

太赫兹液晶材料与器件研究进展

王磊 肖芮文 葛士军 沈志雄 吕鹏 胡伟 陆延青

Research progress of terahertz liquid crystal materials and devices

Wang Lei Xiao Rui-Wen Ge Shi-Jun Shen Zhi-Xiong Lü Peng Hu Wei Lu Yan-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 084205 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182275

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182275>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于石墨烯的太赫兹器件研究进展

Progress of terahertz devices based on graphene

物理学报. 2015, 64(22): 229501 <https://doi.org/10.7498/aps.64.229501>

基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

物理学报. 2018, 67(11): 118102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

太赫兹人工电磁媒质研究进展

Progress of terahertz metamaterials

物理学报. 2015, 64(22): 228701 <https://doi.org/10.7498/aps.64.228701>

基于石墨烯的太赫兹波散射可调谐超表面

Graphene based tunable metasurface for terahertz scattering manipulation

物理学报. 2017, 66(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204101>

基于石墨烯互补超表面的可调谐太赫兹吸波体

Tunable terahertz absorber based on complementary graphene meta-surface

物理学报. 2016, 65(1): 018101 <https://doi.org/10.7498/aps.65.018101>

太赫兹片上系统和基于微纳结构的太赫兹超宽谱源的研究进展

Research progress of super-continuum terahertz source based on nano-structures and terahertz lab on-chip system

物理学报. 2016, 65(1): 010704 <https://doi.org/10.7498/aps.65.010704>

综述

太赫兹液晶材料与器件研究进展*

王磊^{1)2)†} 肖芮文¹⁾ 葛士军²⁾ 沈志雄²⁾ 吕鹏¹⁾ 胡伟²⁾ 陆延青²⁾

1) (南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 南京 210023)

2) (南京大学现代工程与应用科学学院, 固体微结构物理国家重点实验室, 人工微结构科学与技术协同创新中心, 南京 210093)

(2018年12月26日收到; 2019年1月31日收到修改稿)

液晶是一种性能优异的可调控光电功能材料, 基于液晶的太赫兹器件有着广泛的应用前景, 但高性能太赫兹功能器件的研发仍处于初级阶段. 本文综述了太赫兹领域液晶材料与器件的研究现状, 探讨了液晶技术与太赫兹技术相结合的发展趋势.

关键词: 液晶, 太赫兹波, 超材料, 石墨烯

PACS: 42.70.Df, 87.50.U-, 42.79.Kr, 61.30.Pq

DOI: 10.7498/aps.68.20182275

1 研究背景

太赫兹波 (terahertz, THz) 一般指频率在 0.1—10.0 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$, 对应波长 3000—30 μm) 之间的电磁波, 如图 1 所示. 由于其具有较低的光子能量, 适合对生物组织进行活体检查; 很多凝聚态物质、铁磁材料的谐振频率, 生物大分子的骨架振动和转动能级, 许多分子间弱的相互作用 (氢键等) 都处于 THz 频带; 许多非金属、非极性材料对 THz 波的吸收较小, 具有高透性; 与可见光和微波相比, THz 波同时具有较高的方向性和较强的云雾穿透能力, 能实现 Gbit/s 以上的无线传输速率等独特优势, 使得位于交叉学科前沿的 THz 科学技术在安全检查、生物医学、无损探测、高速通信等诸多领域具有重要的应用前景^[1-5]. 目前, 在世界范围内掀起了一股 THz 研究热潮^[6]. 相对于 THz 源和 THz 探测器的飞速发展, 用于传输和控制 THz 波的高性能光子学器件还不够成熟, 尤其对各种动态可重构的 THz 功能器件的研究仍处于初级阶段, 但需求尤为迫切^[7].

液晶兼具液体的流动性和晶体的有序性, 其指向矢分布及光学性质强烈依赖于表面作用和环境温度, 并对外场 (电场、磁场、光场、声场等) 的变化非常敏感, 其介电各向异性覆盖从紫外到微波的广阔频段, 是优异的可调控光电功能材料^[9]. 最初液晶光子学器件主要用于光通信领域的可调谐无源器件, 以实现光信号的控制和分配. 由于液晶器件具有无机械移动部件、体积小、重量轻、成本低、工艺简单、连续可调等优势, 后来的研究也逐渐向波长更长的区域如中远红外波段、THz 波段乃至微波波段延伸. 液晶技术已经在显示领域和非显示领域得到了广泛的应用, 积累了大量技术基础^[10, 11], 使得基于液晶的 THz 可调器件的研究越来越引起了人们的关注. 本文综述了当前液晶材料与基于液晶的动态可调器件在 THz 波段研究的最新进展, 并对其发展趋势进行了简要探讨.

2 太赫兹液晶材料的研究现状

液晶材料具有介电与光学的各向异性, 人们能够通过外场来调节液晶分子的指向矢, 从而对光波

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61605088)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK20150845) 和固体微结构物理国家重点实验室 (批准号: M31039) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangl@njupt.edu.cn

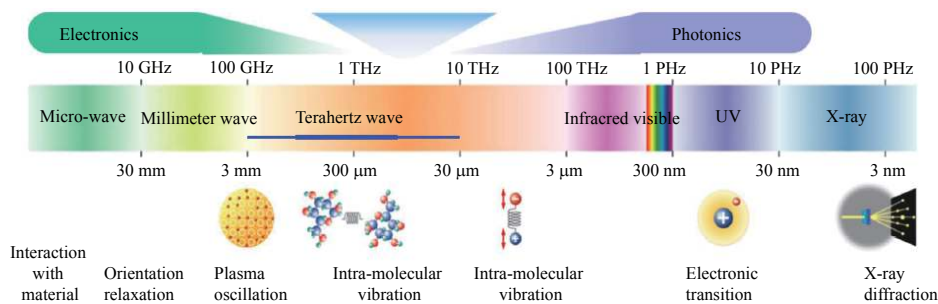

 图 1 电磁波谱示意图及 THz 在电磁波谱中的位置^[8]

 Fig. 1. Schematic diagram of electromagnetic spectrum and location of THz in electromagnetic spectrum with blue underline^[8].

乃至各频段电磁波的强度、位相、偏振等性质进行有效调控,使得液晶材料具有了巨大的应用潜力.在 THz 波段一般使用热致向列相液晶.该类液晶材料在 THz 波段的介电和光学各向异性较之在可见光或红外一般会有所降低,同时其吸收损耗也会增大^[12].2003 年,台湾国立交通大学的潘犀灵教授研究组率先进行了液晶 5CB 在 THz 波段下的折射率各向异性的研究^[13],发现在 0.3—1.4 THz 内双折射 (Δn) 为 0.13—0.21.2008 年, Koeberle 等^[14]采用自由空间的连续 THz 波系统给出了 K15 和 E7 两种液晶在 0.10—0.35 THz 频率范围内的特性, Δn 分别大于等于 0.05 和 0.08.2009 年, Wilk 等^[15]研究了四款 CB 系列液晶 5CB, 6CB, 7CB 和 8CB 的 THz 特性,除了折射率和吸收系数,还给出了在不同电场和温度条件下的双折射值.在 THz 范围这些液晶的 n_o 在 1.64 和 1.60 之间, n_e 在 1.74 和 1.70 之间. THz 波段的性质主要由液晶的扭转和振动模式决定,吸收主要来自于液晶分子苯环在液晶分子短轴方向的扭转. Vieweg 等^[16]报道了向列相液晶在 THz 频域内的分子特性,探讨了烷基链的长度对液晶特性的影响,重点研究了

最明显的奇偶效应.文献中还用 Vuks 和 Haller 方法计算极化率和液晶指向矢,建立了液晶分子结构与 THz 特性之间的联系,对由液晶分子主结构和侧链引起的 THz 各向异性的变化也进行了分析讨论. Yang 等^[17]研究了 E7 混合液晶的光学常数,在 0.2—2.0 THz 频段内, n_e 值的范围为 1.690—1.704, n_o 值的范围为 1.557—1.581,即双折射值的变化范围为 0.130—0.147,在 26—70 °C 温度下,其消光系数小于 0.035,没有尖锐的吸收峰,双折射的温度相关性与可见波段的特性相似.综上所述,常规液晶在 THz 波段的双折射普遍比较小.

相比可见光波段的液晶器件,在 THz 波段通常需要更厚的液晶层,如 (1) 式所示:

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta n d/\lambda, \quad (1)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为 o 光与 e 光的相位差, Δn 为液晶双折射, d 为液晶层厚度, λ 为入射波长.液晶层太厚会导致器件响应速度变慢和较高吸收损耗等问题^[18].人们迫切需要 THz 波段大双折射液晶材料.当液晶的双折射增大时,可以使用较薄的液晶盒来实现相同的相位延迟.目前比较大的 THz 双折射材料如表 1 所列.

表 1 THz 大双折射液晶材料

Table 1. Large birefringence liquid crystal materials in THz range.

