

太赫兹液晶可调谐功能器件

冀允允¹, 范飞^{1,3*}, 于建平¹, 许士通¹, 程洁嵘¹, 王湘晖¹, 常胜江^{1,2**}

¹南开大学现代光学研究所, 天津 300350;

²天津光子传感器与传感网络技术重点实验室, 天津 300350;

³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 介绍了不同液晶材料在太赫兹 (THz) 波段的光学各向异性和外场调制特性。在此基础上, 综述了几种基于液晶与人工电磁微结构相结合的 THz 功能器件, 该器件可实现对 THz 波的调谐滤波、电磁诱导透明、相位调制以及偏振控制功能等; 系统地分析了液晶与人工电磁微结构的相互作用机理、THz 波长尺度下液晶的外场调控规律与表面相互作用。此外, 还对 THz 液晶光子器件的研究发展趋势进行了展望。

关键词 太赫兹技术; 石墨烯; 光子晶体; 超材料; 液晶器件

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614006

Terahertz Tunable Devices Based on Liquid Crystal

Ji Yunyun¹, Fan Fei^{1,3*}, Yu Jianping¹, Xu Shitong¹, Cheng Jierong¹,
Wang Xianghui¹, Chang Shengjiang^{1,2**}

¹Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China;

²Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, Tianjin 300350, China;

³State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract This study aims to introduce the optical anisotropy and modulation characteristics of different liquid crystal materials in the terahertz (THz) regime. Herein, several THz functional devices were reviewed based on the combination of liquid crystals and artificial electromagnetic microstructures, realizing the functions, such as tunable filtering, electromagnetic induced transparency, phase modulation, and polarization control of THz waves. Moreover, the interaction mechanism between liquid crystals and artificial electromagnetic microstructures was analyzed and discussed, along with the regulation law of external field and surface interaction at the THz wavelength scale. In addition, the development trend in the applications of THz liquid crystal photonic devices was prospected.

Key words terahertz technology; graphene; photonic crystals; metamaterials; liquid crystal devices

OCIS codes 040.2235; 160.5298; 160.3918; 230.3720

1 引 言

太赫兹 (THz, $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) 波通常是指振荡频率范围为 $0.1 \sim 10.0 \text{ THz}$ 的介于微波与红外光波之间的一段尚未完全开发的电磁波^[1-4]。THz 波的长波段与微波、毫米波重合, 短波段与红外光重合, 是宏观经典理论向微观量子理论的过渡区域, 也

是电子学向光子学的过渡区域, THz 波因其在电磁波谱中的特殊位置, 使其与物质的相互作用具有与微波、光波显著不同的特性, 蕴含着新的基础科学问题和重大技术创新潜力。THz 波具有频带宽、光子能量低、相干性强、测量信噪比高和安全性良好等优点, 在无线通信、雷达、安检、材料表征和医学诊断等领域展现出良好的应用前景^[5-8]。因此, 发展 THz

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-02-03; 录用日期: 2019-02-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0701000, 2016YFC0101002)、国家自然科学基金 (61831012, 61671491)、天津市青年人才托举工程 (TJSQNTJ-2017-12)

* E-mail: fanfei@nankai.edu.cn; ** E-mail: sjchang@nankai.edu.cn

科学与技术对国民经济以及国家安全具有重要的意义。THz 科学与技术的发展必然需要多功能和实用性的 THz 应用系统的支撑,除了 THz 源^[9-10]和探测器^[11-12],高性能的 THz 功能器件(如波导^[13-14]、开关^[15-17]、调制器^[18-20]、滤波器^[21-23]、隔离器^[24-26]、吸收器^[27-29]、偏振器^[30-32]和相移器^[33-34])也必不可少,从而能更好地传导、调制以及操控 THz 波。此外,研究人员利用光子晶体^[35-36]、超材料^[37-38]、超表面^[39-40]和等离子体^[41-42]等人工电磁微结构来提高器件的工作性能。但这些新型功能器件在一定程度上仍存在工作频带窄、功能单一和不可调控的局限,因此发展主动可调谐 THz 功能器件就显得尤为重要。

液晶是发展主动可调谐光子器件的重要候选方案,它具有良好的宽带光学各向异性和电光、磁光调制特性,液晶光子学器件的研发也从短波(如可见光、近红外波段)逐渐向长波方向(如中远红外、THz 波段)延伸。液晶是目前在 THz 波段极少数具有较高双折射、低吸收损耗以及可通过外场实现较大相移调谐范围的材料之一,THz 液晶的研究涉及到 THz 相位调制器、连续可调谐波片和空间光调制器等一系列关键 THz 器件的研制,所以 THz 液晶器件受到人们广泛关注。科研人员已经对 THz 波段常见液晶的光学性质和各向异性参数进行广泛的实验研究。2008 年, Pan 等^[43]率先研究了 5CB 液晶在 THz 波段的折射率各向异性,在 0.3~1.4 THz 频率范围内双折射系数 Δn 为 0.13~0.21。2010 年, Yang 等^[44]研究了 E7 混合液晶的光学常数和双折射特性,在 0.2~2.0 THz 频率范围内,该混合液晶的双折射系数 Δn 为 0.130~0.148,且在室温下的消光系数小于 0.035。2012 年, Wang 等^[45]报道了 0.4~1.6 THz 频率范围内的高双折射液晶 NJU-LDn-4,其双折射系数高达 0.306。2013 年, Reuter 等^[46]也提出了两种 THz 高双折射、低损耗的液晶,其在 0.2~2.5 THz 频率范围内的双折射系数 Δn 分别为 0.32 和 0.38。综上所述,液晶在 THz 波段具有较高的双折射系数和低的吸收系数。

液晶最具吸引力的性质是其光学各向异性可通过改变外电场、磁场、光场或者温度进行调控^[47],制备成能实现特定功能的 THz 可调谐器件(如 THz 开关、滤波器、吸收器以及调制器等),因而受到关注。近年来,人工电磁结构的兴起为 THz 器件的发展提供了新的机遇。所谓的人工电磁结构是指亚波长金属或介质单元以周期或准周期的方式排列形成

的具有特殊电磁特性的结构,其可通过合理设计几何尺寸来灵活地操控光波的振幅、相位以及偏振态,进而实现模式双折射、手性偏振旋转以及二向色性。这些人工电磁结构与液晶结合后,可构成新型 THz 可调谐器件。例如, Wilk 等^[48]在频率为 300 GHz 附近实现了一种基于布拉格结构的 THz 带阻滤波器,其带宽为 60 GHz,并通过电控液晶的方式实现了开关功能。Chen 等^[49]制备了一种内嵌双频液晶的 THz 超材料快速响应光开关,通过电控厚度为 50 μm 的双频液晶实现了 15 GHz 的频率调谐范围,其透射共振峰发生红移和蓝移的响应时间分别为 1.044 ms 和 1.376 ms。Savo 等^[50]实验验证了一种基于超材料吸收器功能的 THz 空间光调制器,通过电控液晶实现了 75% 的调制深度。Isić 等^[51]提出了一种紧凑型超材料吸收器,该器件实现了大于 23 dB 的调制深度、15% 的频谱调谐以及 50 ms 的响应时间。以上几种基于人工电磁结构的 THz 液晶可调谐器件的工作机理包含:1) 通过外场改变液晶折射率引起人工微结构谐振峰的频移或吸收变化;2) 通过人工电磁结构的局域场增强效应,在一定程度上提高 THz 波与液晶的相互作用,反过来又增强液晶的双折射特性并提高其调谐性能,最终实现可调谐滤波和开关等功能。然而,这类器件仍存在调谐范围窄、插损大以及调制深度低等问题。

THz 液晶器件还涉及到 THz 可调谐相位延迟器($\pi/2$ rad 相移对应 1/4 波片; π rad 对应半波片),它也是实现偏振变换器和空间光调制器的基础。Tsai 等^[52]将两个交叉的金属板作为电极,驱动厚度为 38.6 μm 的 5CB 液晶盒,在 1.07 THz 频率处实现了最大相移(4.07°),然而其调制效率很低且驱动电压高。Hsieh 等^[53]利用 125 V 的横向偏置电压驱动厚度为 570 μm 的 E7 液晶盒获得 $\pi/2$ 的大相位延迟,用作电控 THz 液晶相移器和可调谐波片,但是器件所需的外电压较高且响应很慢。Lin 等^[54]用亚波长金属光栅施加 130 V 的纵向电场驱动厚度为 256 μm 的液晶盒,在 1.88 THz 频率处获得 66° 的相移,但其驱动电压仍然很高且该电极具有偏振选择性。在双折射系数一定的条件下,液晶的相位延迟与工作波长呈反比,这就导致现有液晶 THz 相移器的厚度往往都超过 100 μm ,而厚液晶层将导致驱动外场高、响应时间慢、调谐范围窄、插入损耗大以及器件稳定性差等一系列技术问题。更根本的问题是,数十微米至毫米厚度的超厚液晶层必然降低表面锚定层对液晶初始取向的作用,无论使用摩擦

