环宽度 g 、顶部石英层厚度 h_q 和液晶层厚度 h_{lc} 进行优化,可以得到完美吸收的超表面吸波器。

利用优化算法对微纳光电子器件进行逆向设计,是目前常用的一种优化设计方法^[24, 25]。粒子群算法是进化计算技术,适合处理非线性、非凸的优化问题,能更高效地解决问题^[26]。由于超表面吸波器的结构参数对吸收效果的影响具有非线性,且优化目标复杂,因此本文采用粒子群算法对超表面吸波器单元结构进行逆向设计。基于PSO逆向设计超表面结构的流程如图3所示。

1)输入超表面的优化变量及取值范围,并生成初始参数种群。优化变量有:方形谐振器内环内径 a ,取值范围为110~140 μm ;内外环的间距 w 、内环宽度 g ,取值范围为1~20 μm ;顶部石英层厚度 h_q ,取值范围是

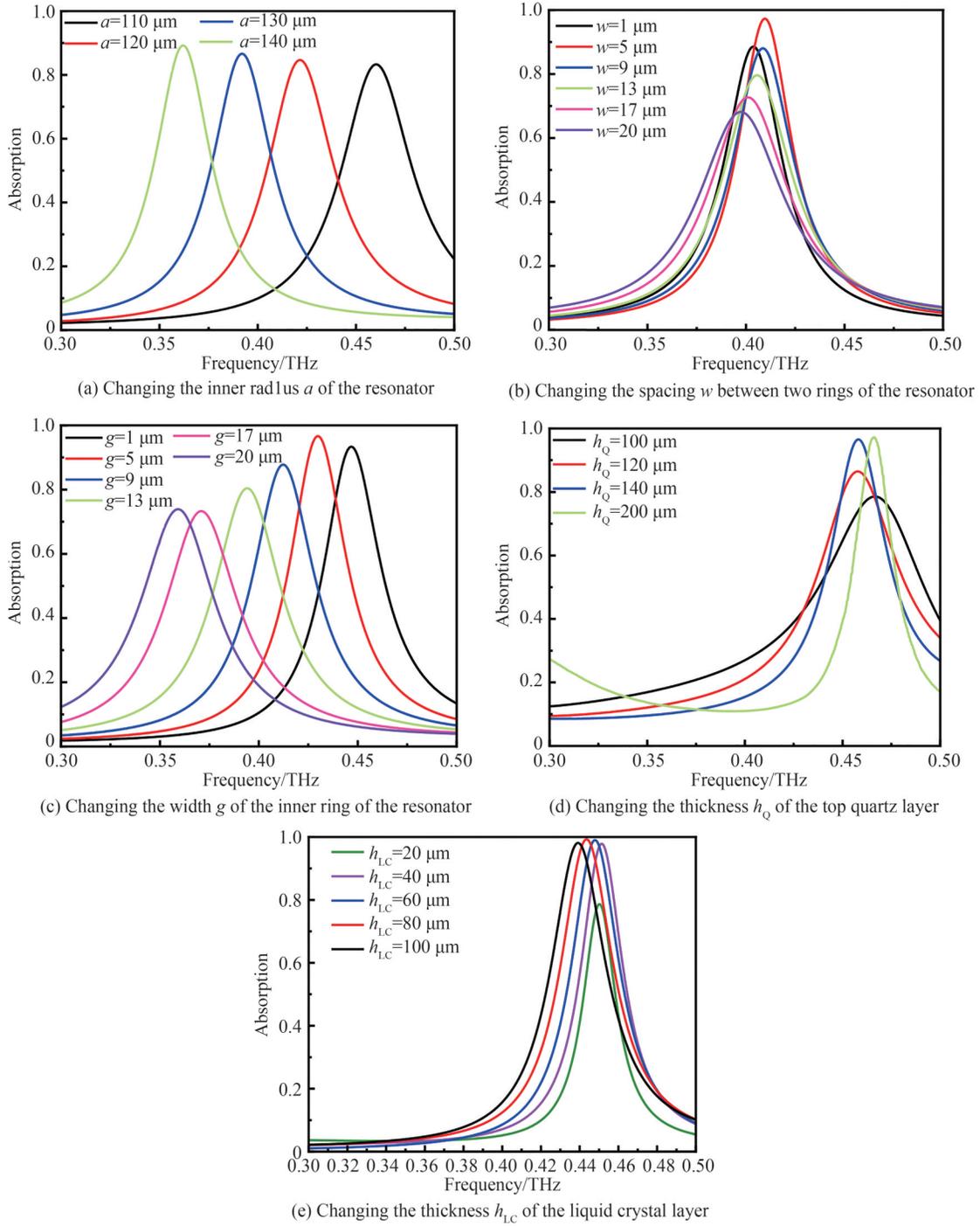


图2 超表面单元结构参数变化时的吸收率

Fig. 2 Absorption rate with changes in metasurface unit structure parameters

100~200 μm ; 液晶层厚度 h_{LC} , 取值范围是 20~100 μm 。算法自动生成初始编码序列种群

$$X_0 = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (5)$$

