

文章编号:1007-2780(2023)08-1022-09

基于双层液晶功能膜的多维防伪技术

王芳¹, 袁丛龙², 王翼飞¹, 沈冬², 王骁乾^{2*}, 郑致刚^{1,2*}

(1. 华东理工大学材料科学与工程学院, 上海 200237;

2. 华东理工大学物理学院, 上海 200237)

摘要: 防伪与伪造之间的矛盾日益加深, 研发保密性强、安全性高、不可复制的防伪技术已成为社会与经济迫切需求。在此背景下, 液晶防伪技术因其性能优异、实用性高、广受市场好评而成为备受关注的领域。然而, 现有的防伪技术层次结构不够丰富, 隐藏图文颜色单一, 因此, 本研究提出了一种双信息防伪层的器件结构, 由宾主液晶防伪膜层和胆甾相液晶防伪膜层组成, 每层包含不同的信息内容。通过不同的光照模式, 可以获得不同的显示内容, 从而达到了多维防伪的效果。相较于传统单层宾主液晶防伪膜层, 该设计具有与偏振相关的透反射差异和在透射方向上不对称的光响应特点。使用这种易制备的防伪膜层叠加设计不仅提高了防伪码的安全水平, 还降低了应用成本。

关键词: 宾主液晶; 二色性染料; 胆甾相液晶; 防伪; 光配向

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2023-0128

Multidimensional anti-counterfeit technology enabled by a double-layered functional liquid crystal film

WANG Fang¹, YUAN Cong-long², WANG Yi-fei¹, SHEN Dong²,
WANG Xiao-qian^{2*}, ZHENG Zhi-gang^{1,2*}

(1. School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology,
Shanghai 200237, China;

2. Department of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The contradiction between counterfeiting and forgery is deepening, and the development of counterfeiting technology with strong confidentiality, high security, and non-reproducibility has become an urgent need for social and economic development. In this context, liquid crystal anti-counterfeiting technology has become an area of great interest due to its excellent performance, high practicality, and

收稿日期: 2023-04-06; **修订日期:** 2023-04-23.

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2022YFA1203700); 国家自然科学基金 (No. 61822504, No. 62275081, No. 51873060, No. 62035008); 上海市教育委员会, 上海市科技创新计划重大项目 (No. 2021-01-07-00-02-E00107); 上海市教委, 上海教育发展基金会曙光计划 (No. 21SG29)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFA1203700); National Science Foundation of China (No. 61822504, No. 62275081, No. 51873060, No. 62035008); Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission, Scientific Committee of Shanghai (No. 2021-01-07-00-02-E00107); "Shuguang Program" of Shanghai Education Development Foundation, and Shanghai Municipal Education Commission (No. 21SG29)

*通信联系人, E-mail: xqwang@ecust.edu.cn; zgzheng@ecust.edu.cn

wide market appreciation. However, the existing anti-counterfeiting technology is not rich enough in hierarchy, and the hidden graphic is only one color. Therefore, this study proposes a device structure with a dual information security layer consisting of a guest-host liquid crystal anti-counterfeiting film layer and a cholesteric liquid crystal anti-counterfeiting film layer, each layer containing different information content. Through different light patterns, different display contents can be obtained, thus achieving a multi-dimensional anti-counterfeiting effect. The design features polarization-related transmission-reflection differences and an asymmetric light response in the transmission direction compared to conventional single-layer guest-host liquid crystal anti-counterfeit film layers. The use of this easily prepared anti-counterfeit film layer overlay design not only improves the security level of the security code but also reduces the cost of application.

Key words: guest-host liquid crystal; dichroic dyes; cholesteric liquid crystal; anti-counterfeit; photoalignment

1 引言

防伪技术是一种旨在辨识真伪、防止仿冒和克隆的技术手段。如今,商品仿冒已成为全球范围内影响多个行业的难题,包括医药、消费电子、时尚快消和奢侈品等。假冒商品的泛滥会导致合法企业利润的损失,破坏品牌声誉,失去市场份额,同时也会对消费者的健康和安全造成严重威胁。因此,采用防伪技术以检测和预防假冒产品显得尤为重要。防伪技术的有效性取决于所采用技术的复杂度和先进性。目前,已开发出多种防伪技术,如全息图、射频识别(RFID)标签、水印和二维码(Quick Response, QR)等^[1-8]。虽然这些技术可以提升安全性,但仍然存在一些挑战和限制,例如获取方式复杂,实施成本潜在高昂,同时目标物易于被仿造。因此,开发和采取有效的防伪解决方案需要持续的研究和创新以保持技术领先,始终赢得制假者的先机。

