

文章编号:1007-2780(2023)04-0419-13

液晶太赫兹光子学研究进展

王磊^{1,2,3}, 吴双悦¹, 宗顾卫¹, 金萍¹, 张绪¹,
宋瑞琦¹, 李炳祥^{1*}, 胡伟^{2*}, 陆延青^{2*}

- (1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 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, 江苏 南京 210093;
3. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:液晶作为液态和固态之间的中间态,具有液体的流动性和晶体的各向异性,其指向矢灵活可调,从微波到紫外都有广泛应用。近年来液晶光子学在太赫兹波段展现出巨大应用前景,本文综述了基于液晶的太赫兹源、可调太赫兹器件和太赫兹探测器的研究进展,探讨了未来液晶太赫兹光子学的发展趋势,如新型铁电向列相、液晶拓扑在太赫兹领域的应用,多模式、多参量的太赫兹波按需产生、调制与探测等。

关键词:液晶;太赫兹源;太赫兹器件;太赫兹探测器

中图分类号:O734;O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0370

Research progress of liquid crystal terahertz photonics

WANG Lei^{1,2,3}, WU Shuang-yue¹, ZONG Gu-wei¹, JIN Ping¹, ZHANG Xu¹,
SONG Rui-qi¹, LI Bing-xiang^{1*}, HU Wei^{2*}, LU Yan-qing^{2*}

- (1. *College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics(Future Technology),
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;*
2. *National Laboratory of Solid State Microstructures, College of Engineering and Applied Sciences,
Nanjing University, Nanjing 210093, China;*
3. *State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

Abstract: Liquid Crystal (LC), as an intermediate state between liquid and solid, has the fluidity of liquid and the anisotropy of crystal, and its director is flexible and tunable. It has a wide range of applications from microwave to ultraviolet. In recent years, LC photonics has shown great application prospects in the terahertz band. This paper reviews the research progress of LC-based terahertz sources, tunable terahertz devices and terahertz detectors, and discusses the future development of LC terahertz photonics such as

收稿日期:2022-11-08;**修订日期:**2022-11-26.

基金项目:国家重点研发计划(No.2022YFA1405000);江苏省自然科学基金(No.K20211277);中国博士后基金(No.2019M651768, No.2020T130285);江苏省前沿引领技术基础研究专项(No.BK20212004)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA1405000); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.K20211277); China Postdoctoral Science Foundation (No.2019M651768, No.2020T130285); Frontier Leading Technology Basic Research Project of Jiangsu Province (No.BK20212004)

*通信联系人, E-mail: bxli@njupt.edu.cn; huwei@nju.edu.cn; yqlu@nju.edu.cn

ferroelectric nematic phase, liquid crystal topology, as well as multi-mode and multi-parameter on demand terahertz wave generation, modulation and detection.

Key words: liquid crystals; terahertz sources; terahertz devices; terahertz detectors

1 引言

液晶(liquid crystal, LC)态是一种介于各向同性液态和固态(晶体)之间的中间态。液晶分子短程无序,但仍保持一定的长程(指向)有序,使其兼具液体的流动性和晶体的介电/光学各向异性。液晶技术在可见光波段,尤其显示领域大放光彩^[1-2],从微波到紫外也大有可为^[3-4]。液晶器件已逐渐成为制备低成本、高效率、动态可调光子学器件的典范^[5-6]。

太赫兹(terahertz, THz)波泛指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波,介于微波和红外之间。由于 THz 波具有时空相干性好、光子能量低、通信容量大和穿透性高等特点,使得 THz 技术在生物医学、通信传感、无损检测和成像等领域具有不可替代的应用潜力^[7-10]。但要推动 THz 技术的广泛应用,从组成 THz 系统的源、中间器件到 THz 探测器,在小型化、低成本、灵活可调等方面仍都面临很大挑战。液晶 THz 光子学技术被认为是一种较为有效的策略来解决这些挑战。本文总结了近年来基于液晶的 THz 源、THz 可调光子学器件和 THz 探测器的研究进展,并对未来液晶 THz 光子学的发展进行简要探讨。

2 基于液晶的 THz 源研究现状

THz 辐射源是 THz 科学与技术发展的关键。

传统的 THz 辐射源通常存在材料昂贵、体积庞大、系统复杂等缺点,同时对 THz 辐射的带宽和偏振等光学参量调控受限。高效、灵活、宽频的 THz 波产生及调控是 THz 源的重要研究方向。飞秒激光具有极短脉宽、极高峰值功率和超宽频谱等特性,基于飞秒激光产生的 THz 辐射具有宽频、室温工作、波长可调谐等优点。固体、液体和气体等均能基于飞秒激光产生 THz 辐射^[11-16],而介于固态和液态之间的液晶产生 THz 波的相关研究迟迟未见报道。液晶态与 THz 电磁波谱如图 1 所示。液晶以其独特的物理和光学性质在非线性光学领域占有重要地位。几乎所有光学非线性现象都已在液晶中观测到,如自相位调制、超快光开关和空间光孤子等^[17]。分子结构无对称中心的液晶材料本身易具有较高的非线性系数,液晶经过取向后,其非线性系数比没有取向的一般大 5 倍以上^[18]。但关于液晶二阶非线性效应的报道并不多。王再江等人报道了 5CB 液晶在电场诱导下实现相位匹配且产生二次谐波,并测定其非线性系数张量^[19]。2007 年,Andy 等人研究了液晶聚合物中二次谐波的产生^[20]。关于飞秒激光和液晶相互作用的研究还不多。2021 年,我们首次报道了利用飞秒激光激励一种液晶材料,实现了椭圆偏振态的宽频 THz 辐射现象^[21]。

