

# 线偏振光全息的忠实再现条件研究

齐沛良, 王瑾瑜, 宋海洋, 陈宇昕, 朱莉莉\*, 谭小地\*\*

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

**摘要** 在基于张量的偏光全息理论的基础上, 使用偏振方向在入射面内的线偏振光作为记录参考光, 记录干涉夹角为  $90^\circ$  时, 只需满足再现光与记录参考光的偏振方向非相互正交, 就可以实现对信号光偏振态的忠实再现, 再现光光强受读取参考光偏振态的影响。理论与实验结果证实了这一更宽松条件下对信号光忠实再现的可能性。该结论有助于拓展人们对偏光全息理论的认识, 并可依此结论设计和制作出用于改变入射光传播方向的偏振器件。

**关键词** 全息; 偏振态; 张量理论; 忠实再现

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2309001

## Faithful Reconstruction Condition of Linear Polarization Holography

Qi Peiliang, Wang Jinyu, Song Haiyang, Chen Yuxin, Zhu Lili\*, Tan Xiaodi\*\*

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

**Abstract** According to the tensor based polarization light holography theory, we find that the faithful reconstruction of the polarization state of the signal light can be realized as long as the polarization directions of the read reference light and the reconstructed light are not orthogonal to each other, when the linearly polarized light with polarization direction in the incident plane is taken as the recording reference light and the interference angle at the recording stage is  $90^\circ$ . Besides, the intensity of the reconstructed light is affected by the polarization state of the read reference light. Furthermore, the faithful reconstruction of signal light under more relaxed conditions is verified by the theoretical and experimental results. This conclusion is helpful to extend our cognition of polarization holography, and based on this, we can design and fabricate polarization devices to change the propagation direction of the incident light.

**Key words** holography; polarization states; tensor theory; faithful reconstruction

**OCIS codes** 090.1970; 090.2880; 090.2900; 090.2910

## 1 引 言

全息技术自诞生至今已有 80 年, 其在数字图像处理<sup>[1-2]</sup>、干涉计量<sup>[3]</sup>等领域都有广泛的应用。与传统全息相比, 偏光全息不仅记录了光波的振幅和相位信息, 同时还记录了光波的偏振信息<sup>[4-5]</sup>, 因此自 1974 年被提出后就引起了研究人员的广泛兴趣<sup>[6]</sup>。2009 年 Nikolova 和 Ramanujam<sup>[7]</sup> 引入了琼斯矩阵来描述偏光全息的记录与再现过程, 建立起了一套较为完整的偏光全息理论, 但该理论仅在傍轴近似(即信号光和参考光之间的干涉夹角近似为零)的条件下才能成立。2012 年 Kuroda 等<sup>[8]</sup> 提出了基于张量的偏光全息理论, 该理论利用三维张量方法处理

记录材料对偏振光场的响应, 突破傍轴条件的限制, 可用于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, 基于张量的偏光全息理论具有普遍性和全面性。

有关基于张量的偏光全息理论的研究近几年有了很大进展。这些研究在满足布拉格条件时发现了一些新的现象, 如忠实再现、零再现等。忠实再现是指衍射光的偏振态与信号光完全相同, 这意味着存储材料中的光信息可以被正确地读取, 这在全息存储、微纳加工、图像显示等领域有重要的应用。零再现指在满足布拉格条件时衍射光强度为零的现象。Wu 等<sup>[9]</sup> 和 Zhang 等<sup>[10]</sup> 分别验证了圆偏光和

收稿日期: 2020-06-29; 修回日期: 2020-08-12; 录用日期: 2020-08-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0701800)

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

椭圆偏光在正交记录条件下,在强度响应光栅和偏振响应光栅达到平衡时的忠实再现及零再现现象;Wang 等<sup>[11]</sup>验证了正交圆偏振光记录条件下偏光全息零再现的机理;Zang 等<sup>[12]</sup>验证了大角度下实现线偏振光的忠实再现需要的实验条件,依据该条件,只有在记录的强度响应光栅和偏振响应光栅达到平衡且记录与再现参考光的偏振方向一致时,信号光波的偏振状态才可以被忠实地再现出来,实验中很难实现该条件,这极大地限制了线偏振光全息的应用。