液晶种类	频率范围/THz	n_e	n_o	Δn (1 THz)
LCMS107	0.5—1.6	1.80—1.85	1.50—1.62	0.2—0.3
BL037	0.3—2.5	1.76—1.78	1.56—1.62	~ 0.2
MDA-00-3461	0.3—1.4	1.74	1.54	0.20
RDP97304	0.2—2.0	1.77—1.79	1.55—1.61	0.22
NJU-LDn-4	0.4—1.6	1.80—1.82	1.50—1.51	~ 0.31
GT3-23001	0.4—4.0	1.76 ± 0.01	1.54 ± 0.01	~ 0.22
LC1852	0.5—2.5	1.85—1.89	1.55—1.57	0.32
LC1825	0.2—2.5	1.91—1.95	1.54—1.57	0.38
MLC-2142	0.1—1.6	1.85—1.88	1.61—1.64	0.24
2020+nps3	0.3—3.0	1.90—1.92	1.55—1.60	0.36

2010年, Trushkevych等^[19]报道了基于异硫氰酸酯的液晶在0.5—1.6 THz范围内双折射从0.2变化到0.3,但这种液晶对光和热的稳定性都较差,无实用性. 2011年, Vieweg等^[20]研究了BL037液晶混合物在THz频段的光谱,并提取了折射率和吸收系数等参数,同时分析了该液晶的温度依赖性,从0.3 THz到2.5 THz双折射约为0.2,是应用于THz频段的比较好的液晶材料. 潘犀灵教授研究组^[21]在室温下测得MDA-00-3461液晶在0.3—1.4 THz, n_e 和 n_o 分别为1.74和1.54,即双折射为0.2,且在该频段内的消光系数相对比较小,在整个频段范围内没有观察到有吸收峰. 2012年, Park等^[22]用THz时域频谱方法测得RDP97304具有最大的双折射值0.22,也是一种比较有效的开发THz器件的液晶材料. 我们研究组^[23]研制了一种THz波段大双折射液晶材料NJU-LDn-4,具体是以氟化二苯乙炔衍生物为主要成分的混合液晶材料,是最早报道的在THz波段 $\Delta n > 0.3$,且温宽达到实用要求的液晶材料,如图2所示.

该液晶在THz频段的电磁特性十分稳定,并且随着频率的上升,液晶的介电损耗始终保持在一

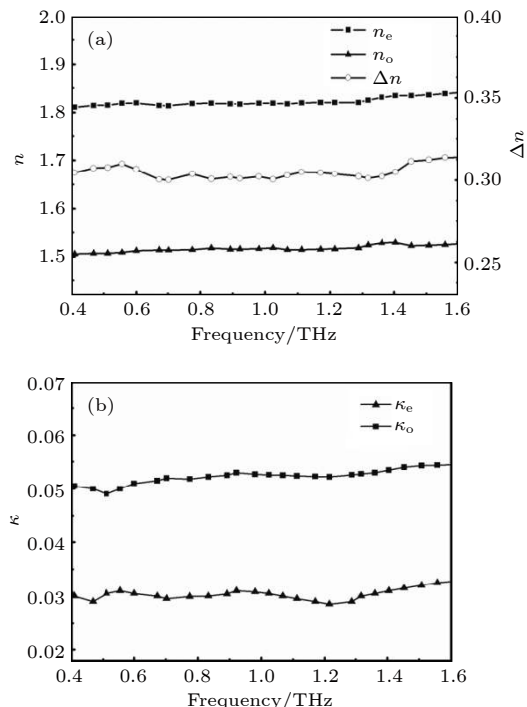


图2 THz波段大双折射液晶的双折射和折射率 (a) 实部; (b) 虚部随频率的变化^[23]

Fig. 2. Frequency-dependent birefringence Δn and refractive indices: (a) Real part n ; (b) imaginary part κ of NJU-LDn-4^[23].

个较低的范围. 该成果为设计合成更大双折射、更快响应的液晶材料提供了很好的参考. 2013年, Naftaly和Dudley^[24]在较宽的THz频段范围0.4—4 THz内,测得GT3-23001液晶的双折射约为0.22. Reuter等^[25]展示了两种在THz波段具有大双折射、低损耗特性的液晶混合物1852和1825,在0.2—2.5 THz范围内,最大双折射分别为0.32和0.38,但其吸收系数随THz频率变化明显. 2016年, Liu等^[26]研究了一种正性液晶材料MLC-2142在THz波段的特性,发现其在0.1—1.6 THz范围内,双折射的大小随频率的增加略有增大,且都大于0.23. 该液晶材料非常适合应用于宽带可调THz器件. Chodorow等^[27, 28]研究了掺入钛酸钡铁电纳米粒子的液晶材料,其中一种2020液晶悬浊液在0.3—3.0 THz,平均双折射达到0.3以上,1 THz时的双折射甚至高达0.36. 这为我们获得大双折射液晶材料提供了一个新的思路,但其吸收损耗会由于纳米粒子的掺入而增大. 2017年, Dziaduszek等^[29]研究表明一些二、三和四氟取代的4-异硫氰酸根和4-氰基-4'-(4-烷基乙烷)是制备高双折射液晶的有用成分,且尤其适用于THz波段.

综上,现有THz大双折射液晶材料的双折射还不够大,仍有进一步提升的需求和空间. 一般大双折射液晶分子共轭长度长,电子云共轭性强,共轭方向的偶极较强;双折射随端基柔性链部分的增长而增加,但是奇偶效应明显;当然实用的液晶材料还要同时满足快速响应等特性,液晶黏弹性系数越小,响应速度越快. 目前研究表明,在可见光波段的大双折射液晶在THz波段其双折射不一定较大. 由于商业保密,很多在THz波段具有较大双折射的液晶材料的分子结构配比无从知晓,分子结构和THz双折射的关系等深入的机理尚不清楚. THz大双折射液晶材料可以减小液晶THz器件盒厚,保证液晶的良好取向,提高器件响应速度等;对同样厚度的液晶层,又能增大THz液晶器件调制范围. 对液晶材料在THz波段的特性研究是THz液晶器件性能提升与广泛应用的关键,今后仍需对THz大双折射液晶材料分子设计规律进行深入研究,进一步优化设计在THz波段具有宽带、更大双折射、更小损耗且更快响应速度兼顾较宽液晶相温宽等优良特性的液晶材料.

3 传统太赫兹液晶器件的研究现状

根据 THz 源和探测器最新进展及应用倡议, 需要发展各种 THz 可调器件, 包括: 可调的相位延迟器、滤波器、波片和空间光调制器等, 这些可重构器件可以减小 THz 系统的复杂度、成本和尺寸. 人们尝试用不同的方法调制 THz 有效介电常数的实部和虚部, 包括电学的、磁学的、光学的、机械的、热学的和结构的方法^[30–35]. 其中, 由于液晶在较宽的频带范围内具有双折射且具备成熟的液晶显示 (LCD) 技术基础, 基于液晶材料的连续可调 THz 器件备受关注^[36, 37].

由于早期缺乏 THz 波段的高透明电极, 人们利用磁场调制液晶. 潘犀灵教授研究组利用磁场对液晶的指向矢分布进行调控 (即调节液晶介质的折射率), 设计实现了可调的 THz 相移器^[38] 和滤波器^[39, 40]. Chen 等^[41] 采用向列相液晶 E7, 并用磁场给总厚度长达 3.0 mm 液晶盒配向, 在 1 THz 实现了 0—360° 相位可调. 2016 年, Yang 等^[42] 用弱磁场对随机取向的液晶进行调控, 实现了比较高的相位调制深度. 磁场调控液晶的优点在于能有效避免电极材料对 THz 不透明和厚盒需加高工作电压等问题, 可实现液晶分子折射率的有效调制. 但磁调液晶器件体积大、功耗大, 很难集成. Ge 等^[43] 把液晶填充到金属薄片阵列空隙间, 通过温度控制液晶折射率的变化, 实现了一种新型 THz 可调滤波器, 但其可调范围比较窄. 在所有驱动机制中, 电调谐由于其易集成和高可靠性最具吸引力. Tsai 等^[44] 最初利用 38.6 μm 的向列相液晶盒实现了 5° 的延迟量. 后来该研究组采用 570 μm 厚的向列相液晶盒, 通过侧向加电压的方式, 在 125 V 的驱动电压作用下实现了在 1 THz 延迟量为 90° 的器件^[45]. 该器件可以作为在 1 THz 的电控四分之一波片, 也可以作为电控四分之一波片的补偿片, 但响应速度较慢. 同时该研究组实现了在 1 THz 的可调相位为 360° 相位延迟器^[46], 相位延迟所对应的电压为 100 V. 该器件采用盒厚为 1.83 mm 的垂直配向液晶盒, 所用液晶为 E7. 通过改变电极位置 (将金属条作为液晶盒的间隔材料进行横向加场) 等方法实现了电场调控, 并结合理论工作又报道了电场调谐的 THz 液晶相位光栅的研究结果^[47].

在可见及近红外波段最常用的透明导电薄膜

氧化铟锡 (ITO), 在 THz 波段的透过率却非常低, 不再适用^[37], 迫切需要重新寻找在 THz 波段可用的替代材料. 我们研究组前期已用亚波长金属线栅作为透明电极实现了紧凑型、高效的 THz 相位延迟器, 但这种电极是偏振相关的, 仅一个偏振方向的 THz 波能通过^[48]. 最近 ITO 纳米须电极被用在电调 THz 相位延迟器中, 它在 0.2—1.2 THz 透过率约为 82%^[49]; 一种聚合物在 THz 波段的透过率达到 90%, 被用作透明电极, 实现了一种电可调相位延迟器^[50, 51]. Wu 等^[52] 用石墨烯做 THz 波段电极, 驱动 50 μm 厚的液晶盒, 实现了最大相移 10.8°, 饱和电压 5 V. 但随着石墨烯层数增加, 电导率增加, THz 透过率会减小. 我们研究组在 2015 年通过紫外线臭氧法 (ultra-violet ozone, UVO) 对石墨烯进行处理得到少层多孔石墨烯, 其在 THz 波段透过率超过 98% 且保持了较小的面电阻, 成为 THz 波段完美透明电极. 然后结合亚波长金属线栅偏振器电极, 驱动被光控取向的大双折射液晶材料 NJU-LDn-4, 实现了 0.5—2.5 THz 宽带低电压连续调谐的 THz 波片^[53], 如图 3 所示.