实验装置如图 2(a)所示,泵浦源使用中心波长为 800 nm,脉宽 100 fs,重复频率为 1 kHz 的钛

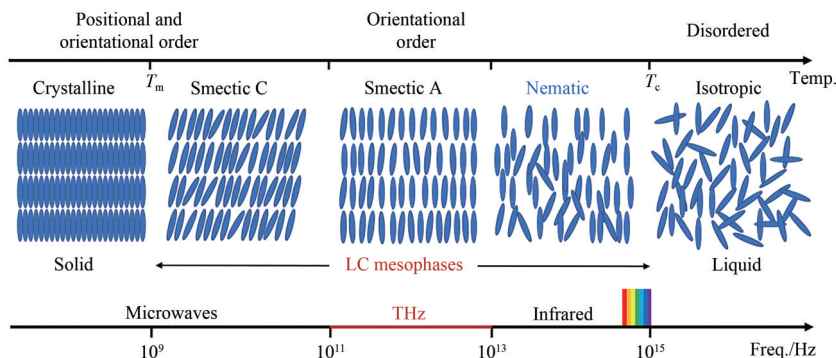


图 1 液晶态与 THz 电磁波谱示意图

Fig.1 Schematic diagram of THz electromagnetic spectra and LC mesophases

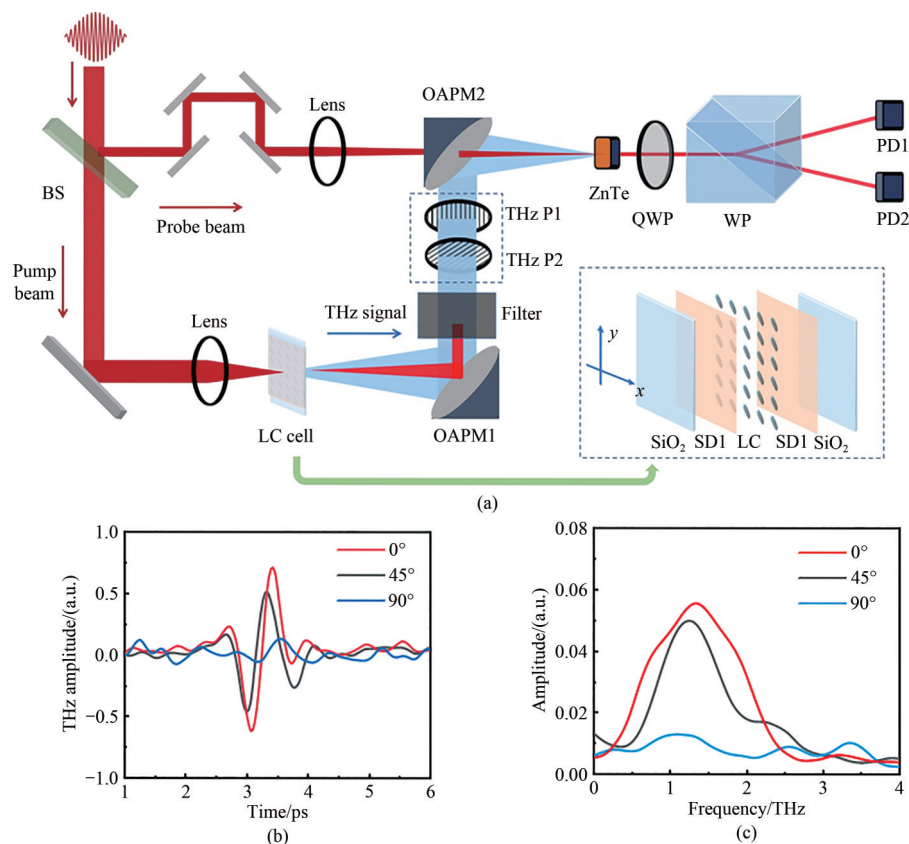


图2 (a)飞秒激光激励液晶产生THz的实验装置图,框图为液晶盒构成;(b)飞秒激光偏振方向与液晶指向矢不同夹角下产生的THz辐射时域波形图和(c)相应的THz频谱^[21]。BS:分束镜;OAPM:离轴抛物面反射镜;QWP:1/4波片;WP:Wollaston棱镜;PD:光电探测器。

Fig.2 (a) Experimental setup of THz generation induced by femtosecond laser in LC, the block diagram is LC cell; (b) Temporal THz waveforms of the THz emission from the LC cell with different θ and (c) corresponding Fourier-transformed spectra^[21]. BS: beam splitter; OAPM: off-axis parabolic mirror; QWP: quarter wave plate; WP: Wollaston prism; PD: photo detector.

蓝宝石飞秒激光器。入射的飞秒激光经分束器(BS)分为泵浦光束和探测光束。泵浦光束通过焦距为50 mm的透镜作用在液晶盒产生THz辐射。此时液晶盒位于焦点前,处于离焦位置,液晶上的光斑直径约为2 mm。THz辐射由一组有效焦距为50.8 mm(2 in)的离轴抛物面反射镜(OAPM)收集并准直,黑色聚乙烯薄膜作滤光片用以阻挡剩余的泵浦激光。THz偏振片P1、P2用于探测THz波的偏振态。通过光电采样法探测所产生的THz电场,线偏振的探测光束经透镜与产生的THz波一起会聚到1 mm厚度、〈110〉取向的ZnTe上,THz波诱导电光晶体ZnTe的折射率发生改变,探测光束的偏振态从线偏振变为椭圆偏振,通过光电探测器(PD)测量探测光束的椭圆偏度,从而确定THz波的电场强度。液晶盒由两片

平行的熔融SiO₂基板作为衬底,通过框胶结合构成,盒厚由180 μm 的Mylar膜控制,盒内灌入一种向列型混合液晶NJU-LDn-4,2个衬底都旋涂有偶氮染料SD1作为光控取向层。对液晶进行初始取向,其指向矢与y轴成45°夹角,平行于衬底均匀排列。该液晶混晶材料包含大量高度共轭的棒状分子,具有较长的 π 共轭电子结构,可实现相对较大的液晶非线性效应。在0.4~1.6 THz范围内平均双折射为0.306,且吸收损耗较低,没有尖锐的吸收峰,产生的THz光谱不会出现明显的吸收线^[22]。

旋转液晶盒改变飞秒激光偏振方向与液晶指向矢夹角,探测到的THz辐射时域波形图如图2(b)所示,此时泵浦光功率为30 mW。在初始位置,液晶指向矢与泵浦光偏振夹角为45°时,产

生的 THz 脉冲如黑色曲线所示。将液晶盒旋转 45° , 使液晶指向矢与泵浦光偏振方向平行 ($\theta=0^\circ$), 此时产生的 THz 波电场强度大于 $\theta=45^\circ$ 时的 THz 波, 如红色曲线所示。当液晶指向矢垂直于泵浦光偏振方向 ($\theta=90^\circ$), 没有明显的 THz 辐射。相应的 THz 频谱如图 2(c) 所示, $\theta=45^\circ$ 时, 液晶产生的宽频 THz 辐射中心频率在 1.2 THz 附近; 当 $\theta=0^\circ$ 时, 产生的 THz 波强度更大, 频谱更宽, 且中心频率右移至 1.4 THz 处。观测到的光谱差异可能与飞秒激光诱导的指向矢重新定向和相位匹配有关, 指向矢重定向会改变液晶等效二阶非线性极化率。

以不同功率的泵浦光束入射到液晶盒上, 产生的时域波形如图 3(a) 所示。泵浦功率为 10 mW 时, 产生的 THz 波太弱, 难以观测; 当泵浦功率增大到 15 mW 时, 探测到的 THz 波形已比较明显, THz 电场强度随泵浦功率的增强而增大。30 mW 的泵浦功率产生的 THz 峰值电场强度约为 15 mW 时的

5 倍; 泵浦功率达到 30 mW 以上时, THz 电场强度增长减缓, 35 mW 对应的 THz 波的脉冲半宽度约为 0.4 ps。强激光脉冲激发空气等离子体也可以辐射出 THz 波, 为了证明 THz 波是由于液晶产生的, 我们使用相同功率的飞秒激光分别激发玻璃衬底、空液晶盒, 相同液晶层厚度、平行取向的液晶 E7, 都没有产生 THz 辐射。经计算, 实验中的飞秒激光脉冲功率密度不足以激发空气等离子体产生 THz 辐射: 功率 35 mW、光斑直径 2 mm、脉冲宽度 100 fs、重复频率 1 kHz 的飞秒激光峰值功率密度为 $1.11 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$, 而空气电离的阈值^[15-16]约为 $1.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。进一步探究了 THz 峰值电场强度与泵浦功率的关系, 如图 3(b) 所示, 点表示实际测量的数据, 线条为拟合曲线。可探测到 THz 辐射场的泵浦激光能量密度阈值约为 0.3 mJ/cm^2 , THz 波饱和强度约为 0.15 V/cm , 液晶的损伤阈值约为 1.2 mJ/cm^2 。曲线虚线部分为偏离趋势。我们认为, 在泵浦能量密度低区, 是噪声的影响;