式中, n 为种群大小, 本方案中选取 $n=50$, $x_k = [a_k, w_k, g_k, h_{Q,k}, h_{LC,k}]$ ($k=1, 2, \dots, n$) 为一个结构参数种群。

2) 定义期望功能的目标函数 (FoM)。目标函数定义为

$$\text{FoM} = 2 - \text{MAX}[A(i_0)] - \text{MAX}[A(i_1)] + \frac{k}{|i_0 - i_1|} \quad (6)$$

式中, $A_0(i)$ 为频率 i 处的吸收率, i 的范围为 0.3~0.5 THz, i_0 表示偏置电压为 0 时的吸收频率, i_1 表示偏置电压 V_{th} 为时的吸收频率, k 为权重系数, 本方案中选取 $k=1$ 。

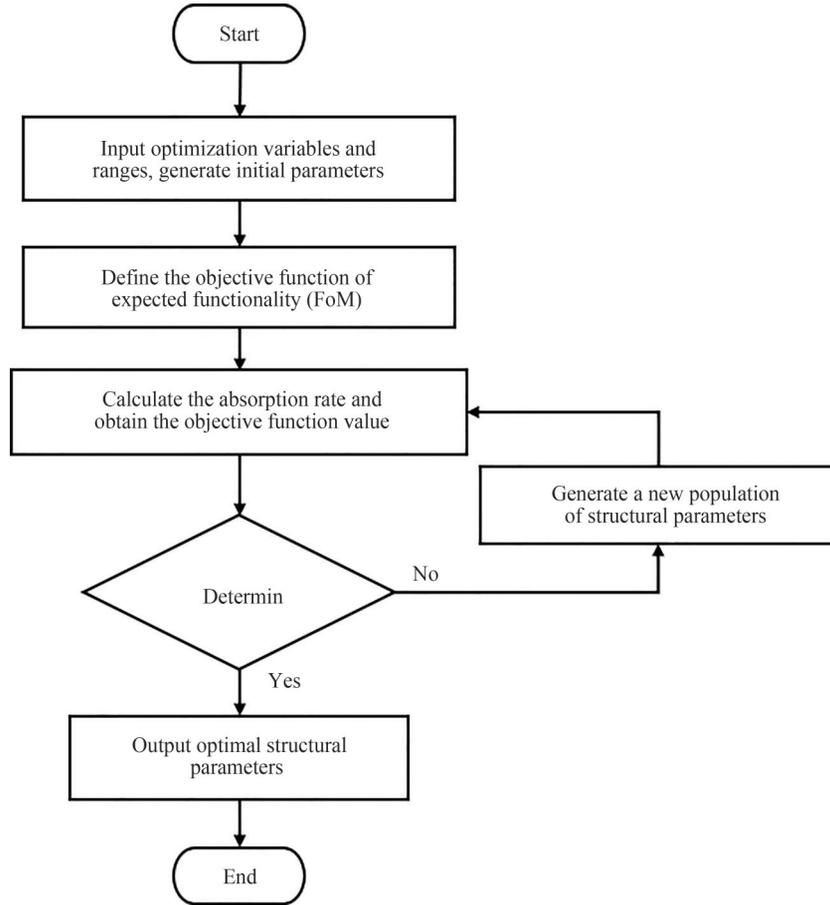


图3 基于PSO逆向设计超表面结构流程图

Fig. 3 Flowchart of inverse design of metasurface structure based on PSO

3)调用CST计算该结构参数下的吸收率,并获取目标函数值。将初始种群下的吸收率带入式(5),可以得到该种群对应的FoM值。

4)判断是否为最优解。设置算法的目标收敛值为 10^{-5} ,若种群中有FoM的值小于目标收敛值或种群中FoM的极大值小于目标收敛值,则算法收敛,并输出极小值和优化的变量参数;否则进入步骤5)。

