

基于液晶光取向的多维复用全息图像 技术及其加密应用*

王裕帅 陈芳芳 桑景新 张子玉 厉怡辰 郑继红†

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

(2025年9月19日收到; 2026年1月31日收到修改稿)

光控取向技术的显著进步极大地推动了基于 Pancharatnam-Berry (PB) 相位的平面液晶器件发展. 目前平面液晶器件依托液晶分子的双折射、旋光色散等特性及特定微纳结构设计, 已能够实现空间、偏振、波长和角度等多维度的复用功能. 然而, 其可承载的信息容量和通道数量仍有进一步提升的空间. 本文提出一种结合液晶光取向和数字全息技术的多维复用全息图像加密方法, 基于液晶空间光调制器 (liquid crystal spatial light modulator, LC-SLM) 实现单步曝光工艺, 利用 Malus 定律中液晶分子的取向简并性实现偏振复用, 并利用改进的 Gerchberg-Saxton 算法实现空间位置复用与波长复用. 实验构建了六通道的加密框架, 三者通过单一液晶光学元件协同作用, 实现了多维信息高度融合. 本研究不仅验证了平面液晶光学元件在多维信息加密中的应用潜力, 同时拓展了平面液晶光学元件在信息安全、光学加密及多维数据存储等领域的应用前景, 为新一代多维可控光学加密系统提供了理论与实验基础.

关键词: 液晶光控取向, 多维复用, 光学加密, 全息成像

DOI: 10.7498/aps.75.20251293

CSTR: 32037.14.aps.75.20251293

1 引言

信息社会的飞速发展使得信息安全成为全球焦点^[1]. 传统加密方法 (如对称与非对称加密等) 主要依赖复杂的数学计算难题来保障安全. 然而, 在计算能力, 特别是量子计算技术飞速发展的背景下, 这些基于数论难题的算法正面临潜在的、被量子计算机高效破解的威胁. 相比之下, 基于物理机制的光学加密技术, 在信息安全领域展现出独特的优势. 光学加密将信息隐藏在光场的物理维度 (如相位、偏振和波长) 中, 其安全性建立在光学系统的物理参数和光传播的物理定律之上. 这种物理层加密所产生的密钥空间在本质上是多维且连续的, 难以被传统的数学方法穷举. 更重要的是, 其解密过

程依赖于对特定物理密钥, 而非仅仅依赖于计算上的复杂性, 这使得其天生对基于计算能力的攻击, 包括未来的量子计算攻击, 具备显著的抵御能力. 因此, 将光学物理加密与数学加密算法相结合, 有望构建更为坚固、面向未来的多层次信息安全防御体系^[2-7]. 因此, 探索新型加密技术, 特别是以物理研究方法为基础的新型技术, 成为重要研究方向^[8].

液晶全息光学加密作为一种新兴技术, 通过调控光场 (振幅、相位、偏振等) 及液晶取向特性, 增加密码空间复杂度, 具备高安全性与隐蔽性^[8-12]. 相较于需精密定制光学结构的超表面^[13-20], 平面液晶器件结合光配向技术与液晶材料, 在光学加密领域展现出独特优势: 制备流程便捷, 可集成波长、位置与偏振复用功能, 大幅缩短制备周期并降低成本^[21]; 同时具备高可扩展性、兼容性、稳定性

* 国家自然科学基金 (批准号: 62475158) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jihongzheng@usst.edu.cn

及广泛的材料来源,为产业化应用奠定基础^[22].近年来,平面液晶器件凭借其高精度相位调控能力,在全息图像加密中应用广泛.例如:Chen等^[23]实现了单个液晶器件的多通道信息编码与图像显示;Li等^[24]报道了具有振幅、相位和偏振多维调制的PB相位液晶全息图;Shao等^[25]利用液晶分子的复振幅调制特性,构建了集表面显示与聚焦功能于一体的多功能液晶元件;Xie等^[26]通过改变液晶取向同时实现了表面显示与全息成像,支持连续振幅与二值相位调制;Xu等^[27]则提出了一种基于级联液晶元件的秘密共享光加密方案,可同步控制入射光的振幅与相位.

高分辨率、结构化液晶PB相位光学元件的制备主要采用数字微镜阵列(digital micromirror device, DMD)动态掩模曝光与液晶空间光调制器(LC-SLM)单步曝光两种方法^[28,29].DMD动态掩模系统利用外部偏振光源照射加载图案的DMD实现任意图案制备与偏振态输出,其局限在于每次曝光仅能输出单一方向偏振光,制备多方位角取向图案需多次曝光.而利用LC-SLM控制各像素点的相位延迟,通过液晶空间光调制器控制任意像素的相位延迟,使不同像素点产生不同方向的线偏振光,可以实现任意图案的单步曝光.

本文提出一种多维复用全息图像加密方法,利用LC-SLM实现单步曝光工艺,通过在单一平面液晶光学器件中实现近场偏振信息与远场衍射图像的同步集成.该方法利用Malus定律中液晶分子取向的兼并性,实现偏振复用;同时引入改进的GS算法,完成空间位置信息与波长维度的有效编码,从而构建出融合六通道三维信息的集成化加密架构.3种复用机制在同一液晶器件上协同作用,不仅大幅简化了系统配置,增强了运行稳定性,还显著提高了信息传输与存储的效率.研究结果验证了该方法在多维信息安全领域的可行性,并进一步

拓宽了平面液晶光学元件在数据加密、信息防护及多维存储等方面的应用边界,为发展可调控、高集成度的新型光学安全系统奠定了理论与实践基础.

2 全息图像加密复用原理

2.1 LC-SLM 单步曝光工艺

如图1所示,单步曝光系统利用LC-SLM控制相位延迟以生成不同方向的线偏振光场.光束依次通过起偏器(垂直偏振)、LC-SLM、1/4波片(快轴方向与起偏器方向一致)、透镜及样品.根据琼斯矩阵理论,出射光场的偏振态可表示为

$$E_{\text{out}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = j e^{j\frac{\alpha}{2}} \begin{bmatrix} \sin \frac{\alpha}{2} \\ \cos \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 α 是LC-SLM某一像素点产生的相位延迟.根据 E_{out} 表达式可得输入的线偏光转变为偏振方向旋转 $\alpha/2$ 的线偏光输出,通过控制不同像素点的施加电压可实现任意偏振角度的像素化偏振光场,即通过加载不同的灰度图案,可实现不同方位角的线偏振光场,这种单步曝光的方法,有效缩短了PB相元器件的制备时间,过程简便高效.

