

液晶软光子学——光场的多自由度调控*

陆延青[†]

(南京大学现代工程与应用科学学院 智能光传感与调控技术教育部重点实验室 南京 210023)

2023-01-11 收到

[†] email: yqlu@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230205

Liquid crystal soft mattonics——multi-degree manipulation of light

LU Yan-Qing

(Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation of the Ministry of Education, College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

摘要 液晶是一类典型的软物质。它具有优异的外场调谐特性以及多层级的组装结构特征。文章介绍了作者在液晶光控取向技术及其光学应用方面取得的进展, 如对液晶进行图案化编码实现任意液晶微结构的制备及多层级操纵, 对光场的振幅、相位、偏振及波长等多自由度进行灵活、高效的调控, 实现功能可调的液晶太赫兹器件等。

关键词 液晶, 多层级结构, 光取向, 光场调控, 太赫兹

Abstract Liquid crystal is a typical soft matter, with excellent external field tunability and hierarchical self-assembly. Here we present our recent work on the use of photo-alignment to manipulate the microstructure and even hierarchical structure of liquid crystals, resulting in various novel physical effects. Liquid crystal microstructures of arbitrary design have been fabricated by photo-patterning, which enables flexible and efficient control of the multi-dimensional parameters of light such as the amplitude, phase, polarization and wavelength. Liquid crystal based tunable terahertz devices have also been devised.

Keywords liquid crystal, hierarchical structure, photo-alignment, light manipulation, terahertz

1 引言

光子具有丰富的物理维度, 包括频率/波长、时间、振幅、偏振、自旋角动量、轨道角动量等。与电子相比, 光子具有极高的信息容量、强大的并行处理能力。实现对光子在频域和空间域的并行多维度调控对于集成化、智能化和小型化光学系统的发展具有重要意义, 在信息、生命、化学

和材料等领域具有广阔的应用前景。然而, 精确、高效地实现局域多维光场参量的调制与编解码仍然是当前光子信息领域面临的难题。波长、振幅、自旋、轨道角动量间的耦合也使得其按需独立调控或联合调控受到制约。

液晶相是一种介于固体和液体之间的中间相, 其对应物常表述为液晶(liquid crystal, LC)。它兼具液体的连续性和晶体的各向异性, 展现出典型的光学(Δn)、电学($\Delta \epsilon$)各向异性以及灵敏的多元外场(包括力、热、光、电、磁)响应特性。除了传统的向列相液晶, 液晶独特的分子结构和

* Soft mattonics 是 soft-matter photonics (软物质光子学)的简写, 由作者在 *Chinese Optics Letters* 期刊 2020 年第 8 期的专题导语“Editorial for special issue on soft-matter photonics (soft mattonics)”中首次提出。

分子间相互作用赋予其灵活的自组装行为，能够形成丰富多样的层级结构，如胆甾相液晶、近晶相液晶、蓝相液晶等。探索液晶的纳米组装结构与光学性质的双向映射，实现对光的多自由度的动态正交调控，有望推动其在光计算、激光通讯、集成光子芯片、虚拟现实等领域的创新与应用。特别是，液晶多层级结构因其不同层级存在独特的空间构型而具有对光多参量并行调制的能力。液晶的外场刺激响应特性进一步增加其组装形式的多样性。利用液晶多层级结构有望实现对光的更多维度的、更复杂多变的操控，有望提升光信息加载的能力，带来材料层面和技术层面的新效应和新应用。

2012年，我们提出并实现了基于数字微镜系统(digital micro-mirror device, DMD)对液晶进行任意图案化取向的技术^[1]。通过对取向层进行动态无掩膜曝光，诱导液晶指向矢的空间分布，从而实现了对光的点对点的波前控制。利用这项技术实现了基于向列相液晶(nematic LC, NLC)的涡旋光束、艾里光束、矢量光束等多种空间结构光场制备^[2-5]。2015年，利用光取向技术操控胆甾相液晶(cholesteric LC, CLC)螺旋轴平面内指向，实现了大规模、无缺陷的螺旋条纹和波浪状光栅等复杂纹理^[6]。2018年，数字化手性超结构的概念被提出并实现了宽带反射式几何相位的灵活操控。通过编码达曼涡旋光栅，验证了涡旋光的生成、检测与解复用^[7]。2019年，通过在胆甾相液晶中掺杂光响应手性分子开关，实现了带宽超过1000 nm的主动式平面光学器件^[8]。此外，近年来，我们在四维可视化成像、粒子输运以及结合超材料的液晶太赫兹(THz)器件等方面也相继取得进展^[9-11]。文章以我们在液晶光控取向技术及其光学应用方面取得的新进展为主，结合国内外相关团队工作进行展示。在广大同行的共同努力下，基于液晶的“软光学”研究新方向正处在迅猛发展中。

2 液晶多层级超结构操控

液晶是典型的软物质序构材料，兼具液体的流动性与晶体的各向异性，且对多种外部刺激具有

灵敏的外场响应。液晶因其良好的受控自组装特性及其独特的电光特性，受到了广泛的关注^[12-14]。如能对自组装液晶多层级超结构进行有效的操控，不仅能够获得功能液晶超结构材料、催生新奇物理效应，同时也是研究光与物质相互作用的关键媒介。

2.1 向列相液晶图案化取向操控

向列相液晶是最简单、常见且应用最为广泛的一类液晶材料，分子取向有序而位置无序。因其粘度低，向列相液晶可以在极小的外部刺激作用下发生弹性变形。在正交偏光显微镜下，退平面取向的向列相液晶将呈现纹影织构，由弹性能与其他贡献组成的系统总能量达到最小值决定。