取向还是紫外光致取向的传统锚定方法,远离表面的一部分液晶会处于随机排布状态,从而降低器件的调谐范围,降低偏振转换效率,增加响应时间。

为了避免上述问题,Chen 等^[55]采用旋转外磁场方向的装置来搭建 THz 液晶可调谐相移器,但其实质是机械调控液晶的光轴取向,也不利于器件集成。最近几年,研究人员尝试通过一些新技术来改善 THz 液晶器件的性能,例如采用新型 THz 透明纳米导电薄膜电极可以减小正负电极间的距离,从而降低驱动电压,同时增强表面锚定作用,这在一定程度上增大了调谐范围。Yang 等^[56]采用 ITO“纳米须”作为 E7 液晶盒的电极,利用 17 V 的电压使厚度为 500 μm 的液晶盒在 1 THz 频率附近实现 $\pi/2$ 相移的调谐范围。Wang 等^[57]采用多孔石墨烯和金属亚波长光栅作为 THz 透明电极并辅以表面锚定层,制备了 THz 液晶可调谐相移器,利用 50 V 的电压在 2.1 THz 频率处可实现 π 相移的调谐范围。总之,可调谐相移量不仅依赖于液晶折射率调控,还依赖于 THz 波相移在双折射材料中的积累。而目前的研究中尚未涉及人工微结构中 THz 波与液晶相互作用距离这一关键科学问题,因此人工微结构增强 THz 液晶可调谐相移的机制还有待深入探索。

下文将分类介绍本课题组近年来在 THz 液晶可调谐功能器件方面的研究。首先,介绍不同种类的液晶在 THz 波段的光学各向异性和电光、磁光调制特性。在此基础上,通过探索液晶与人工电磁微结构(包括光子晶体、超材料和超表面等)的相互作用机理,发展 THz 液晶可调谐滤波、开关器件、THz

可调谐相移以及偏振调控器件。这些 THz 液晶可调谐器件在 THz 成像、光谱和信息处理等应用中具有重要作用。

2 液晶在 THz 波段的双折射特性

液晶材料在 THz 波段的性质主要由液晶分子的扭转和振动模式决定,吸收主要来自于液晶分子苯环在短轴方向的扭转。在适当的处理下,液晶分子的导向呈现均一的排布状态,称为向列相液晶,表现出介电各向异性和折射率各向异性。向列相液晶分子呈棒状结构,且取向有序,从光学性质上可以看成单轴晶体,在平行和垂直于光轴方向上存在两个不同的介电常数 ϵ_{\parallel} 和 ϵ_{\perp} ,则介电各向异性表示为 $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ 。实验发现不同类型的液晶分子,其分子的长轴方向偏向于平行或垂直于分子电偶极矩(电场的方向)。在外电场的作用下,正性液晶分子的长轴方向平行于分子电偶极矩(即 $\Delta\epsilon > 0$),负性液晶分子的长轴方向垂直于分子电偶极矩(即 $\Delta\epsilon < 0$)。当入射光的电场方向垂直于液晶指向矢时(o 光),液晶材料折射率为寻常光折射率 n_o ;而当入射光的电场方向沿着液晶的指向矢时(e 光),则其折射率为非常光折射率 n_e 。双折射系数(或光学各向异性)表示为 $\Delta n = n_e - n_o$,其中 $n_o < n_e$ 为正性液晶,反之则为负性液晶。除此之外,液晶的电阻率、电导率和黏滞系数也都表现为各向异性。由此可见,对于不同偏振态的入射光,液晶材料表现出不同的光学特性。表 1 给出了几种常见液晶材料在 THz 波段的光学各向异性参数,其中 α_o 和 α_e 分别为液晶的寻常光吸收系数和非常光吸收系数。

表 1 几种常见液晶材料在 THz 波段的光学各向异性参数

Table 1 Optical anisotropy parameters of several common liquid crystals in THz regime

Liquid crystal	n_o	n_e	Δn	α_o	α_e
5CB ^[58]	~1.641	~1.747	0.106	-	-
E7 ^[59]	~1.590	~1.740	~0.150	3.1-27.1	0.9-7.0
BL037 ^[59]	~1.600	~1.790	~0.190	3.3-33.9	1.0-7.4
NJU-LDn-4 ^[45]	~1.500	~1.806	~0.306	-	-
1852 ^[46]	1.570-1.550	1.890-1.850	0.320±0.020	2.5-22.5	3.0-16.1
1825 ^[46]	1.570-1.540	1.950-1.910	0.380±0.020	3.3-14.7	2.8-22.5

实验上通常采用透射式太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统对样品进行测试。为了得到液晶在 THz 波段的光学各向异性参数,通常先选取不加液晶时空盒的 THz 信号作为参考信号,设其电场强度为 $E_{\text{ref}}(t)$, t 为时间;然后再测量填充液晶之后的 THz 信号,设其电场强度为 $E_{\text{sam}}(t)$,经傅里叶变换后的 THz 电场强度分别为 $E_{\text{ref}}(\omega)$ 和

$E_{\text{sam}}(\omega)$, ω 为频率,相位分别为 $\varphi_{\text{ref}}(\omega)$ 和 $\varphi_{\text{sam}}(\omega)$,则被测样品的 THz 振幅透射率可以表示为

$$t(\omega) = E_{\text{sam}}(\omega) / [E_{\text{ref}}(\omega)]. \quad (1)$$

假设样品为平行厚度且厚度为 d 的物体,在样品吸收较弱的情况下,样品的折射率 $n(\omega)$ 和吸收系数 $\kappa(\omega)$ 分别为^[60]

$$n(\omega) = 1 + \frac{\Delta\varphi(\omega)c}{\omega d}, \quad (2)$$

$$\kappa(\omega) = \frac{-\ln\left[\frac{t(\omega)}{T_{\text{Fresnel}}(\omega)}\right]c}{\omega d}, \quad (3)$$

式中： c 为光速；相位差 $\Delta\varphi(\omega) = \varphi_{\text{sam}}(\omega) - \varphi_{\text{ref}}(\omega)$ ； $T_{\text{Fresnel}}(\omega) = 4n(\omega)/[1+n(\omega)]^2$ 为根据菲涅耳公式计算得到的 THz 波正入射时空气与样品界面的透射率，进一步可以得出样品的吸收系数^[61]

$$\alpha(\omega) = \frac{2\kappa(\omega)\omega}{c}. \quad (4)$$

2.1 液晶在 THz 波段的磁致双折射

下面介绍三种热致液晶在 THz 波段的磁致双折射特性^[62]：5CB、E7 和 BNHR。在室温时这三种液晶呈乳白色悬浊状态，介电各向异性为正 ($n_o < n_e$)，化学稳定性高，在可见光波段的双折射系数分别为 $\Delta n_{5\text{CB}} = 0.16$ 、 $\Delta n_{\text{E7}} = 0.21$ 和 $\Delta n_{\text{BNHR}} = 0.25$ ，其中 BNHR 液晶的黏滞系数最高。

图 1 所示为三种向列相液晶在 THz 波段的折射率。如图 1(a) 所示，沿 x 轴的线偏振 THz 波垂直入射到液晶盒，外加磁场的方向分别垂直于 THz 的传播方向和偏振方向。当外磁场为 0 时，液晶分子处于随机分布状态，整体呈现各向同性，故各个方