液晶(Liquid crystal, LC)由于其独特的电光特性、优越的外场响应性、独特的偏振状态、直观可见性、高度灵活性和低成本等特点,成为先进防伪技术的优秀候选材料。其中,胆甾相液晶或手性向列相液晶材料(Cholesteric liquid crystal, CLC)因具有螺旋状的分子排列;形成周期为几百纳米的螺旋超结构,并呈现独特的结构反射色^[9]。近年来,越来越多的研究探索了液晶材料在防伪技术中的潜力。Shi等人报道了将光氟吡喃和锌离子纳入到CLC中,实现了多模式光信号的可逆转换,易于肉眼识别,从而提高了材料和器件的防伪级别^[10]。Zheng等人基于内源手性可控光开关,通过

光动态图案化编程手段,实现了防伪功能的颜色可调、可擦除和视角差异性^[11]。Gao等人开发并制备了含有侧链液晶聚合物与低分子量液晶的液晶混合物,并通过同时引入共存的光或热聚合物分散网络,制备了具有明显光学开关模式的液晶复合膜层,提高了膜层的强度和韧性,从而制备了一种利用温度响应特性检测防伪的标签^[12]。Sun等人报道了具有近晶相结构的杂化二氧化硅薄膜,合成了具有近晶相液晶的防伪薄膜,并利用薄膜表面的纳米颗粒的光散射特性和薄膜内部的选择性布拉格反射特性,实现了可以在倾斜视图下观察到颜色图案而垂直视图下无法观察到颜色图案的特性,在防伪领域具有很好的前景^[13]。尽管基于液晶功能材料的防伪技术具有明显的优势和丰富的潜力,但在多重安全性、易于检测性和偏振响应性等方面仍面临挑战。

二色性染料是一类具有独特明显光学效应的有机分子,具有吸收平行于分子长轴方向的偏振光而保留垂直于分子长轴偏振光通过的能力^[14]。当二色性染料溶解在向列相液晶之中后,形成宾主液晶(Guest-host liquid crystal, GHLC)。通过控制主体向列相液晶的排列而具有控制透射光偏振和强度的能力,在显示应用、光子技术及防伪等领域展示了独特的魅力^[15-16]。本文设计了内嵌图案化GHLC和CLC的双层功能化的液晶防伪器件。这种独特的构造赋予了器件特殊的透射/反射差异、偏振依赖的隐藏/显露属性以及在透射方向上的不对称光学效应,从而实现多维防伪显示。它将促进和升级现有的液晶防伪技术,并在信息加密^[17-18]、信息存储^[19]和无源显示^[20]等方向

启发新思路和新应用。

2 实 验

2.1 材料

GHLC由质量分数为95.2%的商用向列相液晶E7(南京慕润新材料科技公司)和4.8%的二色性染料Black X13(德国BASF)配置而成。胆甾相液晶由质量分数为97.1%的商用向列相液晶XH1010(烟台显华化工科技有限公司)和2.9%的手性掺杂剂R5011(江苏和成显示科技有限公司)配置而成。混合液晶在100℃下搅拌1h以上,然后通过毛细管注射到液晶盒中,随后缓慢冷却到室温。

2.2 液晶盒制备

玻璃基板使用超声清洗和紫外线臭氧清洗。磺胺偶氮染料SD1(Dai-Nippon Ink and Chemicals, Japan)溶于N,N-二甲基甲酰胺中,质量分数为0.5%。制备光学取向层时,在500 r/s的低速下旋涂5s,在3000 r/s的高速下旋涂30s,并在100℃下加热10min进行高温烘干,以便将溶液中溶剂去除干净。使用8μm厚的边框胶胶带将两块玻璃基板对合并粘结在一起,使用环氧树脂密封,制成液晶盒。

2.3 双层多功能防伪器件制备

在制备过程中,分别将CLC层和GHLC层填充所需的液晶盒1和液晶盒2,分别将液晶盒1、2放在数字微镜设备(Digital Micro-mirror Device, DMD)的二维移动平台上进行光聚焦。在液晶盒1中,设计了“箭头指向”图形,其中“箭头指向”为曝光区域,周边为非曝光区域,如图1(a)

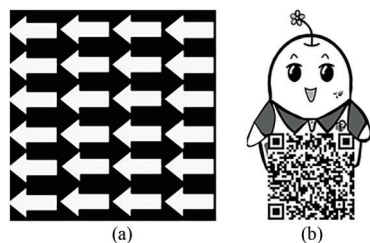


图1 (a)胆甾相液晶层取向图形;(b)宾主液晶层取向图形。

Fig.1 (a) Pattern of the cholesteric liquid crystal layer orientation; (b) Pattern of the guest-host liquid crystal layer orientation.