取向是操控液晶微结构的有力手段。传统的摩擦取向技术可以诱导液晶分子沿着特定的单一方向排列，具有稳定性高、可靠性好及适合大面积处理等优点，是显示产业流行的主要技术。但该技术仍存在杂质污染、静电累积、不适用于曲面基板、难以复杂取向等问题。为此，人们不断探索操控液晶取向的新方法，以期获得理想的复杂微结构操控。其中，光控取向技术因其灵活、高效率、高品质、非接触、图案化等优势引起了关注，且适用范围广^[15-17]。其原理是利用光敏材料在紫外线偏振光照射下发生分子取向重排，产生各向异性表面，进而诱导液晶分子定向排列^[18]。我们团队进一步研发了具有自主知识产权的动态无掩膜曝光系统，基于光控取向技术成功制备了包括光栅、透镜在内的一系列新型液晶元件及光场调控器件^[1, 5, 19]。

2.2 手性液晶相螺旋超结构操控

手性液晶相可以通过在液晶分子结构中引入手性中心，或在向列相液晶中掺杂非外消旋的手性材料形成，典型的如胆甾相(cholesteric phase)、蓝相(blue phase)、扭曲晶界相(twist grain boundary phase)等。由手性中心产生分子间力诱导相邻分子层的微小指向矢层内偏转，形成一维手性螺旋结构。描述这种螺旋结构最重要的两个性质

是手性和螺距，其中手性描述了液晶分子沿着螺旋轴的旋转方向，可分为左旋和右旋；而螺距 (pitch, p) 则描绘了指向矢发生 360° 连续扭曲所对应的轴向距离， p 由手性剂的螺旋扭曲能 (helical twisting power, HTP) 与掺杂浓度 $c\%$ 共同决定。凭借液晶分子的螺旋自组装，胆甾相液晶在边界锚定或外场激励的协同调控下，能够产生大规模有序的螺旋超结构，即不仅存在微观分子排列的周期性，也具有介观结构的周期性，呈现多层次组装的特征。

近年来，胆甾相液晶指纹织构在光束控制、光谱扫描、光刻掩模板、光学防伪、涡旋光产生、粒子操控以及可调谐激光等领域展现出了独特的应用潜能，受到了极大的关注^[10, 13, 14]。然而，通过传统摩擦取向等方法制备的指纹螺旋结构存在缺陷多、不可靠等问题，且只能实现简单周期性螺旋结构。对此，我们团队巧妙利用光取向技术操控胆甾相液晶螺旋超结构，实现了对螺旋轴面内指向的任意控制(图 1)^[6]。李全教授团队进一步发展了光对手性液晶螺旋轴指向的三维操纵，并实现了光束衍射点阵和维度的任意光操控^[20]。通过引入变化的温度场和电场，科学家们成功实

现了体系的有序度调控及指纹织构连续旋转。我们团队基于手性分子开关掺杂的光敏胆甾相液晶体系，系统地研究了螺旋超结构的光驱动光栅旋转及周期变化规律，实现了对指纹织构周期和方向的连续操控，总旋转角达 987.8° ^[21]。进一步利用光控取向技术人为诱导分子组装构建精密螺旋结构，利用光刺激增旋/解旋，模拟了细菌鞭毛螺旋式自推进的运动模式，实现了可定制化操纵负载微球的自驱动可编程执行器^[9]。

倾斜螺旋胆甾相液晶 (heliconical CLC, HCLC) 是一种特殊的手性液晶序构材料，虽预测于半个世纪前，直到近年由 Lavrentovich 团队和 Clark 团队在弯曲形液晶二聚化合物中发现^[22, 23]。相比于传统的胆甾相液晶，倾斜螺旋结构在电场作用下具有更宽域的反射带调谐功能。最近，我们与李全教授团队、郑致刚教授团队合作，开发了稳定可靠的光响应倾斜螺旋液晶体系，在电/光联合调控下实现了不同螺旋超结构间的稳定、动态、可逆操控，其布拉格反射光谱的动态调谐范围覆盖了近紫外、可见光到近红外波段^[24]。通过进一步加载空间几何相位，我们还提出相位与波长独立控制的空间光场动态调控方案，有望应用于 AR/VR、全光网络、激光通信等领域^[25]。

蓝相存在于高手性胆甾相与各向同性相之间的极窄温区，液晶分子围绕两个螺旋轴扭曲排列形成柱状结构，并以立方堆积方式构筑产生三维光子晶体。因其极窄频率的光子局域特性，及基于克尔效应的快速电光响应能力，蓝相液晶在下一代快速响应显示、可调激光、平面光学元件、偏振全息技术等领域具有巨大的应用潜力。为攻克蓝相液晶体系位错或旋错缺陷难以控制的问题，团队另辟蹊径，采用光控取向技术实现了任意微晶图案，直观证明了取向控制对晶格指向有序性的决定性影响，并展示了基于微晶图案设计的有前途的光子应用前景^[26]。

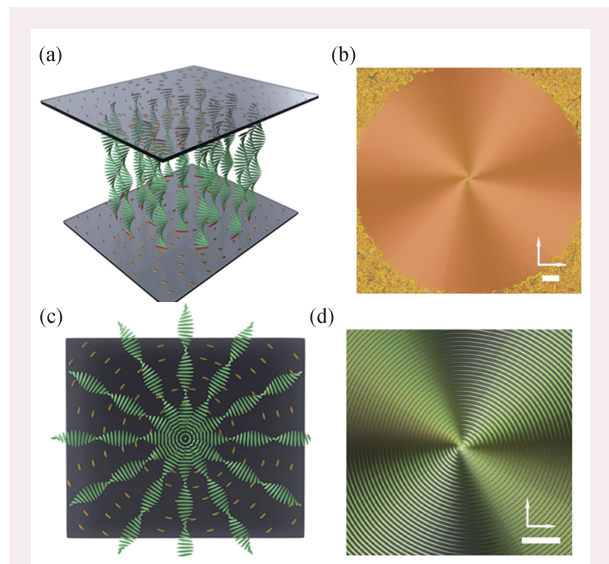


图 1 (a)角向取向诱导构筑平面态螺旋超结构的液晶分子排布示意图；(b)平面态螺旋超结构的织构图；(c)电场诱导构筑阿基米德螺旋型指纹超结构的液晶分子排布示意图；(d)阿基米德螺旋指纹超结构织构图^[6]。图中比例尺为 $50\ \mu\text{m}$