2.2 基于菲涅耳衍射的全息图算法设计

设计全息图第1步是获得所需的相位轮廓,本文采用改进的GS算法,其流程图如图2所示,通过传播函数(优化好的傅里叶变换)在物面和全息面之间建立循环,采用迭代的方式对不同深度的图像进行优化,形成最终我们所需的相位轮廓.此处采用菲涅耳衍射公式来模拟光场传播^[30],公式如下:

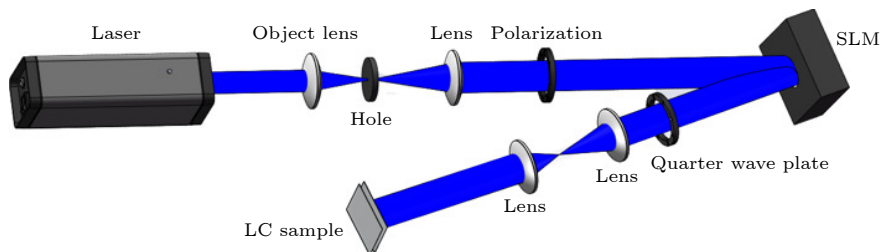


图1 液晶空间光调制器全息曝光模拟图

Fig. 1. Simulation diagram of holographic exposure of liquid crystal spatial light modulator.

$$U_d(x, y) = \frac{\exp(jkd)}{jkd} \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y^2)\right] \times \iint \left\{ U_0(x_0, y_0) \exp\left[\frac{jk}{2d}(x_0^2 + y_0^2)\right] \right\} \times \exp\left[-j2\pi\left(x_0 \frac{x}{\lambda d} + y_0 \frac{y}{\lambda d}\right)\right] dx_0 dy_0, \quad (2)$$

其中 U_0 和 U_d 分别是全息面和物面的光场复振幅; \mathbf{k} 表示波矢 ($|k| = 2\pi/\lambda$); (x_0, y_0) 和 (x, y) 分别代表全息面和物面的坐标. (2) 式可以转换为傅里叶变换的形式, 即 (3) 式:

$$U_d(x, y) = \frac{\exp(jkd)}{jkd} \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y^2)\right] \times F \left\{ U_0(x_0, y_0) \exp\left[\frac{jk}{2d}(x_0^2 + y_0^2)\right] \right\}. \quad (3)$$

这种形式方便我们利用菲涅耳衍射公式来模拟光的传播. 从 (3) 式可以看出光场传播由传播距离 d 和波长 λ 决定, 因此可以从这两个自由度入手进行复用加密.

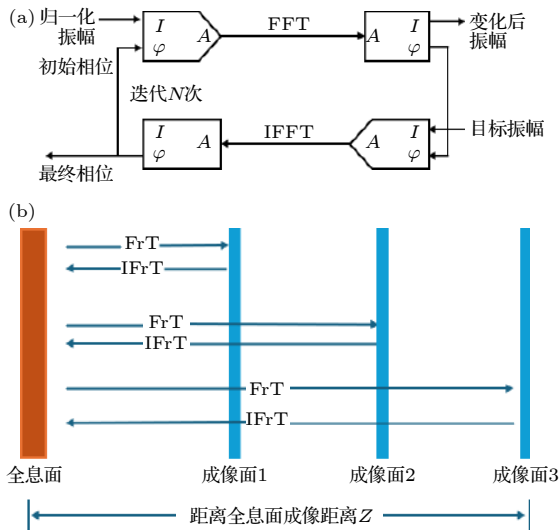


图2 (a) 原始 2D GS 算法的流程图, “FFT”和“逆 FFT”表示傅里叶变换和逆傅里叶变换; (b) 改进 GS 算法的示意性程序流程图, “FrT”和“IFrT”表示菲涅耳变换和逆菲涅耳变换

Fig. 2. (a) Flowchart of the original 2D GS algorithm. “FFT” and “Inverse FFT” represent the Fourier transform and the inverse Fourier transform respectively. (b) Schematic flowchart of the improved GS algorithm. “FrT” and “IFrT” stand for Fresnel transformation and inverse Fresnel transformation respectively.

2.3 取向简并度

图 3(a) 展示了 PB 相位液晶全息图的原理示意图. 图中每个像素点的振幅透射率相同. LC 分

子矢量为 \mathbf{n} , 其特征在于面外取向角 γ 和面内取向角 θ , 由这两个角度来确定液晶分子最后的取向. 液晶分子的相位延迟表示为 $\delta = (2\pi d \Delta n)/\lambda$, 其中 d 为液晶层的厚度, Δn 为液晶双折射率, λ 为入射光波长. 因此液晶分子的调制效应可以表示为

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta & i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \\ i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta & \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

对于水平偏振光 $[1, 0]^T$ 入射, 出射光场可以表示为 $E_{\text{out}} = J(\theta)[1, 0]^T$, 其中,

$$E_{\text{out}} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta \\ i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

假如后检偏器的方向为 α , 则透射光场的复振幅表示为

$$E_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} \cos \alpha + i \sin \frac{\delta}{2} \cos(\alpha - 2\theta) \\ \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (6)$$