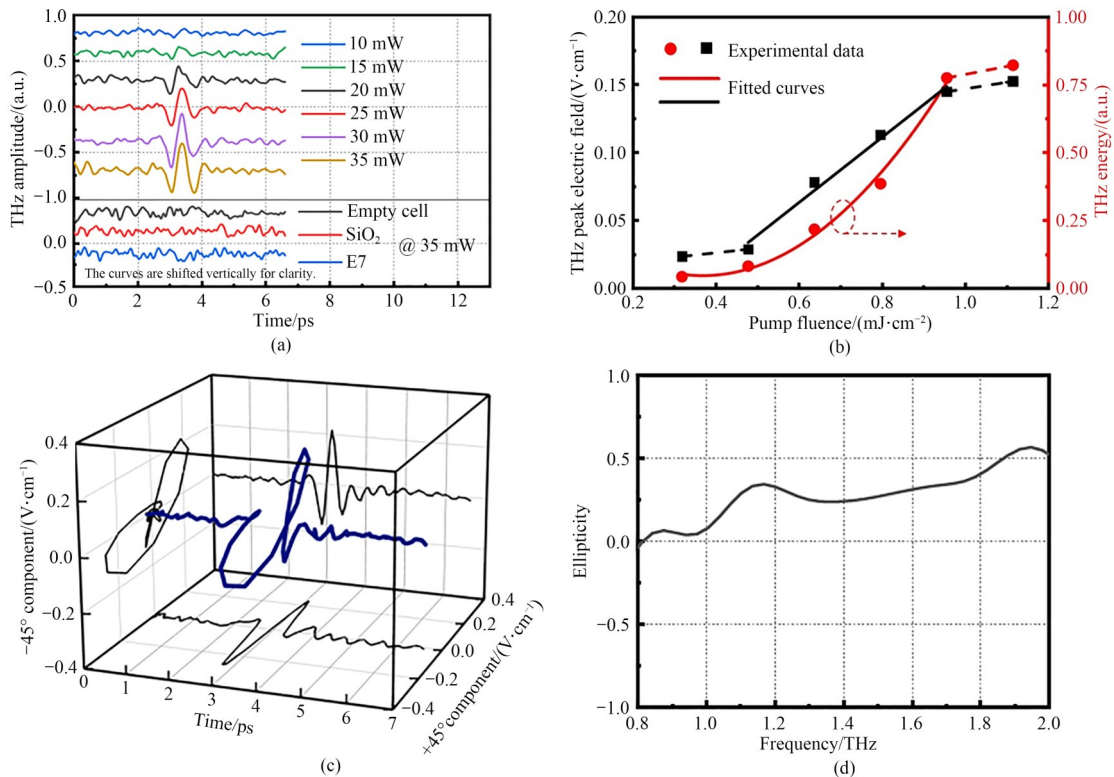


图3 THz辐射和偏振特性。(a)THz时域波形图^[21]; (b)THz电场强度峰值和归一化能量与泵浦光能量密度的关系^[21]; (c)THz波时域三维轨迹图; (d)THz波的椭圆率。

Fig. 3 The THz radiation and polarization properties. (a) Normalized THz waveforms with different pump powers^[21]; (b) THz peak electric field and energy from LC as a function of the pump fluence^[21]; (c) Three-dimensional trajectory plot of the temporal waveforms of THz emission; (d) Ellipticity of THz waves in frequency domain.

而在高区,主要与双光子吸收和液晶较低的损伤阈值有关。THz电场强度与泵浦激光能量密度呈明显的线性关系,与其他晶体基于光整流效应产生THz波的规律一致,初步判断飞秒激光激发液晶是基于光整流效应产生THz辐射。

进一步研究发现,出射的THz波具有椭圆偏振态。THz波时域三维轨迹如图3(c)所示,此时泵浦光功率为30 mW。如图3(d)所示,在0.8~2.0 THz频域内的椭圆率均大于0,中心频率1.2 THz处的椭圆率为0.3,THz辐射为椭圆偏振,而一般基于光整流效应产生的THz波均为线偏态。我们认为这是强飞秒激光泵浦下液晶指向矢的重新定向引起的^[23]。强飞秒激光泵浦可以打破平面取向液晶具有的中心对称性^[24],这里强飞秒激光引起液晶材料的对称中心偏离,有效对称中心的缺失导致了液晶二阶非线性的产生^[25]。液晶不仅像一般电光晶体一样,在飞秒激光作用下,基于光整流效应产生THz辐射,而且在强飞秒激光泵浦下液晶被重新取向,导致了液晶非均匀的整体取向,从而产生了椭圆偏振的THz波。目前液晶的损伤阈值较低,很难通过增加飞秒激光泵浦功率来提高THz辐射强度。通过相位匹配可进一步提高THz辐射强度,如何利用液晶阵列、透镜或球面反射器等增强THz发射强度值得进一步研究。

3 基于液晶的THz中间器件研究现状

近年来,液晶光取向技术的发展催生出一系列功能强大的液晶元件,为平面集成化的动态光场调控开辟了新道路^[26]。2019年,Shen等人引入几何相位的概念,设计棋盘格状空间复用的透镜相位,利用光控取向液晶技术实现了一种自旋选择性THz平面透镜,并验证了其具有聚焦的电控开关特性^[27],如图4(a)所示。与液晶类似,液晶聚合物(liquid crystal polymer, LCP)也具有宽波段光学各向异性特点。2006年,F. Rutz等人展示了一种LCP具有较大的THz双折射^[28];2021年Nakanishi等人对一种LCP进行了偏振成像;但都没有用LCP做成THz功能器件^[29]。2020年,Shen等人进一步提出基于LCP的平面THz光子元件^[30]。首先将几何相位信息写入液晶取向中,然后紫外聚合得到特定功能的波前调制元件,实现了THz偏振调控、波束偏转、可调聚焦、涡旋光束及贝塞尔光束产生等一系列功能,如图4(b)所示。由于聚合后结构化取向图案被固定下来,LCP器件不再需要基板,无需外加电场或磁场调控,本身的形变可带来动态调制效果,且在满足半波条件时可达近乎100%高效调制。该类器件具有柔性自支撑、机械形变动态响应、稳定性良好等优点。

