

文章编号:1007-2780(2020)07-0762-14

基于液晶的太赫兹波前调控器件研究进展

申彦春^{1,2}, 王金兰¹, 王巧莲¹, 沈志雄², 胡 伟^{2*}

(1. 广州铁路职业技术学院 信息工程学院, 广东 广州 510430;

2. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 液晶作为宽波段外场可调谐材料在太赫兹波段具有显著的应用优势, 有望实现高效、动态的太赫兹波前调控。本文简要综述了近年来南京大学液晶与微纳光学研究组和其他科研团队在基于液晶的太赫兹波前调控器件领域展开的部分研究, 包括基于纯液晶的太赫兹调波器件和基于液晶集成超构表面的太赫兹调波器件两类, 系统阐述了这些器件的动态可调谐、多样化功能的特征以及潜在的应用前景, 并对液晶技术与太赫兹技术相结合的发展趋势进行了展望。

关键词: 太赫兹技术; 液晶器件; 超构表面; 动态调谐

中图分类号: O436; O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/YJYXS20203507.0762

Progress of liquid crystal based terahertz wavefront modulators

SHEN Yan-chun^{1,2}, WANG Jin-lan¹, WANG Qiao-lian¹, SHEN Zhi-xiong², HU Wei^{2*}

(1. *Information Engineering Institute, Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou 510432, China;*

2. *College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

Abstract: Liquid crystal, with a broadband external field induced tunability, has obvious application advantages in the terahertz band. It is expected to realize efficient and active terahertz wavefront modulation. This article briefly summarizes some of the recent researches carried out by the group of liquid crystal and micro/nano optics of Nanjing University and other research teams in the field of liquid crystal based terahertz wavefront modulators. There are mainly two types, including pure liquid crystal based modulators and liquid crystal integrated metadevices. The characteristics of the dynamic tunability, diversified functions and potential application prospects of these devices are systematically described. The development trend of the combination of liquid crystal and terahertz technology is also discussed.

Key words: terahertz technology; liquid crystal device; metasurface; dynamic tunability

收稿日期: 2020-04-21; 修订日期: 2020-04-26.

基金项目: 广东省科技计划项目 (No. 2017A010101022)

Supported by Science and Technology Program of Guangdong (No. 2017A010101022)

* 通信联系人, E-mail: huwei@nju.edu.cn

1 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波是指振荡频率为0.1~10 THz(对应波长范围0.03~3 mm)的电磁波。其在电磁波谱中的位置介于微波与红外波之间,是电子学(Electronics)与光子学(Photonics)的过渡区域,该区域是人类了解与开发最少的波段,存在与微波和光波不同的特性,蕴含着丰富的应用前景^[1-3]。THz波的光子能量很低,大约是X射线的百万分之一,非常适合生物活体检测;THz波段覆盖了蛋白质等诸多分子的振动和转动频率,构成了对应的“指纹”(Fingerprints)谱;由于THz波脉宽为亚皮秒量级,具有较高的信噪比,广泛用于飞秒时间分辨的瞬态光谱研究与成像;THz波具有很高的时空相干性,便于从事材料的瞬态相干动力学研究;THz波的高带宽特性,适用于宽频无线通信。基于上述特点,THz技术在化学及生物成分标记、无损检测、无线通信等领域引起了广泛的关注^[4-9]。与可见光、红外和微波等频段相比,THz频段的研究起步较晚且不够广泛深入,但近年来,THz波的产生和探测技术不断成熟,THz辐射源^[10-12]、信号探测器^[13-15]等器件的研究取得了显著发展。然而THz波传输过程中的控制与调制技术仍处于起步阶段,制约了THz系统的应用。传统的THz光学元件,如THz波片、偏振转换器等^[16-18],带宽窄、体积大、不易集成且制作复杂、价格昂贵、可调谐性差,因此,探索小型化、易加工、低损耗、可调谐的新型THz波前调控元件,实现对THz波束高效、动态的调控将是THz光学元件的未来发展方向。

液晶(Liquid crystals)是一种可调的光电各向异性功能材料^[19],可以通过电场或磁场在可见光波段到微波波段的范围内进行连续调节,利用液晶独特电磁调谐性制备的液晶THz器件具有工艺简单、成本低、体积小、质量轻的特点,将对THz技术的发展产生深远影响^[20-23]。不过,在THz波段应用液晶材料制备可调谐元件也面临一些新的挑战。一方面,在THz频段主要应用的是向列相液晶材料,胆甾相液晶的应用也有少量文献报道,例如利用其螺距的温度敏感特性应用到THz波的可视化中^[24]。向列相液晶的介电和

光电各向异性相较于可见光波段显著降低,同时吸收损耗增大,THz波段所需的大液晶盒厚会带来取向、加电困难等问题。另一方面,在可见光及近红外波段最常用的玻璃基板和ITO导电膜分别表现出较强的吸收和反射特性,因此需要重新寻找替代材料。为了解决上述问题,世界范围内的科研人员进行了广泛深入的探索,取得了技术突破。本文综述了当前基于液晶的THz波前调控器件的最新研究进展,并对其发展趋势进行了简要讨论。

2 纯液晶型THz相位调制器件

早期THz液晶元件实现调制的方法是利用外加磁场改变液晶的指向矢分布^[25-31]。潘犀灵教授研究组设计了可调的液晶THz相移器和滤波器,该设计利用磁场调节液晶介质的折射率来实现^[25]。Chen等^[26]提出了一种相位调控方法,该方法利用磁场为30 mm厚的液晶盒配向以实现相位调控。2016年,Yang等^[30]提出了一种用弱磁场驱动随机取向液晶的相位调制方法,该方法能够实现较大的调制深度。由于大盒厚导致响应速度慢、驱动电压高、调制效率低等问题,需要利用磁场调节液晶介质的折射率,但该方法设计制备复杂,不利于元器件的小型化和集成化。随着THz波段高透过率、高电导率的透明电极材料的开发(例如ITO纳米晶须、少层石墨烯和PEDOT:PSS等^[32-38]),科研人员采用多片叠层或将金属条夹在液晶盒上下两层基板之间的方法,在基板间横向加场,进行电场调控^[39]。由于液晶的折射率除受电场、磁场调制外还可以通过温度来调制,因此也有一些THz液晶元件采用的是温控调节^[40-41]。液晶THz元件主要分为两大类,一类是直接利用液晶本身对THz波进行调制,例如相移器、波片等;另一类是把液晶与超构表面进行集成,对其包覆的超构表面的电磁响应进行调制,例如超构表面滤波器、吸收器、光场调制器等。

2.1 可调相移器、波片

THz液晶相移器的结构设计是将液晶灌入均一取向的液晶盒内,通过外加电场或磁场调谐,使内部均一取向的液晶分子在加场前后的指向矢发生变化,从而得到两种不同的液晶折射率(n_e 和 n_o)。当THz波线偏振入射时,产生相位的变化。

若要获得尽量大的相移,则需要液晶的双折射率及液晶层的厚度尽可能大。现有的相移器受结构厚度和液晶材料的限制,所实现的相位调控范围不能覆盖整个 $0 \sim 2\pi$ 区间,同时由于大盒厚的影响,THz 透过效率以及加场后液晶的响应速度均变小。受器件集成度和成本限制,科研人员逐渐摒弃了磁场调控方式而采用电场调控方式。下面分别介绍几种 THz 液晶相移器。

Lin 等^[42]利用亚波长金属线栅作为 THz 透明电极实现了一种自偏振的电调液晶相移器,在 $0.2 \sim 2$ THz 具有较高的偏振选择透过率,该元件结构如图 1(a)所示。在制备有金属线栅的上下石英基板间旋涂一层 PI 取向层,摩擦方向与线栅方向垂直,基板间填充 $256 \mu\text{m}$ 厚的 E7 液晶,得到 THz 液晶元件,该元件具有较小的阈值电压(小于 20 V)和饱和电压(约为 130 V),在 1.88 THz 处能够实现最大 $\pi/3$ 的相移(图 1(b)),在集成化的宽带可调 THz 元件中具有广泛的应用前景。Altmann 等^[43]同样是在石英基板上制作金属线栅作为电极,利用聚合物稳定液晶(PSLC)实现电调控相移器,该元件响应迅速,且聚合物网络

