

线偏光全息的正交再现

吴晨灏¹, 陈宇昕¹, 黄志云^{1,2*}, 宋海洋¹, 谭小地^{1,2**}

¹ 福建师范大学光电与信息工程学院, 信息光子学研究中心, 福建 福州 350117;

² 福建师范大学医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350117

摘要 报道了正交线偏光全息中的正交再现现象。所谓的正交再现,指的是衍射光的偏振态与记录信号光的偏振态是正交的。基于新发展的张量偏光全息理论,分析了正交再现的条件;搭建实验平台,在实验上观察到正交再现现象。通过定量分析与多组实验,可以得出当衍射光实现正交再现时,其功率大小与记录过程中信号光和参考光的干涉夹角有关。实验结果和理论分析结果完全吻合。正交再现现象的发现,有望拓展对偏光全息理论的认知。

关键词 全息; 偏振态; 张量理论; 正交再现

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0409001

Orthogonal Reconstruction in Linear Polarization Holography

Wu Chenhao¹, Chen Yuxin¹, Huang Zhiyun^{1,2*}, Song Haiyang¹, Tan Xiaodi^{1,2**}

¹ Information Photonics Research Center, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117, China;

² Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117, China

Abstract In this paper, we investigate the orthogonal reconstruction in orthogonal linear polarization holography. Orthogonal reproduction means that the polarization of the diffracted light is orthogonal to the polarization of the recorded signal light. Based on the newly developed polarization holography theory with the tensor method, we analyzed the prerequisite for orthogonal reconstruction and verified it experimentally by constructing an experimental platform. Through quantitative analysis and multiple experiments, the power of the diffracted light was related to the interference angle between the recorded signal light and reference light during the recording process when the diffracted light was subjected to orthogonal reconstruction. The experimental results are in good agreement with the results obtained via theoretical analysis. Thus, our knowledge related to polarization holography may be improved through orthogonal reconstruction.

Key words holography; polarization states; tensor theory; orthogonal reconstruction

OCIS codes 090.2910; 090.2880

1 引言

传统全息于 1948 年由匈牙利科学家 Gabor 首次提出,是通过两束相干光的干涉记录光的振幅和相位信息^[1]。与传统全息不同的偏光全息,是通过两束不同偏振态光的相互干涉,用偏振敏感材料来

记录,记录信息不仅包含光的振幅和相位信息,还包含光的偏振态信息^[2]。

偏光全息自 1974 年被提出之后,引起了研究人员的广泛兴趣^[3-10]。早期的理论研究主要利用琼斯矩阵,然而该理论仅在傍轴近似的条件(信号光和参考光之间的干涉角近似为零)下才能成立^[2]。为了

收稿日期: 2020-07-24; 修回日期: 2020-07-30; 录用日期: 2020-08-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0701800)

* E-mail: zhiyunhuang@fjnu.edu.cn; ** E-mail: xtan@fjnu.edu.cn

突破傍轴条件的限制,2011 年 Kuroda 等^[11-12]提出了基于张量方法的偏光全息理论。该理论将记录材料对偏振光场的响应用张量方法进行表述,突破了傍轴条件的限制,可以研究任意干涉角度下偏光全息的性质,并且在采用傍轴近似条件后,该理论的结果与基于琼斯矩阵得到的结果一致。因此,张量偏光全息理论具有普适性和全面性。

基于该理论的指导,大角度记录的偏光全息研究有了很大的进展。在满足布拉格条件时,一些新的现象被陆续报道,如忠实再现、零再现等^[13-19]。所谓的忠实再现,指的是衍射光的偏振态与信号光完全相同,这意味着存储在材料中的光信息可以被正确地读取,其在微纳加工、图像显示等领域有重要的应用。零再现指的是在读取光不为 0 时,衍射光功率为 0 的现象。但是否存在衍射光的偏振态与信号光正交的实验现象,即正交再现,目前还未见有关报道。