2.3 近晶相液晶拓扑超结构操控

相比于向列相和胆甾相，近晶相液晶有序度更高，具有典型的分层结构特征，层内液晶分子

相互平行，垂直或倾斜于层面排列。当近晶相液晶受到外部刺激，为保持液晶分子层间距恒定，液晶分子层发生较大的展曲形变，形成具有特定排列的液晶拓扑缺陷阵列。在几何上，存在三组典型的缺陷线对：共轭的椭圆与双曲线、共轭的两条抛物线、圆与经过圆心的直线。液晶分子层包裹上述缺陷线对形成不同形态的拓扑缺陷。

焦锥畴是近晶相液晶中典型的拓扑缺陷结构，其研究最为广泛。为获得可满足应用需求的拓扑缺陷阵列，研究人员进行了诸多尝试，发明的操控方法包括：(1)二维界面调控法，即通过不同界面锚定影响畴结构的组装，如Ok等人通过双向摩擦取向调控了焦锥畴阵列的对称性^[27]；(2)三维几何限制结构^[28]，如在微通道或微柱阵列表面诱导生长大小、排列受控的焦锥畴阵列。方法(2)由于液晶与基板的相互作用有所增强，使得对液晶分子层的操控性得到了进一步提升，然而仍存在效率低、操作复杂等问题。为获得更高维度、更高精度操控，我们团队将“自上而下”的图案化取向与“自下而上”的液晶分子组装结合，提出了分子层“折纸术”概念，实现了对近晶相液晶焦锥畴超结构全方位的操控。该类焦锥畴打破了环面焦锥畴固有的旋转对称性，呈现出新颖的偏振依赖不对称衍射现象^[29]。进一步通过对焦锥畴单元大小和朝向的设计，利用焦锥畴微透镜成像功能，实现了对待测物体深度与偏振信息的高效提取，并报道了一种四维可视化成像新技术(图2)^[10]。此外，我们借助光取向锚定奇点阵列设计，还提出了利用液晶拓扑缺陷协同组装液晶分层超结构的新策略，并在较薄液晶膜层中实现了高质量油纹线型畴的灵活操控。通过可编程取向图案的诱导，验证了油纹线型畴的弯折、弯曲、展曲控制，并探究了与弯折角度及弯曲、展曲曲率相关的结构操控规律^[30]。为攻克近晶相液晶动态可调的问题，我们通过聚合物稳定策略以及外场激励，实现了焦锥畴微透镜阵列的动态重构，获得了焦距在40—850 μm 范围内的可调谐^[31]。通过引入光敏手性分子开关，利用表面电致倾斜效应，成功操控了液晶体系的手性强度与分子间极化耦合，实现了光制动油纹线型畴的连续可逆旋转^[32]。上述工

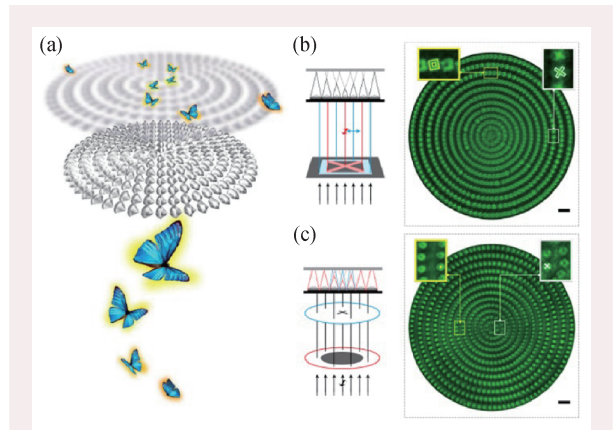


图2 (a)基于受控近晶相液晶焦锥畴阵列的四维可视化成像示意图；(b)目标探测物偏振信息解复用功能示意图(左)及实验结果(右)；(c)目标探测物空间深度信息解复用功能示意图(左)及实验结果(右)^[10]。图中比例尺为20 μm

作的研究将大大推动近晶相液晶拓扑缺陷超结构的实用化进程。

3 基于液晶微结构的光场调控技术

借助微纳加工技术，我们能够精准控制液晶分子倾角/方位角的空间分布，从而灵活操控光场的振幅、相位、偏振等维度。下文将围绕向列相与胆甾相液晶，具体介绍基于液晶微结构的光场调控技术。

3.1 向列相液晶

目前，商用光学器件中使用的液晶大多是棒状的向列相液晶，其指向矢方向可由倾角 θ 和方位角 α 共同描述。当光束垂直入射到液晶层，向列相液晶的寻常光折射率始终为 n_o ，有效非常光折射率 $n_{e,eff}$ 的大小与倾角 θ 相关，取值范围为 $n_o - n_e$ (n_e 为液晶的非寻常光折射率)。由于折射率的差异，o光与e光经过相同的液晶层后，通常会获得不同的附加相位，其中e光相位与液晶倾角 θ 相关。这种由光程引入，与传输介质折射率、厚度紧密相关的相位，称为“动力学相位”。通过改变外加电压，可以控制倾角 θ 在 0° 与 90° 之间连续变化，进而调控e光相位。而通过设计方位角 α 的正交分布，使一部分区域对入射光的折射率为 n_o ，