通过叠加多孔石墨烯电极的双层液晶盒, 调节带宽进一步增大, 工作电压进一步减小, 实现了真正高效实用的超宽带可调 THz 波片, 可实现线偏振光到圆偏振光之间的连续演变, 为设计 THz 偏振转换提供了一个很好的思路, 在集成化、高效率、低能耗的实用液晶 THz 元器件方向上迈出了关键的一步. 随后, Sasaki 等^[54] 也用石墨烯作为透明电极, 驱动随机取向的液晶, 可实现任意偏振态 THz 波的相位延迟. 2018 年, Ji 等^[55] 又设计了一种石墨烯光栅与液晶相结合的宽带可调 THz 波片. 2017 年, Sasaki 等^[56] 用 PEDOT/PSS 作电极, 同时作为摩擦取向层, 控制扭曲向列相液晶的初始取向, 实现了一种 THz 偏振转换器. 同年, Ji 等^[57] 结合 THz 介质超表面, 进一步增强了液晶的相位延迟能力. Wang 等^[58] 使用手性向列相液晶, 实现了偏振不相关的 THz 相位调制器, 调制量可达 2π , 这种稀释的手性剂可把临界电压减小至 0.24 V/ μm . 2018 年, Yu 等^[59] 用一种新型双频液晶实现了一种可调的 THz 波片.

以上液晶 THz 器件都为透射式. 2017 年, 我们研究组设计实现了一种基于亚波长金属线栅的反射式电控宽带可调 THz 液晶波片^[60], 如图 4 所示. 在 0.5—2.5 THz 宽带范围内, 仅有偏振方向

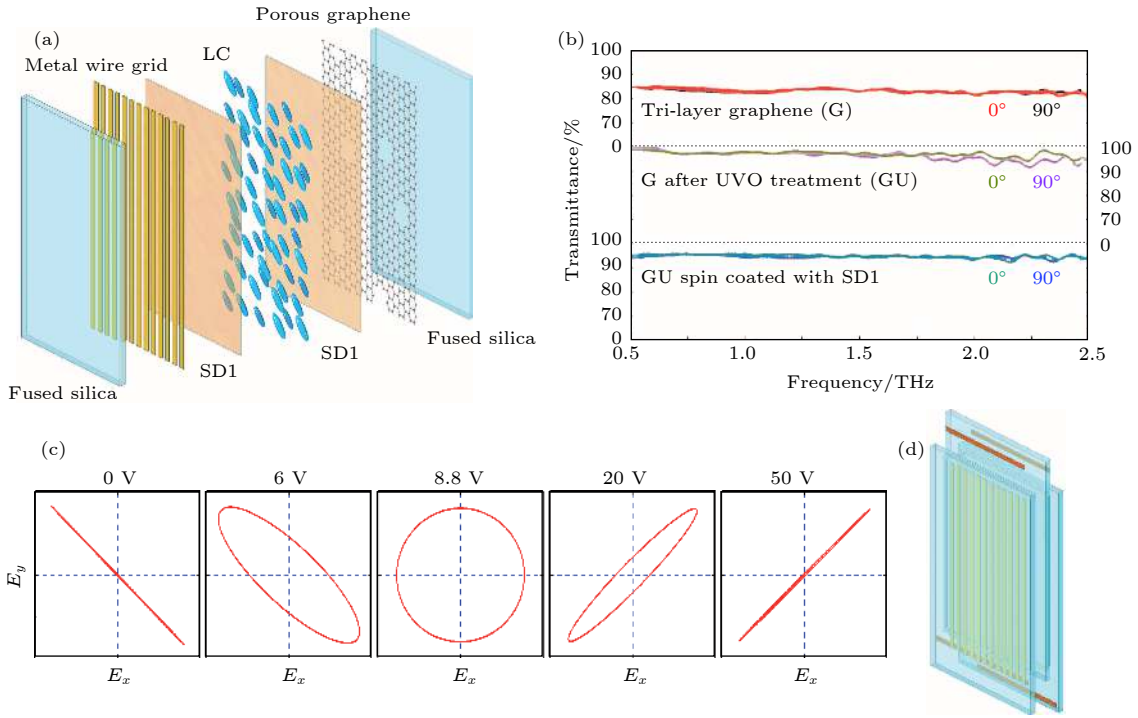


图 3 液晶 THz 波片 (a) 结构图; (b) 石墨烯传输特性; (c) 电调 THz 偏振态; (d) 双层液晶器件^[53]

Fig. 3. Tunable THz waveplate: (a) The cell is composed of a front fused silica substrate covered with a subwavelength metal wire grid and a rear fused silica substrate covered with porous graphene, both substrates are spin coated with SD1 alignment layers, and 250- μm -thick Mylar is used to separate the two substrates, NJU-LDn-4 LCs are capillary filled into the cell; (b) UVO-treated and then SD1 spin-coated CVD-grown few-layer graphene films; (c) polarization evolution at 2.1 THz: linearly polarized at 0 V, elliptically polarized at 6 V, circularly polarized at 8.8 V, elliptically polarized at 20 V and linearly polarized at 50 V (orthogonal to the polarization at 0 V); (d) schematic illustration of the double-stacked cell^[53].

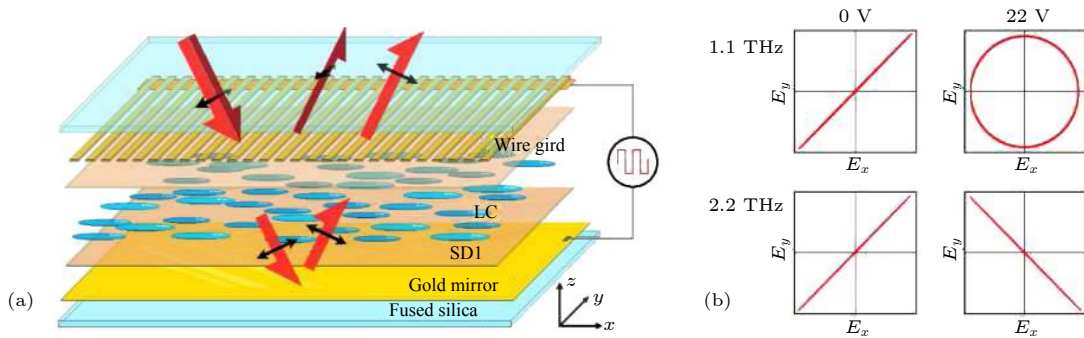


图 4 一种反射式电控宽带可调 THz 液晶波片 (a) 示意图; (b) 不同电压下的 THz 偏振态^[60]

Fig. 4. A reflective electrically controlled broadband tunable THz liquid crystal waveplate: (a) Schematic drawing; (b) polarization evolution (0–22 V) from linearly polarized to circularly polarized at 1.1 THz, to orthogonally linearly polarized at 2.2 THz^[60].

垂直于光栅方向的 THz 波透过亚波长金属线栅, 进入液晶层, 然后从反射面再返回; 偏振方向平行于光栅方向的 THz 波直接被线栅反射, 因此这两束光即形成光程差. 通过调节电压控制液晶指向矢, 在 2.2–2.5 THz 可实现半波片功能, 在 1.1–2.5 THz 之间可实现四分之一波片功能, 在 2.1 THz 和 1.1 THz 时的偏振演化过程如图 4(b) 所示.

由公式

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h \left(n - \frac{\sin^2\theta}{n} \right)}{\cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin\theta}{n} \right) \right]} \quad (2)$$

可得, 对于一个给定的相位差, 反射式波片所需液晶层厚度仅为透射式的 1/10; 在同样的液晶层厚度下, 相位差动态可调范围是透射式的 2 倍; 通过

改变 THz 波入射角, 可以同时实现偏振转换和 THz 光束扫描. 2018 年, Yang 等^[61] 又结合超材料, 设计实现了一款基于液晶的电调反射式 THz 相位延迟器. 通过设计超材料周期和偶极子尺寸得到所需的反射阵谐振频率的带宽、相位和反射损耗, 实现了从 325 GHz 到 337.6 GHz 相位可调范围 300° 以上, 在 330 GHz 最大相位延迟 331° .

基于 SD1 偶氮光控取向剂, 利用自主研发的数字掩模偏振曝光系统实现液晶光轴空间连续渐变的微结构, Ge 等^[62] 成功制备出了基于 THz 波段大双折射率液晶材料的液晶 THz q 波片, 实现了不同拓扑荷 THz 涡旋的产生, 如图 5. 这是国际上首次利用液晶实现 THz 涡旋的产生与调制, 有望推进 THz 涡旋在通讯、传感和成像等领域的应用. 在液晶 THz q 波片的基础上, 进一步引入偏振光栅设计, 又研发了一种液晶 THz 叉形偏振光栅^[63], 集成了偏振光栅的偏振选择性衍射和叉形光栅的涡旋产生能力, 为 THz 涡旋的产生和分离提供了一种简单实用的方法.