由于线偏振光最为简单,基于正交线偏光全息的各种再现现象无需严格的曝光条件,且实验现象较易观察,故本文基于正交线偏光全息研究正交再现。首先推导了正交线偏振光在大角度下实现正交再现的条件,然后通过实验进行了验证,最后指出了正交再现的潜在应用。

2 基本原理

偏光全息可以分为记录和再现两个过程,如图 1(a)和图 1(b)所示。设定信号光为 s 线偏光,参考光为 p 线偏光,下标“+”和“-”分别表示信号光波和参考光波。其中,s 线偏光的偏振方向与 y 轴平行,p 线偏光的偏振方向在 x-z 平面,x-y 平面平行于材料的表面,z 轴表示材料的深度方向。

在记录过程中,如图 1(a)所示,信号光与参考光分别以角度 θ_+ 和角度 θ_- 在材料表面干涉生成记录光栅。两个正交偏振的单位向量定义为

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{p}_j = \begin{pmatrix} \cos \theta_j \\ 0 \\ \sin \theta_j \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中,向量 \mathbf{s} 和 $\mathbf{p}_j (j = +, -)$ 分别表示 s 线偏光和 p 线偏光的单位矢量。

在再现过程中,如图 1(b)所示,用具有不同偏振态的再现参考光 \mathbf{F} 读取全息图。基于张量偏光全息理论^[11],可以将相应的衍射光描述为

$$\mathbf{G}_F \propto \mathbf{X} - (\mathbf{X} \cdot \mathbf{k}_+) \mathbf{k}_+ = \mathbf{X}_+ + \{\mathbf{X}_- - (\mathbf{X}_- \cdot \mathbf{k}_+) \mathbf{k}_+\}, \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \mathbf{X}_+ + \mathbf{X}_- \\ \mathbf{X}_+ = B(\mathbf{G}_-^* \cdot \mathbf{F}) \mathbf{G}_+ \\ \mathbf{X}_- = A(\mathbf{G}_+ \cdot \mathbf{G}_-^*) \mathbf{F} + B(\mathbf{G}_+ \cdot \mathbf{F}) \mathbf{G}_-^* \end{cases}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{k}_+ 表示的是信号光的单位波矢量; \mathbf{G}_+ 和 \mathbf{G}_- 表示信号光和参考光的矢量振幅;上标*表示复共轭;A 和 B 分别表示材料对光强的响应以及材料对光场偏振态的响应。A 和 B 不是固定的值,在实验中会随着曝光时间的变化而改变。

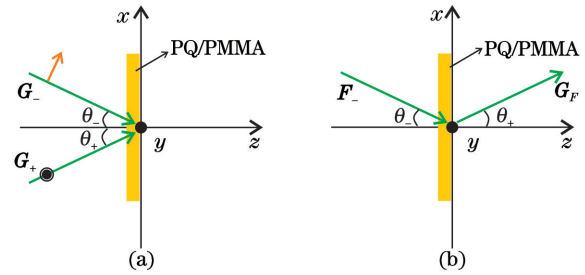


图 1 偏光全息原理图。(a)记录过程;(b)再现过程

Fig. 1 Schematic diagram of polarization holography.

(a) Recording stage; (b) reading stage

由于本研究只关注衍射光的偏振态,故可以将信号光与参考光的强度都设为 1。据上文可知,记录信号光为 s 线偏光,记录参考光为 p 线偏光,故

$$\mathbf{G}_+ = \mathbf{s}, \mathbf{G}_- = \mathbf{p}_-. \quad (4)$$

用任意偏振方向的线偏振光作为再现参考光,则再现参考光可以表示为

$$\mathbf{F} = \sin \alpha \cdot \mathbf{s} + \cos \alpha \cdot \mathbf{p}_-, \quad (5)$$