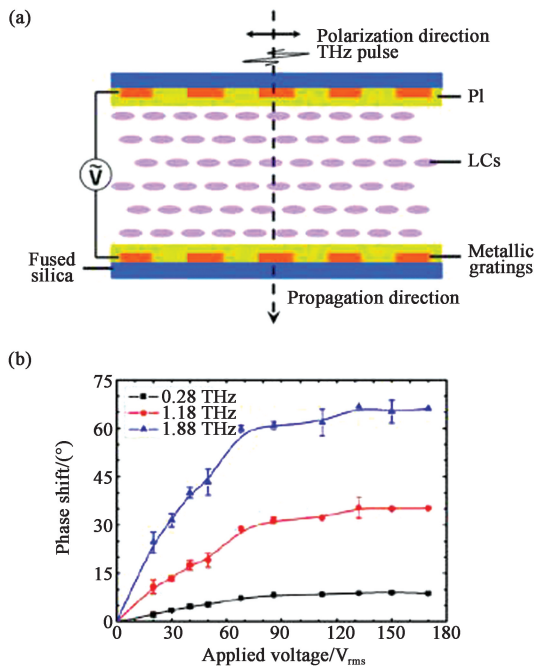


图 1 (a)一种自偏振液晶相移器结构示意图;(b)产生的 THz 相移与施加电压的关系。

Fig.1 (a) Schematic illustration of a self-polarized LC phase shifter; (b) Dependency of THz phase shift on the applied voltage.

能够诱导液晶的取向方向,元件无须取向层。Yang 等^[44]利用 ITO 纳米晶须作为 THz 波段透明电极研发了一种 THz 相移器,结构如图 2(a)所示。该元件利用电子束掠角沉积技术在基板表面倾斜地生长 ITO 纳米晶须,使其可以同时作为 THz 波段透明电极和液晶取向层,该元件能够在 $517 \mu\text{m}$ 的大盒厚下实现液晶层的良好取向,而且在 $0 \sim 2.5$ THz 的宽频率范围内透过率能够达到 82%。该元件在 1 THz 处的相位延迟量超过 $\pi/2$,透过率达到 78%,驱动电压低至 5.66 V,且制作工艺与 CMOS 工艺相兼容。有机物 PEDOT:PSS 具有良好的导电性且制备工艺简单,在有机发光二极管(OLEDs)领域中应用广泛^[45]。Du 等^[37]采用该材料作为 THz 波段透明电极,设计了一种新型相移器,该元件在 6.7 V 的电压驱动下,在 1.17 THz

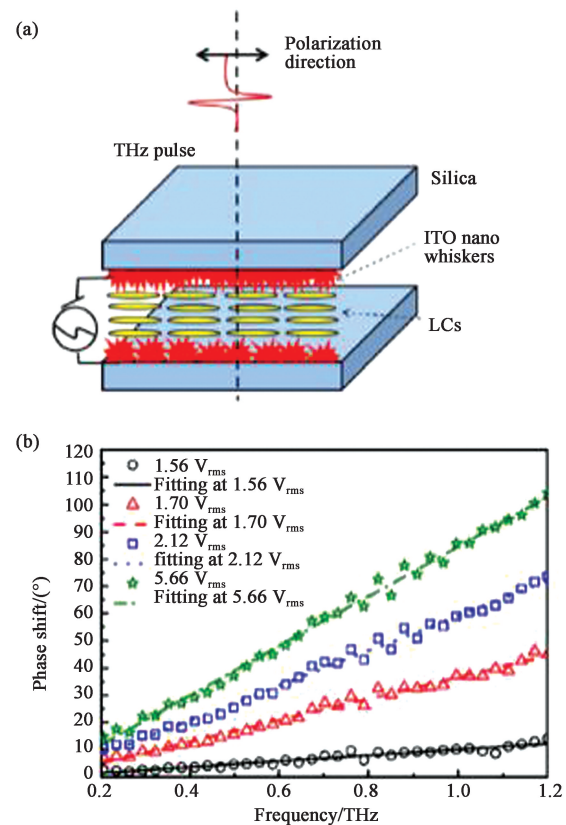


图 2 (a)采用 ITO 纳米晶须作为电极和取向层的相移器结构示意图;(b)产生的 THz 相移在不同施加电压下随频率的变化关系。

Fig.2 (a) Schematic illustration of a phase shifter with ITO nanowhiskers as the electrodes and alignment layers; (b) Dependency of THz phase shift on frequency with various applied voltages.

处的相移最大值超过 $2/3\pi$ 。

液晶波片的作用是改变入射波的偏振态。原理为:将入射 THz 波线偏振方向与液晶分子的长轴方向呈 45° 夹角,通过改变电压大小可实现不同偏振态的出射。在未加电时,沿着长轴方向和垂直于长轴方向的偏振分量感受到不同的折射率从而产生相位差,导致出射时偏振态发生变化。加电可以调节液晶指向矢方向,进而调节相位差。在饱和电压下,液晶分子垂直于上下基板排列,相位差减为 0。

当前见著报道的波片结构有两种,分别是透射式结构和反射式结构。其中,透射式结构是指依靠液晶的双折射 Δn 产生正交偏振分量的相位差。Wang 等^[46]把金属线栅和石墨烯电极相结合,设计制备了宽带可调 THz 波片,结构如图 3(a)所示:上下两层石英基板中间是 $250\ \mu\text{m}$ 的大双折射液晶材料 NJU-LDn-4^[47],该材料在 1 THz 附近双折射率达到 0.3。其中,上基板内表面覆盖亚波长金属线栅,线栅周期 $20\ \mu\text{m}$,金属线宽 $10\ \mu\text{m}$,可同时作为透明电极和偏振片,偏振透射效果如图 3(b)所示。金属线栅上涂覆一种光敏偶氮取向材料 SD1^[48-49],取向方向和线栅方向呈 45°

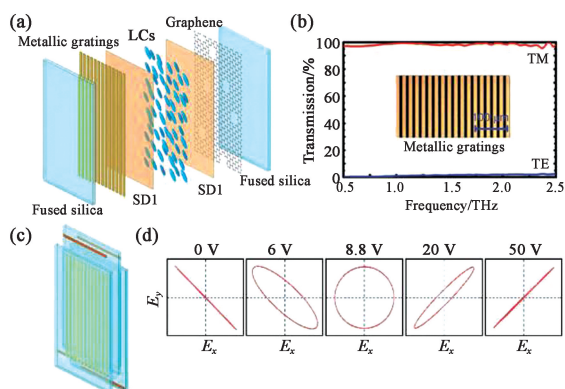


图3 (a)透射式液晶 THz 波片结构示意图;(b)金属线栅的对 TE 波和 TM 波的偏振选择特性;(c)双层叠盒结构;(d)在 2.1 THz 频率处出射偏振态随着施加电压的变化关系。

Fig.3 (a) Schematic of a LC THz waveplate working on the transmission mode; (b) Polarization selected transmission of metallic gratings with TE and TM incidences; (c) Stacking cell structure; (d) Polarization evolution at 2.1 THz with various applied voltages.