5)根据算法规则生成新的编码序列种群。粒子速度和粒子位置可表示为

$$V_q(t+1) = \omega V_q(t) + c_1 r_1(t) \times [p_{\text{best}q}(t) - x_q(t)] + c_2 r_2(t) \times [g_{\text{best}q}(t) - x_q(t)] \quad (7)$$

$$x_q(t+1) = x_q(t) + V_q(t+1) \quad (8)$$

式中, $q=1,2,\dots,n$ 表示不同微粒, t 表示第 t 代; V_q 为粒子的速度, x_q 为粒子的当前位置, ω 为惯性权重; $r_1(t)$ 、 $r_2(t)$ 为介于0~1之间的两个相互独立的随机数; c_1 、 c_2 为加速常数,通常在0~2之间取值。根据当前种群的位置及速度信息,根据式(7)、(8)生成下一代种群 $X_t = [x'_1, x'_2, \dots, x'_n]$ 。

新种群构造完毕后,返回步骤3),再次计算该结构参数种群下的吸收谱,并获取目标函数值,开始新一轮寻优。

利用PSO算法,对方形谐振器的内环内径 a 、内外环间距 w 、内环宽度 g 和顶部石英层厚度 h_q 的值进行逆向设计。在逆向设计中,所使用的计算机的CPU为AMD Ryzen 7 5800H,内存大小为16 GB,GPU为NVIDIA GeForce RTX 3050。最终结果为 $a=120 \mu\text{m}$, $g=6.25 \mu\text{m}$, $w=6.25 \mu\text{m}$, $h_q=160 \mu\text{m}$, $h_{\text{LC}}=50 \mu\text{m}$,耗时5.3 h。

3 吸波器性能分析

对逆向设计的超表面吸波器的可调谐特性和偏振特性进行研究。随着偏置电压 0 增加到 V_{th} ,LC分子的偏转角 θ 从 0° 旋转到 90° 。图4给出了太赫兹波垂直入射时,TE模式和TM模式在液晶分子偏转角 θ 分别

为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 时的吸收谱。从图4(a)中可以看出,随着LC分子的偏转角 θ 的增大,即随着偏置电压的增加,TE模式吸收谱的峰值吸收频率从444.4 GHz红移至404.4 GHz,吸收率均大于0.99,频率可调谐性为9%。图4(b)为TM模式的吸收谱,吸收峰值频率从425.4 GHz红移至404.4 GHz,吸收率均大于0.99,频率可调谐性为4.64%。

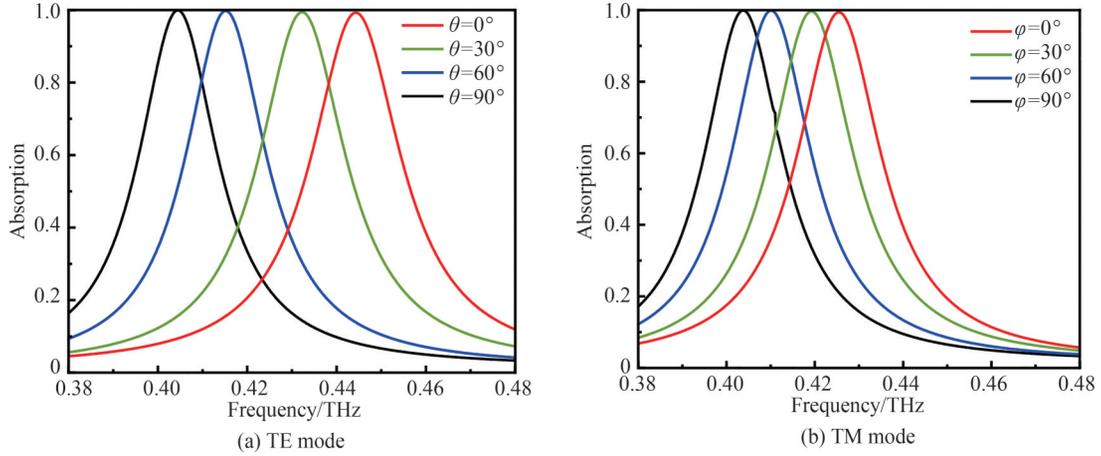


图4 太赫兹波垂直入射时TE模式和TM模式吸收谱

Fig. 4 Absorption spectra of TE mode and TM mode when terahertz waves are vertically incident