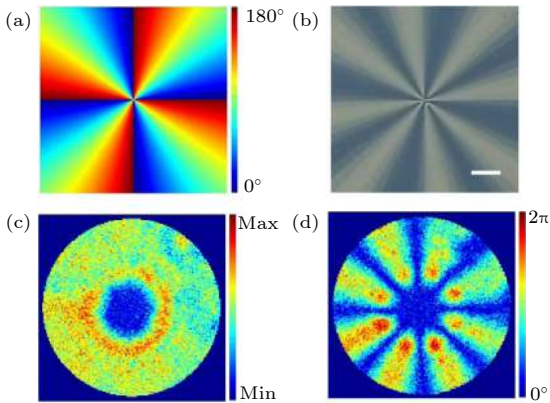


图 5 (a) 液晶光轴分布理论值; (b) $q = 2$ 的 THz 液晶 q 波片在正交偏振片下的照片, 标尺为 1 mm; (c) 1 THz 左旋圆偏振 THz 波经过该波片后所测强度和 (d) 相位分布^[62].
Fig. 5. (a) Theoretical optical axis distribution; (b) photo under crossed polarizers of the q-plate with $q = 2$, the scale bar is 1 mm; (c) the measured intensity, and (d) phase distributions of the transformed component at 1.0 THz with left circular incident polarization^[62].

相对于可见光或红外波, THz 波长较大, 在 THz 频段要实现相同的调制量 (比如半波片所需的相位差 π), 所需的液晶盒厚就会大大增加, 这会在液晶取向、工作电压等各方面带来极大挑战, 上述传统液晶 THz 光子学器件尚存在响应速度慢且功能单一等许多不足.

4 太赫兹超材料液晶器件研究现状

超材料具有亚波长人工微结构, 理论上可以任意设计电磁参数 (介电常数 ϵ , 磁导率 μ), 会呈现出与自然材料所不同的电磁特性, 是操控电磁波的理想平台. 尤其在 THz 波段, 自然界尚无特别有效的材料来操控 THz 波. 虽然超材料已展示出了许多奇异的效果, 但由于它们的谐振特性, 其工作带宽一般比较窄. 且以超材料为代表的微纳结构材料的性质取决于其结构参数, 难以即时调控. 在各种非宽带应用中, 对电磁响应的动态可调仍然是高度期望的, 因此为了得到实用的设备, 构建可调的 THz 超材料器件尤为重要. 将液晶和人工超材料相结合, 利用液晶的可调控性和超材料的特殊效应, 可实现具备即时调控功能的超材料器件, 例如偏振控制器、吸收器、波束扫描、空间光调制器, 用于 THz 通信、THz 成像、THz 传感、THz 探测等领域, 又可有效地解决传统液晶 THz 器件响应速度慢等问题, 同时具有体积小、重量轻、易集成等优势.

2013 年, Padilla 等^[64] 首次设计实现了一种 THz 波段液晶可调超材料吸收器, 如图 6 所示. 该器件谐振频率可调范围只有 4%, 在 2.62 THz 振幅可调范围只有 30%. 随后, 基于此, Padilla 教授研究组^[65] 又实现了一种 THz 空间光调制器, 可单像素独立控制, 器件整体调制深度可达 75%. 2015 年, Isić 等^[66] 设计了一种基于液晶的临界耦合 THz 超材料吸收器, 调制深度高达 23 dB, 频谱可调范围大于 15%. 2017 年, Yang 等^[67] 用液晶实现了可调 THz 超材料类电磁诱导透明和类电磁诱导吸收, 调制深度分别达到 18.3 dB 和 10.5 dB. 同年 Lu 等^[68] 利用超材料吸收器测量液晶在低 THz 频域的介电常数. Vasić 等^[69] 实现了一种基于金属介质金属 (MIM) 谐振腔结构的电调液晶 THz 超材料偏振转换器. 2018 年, Wang 等^[70] 利用电磁诱导透明传感器研究了 THz 波段向列相液晶的介电常数. Wang 等^[71] 设计了一种等离子诱导透明的液晶可调 THz 超材料调制器. Yin 等^[72] 设计实现了一种基于液晶的电可调 THz 超材料双带吸收器. 同时 Wang 等^[73] 制作了一种三带同时可调的液晶 THz 超材料吸收器.

以上基于液晶电控可调的超材料 THz 器件,

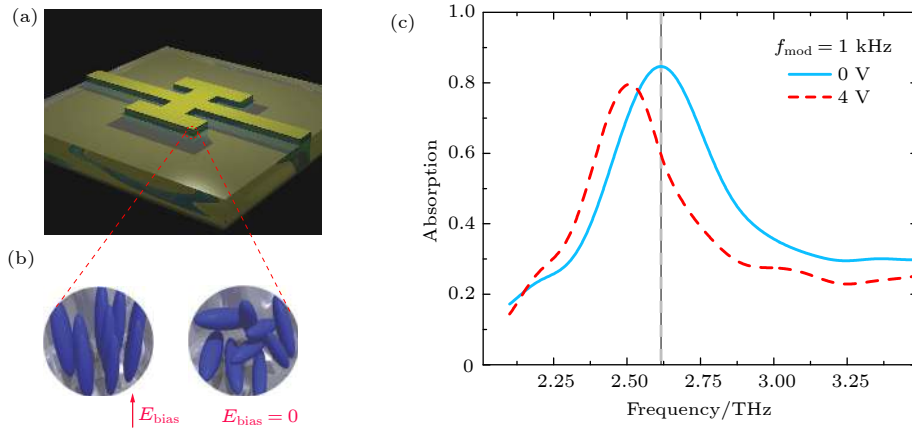


图 6 (a) 液晶可调超材料吸收器单元; (b) 液晶在偏置电压下取向变化; (c) 吸收频率可调范围^[64]

Fig. 6. (a) Rendering of a single unit cell of the liquid crystal metamaterial absorber; (b) depiction of the random alignment of liquid crystal in the unbiased case (right) and for an applied ac bias (left); (c) frequency dependent absorption $A(u)$ for 0 V (blue solid curve) and 4 V (red dashed curve) at $f_{\text{mod}} = 1$ kHz, dashed line is centered at $A_{\text{max}}(V_{\text{bias}} = 0) = 2.62$ THz^[64].

为了方便加静电场控制液晶, 超材料除了做功能器件外, 同时当电极使用, 这就使得超材料单元必须至少一边相连. 这样不仅降低了超材料设计的灵活性, 而且由于这个连接线, 超材料性能有所下降. 我们为此设计了一种高效复合电极, 把少层多孔石墨烯集成到超材料表面, 这样不仅超材料可以设计成各种类型, 而且电极的面电阻也比单纯的石墨烯电极的更小. 我们用这种电极, 设计实现了一种高效液晶可调十字架型 THz 超材料吸收器, 而且通过精确设计不同的十字架臂长, 从而实现高性能的宽带可调^[74]. 如图 7 所示, 少层多孔石墨烯集成到超材料表面, 可以提供非常均匀的静电场来高效控制液晶, 也使其工作电压较以往有所降低, 而且作为透明电极不影响 THz 波透过特性. 液晶层厚度在 10 μm 左右, 器件响应速度可达亚毫秒量级.

其谐振频率可调范围为 0.75 — 1.00 THz, 且具有较高的品质因子, 振幅可调范围在 80% 左右, 工作电压只需 10 V. 由于实验上尚不具备直接探测 THz 近场的条件, 通过模拟仿真可知, THz 近场增强区域的热点分布也有大范围的可调性. 因此, 结合 THz 大双折射液晶材料, 我们设计实现了调制量大, 响应速度快的 THz 超材料吸收器. 同时我们还研究了不同微区液晶指向矢变化与 THz 远场特性之间的对应关系^[75].

林志雄等^[76]设计实现了一种集成液晶的多功能 THz 超材料器件, 如图 8 所示, 进一步扩展了液晶超材料器件在 THz 领域的应用.

对于透射工作模式, 该器件表现为一种类电磁

诱导透明特性; 对反射工作模式, 则表现出吸收器特性. 梳状电极在平面内驱动液晶, 避免了超材料单元的相互连接, 分别实现了 60 GHz 频率可调范围和 15% 的调制深度, 器件调制速度可达毫秒量级.

5 液晶在 THz 领域的一些应用

液晶在 THz 领域的应用已逐步涉及到 THz 源、THz 无线通信和 THz 探测器等领域. Qiu 等^[77]设计实现了一种磁场和电场共同驱动的集成铁磁材料和大双折射液晶材料新型多功能可调 THz 源. 对传统 THz 液晶波片而言, 金属对 THz 不透明, 不能用金属薄膜做电极, 而这里不仅可以做电极而且还减少了一个衬底对 THz 波的损耗, 如图 9 所示

铁磁异质结基于反自旋霍尔效应, 可产生 THz 辐射, 既作为 THz 源, 又能作为入射面电极驱动液晶指向矢变化, 通过加载电场控制出射 THz 波的偏振态, 实现了一种紧凑的可调 THz 源, 在产生宽带 THz 辐射的同时可完美控制 THz 偏振态从线偏振到圆偏振的转换.