向的折射率相等 [$n_x(0 \text{ mT}) = n_y(0 \text{ mT}) = n_{\text{iso}}$]。当外磁场不为 0 时，液晶分子沿着磁场方向转动，此时的液晶层可视为具有光学各向异性的单轴晶体。随着磁场逐渐增强，液晶分子也逐渐向外磁场方向排列，相应的折射率也会逐渐降低，如图 1(b)~(d) 所示。当施加足够强的磁场时，液晶分子将平行于磁场方向排列，即液晶分子指向矢与 y 轴平行。因此，当磁场强度为 30 mT 时，测得的折射率 n_x (30 mT) 是寻常光折射率。对于随机排列的液晶分子，其各向同性态折射率 n_{iso} 可表示为

$$n_{\text{iso}}^2 = \frac{2n_o^2 + n_e^2}{3}, \quad (5)$$

式中： n_o 为寻常光折射率，也即实验测得的折射率 $n_x(30 \text{ mT})$ ；各向同性态折射率 n_{iso} 为实验测得的折射率 $n_x(0 \text{ mT})$ 。则磁场 $B = 30 \text{ mT}$ 时的非常光折射率 n_e 的近似表达式为^[62]

$$n_e = \sqrt{3n_{\text{iso}}^2 - 2n_o^2}. \quad (6)$$

由此可以得出三种液晶在 0.2~1 THz 频率波段的光学各向异性参数，如表 2 所示。5CB、E7 和 BNHR 样品的最高双折射系数分别为 0.168、0.249 和 0.311。因此，相同条件下，填充 BNHR 的液晶盒能够增强其相位调控能力。

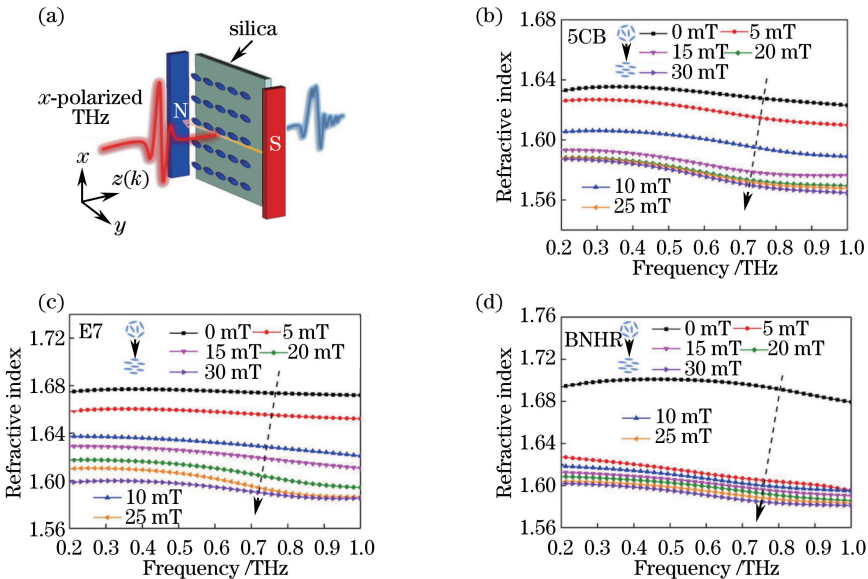


图 1 三种向列相液晶在 THz 波段的折射率。(a) 实验原理示意图；(b) 5CB 液晶折射率谱线；(c) E7 液晶折射率谱线；(d) BNHR 液晶折射率谱线^[62]

Fig. 1 Refractive indexes of three nematic liquid crystals in THz regime. (a) Principle diagram of experiment; (b) refractive index spectra of 5CB liquid crystal; (c) refractive index spectra of E7 liquid crystal; (d) refractive index spectra of BNHR liquid crystal^[62]

表 2 三种液晶在 0.2~1 THz 频率波段的光学各向异性参数

Table 2 Optical anisotropy parameters of liquid crystal in THz regime

Liquid crystal		5CB	E7	BNHR
Terahertz anisotropy [0.2-1 THz, 20 °C]	n_o	1.565-1.587	1.585-1.600	1.581-1.602
	n_{iso}	1.623-1.635	1.672-1.677	1.679-1.701
	n_e	1.727-1.733	1.821-1.834	1.860-1.883
	Δn	0.140-0.168	0.221-0.249	0.279-0.311

2.2 双频液晶在 THz 波段的电控双折射

通常情况下,向列相液晶的分子长轴趋向于外电场的方向,表现出单轴晶体的性质。然而,与传统向列相液晶不同的是,双频液晶的分子取向不仅依赖于外电场的强度大小,还依赖于外电场的交变频率(即 f_M)。本节主要介绍双频液晶在 THz 波段的电控双折射特性^[63]。固定交变电场的大小为 30 kV/m、方向为 y 轴时,通过改变 f_M 的大小来扭转液晶分子的长轴指向。图 2 所示为实验测得双频液晶(DP002-016)的 THz 双折射特性。当 x 轴的人射光为线偏振光时,从实验测得的时域谱可以看出,时域信号的延迟随着 f_M 的增大而逐渐增大,如

图 2(a)所示。而对于 y 方向的入射线偏振光,时域信号的延迟随着 f_M 的增大而逐渐减小,如图 2(b)所示。这预示着液晶分子的长轴指向逐渐从垂直于交变电场的方向转变为沿着交变电场的方向。根据(2)式和(3)式,计算得出相应的折射率和消光系数,如图 2(c)~(f)所示。为了方便讨论,这里定义一个频率相关的参数——群折射率来描述 THz 信号经双频液晶盒之后的延迟,其表达式为^[63]

$$n_g = \frac{(T_s - T_r) \cdot c}{d} + 1, \quad (7)$$

式中: T_s 和 T_r 分别为 THz 信号的主峰穿过双频液晶盒和空盒的时间; d 为液晶盒的厚度。

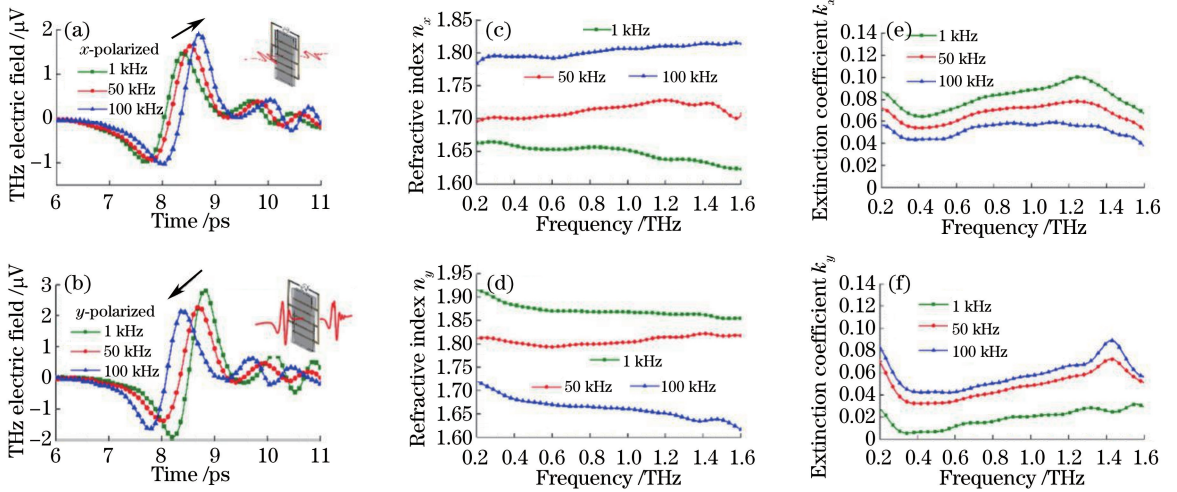


图 2 实验测得双频液晶(DP002-016)的 THz 双折射特性。(a)入射光的偏振态沿着 x 轴的时域信号;(b)沿着 y 轴的时域信号;(c) x 轴方向的折射率谱;(d) y 轴方向的折射率谱;(e) x 轴方向的消光系数;(f) y 轴方向的消光系数^[63]

Fig. 2 Experimentally measured THz birefringent performance of dual-frequency liquid crystal (DP002-016). (a) Time-domain signal of incident light polarization along x -axis; (b) time-domain signal along y -axis; (c) refractive index spectra along x -axis; (d) refractive index spectra along y -axis; (e) extinction coefficient along x -axis; (f) extinction coefficient along y -axis^[63]

双频液晶(DP002-016)随交变电场频率变化的 THz 双折射和相移特性如图 3 所示。其中图 3(b)给出了群折射率 n_g 随交变频率的增大而变化的关系曲线。对于 x 方向入射的线偏光,群折射率 n_{gx} 从 1.66(30 kHz 处)增大到 1.80(80 kHz 处)后趋于稳定,其最大调谐范围为 0.14。相反地,对于 y 方向入射的线偏光,其群折射率 n_{gy} 则从 1.86(40 kHz