以实现波片功能。下基板采用石墨烯作为透明电极,经过紫外臭氧处理之后,产生的多孔石墨烯在 THz 波段的透过率高达 97%。然后在石墨烯层上旋涂 SD1 材料实现均匀液晶取向。在金属线栅和石墨烯上加电能使液晶盒的相位延迟量发生变化,从而改变入射光的偏振态(图 3(d))。该元件单盒结构在 1 THz 处相位调制量达到 $\pi/2$,为了增大调制量,采用了双层叠盒结构(图 3(c)),叠盒后在 1 THz 处相位调制量达到 π 。该元件能够实现偏振态的连续调制,且控制电压小于 50 V。Sasaki 等^[50]提出了一种将石墨烯作为驱动对液晶进行取向的方法,该方法能够延迟偏振 THz 波的相位。2018 年,Ji 等^[51]提出了一种宽带可调 THz 波片,该波片采用石墨烯光栅驱动液晶进行取向。由于传播相位的波长相关性,色差是液晶 THz 调波器件不可避免的问题。Yang 等^[52]通过人为提供相位补偿,在相对较宽的频域范围内实现了相同的相位调制量。如图 4(a)所示,该波片由 3 个液晶盒构成,每个盒由两片石英基片中

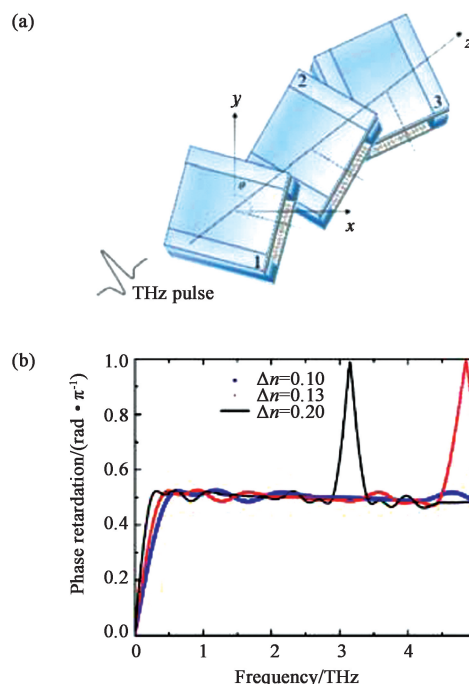


图4 (a)可调消色差 THz 波片结构示意图;(b)在不同的液晶双折射率条件下宽波段内的相位延迟量。

Fig.4 (a) Schematic of a tunable THz achromatic waveplate; (b) When applying different voltages, the birefringence of LC change and thus the achromatic range is tuned.

间夹一层均匀取向的液晶,每个盒之间有一定的取向夹角。该元件通过电调实现在 $0.2 \sim 0.8$ THz 处相位调制量达到 $\pi/2$,实现宽频 $1/4$ 波片的功能(图 4(b))。2017 年,Wang 等^[53]提出了一种反射式可调 THz 波片,如图 5(a)所示。偏振方向垂直于光栅方向的 THz 波透过金属线栅进入液晶层后被反射,偏振方向平行于光栅方向的 THz 波到达金属线栅再返回,两束光由于经过的路径不同,因而存在一定的光程差。由于液晶 THz 器件可以利用电场进行调节,可在一定的频率范围内实现半波片功能。2016 年,Zografopoulos 等^[54]也提出了一种基于金属-液晶-金属结构的反射式 THz 液晶波片,并得出在相同相位差的前提下,反射式波片所需液晶层厚度远小于透射式波片。在相同液晶层厚度前提下,反射式波片的相位差动态可调范围是透射式波片的两倍。通过改变入射角,可以实现偏振转换和波束扫描功能。但在实际应用中,受限于 THz 光路系统,透射模式比反射模式的应用更广泛。

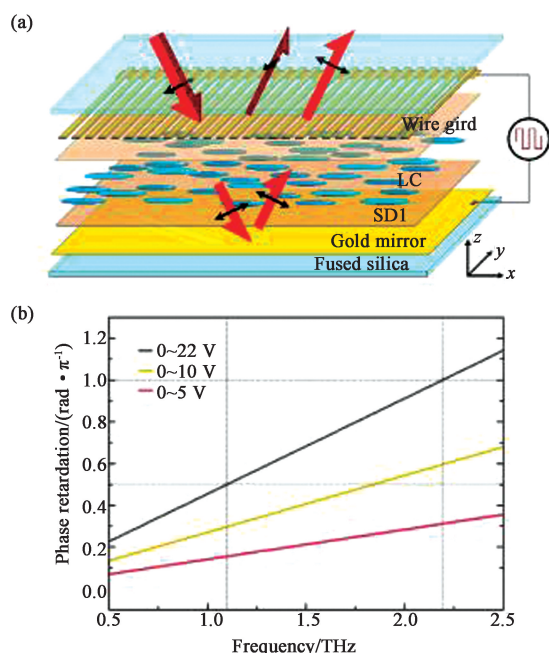


图 5 (a)一种反射式波片结构示意图;(b)产生的 THz 相移在不同施加电压下随频率的变化关系。

Fig.5 (a) Schematic of a waveplate working on the reflection mode; (b) Dependency of THz phase shift on frequency with various applied voltages.

2.2 液晶几何相位调制器

上述液晶 THz 器件实现了对波前均一调制的功能,但结构简单,功能单一。近年来,随着图案化光取向技术的发展,几何相位的概念被引入到液晶体系中^[55-59]。与传播相位利用光程产生相位差不同,几何相位是由偏振在空间两点间变化导致路径不同而引入的,只与各向异性材料在空间的旋转方向有关^[60]。胡伟、陆延青研究组利用一种具有偏振敏感特性并且可以重复光擦写的偶氮苯类光取向材料 SD1,结合自行设计制造的数字微镜阵列(DMD)动态掩模紫外曝光系统^[61],可用于液晶的任意不均匀取向^[62]。基于此,在可见光波段开发了大量液晶光场调控器件^[63-67],可用于涡旋光和艾里光等多种特殊光场的操控,在光学系统以及微纳加工等众多领域都有应用。可见光波段的光场调控元件,同样可以应用到 THz 波段,为 THz 的动态高效调控提供参考。

图 6 所示为动态掩模紫外曝光系统的结构示意图。简单来说,汞灯光源发出的紫外光经过准直系统以及反射镜照在 DMD 上,DMD 中每个微镜都可以通过微电子机械系统(MEMS)独立控制开关,因此可以反射带有设计图案的紫外光。在通过电动旋转的偏振片并通过物镜聚焦后,光束被投射到空液晶盒上。CCD 用来检查聚焦过程中有没有出现离焦情况。DMD 的输出图形随着偏振片的旋转同步变化,便可实现任意取向的图案化液晶结构。光控取向膜 SD1 的厚度极薄,仅为 50 nm 左右,对 THz 波无明显吸收。

2017 年,Ge 等^[68]研发了一种液晶 THz 涡旋波片,可以产生任意拓扑荷的 THz 涡旋光束

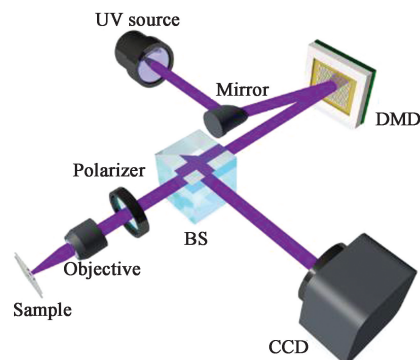


图 6 DMD 曝光系统示意图

Fig. 6 Schematic of DMD lithography system

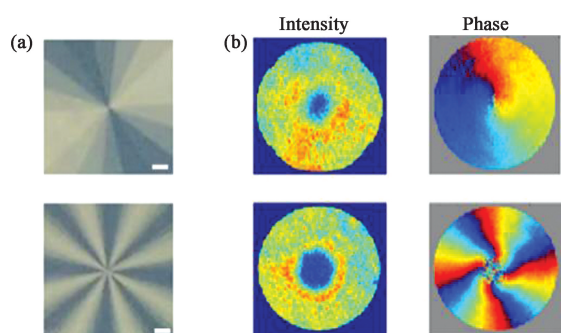


图7 (a)拓扑荷分别为1和4的THz涡旋波片的偏光显微镜照片,比例尺为1 mm;(b)上下拓扑荷分别为1和4的涡旋波片的强度和相位分布图。

Fig.7 (a) Polarized microscope photo of a THz vortex waveplate with topological charges of 1 and 4, respectively, scale bar: 1 mm; (b) Top and bottom are the intensity and phase distributions of the vortex waveplates with topological charges of 1 and 4, respectively.