为了解释吸波器对电磁波产生强吸收的原因,用谐振器理论研究吸收峰值频率所对应的表面电场 E 和电流分布 J 。由于可调谐吸波器各个吸收峰的物理机制相似,因此只给出了偏置电压为0峰值吸收频率444.4 GHz的TE偏振态在垂直入射时,超表面吸波器的表面电场 E 和电流分布 J ,如图5所示。由图5(a)中可知,电场能量集中在金属谐振器的外环与内环之间,这意味着方形环谐振器对入射电磁波产生强烈电共振,由此导致了强烈的共振吸收。由图5(b)中可知,表面电流密集集中在方形环谐振器的内环上,激发了电偶极子共振,导致了电磁波的吸收。同时,如图5(c)所示,金属反射板上的电流方向与谐振器表面的电流方向相反,这种反向电流的形成,使得顶层和底层结构内形成电流环,产生的磁场会与入射太赫兹波的磁场产生磁通耦合,产生磁偶极子共振,从而导致波被器件吸收。分析表明,提出的方形环谐振器不仅可以产生电偶极子共振,还可以产生强烈的磁偶极子共振。因此,在强的电磁共振的作用下,入射电磁波在超表面吸波器中产生强吸收,吸收率达到0.99以上。

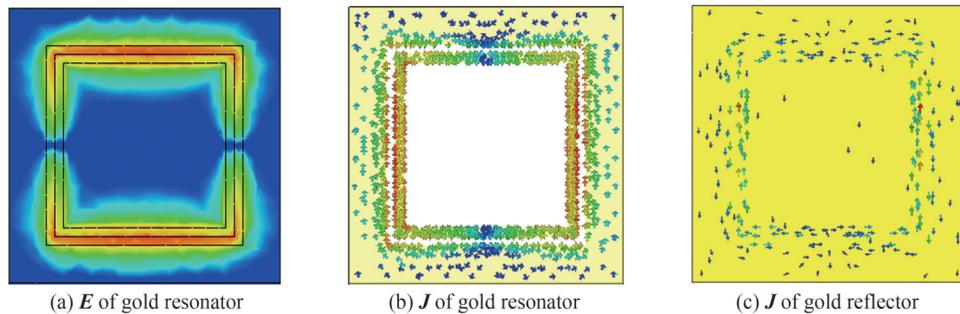


图5 垂直入射时超表面吸波器的表面电场 E 和电流分布 J

Fig. 5 Surface electric field E and current distribution J of metasurface absorber under vertical incidence

同样,阻抗匹配理论也可以用来解释吸波器强吸收的物理机制,吸波器在工作频段上产生完美吸收是由于该频段的相对阻抗与自由空间的阻抗发生了匹配。相对阻抗 z 为

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11}^2) - S_{21}^2}} \quad (9)$$

根据式(9)计算出液晶分子偏转角 θ 分别为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 时,超表面吸波器的相对阻抗,如图6所示。

从图6中可以看出,液晶分子不同的偏转角度下,对应吸波频率处的相对阻抗实部接近于1,虚部部分接近于0,这时吸波器的相对阻抗 z 与自由空间阻抗匹配达到良好的匹配状态。因此,吸波器在其频率调谐范围内表现出完美的电磁波吸收特性。