其中系数 α 表示再现参考光与水平轴的夹角。

将(4)式和(5)式代入(2)~(3)式中,可得衍射光的表达式为

$$\mathbf{G}_F \propto \cos \alpha \cdot B \mathbf{s} + \sin \alpha \cos \theta \cdot B \mathbf{p}_+, \quad (6)$$

其中 $\theta = |\theta_+ - \theta_-|$,表示记录信号光 \mathbf{G}_+ 和记录参考光 \mathbf{G}_- 之间的夹角。

由(6)式可知,在正交线偏振光记录条件下,当用任意偏振方向的线偏振光读取全息图时,衍射光中通常包含了 s 偏振和 p 偏振两个成分。然而要实现正交再现,即衍射光的偏振态与信号光的偏振态为正交的,则要求衍射光中仅含有 p 偏振的成分,故需要满足的条件

$$\cos \alpha = 0, \sin \alpha \neq 0, \cos \theta \neq 0, \quad (7)$$

此时,再现参考光和衍射光分别为

$$\mathbf{F} \propto \mathbf{s}, \mathbf{G}_F \propto \mathbf{p}_+. \quad (8)$$

(7)式意味着只要满足记录信号光和参考光之间的夹角不为 90° 这一条件,就可以利用 s 线偏振光作为再现参考光读取材料上记录的全息图,从而实

现正交再现。

3 实验步骤与结果分析

3.1 实验步骤

对正交线偏振光在大角度干涉下衍射光的偏振特性进行实验研究。实验装置如图 2 所示。使用扩束仪(BE)将一束波长为 532 nm 的激光进行扩束,扩束光通过孔径光阑后光斑直径约为 8 mm,并通过偏振分束器 PBS1 进行偏振分束,使之分为信号光和参考光。设定通过偏振分束器 PBS1 的反射光,即 s 线偏振光为信号光,通过偏振分束器 PBS1

的透射光,即 p 线偏振光为参考光。半波片 HWP1 的作用是使信号光和参考光的功率比为 1:1,调整后测得每束光的光功率均为 39 mW。旋转半波片 HWP2 至快轴与水平方向平行,记录下此时半波片 HWP2 的位置。根据半波片的工作原理,可知此时通过半波片 HWP2 的光仍为 p 线偏振光。这样在再现过程中通过旋转半波片 HWP2,就可以得到任意偏振方向的再现参考光。偏振分束器 PBS2 将衍射光分为 p 偏振分量和 s 偏振分量,然后使用功率计 PM1 和 PM2 分别测量衍射光各分量的功率变化情况,以此来分析衍射光的偏振态。

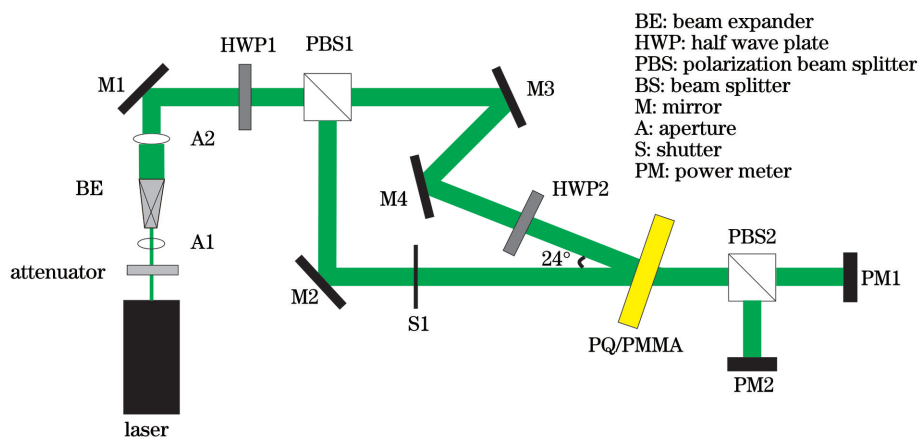


图 2 正交线偏光全息实验示意图

Fig. 2 Experimental schematic of orthogonal linear polarization holography

在记录过程中,打开快门 S1,此时信号光与参考光在材料外表面的夹角约为 24° 。实验所用的记录材料为掺杂菲醌的聚甲基丙烯酸甲酯(PQ/PMMA),是一种常见的致聚合物材料,在波长 532 nm 处的折射率约为 1.51^[20]。经过计算,材料内部的夹角约为 15.8° ,满足大角度记录条件。记录材料曝光 10 min 后关闭快门 S1,此时再现过程开始。旋转半波片 HWP2 一周,记录下功率计 PM1 和 PM2 的变化。