反射阵天线作为新一代天线具有较高的增益, 较小的剖面, 易制作、易集成、可单独控制单元相位等优点, 受到广泛关注. 目前主要有贴片式反射阵天线、3D 打印反射阵天线和可重构反射阵天线. 其中可重构反射阵天线因可灵活调控, 备受青睐. THz 可重构反射阵天线主要分为基于石墨烯和液晶两类. 当前高纯度的石墨烯难以大面积生产和集

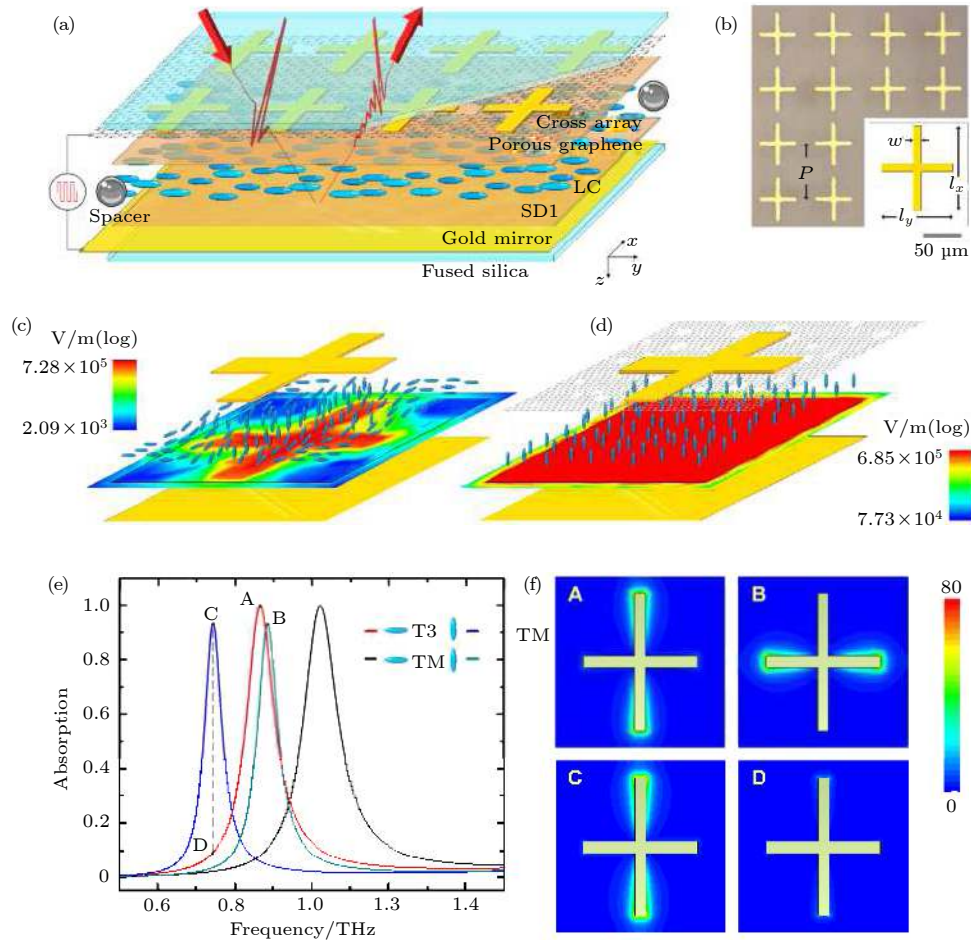


图 7 一种石墨烯/超材料协同驱动的电控液晶可调 THz 波吸收器 (a) 结构示意图; (b) 十字超材料的显微图片; (c) 十字超材料电极驱动液晶指向矢分布; (d) 十字超材料和石墨烯复合电极驱动液晶指向矢分布; (e) 可调 THz 波吸收器的远场吸收特性和 (f) 近场特性, A, 0.864 THz, 0 V; B, 0.884 THz, 10 V; C, 0.742 THz, 10 V; D, 0.742 THz, 0 V. 液晶方向在 0 V 为平行, 在 10 V 为垂直^[74]

Fig. 7. Liquid crystal tunable metamaterial/graphene absorber: (a) Schematic; (b) optical image of the metasurface (inset: a unit cell of the metasurface), $P = 150 \mu\text{m}$, $l_x = 120 \mu\text{m}$, $l_y = 100 \mu\text{m}$, $w = 10 \mu\text{m}$. Simulations of the static electric field and liquid crystal director distributions shown at a plane centered in the liquid crystal layer when the operating voltage is 10 V: (c) cross-shaped electrode; and (d) metamaterial/graphene electrode with the same metal ground. Tunability of the THz resonant frequencies and hot spots of the metamaterial absorber: (e) tunable absorption of TE and TM mode; (f) electric field of the corresponding points in (e) at a plane $1 \mu\text{m}$ above the cross-shaped metasurface. A, 0.864 THz, 0 V; B, 0.884 THz, 10 V; C, 0.742 THz, 10 V; D, 0.742 THz, 0 V. The orientation of liquid crystal is horizontal at 0 V while vertical at 10 V^[74].

成到其他器件上, 同时石墨烯电导率存在较强的色散特性, 且主要在 THz 高频段可调, 这些问题限制了石墨烯在 THz 天线技术中的推广. 基于液晶的 THz 反射阵列天线, 其基本原理是将液晶作为阵列单元的电调介质, 通过改变外加电场来调节各阵列单元的反射相位, 进而实现波束的连续扫描, 具有一定优势.

2008 年, 贝尔法斯特女王大学的 Vincent 研究组^[78]设计了一种基于矩形贴片的液晶反射阵列单元, 该阵列单元在 102 GHz 可以实现 165° 的相位变化. 2015 年, Gerardo 等^[79]提出了一种基于液

晶电控扫描的反射阵列天线, 如图 10 所示. 阵列单元是由三个尺寸不同的偶极子平行放置构成, 改变液晶层两侧偏置电压, 单元可以实现 330° 的相位变化. 该反射阵列天线在 100 GHz 的扫描范围达到了 -60° 到 -5° . 2017 年, Fuscaldo 等^[80]研究了一种基于液晶的 Fabry-Perot 腔的 THz 漏波天线.

另外, 在 THz 探测器方面, 液晶也可尝试作为探测器. 胆甾相液晶 (cholesteric liquid crystal, CLC) 是一类对温度敏感的液晶, 其指向矢呈螺旋分布, 沿着螺旋轴方向折射率呈周期性变化. 通过加热或冷却液晶, 其分子排列发生改变, 从而造成

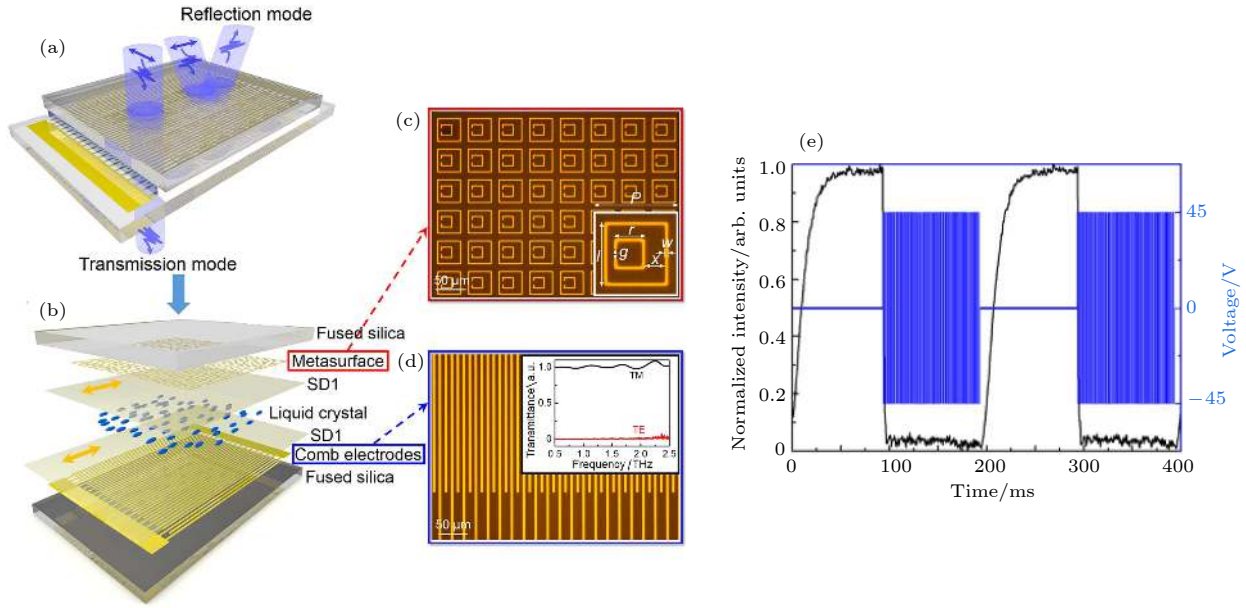


图 8 集成液晶的多功能 THz 超材料器件 (a) 示意图; (b) 分解图, 黄色箭头方向为液晶取向方向; (c) 超表面显微照片, 内插图为其共振器的单位尺寸, p , 晶格周期, $50 \mu\text{m}$; l , CRR 长度, $40 \mu\text{m}$; r , SRR 长度, $20 \mu\text{m}$; w , 结构宽度, $3 \mu\text{m}$; g , 液晶层厚度, $4 \mu\text{m}$; x , 非对称距离, $11 \mu\text{m}$; (d) 梳状电极显微图和特性; (e) 器件响应时间实验测试 [76]

Fig. 8. The active multifunctional terahertz metadvice: (a) Schematic illustration; (b) decomposition diagram of the device, the yellow arrows indicate the alignment direction; (c) the micrographs of the metasurface; (d) the comb electrode, inset in (c) shows the unit dimension of the resonator; p , lattice periodicity, $50 \mu\text{m}$; l , CRR length, $40 \mu\text{m}$; r , SRR length, $20 \mu\text{m}$; w , structure width, $3 \mu\text{m}$; g , gap, $4 \mu\text{m}$; and x , asymmetry distance, $11 \mu\text{m}$; the inset in (d) shows the polarization selectivity of the subwavelength grating; (e) black line reveals the electro-optical response of the device at 45 V ; the blue line depicts the 1 kHz square-wave voltage signals [76].