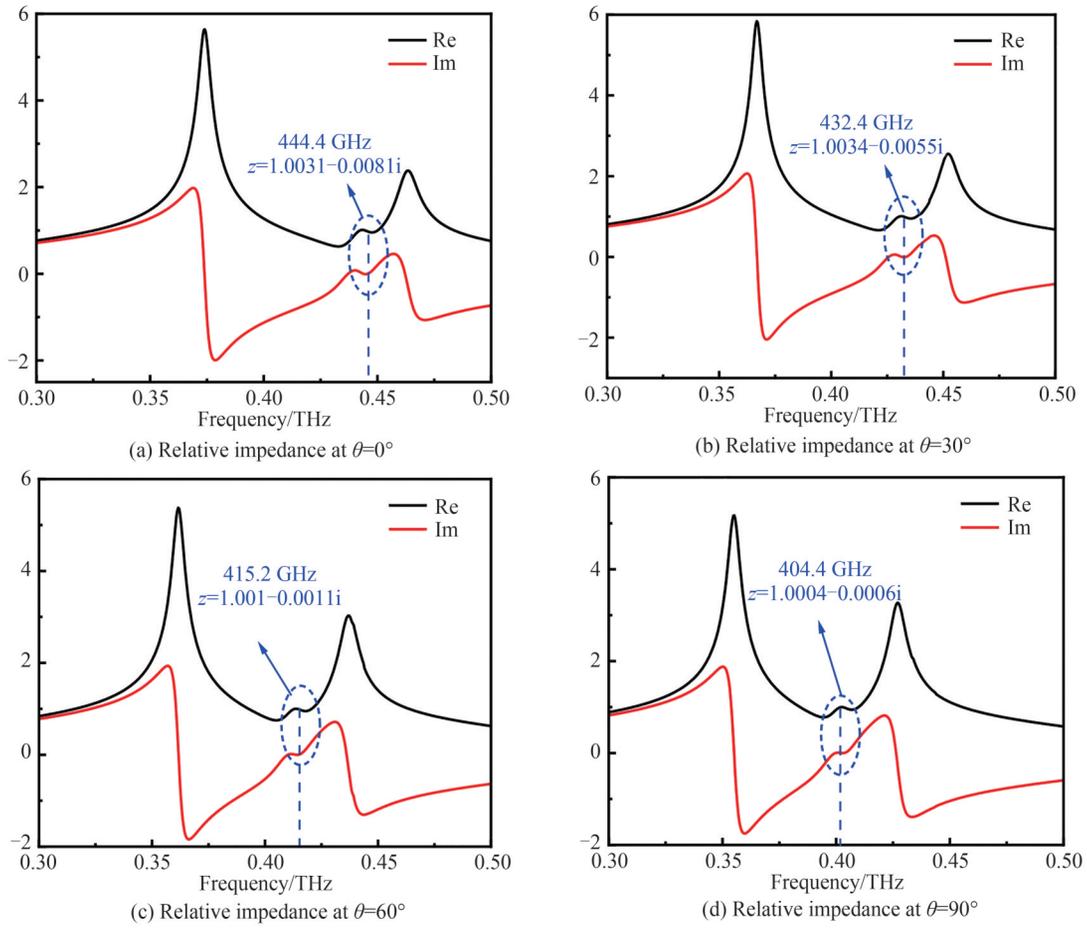


图6 不同分子偏转角下超表面吸波器相对阻抗谱
Fig. 6 Relative impedance spectra of metasurface absorber

对于吸波器而言,吸收率在大角度入射下保持稳定是至关重要的,因此对提出的超表面吸波器在不同入射角下的TE和TM偏振波的吸收率进行研究。图7为无偏置电压状态下,TE模式和TM模式的电磁波以 α 角度斜入射时,超表面吸波器的吸收谱。从图7(a)可以看出,TE偏振波倾斜入射时的吸收谱,入射角 α 从 0° 增大到 60° 时,吸收频率保持稳定在444.4 GHz处,峰值吸收率略有下降,但保持在94%以上;入射角度大于 60° 后,吸收率出现恶化。从图7(b)可以看出,对于TM偏振,随着入射角度 α 增加到 45° ,吸收频率保持稳定在425.4 GHz处,且峰值吸收率保持在97%以上;当入射角度 α 从 45° 增加到 60° 时,吸波器的吸收频率偏移到428.4 GHz(相对偏移量为0.7%),但吸收率仍保持在94%以上。这与文献[27]中入射角度 α 与反射率之间关系的结论相一致。因此,设计的超表面吸波器具有良好的广角入射吸收稳定性。

图7中还可以看出,对于TE模式,入射角度 α 大于 60° 后,吸收率出现恶化;对于TM模式,入射角度 α 大于 60° 后,频率稳定性和吸收效果变差。TE模式电磁波以 60° 和 85° 斜入射时,超表面吸波器的表面电场 E 和电流分布 J 如图8所示。由图8中可以看出,电磁波以 60° 斜入射时,与图5中垂直入射时相比,电共振强度略有下降,电偶极子共振略微减弱,因此吸波器仍能保持良好吸收性能。电磁波以 85° 斜入射时,金属谐振器的外环与内环之间的电场能量,明显弱于图5所示的垂直入射的能量,这意味着方形环谐振器对入射电磁波的电共振减弱;方形环谐振器的内环上电流分布明显减少,导致电偶极子共振减弱。因此, 85° 斜入射的电磁波在结构之间激发出的极子共振模式变弱,最终导致超表面吸波器的吸收效果变差。