处)减小到 1.66(90 kHz 处)后趋于稳定,其最大调谐范围为 -0.2 。由此可见,厚度为 600 μm 的双频液晶在电场强度为 30 kV/m、频率为 1~100 kHz 的交变电场下调谐工作,在 0.68 THz 以上可作为可调谐 1/4 波片,在 1.33 THz 以上可作为可调谐 1/2 波片,如图 3(c)所示。与普通液晶相比,双频液晶具有无需锚定预处理、响应时间快和性质均匀稳

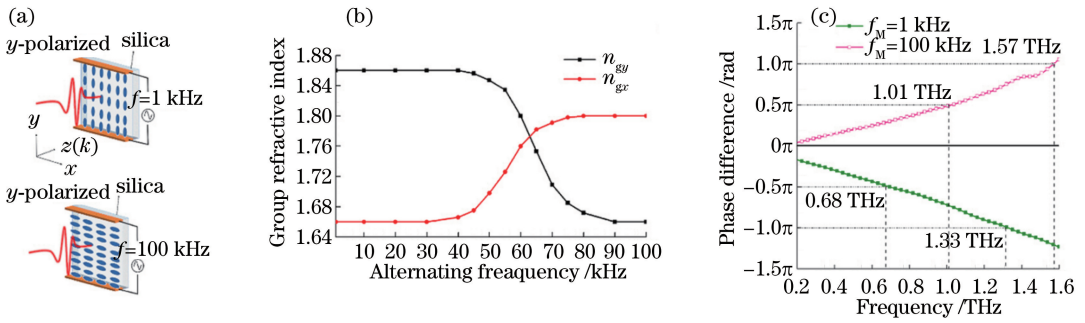


图 3 双频液晶(DP002-016)随交变电场频率变化的 THz 双折射和相移特性。(a)双频液晶在 1 kHz 和 100 kHz 交变电场下的液晶分子排布示意图;(b)群折射率随交变频率变化的曲线;(c)双折射相移谱线^[63]

Fig. 3 THz birefringent and phase shift performances of dual-frequency liquid crystal (DP002-016) versus frequency of alternating electric field. (a) Schematic of liquid crystal molecular arrangement under alternating electric fields of 1 kHz and 100 kHz; (b) group refractive index versus alternating frequency; (c) phase shift spectra of birefringence^[63]

定等明显优势,是一种具有应用潜力的 THz 可调谐功能材料。

3 太赫兹液晶可调谐滤波器与开关器件

液晶的电控特性和易集成的特点,使其成为探索新型主动太赫兹调谐器件最有效的手段之一。太赫兹液晶调谐器件的研究主要包括可调谐吸收器^[64]、快速响应开关^[65]、可调谐滤波器^[66]以及调制器^[67-68]等。其中,滤波器是指对特定波段通过、其他波段吸收或反射的器件,是 THz 通信和雷达系统中的重要器件。基于人工微结构的各类 THz 滤波器(如基于金属孔阵列的带通滤波器^[69]、超材料带阻滤波器^[70]、光子晶体波导宽带滤波器^[71]、微腔窄带滤波器^[72]和等离子体波导机械可调滤波器^[73]等)已被广泛报道。人们更感兴趣的是如何实现滤波器的带宽和工作频率的主动可调谐,其原因在于可调谐滤波器的实现不仅扩展了滤波器的工作范围,还直接实现了 THz 开关和强度调制的功能,当器件被高速调控时就可以作为 THz 调制器使用。

近些年,超材料以其独特的电磁响应特性,在实现 THz 波的调控方面受到科学家的广泛关注,其在相干等离子体系统中引发的类电磁诱导透明(EIT)和电磁诱导吸收(EIA)^[74]现象尤为引人注目。EIT 现象是利用共振模式的相消干涉在谐振谱线中形成一个较窄的透射峰^[75-76]。与之相反,当共振模式发生相长干涉时将引起 EIA 现象^[77],一个明显的吸收峰将取代 EIT 现象中的透射峰。最近,科研工作者们利用一系列超材料结构(如金属线段^[78]、开口谐振环^[79]和非对称 Fano 谐振腔^[80]等)实现了 EIT 和 EIA 效应。为了实现主动可调的 EIT 或 EIA 器件,

基于半导体超材料^[81]、超导超材料^[82]、新型石墨烯超材料^[83]、MEMS 超材料^[84]以及可调谐液晶超材料^[85]等器件已被广泛地研究报道。

3.1 太赫兹金属光子晶体可调谐滤波器

图 4 所示为太赫兹金属光子晶体可调谐滤波器的传输特性。光子晶体的光子带隙使其具有良好的带通或带阻滤波特性,可通过引入功能材料使得 THz 光子晶体的滤波谱线能够在外场的激励下发生平移或强度变化,以实现可调谐滤波和调制功能。本节介绍两种滤波器,分别为液晶填充金属光子晶体(PC)构成的带通滤波器和液晶填充金属光子晶体波导(PCW)构成的带阻滤波器,其结构分别如图 4(b)和图 4(e)所示^[86]。首先,利用时域有限差分法(FDTD)分析液晶填充金属光子晶体在 THz 波段的传输性质,结果如图 4(a)所示。当没有外加电场时,器件的 3 dB 通带位于 0.89~1.03 THz 频率范围内;当外电场增加,液晶的折射率下降,器件的通带向高频移动,最大可以达到 0.99~1.14 THz 频率范围内。图 4(c)显示了器件处于上述两个不同状态下在 1.05 THz 频率处的稳态电场分布。由图 4 可知,这一器件可以实现连续可调谐带通滤波器的功能,其中心可调频率从 0.96 THz 移动到 1.07 THz,调谐范围内 3 dB 带宽始终保持在 150 GHz。

图 4(d)和 4(f)所示分别为液晶填充金属光子晶体波导器件的传输谱线和稳态场分布。未施加电压时,器件的阻带位于 0.89~0.95 THz 频率范围内;施加 5 V 电压时,器件的阻带向高频移动到 1~1.06 THz 频率范围内。器件中心频率从 0.92 THz 移动到 1.03 THz,3 dB 带宽保持在

60 GHz不变,中心频率处的消光比高达 35 dB。从稳态场分布图还可看出,金属光子晶体波导处于禁带时,并非是将波导中电磁波泄漏到周围的光

子晶体空间中,而是光进入波导后发生谐振,最终被反射到波导的输入端口,这与介质光子晶体的泄漏模式损耗机制不同。

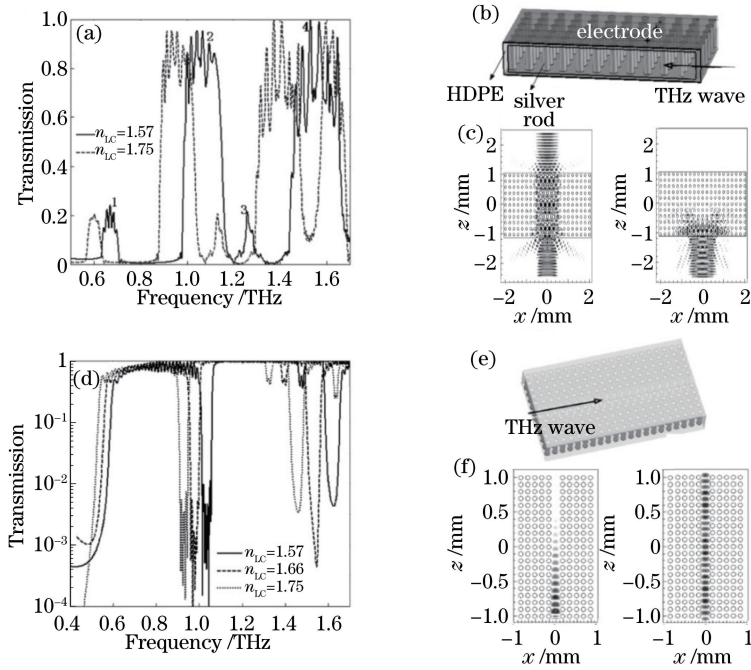


图 4 太赫兹金属光子晶体可调谐滤波器的传输特性。(a)在不同液晶有效折射率 n_{LC} 下液晶填充 PC 器件的透射率谱; (b) PC 器件结构示意图; (c) PC 器件开、关频率下的稳态场分布; (d)在不同液晶有效折射率 n_{LC} 下液晶填充 PCW 器件的透过率谱; (e) PCW 器件结构示意图; (f) PCW 器件开、关频率下的稳态场分布^[86]