所示。在液晶盒2中,设计了4种不同取向区域的“小花梨”曝光图形,如图1(b)所示。使用毛细管分别向置于加热台上的液晶盒1与液晶盒2中灌入CLC和GHLC。冷却降至室温,将两个液晶盒使用光学胶粘合,制成双液晶层防伪器件。

2.4 特征分析

材料的透反射光谱由偏振光学显微镜((LVPOL 100, Nikon)的光纤连接光谱仪(ULS2048, Avantes)记录。

3 结果与讨论

3.1 材料体系性能

CLC层的反射光谱如图2(a)所示。手性剂R5011的质量分数在实验中优化为2.9%,其反射色呈现蓝色,反射波段介于450~500nm范围。红色曲线代表CLC在曝光区域的反射光谱,其平均反射率约为39.67%;蓝色曲线则是CLC在未曝光区域的反射率,其对应平均反射率约为11.17%。这是由于非取向区域的CLC排列有序度较低,从而导致相对较低的反射率。图2(b)显示了GHLC层不同灰度区域对应的透射光谱。GHLC材料的吸收波段在400~700nm整个可见光波段。灰度区域1对应的液晶分子取向角为0°,呈现最低的光谱透过率,在波长400~700nm范围内,平均透过率为0.49%;灰度区域2、3和4分别对应的液晶分子取向角为30°,60°,90°,光谱透过率由低变高。当液晶分子取向角为90°时,呈现最高的光谱透过率44.69%,表现出良好的二色性吸收能力。GHLC层的光谱二色性透过率的消光比(Extinction ratio, ER)可依据公式(1)计算:

$$ER = \frac{T_{//}}{T_{\perp}}, \quad (1)$$

其中: $T_{//}$ 表示入射光偏振态与GHLC分子取向方向平行时的透射率, T_{\perp} 表示入射光偏振态与GHLC分子取向方向垂直时的透射率。实验测得在波长400~700nm范围内,当厚度为8μm时,GHLC层表现出较高的二色对比度,即 $ER=91.20$ 。

3.2 多重防伪器件结构设计

为实现多维防伪的功能,本文提出了一种液晶防伪器件的结构设计,主要由图案化的CLC层和GHLC层构成,如图3所示。这两层膜层均

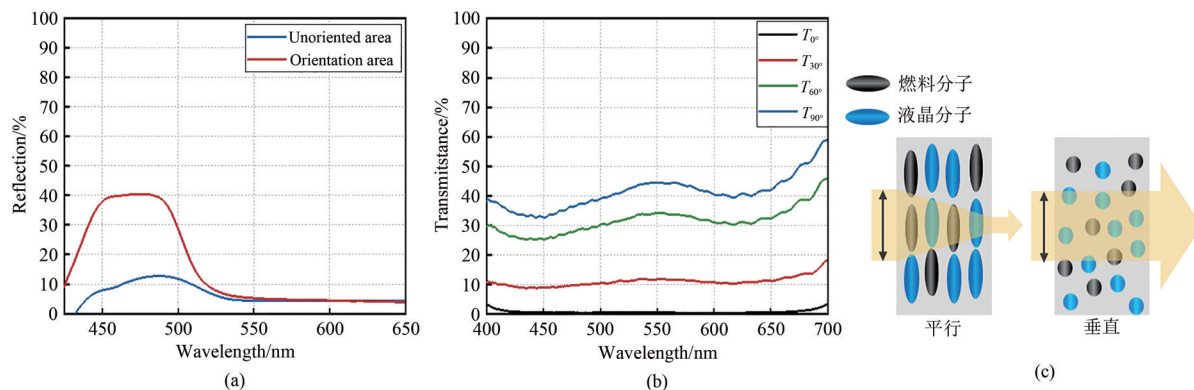


图 2 (a)掺杂质量分数为 2.9% 的 R5011 的胆甾液晶反射光谱,红色曲线和蓝色区间分别代表胆甾相液晶在 SD1 取向区域和非取向区域对应的反射光谱;(b)掺杂质量分数为 4.8% 的二色性染料的宾主液晶在不同线偏振方向入射情况下的透射光谱,图例中的角度代表入射线偏振光的偏振方向与宾主液晶排列长轴方向的夹角;(c)宾主液晶体系的二色性吸收原理示意图,黑色箭头代表入射光的偏振方向。

Fig. 2 (a) Reflection spectra of cholesteric liquid crystal doped with 2.9% (mass fraction) R5011, the red curve and blue interval represent the corresponding reflection spectra of cholesteric liquid crystal in the SD1 oriented region and non-oriented region respectively; (b) Transmission spectra of guest-host liquid crystal doped with 4.8% (mass fraction) dichroic dye in the case of incident light in different line polarization directions, the angles in the legend represent the angle between the polarization direction of the incident polarized light and the direction of the long axis of the guest-host liquid crystal arrangement; (c) Schematic diagram of the dichroic absorption principle of the guest-host liquid crystal system, the black arrows represent the polarization direction of the incident light.

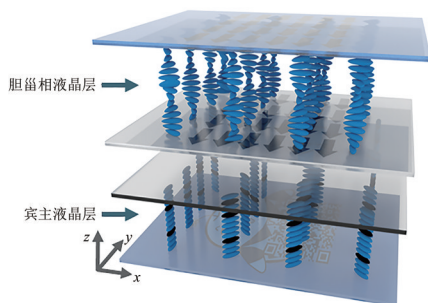


图 3 多维防伪器件的液晶膜层结构设计。上膜层为胆甾相液晶层,下膜层为宾主液晶层。黑色代表二色性染料分子,蓝色代表液晶分子,“小花梨”中不同灰阶区域表示液晶分子取向方向不同。

Fig. 3 Schematic of the liquid crystal based multi-dimensional anti-counterfeiting device. The upper layer is the cholesteric liquid crystal layer, and the lower layer is the guest-host liquid crystal layer. The black colour represents the dichroic dye molecules, the blue colour represents the liquid crystal molecules, and the different grey scale areas in the “small pear” indicate the different orientation of the liquid crystal molecules.