对所提出的吸波器性能与一些已报道的基于LC的可调谐吸波器进行比较,结果如表1所示。提出的吸

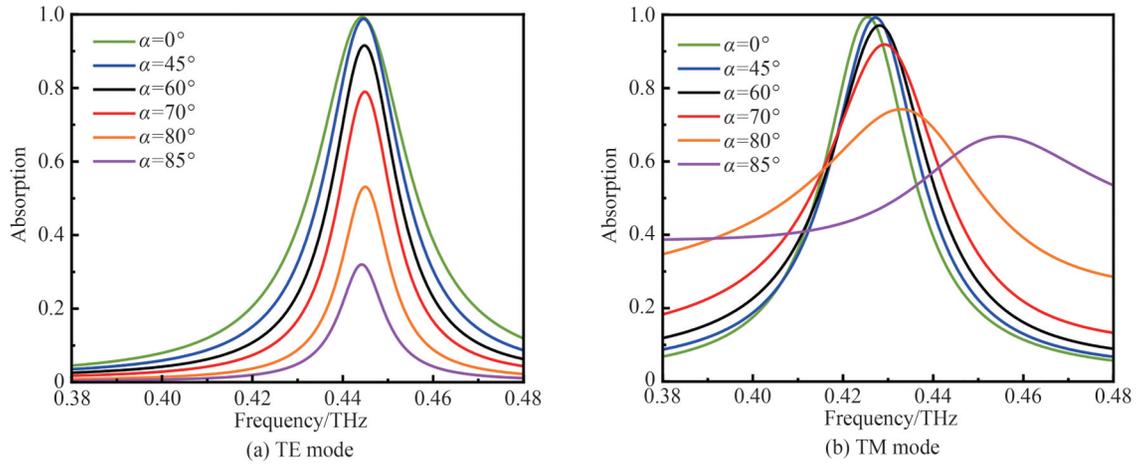


图7 太赫兹波以角度 α 斜入射时TE模式和TM模式吸收谱

Fig. 7 Absorption spectra of TE mode and TM mode when terahertz waves are obliquely incident at an angle of α

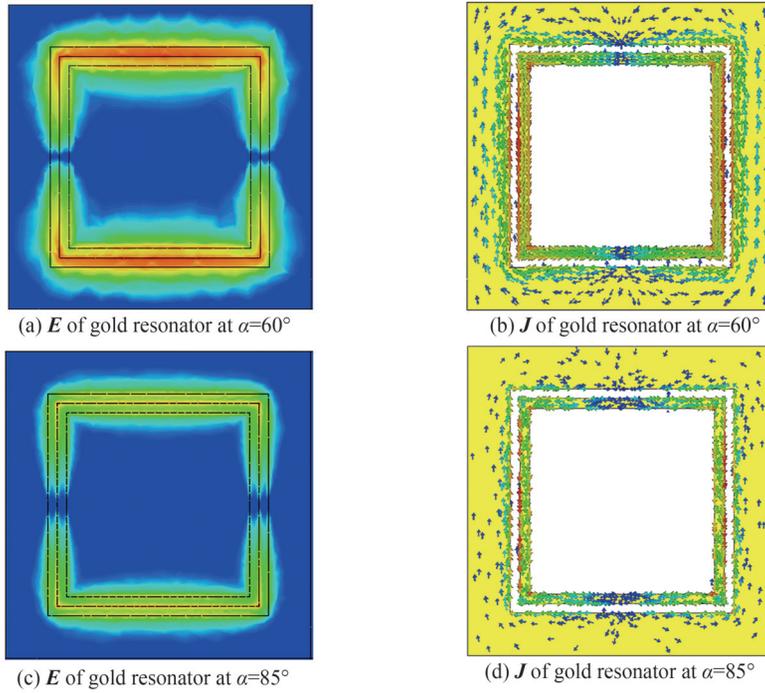


图8 60°和85°斜入射时超表面吸波器的表面电场 E 和电流分布 J

Fig. 8 Surface electric field E and current distribution J of metasurface absorber under oblique incidence at 60° and 85°

表1 吸波器主要性能参数与已发表的相似文献比较

Table 1 Comparison of the main performance parameters of the absorber with similar published literature

Reference	Polarization	Maximum measured frequency tunability	Absorption for oblique incidence ($\alpha=60^\circ$)	Frequency stability for oblique incidence
[18]	TE	4.59%	>75%	Low
[19]	TE	2.8%	—	—
[21]	TE	9.3%	>90%	High
[28]	TE	6.4%	>75%	Low
[29]	TE	4.7%	>90%	Medium
	TM	4.1%	>40%	Low
[30]	TE	7.8%	—	Low
This paper	TE	9%	>94%	High
	TM	4.64%	>94%	High

波器 TE 模式频率可调谐性为 9%, TM 模式为 4.64%; 对于 TE 和 TM 偏振斜入射, 所提出的吸波器在大角度斜入射下吸收率大于 94%, 且吸收频率保持高度稳定(相对偏移量小于 1%)。因此提出的可调谐太赫兹吸波器具有可调谐性大、斜入射稳定性高的良好工作性能。