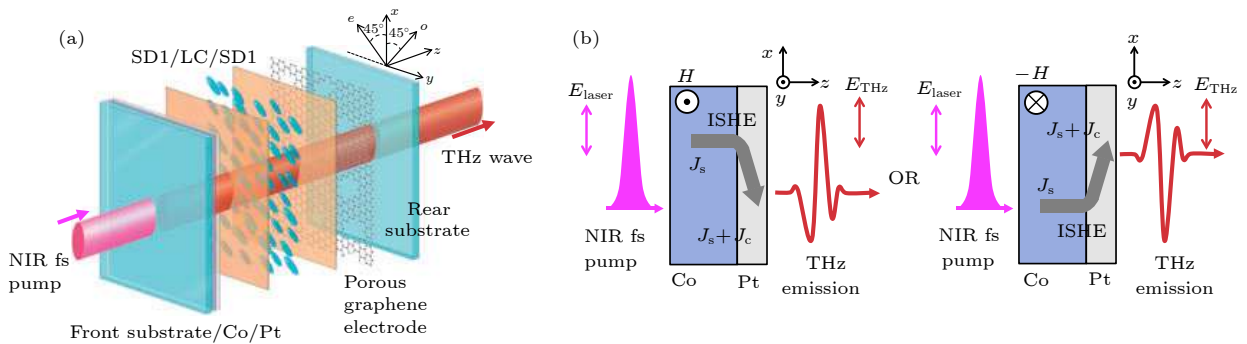


图 9 (a) 偏振可调的 THz 发射器结构图; (b) 铁磁异质结 THz 源工作原理图, 由飞秒激光脉冲作用铁磁异质结产生的自旋电流 J_s 转化成面内电流 J_c , 其沿 x 轴方向类似电偶极子, 发射出线偏振 THz 波, THz 波偏振方向由磁场方向决定 [77]

Fig. 9. (a) Schematic of the polarization-tunable THz emitter; a ferromagnetic heterostructure and a large birefringence liquid crystal are integrated in the emitter, the heterostructure acts as the THz source as well as the electrode on the front side, a few-layer porous graphene with a high transmittance is employed as the other electrode on the rear side; (b) the spin current J_s launched by the laser pulse excitation is converted into the in-plane charge current J_c due to the ISHE, the current J_c along the x -axis act as an electric dipole, emitting linearly polarized THz waves into free space, the polarity of the THz waveform is determined by the direction of the magnetic field H and reverses together with it [77].

液晶的光学性质 (包括选择反射, 旋光性等) 变化. 其中 CLC 的热色特性 (螺距随温度敏锐变化, 反射光的颜色也随之变化) 被普遍用于温度计和各种测量温度变化的装置中. CLC 的颜色随温度变化的灵敏度高, 且性能稳定, 在液晶显示和生物医学

等领域已有成熟应用 [81–85], 基于 CLC 的光子学器件具有广泛的应用前景 [86, 87].

2015 年, 大阪大学激光工程研究所 THz 研究中心 Nakajima 教授研究组 [88] 设计实现了一种基于 CLC 的 THz 波束测量卡, 如图 11 所示. 由于

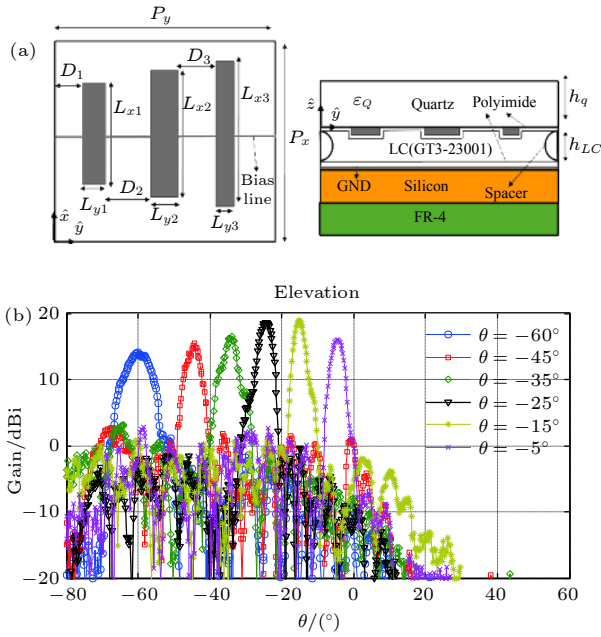


图 10 (a) 液晶电控反射阵天线结构单元示意图; (b) 增益与扫描角度关系^[79]
 Fig. 10. (a) Schematic of the liquid crystal-reflectarray, cells showing its different parts; (b) measured radiation patterns at 100 GHz of several scan angles^[79].

THz 辐射导致 CLC 温度升高, 在室温下即可通过其颜色的变化检测 THz 波. 通过 Hue 法数字化得到的图像, 可以测量 THz 光斑和强度, 但其探测灵敏度较低, 且 THz 功率密度必须在 4.3 mW/cm² 以上, 原因在于该器件对 THz 波的吸收只有 30%, 且没有考虑或利用热扩散效应, 要求 THz 功率密

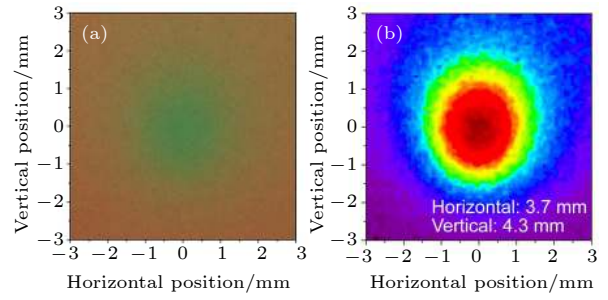


图 11 (a) 基于 CLC 的 THz 成像卡; (b) 数字化处理后的 THz 波束^[88]
 Fig. 11. (a) CLC picture taken by a digital camera; (b) hue image digitalized from (a)^[88].

度也不能太高. 而 Renk 教授研究组^[89] 用 CLC 对 THz 波的探测研究, 仅集中在单频的连续 THz 源. Woolard 教授研究组虽然用 CLC 同时探测了脉冲型和连续 THz 波, 但频率范围仅到 2 THz^[90].

2018 年, 我们把上述工作进一步改进, 设计实现了一种基于三层结构的胶囊型 CLC 薄膜的可视化 THz 功率计^[91], 如图 12(a) 所示. 利用 CLC 的热色效应和热扩散效应, 通过量化由 THz 吸收引起的颜色变化, 来探测 THz 功率, 尤其适用于测量强 THz 波功率. 图 12(b) 显示了不同 THz 功率下, 颜色变化区域随 THz 强度的增加而明显增大. 利用 ImageJ 软件对基于色调的胶囊型 CLC 薄膜图像进行处理. 在热平衡状态下, 颜色变化的直径随 THz 功率的增加而增大, 可检测的 THz 场阈值约

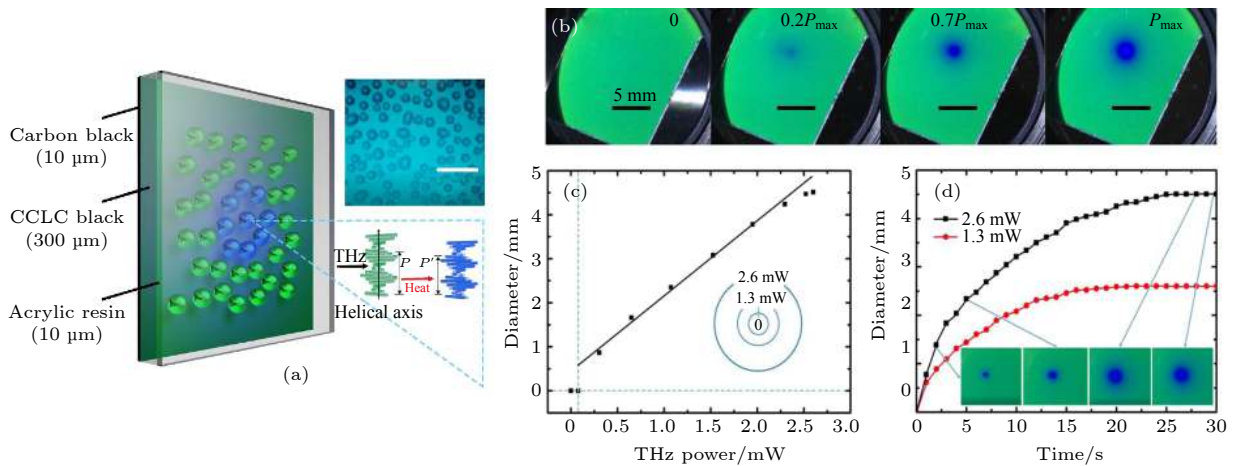


图 12 (a) 一种基于胶囊型 CLC 薄膜的可视化 THz 功率计结构示意图; (b) 在不同 THz 强度辐照下胶囊型 CLC 薄膜颜色变化情况; (c) 热平衡时 THz 功率与颜色变化区域直径的关系; (d) THz 波辐照时间与颜色变化区域直径的关系^[91]

Fig. 12. (a) Schematic and working principle of the capsulized CLC film, the inset shows a micrograph of the film, which is produced with a color 3D laser scanning microscope (VK-8710, KEYENCE, Osaka, Japan); (b) visible pictures are taken under different THz intensities by a smartphone camera with Bluetooth; (c) increase in the diameter of the color change with different THz powers in thermal equilibrium, similar to a dartboard shown in the inset; (d) increase in the diameters as a function of response time with 1.3 mW and 2.6 mW THz radiation, the inset shows image changes under different THz radiation times^[91].