(图7)。若是利用THz透明电极调控液晶的指向矢,能够实现满足不同波长半波条件的涡旋光束输出,在THz模式复用通信、传感和成像等领域具有显著的应用价值^[69-70]。在此基础上,Ge等^[71]把能产生涡旋光束的q波片和具有偏振选择性衍射特性的偏振光栅集成起来,制备了一种液晶THz偏振叉形光栅,为不同圆偏振态和拓扑核的THz涡旋的产生和分离提供了一种简单实用的方法。2019年,Shen等^[72]通过设计棋盘格形式的共轭透镜相位实现了对入射左右旋圆偏振THz波的自旋选择汇聚效果,该特性在0.6~1.2 THz的宽带范围内得到很好的验证。与超构表面实现宽带聚焦透镜^[73]相比,液晶透镜具有动态可调谐、加工成本相对较低的优势。不过,液晶器件因几何相位自身左右旋圆偏振的共轭特性无法实现左右旋的偏振复用,并且不能实现亚波长的近场聚焦,而超构表面因其谐振单元亚波长的特性,结合自身的共振相位,可以实现比几何相位液晶器件更多样的功能。上述液晶THz元件因为上下基板的存在,通常整体厚度较大,不利于THz器件和系统的集成化、小型化。2020年,Shen等^[74]又提出了一种基于自支撑液晶聚合物(LCP)膜的THz平面光子学器件。如图8(a)所示,在一层LCP柔性薄膜上集成了多个光场调控

单元。这类元件通过对液晶聚合物的晶轴方向进行预编程,来实现对波前的几何相位调制。该研究适用于多种THz光子元件,例如波片、光束偏折器、透镜、贝塞尔以及涡旋光产生器,能够满足THz无线通信的基本功能,包括偏振控制、波束扫描、波束赋形和轨道角动量(OAM)模式复用。进一步地,如图8(c)所示,液晶聚合物薄膜自身的柔性赋予这类元件形变引起的可调谐性。

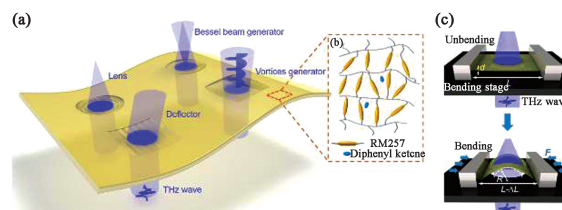


图8 (a)结构取向的液晶聚合物柔性膜对太赫兹波前调控示意图;(b)柔性膜的组成成分:液晶聚合物单体RM257和光引发剂二苯甲酮;(c)薄膜弯折下透镜焦距的动态改变。

Fig.8 (a) Schematic of the photopatterned LCP flexible film for versatile THz wavefront modulations; (b) Composition of the flexible film: LCP monomer RM257 and photoinitiator diphenyl ketone; (c) Tunability of the focal length under film bending change.

3 集成液晶和超构表面的THz波前调控器件

相比于可见光或红外波段的液晶调制器来说,THz波段波长更长。要想在THz频段实现同样的相位调制量,所需液晶盒厚度更大,通常在数百微米量级,这将使液晶取向的难度增加,器件响应速度变慢^[75]。由于液晶折射率可以通过外场调控,如果将液晶作为超构材料的环境介质,即可通过外场调控改变超构材料结构的环境折射率,从而调控超构材料的电磁特性,也规避了纯液晶器件的诸多弊端,设计出功能多样化的液晶THz元件。

超构材料是一种人工电磁介质,通过人为设计单元结构,能够实现自然材料所不具备的独特性能,如人造磁性、负指数材料、电磁隐身等^[76-80]。超构表面是超构材料的二维形式,设计

与加工更加便捷,现已催生出一大批先进的光学功能器件,例如电磁隐身斗篷、偏振复用全息、完美吸收器等^[81-83]。对于 THz 波段,自然环境中比较少有可以直接用于调控的天然材料,并且 THz 波段金属材料损耗比可见光或近红外波段更小,可以用成熟的光刻工艺对这一频段的超构表面进行加工,因此超构表面器件在这一波段具有独特的优势,为 THz 超构器件的广泛应用提供了可能。目前为止,虽然超构表面已有很多神奇应用,但仍存在工作带宽窄、波前调制效率低等问题,而且超构表面一经制备,结构即固定,功能也随之固定,无法进行动态调控。因此,通过超构表面和功能材料,例如半导体、MEMS、石墨烯、液晶等的结合,寻求高效、可调谐的超构器件成为该领域研究的热点^[84-94]。相较于其他功能材料而言,液晶超构器件最主要的优势在于加工工艺的成熟和较低的成本。因为液晶取向技术在显示领域已经非常成熟,结合硅基液晶(LCoS)技术可以制备大面积液晶超构器件,从而避免了一系列复杂的微纳加工工艺。在器件表现方面,通常半导体器件的响应速度会快于向列相液晶器件,通过引入一些特殊的液晶材料,如铁电液晶、双频液晶和蓝相液晶等,液晶 THz 器件的响应速度能得到极大的提升。

2013 年,Padilla 等^[95]提出了一种工作在 THz 波段的可调谐超构吸收器,如图 9(a)所示。该成果采用多层结构设计,上层为可以与空间光电场进行耦合的金属结构阵列,下层为金属背板,中间层为介质,上下双层金属结构可以构成一个使光的磁场分量也发生耦合的机制。通过调控上层金属结构阵列单元的结构参数与介质层的材料和厚度,即可调控超构材料吸收器自身的等效介电常数和等效磁导率。在所需频率处和外界环境的阻抗匹配时,能实现很强的吸收效应。结构中的液晶介质层采用外加电场进行调控,通过在上层金属结构和下层金属板上加电以改变液晶的指向矢分布,实现从未加电时的无序排列变成加电状态下沿着垂直于背板平面的电场方向有序排列,从而改变入射 THz 电磁波感受到的介质层折射率,达到调制谐振频率大小的目的。实验中发现,该吸收器元件加电后在 2.62 THz 处吸收强度减少 30%,共振吸收可调范围为带宽的 4%,而吸收器的驱动电压仅为 4 V。2017 年,Yang

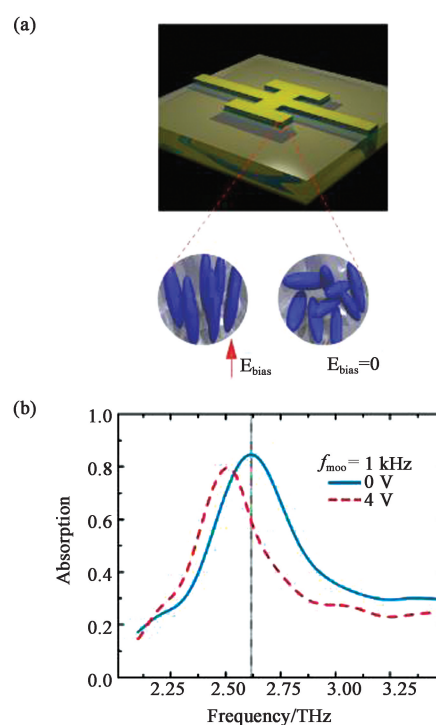


图 9 (a)可调谐超构吸收器的结构示意图以及液晶在加电和不加电状态下的偏转情况;(b) THz 吸收频率随着施加电压的变化而变化。

Fig.9 (a) Schematic of the tunable metamaterial absorber and the orientation of LCs at bias ON and bias OFF states; (b) Change of the THz absorption frequency with the applied voltage.