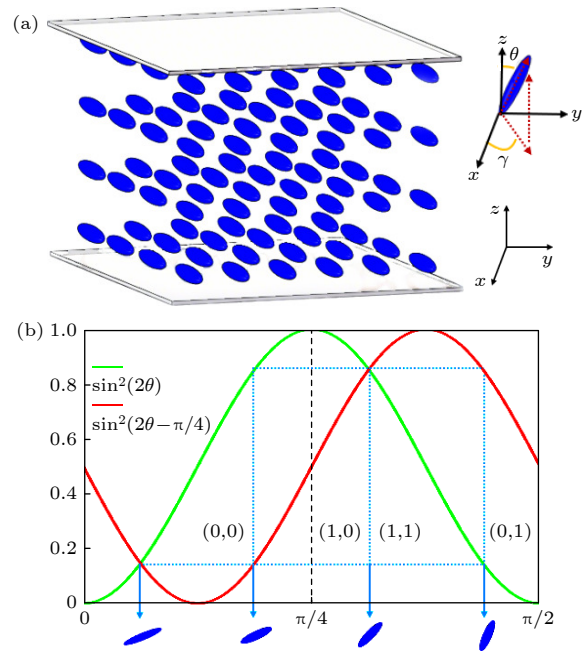


图3 液晶分子的振幅和相位调制原理 (a) 双折射 LC 分子, γ 和 θ 分别是面外取向角和面内取向角; (b) 计算 LC 分子旋转之前 (通道 1) 和之后 (通道 2) 的归一化强度以及对应强度比的液晶分子状态

Fig. 3. Principles of amplitude and phase modulation of liquid crystal molecules: (a) Birefringent LC molecule, γ and θ are the out-of-plane and in-plane orientation angles, respectively; (b) states of LC molecules before (Channel 1) and after (Channel 2) rotation, along with the normalized intensities and corresponding intensity ratios.

透射光场 E_α 表明透射光场的偏振态与检偏器角度 α 、液晶相位延迟 δ 和液晶分子取向角 θ 这三者密切相关,这就为光学加密提供了多个自由度,通过操控 α 、 δ 和 θ 来操控最后的透射光场,从而实现多自由度加密.

当 $\delta = \pi$ (满足半波条件) 且检偏器角度 $\alpha = 90^\circ$ 时,透射光场的光强为 $I_{\text{out}} = \sin^2(2\theta)$; 接下来将液晶分子角度旋转 22.5° , 即最后的出射光场的强度为 $I_{\text{out}} = \sin^2(2\theta - 45^\circ)$. 图 3(b) 展示了液晶分子旋转前后 (通道 1: $\sin^2(2\theta)$; 通道 2: $\sin^2(2\theta - 45^\circ)$), 透射光强随方位角 θ 变化的归一化曲线. 分析可知, 通道 1 (2θ): 当 LC 取向角为 11° 和 79° 时强度为 0.14, LC 取向角为 34° 和 56° 时强度为 0.86, 可定义低强度 (11° 和 79°) 为二进制状态“0”, 高强度 (34° 和 56°) 为二进制状态“1”. 通道 2 ($2\theta - 45^\circ$): 当 LC 取向角为 11° 和 34° 时强度为 0.14, LC 取向角为 56° 和 79° 时强度为 0.86, 可定义低强度 (11° 和 34°) 为二进制状态“0”, 高强度 (56° 和 79°) 为二进制状态“1”. 因此, 双通道的强度可编码为 4 个独立的二进制状态 (“00”, “01”, “10”, “11”), 为实现两幅独立二值图像的双通道显示提供了途径.

上述分析阐述了双通道二值灰度图像显示原理. 根据光强公式 $I_{\text{out}} = \sin^2(2\theta)$, 对于特定光强值, 存在多个不同的方位角 θ 与之对应, 即 $I_{\text{out}} = \sin^2(2\theta) = \sin^2(\pi \pm 2\theta) = \sin^2(2\pi - 2\theta)$ 可产生相同的光强, 因此在 LC 指向分布中, 光场强度和面内取向角之间存在一对四的关系, 这也被称为取向简并度^[27]. 因此利用取向简并度可以选取我们所需要的液晶分子取向角. 图 3(b) 只显示了取向角从 0° 到 90° 的变化, 但是考虑取向角 90° 到 180° 的变化时, 可以进一步丰富几何相位和取向角之间的关系, $E_{\text{out}} = \sin[2(\theta + 90^\circ)] = -\sin(2\theta) = e^{j\pi} \sin(2\theta)$. 由此可见当取向角从 0° 到 90° 变化为 90° 到 180° 时, 有一个 π 的相位变化, 这种特性恰好满足二值相位操作的需求. 因此可以确定液晶分子取向角, 从而决定整个像素区域内的 $[0, \pi]$ 分布; 同时基于菲涅耳衍射的全息图可以离散为二元相 $[0, \pi]$, 将两者的二元分布进行相应匹配, 不仅可以获得连续的强度调制, 而且可以控制衍射光场的相位分布与强度调制进行匹配, 得到最终的液晶分子取向角分布, 从而形成独立的信息通道, 且不需要复杂的设计和制造成本.

3 结果与讨论

3.1 位置复用

采用基于磺基偶氮染料 SD1 的光配向技术和基于液晶空间光调制器 (LC-SLM, HDSLMS0 R PLUS, 1920×1080 像素, 每个像素尺寸 $10.8 \mu\text{m} \times 10.8 \mu\text{m}$) 的动态曝光工艺, 制备了平面液晶元件. 实验制备的 LC 样品通过图 4 所示的检测光路测量样品性能, 激光器输出的光束 (功率为 900 mW) 经过起偏器后变为水平偏振, 然后依次通过 LC 样品和检偏器, 检偏器与起偏器角度正交, 并且通过 CCD 相机捕获正后方的图像, CCD 分辨率为 2448×2048 , 像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$, 曝光时间设置为 20 ms. 本实验设计了 3 个字母 “WYS” 在不同的距离 ($z_1 = 12 \text{ cm}$, $z_2 = 15 \text{ cm}$, $z_3 = 20 \text{ cm}$) 处成像显示. 图 5 示出了波长为 $\lambda_1 = 457 \text{ nm}$ 时不同 z 平面处的 3 个字母重构图像 “WYS” 的仿真和实验结果. 根据我们的实验结果, 全息图与 3 个再现平面的距离分别为 $z_1 = 12.2 \text{ cm}$, $z_2 = 16.3 \text{ cm}$, $z_3 = 22.5 \text{ cm}$, 重建的距离与设计值基本吻合. 尽管全息图是针对 $\lambda_1 = 457 \text{ nm}$ 波长设计的, 但是其可以在宽光谱中工作, 因此复现时也使用 $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ 和 $\lambda_3 = 638 \text{ nm}$ 的波长进行图像重构. 根据费马原理^[31], 对于入射波长与重建距离之间的关系可以简化为 $\lambda_1 Z_1 = \lambda_2 Z_2$. 因此在不同波长时复现的距离会有微小的变化, $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ 时, 重建的距离分别为 $z_1 = 10.3 \text{ cm}$, $z_2 = 13.7 \text{ cm}$, $z_3 = 18.8 \text{ cm}$; $\lambda_3 = 638 \text{ nm}$ 时, 重建的距离分别为 $z_1 = 8.6 \text{ cm}$, $z_2 = 11.5 \text{ cm}$, $z_3 = 15.8 \text{ cm}$, 这一结果与图 5 所示的实验观察结果基本一致.