3.2 实验结果分析

图 3 所示为半波片 HWP2 旋转一周(360°)时,衍射光中 p 偏振分量和 s 偏振分量的功率变化。半波片 HWP2 旋转 45° 时,再现参考光为 s 线偏光,衍射光中 p 偏振分量的功率达到最大值 $214 \mu\text{W}$,而 s 偏振分量的功率则达到最小值,约为 $2 \mu\text{W}$,消光比为 $214:2=107:1$ 。考虑到实验中噪声的影响,可以认为此时衍射光中只有 p 偏振分量而无 s 偏振分量,即得到了正交再现的现象。在 360° 的范围内,不仅在 45° 的时候出现了该现象,在 135° 、 225° 、 315° 的时候也可以得到正交再现的现象,彼此间隔为

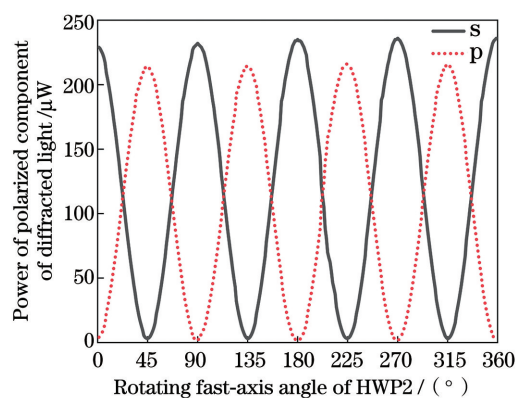


图 3 衍射光偏振分量与 HWP2 快轴旋转角度关系

Fig. 3 Power of polarized component of diffracted light varying with rotating fast-axis angle of HWP2

90° 左右。根据理论分析和半波片的工作原理,为了实现正交再现,半波片 HWP2 旋转的理论角度须为 45° 、 135° 、 225° 、 315° 。由此可知,实验数据与理论值相吻合,本文新发展的张量偏光全息理论得以验证。

从图 3 我们还可以观察到忠实再现的现象。在半波片 HWP2 旋转大约 90° 的时候,再现参考光为 p 线偏光,衍射光中 s 偏振分量的功率达到最大值

230 μW , 而 p 偏振分量的功率达到最小值, 约为 1 μW , 消光比为 230:1。考虑到实验中噪声的影响, 可以认为此时再现信号光中只有 s 线偏光, 而 p 线偏光已经消光, 此为忠实再现现象, 即衍射光的偏振方向与记录信号光的偏振方向一致。在 360° 的范围内, 不仅在约 90° 的时候出现了该现象, 在 0° (360°)、180°、270° 的时候也可以看到忠实再现的现象, 这与理论值也吻合。

从图 3 还可发现, 正交再现时 p 偏振分量的峰值

表 1 不同干涉角度时的实验结果

Table 1 Experimental results with different interference angles

External interference angle / (°)	Internal interference angle / (°)	Orthogonal reconstruction power / μW	Faithful reconstruction power / μW	Power ratio	Theoretical value ($\cos^2 \theta$)
24	15.8	214	230	0.930	0.9260
40	26.2	120	147	0.816	0.8051
59	38.1	215	343	0.627	0.6193
95	58.5	26.8	98	0.273	0.2737