等^[96]实现了一种基于液晶的可调谐 THz 电磁诱导透明器件,调制深度达到 18.3 dB。2017 年,Wang 等^[97]利用少层石墨烯电极结合十字形超构表面结构单元,实现了高性能宽带可调谐吸收器,如图 10(a)所示。由于十字结构长宽参数的不同(图 10(b)),根据不同偏振方向入射可以工作在不同的 THz 频率下(图 10(c)和 10(d)),整个液晶层厚度仅为 10 μm ,响应速度达毫秒量级。2018 年,Wang 等^[98]设计了一种等离子体诱导透明的液晶可调谐双带吸收器。2018 年,Shen 等^[99]进一步实现了一种集成透射和反射两种工作模式的可调超构器件,通过改变入射线偏振方向可以在两种模式间自由切换。该器件结构如图 11(a)和 11(b)所示:上基板为金属超构表面,下基板为亚波长金属线栅叉指电极,中间为厚度仅为 5 μm 的均一取向液晶层。由于金属线栅对入射线偏振 THz 波的偏振选择性,即透过 TM 波而反射 TE

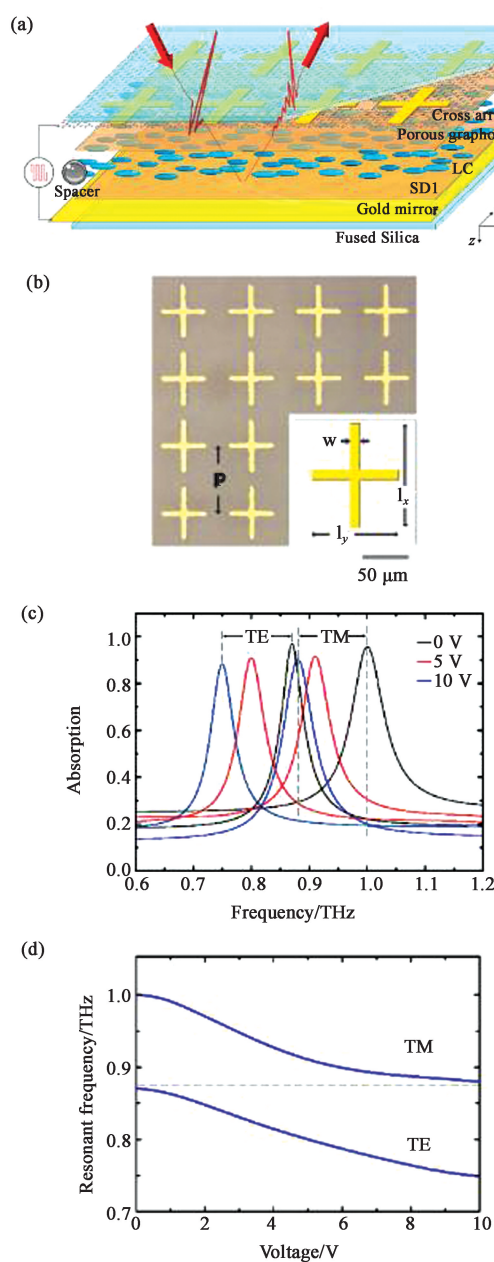


图 10 (a)石墨烯电极结合十字形超构表面的可调谐超构吸收器的结构示意图;(b)超构表面的十字形阵列显微照片;(c)在 TE 波和 TM 波入射下吸收频率随着施加电压的变化关系;(d)在 TE 波和 TM 波入射下谐振峰频率与施加电压的关系。

Fig.10 (a) Schematic of a tunable metamaterial absorber with graphene electrodes and a cross-shaped metasurface; (b) Micrograph of the cross-shaped array on the metasurface; (c) Dependency of the absorption frequency on applied voltage at TE and TM wave incidences; (d) Dependency of the resonant peak frequency on applied voltage at TE and TM wave incidences.

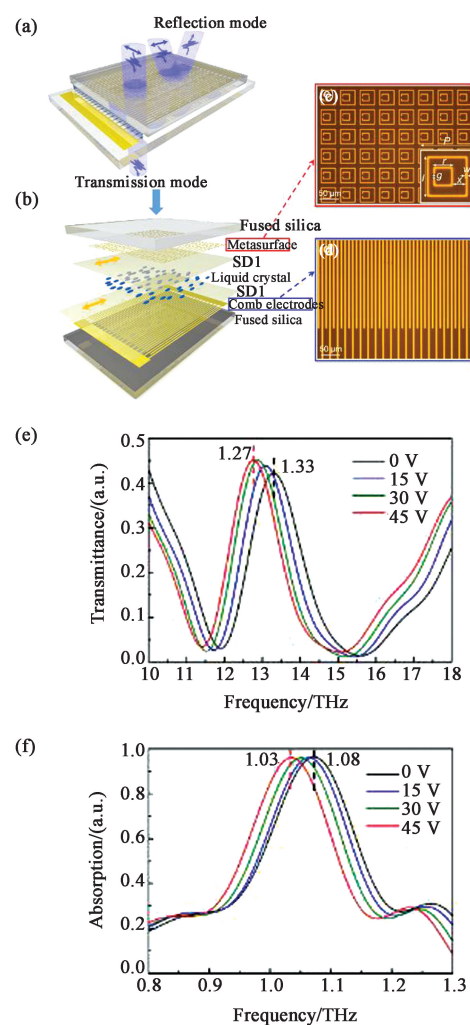


图 11 (a)透射和反射两种模式集成的液晶可调超构器件结构示意图;(b)该器件的结构分解图;(c)上层超构表面的显微照片;(d)下层亚波长金属梳状电极的显微照片;(e)在透射模式下透射频率谱线随着电压增大而红移;(f)在反射模式下吸收频率谱线随着电压增大而红移。

Fig.11 (a) Schematic of the LC integrated metadvice, which can operate in both transmission and reflection modes; (b) Structural decomposition diagram of the metadvice; (c) Micrograph of the metasurface on the upper layer; (d) Micrograph of the subwavelength metal comb electrode on the down layer; (e) In transmission mode, the transmission spectrum is red-shifted with increasing voltage; (f) In reflection mode, the absorption spectrum is red-shifted with increasing voltage.

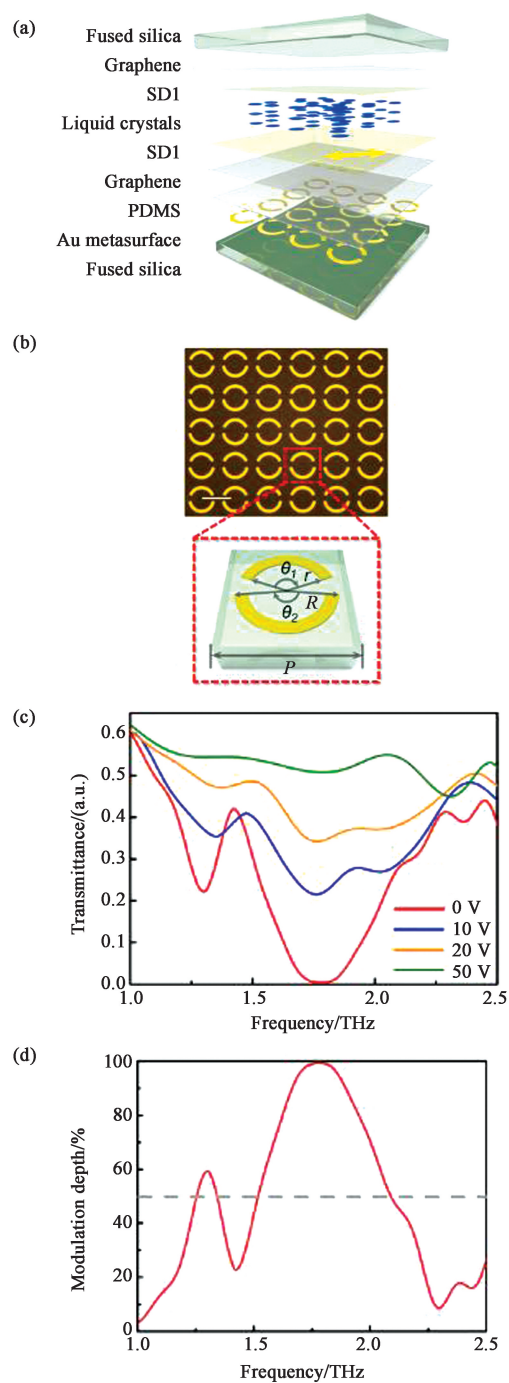


图 12 (a)法诺共振电磁隐身超构器件的结构分解图;(b)超构表面的偏光显微镜照片以及单一不对称开口环结构单元尺寸;(c)在施加不同电压下透射谱的变化情况;(d)0 V 和 50 V 电压下不同频率处的调制深度。

Fig.12 (a) Structural decomposition diagram of the dynamic Fano cloaking metadvice; (b) Microscope of the metasurface and dimensions of a single asymmetric split ring unit; (c) Transmission spectrum under different voltages; (d) Modulation depth of the metadvice at different frequencies.