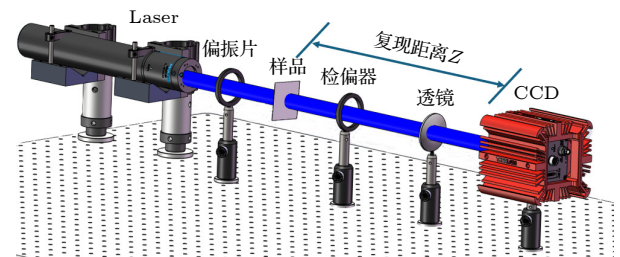


图 4 用于重建图像的检测光路示意图, 蓝色箭头表示重建图像和样本之间的距离

Fig. 4. Schematic diagram of the detection light path for reconstructing images. The blue arrow represents the distance between the reconstructed image and the sample.

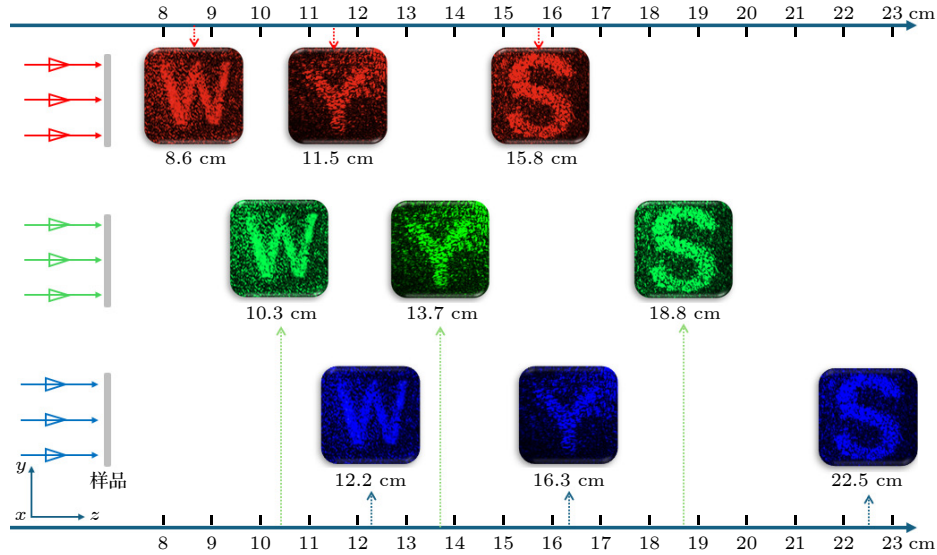


图 5 位置复用实验结果, 即 CCD 相机在不同位置捕获的图像“WYS”, 638 nm 入射下捕获距离分别为 $z_1 = 8.6$ cm, $z_2 = 11.5$ cm, $z_3 = 15.8$ cm; 532 nm 入射下捕获距离分别为 $z_1 = 10.3$ cm, $z_2 = 13.7$ cm, $z_3 = 18.8$ cm; 457 nm 入射下捕获距离分别为 $z_1 = 12.2$ cm, $z_2 = 16.3$ cm, $z_3 = 22.5$ cm

Fig. 5. Experimental results of position reuse. Images captured by CCD cameras at different positions are denoted as “WYS”. Capture distances under 638 nm incidence are $z_1 = 8.6$ cm, $z_2 = 11.5$ cm, and $z_3 = 15.8$ cm, respectively. Capture distances under 532 nm incidence are $z_1 = 10.3$ cm, $z_2 = 13.7$ cm, and $z_3 = 18.8$ cm, respectively. Capture distances under 457 nm incidence are $z_1 = 12.2$ cm, $z_2 = 16.3$ cm, and $z_3 = 22.5$ cm, respectively.

3.2 波长复用

根据上述重构距离和不同波长之间的关系 $\lambda_1 Z_1 = \lambda_2 Z_2$, 设计了三色波长 RGB 分别对应数字图像“4”, “2”, “8”. 图 6 所示为不同波长、相同距离 ($z = 15$ cm) 平面处的 3 个数字重构图像的仿真和实验结果. 实验结果表明特定波长只能在对

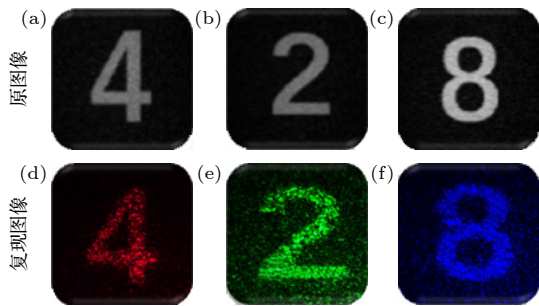


图 6 波长复用实验结果 (a)—(c) 在不同波长同一位置时, CCD 相机捕获的图像“428”; (d) 638 nm 入射下捕获的距离为 $z = 13$ cm; (e) 532 nm 入射下捕获的距离为 $z = 13.5$ cm; (f) 457 nm 入射下捕获的距离为 $z = 15$ cm

Fig. 6. Experimental results of wavelength multiplexing: (a)—(c) The image captured by the CCD camera at the same position at different wavelengths is “428”; (d) the distance captured under 638 nm incident is $z = 13$ cm, (e) the distance captured under 532 nm incident is $z = 13.5$ cm, (f) the distance captured under 457 nm incident is $z = 15$ cm.

应的位置才能观察到对应的图像, 并且复现的距离和我们所设计的距离较为符合, 为我们的加密方案又增加了一个新的通道.