包含预先设计的独立图形信息。其中,CLC 层设计尺寸为 1 cm×1 cm 的“箭头指向”形状,结构

简单、易分辨。该图形可以很好地覆盖 GHLC 层所设计的图形,起到隐藏第二层防伪图形的效果。当入射光照射到 CLC 层后,呈现明显的蓝色反射图形。GHLC 层内嵌了“小花梨”图形,该图形由 0°,30°,60°,90° 4 个图形化液晶取向方位角构成。当入射光为线偏振光时,不同取向区域内 GHLC 的方位角对应差异化的二色性吸收与透过,宏观上显示出不同灰阶的预设图形。

该双层功能化液晶层的防伪器件设计具有独特的优势:(1) CLC 层具有独特的结构色与取向差异。通过调整手性剂浓度,可以改变 CLC 螺距,从而对应不同的反射波段。自然光下透过防伪器件,可以形成不同反射颜色的反射图形。GHLC 层信息可作为信息隐蔽层,在自然光下隐藏,仅在线偏振观察下显现。(2) GHLC 层中的二色性染料由多种染料混合制备,对应吸收光谱,GHLC 存在宽波段选择性吸收,在自然光下呈现黑色。这一特点可以作为第二层防伪层,同时也可以作为 CLC 层防伪图形的衬底,提升 CLC 层的反射视觉效果。(3) CLC 层与 GHLC 层具有明显的透反射差异。在可见光反射模式下,可以观

测到 CLC 层单层图形信息;在线偏振光透射模式下,可观测到 GHLC 层单层信息。通过不同光照模式,可以识别出不同的图形结果,实现多维防伪的效果。

3.3 自然光下的透、反防伪信息显示

该防伪器件在不同膜层顺序下呈现出透、反射显示差异化。如图 4(a)所示,当自然光入射至 CLC 层后,在反射端呈现出交替的蓝色“箭头”图形。这是由于液晶单元沿着非偏振光的传播方向进行排列,CLC 层独特的螺旋周期结构导致的布拉格反射色^[21]。其中,取向区域位置的 CLC 排列有序,呈现明显的蓝色的高反射,而非取向区域的 CLC 则表现为低反射,在 GHLC 背景层作用下呈现黑色。如图 4(b)所示,在透射方向上,由于下方 GHLC 层的宽波段光吸收,整体呈现均匀的灰色,其内嵌防伪图形被隐藏。当入射光首先经过 GHLC 层时,光被 GHLC 层的染料分子吸收,在反射端仅呈现黑色,如图 4(c)所示。在透射方向上,光被 GHLC 膜层吸收,GHLC 层信息同样被隐藏。在此情况下,该器件的防伪信息图形整体被遮蔽,如图 4(d)所示。不同的膜层顺序导致了不同的透反射显示差异,这一特点可

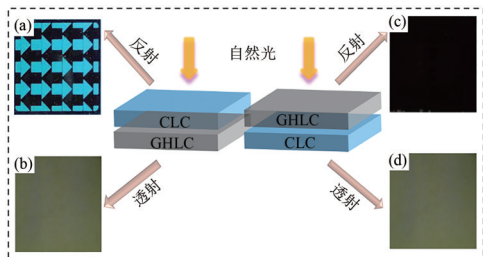


图 4 防伪器件在不同的膜层顺序下呈现出的透、反射显示差异化。(a、b)上膜层为胆甾液晶层,下膜层为宾主液晶层时,自然光下的透、反射信息显示;(c、d)上膜层为宾主液晶层,下膜层为胆甾液晶层时,自然光下的透、反射信息显示。

Fig. 4 Differentiation of transmittance and reflection display under different film layer order of the anti-counterfeiting device. (a, b) Transmissive and reflective information display under natural light when the upper film layer is the cholesteric liquid crystal layer and the lower film layer is the guest-host liquid crystal layer; (c, d) Transmissive and reflective information display under natural light when the upper film layer is the guest-host liquid crystal layer and the lower film layer is the cholesteric liquid crystal layer.