Fig. 4 Transmission characteristics of THz metal photonic crystal tunable filters. (a) Transmission spectra of liquid crystal-filled PC device under different effective refractive indexes n_{LC} of liquid crystal; (b) structural diagram of PC device; (c) steady-state field distributions at ON and OFF frequencies of PC device; (d) transmission spectra of liquid crystal-filled PCW device under different effective refractive indexes n_{LC} of liquid crystal; (e) structural diagram of PCW device; (f) steady-state field distributions at ON and OFF frequencies of PCW device^[86]

3.2 可控太赫兹 EIT 与 EIA 超材料器件

本节主要介绍一种超材料器件,并通过电控可调谐材料液晶实现对 EIT 和 EIA 现象的有效调控^[87]。研究表明,超材料的表面结构对液晶分子具有锚定作用,在器件界面处液晶分子沿着谐振环开口方向排列^[88-89],而在未作取向处理的玻璃界面液晶分子呈现随机排列状态。图 5 所示为可控太赫兹 EIT 与 EIA 超材料器件的传输特性实验结果。当施加的偏置电场与谐振环开口方向相互垂直时,液晶分子形成扭曲排列,此时的液晶层可以作为电控相位延迟器和偏振旋转器。由于液晶层的旋光效应和双折射效应,入射 THz 波的线偏振态能够转为椭圆偏振态,随后与超材料相互作用,产生明模式和暗模式两个模式,这两个模式之间发生相干耦合,出现了如图 5(b)所示的 EIT 现象,其中心频率为 0.86 THz,带宽为 260 GHz,调制深度为 18.3 dB。而当偏置电场沿

着谐振环开口方向时,液晶分子将沿外电场方向逐渐形成均匀一致的排列,此时的液晶层仅起到相位延迟器的作用,并不改变入射 THz 波的线偏振态。此时,仅出现电偶极谐振位置随着液晶折射率的变化向低频移动现象,而没有产生 EIT 现象,如图 5(d)所示。

进一步研究了在 $\theta=90^\circ$ 时该超材料器件的电场调控特性,其原理如图 5(e)所示。在这种情况下,入射光偏振态垂直于谐振环的开口方向,随着偏置电场的增加,液晶层由光学各向同性介质转变为各向异性介质。THz 线偏振光经液晶层之后转变为椭圆偏振光,从而也产生了两个模式,且明、暗两个模式之间发生相长干涉,使原有的透射谱线中出现一个谐振谷,其中心频率为 1.02 THz,带宽为 320 GHz,调制深度为 10.5 dB,如图 5(f)所示。实验结果表明,该器件实现了电磁诱导吸收现象,并与理论预期吻合。

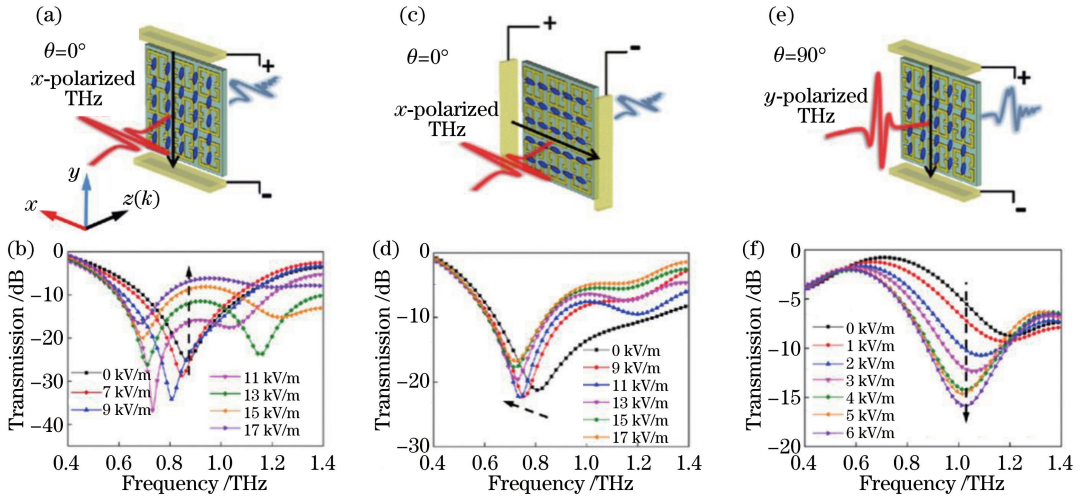


图 5 可调控太赫兹 EIT 与 EIA 超材料器件的传输特性实验结果。 $\theta=0^\circ$ 时外电场沿着 y 方向时液晶超材料(a)示意图及(b)传输谱线; $\theta=0^\circ$ 时外电场沿着 x 方向时液晶超材料(c)示意图及(d)传输谱线; $\theta=90^\circ$ 时外电场沿着 y 方向时液晶超材料(e)示意图及(f)传输谱线^[87]

Fig. 5 Experimental results of transmission characteristics of tunable THz EIT and EIA metamaterial devices. (a) Schematic and (b) transmission spectra of liquid crystal metamaterial when external electric field is along y direction at $\theta=0^\circ$; (c) schematic and (d) transmission spectra of liquid crystal metamaterial when external electric field is along x direction at $\theta=0^\circ$; (e) schematic and (f) transmission spectra when external electric field is along y direction at $\theta=90^\circ$ ^[87]

4 太赫兹液晶可调谐相移与偏振控制器件

传统的 THz 可调谐相位延迟器件主要利用天然晶体材料(如石英晶体)、堆栈的聚合物以及光栅结构等来实现,这些器件往往存在较大的器件厚度、制作困难、工作波长单一、透射率低以及无法主动调控等缺点,因此很难走向实际应用。近年来,由于人工微结构具有加工简单和设计灵活等优点,被广泛地应用于 THz 可调谐相位延迟器件中^[90-91],并通过合理地设计器件尺寸还可有效地改善器件的带宽窄和透射率低等缺点。然而,这类 THz 器件仍无法实现主动调控的功能。液晶分子在外场的控制下表现为各向异性的单轴晶体,并通过扭转液晶分子的导向实现对 THz 波的相位调控,被广泛地用作 THz 波段的液晶相移器^[92]、偏振控制器^[93]以及波片^[94]等。但 THz 波亚毫米波长的长波特性,使得现有 THz 液晶相位控制器件的厚度需达到亚毫米量级才能实现足够大的相移和调谐范围,存在驱动外场高、响应时间长、调谐范围窄、插入损耗大和器件稳定性差等问题。通过将液晶与 THz 介质或金属人工微结构相结合可有效地提高器件的工作性能。Vasić 等^[95]提出一种基于过耦合 MIM 超材料腔的 THz 液晶偏振转换器,并通过 MIM 腔来增强 THz

波与液晶的相互作用,实现线偏振光到右旋圆偏振光、正交线偏振光或左旋圆偏振光的转变。Wang 等^[96]设计了一种基于亚波长金属光栅-液晶-金属反射镜的反射式的 THz 波片,通过亚波长金属光栅对 THz 波的偏振选择作用来增大横电模(TE)和横磁模(TM)之间的相位延迟,从而可在 1.1~2.5 THz 宽频率范围内实现 1/4 波片的功能、在 2.2~2.5 THz 频率范围内实现 1/2 波片的功能。可见,人工微结构为 THz 液晶可调谐相位延迟器件提供了一种新的研究思路,其工作机理有待进一步研究,以提高器件的工作性能。

4.1 基于栅-格复合介质超表面结构的太赫兹液晶相移器

本节主要介绍一种具有高人工双折射的栅-格复合介质超表面结构,并将其与液晶相结合,构成电控主动可调谐超表面器件,液晶填充介质超表面的 3D 结构如图 6(a)所示^[97]。在未对液晶分子作预取向处理的情况下,未施加电场时液晶分子处于随机排列的状态。随着外电场的增大,液晶分子逐渐从随机排列状态转向沿着外场方向均匀排列的状态,从而使 y 方向上的等效折射率发生连续的改变,如 6(b)所示。

图 6(c)给出了在 0.7 THz 频率处三种不同介

质基板的电控液晶相移器随偏置电场变化的相移曲线,即裸硅片基板、 $\theta=90^\circ$ 的复合介质超表面基板和 $\theta=0^\circ$ 的复合介质超表面基板。研究表明,将液晶填充到介质 EIT 超表面结构后,液晶的可调谐相移显著增强,为无微结构时的 1.8 倍。这主要是因为在外电场的作用下,介质超表面的栅-格复合晶格强烈影响液晶分子的分布和导向。当没有偏置电场时,液晶分子随机排列。随后对其施加电场,液晶分子开始沿着栅脊的方向旋转。其中主要有两个力对液晶分子的排列起作用,即电场力(使液晶分子旋转到电场方向)和表面锚定力(使液晶分子向栅脊的方向旋转)。当电场较小时,表面锚定力大于电