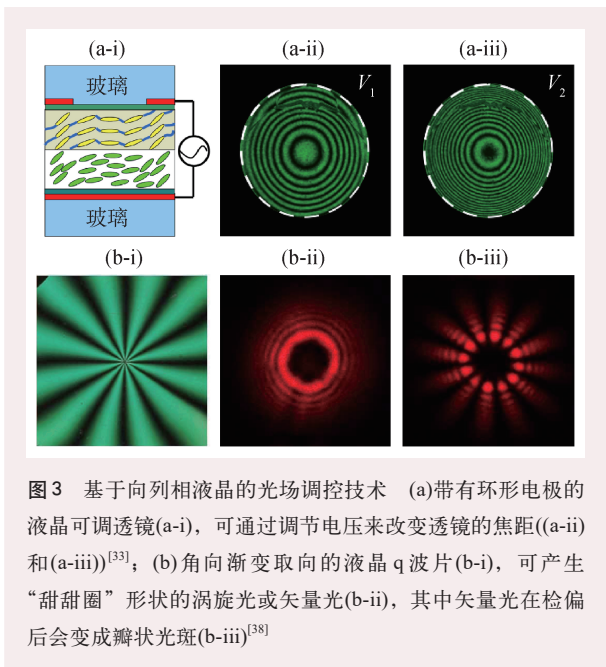


图3 基于向列液晶的光场调控技术 (a)带有环形电极的液晶可调透镜(a-i), 可通过调节电压来改变透镜的焦距((a-ii)和(a-iii))^[33]; (b)角向渐变取向的液晶q波片(b-i), 可产生“甜甜圈”形状的涡旋光或矢量光(b-ii), 其中矢量光在检偏后会变成瓣状光斑(b-iii)^[38]

另一部分为 n_{eff} , 可实现二值相位的空间调制。

基于上述动力学相位原理, 图案化/像素化的电极对不同区域的 n_{eff} 影响程度不同, 能使入射 c 光获得随空间变化的相位分布。例如, Lin 等人利用环形电极, 实现了焦距可电调的液晶透镜^[33](图 3(a))。基于像素电极的液晶空间光调制器可实时、精准地调控空间相位, 目前已得到广泛应用。正交取向液晶无需加工特殊电极, 就能引入图案化的二值相位分布。例如, Chen 等人制成正交取向的液晶达曼涡旋光栅, 实现了涡旋光阵列的产生与调控^[34]。

近年来, 液晶的几何相位成为新的研究热点。与动力学相位不同, 几何相位源于光的自旋轨道耦合, 通常只依赖于传输介质光轴分布的几何特征^[35]。假设向列相液晶层的方位角分布为 $\alpha(x, y)$, 并满足半波条件。左旋、右旋圆偏振光经过液晶层后, 将分别获得几何相位 $+2\alpha(x, y)$ 与 $-2\alpha(x, y)$, 其大小是液晶取向角的两倍, 符号与入射光圆偏振旋性相关。因此, 只要合理设计液晶取向图案, 理论上就能实现任意的空间相位调制。

偏振光栅、几何相位透镜与 q 波片是三种最典型的液晶几何相位元件。其中, 液晶偏振光栅利用线性渐变的取向角, 来为正交圆偏振光引入相反的线性梯度相位, 使它们朝不同方向偏转^[36]。

几何相位透镜的取向角满足径向抛物线关系, 可对一种旋性的圆偏振光起会聚作用, 对另一种起发散作用^[37]。q 波片中的液晶取向呈螺旋形(角向渐变), 能够检测或产生携带螺旋相位的涡旋光以及具有螺旋偏振结构的矢量光^[38](图 3(b))。此外, 结合线形、抛物线形、螺旋形微结构, 还可以制成偏振叉形光栅、涡旋透镜等新颖几何相位元件。2017 年, Chen 等人提出数字化几何相位概念, 即用二值结构对连续几何相位编码, 以实现更丰富的功能^[2]。我们用达曼光栅、圆形达曼光栅、达曼涡旋光栅编码螺旋几何相位, 分别实现了高阶、完美、混合阶庞加莱球光束的动态阵列化调控。Liu 等人用交叠达曼结构编码涡旋透镜相位, 还实现了涡旋光、矢量光三维阵列的灵活操控^[39]。

3.2 胆甾相液晶

手性液晶的分子呈自组装螺旋排列, 典型相态有胆甾相、蓝相、铁电液晶。以胆甾相液晶为例, 其分子沿螺旋轴方向自组装形成螺旋结构, 当螺旋轴垂直于液晶盒表面时, 会表现出手性光子带隙, 即圆偏振选择性的布拉格反射。当入射光的圆偏振旋性和胆甾相液晶手性一致时, 处于布拉格反射带内的入射光将被反射, 其余透射; 而当入射光圆偏振旋性相反时, 入射光将全部透射。

2016 年, 科学家们首次在胆甾相液晶的布拉格反射带隙中发现了几何相位^[40-42], 很快引起关注, 成为软光子学的前沿。胆甾相液晶的反射式几何相位起源于光子自旋轨道耦合。当入射光波长满足布拉格反射条件, λ 值位于 $n_o p - n_e p$ (p 表示螺距, n_o 、 n_e 分别表示寻常光、非寻常光折射率) 之间时, 反射光偏振态与入射光保持一致, 这和镜面反射不同, 意味着入射光改变了其传播方向但保留了偏振态, 所以自旋角动量发生反转, 自旋角动量耦合轨道角动量, 也就带来了几何相位。几何相位的大小与光程无关, 是入射面上胆甾相液晶分子取向角的两倍, 因此, 通过控制液晶表层取向角, 就可以得到 $0 - 2\pi$ 任意大小的几