图 4 所示为归一化的、不同干涉角度的衍射功率随半波片旋转角度的变化曲线。

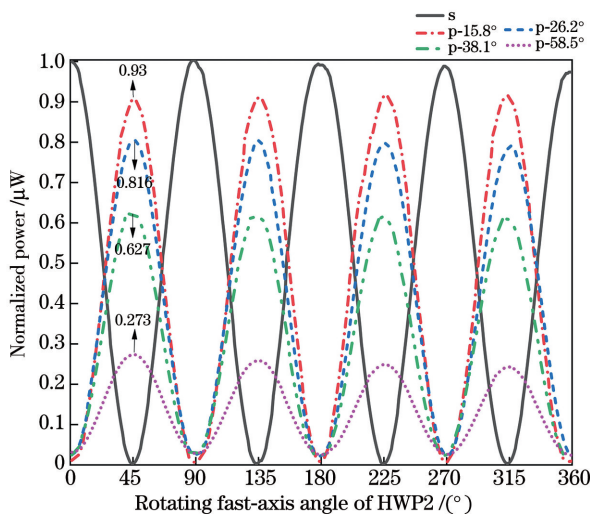


图 4 不同干涉角度时归一化的衍射光偏振分量与 HWP2 快轴旋转角度关系

Fig. 4 Normalized power of polarized component of diffracted light varying with rotating fast-axis angle of HWP2 for different interference angles

综合以上 4 组实验, 随着干涉角度的增大, 正交再现时衍射光的曲线峰值不断减小, 变化情况与理论值 $\cos^2 \theta$ 吻合。特别地, 当该夹角为 90° 时, 使用 s 线偏光作为再现参考光可得到零再现^[3]。这与图 4 所示的实验结果也是自洽的。

功率略低于忠实再现时 s 偏振分量的峰值功率。这种差别可能源于信号光和参考光的夹角。根据 (6) 式, 正交再现时, 干涉角的余弦值会影响衍射光 p 偏振分量的功率, 所以实验中观测到的 p 偏振分量的峰值功率要低一些。为了验证此想法, 改变信号光与参考光的夹角, 重复上述实验。实验中, 材料外部的干涉角分别为 40°、59° 以及 95° 时, 对应的内部干涉角分别为 26.2°、38.1° 以及 58.5°。当衍射光分别实现正交再现以及忠实再现时, 实验结果如表 1 所示。

4 结 论

研究了大角度记录下正交线偏振光全息中的正交再现现象。记录过程的信号光为 s 线偏光, 参考光为 p 线偏光, 两者在材料内部的夹角约为 15.8°。当再现参考光为 s 线偏光时, 衍射光的偏振方向与记录信号光的偏振方向是正交的。正交再现现象的产生不仅与记录光和参考光的偏振方向有关, 同时也与记录信号光和参考光的夹角有关。正交再现这一现象在拓展偏光全息理论的同时, 有望应用于图像显示、偏振探测、设计多功能衍射器件或者微纳光学元件^[21-24]; 在光全息存储领域, 该现象可以应用于增强体全息的光存储密度^[25-26]。

参 考 文 献

- [1] Gabor D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- [2] Nikolova L, Ramanujam P S. Polarization holography[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [3] Zang J L, Kang G G, Li P, et al. Dual-channel recording based on the null reconstruction effect of orthogonal linear polarization holography[J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1377-1380.
- [4] Hong Y F, Kang G G, Zang J L, et al. Investigation of faithful reconstruction in nonparaxial