场力,对于裸硅片基板和 $\theta=90^\circ$ 的复合介质超表面基板的液晶相移器,液晶分子旋转到 x 轴方向(即栅脊的方向),且器件的相位随电场的增大不断减小。当 $\theta=90^\circ$ 时,复合介质超表面基板的液晶相移器中两个力沿着相同的方向,所以与裸硅片基板的液晶相移器相比,相同电场下的相移效应增强。而对于 $\theta=0^\circ$ 的介质超表面基板的液晶相移器,液晶分子同样旋转到栅脊的方向(即 y 轴方向),且器件的相位随电场的增大而不断增大。这是因为其中的两个力相互正交,并且表面锚定力起主导作用,所以相移向反方向变化,在相同的电场下液晶的相移效应变弱。

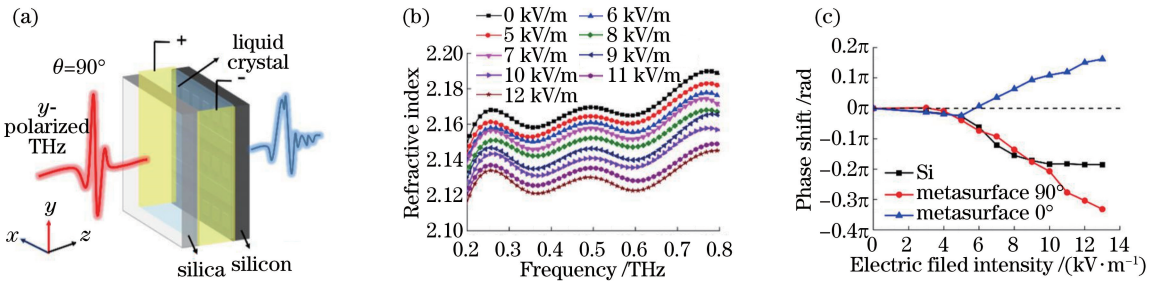


图 6 基于栅-格复合介质超表面结构的大赫兹液晶相移器的实验结果。(a)液晶填充介质超表面的 3D 结构示意图;(b)随外电场变化的有效折射率谱;(c)在 0.7 THz 频率处三种基于不同介质基板的电控液晶相移器随偏置电场变化的相移曲线^[97]

Fig. 6 Experimental results of THz liquid crystal phase shifter based on grid-lattice composite dielectric metasurface structure. (a) 3D structural diagram of liquid crystal filled dielectric metasurface; (b) effective refractive index spectra for different external electric fields; (c) phase shift of three electronically controlled liquid crystal phase shifters based on different dielectric substrates versus bias electric field at 0.7 THz^[97]

4.2 基于电控液晶-石墨烯光栅的宽带可调 1/4 波片

本节主要介绍两种基于石墨烯光栅结构的可开关 1/4 波片:等周期石墨烯光栅(EPG)和渐变周期石墨烯光栅(PGG),通过调控石墨烯的费米能级可使该 1/4 波片实现开关功能^[98]。研究表明,EPG 结构的有效带宽为 0.25,而 PGG 结构的有效带宽为 0.38,是 EPG 结构的 1.52 倍,该结构 1/4 波片的有效带宽显著增大,因此,通过对石墨烯光栅引入空间梯度分布形成的 PGG 结构的 1/4 波片可以增大两个正交偏振分量的波矢差,降低 $\pi/2$ 相位延迟的频率范围、1/4 波片的中心工作频率和有效带宽。

随后将液晶与双层石墨烯光栅结合,构成基于液晶渐变周期石墨烯光栅(PGGLC)的宽带可调谐液晶相移器,其结构如图 7(a)所示。通过调控石墨烯光栅的费米能级,可使器件实现开关功能,当未施加偏置电压(化学势 $\mu_c=0$ eV)时,器件处于 OFF 态;当施加 $V_g=43.1$ V 的偏置电压(化学势 $\mu_c=0.5$ eV)时,器件处于 ON 态。之后再通过电压控制液晶分子的光轴方向,使出射的两个正交偏振分量

之间存在 0.5π 和 1.5π 的相位延迟,进而实现中心频率连续可调的 1/4 波片,如图 7(b)所示。进一步对比液晶等周期石墨烯光栅(EPGLC)和 PGGLC 两种不同结构,结果显示 PGG 能产生更大的双折射相移,且可在相等的驱动电压下使得液晶可调谐相移器件的工作频率更低,获得更大的可调谐频率范围。

5 结束语

随着 THz 技术及其应用系统的不断发展,急需高性能的 THz 功能器件,以满足 THz 通信、信号处理、成像、光谱检测中相位延迟、偏振转换和空间相位调制等功能需求。目前,基于液晶与人工电磁微结构相结合的设计理念为主动可调谐 THz 功能器件提供了一个更为广阔的研究平台。通过光场、温度、电场和磁场等外场调控方式灵活地将 THz 波与液晶相互作用。液晶在 THz 波段的应用主要包括 THz 液晶可调谐器件和可调谐相位延迟器件两大类:一方面,THz 液晶可调谐器件主要依赖于液晶

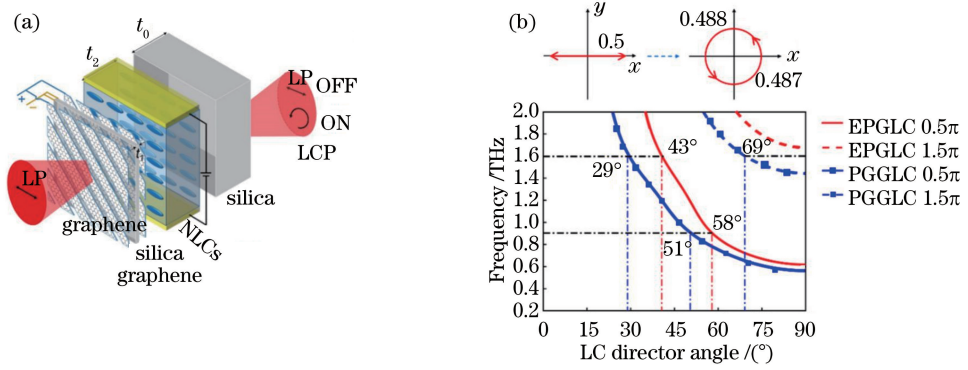


图 7 基于电控液晶-石墨烯光栅的宽带可调 QWP 的仿真结果。(a)基于 PGGLC 的宽带可调谐液晶相移器的示意图；

(b)偏振转换示意图以及两种 QWP 的工作曲线对比图^[98]

Fig. 7 Simulation results of broadband tunable QWP based on electronically controlled liquid crystal-graphene grating.

(a) Schematic of broadband tunable QWP based on PGGLC; (b) schematic of polarization conversion and comparison of operating curves of two QWPs^[98]

的折射率变化而不依赖于液晶层的厚度,从而实现人工微结构谐振峰的频移或吸收的主动可调作用。而现有的 THz 液晶可调谐器件在调谐范围、插入损耗和调制深度等方面仍存在较大的问题;另一方面,THz 液晶可调谐相位延迟器件不仅依赖于液晶的双折射系数还依赖于液晶层的厚度,通过合理设计器件可在特定波段获得 $\pi/2$ 或 π 的相位延迟,从而实现可调谐相移器、偏振转换器以及空间光调制器。然而目前 THz 液晶器件在调谐范围、驱动场强、响应时间、器件厚度和插入损耗等方面仍存在不足。

介绍了分别在磁场和电场驱动方式下两种不同液晶的双折射特性,并介绍了几种 THz 波段的液晶可调谐器件和可调谐相位延迟器件。通过将液晶与人工电磁微结构相结合来增强外场、液晶和 THz 波三者间的相互作用,为进一步发展新型主动的 THz 可调谐器件打下基础,并为 THz 成像、通信和偏振光谱等重要应用提供可靠的器件支撑。