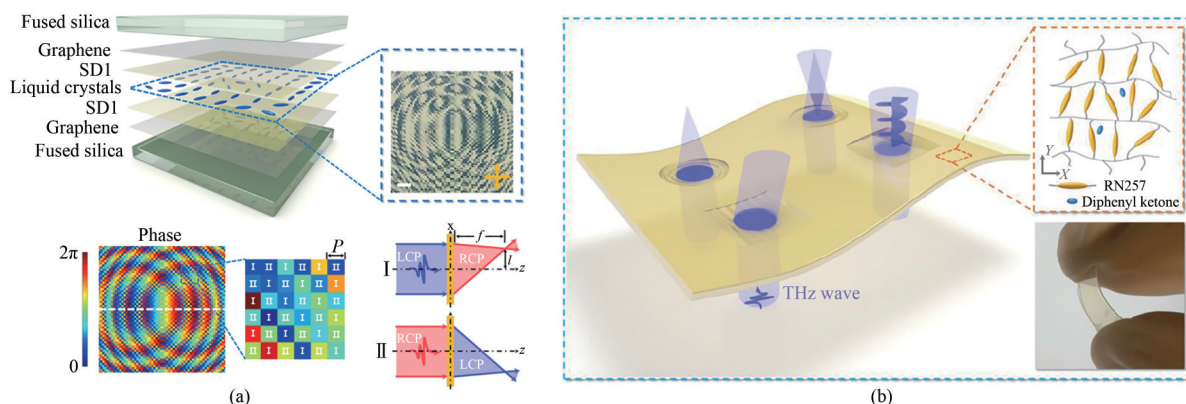


图4 基于液晶和液晶聚合物的THz光学元件^[27,30]。(a)THz自旋可选择透镜;(b)THz平面光子学器件。

Fig. 4 THz optical components based on LC and LCP^[27,30]. (a) Spin-selected THz lens; (b) Planar THz photonics.

将液晶和超材料、石墨烯等相结合,可实现THz液晶器件的多功能化^[31]。Tao等人设计了一种液晶集成金属超表面器件,实现了透反射双

工作模式的THz波调制^[32],如图5(a)所示。由于可编码控制像素化电极,该器件可实现空间灰阶强度调制,如图5(b)所示。Shen等人将液晶几何

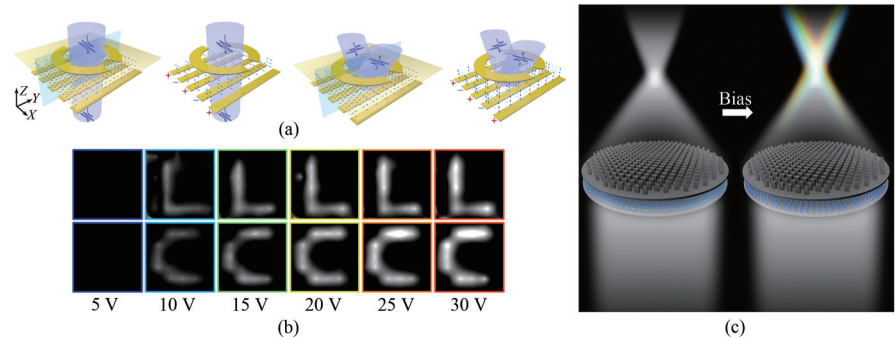


图5 结合超材料、石墨烯的液晶THz光学器件^[32-33]。(a)、(b)液晶集成金属超表面THz透反双功能调制器；(c)液晶集成介质超表面和石墨烯THz可调超透镜。
Fig. 5 LC THz optical components with metamaterials and graphene^[32-33]. (a), (b) Transfective spatial THz modulator; (c) THz metalens with tunable chromatic aberration.

相位与介质超表面的谐振相位结合,再集成石墨烯透明电极,实现了THz波聚焦色散的主动调控^[33],如图5(c)所示。不加电时,可实现0.9~1.4 THz宽带消色差的聚焦;施加75 V方波信号,透镜焦距随频率增大显著减小。该透镜在宽带内的平均调制效率为30%。利用该方法还可设计实现色散可调的THz波束偏折器。

液晶器件与现场可编程门阵列(FPGA)技术相结合,进一步增强了对THz波的调控能力^[34-35]。2020年,Liu等人设计了一种基于液晶的透射式

数字编码超表面,在实验中实现了30°的THz波最大偏转角^[36]。Wu等人设计了一种基于液晶的反射式THz可编程超表面^[37],如图6(a)所示。通过切换每个单元的“0”或“1”的状态动态地控制超表面上的相位分布,THz波偏转角可达32°。2022年,Li等人设计了一种液晶THz空间光调制器,如图6(b)所示,进一步开发了自校准成像算法,实现了双色THz压缩感知成像,为低成本、实用化的THz单像素多光谱成像技术开辟了一条新途径^[38]。

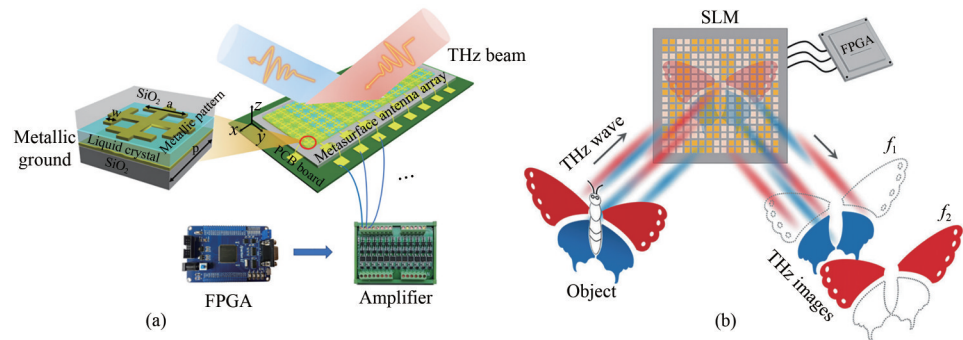


图6 与FPGA技术结合的液晶THz器件^[37-38]。(a)反射式可编程超表面；(b)双色THz空间光调制器用于单像素成像。
Fig. 6 LC THz devices with FPGA technology^[37-38]. (a) Reflective programmable metasurface; (b) Dual-color THz spatial light modulator for single-pixel imaging.