3.3 偏振复用

根据双通道二值灰度图像显示原理, 实现近场偏振双通道的完全解耦, 需要对强度调制进行进一步解耦, 因此液晶分子具有不同的可选状态, 例如从 0° — 90° 满足幅度调制 $(1, 0)$, $(0, 0)$, $(0, 1)$, $(1, 1)$ 的角度值为 $\theta_1 = 11^\circ, 34^\circ, 56^\circ, 79^\circ$. 对于不同取向角也可满足相同强度, 所以可以从 $2\theta, \pi \pm 2\theta, 2\pi - 2\theta$ 这 4 个角度进行选择来实现近场偏振解耦和远场全息重建. 图 7 为两个偏振通道 LC 全息图的实验结果, 测量结果如图 7(c)—(h) 所示. 由于归一化强度仅取决于液晶分子的取向角, 因此该元件可以在宽光谱范围内工作. 我们计算了各波长通道下重建图像与目标图像的峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio) 值, 图像 1 在 638, 532, 457 nm 波长下的 PSNR 分别为 16.38, 22.92, 21.36 dB, 图像 2 在 638, 532, 457 nm 波长下的 PSNR 分别为 19.44, 24.51, 20.33 dB. 这表明重建图像在像素保真度上具有一定可靠性. 并且信息在两个通道中是完全独立的, 这两个图像在正交偏振系统下观察,

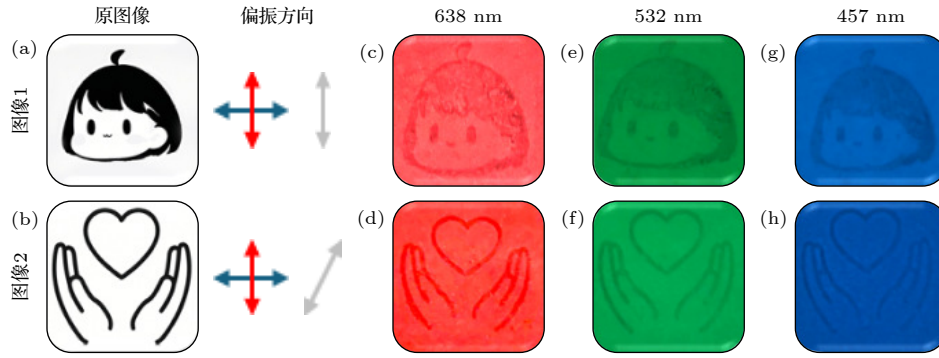


图 7 近场双通道偏振的实验结果 (红色和蓝色箭头表示正交偏振, 灰色箭头表示样品位置) (a), (b) 目标图像; (c)–(h) 在 $\lambda_1 = 638 \text{ nm}$ (c), (d), $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ (e), (f) 和 $\lambda_3 = 457 \text{ nm}$ (g), (h) 入射波长下实验捕获的图像

Fig. 7. Experimental results of near-field dual-channel polarization: (a), (b) The images of the target images; (c)–(h) The images captured experimentally under the incident wavelengths of (c), (d) $\lambda_1 = 638 \text{ nm}$, (e), (f) $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ and (g), (h) $\lambda_3 = 457 \text{ nm}$. The red and blue arrows indicate the orthogonal polarization, while the gray arrow represents the sample position.

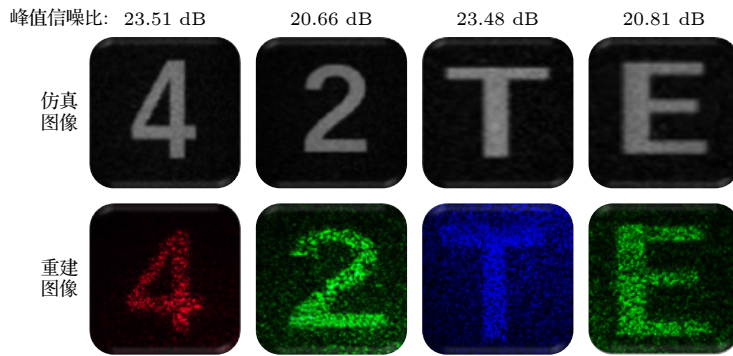


图 8 不同波长重建图像与原图像的峰值信噪比图

Fig. 8. Peak signal-to-noise ratio map of reconstructed images at different wavelengths and the original image.

两幅图像在视觉上均具备良好的可区分度. 在应用中, 入射光的偏振态可以作为解密编码信息的密钥, 通过双通道液晶全息设计, 可以显著提高信息的安全性和容量.

为了对重建图像质量进行定量评价, 本文采用 PSNR 值进行客观评价. 如图 8 所示, 数字“4”的 PSNR 值为 23.51 dB; 数字“2”的 PSNR 值为 20.66 dB; 字母“T”的 PSNR 值为 23.48 dB; 字母“E”的 PSNR 值为 20.81 dB; 其他重建图像质量评价, 同样按照此方法进行评定.

3.4 多维复用加密

上述结果分别验证了近场双通道偏振图像显示、远场空间位置复用以及波长复用的可行性. 为了将位置复用和波长复用结合起来, 我们设计了一个新的复合全息图. 在全息图中既包含了波长复用的字母图像“T”, “E”, 同时又包含了位置复用的字母图像“S”, “T”. 接下来将展示如何通过取向简并

度将相位调制集成到 LC 器件中. 如第 2 节所述, 我们仅仅只考虑了 0° – 90° 的液晶分子取向角的变化, 如果考虑 90° – 180° 的取向角变化, 那么对于几何相位来说将会产生一个 π 的相位突变, 并且无论液晶分子如何旋转, 均会保持双相位差. 可以利用这种变化来构造二元相位, 从而将近场偏振和远场全息集成到一个 LC 器件中, 因此六通道的图像显示可以通过单个 LC 器件实现, 包括两个近场二值图像, 以及远场波长复用图像与位置复用图像. 多维复用加密的示意图如图 9 所示. 图中解密利用光的波长、位置和偏振作为多个自由度. 无法从单个通道检索到有意义的信息. 完全解密需要在嵌套解密方案中使用多个自由度.