何相位。得益于自组装螺旋结构，人们只需要设计表层液晶分子取向角的分布，便可以产生需要的宽波段光场。通过光控取向技术可以精准实现点对点液晶分子的锚定，该技术为胆甾相液晶几何相位器件的发展奠定了良好基础。

基于上述原理，Kobashi等人提出了一种反射式光束偏折器^[41]。这种器件具有周期性渐变的液晶取向图案，可实现具有圆偏振选择性的光束偏折^[8](图4)。此外，沿角向渐变的伴随有中心相位奇点的螺旋结构也引起了科学家的关注，可以得到中空的“甜甜圈”状光斑。Chen等人提出了一种新型数字化编码手性结构，实现了涡旋光束的多路并行解复用，有望为宽波段、大容量的通信技术提供新思路^[7]。另一方面，胆甾相液晶的单手性决定了单一圆偏振依赖的几何相位调制，Zhu等人针对这一局限，巧妙设计出双手性共存的液晶超结构，同时对两种圆偏振实现了宽波段、反射式几何相位调制，促进手性软物质光子学的发展与应用^[43]。Yuan等人通过将胆甾相液晶薄膜和镜像对称双扭曲结构的液晶聚合物集成，分别赋予旋性相反的反射光与透射光以不同的相位调制，实现了自旋解耦的透反射空间光调制^[44]。

功能固定而单一的器件，难以灵活满足不同的使用条件和功能需求。因此，人们致力于研制动态的光子学元件。胆甾相液晶具备优良的动态调控特性，其螺旋结构的重要参量——螺距，对力、热、电、磁、光、湿度等外部刺激均有响应，借助特殊功能分子，螺旋手性的可控翻转也可实现。胆甾相液晶为动态光学元件的发展注入了蓬勃活力。胆甾相液晶的热调控具有丰富多样的机理和形式，例如热膨胀、相变、相转移等。Zhang等人利用热响应手性液晶超结构，设计了一种动态选择的光子角动量检测器^[45]。电调控在响应时间上有显著优势。在低频(kHz量级)电场下，由于介电各向异性，液晶分子相应旋转重整，然而，高于临界值的电场将导致螺旋结构塌缩。为了扩大调谐范围，Xu等人利用聚合—洗出一重填工艺，构筑手性液晶聚合物框架，开发了一种工作波段可调的光子轨道角动量并行处理器^[46]。进一步地，他们利用电致倾斜螺旋原理^[24]，实现

了相位与波长独立控制的光场调制^[25]。光调控是一种非接触、高分辨率的手段，其发展得益于光控功能分子和自组装超结构的结合。Chen等人引入偶氮类光敏手性分子，构筑光控手性可翻转的螺旋超结构，获得了一系列动态平面光学元件，工作波段双向连续调谐，而手性翻转带来元件功能的共轭变换^[8]。在此基础上，他们进一步实现了多维度联合编码的动态复用全息技术^[47]。

4 基于液晶的太赫兹器件研究进展

太赫兹(terahertz, THz)波泛指频率在0.1—10 THz (1 THz = 10^{12} Hz)范围内的电磁波，位于微波和红外线之间，具有光子能量低、穿透性高、通信容量大和独特的指纹谱等特性。处于电子学与光子学之间的THz科技，在无损伤检测、生物医学、高速无线通信等领域应用前景广阔。相对于THz源和THz探测器的快速发展，THz功能器件的发展还不够成熟，对器件动态可重构的需求尤为迫切。液晶作为优异的可调控光电功能材料，其介电和光学各向异性覆盖从紫外到微波频段。液晶器件具有无机械移动部件、体积小、重量轻、连续可调等优势，尤其在显示领域积累了大量的技术基础，使得其在THz领域极具应用潜力。近

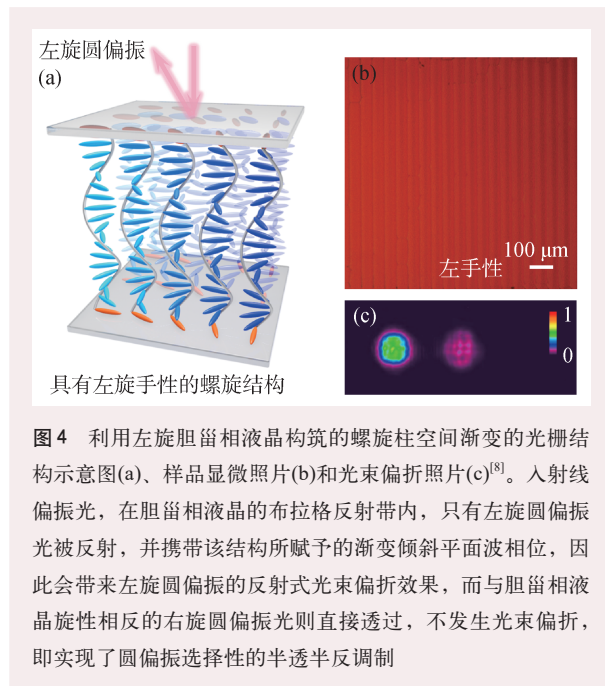


图4 利用左旋胆甾相液晶构筑的螺旋柱空间渐变的光栅结构示意图(a)、样品显微照片(b)和光束偏折照片(c)^[8]。入射线偏振光，在胆甾相液晶的布拉格反射带内，只有左旋圆偏振光被反射，并携带该结构所赋予的渐变倾斜平面波相位，因此会带来左旋圆偏振的反射式光束偏折效果，而与胆甾相液晶旋性相反的右旋圆偏振光则直接透过，不发生光束偏折，即实现了圆偏振选择性的半透半反调制