Chen等人利用向列相液晶的布鲁斯特临界角对THz波进行振幅和相位调制。在0.2~1.6 THz范围内,平均强度调制深度超过99.6%;在0.4~1.8 THz范围内,实现了高精度偏振转换^[39]。Hsieh等人设计了一种磁场调控的液晶THz消色差波片,该装置相位延迟在0.2~0.5 THz范围内可达

90°,工作频率可变换至0.3~0.7 THz,还可以通过多个波片的组合来扩展带宽^[40]。2020年,Zhang等人研究了胆甾相液晶对THz手性态的主动调控,发现其具有较强的THz热光特性和圆二色性^[41]。Shih等人研究了光、热调控染料掺杂液晶的THz强度调制器^[42]。2021年Ji等人报道了一种碳纳

米管薄膜既作为液晶取向层又作为透明电极驱动液晶的 THz 器件^[43]。掺入各种颗粒来增强液晶调控 THz 能力的研究也相继被报道^[44-46]。上述液晶 THz 器件在某些性能指标上已有所突破,对推动 THz 技术的应用起到了重要的促进作用,但综合性能还有待进一步提高。

4 基于液晶的 THz 探测器研究现状

基于电子学和光子学诸多方法的 THz 探测器已经取得很大进展,但通常所需系统结构复杂,成本昂贵,功能单一,应用范围受限,且许多性能

指标已接近理论极限,详见表 1。如何实现便宜、高效和易于使用的 THz 探测器,仍是目前重点研究内容。

基于热效应的 THz 探测器,不受材料禁带宽度的限制,可实现 THz 宽带探测,最有可能被广泛应用,其优势有待充分发挥。受益于可见光波段成熟的高灵敏探测技术,如果能将对 THz 辐射的测量通过热效应转化为对可见光进行探测,那么分析可见光的变化特性就可以得到 THz 波的特性。基于温敏胆甾相液晶的 THz 可视化探测可以实现上述功能,是一种比较新颖、实用的探测 THz 的方法^[52-54]。

表 1 各种 THz 探测器比较

Tab.1 Comparison of various THz detectors

探测器类型	原理	可探测参数	功能器件	不足/优点
非相干探测 ^[47-48]	Pyroelectric	THz 功率	THz 功率计、光斑分析仪	需要电路,成本高。
	Microbolometer			
相干探测 ^[49]	外差法探测	THz 频率、振幅、相位	THz 频谱仪	需要本地震荡源,体积大,成本高。
	基于超快激光 THz		THz 时域光谱仪	需要飞秒激光等,体积庞大,速度慢,成本高。
	脉冲探测			
一种 Golay Cell ^[50]	热光效应	THz 功率	THz 功率计	探测范围小,速度慢。
一种可视化 THz 探测器 ^[51]	THz 光热色效应	THz 功率	THz 功率计、光斑分析仪等	探测范围大,体积小,速度快,成本低。

胆甾相液晶的指向矢呈螺旋分布,折射率沿螺旋轴方向呈周期性变化,即具有 1D 光子晶体结构,微小的温度变化会引起螺距相应变化,从而造成液晶的光学性质(包括选择反射、旋光性等)强烈变化,可视为一种结构色温度传感器。将其胶囊化,可免受外界环境中水蒸气、二氧化碳、紫外线和化学蒸汽等影响,作为固体使用和保存,同时制成的悬浮液可以随意地取用以及涂覆于不同材料上。球形的胶囊可保证胆甾相液晶全方位的选择反射特性,只需要探测反射光即能对信息进行无接触光学读取。

我们前期已设计实现了一种基于胆甾相液晶胶囊(capsulized cholesteric liquid crystal, CCLC)的薄膜用于探测 THz 功率^[55],但 CCLC 薄膜对 THz 波吸收率(60%)仍不够高,无法有效地加热 CCLC 薄膜以实现高效可视化探测。为了获得高效实用的 THz 探测器,需要结合新的材料来提高 THz 吸收率。三维多孔石墨烯(three dimensional

porous graphene, 3DPG)具有高孔隙率,有效降低了材料的等效折射率,使得 THz 波在其表面的反射率大大降低,能够轻松进入内部,然后在孔隙内经历多次散射、反射,可实现在非常宽的频率范围内都保持很低的表面反射和较高的吸收率,同时在较大的人射角范围内都能保持稳定的吸收特性。黄毅教授组展示了一种超低密度和可调节光学特性的三维石墨烯泡沫,其具有微弱的表面反射和巨大的内部吸收^[56],在 0.1~1.2 THz 范围内具有优异的 THz 吸收性能,其反射损耗只有 19 dB。更重要的是,石墨烯很高的电荷载流子迁移率和良好的导热特性使得 3DPG 成为构建新型 THz 高效探测器件的理想材料^[57]。

2020 年,我们首次将 CCLCs 嵌入 3DPG 进行可视化 THz 功率探测^[51],如图 7 所示。3DPG 在 0.5~2 THz 范围内具有超过 97% 的高吸收率,利用温度超灵敏 CCLC 的热色特性,对稳态下 THz 功率进行了可视化定量研究,THz 探测强度高

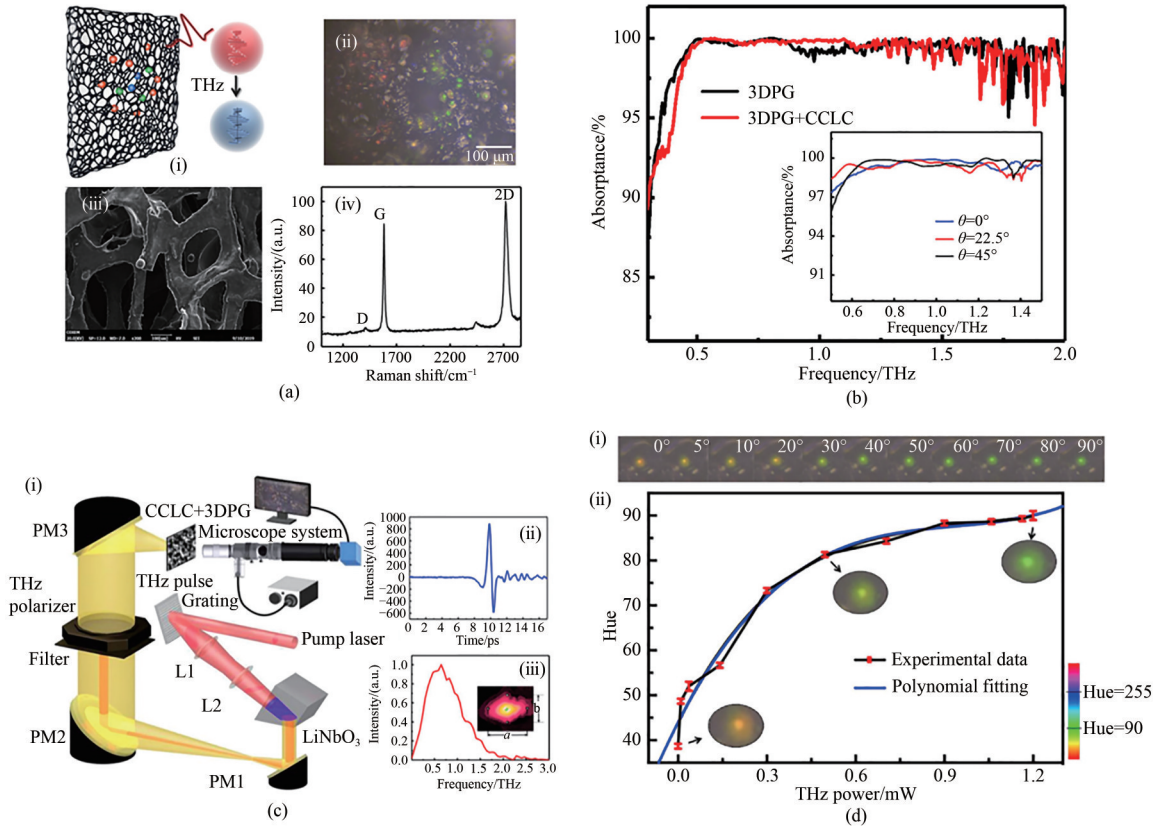


图 7 基于CCLC的THz可视化探测^[51]。(a) CCLCs掺入3DPG的示意图和样品的显微图、SEM图和3DPG拉曼光谱;(b) 3DPG和嵌有CCLCs的3DPG对THz的吸收特性;(c)基于显微成像系统可视化THz功率探测装置;(d)探测的THz功率可视化结果。

Fig. 7 Visualization of THz based on CCLC^[51]. (a) Micrograph of 3DPG embedded with CCLCs, scanning electron microscopy (SEM) image of 3DPG with CCLCs and Raman spectrum of 3DPG; (b) THz absorptions of 3DPG embedded with CCLCs; (c) Experimental setup of THz power visualization; (d) THz intensities' dependence of hue digitized from the pictures of the CCLC.