本领域未来的发展趋势主要集中在以下 3 个方面。

1) 需探索研究新型液晶材料,增大材料本身的双折射效应,从而改善器件的工作性能。探索研究电场极化敏感纳米材料(如碳纳米管、银纳米线)和磁化敏感纳米材料(如磁流体)合成新型铁电和铁磁纳米液晶。研究 THz 波、纳米粒子及其团簇和液晶分子在外场作用下的相互作用机理以及电、磁纳米粒子及其团簇对液晶相移和外场调控特性的改善规律和机制。

2) 需探索人工微结构与液晶结合后,在外场作用下 THz 波、液晶和微结构三者间的相互作用机理。深入研究液晶与人工微结构的光轴匹配原理、

液晶的天然相移与人工微结构相移相互补偿规律,以及人工微结构单元对液晶表面锚定作用,为新型主动的 THz 液晶可调谐器件提供指导。

3) 还需探索 THz 波段新型透明的电极,例如碳纳米管层、多孔 3D 石墨烯等新型二维导电材料,同时结合人工微结构来构成功能电极。通过合理设计、仿真并测试电极结构和排布方式,达到提高透射率、降低阈值驱动电压和增大器件调谐范围的目的。

在亚毫米尺度下,传统液晶物理学理论及其相关技术已经不再适用,要解决上述一系列科学问题和技术瓶颈的关键是要发展适用于 THz 波长尺度的液晶物理与器件技术。因此,深入探索液晶与 THz 波相互作用规律、THz 波长尺度下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,具有重要的基础理论和实际应用价值,对其开展相关研究,既是对液晶物理的新发展,又是对 THz 重要功能器件及相关技术的推动。

参 考 文 献

[1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
 [2] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
 [3] Williams B S. Terahertz quantum-cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2007, 1(9): 517-525.
 [4] Guo X G, Cao J C, Zhang R, et al. Recent progress in terahertz quantum-well photodetectors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(1): 8500508.
 [5] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A review on

- terahertz communications research [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, 32 (2): 143-171.
- [6] Ho L, Pepper M, Taday P. Signatures and fingerprints[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(9): 541-543.
- [7] Zhao J Y, Chu W, Guo L J, *et al.* Terahertz imaging with sub-wavelength resolution by femtosecond laser filament in air [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3880.
- [8] Rahman A, Rahman A K, Rao B. Early detection of skin cancer via terahertz spectral profiling and 3D imaging [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 82: 64-70.
- [9] Heyman J N, Neocleous P, Hebert D, *et al.* Terahertz emission from GaAs and InAs in a magnetic field[J]. *Physical Review B*, 2001, 64(8): 085202.
- [10] Shalaby M, Hauri C P. Spectrally intense terahertz source based on triangular selenium [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8059.
- [11] Kawano Y, Ishibashi K. An on-chip near-field terahertz probe and detector[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(10): 618-621.
- [12] Cai X H, Sushkov A B, Suess R J, *et al.* Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(10): 814-819.
- [13] Wang K L, Mittleman D M. Metal wires for terahertz wave guiding [J]. *Nature*, 2004, 432 (7015): 376-379.
- [14] Chen L, Xu J M, Gao C M, *et al.* Manipulating terahertz electromagnetic induced transparency through parallel plate waveguide cavities[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(25): 251105.
- [15] Hendry E, Lockyear M J, Gómez Rivas J, *et al.* Ultrafast optical switching of the THz transmission through metallic subwavelength hole arrays [J]. *Physical Review B*, 2007, 75(23): 235305.
- [16] Wang G C, Zhang J N, Zhang B, *et al.* Photo-excited terahertz switch based on composite metamaterial structure[J]. *Optics Communications*, 2016, 374: 64-68.
- [17] Gu J Q, Singh R, Liu X J, *et al.* Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1151.
- [18] Fan F, Hou Y, Jiang Z W, *et al.* Terahertz modulator based on insulator-metal transition in photonic crystal waveguide [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4589-4596.
- [19] Li Q, Tian Z, Zhang X Q, *et al.* Active graphene-silicon hybrid diode for terahertz waves [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7082.
- [20] Chen S, Fan F, Miao Y P, *et al.* Ultrasensitive terahertz modulation by silicon-grown MoS₂ nanosheets[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(8): 4713-4719.
- [21] Yang K, Liu S C, Arezoomandan S, *et al.* Graphene-based tunable metamaterial terahertz filters [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105 (9): 093105.
- [22] Zhou X T, Yin X, Zhang T, *et al.* Ultrabroad terahertz bandpass filter by hyperbolic metamaterial waveguide[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11657-11664.
- [23] Yang J, Gong C, Sun L, *et al.* Tunable reflecting terahertz filter based on chirped metamaterial structure[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38732.
- [24] Fan F, Chen S, Wang X H, *et al.* Tunable nonreciprocal terahertz transmission and enhancement based on metal/magneto-optic plasmonic lens [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8614-8621.
- [25] Chen S, Fan F, Wang X H, *et al.* Terahertz isolator based on nonreciprocal magneto-metamaterial [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1015-1024.
- [26] Shalaby M, Peccianti M, Ozturk Y, *et al.* A magnetic non-reciprocal isolator for broadband terahertz operation [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1558.
- [27] Shi C, Zang X F, Wang Y Q, *et al.* A polarization-independent broadband terahertz absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(3): 031104.
- [28] Zang X F, Shi C, Chen L, *et al.* Ultra-broadband terahertz absorption by exciting the orthogonal diffraction in dumbbell-shaped gratings[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8901.
- [29] Yao G, Ling F R, Yue J, *et al.* Dual-band tunable perfect metamaterial absorber in the THz range[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1518-1527.
- [30] Cong L Q, Xu N N, Han J G, *et al.* A tunable dispersion-free terahertz metadvice with pancharatnam-berry-phase-enabled modulation and polarization control[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(42): 6630-6636.
- [31] Xu S T, Hu F T, Chen M, *et al.* Broadband terahertz polarization converter and asymmetric transmission based on coupled dielectric-metal grating [J]. *Annalen der Physik*, 2017, 529(10): 1700151.
- [32] Xu S T, Chen S, Mou L L, *et al.* Carbon nanotube attached subwavelength grating for broadband terahertz polarization conversion and dispersion control[J]. *Carbon*, 2018, 139: 801-807.

- [33] Du Y, Tian H, Cui X, *et al.* Electrically tunable liquid crystal terahertz phase shifter driven by transparent polymer electrodes [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(19): 4138-4142.
- [34] Han Z L, Ohno S, Tokizane Y, *et al.* Thin terahertz-wave phase shifter by flexible film metamaterial with high transmission [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31186-31196.
- [35] Fan F, Chen S, Lin W, *et al.* Magnetically tunable terahertz magnetoplasmons in ferrofluid-filled photonic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(16): 161115.
- [36] Tsuruda K, Fujita M, Nagatsuma T. Extremely low-loss terahertz waveguide based on silicon photonic-crystal slab [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (25): 31977-31990.
- [37] Zheludev N I, Kivshar Y S. From metamaterials to metadevices[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 917-924.
- [38] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, *et al.* Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction [J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [39] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339 (6125): 1232009.
- [40] Yang Y M, Kamaraju N, Campione S, *et al.* Transient GaAs plasmonic metasurfaces at terahertz frequencies[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(1): 15-21.
- [41] Azad A K, O'Hara J F, Singh R, *et al.* A review of terahertz plasmonics in subwavelength holes on conducting films[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(1): 8400416.
- [42] Low T, Avouris P. Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2): 1086-1101.
- [43] Pan R P, Hsieh C F, Pan C L, *et al.* Temperature-dependent optical constants and birefringence of nematic liquid crystal 5CB in the terahertz frequency range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(9): 093523.
- [44] Yang C S, Lin C J, Pan R P, *et al.* The complex refractive indices of the liquid crystal mixture E7 in the terahertz frequency range [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(9): 1866-1873.
- [45] Wang L, Lin X W, Liang X, *et al.* Large birefringence liquid crystal material in terahertz range [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(10): 1314-1319.
- [46] Reuter M, Vieweg N, Fischer B M, *et al.* Highly birefringent, low-loss liquid crystals for terahertz applications [J]. *APL Materials*, 2013, 1 (1): 012107.
- [47] Liu Y, Fan F, Chen S, *et al.* Terahertz optical properties of nematic liquid crystals depended on different external fields [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0226001.
刘岩, 范飞, 陈赛, 等. 外场下向列相液晶太赫兹光学性质[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0226001.
- [48] Wilk R, Vieweg N, Kopschinski O, *et al.* Liquid crystal based electrically switchable Bragg structure for THz waves[J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7377-7382.
- [49] 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]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2021-2024.
- [50] Savo S, Shrekenhamer D, Padilla W J. Liquid crystal metamaterial absorber spatial light modulator for THz applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(3): 275-279.
- [51] Isić G, Vasić B, Zografopoulos D C, *et al.* Electrically tunable critically coupled terahertz metamaterial absorber based on nematic liquid crystals[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 3(6): 064007.
- [52] Tsai T R, Chen C Y, Pan R P, *et al.* Electrically controlled room temperature terahertz phase shifter with liquid crystal[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2004, 14(2): 77-79.
- [53] Hsieh C F, Pan R P, Tang T T, *et al.* Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter and quarter-wave plate[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(8): 1112-1114.
- [54] Lin X W, Wu J B, Hu W, *et al.* Self-polarizing terahertz liquid crystal phase shifter [J]. *AIP Advances*, 2011, 1(3): 032133
- [55] Chen C Y, Hsieh C F, Lin Y F, *et al.* Magnetically tunable room-temperature 2π liquid crystal terahertz phase shifter [J]. *Optics Express*, 2004, 12(12): 2625-2630.
- [56] 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]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(14): 141106.
- [57] Wang L, Lin X W, Hu W, *et al.* Broadband tunable liquid crystal terahertz waveplates driven with porous graphene electrodes [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(2): e253.
- [58] Wilk R, Vieweg N, Kopschinski O, *et al.* THz