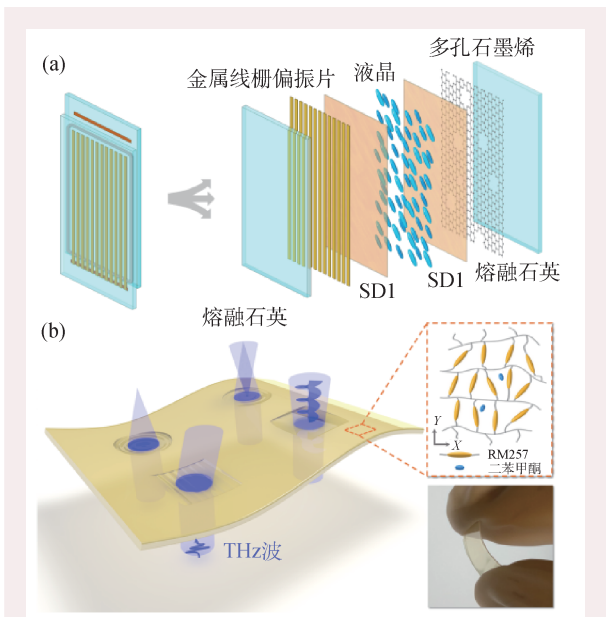


图5 (a)宽带低电压连续可调的THz波片：亚波长金属线栅偏振片为入射面电极，少层多孔石墨烯为出射面电极，光控取向THz波段大双折射液晶材料，其中SD1是偶氮苯磺酸盐染料^[50]；(b)基于光取向液晶聚合物的平面THz光子元件，可实现波束聚焦、偏转、赋形和轨道角动量模式复用等功能(左)，右上图为液晶聚合物的网络结构及有序取向，右下图为液晶聚合物柔性光子器件的可弯曲性展示^[55]

年来基于液晶的可调THz器件研究备受关注。

4.1 传统LC THz器件

常规液晶在THz波段的折射率比较小，如液晶材料5CB，在0.3—1.4 THz范围双折射 Δn 为0.13—0.21；液晶材料K15和E7在0.1—0.35 THz内 Δn 分别约等于0.05和0.08。要想获得足够大的相位延迟，THz波段的液晶层厚度需要和工作波长相近，这样液晶层太厚，会导致LC THz器件响应速度慢和工作电压高等问题。因此，寻找THz波段大双折射液晶材料是需要首先解决的问题。2012年，我们与清华大学梁晓教授研究组合作，设计制备了一种THz波段大双折射液晶材料，具体以氟化二苯乙炔衍生物为主要成分，是最早报道的在THz波段 $\Delta n > 0.3$ ，且温宽达到实用要求的混合液晶材料^[48]。随后，Reuter等人报道了两种液晶混合物1852和1825，在0.2—2.5 THz， Δn 最大分别为0.32和0.38，但其吸收系数随THz频率

变化明显^[49]。

在所有驱动液晶的机制中，电调LC THz器件由于其易集成和高可靠性，最具吸引力，但在可见光波段工作的透明电极ITO，在THz波段不再透明。2015年，少层多孔石墨烯被用于THz波段透明电极，其在0.5—2.5 THz透过率高达98%以上，且面电阻较小，无偏振依赖特性，这样就解决了长期以来阻碍LC THz器件发展的两个基本问题。我们结合亚波长金属线栅偏振电极，驱动被光控取向的上述THz波段大双折射液晶材料，设计了一种宽带低电压连续可调的THz波片，如图5(a)所示，通过构造双层液晶盒的方案，工作带宽进一步增大，工作电压进一步减小，实现了真正高效实用的超宽带可调波片^[50]。随后，Sasaki等人也用石墨烯电极驱动随机取向的液晶，实现了任意偏振态THz波的相位延迟^[51]。以上LC THz器件是透射式的。2017年，一种基于亚波长金属线栅的反射式电控宽带可调LC THz波片被设计实现^[52]。对于给定的相位差，反射式波片所需液晶层厚度约为透射式的1/10；同样液晶层厚度下，相位差动态可调范围约是透射式的2倍。

随着光控取向技术的不断发展，基于DMD系统，2017年成功制备了LC THz q波片，实现了不同拓扑荷的THz涡旋波，这是国际上首次报道的利用LC产生和调制THz涡旋^[53]。在此基础上，我们又研发了一种LC THz叉形偏振光栅，为THz涡旋的产生和分离提供了一种简单实用的方法。进一步，在THz波段引入几何相位的概念，设计棋盘型空间复用的透镜相位模板，利用光控取向液晶技术制备了THz平面透镜，对于入射的左右旋圆偏振THz光实现了宽波段内自旋选择性聚焦，上下基板上的石墨烯透明电极驱动液晶，验证了聚焦的电控可开关特性^[54]。针对液晶器件基板带来的反射损耗大等问题，我们提出了一种全新的基于光控取向液晶聚合物的平面THz光子元件设计方案。首先将几何相位信息写入液晶取向中，再通过紫外光聚合就能得到特定功能的THz波前调制元件，具有柔性自支撑、机械形变可调、稳定性良好等优势。我们设计了多种THz光子元件，如波片、光束偏折器、透镜、贝塞尔以及涡旋光