波,因此 TM 波入射时为透射模式,能够实现类电磁感应透明效应的动态调谐。TE 波入射时为反射模式,电磁波通过介质层的介电损耗和金属层的谐振损耗发生电磁吸收效应。透射模式下红移达到 60 GHz,透明窗口处调制深度达到 37%。反射模式下吸收峰吸收强度达到 97%,加电时红移达到 50 GHz,吸收峰处调制深度达到 81%。该器件在 THz 空间光调制器、传感等领域有着潜在的应用价值。2019 年,Shen 等^[100]将具有不对称开口环阵列的超构表面与电调液晶波片相结合,实现了一种动态法诺(Fano)共振电磁隐身器件。该器件的结构如图 12(a)所示,下层是金属超构表面(图 12(b)),在 x 和 y 两个偏振方向上具有巨大差异的透射谱线;上层为沿着与 x 方向呈 45° 均匀取向的 $250\text{ }\mu\text{m}$ 厚的液晶层,在液晶层两边的石墨烯电极上施加电压时,液晶层能在 1.75 THz 实现电调半波片的功能。该器件能在加电条件下实现 Fano 共振的开与关(图 12(c)),并且调制深度在 1.75 THz 处可以达到 100%(图 12(d))。这类器件尤其适用于对外场十分敏感的 THz 传感领域,该技术有望用于实现对不同生物组织和细胞的检测和区分。除了上述金属型超构表面与液晶集成,介质超构表面同样也能和液晶集成实现各种功能^[101-103],同时由于介质超构表面高效的特点^[104-105],成为了当前的研究热点。2018 年,Zhou 等^[106]利用包含掺杂硅柱阵列的 THz 超构表面与液晶集成,理论上实现了可调谐吸收器,在加电和撤电时吸收率发生明显改变。以上工作均是液晶调控均一的超构表面结构单元进行 THz 频谱的动态调谐。事实上,若是通过合理设计将液晶的几何相位和介质超构表面的共振相位结合起来,可以获得更加多样化的动态功能,实现对 THz 波前远场的操控,例如宽带消色差 THz 透镜、左右旋圆偏振复用器件等。

4 总结与展望

随着 THz 技术及应用的不断发展,亟需高性能波前调控器件以满足 THz 波段传感、成像、通信等领域的需求。目前,纯液晶 THz 调控器件主要用于相移器、波片以及各种几何相位型光学元件以产生各种特种光场以及相位全息。由于超构表面结构单元的均一分布,目前,液晶集成超构器

件的调制能力还处于功能单一的频率调谐,对波前的多维度操控,包括强度、偏振和相位调控,是这类器件未来的发展方向。为了解决大盒厚带来的响应速度慢、驱动电压高、调制效率低等问题,通过将液晶作为环境介质与超构表面进行集成,可以有效规避以上弊端,但也存在设计制备复杂,加工成本高的问题。传统液晶 THz 器件有一定的调制量但响应速度慢,现有的超材料液晶 THz 器件有一定的响应速度但调制量非常有限。因此,通过深入研究 THz 频段液晶的外场调控规律与表面相互作用等液晶动力学和热力学新问题,有望催生出各种新型的液晶 THz 器件并进一步

拓宽其应用领域。

未来,液晶 THz 器件会向着集成化、多功能化的方向不断发展。主要有以下几个探索方向:物质与 THz 波作用的新物理机制的探索,现在的 THz 器件主要是由可见光或者微波波段器件向 THz 的延伸和迁移,THz 本身的特殊性质可能会有一些新机制的启发;适用于 THz 波段的新型液晶材料,尤其是具有大双折射率、低吸收系数、低驱动电压的功能材料;适用于 THz 通信、成像等具体应用的新型集成器件,例如模式复用器件、高效全息器件、大数值孔径 THz 透镜等,有望在前沿的 THz 应用领域取得一些突破性进展。

参 考 文 献:

- [1] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nat. Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] FERGUSON B, ZHANG X C. Materials for terahertz science and technology [J]. *Nat. Mater.*, 2002, 1(1): 26-33.
- [3] GUO X G, CAO J C, ZHANG R, *et al.* Recent progress in terahertz quantum-well photodetectors [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2013, 19(1): 8500508.
- [4] MARKELZ A G, ROITBERG A, HEILWEIL E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2000, 320(1/2): 42-48.
- [5] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1996, 2(3): 739-746.
- [6] KLEINE-OSTMANN T, NAGATSUMA T. A review on terahertz communications research [J]. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 2011, 32(2): 143-171.
- [7] ZHAO J Y, CHU W, GUO L J, *et al.* Terahertz imaging with sub-wavelength resolution by femtosecond laser filament in air [J]. *Sci. Rep.*, 2014, 4: 3880.
- [8] RAHMAN A, RAHMAN A K, RAO B. Early detection of skin cancer via terahertz spectral profiling and 3D imaging [J]. *Biosens. Bioelectron.*, 2016, 82: 64-70.
- [9] REDO-SANCHEZ A, LAMAN N, SCHULKIN B, *et al.* Review of terahertz technology readiness assessment and applications [J]. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 2013, 34(9): 500-518.
- [10] HEYMAN J N, NEOCLEOUS P, HEBERT D, *et al.* Terahertz emission from GaAs and InAs in a magnetic field [J]. *Phys. Rev. B*, 2001, 64(8): 085202.
- [11] SHALABY M, HAURI C P. Spectrally intense terahertz source based on triangular Selenium [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5: 8059.
- [12] TONG J Y, MUTHEE M, CHEN S Y, *et al.* Antenna enhanced graphene THz emitter and detector [J]. *Nano Lett.*, 2015, 15(8): 5295-5301.
- [13] KAWANO Y, ISHIBASHI K. An on-chip near-field terahertz probe and detector [J]. *Nat. Photonics*, 2008, 2(10): 618-621.
- [14] CAI X H, SUSHKOV A B, SUESS R J, *et al.* Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2014, 9(10): 814-819.
- [15] MITTENDORFF M, WINNERL S, KAMANN J, *et al.* Ultrafast graphene-based broadband THz detector [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(2): 021113.
- [16] KAWADA Y, YASUDA T, NAKANISHI A, *et al.* Achromatic prism-type wave plate for broadband terahertz pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(9): 2794-2797.