$2.77 \times 10^2 \text{ mW/cm}^2$,最低探测功率仅为0.009 mW。整个器件厚度只有约0.5 mm。该可视化探测器结构简单便携、成本低廉、高效实用,可应用于THz系统的对准、THz波的光束分析以及THz成像和传感等。

研究发现,相较于单颗CCLC颜色变化的Hue值与THz功率的非线性关系,多颗CCLC随THz功率的颜色变化Hue值与THz探测功率成线性依赖,可以更好地用于THz检测。进一步研究发现,3DPG上溅射少量金纳米颗粒后,THz功率与CCLC的Hue值亦呈线性关系^[58],如图8所示。金纳米颗粒的加入在一定程度上增强了THz吸收,同时金纳米颗粒具有高热导率,其优异的光热转换特性可以将吸收的光能迅速转换为热能,增强了吸收进3DPG中的THz波

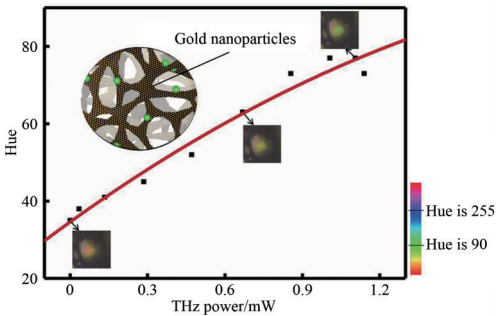


图 8 含有金纳米颗粒的3DPG中CCLC的Hue值与THz功率的对应关系^[58]

Fig. 8 Relationship between Hue value of a CCLC embedded in 3DPG with gold nanoparticles and THz power^[58]

的光热转换和热量传递,使得CCLC温度响应更显著。

但以上工作对 THz 的特定频率和偏振特性尚无具体探测。石墨烯超材料器件可以实现对 THz 波频率和偏振等特性的调控。各种石墨烯微结构制备方法中,激光诱导石墨烯(laser-induced graphene, LIG)法是一种非常方便、快捷的新手段^[59]。目前首都师范大学张岩课题组近期用 LIG 方法成功制备了 3DPG THz 石墨烯光栅和菲涅尔波带片^[60]。通过调整激光加工参数,可对 LIG 构性进行调节,从而定制对特定 THz 频率的吸收率。我们已经设计制备出了基于 LIG 法的 3DPG 微结构 THz 吸收器和滤波器^[61-62]。LIG 法制备 3DPG 微结构 THz 器件结合 CCLCs 进行 THz 光场可视化探测值得深入研究。

5 总结与展望

THz 技术仍需不断突破瓶颈,将液晶技术应用到 THz 领域为我们带来机遇。THz 源方面,还需深入研究基于液晶产生 THz 辐射的物理机制。首先需要寻找高二阶非线性系数、低损耗、高阈值的液晶材料。新型液晶,如铁电向列相^[63-64],尤其是螺旋铁电向列相液晶^[65],具有较大的二阶非线性光学响应且可以保持在室温,为我们开发新型基于液晶的 THz 源打开了新的大门。通过光控取向技术能够定制液晶在微小区域内的指向矢分布,优化结构设计,飞秒激光-THz 的转换效率有望得到提高。液晶对电场、磁场等外场十分敏感,还可以与超材料、石墨烯等 2D 材料组合,加强对 THz 辐射的灵活调控,未来有望集成到紧凑型、芯片级 THz 器件和系统中。

THz 中间器件方面,液晶器件具有制作工艺简单、效率高、动态可调、适于大面积制备等优势^[66]。液晶几何相位元件展现出优异性能与应用潜力,为了更好地满足功能性、灵活性、并行性等需求,未来可以扩展到 THz 波段液晶器件的多模式、多参量、多通道、多维度、多物理场并行操控等方面的

研究和如何提高综合性能指标的研究。

目前拓扑光子学的研究已拓展到 THz 波段,THz 拓扑在 THz 通信与传感等方面展现出诱人的应用前景^[67-69]。液晶作为软物质中的重要成员之一,可设计实现可编程控制的拓扑结构^[70-71]。基于液晶的拓扑结构有望实现紧凑、稳定且动态可调的多功能 THz 器件,为按需调控 THz 的局域和拓扑特性提供了一种灵活方便的方法,也为实现可用于各种应用的 THz 集成光路系统开辟一条新的道路。

THz 探测器方面,对 THz 光场(振幅、频率和偏振)的测量,尤其是同时探测,在 THz 成像、传感和光谱等领域具有重要意义。目前基于胆甾相液晶的 THz 探测器还只能测量 THz 强度,灵敏度还不够高,响应速度还不够快,不具备光谱识别能力。后期可以集成超材料结构进行频率和偏振的选择,实现多通道光谱测试,以实现便携式微型 THz 光场测试仪。

在 THz 低频段领域,利用液晶技术实现智能超表面赋能 6G 无线通信,有望打破现有无线通信技术限制。研究利用基于液晶的不同轨道角动量灵活可调的 THz 波束复用系统,可进一步提高 THz 通信容量。在 THz 高频段领域,THz 生物学的研究如火如荼^[72],而生命物质(如 DNA、RNA、蛋白质)又都具有某些液晶特性。中国科协发布 2022 十大前沿科学问题之一的“如何早期诊断无症状期阿尔茨海默病”,利用液晶技术^[73]或 THz 技术已有研究^[74],两者相结合,有望解决这类生物医学方面的重大科学问题。

此外,将深度学习与上述研究方向相结合,通过将测试结果带入神经网络进行训练,可实现测试数据快速反馈,优化设计,提高测试精度、灵敏度;也可用于相关信息的快速标定、提取和重构,提高对实际应用场景的适应性,实现自适应智能化。随着更深广的领域持续研究,相信在不久的将来,有望突破瓶颈,迎来液晶 THz 光子学的春天。

参 考 文 献:

- [1] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1(1): 3.
- [2] LI Y L, LI N N, WANG D, et al. Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 188.