以用来增强防伪效果。

3.4 线偏振光下的透、反防伪信息显示

虽然在自然光下 GHLC 层中的防伪图形被隐藏,但该图形可在线偏振光入射条件下显示图形,并展示出独特的光学特性,包括灰度和色彩变化。该显示效果与偏振光的入射方向相关。线偏振入射条件下, GHLC 层相当于图形化的偏振器。当 GHLC 层灰阶区域对应的液晶分子取向方位角相对于入射光偏振方向平行时,光吸收系数最高,透过率最低,呈最深颜色——黑色。同理,当液晶分子取向角相对于线偏光角度为 45° , 90° , 135° 时,对应灰阶区域内的液晶吸收系数不同,从而呈现不同灰度的变化。由于 CLC 层的圆偏振响应, CLC 层的布拉格反射对应曝光取向区域,只会反射约为 39.67% 的 450~500 nm 范围内的部分波长光,其他波长的光不会被反射,会继续透过 GHLC 层。对应未曝光区域,只会反射约为 11.17% 的 450~500 nm 范围内的部分波长光。因此,经过 CLC 层的出射光光强会降低一些,但整体影响不大,不会引起整体经过 GHLC 层的透过率降低 50%,不影响透射方向上的图像显示。因此,依据预先设定的 GHLC 分子角向排列,最终会呈现四灰度的光学图形,如图 5(a)~5(d)所示。为了增强防伪器件的能力,我们在防伪图中还嵌入了预先设定的二维码信息,可方便地通过智能手机扫描进一步获得更多信息。

如图 5(e)~5(h)所示,当线偏振光先透过 CLC 层后透过 GHLC 层时,展示出彩色的图形效果。此时, CLC 层作为蓝光波段的圆偏振陷波滤波器。对于同反射波段入射光经过 CLC 层时,选择性反射圆偏光,同旋性的右旋圆偏振光被反射,反旋性的左旋圆偏振光透射^[22]。经过 CLC 层的左旋圆偏振光可视为两个偏振方向不同、振幅大小一致的正交线偏振光叠加。当不同偏振方向的线偏振光经过 GHLC 层时,液晶分子对光的偏振方向与振幅进行调制,出射光的偏振状态发生变化,导致光的相位差发生变化。同时,对应“小花梨”中不同液晶分子方位角区域,二色性染料吸收轴不同会发生不同程度的吸收,选择性地改变光谱强度,从而呈现具有颜色差异图形,因此“小花梨”呈彩色。

如图 6(a)所示,搭建光路测试入射光的波长不在布拉格反射波段的线偏振光经过上膜层为 GHLC 层,下膜层为 CLC 层时的双液晶防伪器件对应的出射光种类。图 6(b)的测试结果表明,

旋转偏振片 2,出射光光强发生强弱变化,透过 CLC 层的出射光为椭圆偏振光。椭圆偏振光也可以看作是两个振幅不同的正交线偏振光的叠加,于是可以将椭圆偏振光沿着 GHLC 层的平行

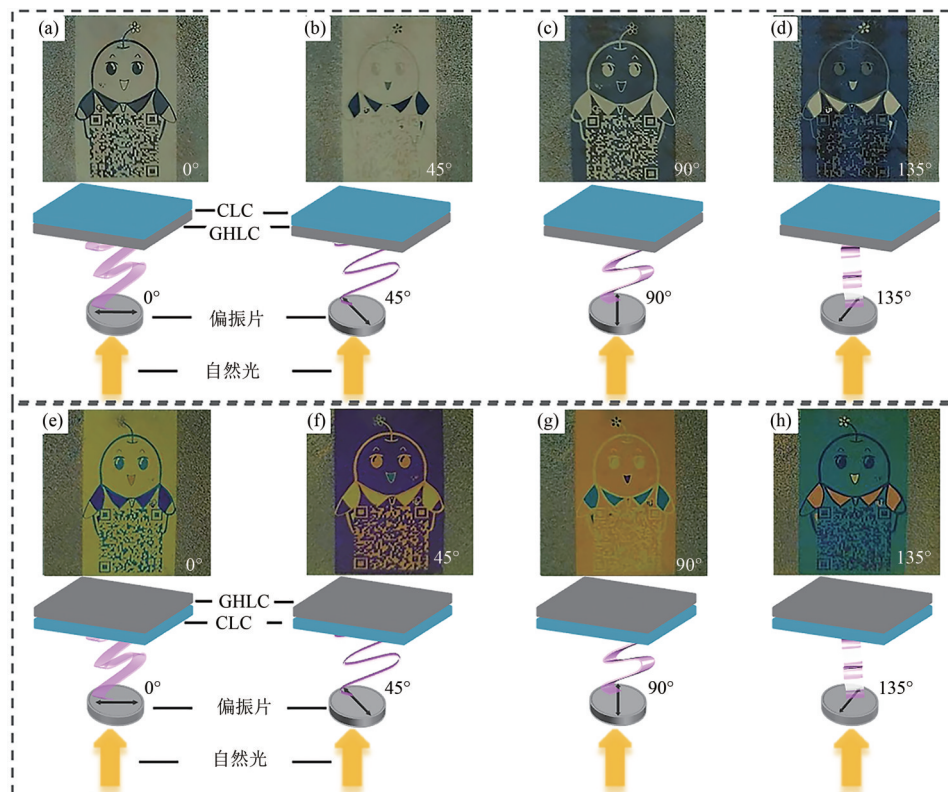


图 5 当线偏振光以 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 的偏振角度入射时,(a~d)上膜层为胆甾液晶层,下膜层为宾主液晶层时,双液晶防伪器件的透射显示效果;(e~h)上膜层为宾主液晶层,下膜层为胆甾液晶层时,双液晶防伪器件的透射显示效果。

Fig. 5 When the line polarized light is incident at the polarization angles of $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ and 135° , (a~d) the transmission display effect of the double liquid crystal anti-counterfeiting device when the upper film layer is the cholesteric liquid crystal layer and the lower film layer is the guest-host liquid crystal layer; (e~h) the transmission display effect of the double-layered liquid crystal anti-counterfeiting device when the upper film layer is the guest-host liquid crystal layer and the lower film layer is the cholesteric liquid crystal layer.