- spectroscopy of liquid crystals from the CB family [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2009, 30(11): 1139-1147.
- [59] Park H, Parrott E P J, Fan F, *et al.* Evaluating liquid crystal properties for use in terahertz devices [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 11899-11905.
- [60] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J L. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(2): 409-415.
- [61] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(7): 1562-1571.
- [62] 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]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(9): 2803-2811.
- [63] Yu J P, Chen S, Fan F, *et al.* Tunable terahertz wave-plate based on dual-frequency liquid crystal controlled by alternating electric field [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 663-673.
- [64] Shrekenhamer D, Chen W C, Padilla W J. Liquid crystal tunable metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(17): 177403.
- [65] Zografopoulos D C, Beccherelli R. Tunable terahertz fishnet metamaterials based on thin nematic liquid crystal layers for fast switching [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13137.
- [66] Zhang H, Guo P, Chen P, *et al.* Liquid-crystal-filled photonic crystal for terahertz switch and filter [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(1): 101-106.
- [67] Su J, Chen H M. Terahertz wave modulator based on liquid-crystal-filled photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2710-2713.
苏坚, 陈鹤鸣. 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器 [J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2710-2713.
- [68] Wang J, Tian H, Wang Y, *et al.* Liquid crystal terahertz modulator with plasmon-induced transparency metamaterial [J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5769-5776.
- [69] McCrindle I J H, Grant J, Drysdale T D, *et al.* Hybridization of optical plasmonics with terahertz metamaterials to create multi-spectral filters [J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 19142-19152.
- [70] Zhu Y H, Vegesna S, Zhao Y, *et al.* Tunable dual-band terahertz metamaterial bandpass filters [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2382-2384.
- [71] Luo Y, Li Y Y, Hu Z F, *et al.* A novel broadband terahertz filter for photonic crystal [J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 63(17): 1688-1694.
- [72] He J L, Liu P G, He Y L, *et al.* Narrow bandpass tunable terahertz filter based on photonic crystal cavity [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(6): 776-779.
- [73] Chen M, Fan F, Yang L, *et al.* Mechanically tunable terahertz plasmonic waveguide filter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0411001.
陈猛, 范飞, 杨磊, 等. 机械可调谐太赫兹等离子体波导滤波器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0411001.
- [74] Tassin P, Zhang L, Zhao R K, *et al.* Electromagnetically induced transparency and absorption in metamaterials: the radiating two-oscillator model and its experimental confirmation [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(18): 187401.
- [75] Zhu L, Meng F Y, Fu J H, *et al.* An approach to configure low-loss and full transmission metamaterial based on electromagnetically induced transparency [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 4285-4288.
- [76] Yang Y M, Kravchenko I I, Briggs D P, *et al.* All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5753.
- [77] Wan M L, He J N, Song Y L, *et al.* Electromagnetically induced transparency and absorption in plasmonic metasurfaces based on near-field coupling [J]. *Physics Letters A*, 2015, 379(30/31): 1791-1795.
- [78] Liu J F, Zhou Q L, Shi Y L, *et al.* Study of dipole arrays at terahertz frequencies [J]. *Optics Communications*, 2013, 291: 26-30.
- [79] Qiao S, Zhang Y X, Xu G Q, *et al.* Controlling the transparency window in terahertz band using mode coupling metamaterials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(6): 063103.
- [80] Chen C Y, Un I W, Tai N H, *et al.* Asymmetric coupling between subradiant and superradiant plasmonic resonances and its enhanced sensing performance [J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 15372-15380.
- [81] Yahiaoui R, Manjappa M, Srivastava Y K, *et al.* Active control and switching of broadband electromagnetically induced transparency in symmetric metadevices [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(2): 021101.
- [82] Jin B B, Wu J B, Zhang C H, *et al.* Enhanced slow light in superconducting electromagnetically induced transparency metamaterials [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2013, 26(7): 074004.

- [83] Xiao S Y, Wang T, Liu T T, *et al.* Active modulation of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz hybrid metal-graphene metamaterials [J]. Carbon, 2018, 126: 271-278.
- [84] Pitchappa P, Manjappa M, Ho C P, *et al.* Active control of electromagnetically induced transparency analog in terahertz MEMS metamaterial [J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(4): 541-547.
- [85] Shen Z X, Zhou S H, Ge S J, *et al.* Liquid-crystal-integrated metadevice: towards active multifunctional terahertz wave manipulations [J]. Optics Letters, 2018, 43(19): 4695-4698.
- [86] Fan F, Chang S J, Hou Y. Metallic photonic crystals for terahertz tunable filters [J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(1): 72-78.
- [87] Yang L, Fan F, Chen M, *et al.* Active terahertz metamaterials based on liquid-crystal induced transparency and absorption [J]. Optics Communications, 2017, 382: 42-48.
- [88] Decker M, Kremers C, Minovich A, *et al.* Electro-optical switching by liquid-crystal controlled metasurfaces [J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8879-8885.
- [89] Buchnev O, Podoliak N, Kaczmarek M, *et al.* Electrically controlled nanostructured metasurface loaded with liquid crystal: toward multifunctional photonic switch [J]. Advanced Optical Materials, 2015, 3(5): 674-679.
- [90] Yang L, Fan F, Chen M, *et al.* Multifunctional metasurfaces for terahertz polarization controller [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(8): 080702.
杨磊, 范飞, 陈猛, 等. 多功能太赫兹超表面偏振控制器 [J]. 物理学报, 2016, 65(8): 080702.
- [91] Li Y H, Zhou L, Zhao G Z. Terahertz broadband polarization converter based on anisotropic metasurface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0314001.
李永花, 周璐, 赵国忠. 基于各向异性超表面的太赫兹宽带偏振转换器 [J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0314001.
- [92] Wu Y, Ruan X Z, Chen C H, *et al.* Graphene/liquid crystal based terahertz phase shifters [J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21395-21402.
- [93] Sasaki T, Okuyama H, Sakamoto M, *et al.* Twisted nematic liquid crystal cells with rubbed poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(styrenesulfonate) films for active polarization control of terahertz waves [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(14): 143106.
- [94] Yang C S, Kuo C, Tang C C, *et al.* Liquid-crystal terahertz quarter-wave plate using chemical-vapor-deposited graphene electrodes [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 2200808.
- [95] Vasić B, Zografopoulos D C, Isić G, *et al.* Electrically tunable terahertz polarization converter based on overcoupled metal-isolator-metal metamaterials infiltrated with liquid crystals [J]. Nanotechnology, 2017, 28(12): 124002.
- [96] Wang L, Ge S J, Hu W, *et al.* Tunable reflective liquid crystal terahertz waveplates [J]. Optical Materials Express, 2017, 7(6): 2023-2029.
- [97] Ji Y Y, Fan F, Chen M, *et al.* Terahertz artificial birefringence and tunable phase shifter based on dielectric metasurface with compound lattice [J]. Optics Express, 2017, 25(10): 11405-11413.
- [98] Ji Y Y, Fan F, Wang X H, *et al.* Broadband controllable terahertz quarter-wave plate based on graphene gratings with liquid crystals [J]. Optics Express, 2018, 26(10): 12852-12862.