- [17] ZHANG L L, ZHONG H, DENG C, *et al.* Terahertz wave polarization analyzer using birefringent materials [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(22): 20266-20271.
- [18] SAHA S C, MA Y, GRANT J P, *et al.* Fabrication of silicon quarter wave plate at Terahertz frequency [C]// *Proceedings of 2010 IEEE Photonics Society Winter Topicals Meeting Series*. Majorca, Spain: IEEE, 2010: 38-39.
- [19] CLARK N A, LAGERWALL S T. Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, 36(11): 899-901.
- [20] WILK R, VIEWEG N, KOPSCHINSKI O, *et al.* Liquid crystal based electrically switchable Bragg structure for THz waves [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(9): 7377-7382.
- [21] OH-E M, YOKOYAMA H, KOEBERG M, *et al.* High-frequency dielectric relaxation of liquid crystals; THz time-domain spectroscopy of liquid crystal colloids [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(23): 11433-11441.
- [22] YUAN Y H, HE J, LIU J S, *et al.* Electrically controlled broadband THz switch based on liquid-crystal-filled multi-layer metallic grating structures [J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2011, 276(1): 012228.
- [23] REUTER M, ALTMANN K, VIEWEG N, *et al.* Highly birefringent liquid crystal at THz frequencies [C]// *Proceedings of 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. Wollongong, NSW, Australia: IEEE, 2012: 1-2.
- [24] WANG L, QIU H S, PHAN T N K, *et al.* Visible measurement of terahertz power based on capsulized cholesteric liquid crystal film [J]. *Appl. Sci.*, 2018, 8(12): 2580.
- [25] CHEN C Y, TSAI T R, PAN C L, *et al.* Room temperature terahertz phase shifter based on magnetically controlled birefringence in liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(22): 4497-4499.
- [26] CHEN C Y, HSIEH C F, LIN Y F, *et al.* Magnetically tunable room-temperature 2π liquid crystal terahertz phase shifter [J]. *Opt. Express*, 2004, 12(12): 2625-2630.
- [27] CHEN C Y, PAN C L, HSIEH C F, *et al.* Liquid-crystal-based terahertz tunable Lyot filter [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(10): 101107.
- [28] HO I C, PAN C L, HSIEH C F, *et al.* Liquid-crystal-based terahertz tunable Solc filter [J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(13): 1401-1403.
- [29] HSIEH C F, LAI Y C, PAN R P, *et al.* Polarizing terahertz waves with nematic liquid crystals [J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(11): 1174-1176.
- [30] YANG L, FAN F, CHEN M, *et al.* Magnetically induced birefringence of randomly aligned liquid crystals in the terahertz regime under a weak magnetic field [J]. *Opt. Mater. Express*, 2016, 6(9): 2803-2811.
- [31] LIN C J, LI Y T, HSIEH C F, *et al.* Manipulating terahertz wave by a magnetically tunable liquid crystal phase grating [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(5): 2995-3001.
- [32] YANG C S, CHANG C H, LIN M H, *et al.* THz conductivities of indium-tin-oxide nanowhiskers as a graded-refractive-index structure [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(S4): A441-A451.
- [33] YANG C S, TANG T T, PAN R P, *et al.* Liquid crystal terahertz phase shifters with functional indium-tin-oxide nanostructures for biasing and alignment [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104(14): 141106.
- [34] KAKENOV N, TAKAN T, OZKAN V A, *et al.* Graphene-enabled electrically controlled terahertz spatial light modulators [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(9): 1984-1987.
- [35] YANF, PARROTT E P, LIU X D, *et al.* Low-cost and broad band terahertz antireflection coatings based on DM-SO-doped PEDOT/PSS [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(12): 2886-2889.
- [36] WU Y, RUAN X Z, CHEN C H, *et al.* Graphene/liquid crystal based terahertz phase shifters [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(18): 21395-21402.
- [37] DU Y, TIAN H, CUI X, *et al.* Electrically tunable liquid crystal terahertz phase shifter driven by transparent polymer electrodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4(19): 4138-4142.
- [38] YAN F, PARROTT E P J, UNG B S Y, *et al.* Solvent doping of PEDOT/PSS; effect on terahertz optoelectronic properties and utilization in terahertz devices [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2015, 119(12): 6813-6818.
- [39] HSIEH C F, PAN R P, TANG T T, *et al.* Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter and quarter-

- wave plate [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(8): 1112-1114.
- [40] LIU L M, SHADRIVOV I V, POWELL D A, *et al.* Temperature control of terahertz metamaterials with liquid crystals [J]. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 2013, 3(6): 827-831.
- [41] KOWERDZIEJ R, OLIFIERCZUK M, PARKA J. Thermally induced tunability of a terahertz metamaterial by using a specially designed nematic liquid crystal mixture [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(3): 2443-2452.
- [42] LIN X W, WU J B, HU W, *et al.* Self-polarizing terahertz liquid crystal phase shifter [J]. *AIP Adv.*, 2011, 1(3): 032133.
- [43] ALTMANN K, REUTER M, GARBAT K, *et al.* Polymer stabilized liquid crystal phase shifter for terahertz waves [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(10): 12395-12400.
- [44] YANG C S, TANG T T, CHEN P H, *et al.* Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter with indium-tin-oxide nanowhiskers as transparent electrodes [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(8): 2511-2513.
- [45] BENOR A, TAKIZAWA S Y, PÉREZ-BOLÍVAR C, *et al.* Efficiency improvement of fluorescent OLEDs by tuning the working function of PEDOT : PSS using UV-ozone exposure [J]. *Org. Electron.*, 2010, 11(5): 938-945.
- [46] WANG L, LIN X W, HU W, *et al.* Broadband tunable liquid crystal terahertz waveplates driven with porous graphene electrodes [J]. *Light Sci. Appl.*, 2015, 4(2): e253.
- [47] WANG L, LIN X W, LIANG X, *et al.* Large birefringence liquid crystal material in terahertz range [J]. *Opt. Mater. Express*, 2012, 2(10): 1314-1319.
- [48] WEI T, CHEN P, TANG M J, *et al.* Liquid-crystal-mediated active waveguides toward programmable integrated optics [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, doi: 10.1002/adom.201902033.
- [49] WEI B Y, CHEN P, GE S J, *et al.* Liquid crystal depolarizer based on photoalignment technology [J]. *Photonics Res.*, 2016, 4(2): 70-73.
- [50] SASAKI T, NODA K, KAWATSUKI N, *et al.* Universal polarization terahertz phase controllers using randomly aligned liquid crystal cells with graphene electrodes [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(7): 1544-1547.
- [51] JI Y Y, FAN F, WANG X H, *et al.* Broadband controllable terahertz quarter-wave plate based on graphene gratings with liquid crystals [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(10): 12852-12862.
- [52] YANG C S, SHIH F C, PAN R P, *et al.* Liquid-crystal-enabled electrically tunable terahertz achromatic-wave plate [C]//*Proceedings of 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. Copenhagen, Denmark: IEEE, 2016: 1-2.
- [53] WANG L, GE S J, HU W, *et al.* Tunable reflective liquid crystal terahertz waveplates [J]. *Opt. Mater. Express*, 2017, 7(6): 2023-2029.
- [54] ZOGRIFOPOULOS D C, FERRARO A, ISIC G, *et al.* Tunable terahertz metamaterials based on nematic liquid crystals [C]//*Proceedings of 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. Copenhagen, Denmark: IEEE, 2016: 1-2.
- [55] JI W, LEE C H, CHEN P, *et al.* Meta-q-plate for complex beam shaping [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 25528.
- [56] CHEN P, LU Y Q, HU W. Beam shaping via photopatterned liquid crystals [J]. *Liq. Cryst.*, 2016, 43(13/15): 2051-2061.
- [57] WEI B Y, HU W, MING Y, *et al.* Generating switchable and reconfigurable optical vortices via photopatterning of liquid crystals [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(10): 1590-1595.
- [58] CHEN P, MA L L, HU W, *et al.* Chirality invertible superstructure mediated active planar optics [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 2518.
- [59] CHEN P, MA L L, DUAN W, *et al.* Digitalizing self-assembled chiral superstructures for optical vortex processing [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(10): 1705865.
- [60] BERRY M V. The adiabatic phase and Pancharatnam's phase for polarized light [J]. *J. Mod. Opt.*, 1987, 34(11): 1401-1407.
- [61] 陈鹏,徐然,胡伟,等.基于光取向液晶的光场调控技术[J].*光学学报*,2016,36(10):1026005.
CHEN P, XU R, HU W, *et al.* Beam shaping based on photopatterned liquid crystals [J]. *Acta Opt. Sin.*, 2016, 36(10): 1026005. (in Chinese)
- [62] WU H, HU W, HU H C, *et al.* Arbitrary photo-patterning in liquid crystal alignments using DMD based lithog-