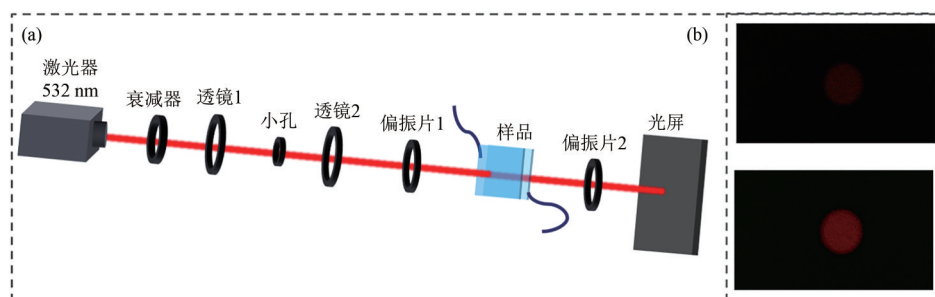


图 6 (a)测试非胆甾液晶反射波段的线偏振光经过双液晶防伪层中胆甾相液晶层出射光的光路装置图;(b)出射光测试结果中明显的亮暗变化。

Fig. 6 (a) Diagram of the optical path device for testing line polarized light in the non- cholesteric liquid crystal reflective band passing through the cholesteric liquid crystal layer in the double liquid crystal anti-counterfeiting layer; (b) Clear brightness and darkness variation in the results of the outgoing light test.

吸收轴和垂直吸收轴进行矢量分解,平行吸收轴的光被大量吸收,垂直吸收轴的光被少量吸收。出射光的偏振状态与光强发生不同程度改变,

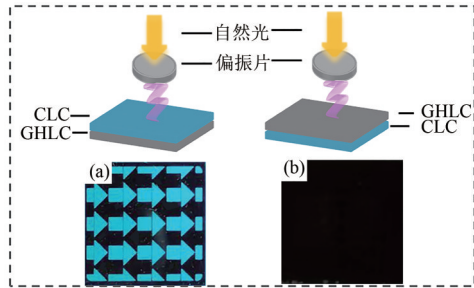


图 7 (a)上膜层为胆甾相液晶层,下膜层为宾主液晶层时,双液晶防伪器件的反射显示效果;(b)上膜层为宾主液晶层,下膜层为胆甾相液晶层时,双液晶防伪器件的反射显示效果。

Fig. 7 (a) Reflective display effect of the double-layered liquid crystal security device when the upper layer is a cholesteric liquid crystal layer and the lower layer is a guest-host liquid crystal layer; (b) Reflective display effect of the dual liquid crystal security device when the upper layer is a guest-host liquid crystal layer and the lower layer is a cholesteric liquid crystal layer.

“小花梨”同样也显示出彩色。

线偏振光反射模式下,当CLC层在上时,只显示CLC层信息;当GHLC层在上时,入射光被吸收,不显示任何信息,仍为黑态(图7)。其显示结果与自然光下反射模式相同。

3.5 多维防伪器件在不同观察角度下的信息显示

多维防伪器件在不同的观察视角上呈现出独特的差异化,从而赋予其进一步的功能。如图8(a)所示,自然光入射的反射端随着观察视角 θ 的倾斜,对应CLC蓝色箭头图形的反射色由蓝色转变为淡紫色。当倾斜角度为 60° 时,对应图形显示变得模糊。这是由于在斜向观察器件时,由于CLC膜层的布拉格反射^[23-26]波段向短波长方向移动至紫外区域,从而使人眼无法识别。

如图8(b)所示,GHLC层在CLC层下方时,将双液晶防伪层置于偏光器上,在透射状态下,线偏光先经过GHLC层,再经过CLC层,最终显示GHLC层信息。在此情境下,最终的显示图形仅与GHLC层中二色性染料分子的面内角向吸收有关,斜入射对光的特定吸收影响较小,最终呈现观察视角的无依赖性。