4 结论

本文提出了一种基于液晶的广角稳定太赫兹可调谐超表面吸波器。为了模拟液晶材料的各向异性特性, 利用液晶材料介电常数张量进行材料建模。为了提高设计效率, 得到良好的吸波性能和可调谐性能, 利用 PSO 对超表面吸波器单元结构进行了逆向设计。对设计的超表面吸波器垂直入射时的吸收特性、频率可调谐性和偏振特性, 以及不同入射角度下的电磁波吸收特性进行研究。结果表明, 利用 PSO, 对表面方形谐振器内环内径 a 、内外环间距 w 、内环宽度 g 和顶部石英层厚度 h_0 进行逆向设计, 可以高效地设计出吸波性能和可调谐性能良好的吸波器; 对逆向设计的超表面吸波器施加电压, 并且电压在 0~10 V 范围内连续调谐时, 吸波器 TE 模式吸波频率可以在 404.4~444.4 GHz 范围内实现连续可调谐, 吸收率均大于 99%, 其频率可调谐性为 9%; TM 模式吸波频率可以在 404.4~425.4 GHz 范围内实现连续可调谐, 吸收率均大于 99%, 其频率可调谐性为 4.64%。此外, 该吸波器具有大角度入射稳定性, 在斜入射角度 60° 时, 吸收率仍大于 94%, 且吸收频率稳定。所提出的太赫兹超表面吸波器, 具备结构简单、高吸收率、大频率可调谐性、广角稳定性和控制电压低等优点, 具有广泛的应用价值。

参考文献

- [1] DAVIES A G, LINFIELD E H, JOHNSTON M B. The development of terahertz sources and their applications[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2002, 47(21):3679-3689.
- [2] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1:97-105.
- [3] FUJITA K, JUNG S, JIANG Y, et al. Recent progress in terahertz difference-frequency quantum cascade laser sources[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(11): 1795-1817.
- [4] LEWIS R A. A review of terahertz detectors[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2019, 52(43):433001.
- [5] SMITH D R, PENDRY J B, WILTSHIRE M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004, 305(5685):788-792.
- [6] LIU Y, ZHANG X. Metamaterials: a new frontier of science and technology[J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(5): 2494-2507.
- [7] HE Q, SUN S, ZHOU L. Review article tunable/reconfigurable metasurfaces: physics and applications[J]. *Research*, 2019, 2019(2):1849272.
- [8] WAN X, JIANG W X, MA H F, et al. A broadband transformation-optics metasurface lens[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(15):151601.
- [9] ZHAO Y T, WU B, HUANG B J, et al. Switchable broadband terahertz absorber/reflector enabled by hybrid graphene-gold metasurface[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7):7161-7169.
- [10] AGARWAL P, KISHOR K, SINHA R K. Ultrasensitive dual-band terahertz metasurface sensor based on all InSb resonator[J]. *Optics Communications*, 2022, 522:128667.
- [11] NEBIOGLU M A, TAKAN T, ALTAN H, et al. An indium tin oxide metasurface filter for terahertz applications: design, fabrication, and characterization[J]. *Modern Physics Letters B*, 2017, 31(8):1750074.
- [12] CONG L, XU N, ZHANG W, et al. Polarization control in terahertz metasurfaces with the lowest order rotational symmetry[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9):1176-1183.
- [13] TSILIPAKOS O, TASOLAMPROU A C, PITILAKIS A, et al. Toward intelligent metasurfaces: the progress from globally tunable metasurfaces to software-defined metasurfaces with an embedded network of controllers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(17):2000783.
- [14] MIAO Z, WU Q, LI X, et al. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces[J]. *Physical Review X*, 2015, 5(4):041027.
- [15] WANG G, TIAN H, WANG J, et al. Electronically controlled flexible terahertz metasurface based on the loss modulation of strontium titanate[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(1):94-97.
- [16] YAGHMAEE P, KARABEY O H, BATES B, et al. Electrically tuned microwave devices using liquid crystal technology[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013, 2013: 824214.
- [17] DU Hongyan, ZHANG Zidong, TIAN Rui, et al. Research progress in broadband absorber based on artificial electromagnetic medium[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(6):23-33.
杜宏艳, 张子栋, 田瑞, 等. 基于人工电磁介质的宽带吸波器研究进展[J]. *材料工程*, 2020, 48(6):23-33.