近场偏振. 二维码和字母“FFGF”分别编码在两个偏振通道, 将样品放置于正交偏振系统中可以通过 CCD 观察到二维码, 通过顺时针旋转样品 22.5° , 可以通过 CCD 观察到字母“FFGF”, 字母“FFGF”即为解密所需的密钥. 实验结果如

图 10(c)–(h) 所示, 在不同波长下, 近场密钥图像 (二维码、字母“FFGF”) 均能清晰重建, 在实际应用的过程中, 近场偏振通道的性能可能受到环境光的挑战. 非偏振或杂乱的环境光会叠加在信息光场上, 降低信噪比, 可能影响密钥图像 (如二维码) 的清晰度和解码可靠性.

远场全息. 全息图像 (字母“T”, “E”, “S”, “T”) 始终投影在远场, 包含密文信息, 其中字母“T”, “E”构成波长复用通道, 字母“S”, “T”构成位置复用通道, 如图 10(i)–(l) 所示, 在不同位置和波长入射下, 远场全息图像 (字母“T”, “E”, “S”, “T”) 均能清晰重建, 重建距离与预期值较为符合, “T” ($\lambda_1 = 638 \text{ nm}$), “E” ($\lambda_2 = 532 \text{ nm}$) 的复现距离为 $z = 25 \text{ cm}$, “S”, “T” ($\lambda = 457 \text{ nm}$) 的复现距离分

别为 $z_1 = 15 \text{ cm}$, $z_2 = 22 \text{ cm}$.

用户首先根据近场偏振分别获取密钥“FFGF”和二维码图像; 然后根据远场全息获取密文“TEST”; 接着, 利用维吉尼亚密码 [32] 对密文及密钥进行解密, 从而可以得到明文信息“YJYY”; 最后通过扫描获取的二维码进入密码输入界面, 将获取的明文信息“YJYY”输入, 即可获得最终的加密图像. 由于使用的是菲涅耳区域的二元相位调制, 没有孪生像的产生, 实验结果和目标图像吻合完好, 这种 PB 相位液晶全息图具有宽带响应特性, 能够在整个可见光波段工作. 值得注意的是, 双折射具有色散特性, 并且半波延迟所需的电压也随入射波长而变化. 上述结果表明, 我们所设计的液晶器件可以实现强度和相位的分离调制, 为多功能平板光学元件的研制提供了一种途径.

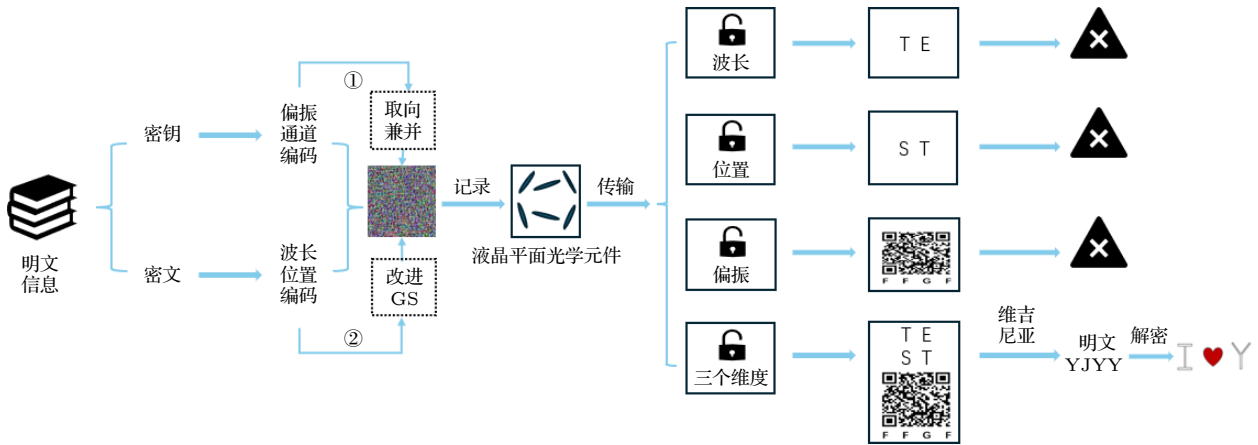


图 9 多维复用加密的示意图

Fig. 9. Schematic diagram of the principle of multidimensional multiplexing encryption.

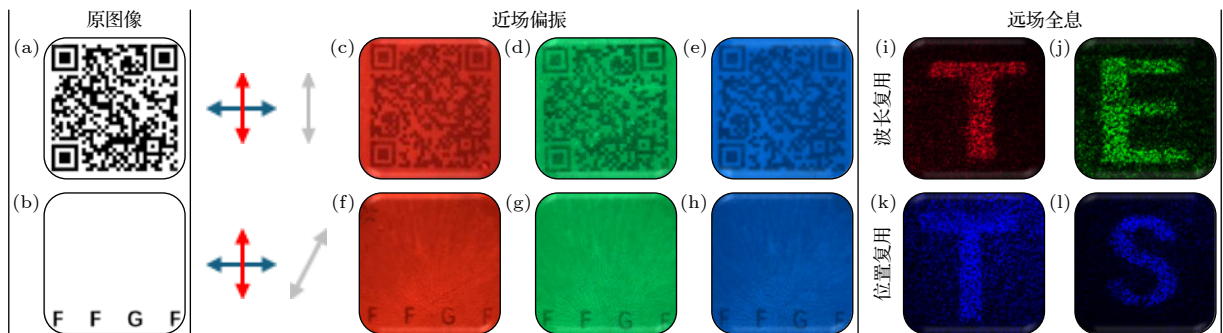


图 10 双通道液晶显示器件的实验结果 (a), (b) 原图像, 其中红色和蓝色箭头表示正交偏振方向, 灰色箭头表示样品位置; (c)–(h) 在 638 nm (c), (f), 532 nm (d), (g) 和 457 nm (e), (h) 的入射波长下实验捕获的图像; (i) 红光照射下捕获的波长复用图像“T”; (j) 绿光照射下捕获的波长复用图像“E”; (k), (l) 蓝光照射下捕获的位置复用图像“T”, “S”

Fig. 10. Experimental results of dual channel liquid crystal display device: (a), (b) Original image; the red and blue arrows represent the orthogonal polarization direction, while the gray arrows indicate the sample position; (c)–(h) the images captured experimentally at incident wavelengths of 638 nm (c), (f), 532 nm (d), (g), and 457 nm (e), (h); (i) the wavelength multiplexed image “T” captured under red light irradiation; (j) the wavelength multiplexed image “E” captured under green light irradiation; (k), (l) the position multiplexed images “T” and “S” captured under blue light irradiation.