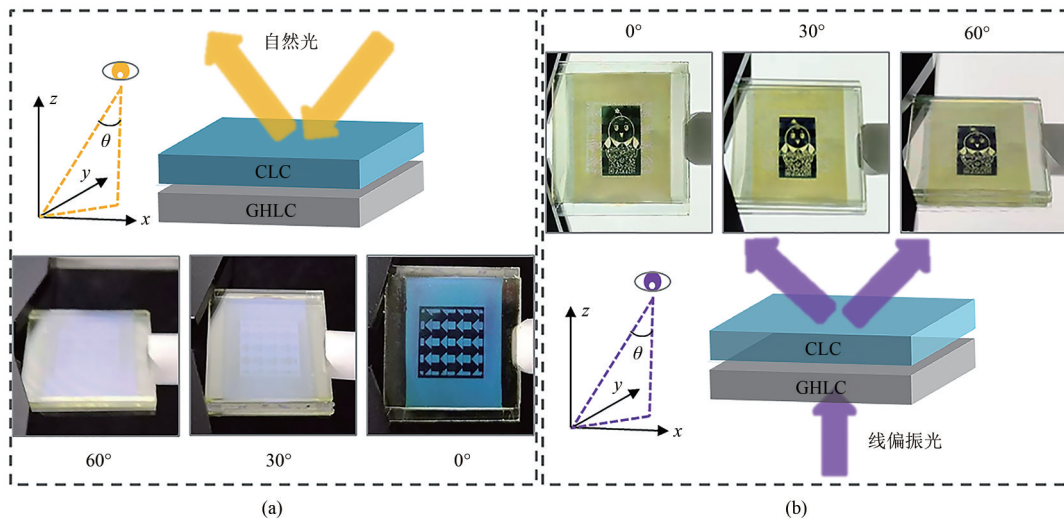


图 8 双层防伪层器件中上膜层为宾主液晶层,下膜层为胆甾相液晶层,对应不同模式光照的透反射显示差异。(a)自然光反射模式下,视角为 0° , 30° , 60° 的信息显示;(b)线偏振光透射模式下,视角为 0° , 30° , 60° 的信息显示。 θ 表示观察视角。

Fig. 8 Difference in the transmission and reflection display of this double-layer anti-counterfeit layer device in which the upper film layer is the guest-host liquid crystal layer and the lower film layer is the cholesteric liquid crystal layer, corresponding to different modes of light illumination. (a) Information display under different viewing angles of 0° , 30° , and 60° in natural light reflection mode; (b) Information display under different viewing angles of 0° , 30° , and 60° in transmission mode corresponding to line polarized light. Where, θ indicates the observation angle.

4 结 论

本文巧妙地设计了一种基于双液晶功能层的多维防伪器件,由图案化的CLC层与图案化的GHLC层构成。借助于GHLC层的二色性吸收与CLC层的选择性反射色,实现了多维防伪功能,表现为透、反射端的差异化图像显示、自然光

与线偏振光的图形隐藏与显现以及视角依赖性。双液晶防伪层相较于基于传统单液晶层防伪器件,具备更高维度的显示光学效应,可通过图形设计赋予更多的信息加密与隐藏,显著增强了防伪效果。该器件具有易制备、易观察、难伪造等特点,有望应用于酒类^[27-29]、纪念钞^[30]、特色图书^[13,31]等市场产品,同时也为今后特殊防伪应用提供了思路。

参 考 文 献:

- [1] WANG X S, CUI Y, REN B, *et al.* Metalens for generating multi-channel polarization-wavelength multiplexing metasurface holograms [J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 47856-47866.
- [2] LI Y, YU Q, WU Y, *et al.* Research on hologram based on holographic projection technology [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022: 3142599.
- [3] SALEM F M, AMIN R. A privacy-preserving RFID authentication protocol based on El-Gamal cryptosystem for secure TMIS [J]. *Information Sciences*, 2020, 527: 382-393.
- [4] GHOLAMI V, ALAGHEBAND M R. Provably privacy analysis and improvements of the lightweight RFID authentication protocols [J]. *Wireless Networks*, 2020, 26(3): 2153-2169.
- [5] NGUYEN H P, RETRAINT F, MORAIN-NICOLIER F, *et al.* A watermarking technique to secure printed matrix barcode-application for anti-counterfeit packaging [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 131839-131850.
- [6] SAKIB S, MILENKOVIĆ A, RAY B. Flash watermark: an anticounterfeiting technique for NAND flash memories [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020(10): 4172-4177.
- [7] QING L. Research on equipment defect management system based on QR code [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 677(5): 052058.
- [8] PAN J S, LIU T, YAN B, *et al.* Using color QR codes for QR code secret sharing [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2022, 81(11): 15545-15563.
- [9] GOETZ K P, TAYLOR A D, HOFSTETTER Y J, *et al.* Sustainability in perovskite solar cells [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(1): 1-17.
- [10] SHI Y H, HAN J L, JIN X, *et al.* Chiral luminescent liquid crystal with multi-state-reversibility: breakthrough in advanced anti-counterfeiting materials [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(20): 2201565.
- [11] ZHENG Z G, HU H L, ZHANG Z P, *et al.* Digital photoprogramming of liquid-crystal superstructures featuring intrinsic chiral photoswitches [J]. *Nature Photonics*, 2022(3): 226-234.
- [12] GAO Y Z, FENG K, ZHANG J, *et al.* Finger-temperature-detecting liquid crystal composite film for anti-counterfeiting labels [J]. *Molecules*, 2020, 25(3): 521.
- [13] SUN W, CHEN X F, LI Y, *et al.* Anti-counterfeiting behaviour of organic-inorganic hybrid silica film with a chiral smectic C structure [J]. *Chemistry-An Asian Journal*, 2022, 17(20): e202200793.
- [14] SHIBATA Y, MARUYAMA S, ISHINABE T, *et al.* Polarization characteristics of single-crystalline dichroic azo dye grown in nematic-phase liquid crystal [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021, 60(8): 081001.
- [15] YANG W J, LENG J B, HUANG Z Q, *et al.* Controllable viewing-angle display using GHLC cell as backlight panel [J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 428-429: 335-339.
- [16] ONO H, ITO M. Characteristics of all-optical switching properties in a guest-host liquid crystal Fabry-Perot device [J]. *Optics Communications*, 2003, 223(4/6): 399-409.
- [17] LIANG Y G, WANG Y M, ZHU M M, *et al.* Controlling the pretilt angles of guest-host liquid crystals via a hydrophilic polyimide layer through oxygen plasma treatment [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, 4(9): 4632-4640.
- [18] HUANG H W, LI H T, YIN J M, *et al.* Butterfly-inspired tri-state photonic crystal composite film for multilevel information encryption and anti-counterfeiting [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(17): 2211117.
- [19] TIAN Y, PENG H, WEI Q L, *et al.* Moisture-Induced reversible structure conversion of Zero-Dimensional organic cuprous bromide hybrids for multiple photoluminescent anti-Counterfeiting, information encryption and rewritable