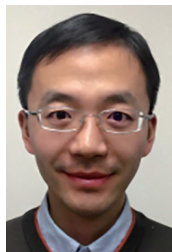
- [3] MAUNE H, JOST M, REESE R, *et al.* Microwave liquid crystal technology [J]. *Crystals*, 2018, 8(9): 355.
- [4] FAN Y H, LIN Y H, REN H W, *et al.* Fast-response and scattering-free polymer network liquid crystals for infra-red light modulators [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(8): 1233-1235.
- [5] LIU S J, CHEN P, GE S J, *et al.* 3D engineering of orbital angular momentum beams via liquid-crystal geometric phase [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2200118.
- [6] ZHU L, XU C T, CHEN P, *et al.* Pancharatnam-Berry phase reversal via opposite-chirality-coexisted superstructures [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 135.
- [7] 周俊, 刘盛纲. 太赫兹生物医学应用的研究进展[J]. 现代应用物理, 2014, 5(2): 85-97.
ZHOU J, LIU S G. Research progress of terahertz biomedical applications [J]. *Modern Applied Physics*, 2014, 5(2): 85-97. (in Chinese)
- [8] 姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2213-2233.
YAO J Q, CHIN, YANG P F, *et al.* Study and outlook of terahertz communication technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2213-2233. (in Chinese)
- [9] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [10] FERGUSON B, ZHANG X C. Materials for terahertz science and technology [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26-33.
- [11] ZHANG X C, MA X F, JIN Y, *et al.* Terahertz optical rectification from a nonlinear organic crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(26): 3080-3082.
- [12] GUIRAMAND L, NKECK J E, ROPAGNOL X, *et al.* Near-optimal intense and powerful terahertz source by optical rectification in lithium niobate crystal [J]. *Photonics Research*, 2022, 10(2): 340-346.
- [13] JIN Q, E Y W, WILLIAMS K, *et al.* Observation of broadband terahertz wave generation from liquid water [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(7): 071103.
- [14] E Y W, ZHANG L L, TSYPKIN A, *et al.* Progress, challenges, and opportunities of terahertz emission from liquids [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(3): A43-A51.
- [15] KRESS M, LÖFFLER T, EDEN S, *et al.* Terahertz-pulse generation by photoionization of air with laser pulses composed of both fundamental and second-harmonic waves [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1120-1122.
- [16] COOK D J, HOCHSTRASSER R M. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(16): 1210-1212.
- [17] KHOO I C. Nonlinear optics of liquid crystalline materials [J]. *Physics Reports*, 2009, 471(5/6): 221-267.
- [18] 谌东中, 余学海. 具有二阶非线性光学特性的液晶聚合物[J]. 高分子材料科学与工程, 1999, 15(6): 10-13.
CHEN D Z, YU X H. Second-order nonlinear optical liquid crystalline polymers [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 1999, 15(6): 10-13. (in Chinese)
- [19] 王再江, 王炳奎. 电场诱导向列相液晶二阶线性光学效应[J]. 量子电子学, 1994, 11(3): 134-139.
WANG Z J, WANG B K. Electric field-induced second harmonic generation of nematic liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1994, 11(3): 134-139. (in Chinese)
- [20] FUH A Y, HUANG C, LAU C, *et al.* Studies of second harmonic generation in liquid crystal-polymer mixtures[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1997, 36(11): 6832-6838.
- [21] WANG L, QIU H S, JIN P, *et al.* THz generation by optical rectification of femtosecond laser pulses in a liquid crystal [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(3): A89-A93.
- [22] 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.
- [23] 赵祥杰, 骆永全, 罗飞, 等. 强激光诱导向列相液晶指向矢转动的数值研究[J]. 液晶与显示, 2010, 25(3): 346-350.
ZHAO X J, LUO Y Q, LUO F, *et al.* Numerical research on laser induced molecular reorientation in liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(3): 346-350. (in Chinese)
- [24] SUKHOV A V, TIMASHEV R V. Optically induced deviation from central symmetry; lattices of quadratic nonlinear susceptibility in a nematic liquid crystal [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1990, 51(7):

- 413-417.
- [25] ENIKEEVA V A, ZOLOT'KO A S, MAKAROV V A, *et al.* Second harmonic generation by femtosecond pulses in nematic liquid crystal [J]. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2007, 34(5): 142-145.
- [26] YUAN R, XU C T, CAO H, *et al.* Spin-decoupled transfective spatial light modulations enabled by a piecewise-twisted anisotropic monolayer [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(23): 2202424.
- [27] SHEN Z X, ZHOU S H, GE S J, *et al.* Liquid crystal tunable terahertz lens with spin-selected focusing property [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8800-8807.
- [28] RUTZ F, HASEK T, KOCH M, *et al.* Terahertz birefringence of liquid crystal polymers [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(22): 221911.
- [29] NAKANISHI A, HAYASHI S, SATOZONO H, *et al.* Polarization imaging of liquid crystal polymer using terahertz difference-frequency generation source [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(21): 10260.
- [30] SHEN Z X, TANG M J, CHEN P, *et al.* Planar terahertz photonics mediated by liquid crystal polymers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(7): 1902124.
- [31] ZANG X F, YAO B S, CHEN L, *et al.* Metasurfaces for manipulating terahertz waves [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(2): 148-172.
- [32] TAO S N, SHEN Z X, YU H G, *et al.* Transfective spatial terahertz wave modulator [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(7): 1650-1653.
- [33] SHEN Z X, ZHOU S H, LI X N, *et al.* Liquid crystal integrated metalens with tunable chromatic aberration [J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036002.
- [34] FU X J, SHI L, YANG J, *et al.* Flexible terahertz beam manipulations based on liquid-crystal-integrated programmable metasurfaces [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(19): 22287-22294.
- [35] LIU S, XU F, ZHAN J L, *et al.* Terahertz liquid crystal programmable metasurface based on resonance switching [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(7): 1891-1894.
- [36] LIU C X, YANG F, FU X J, *et al.* Programmable manipulations of terahertz beams by transmissive digital coding metasurfaces based on liquid crystals [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(22): 2100932.
- [37] WU J B, SHEN Z, GE S J, *et al.* Liquid crystal programmable metasurface for terahertz beam steering [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(13): 131104.
- [38] LI W L, HU X M, WU J B, *et al.* Dual-color terahertz spatial light modulator for single-pixel imaging [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 191.
- [39] CHEN X Q, LI K D, ZHANG R, *et al.* Highly efficient ultra-broadband terahertz modulation using bidirectional switching of Liquid crystals [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(24): 1901321.
- [40] HSIEH C F, YANG C S, SHIH F C, *et al.* Liquid-crystal-based magnetically tunable terahertz achromatic quarter-wave plate [J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9933-9940.
- [41] ZHANG X, FAN F, JI Y Y, *et al.* Temperature-dependent chirality of cholesteric liquid crystal for terahertz waves [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(18): 4988-4991.
- [42] SHIH Y H, SILALAH H M, TSAI T I, *et al.* Optically tunable and thermally erasable terahertz intensity modulators using dye-doped liquid crystal cells with metasurfaces [J]. *Crystals*, 2021, 11(12): 1580.
- [43] JI Y Y, FAN F, ZHANG Z Y, *et al.* Active terahertz liquid crystal device with carbon nanotube film as both alignment layer and transparent electrodes [J]. *Carbon*, 2022, 190: 376-383.
- [44] JI Y Y, FAN F, XU S T, *et al.* Terahertz dielectric anisotropy enhancement in dual-frequency liquid crystal induced by carbon nanotubes [J]. *Carbon*, 2019, 152: 865-872.
- [45] JI Y Y, FAN F, XU S T, *et al.* Manipulation enhancement of terahertz liquid crystal phase shifter magnetically induced by ferromagnetic nanoparticles [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(11): 4933-4941.
- [46] JI Y Y, FAN F, ZHANG X, *et al.* Terahertz birefringence anisotropy and relaxation effects in polymer-dispersed liquid crystal doped with gold nanoparticles [J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17253-17265.
- [47] OptronicsOphir. Pyrocam IIIHR beam profiling camera [EB/OL]. <http://www.ophiropt.com/laser--measurement/beam-profilers/products/Beam-Profiling/Camera-Profiling-with-BeamGage/Pyrocam-IIIHR/>.