- raphy system [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(15): 16684-16689.
- [63] WEI B Y, LIU S, CHEN P, et al. Vortex Airy beams directly generated via liquid crystal q-Airy-plates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 112(12): 121101.
- [64] DUAN W, CHEN P, GE S J, et al. Helicity-dependent forked vortex lens based on photo-patterned liquid crystals [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(13): 14059-14064.
- [65] CHEN P, GE S J, DUAN W, et al. Digitalized geometric phases for parallel optical spin and orbital angular momentum encoding [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(6): 1333-1338.
- [66] TANG M J, CHEN P, ZHANG W L, et al. Integrated and reconfigurable optical paths based on stacking optical functional films [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(22): 25510-25514.
- [67] WEI B Y, CHEN P, GE S J, et al. Generation of self-healing and transverse accelerating optical vortices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(12): 121105.
- [68] GE S J, CHEN P, SHEN Z X, et al. Terahertz vortex beam generator based on a photopatterned large birefringence liquid crystal [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(11): 12349-12356.
- [69] FRANKE-ARNOLD S, ALLEN L, PADGETT M. Advances in optical angular momentum [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2008, 2(4): 299-313.
- [70] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [71] GE S J, SHEN Z X, CHEN P, et al. Generating, separating and polarizing terahertz vortex beams via liquid crystals with gradient-rotation directors [J]. *Crystals*, 2017, 7(10): 314.
- [72] SHEN Z X, ZHOU S H, GE S J, et al. Liquid crystal tunable terahertz lens with spin-selected focusing property [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(6): 8800-8807.
- [73] CHENG Q Q, MA M L, YU D, et al. Broadband achromatic metalens in terahertz regime [J]. *Sci. Bull.*, 2019, 64(20): 1525-1531.
- [74] SHEN Z X, TANG M J, CHEN P, et al. Planar terahertz photonics mediated by liquid crystal polymers [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(7): 1902124.
- [75] 王磊, 肖芮文, 葛士军, 等. 太赫兹液晶材料与器件研究进展 [J]. *物理学报*, 2019, 68(8): 084205.
- WANG L, XIAO R W, GE S J, et al. Research progress of terahertz liquid crystal materials and devices [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2019, 68(8): 084205. (in Chinese)
- [76] YEN T J, PADILLA W J, FANG N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials [J]. *Science*, 2004, 303(5663): 1494-1496.
- [77] ZHANG S, PARK Y S, LI J, et al. Negative refractive index in chiral metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102(2): 023901.
- [78] CAI W S, CHETTIAR U K, KILDISHEV A V, et al. Optical cloaking with metamaterials [J]. *Nat. Photonics*, 2007, 1(4): 224-227.
- [79] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [80] MA H F, CUI T J. Three-dimensional broadband ground-plane cloak made of metamaterials [J]. *Nat. Commun.*, 2010, 1: 21.
- [81] YANG Y H, JING L Q, ZHENG B, et al. Full-polarization 3D metasurface cloak with preserved amplitude and phase [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(32): 6866-6871.
- [82] WEN D D, YUE F Y, LI G X, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms [J]. *Nat. Commun.*, 2015, 6: 8241.
- [83] YAO Y, SHANKAR R, KATS M A, et al. Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators [J]. *Nano Lett.*, 2014, 14(11): 6526-6532.
- [84] MANJAPPA M, PITCHAPPA P, SINGH N, et al. Reconfigurable MEMS Fano metasurfaces with multiple-input-output states for logic operations at terahertz frequencies [J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9(1): 4056.
- [85] ZHAO X G, SCHALCH J, ZHANG J D, et al. Electromechanically tunable metasurface transmission waveplate at terahertz frequencies [J]. *Optica*, 2018, 5(3): 303-310.
- [86] DRISCOLL T, KIM H T, CHAE B G, et al. Memory metamaterials [J]. *Science*, 2009, 325(5947): 1518-1521.

- [87] CHEN H T, PADILLA W J, ZIDE J M O, *et al.* Active terahertz metamaterial devices [J]. *Nature*, 2006, 444 (7119): 597-600.
- [88] GU J Q, SINGH R, LIU X J, *et al.* Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials [J]. *Nat. Commun.*, 2012, 3: 1151.
- [89] SAVO S, SHREKENHAMER D, PADILLA W J. Liquid crystal metamaterial absorber spatial light modulator for THz applications [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2014, 2(3): 275-279.
- [90] CHEN C C, CHIANG W F, TSAI M C, *et al.* Continuously tunable and fast-response terahertz metamaterials using in-plane-switching dual-frequency liquid crystal cells [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(9): 2021-2024.
- [91] GU J Q, SINGH R, TIAN Z, *et al.* Terahertz superconductor metamaterial [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97 (7): 071102.
- [92] WU J B, JIN B B, WAN J, *et al.* Superconducting terahertz metamaterials mimicking electromagnetically induced transparency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(16): 161113.
- [93] JU L, GENG B S, HORNG J, *et al.* Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2011, 6(10): 630-634.
- [94] LEE S H, CHOI M, KIM T T, *et al.* Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials [J]. *Nat. Mater.*, 2012, 11(11): 936-941.
- [95] SHREKENHAMER D, CHEN W C, PADILLA W J. Liquid crystal tunable metamaterial absorber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110(17): 177403.
- [96] YANG L, FAN F, CHEN M, *et al.* Active terahertz metamaterials based on liquid-crystal induced transparency and absorption [J]. *Opt. Commun.*, 2017, 382: 42-48.
- [97] WANG L, GE S J, HU W, *et al.* Graphene-assisted high-efficiency liquid crystal tunable terahertz metamaterial absorber [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(20): 23873-23879.
- [98] WANG J, TIAN H, WANG Y, *et al.* Liquid crystal terahertz modulator with plasmon-induced transparency metamaterial [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(5): 5769-5776.
- [99] SHEN Z X, ZHOU S H, GE S J, *et al.* Liquid-crystal-integrated metadvice: towards active multifunctional terahertz wave manipulations [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(19): 4695-4698.
- [100] SHEN Z X, ZHOU S H, GE S J, *et al.* Liquid crystal enabled dynamic cloaking of terahertz Fano resonators [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 114(4): 041106.
- [101] SAUTTER J, STAUDE I, DECKER M, *et al.* Active tuning of all-dielectric metasurfaces [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4308-4315.
- [102] KOMAR A, FANG Z, BOHN J, *et al.* Electrically tunable all-dielectric optical metasurfaces based on liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110(7): 071109.
- [103] KOMAR A, PANIAGUA-DOMINGUEZ R, MIROSHNICHENKO A, *et al.* Dynamic beam switching by liquid crystal tunable dielectric metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1742-1748.
- [104] JAHANI S, JACOB Z. All-dielectric metamaterials [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2016, 11(1): 23-26.
- [105] ZHANG H F, ZHANG X Q, XU Q, *et al.* Polarization-independent all-silicon dielectric metasurfaces in the terahertz regime [J]. *Photonics Res.*, 2018, 6(1): 24-29.
- [106] ZHOU S H, SHEN Z X, KANG R Y, *et al.* Liquid crystal tunable dielectric metamaterial absorber in the terahertz range [J]. *Appl. Sci.*, 2018, 8(11): 2211.

作者简介:



申彦春(1980—),男,广东广州人,博士,副教授,2018年于首都师范大学获得博士学位,主要从事太赫兹液晶器件方面的研究。E-mail: cnsyc@126.com



胡伟(1981—),男,山东日照人,博士,教授,2009年于吉林大学获得博士学位,主要从事液晶光子学的研究。E-mail: huwei@nju.edu.cn