为 0.07 mW, 此时可以产生肉眼可见的颜色变化. 当大于阈值时, 颜色变化区域直径与 THz 功率具有近似线性的关系, 如图 12(c). 即使 THz 功率密度超过 4.0×10^3 mW/cm², 薄膜仍能很好地工作. 图 12(d) 表示 THz 波不同辐射时间下的颜色变化规律. 同时, 我们还得到在瞬态工作状态下, THz 功率与颜色变化面积近似抛物线关系.

该设备不受颜色变化饱和的限制, 且不需要任何额外的组件来测量温度. 这种新型 THz 功率计具有柔性可弯曲、成本低、便于携带等特性, 可用于 THz 成像、THz 生物传感和 THz 检测等领域. 目前对这一领域的研究并不多, 仍面临许多挑战: 灵敏度不高、响应速度慢、分辨率低等, 具有极大的提升空间.

6 总结与展望

前期基于液晶的电调 THz 器件面临的几大挑战: 1) 液晶在 THz 频段的双折射比较低; 2) 传统的透明电极如 ITO 在 THz 波段高反射, 缺少高透过率的透明电极; 3) 大盒厚带来的液晶取向效果差, 工作电压高, 响应速度慢等. 经过最近几年的研究, 阻碍 THz 液晶器件发展的这些主要问题已经基本解决. 目前已经有不少 THz 大双折射液晶材料和 THz 波段透明电极, 已经可以实现各种液晶可调 THz 超材料功能器件.

各种液晶材料和器件在 THz 领域应用前景十分广阔. 下一步要发展性能更加优异的 THz 波段更大双折射液晶材料; 研究其他新型液晶如蓝相液晶、铁电液晶在 THz 波段的特性; 各种新型 2D 材料如 MoS₂ 在 THz 液晶领域的应用; 优化超材料设计, 尤其对 THz 超材料近场主动调控与探测的研究, 可用于 THz 超分辨成像等; 优化液晶超材料天线阵列, 实现高效 THz 波束赋形与扫描; 研究液晶材料在 THz 强场作用下的非线性效应等. 各种性能优异的液晶材料与超材料、2D 材料三者相结合, 必将在 THz 源、THz 功能器件和 THz 探测器等领域发挥其独特作用.

参考文献

[1] Tonouchi M 2007 *Nat. Photon.* **1** 97
 [2] Zhou J, Liu S G 2014 *Modern Appl. Phys.* **5** 85 (in Chinese) [周俊, 刘盛纲 2014 现代应用物理 **5** 85]

[3] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nat. Material* **1** 26
 [4] Yao J Q, Chi N, Yang P F, Cui H X, Wang J L, Li J S, Xu D G, Ding X 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 2213 (in Chinese) [姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 崔海霞, 汪静丽, 李九生, 徐德刚, 丁欣 2009 中国激光 **36** 2213]
 [5] Seifert T, Jaiswal S, Martens U, Hannegan J, Braum L, Maldonado P, Freimuth F, Kronenberg A, Henrizi J, Radu I, Beaurepaire E, Mokrousov Y, Oppeneer P M, Jourdan M, Jakob G, Turchinovich D, Hayden L M, Wolf M, Münzenberg M, Kläui M, Kampfrath T 2016 *Nat. Photon.* **10** 483
 [6] Zhang X C, Shkurinov A, Zhang Y 2017 *Nat. Photon.* **11** 16
 [7] Wang L 2014 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [王磊 2014 博士学位论文(南京: 南京大学)]
 [8] <https://www.advantest.com/products/terahertz-spectroscopic-imaging-systems/about-terahertz-waves> [2019-4-4]
 [9] de Gennes P G, Prost J 1993 *The Physics of Liquid Crystals* (New York: Oxford University Press) pp28–40
 [10] Rao L H, Ge Z B, Wu S T, Lee S H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 231101
 [11] O'Neill M, Kelly S M 2003 *Adv. Mater.* **15** 1135
 [12] Wu S T 1986 *Phys. Rev. A* **33** 1270
 [13] Tsai T R, Chen C Y, Pan C L, Pan R P, Zhang X C 2003 *Appl. Opt.* **42** 2372
 [14] Koeberle M, Goebel T, Schoenherr D, Mueller S 2008 *Microwave Conference Hamburg* Harburg German, March 10–12, 2008 p146
 [15] Wilk R, Vieweg N, Kopschinski O, Hasek T, Koch M 2009 *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **30** 1139
 [16] Vieweg N, Jansen C, Shakfa M K, Scheller M, Krumbholz N, Wilk R, Mikulicz M, Koch M 2010 *Opt. Express* **18** 6097
 [17] Yang C S, Lin C J, Pan R P, Que C T, Yamamoto K, Tani M, Pan C L 2010 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **27** 1866
 [18] Wu S T, Yang D K 2014 *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* (New York: John Wiley & Sons) pp127–148
 [19] Trushkevych O, Xu H, Lu T, Zeitler J A, Rungsawang R, Golden F, Collings N, Crossland W A 2010 *Appl. Opt.* **49** 5212
 [20] Vieweg N, Shakfa M K, Koch M 2011 *Opt. Commun.* **284** 1887
 [21] Ku C P, Shih C C, Lin C J, Pan R P, Pan C L 2011 *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **541** 65
 [22] Park H, Parrott E P, Fan F, Lim M, Han H, Chigrinov V G, Pickwell-MacPherson E 2012 *Opt. Express* **20** 11899
 [23] Wang L, Lin X W, Liang X, Wu J B, Hu W, Zheng Z G, Jin B B, Qin Y Q, Lu Y Q 2012 *Opt. Mater. Express* **2** 1314
 [24] Naftaly M, Dudley R 2013 *Opt. Mater. Express* **3** 459
 [25] Reuter M, Vieweg N, Fischer B M, Mikulicz M, Koch M, Garbat K, Dabrowski R 2013 *APL Mater.* **1** 012107
 [26] Liu Q F, Luo D, Li S X, Tian Z 2016 *Liq. Cryst.* **43** 796
 [27] Chodorow U, Mavrona E, Palka N, Strzeczysz O, Garbat K, Saizek S, Blach J F, Apostolopoulos V, Kaczmarek M, Parka J 2017 *Liq. Cryst.* **44** 1207
 [28] Mavrona E, Chodorow U, Barnes M E, Parka J, Palka N 2015 *AIP Adv.* **5** 077143
 [29] Dziaduszek J, Dąbrowski R, Urban S, Garbat K, Glushchenko A, Czupryński K 2017 *Liq. Cryst.* **44** 1277
 [30] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, Lee M, Averitt R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 107401
 [31] Shalaby M, Peccianti M, Ozturk Y, Morandotti R 2013 *Nat. Commun.* **4** 1558
 [32] Ren M, Jia B, Ou J Y, Plum E, Zhang J, MacDonald K F, Nikolaenko A E, Xu J, Gu M, Zheludev N I 2011 *Adv. Mater.*