- approximation polarization holography [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(36): 10024-10029.
- [5] Hong Y F, Zang J L, Liu Y, et al. Review and prospect of polarization holography [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 588-602, 702.
洪一凡, 臧金亮, 刘颖, 等. 偏光全息研究历程与展望 [J]. *中国光学*, 2017, 10(5): 588-602, 702.
- [6] Huang T, Wagner K H. Coupled mode analysis of polarization volume hologram [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(2): 372-390.
- [7] Nikolova L, Todorov T, Ivanov M, et al. Polarization holographic gratings in side-chain azobenzene polyesters with linear and circular photoanisotropy [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(20): 3835-3840.
- [8] Todorov T, Nikolova L, Tomova N, et al. Photoinduced anisotropy in rigid dye solutions for transient polarization holography [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(8): 1262-1267.
- [9] Todorov T, Nikolova L, Stoyanova K, et al. Polarization holography 3: some applications of polarization holographic recording [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(6): 785-788.
- [10] Wei R, Zang J L, Liu Y, et al. Review on polarization holography for high density storage [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180598.
魏然, 臧金亮, 刘颖, 等. 应用于高密度存储的偏光全息技术研究进展 [J]. *光电工程*, 2019, 46(3): 180598.
- [11] Kuroda K, Matsushashi Y, Fujimura R, et al. Theory of polarization holography [J]. *Optical Review*, 2011, 18(5): 374-382.
- [12] Kuroda K, Matsushashi Y, Shimura T. Reconstruction characteristics of polarization holograms [C] // 2012 11st Euro-American Workshop on Information Optics, August 20-24, 2012, Quebec City, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2012: 1-2.
- [13] Zang J L, Wu A A, Liu Y, et al. Characteristics of volume polarization holography with linear polarization light [J]. *Optical Review*, 2015, 22(5): 829-831.
- [14] Wu A A, Kang G G, Zang J L, et al. Null reconstruction of orthogonal circular polarization hologram with large recording angle [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8880-8887.
- [15] Zhang Y Y, Kang G G, Zang J L, et al. Inverse polarizing effect of an elliptical-polarization recorded hologram at a large cross angle [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4126-4129.
- [16] Wang J, Kang G, Wu A, et al. Investigation of the extraordinary null reconstruction phenomenon in polarization volume hologram [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1641-1647.
- [17] Huang Z Y, He Y W, Dai T G, et al. Prerequisite for faithful reconstruction of orthogonal elliptical polarization holography [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(10): 102409.
- [18] Shao L, Zang J L, Fan F L, et al. Investigation of the null reconstruction effect of an orthogonal elliptical polarization hologram at a large recording angle [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(36): 9983-9989.
- [19] Huang Z Y, He Y W, Dai T G, et al. Null reconstruction in orthogonal elliptical polarization holography read by non-orthogonal reference wave [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 131: 106144.
- [20] Liu Y, Li Z Z, Zang J L, et al. The optical polarization properties of phenanthrenequinone-doped Poly(methyl methacrylate) photopolymer materials for volume holographic storage [J]. *Optical Review*, 2015, 22(5): 837-840.
- [21] Martinez-Ponce G, Petrova T, Tomova N, et al. Bifocal-polarization holographic lens [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(9): 1001-1003.
- [22] Jiang Z X, Gui J B, Wang G Q, et al. Overview of holographic-compression technology for three-dimensional display [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 240001.
姜智翔, 桂进斌, 王国庆, 等. 用于三维显示的全息压缩技术概述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 240001.
- [23] Srikhirin T, Cimrova V, Schiewe B, et al. An investigation of the photoinduced changes of absorption of high-performance photoaddressable polymers [J]. *Chemphyschem*, 2002, 3(4): 335-342.
- [24] Zhao F, Chen X N, Wang D C. Metalens design and simulation for simultaneous focusing of orthogonal circularly polarized light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1024001.
赵峰, 陈向宁, 王得成. 正交圆偏振光同时聚焦的超透镜设计与仿真 [J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1024001.
- [25] Tan X D, Lin X, Wu A A, et al. High density collinear holographic data storage system [J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2014, 7(4): 443-449.
- [26] Lin X, Hao J Y, Zheng M J, et al. Optical holographic data storage: the time for new development [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180642.
林泉, 郝建颖, 郑明杰, 等. 光全息数据存储: 新发展时机已至 [J]. *光电工程*, 2019, 46(3): 180642.