- luminescent paper [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 458: 141436.
- [20] CHEN J, YANG X Y, CHEN J, *et al.* Light-responsive polyblend films with reconfigurable surface micropatterns as rewritable information storage media [J]. *Chinese Journal of Chemistry*, 2023, 41(3): 273-279.
- [21] 罗龙飞, 李玉洁, 沈志豪, 等. 偶氮苯液晶嵌段共聚物薄膜自组装和光响应性研究进展 [J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1238-1254.
- LUO L F, LI Y J, SHEN Z H, *et al.* Progress in self-assembly and photo-responsiveness of thin films of azobenzene-based liquid crystalline block copolymers [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1238-1254. (in Chinese)
- [22] MA J Z, YANG Y Z, WANG L, *et al.* Main-chain chiral liquid crystal elastomers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 0751417.
- [23] BONDAREV V Y, KOZLOVSKY V I, KRYSA A B, *et al.* Laser CRT as a light source for display technology [C]// *Proceedings of SPIE 6637, International Symposium on Advanced Display Technologies*. Moscow, Russian Federation: SPIE, 2007: 663707.
- [24] MCCONNEY M E, RUMI M, GODMAN N P, *et al.* Photoresponsive structural color in liquid crystalline materials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(16): 1900429.
- [25] YIN K, XIONG J H, HE Z Q, *et al.* Patterning liquid-crystal alignment for ultrathin flat optics [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(49): 31485-31489.
- [26] 杨言昭, 张璇, 封伟, 等. 仿生变色液晶功能材料 [J]. *表面技术*, 2022, 51(8): 15-29.
- YANG Y Z, ZHANG X, FENG W, *et al.* Bioinspired color-changing liquid crystal materials [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(8): 15-29. (in Chinese)
- [27] MA Y, XIN S J, LIU X Y, *et al.* Colour generation for optically driving liquid crystal display [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(12): 1729-1734.
- [28] YUAN Y, CAO L. Liquor product anti-counterfeiting system based on RFID and two-dimensional barcode technology [J]. *Journal of Convergence Information Technology*, 2013, 8(8): 88-96.
- [29] LI T H, HU H B. Research on liquor warehousing and the anti-counterfeiting system based on radio frequency identification technology [J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2016, 13(9): 6052-6055.
- [30] LI W S, SHEN Y, CHEN Z J, *et al.* Demonstration of patterned polymer-stabilized cholesteric liquid crystal textures for anti-counterfeiting two-dimensional barcodes [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 601-606.
- [31] PARK G, YOON D K. Security use of bilayer dichroic films made of liquid crystal polymer networks [J]. *Journal of Information Display*, 2021, 22(3): 173-178.

作者简介:



王芳(1996—),女,山东济南人,硕士研究生,2018年于聊城大学获得学士学位,主要从事宾主液晶材料的研究。E-mail:2849813747@qq.com



郑致刚(1982—),男,浙江宁波人,博士,教授,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事液晶态功能材料与微纳光学器件方面的研究。E-mail:zgzheng@ecust.edu.cn



王骁乾(1984—),上海人,博士,讲师,2014年于香港科技大学获得博士学位,主要从事液晶微纳结构及光子器件的研究。E-mail:xqwang@ecust.edu.cn