- [48] INO. MICROXCAM-384I-THz Terahertz Camera [EB/OL]. <https://www.ino.ca/en/solutions/thz/microxcam-384i-thz/>.
- [49] 金鹰兵, 单文磊, 郭旭光, 等. 太赫兹检测技术[J]. 物理, 2013, 42(11): 770-780.
JIN B B, SHAN W L, GUO X G, *et al.* Terahertz detectors [J]. *Physics*, 2013, 42(11): 770-780. (in Chinese)
- [50] TYDEX. Golay Detectors [EB/OL]. http://www.tydexoptics.com/products/thz_devices/golay_cell/.
- [51] WANG L, XIAO R W, YANG S X, *et al.* 3D porous graphene-assisted capsulized cholesteric liquid crystals for terahertz power visualization [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(20): 5892-5895.
- [52] KEILMANN F, RENK K F. Visual observation of submillimeter wave laser beams [J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 18(10): 452-454.
- [53] CHEN I A, PARK S W, CHEN G, *et al.* Ultra-broadband wavelength conversion sensor using thermochromic liquid crystals [C]//*Proceedings of SPIE 8624, Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications VI*. San Francisco: SPIE, 2013: 862415.
- [54] TADOKORO Y, NISHIKAWA T, KANG B Y, *et al.* Measurement of beam profiles by terahertz sensor card with cholesteric liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(19): 4456-4459.
- [55] WANG L, QIU H S, PHAN T N K, *et al.* Visible measurement of terahertz power based on capsulized cholesteric liquid crystal film [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2580.
- [56] HUANG Z Y, CHEN H H, HUANG Y, *et al.* Ultra-broadband wide-angle terahertz absorption properties of 3D graphene foam [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(2): 1704363.
- [57] SHAHIL K M F, BALANDIN A A. Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials [J]. *Solid State Communications*, 2012, 152(15): 1331-1340.
- [58] 肖芮文, 肖俊羽, 金萍, 等. 基于三维多孔石墨烯和胆甾相液晶胶囊的高效可视化太赫兹探测器[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1704002.
XIAO R W, XIAO J Y, JIN P, *et al.* High-efficiency visual terahertz detector based on three-dimensional porous graphene and cholesteric liquid crystal microcapsule [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1704002. (in Chinese)
- [59] LIN J, PENG Z W, LIU Y Y, *et al.* Laser-induced porous graphene films from commercial polymers [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5714.
- [60] WANG Z Y, WANG G C, LIU W G, *et al.* Patterned laser-induced graphene for terahertz wave modulation [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(2): 546-551.
- [61] LAN J X, ZHANG R X, BAI H, *et al.* Tunable broadband terahertz absorber based on laser-induced graphene [J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(7): 073701.
- [62] ZHANG R X, ZONG G W, WU S Y, *et al.* Ultrathin flexible terahertz metamaterial bandstop filter based on laser-induced graphene [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(4): 1229-1232.
- [63] CHEN X, KORBLOVA E, DONG D P, *et al.* First-principles experimental demonstration of ferroelectricity in a thermotropic nematic liquid crystal: polar domains and striking electro-optics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(25): 14021-14031.
- [64] LI J X, NISHIKAWA H, KOUIGO J, *et al.* Development of ferroelectric nematic fluids with giant- ϵ dielectricity and nonlinear optical properties [J]. *Science Advances*, 2021, 7(17): eabf5047.
- [65] ZHAO X H, ZHOU J C, LI J X, *et al.* Spontaneous helielectric nematic liquid crystals: electric analog to helimagnets [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(42): e2111101118.
- [66] LI S Q, XU X W, VEETIL R M, *et al.* Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface [J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [67] ERGOKTAS M S, SOLEYMANI S, KAKENOV N, *et al.* Topological engineering of terahertz light using electrically tunable exceptional point singularities [J]. *Science*, 2022, 376(6589): 184-188.
- [68] WANG J Y, XIA S Q, WANG R D, *et al.* Topologically tuned terahertz confinement in a nonlinear photonic chip [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 152.
- [69] KUMAR A, GUPTA M, PITCHAPPA P, *et al.* Topological sensor on a silicon chip [J]. *Applied Physics Letters*,

- 2022, 121(1): 011101.
- [70] JIANG J H, RANABHAT K, WANG X Y, *et al.* Active transformations of topological structures in light-driven nematic disclination networks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(23): e2122226119.
- [71] ZHANG R, MOZAFFARI A, DE PABLO J J. Logic operations with active topological defects [J]. *Science Advances*, 2022, 8(8): eabg9060.
- [72] CHOI W J, YANO K, CHA M, *et al.* Chiral phonons in microcrystals and nanofibrils of biomolecules [J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(5): 366-373.
- [73] PANI I, MADHU P, NAJIYA N, *et al.* Differentiating Conformationally distinct Alzheimer's amyloid- β oligomers using liquid crystals [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2020, 11(21): 9012-9018.
- [74] YEO W G, GUREL O, SRINIVASAN N, *et al.* Terahertz imaging and electromagnetic model of axon demyelination in Alzheimer's disease [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, 7(6): 711-721.

作者简介:



王磊(1982—),男,江苏徐州人,博士,副教授,2014年于南京大学获得博士学位,主要从事液晶太赫兹光子学、超材料与石墨烯等方面的研究。E-mail:wangl@njupt.edu.cn



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,从事液晶光子学、聚焦光控液晶层级序构、光寻址液晶调光、军民用液晶元件开发等方面的研究。E-mail:huwei@nju.edu.cn



李炳祥(1982—),男,福建泉州人,博士,教授,2019年于美国肯特州立大学先进材料与液晶研究所获得博士学位,主要从事液晶、刺激响应软材料、活性物质和生物物理等方面的研究。E-mail:bxli@njupt.edu.cn



陆延青(1971—),男,江苏如皋人,博士,教授,1996年于南京大学获得博士学位,主要从事微纳光学、液晶光学、光纤器件方面的研究。E-mail:yqlu@nju.edu.cn