- [18] YIN Z, LU Y, XIA T, et al. Electrically tunable terahertz dual-band metamaterial absorber based on a liquid crystal[J]. *Rsc Advances*, 2018, 8(8):4197-4203.
- [19] YIN Z, WAN C, DENG G, et al. Fast-tunable terahertz metamaterial absorber based on polymer network liquid crystal [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2018, 8(12):2454.
- [20] DENG G, HU H, MO H, et al. Tunable terahertz metamaterial wideband absorber with liquid crystal [J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(12):4026-4635.
- [21] DENG G, HU H, MO H, et al. Liquid crystal-based wide-angle metasurface absorber with large frequency tunability and low voltage[J]. *Optics Express*, 2022, 30(13):22550-22561.
- [22] 高盛. 基于液晶的太赫兹开槽结构移相器及阵列天线 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [23] KHOO I C. Nonlinear optics of liquid crystalline materials[J]. *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 2009, 471(5-6):221-267.
- [24] SUI S, MA H, WANG J, et al. Topology optimization design of a lightweight ultra-broadband wide-angle resistance frequency selective surface absorber[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2015, 48(21):215101.
- [25] JIA Y, WANG J, CHEN W, et al. Research progress on rapid optimization design methods of metamaterials based on intelligent algorithms[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2):220-239.
- [26] VENTER G, SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Particle swarm optimization[J]. *Aiaa Journal*, 2003, 41(8):1583-1589.
- [27] HOLLOWAY C L, KUESTER E F, NOVOTNY D. Waveguides composed of metafilms/metasurfaces: the two-dimensional equivalent of metamaterials[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8:525-539.
- [28] DENG G, XIA T, JING S, et al. A tunable metamaterial absorber based on liquid crystal intended for F frequency band [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16:2062-2065.
- [29] DENG G, LU Y, YIN Z, et al. A tunable polarization-dependent terahertz metamaterial absorber based on liquid crystal [J]. *Electronics*, 2018, 7(3):27.
- [30] LV J F, DING C, MENG F Y, et al. A tunable metamaterial absorber based on liquid crystal with the compact unit cell and the wideband absorption[J]. *Liquid Crystals*, 2021, 48(10):1438-1447.

Liquid Crystal-based Wide-angle Terahertz Tunable Metasurface Absorber

JING Yueyang, LI Peili, ZHANG Yajie, CAO Yang, CHEN Yu

(College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Recently, metasurfaces have received widespread attention due to their unique properties and potential applications in many fields such as biosensing, imaging, and communication. Among these studies, metasurface absorbers have aroused much interest of researchers. Absorbers can perfectly absorb incident certain frequencies or some frequencies of electromagnetic waves, and are widely used in fields such as electromagnetic compatibility and electromagnetic shielding. Compared with traditional absorber materials, a metasurface absorber overcomes the disadvantages of large volume, heavy weight, and poor stability. To cope with diverse application scenarios, it is essential to achieve frequency tunability of a metasurface absorber.

In this paper, we propose a liquid crystal-based tunable terahertz metasurface absorber with the advantages of simple structure, and wide-angle stability. By utilizing the electrically tunable property of liquid crystal materials, the absorption frequency of the metasurface absorber can be tuned. Using the dielectric constant tensor of liquid crystal materials for material modeling, the anisotropic properties of liquid crystal materials were simulated. To improve the design efficiency and achieve good absorption and tunability performance, the Particle Swarm Algorithm (PSO) was used for reverse design of the parameters of the meta-surface unit structure. We investigated the absorption characteristics, frequency tunability, and polarization characteristics of the meta-surface absorber obtained by reverse design under vertical incidence, as well as the electromagnetic wave absorption characteristics at different incident angles. The results show that the absorbers with good absorption and tunability performance can be reverse

designed efficiently by PSO. By applying voltage to the metasurface absorber obtained by reverse design, and continuously tuning the voltage in the range of 0~10 V, the TE mode absorption frequency is continuously tunable in the range of 404.4~444.4 GHz, with a frequency tunability of 9%. The TM mode absorption frequency is continuously tunable in the range of 404.4~425.4 GHz, with a frequency tunability of 4.64%. Both modes have absorption rates greater than 99%. In addition, the absorber has a large-angle incidence stability. Even at an oblique incidence angle of 60°, the absorption rate is still greater than 94%, and the absorption frequency is stable. The proposed terahertz metasurface absorber has many advantages, such as high absorption rate, wide frequency tunability, and wide-angle stability, which has broad application value.

Key words: Liquid crystal; Metasurface; Particle swarm optimization; Tunable; Absorber

OCIS Codes: 230.4170; 300.1030; 160.3710