4 结 论

本文提出并实现了一种基于 LC-SLM 的多维复用全息图像加密方法. 该方法充分利用光场的波长、相位和偏振态多个物理维度, 并基于液晶分子取向简并性, 结合光控取向技术与改进的 GS 算法, 在单一元件上设计了高度集成的液晶平面光学元件, 在成功实现波长复用与位置复用的基础上, 本研究最终集成了偏振维度, 利用取向简并度构建了更为复杂的六通道加密系统. 实现了近场强度连续变化的高保真二值图像再现; 并引入二元相位差, 实现了远场区域基于二元相位的全息图像再现, 成功实现了六通道信息显示与集成. 通过对不同通道图像间纵向间隔的模拟, 我们获得了一系列串扰效应较弱的仿真结果. 在此基础上, 采用上述优化后的纵向间隔进行实验验证. 实验表明, 在适度增加复用通道数量的情况下, 各图像间的串扰水平与仿真结果接近一致, 这有力地证明了本方法在多维光学加密中的稳健性与应用潜力. 两个独立的近场偏振通道 (二值图像) 作为密钥与信息载体 (如二维码) 编码; 四个远场通道 (波长复用与位置复用) 用于传递密文信息, 同时结合光学物理加密与数字密码算法维吉尼亚对信息进行加密, 即使单点信息被爆破也不能破解全部信息, 这种结合加强了系统的稳定性并且在单一元件中高度集成的液晶平面光学元件不仅为光学信息安全与防伪提供了新方案, 也为发展多功能平板显示与投影显示技术提供了重要思路.

参考文献

- [1] Chen F F, Zheng J H, Xing C C, Sang J X, Shen T 2024 *Displays* **82** 102632
- [2] Yuan H, Zhong Z Q, Zhang Y H, Zhang B 2023 *Adv. Opt. Mater.* **11** 2300352
- [3] Wang J, Chen J, Yu F L, Chen R S, Wang J X, Zhao Z Y, Li X N, Xing H Z, Li G H, Chen X S, Lu W 2024 *Nat. Commun.* **15** 6284
- [4] Chen P, Shen Z X, Xu C T, Zhang Y H, Ge S J, Ma L L, Hu W, Lu Y Q 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2200011
- [5] Márquez A, Li C, Beléndez A, Maier S A, Ren H 2023 *Nanophotonics* **12** 4415
- [6] Liu S Y, Alfarhan S, Wang W B, Feng S, Zhu Y X, Liu L Y, Song K N, Yang S, Jin K L, Chen X F 2023 *Adv. Opt. Mater.* **11** 2301364
- [7] Wang E L, Niu J B, Liang Y H, Li H L, Hua Y L, Shi L N, Xie C Q 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1901674
- [8] Chen F F, Shen T, Ma C W, Sang J X, Wang Y S, Zheng J H 2025 *J. Mol. Liq.* **430** 127752
- [9] Wang Z Y, Zhang H, Ma L L, Lu Y Q 2024 *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Chengdu, China, April 21–25, 2024* p1
- [10] Frese D, Sain B, Zhou H Q, Wang Y T, Huang L L, Zentgraf T 2021 *Nanophotonics* **10** 4543
- [11] Chen F F, Ma C W, Shen T, Sang J X, Zheng J H 2025 *Liq. Cryst.* **52** 230
- [12] Chen F F, Zheng J H 2024 *Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications XVIII* San Diego, California, United States, September 30, 2024 p69
- [13] Tang D L, Shao Z L, Xie X, Zhou Y J, Zhang X H, Fan F, Wen S C 2022 *Opto-Electronic Adv.* **6** 220063
- [14] Xu J L, Yue Z Y, Lu P Y, Wu R, Jiang K, Jiang X Q, Teng S Y 2023 *Chin. Opt. Lett.* **21** 100501
- [15] Dong F L, Feng H, Xu L H, Wang B, Song Z W, Zhang X F, Yan L Q, Li X J, Tian Y, Wang W T, Sun L F, Li Y, Chu W G 2018 *Acs Photonics* **6** 230
- [16] Zhou H Q, Sain B, Wang Y T, Schlickriede C, Zhao R Z, Zhang X, Wei Q S, Li X W, Huang L L, Zentgraf T 2020 *Acs Nano* **14** 5553
- [17] Deng L G, Deng J, Guan Z Q, Tao J, Chen Y, Yang Y, Zhang D X, Tang J B, Li Z Y, Li Z L, Yu S H, Zheng G X, Xu H X, Qiu C W, Zhang S, 2020 *Light-Sci. Appl.* **9** 101
- [18] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, Tang C C, Li X W, Weiss T, Huang L L, Wang Y T, Zentgraf T 2018 *Light-Sci. Appl.* **7** 95
- [19] Wei Q S, Huang L L, Zhao R Z, Geng G Z, Li J J, Li X W, Wang Y T 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2102166
- [20] Guo J Y, Wang T, Quan B G, Zhao H, Gu C Z, Li J J, Wang X K, Situ G H, Zhang Y 2019 *Opto-Electronic Adv.* **2** 07180029
- [21] Liu W Y, Zhuo Y Z, Xiao L K, Chen C, Shang S, Liu H Z, Meng H Y, Wang F Q, Yang X B, Wei Z C 2023 *Chin. Opt. Lett.* **21** 093601
- [22] Chen F F, Shen T, Ma C W, Sang J X, Xing C C, Zheng J H, Zhuang S L 2024 *Opt. Lett.* **49** 3528
- [23] Chen K X, Xu C T, Zhou Z, Li Z L, Chen P, Zheng G X, Hu W, Lu Y Q 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2100591
- [24] Li P, Xue J M, Fan X H, Wu X G, Zhou L, Chen W Q, Liu S, Wei B Y, Gan X T, Zhao J L 2024 *Laser Photonics Rev.* **18** 2400088
- [25] Shao Z L, Xie X, Zhou Y J, Zhang X H, Du W J, Fan F, Tang D L 2022 *Nanophotonics* **11** 4455
- [26] Xie X, Du W J, Shao Z L, Zhou Y J, Lou Z L, Ji R N, Wen D D, Wei B Y, Gan X T, Zhao J J, Fan F, Tang D L 2023 *Laser Photonics Rev.* **17** 2300193
- [27] Xu X, Qiao S Y, Guo Y H, Zhang Q, Fu G Q, Pu M B, Fan Y L, Li X Y, Zhang F, Xu M F, Duan F, Luo X G 2024 *Laser Photonics Rev.* **18** 2400168
- [28] Li Y, Liu Y D, Li S D, Zhou P C, Zhan T, Chen Q M, Su Y K, Wu S T 2019 *Opt. Express* **27** 9054
- [29] Wang D, Li Y L, Zheng X R, Ji R N, Xie X, Song K, Lin F C, Li N N, Jiang Z, Liu C, Zheng Y W, Wang S W, Lu W, Jia B H, Wang Q H 2024 *Nat. Commun.* **15** 8242
- [30] Depasse F, Paesler M, Courjon D, Vigoureux J 1995 *Opt. Lett.* **20** 234
- [31] Se-yuen M 1986 *Phys. Educ.* **21** 365
- [32] Aliyu A A M, Olaniyan A 2016 *Int. J. Comput. Appl.* **135** 46