- 23 5540
- [33] Hu F, Qian Y, Li Z, Niu J, Niu K, Xiong X, Zang W, Peng Z 2013 *J. Opt.* **15** 055101
- [34] Huang W, Yin X, Huang C, Wang Q, Miao T 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 261908
- [35] Lapine M, Powell D, Gorkunov M, Shadrivov I, Marqués R 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 084105
- [36] Wilk R, Vieweg N, Kopschinski O, Koch M 2009 *Opt. Express* **17** 7377
- [37] Jewell S A, Hendry E, Isaac T H, Sambles J R 2008 *New J. Phys.* **10** 033012
- [38] Chen C Y, Tsai T R, Pan C L, Pan R P 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4497
- [39] Chen C Y, Pan C L, Hsieh C F, Lin Y F, Pan R P 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 101107
- [40] Chen H I, Pan C L, Hsieh C F, Pan R P 2008 *Opt. Lett.* **33** 1401
- [41] Chen C Y, Hsieh C F, Lin Y F, Pan R P, Pan C L 2004 *Opt. Express* **12** 2625
- [42] Yang L, Fan F, Chen M, Zhang X Z, Bai J J, Chang S J 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 2803
- [43] Ge S J, Liu J C, Chen P, Hu W, Lu Y Q 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 120401
- [44] Tsai T R, Chen C Y, Pan R P, Pan C L 2004 *IEEE Microw. Wirel. Co.* **14** 77
- [45] Hsieh C F, Pan R P, Tang T T, Chen H L, Pan C L 2006 *Opt. Lett.* **31** 1112
- [46] Wu H Y, Hsieh C F, Tang T T, Pan R P, Pan C L 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 1488
- [47] Lin C J, Lin C H, Li Y T, Pan R P, Pan C L 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 730
- [48] Lin X W, Wu J B, Hu W, Zheng Z G, Wu Z J, Zhu G, Xu F, Jin B B, Lu Y Q 2011 *AIP Adv.* **1** 032133
- [49] Yang C S, Tang T T, Chen P H, Pan R P, Yu P, Pan C L 2014 *Opt. Lett.* **39** 2511
- [50] Du Y, Tian H, Cui X, Wang X J, Lu J G, Zhou Z X 2016 *Opt. Express* **24** 6359
- [51] Du Y, Tian H, Cui X, Wang H, Zhou Z X 2016 *J. Mater. Chem. C* **4** 4138
- [52] Wu Y, Ruan X Z, Chen C H, Shin Y J, Lee Y, Niu J, Liu J, Chen Y, Yang K L, Zhang X, Ahn J H, Yang H 2013 *Opt. Express* **21** 21395
- [53] Wang L, Lin X W, Hu W, Shao G H, Chen P, Liang L J, Jin B B, Wu P H, Qian H, Lu Y N, Liang X, Zheng Z G, Lu Y Q 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e253
- [54] Sasaki T, Noda K, Kawatsuki N, Ono H 2015 *Opt. Lett.* **40** 1544
- [55] Ji Y Y, Fan F, Wang X H, Chang S J 2018 *Opt. Express* **26** 12852
- [56] Sasaki T, Okuyama H, Sakamoto M, Noda K, Okamoto H, Kawatsuki N, Ono H 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 143106
- [57] Ji Y Y, Fan F, Chen M, Yang L, Chang S J 2017 *Opt. Express* **25** 11405
- [58] Wang C T, Wu C L, Zhang H W, Lin T H, Lee C K 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 2283
- [59] Yu J P, Chen S, Fan F, Cheng J R, Xu S T, Wang X H, Chang S J 2018 *Opt. Express* **26** 663
- [60] Wang L, Ge S J, Hu W, Nakajima M, Lu Y Q 2017 *Opt. Mater. Express* **7** 2023
- [61] Yang J, Xia T Y, Jing S C, Deng G S, Lu H B, Fang Y, Yin Z P 2018 *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **39** 439
- [62] Ge S J, Chen P, Shen Z X, Sun W F, Wang X K, Hu W, Zhang Y, Lu Y Q 2017 *Opt. Express* **25** 12349
- [63] Ge S J, Shen Z X, Chen P, Liang X, Wang X K, Hu W, Zhang Y, Lu Y Q 2017 *Crystals* **7** 314
- [64] Shrekenhamer D, Chen W C, Padilla W J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 177403
- [65] Savo S, Shrekenhamer D, Padilla W J 2014 *Adv. Opt. Mater.* **2** 275
- [66] Isić G, Vasić B, Zografopoulos D C, Beccherelli R, Gajić R 2015 *Phys. Rev. Appl.* **3** 064007
- [67] Yang L, Fan F, Chen M, Zhang X, Chang S J 2017 *Opt. Commun.* **382** 42
- [68] Lu H B, Jing S C, Xia T Y, Yang J, Yin Z P, Deng G S 2017 *IEICE Elect. Express* **14** 20170469
- [69] Vasić B, Zografopoulos D C, Isić G, Beccherelli R, Gajić R 2017 *Nanotechnology* **28** 124002
- [70] Wang P Y, Jin T, Meng F Y, Lyu Y L, Erni D, Wu Q, Zhu L 2018 *Opt. Express* **26** 12318
- [71] Wang J, Tian H, Wang Y, Li X Y, Cao Y J, Li L, Liu J L, Zhou Z X 2018 *Opt. Express* **26** 5769
- [72] Yin Z P, Lu Y J, Xia T Y, Lai W, Yang J, Lu H B, Deng G H 2018 *RSC Adv.* **8** 4197
- [73] Wang R X, Li L, Liu J L, Yan F, Tian F J, Tian H, Zhang J Z, Sun W M 2017 *Opt. Express* **25** 32280
- [74] Wang L, Nakajima M, Ge S J, Lu Y Q 2017 *Opt. Express* **25** 23873
- [75] Wang L, Ge S J, Chen Z X, Hu W, Lu Y Q 2016 *Chin. Phys. B* **25** 094222
- [76] Shen Z X, Zhou S H, Ge S J, Duan W, Chen P, Wang L, Hu W, Lu Y Q 2018 *Opt. Lett.* **43** 4695
- [77] Qiu H S, Wang L, Shen Z X, Kato K, Sarukura N, Yoshimura M, Hu W, Lu Y Q, Nakajima M 2018 *Appl. Phys. Express* **11** 092101
- [78] Hu W F, Robert C, Jos É A E, Raymond D, Harold G, Vincent F, Norman G, 2008 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **56** 3112
- [79] Gerardo P P, Barba M, Encinar J A, Cahill R, Dickie R, Baine P M 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 3722
- [80] Fuscaldò W, Burghignoli P, Baccarelli P, Galli A 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 1651
- [81] Kahn F J 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 209
- [82] Inoue Y, Moritake H 2016 *Opt. Express* **24** 23027
- [83] Kim H, Kobashi J, Maeda Y, Ozaki M, Maeda Y 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 1138
- [84] Xianyu H, Faris S, Crawford G P 2004 *Appl. Opt.* **43** 5006
- [85] Hsiao Y C, Wei L 2013 *Opt. Express* **21** 23927
- [86] Wang L, Urbas A M, Li Q 2018 *Adv. Mater.* 1801335
- [87] Schwartz M, Lenzini G, Geng Y, Rønne P B, Ryan P Y A, Lagerwall J P F 2018 *Adv. Mater.* **30** 1707382
- [88] Kang B, Takano K, Nakajima M, Hangyo M, Takano K, Tadokoro Y 2015 *Opt. Lett.* **40** 4456
- [89] Keilmann F, Renk K F 1971 *Appl. Phys. Lett.* **18** 452
- [90] Chen I A, Park S W, Chen G, Wang C, Bethea C, Martini R, Woolard D 2013 *Proc. SPIE* **8624** 862415
- [91] Wang L, Qiu H S, Phan T N K, Kato K, Kang B, Takano K, Lu Y Q, Chen L J, Lü P, Yu K H, Wei W, Jin B B, Nakajima M 2018 *Appl. Sci.* **8** 2580

REVIEW

Research progress of terahertz liquid crystal materials and devices^{*}

Wang Lei^{1)2)†} Xiao Rui-Wen¹⁾ Ge Shi-Jun²⁾ Shen Zhi-Xiong²⁾Lü Peng¹⁾ Hu Wei²⁾ Lu Yan-Qing²⁾

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

2) (*National Laboratory of Solid State Microstructures, Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures and College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

(Received 26 December 2018; revised manuscript received 31 January 2019)

Abstract

Liquid crystal (LC) is an excellent tunable functional material which can be controlled by the external stimulus such as electric field, magnetic field and temperature. Terahertz (THz) radiation in a frequency range of 0.1–10.0 THz, has enormous advantages such as a low photon energy, sensitivity to crystal lattice vibration, magnetic spins, hydrogen bonds, intermolecular interaction, and water, and high transparency to non-conducting materials. The THz technology, therefore, has great potential in a diverse range of applications from spectroscopy, security screening to biomedical technology and high-speed wireless communication. But the development of high-performance LC based tunable THz functional devices is still in its infancy stage. The dispersion of LC refractive index induces a comparatively low birefringence in the THz regime. The lack of transparent electrodes makes the electric tuning of LCs difficult to achieve. To achieve certain modulations requires a very thick THz layer, leading to several disadvantages such as high operating voltage, slow response and poor pre-alignment. In this paper, we first present the research progress of large birefringence LCs in THz range. A room-temperature nematic LC NJU-LDn-4 with an average birefringence greater than 0.3 in a frequency range from 0.5 to 2.5 THz is shown in detail. This kind of LC can remarkably reduce the required cell gap, thus reducing the operating voltage and response time. Then we summarize varieties of conventional THz devices based on LC. Many electrodes are used for THz range. Graphene which can be used as a perfect transparent electrode material in THz band is proposed. Not only tunable transmissive but also reflective THz waveplates are introduced. The thickness of the LC layer of the reflective one can be reduced to ~10% of that needed for the same phase shift at a given frequency in a transmissive waveplate. The same tunability as that in the transmissive type just needs half the thickness. We also introduce that LC can generate THz vortex beam based on a photopatterned large birefringence LC. In the area of LC based versatile THz metamaterial devices, the adjacent units of a metasurface layer, such as a fishnet or grating, are usually connected to each other which may cause low-quality (Q) factor and polarization sensitivity, which is undesirable. We emphasize a graphene-assisted high-efficiency tunable THz metamaterial absorber. Few-layer porous graphene is integrated onto the surface of a metasurface layer to provide a uniform static electric field to efficiently control the LC, thereby enabling flexible metamaterial designs. The THz far-field and near-field with large modulation and fast

^{*} Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61605088), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20150845), and the Open Foundation Project of the National Laboratory of Solid State Microstructures, China (Grant No. M31039).

[†] Corresponding author. E-mail: wangl@njupt.edu.cn

response are realized. A magnetically and electrically polarization-tunable terahertz emitter that integrates a ferromagnetic heterostructure and the large-birefringence liquid crystals is also demonstrated to be able to generate broadband THz radiation and control the polarization of THz waves perfectly as well as LC based THz reflectarray. Last but not least, a temperature-supersensitive cholesteric LC used for THz detection is shown. It can not only measure the beam profiles but also detect the power values of THz waves generated from a nonlinear crystal pumped by a table-top laser. Quantitative visualization based on not only the thermochromic but also the thermal diffusion effect, can be used conveniently and effectively at room temperature. In this review, we summarize the latest progress of liquid crystal materials and components in THz and discuss the possible prospects of the combination of liquid crystal technology and THz technology. We envision that LCs will play a unique role in THz sources, THz functional devices and THz detectors.

Keywords: liquid crystal, terahertz, metamaterial, graphene

PACS: 42.70.Df, 87.50.U-, 42.79.Kr, 61.30.Pq

DOI: [10.7498/aps.68.20182275](https://doi.org/10.7498/aps.68.20182275)