产生器，如图 5(b)所示，完成了一系列适用于 THz 无线通信的基本功能验证，包括：偏振控制、波束偏转、波束赋形和轨道角动量模式复用等^[55]。

4.2 结合超材料的 LC THz 器件

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)，是操控电磁波的理想平台，尤其在 THz 波段，自然界尚无特别高效的材料来操控 THz 波。金属超材料既可设计成各种功能器件又可作为电极驱动液晶，同时超材料的亚波长局域场增强特性，可使液晶层厚度大大减小，基于液晶的 THz 可调超材料器件响应速度会显著提高，驱动电压会明显降低。2013 年，Padilla 等人首次设计实现了一种基于液晶的可调 THz 超材料吸收器，但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%^[56]。我们创造性地把少层多孔石墨烯 THz 透明电极铺在金属超材料表面上，设计了一种不同臂长的十字架型 THz 超材料吸收器，实现了高性能的宽带可调^[57]。谐振频率范围为 0.75 — 1 THz，且具有较高的品质因子，振幅可调范围在 80% 左右，最大工作电压只需 10 V。基于这种超材料/石墨烯复合电极概念，一种透射式对线偏振方向敏感的法诺共振型超表面器件，结合电控液晶偏振旋转器，实现了 660 GHz 的宽波段内超过 50% 的大调制深度^[58]。利用亚波长线栅作叉指电极，基于液晶的可调 THz 超材料多功能器件被设计实现^[59]。在透射模式下可实现类电磁诱导透明效应的谐振滤波功能，频率调谐范围 60 GHz，在 1.27 THz 可获得 37% 的调制深度；在反射模式下可实现动态吸波功能，频率调谐范围 50 GHz，在 1.08 THz 可获得 81% 的调制深度。液晶层厚度仅为 5 μm ，可实现 2.4 ms 的快速响应。

针对 THz 金属超材料器件损耗较大的问题，可以设计集成石墨烯透明电极的可调液晶介质超材料

THz 器件。我们提出了一种具有宽带色散可控功能的 THz 超透镜，如图 6(a)所示，集成了光控取向液晶畴的几何相位和介质超表面的谐振相位。不加电时，可实现 0.9 — 1.4 THz 频段范围内焦距为 15.0 mm 的宽带消色差聚焦效果；当在石墨烯电极上对液晶层施加饱和电压时，液晶的几何相位调制消失，透镜呈现色散聚焦特性，透镜焦距随频率增大显著减小^[11]，还可设计实现色散可调的 THz 波束偏折器。通过像素化电控液晶单元，可形成对超材料特定区域的局部调控，实现 THz 空间波前调制的效果，在成像等领域具有应用潜力。如图 6(b)所示，Li 等人设计了一种基于液晶的 THz 超材料空间光调制器，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^[60]。

5 结束语

从简单结构到多层级超结构，从简单光场到复杂结构光场，从静态功能到动态功能，从单一波长到宽带高效，液晶光学正朝着多样化、多功能、多维度调控的方向发展。这不仅是基础研究的前沿，也具有广阔的应用前景。首先，由于多层级组装过程的多样性和复杂性，在微观层面会衍生出丰富多样的结构类型。多层级结构及其跨尺度传递特性有望给软物质凝聚态物理学提供新

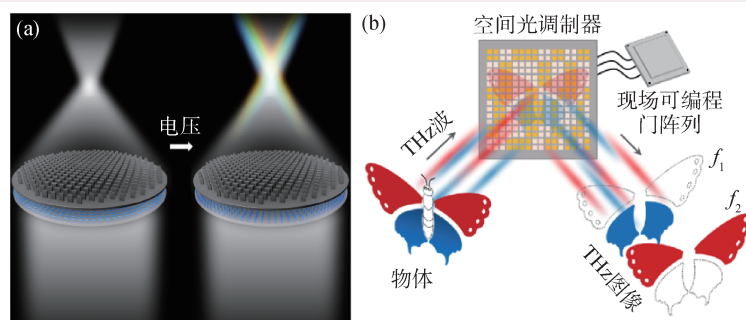


图 6 (a)宽带色散可调 THz 介质超透镜，不加电时，可实现宽带消色差聚焦(左)，当在石墨烯电极上施加饱和电压时，透镜呈现色散聚焦特性(右)^[11]；(b)基于液晶超材料空间光调制器的双色 THz 压缩感知成像，当施加电压偏置后，工作谐振频点发生了约 20 GHz 的频率偏移，两个谐振频点(f_1 和 f_2)的反射和吸收状态恰好相反，调制深度均大于 70%^[60]

颖的研究课题。其次,由于液晶中特征结构的尺度和光波长可以比拟,通过功能单元及其空间序构的设计,催生了多维光子的并行调控,可实现光子偏振、方向、角动量、波长等的多维度正交、高效调制。我们相信,液晶“软光子”学必将在