Multidimensional multiplexing holographic image technology and its encryption application based on liquid crystal light orientation*

WANG Yushuai CHEN Fangfang SANG Jingxin ZHANG Ziyu
LI Yichen ZHENG Jihong[†]

(*Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

(Received 19 September 2025; revised manuscript received 31 January 2026)

Abstract

The remarkable progress in photoalignment technology has greatly propelled the development of planar liquid crystal devices based on the Pancharatnam-Berry (PB) phase. Currently, by leveraging properties such as birefringence and optical rotatory dispersion of liquid crystal molecules, along with tailored micro-/nano-structural designs, these planar devices can achieve multidimensional multiplexing functions, including spatial, polarization, wavelength, and angular multiplexing. Nevertheless, significant opportunities remain to further enhance their information capacity and the number of multiplexing channels.

This study proposes and experimentally validates a novel multidimensional multiplexing holographic image encryption method based on liquid crystal photoalignment. Central to our approach is the fabrication of planar liquid crystal optical elements via a single-step exposure process enabled by a liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM). Compared with conventional multi-step lithography techniques, this method substantially simplifies the manufacturing process. Within a single device, we exploit three independent physical dimensions for information encoding and encryption. First, polarization multiplexing is achieved by leveraging the orientational degeneracy of liquid crystal molecules in accordance with Malus's law, enabling independent encoding of two binary images in the near field. Second, spatial position multiplexing is realized through a modified Gerchberg-Saxton (GS) algorithm based on Fresnel diffraction theory, allowing distinct images to be reconstructed at predetermined propagation distances. Third, wavelength multiplexing is implemented by utilizing the dispersive relationship between reconstruction distance and incident wavelength, ensuring that specific images are retrievable only under illumination with their corresponding wavelength.

By integrating these three mechanisms, we successfully designed and fabricated a six-channel encryption system on a single planar liquid crystal element. This system comprises two near-field polarization channels and four far-field holographic channels, which combine both wavelength-multiplexed and position-multiplexed images. Experimental results demonstrate the successful and independent reconstruction of various target patterns, including alphanumeric characters and QR codes. Furthermore, to enhance security, we establish a nested encryption scheme that integrates this multidimensional physical encryption with the classical cryptographic algorithm—the Vigenère cipher. In this scheme, complete decryption requires simultaneous possession of multiple physical keys (correct wavelength, polarization state, and observation distance) along with the algorithmic key, thereby establishing a robust defense against partial information breaches.

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62475158).

[†] Corresponding author. E-mail: jihongzheng@usst.edu.cn

In conclusion, this work not only confirms the feasibility and considerable potential of planar liquid crystal devices for high-capacity, multidimensional optical encryption but also provides a practical and integrated framework for its implementation. The proposed method—characterized by simplified fabrication, a high degree of integration, and enhanced security through physical-algorithmic nesting—paves the way for next-generation optical security systems. It holds promising application prospects in fields such as high-security information storage, anti-counterfeiting, and optical data encryption, offering a viable pathway toward safeguarding information against future computational threats.

Keywords: liquid crystal light-controlled orientation, multi-dimensional reuse, optical encryption, holographic imaging

DOI: [10.7498/aps.75.20251293](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251293)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251293](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251293)



基于液晶光取向的多维复用全息图像技术及其加密应用

王裕帅 陈芳芳 桑景新 张子玉 厉怡辰 郑继红

Multidimensional multiplexing holographic image technology and its encryption application based on liquid crystal light orientation

WANG Yushuai CHEN Fangfang SANG Jingxin ZHANG Ziyu LI Yichen ZHENG Jihong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 090409 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251293

CSTR: 32037.14.aps.75.20251293

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251293>

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

基于矢量焦点超构透镜的偏振结构及高安全性光学加密

Polarization structures generated through metalenses with vectorial foci for high-security optical encryption

物理学报. 2025, 74(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250508>

轨道角动量复用三维加密全息图

Orbital angular momentum multiplexing three-dimensional encrypted hologram

物理学报. 2025, 74(6): 064205 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241444>

三维空间轨道角动量全息

Three-dimensional spatial orbital angular momentum holography

物理学报. 2024, 73(9): 094202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231822>

反射式光取向液晶偏振体全息柱透镜的特性

Characteristics of reflective liquid crystal polarization holographic cylindrical lenses

物理学报. 2025, 74(7): 076101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241794>

基于量子随机行走和多维混沌的三维图像加密算法

Three dimensional image encryption algorithm based on quantum random walk and multidimensional chaos

物理学报. 2022, 71(17): 170303 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220466>

无干涉编码孔径相关全息的多图像双重混沌压缩加密方法

Multi-image dual-chaotic compression encryption method for interferenceless coded aperture correlation holography

物理学报. 2026, 75(5): 170303 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251533>