新型显示成像、柔性光电器件、光场时空调控、量子信息技术等领域发挥越来越大的作用。

致谢 感谢胡伟、陈鹏、马玲玲、王磊、徐春庭等人在文章撰写过程中提供的帮助。

参考文献

- [1] Wu H, Hu W, Hu H C *et al.* *Opt. Express*, 2012, 20: 16684
- [2] Chen P, Ge S J, Duan W *et al.* *ACS Photonics*, 2017, 4: 1333
- [3] Chen P, Wei B Y, Ji W *et al.* *Photonics Res.*, 2015, 3: 133
- [4] Wei B Y, Chen P, Hu W *et al.* *Sci. Rep.*, 2015, 5: 17484
- [5] Wei B Y, Hu W, Ming Y *et al.* *Adv. Mater.*, 2014, 26: 1590
- [6] Ma L L, Li S S, Li W S *et al.* *Adv. Opt. Mater.*, 2015, 3: 1691
- [7] Chen P, Ma L L, Duan W *et al.* *Adv. Mater.*, 2018, 30: 1705865
- [8] Chen P, Ma L L, Hu W *et al.* *Nat. Commun.*, 2019, 10: 2518
- [9] Ma L L, Liu C, Wu S B *et al.* *Sci. Adv.*, 2021, 7: eabh3505
- [10] Ma L L, Wu S B, Hu W *et al.* *ACS Nano*, 2019, 13: 13709
- [11] Shen Z X, Zhou S H, Li X A *et al.* *Adv. Photonics*, 2020, 2: 036002
- [12] Ma L L, Hu W, Zheng Z G *et al.* *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7: 1900393
- [13] Ma L L, Li C Y, Pan J T *et al.* *Light Sci. Appl.*, 2022, 11: 270
- [14] 曹慧敏, 吴赛博, 王靖阁 等. 液晶与显示, 2021, 36: 921
- [15] Ge S J, Ji W, Cui G X *et al.* *Opt. Mater. Express*, 2014, 4: 2535
- [16] Lin X W, Hu W, Hu X K *et al.* *Opt. Lett.*, 2012, 37: 3627
- [17] Srivastava A K, Hu W, Chigrinov V G *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101: 031112
- [18] Akiyama H, Kawara T, Takada H *et al.* *Liq. Cryst.*, 2002, 29: 1321
- [19] Hu W, Srivastava A, Xu F *et al.* *Opt. Express*, 2012, 20: 5384
- [20] Zheng Z G, Li Y N, Bisoyi H K *et al.* *Nature*, 2016, 531: 352
- [21] Ma L L, Duan W, Tang M J *et al.* *Polymers*, 2017, 9: 295
- [22] Borshch V, Kim Y K, Xiang J *et al.* *Nat. Commun.*, 2013, 4: 2635
- [23] Chen D, Porada J H, Hooper J B *et al.* *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2013, 110: 15931
- [24] Yuan C L, Huang W B, Zheng Z G *et al.* *Sci. Adv.*, 2019, 5: eaax9501
- [25] Xu C T, Liu B H, Peng C *et al.* *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10: 2201088
- [26] Zhou K, Bisoyi H K, Jin J Q *et al.* *Adv. Mater.*, 2018, 30: 1800237
- [27] Ok J M, Kim Y H, Jeong H S *et al.* *Soft Matter*, 2013, 9: 10135
- [28] Honglawan A, Beller D A, Cavallaro M *et al.* *Adv. Mater.*, 2011, 23: 5519
- [29] Ma L L, Tang M J, Hu W *et al.* *Adv. Mater.*, 2017, 29: 1606671
- [30] Wu S B, Ma L L, Chen P *et al.* *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8: 2000593
- [31] Wu J B, Wu S B, Cao H M *et al.* *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10: 2201015
- [32] Wu S B, Cao H M, Wu J B *et al.* *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10: 2102754
- [33] Lin H C, Lin Y H. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98: 083503
- [34] Chen P, Ge S J, Ma L L *et al.* *Phys. Rev. Appl.*, 2016, 5: 044009
- [35] Chen P, Wei B Y, Hu W *et al.* *Adv. Mater.*, 2020, 32: 1903665
- [36] 袁方, 谭庆贵, 王光耀 等. 液晶与显示, 2022, 37: 1411
- [37] Kim J, Li Y, Miskiewicz M N *et al.* *Optica*, 2015, 2: 958
- [38] Slussarenko S, Murauski A, Du T *et al.* *Opt. Express*, 2011, 19: 4085
- [39] Liu S J, Chen P, Ge S J *et al.* *Laser Photonics Rev.*, 2022, 16: 2200118
- [40] Barboza R, Bortolozzo U, Clerc M G *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117: 053903
- [41] Kobashi J, Yoshida H, Ozaki M. *Nat. Photonics*, 2016, 10: 389
- [42] Rafayelyan M, Tkachenko G, Brasselet E. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116: 253902
- [43] Zhu L, Xu C T, Chen P *et al.* *Light Sci. Appl.*, 2022, 11: 135
- [44] Yuan R, Xu C T, Cao H *et al.* *Adv. Sci.*, 2022, 9: 2202424
- [45] Zhang Y H, Chen P, Xu C T *et al.* *ACS Photonics*, 2022, 9: 1050
- [46] Xu C T, Chen P, Zhang Y H *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 118: 151102
- [47] Chen P, Shen Z X, Xu C T *et al.* *Laser Photonics Rev.*, 2022, 16: 2200011
- [48] Wang L, Lin X W, Liang X *et al.* *Opt. Mater. Express*, 2012, 2: 1314
- [49] Reuter M, Vieweg N, Fischer B *et al.* *APL Mater.*, 2013, 1: 012107
- [50] Wang L, Lin X W, Hu W *et al.* *Light Sci. Appl.*, 2015, 4: e253
- [51] Sasaki T, Noda K, Kawatsuki N *et al.* *Opt. Lett.*, 2015, 40: 1544
- [52] Wang L, Ge S J, Hu W *et al.* *Opt. Mater. Express*, 2017, 7: 2023
- [53] Ge S J, Chen P, Shen Z X *et al.* *Opt. Express*, 2017, 25: 12349
- [54] Shen Z X, Zhou S H, Ge S J *et al.* *Opt. Express*, 2019, 27: 8800
- [55] Shen Z X, Tang M J, Chen P *et al.* *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8: 1902124
- [56] Shrekenhamer D, Chen W C, Padilla W J. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 177403
- [57] Wang L, Ge S J, Hu W *et al.* *Opt. Express*, 2017, 25: 23873
- [58] Shen Z X, Zhou S H, Ge S J *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 114: 041106
- [59] Shen Z X, Zhou S H, Ge S J *et al.* *Opt. Lett.*, 2018, 43: 4695
- [60] Li W L, Hu X M, Wu J B *et al.* *Light Sci. Appl.*, 2022, 11: 191