本文在基于张量的偏光全息理论的基础上,提出了当使用偏振方向在入射面内的线偏振光作为参考光且记录夹角为  $90^\circ$  时,不需要满足强度响应光

栅和偏振响应光栅的平衡就能够实现对信号光的忠实再现的观点,并通过实验加以验证。本文研究极大地降低了在实验中实现线偏振光全息的忠实再现的难度。最后对全文进行了总结,并指出了基于该宽松条件的可能应用。

## 2 理论分析

偏振全息的记录和再现过程如图 1 所示。为了便于描述,定义  $\theta$  为两束记录光在传播方向上的夹角,即干涉夹角, $s$  偏振方向平行于坐标系  $y$  轴方向, $p$  偏振方向在  $x-z$  平面内,与光波传播方向垂直。 $G_+$ 、 $G_-$ 、 $F_-$ 、 $G_F$  分别表示信号光、记录参考光、读取参考光和再现光。

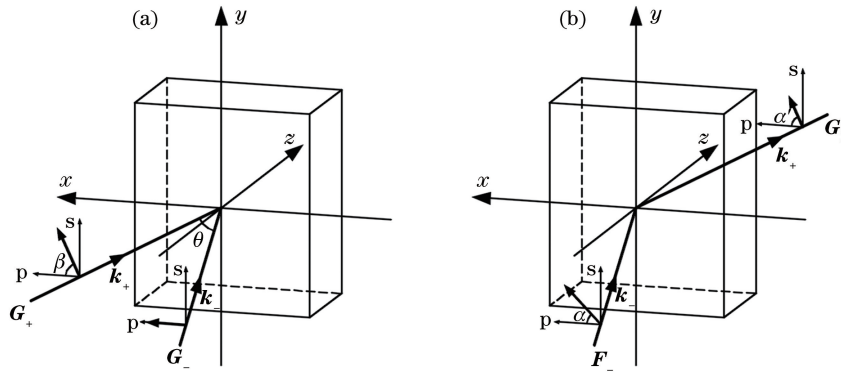


图 1 偏振全息示意图。(a)记录过程;(b)再现过程

Fig. 1 Diagrams of polarization holography. (a) Recording process; (b) reconstructing process

基于张量的偏光全息理论,在记录过程中,信号光与记录参考光以角度  $\theta$  发生干涉,在具有偏振敏感特性的材料中记录偏振干涉光场。此时曝光后材料的介电张量表达式为<sup>[13]</sup>

$$\underline{\epsilon} = \epsilon_1 \mathbf{1} + A |\mathbf{E}|^2 \mathbf{1} + B(\mathbf{E}\mathbf{E}^* + \mathbf{E}^*\mathbf{E}), \quad (1)$$

式中: $\epsilon_1$  表示曝光前各向同性材料的介电常数; $\mathbf{1}$  代表二阶单位张量;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,由材料本身的属性所决定,表征了强度响应光栅和偏振响应光栅记录的程度,会随着曝光能量的变化而改变; $\mathbf{E}$  为记录信号光和参考光的偏振干涉光场的电矢量,可以表示为

$$\mathbf{E} = \mathbf{G}_+ \exp(i\mathbf{k}_+ \cdot \mathbf{r}) + \mathbf{G}_- \exp(i\mathbf{k}_- \cdot \mathbf{r}), \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}$  表示位置矢量; $\mathbf{k}_j$  ( $j = +, -$ ) 为信号光和记录参考光的传播矢量。按照图 1 所示的坐标系, $\mathbf{k}_j$  ( $j = +, -$ ) 可表示为

$$\mathbf{k}_+ = \begin{bmatrix} k \sin \theta_+ \\ 0 \\ k \cos \theta_+ \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_- = \begin{bmatrix} k \sin \theta_- \\ 0 \\ k \cos \theta_- \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $k$  是单位波矢量的辐值; $\theta_+$  为信号光束与  $z$  轴的夹角, $\theta_-$  为参考光束与  $z$  轴的夹角, $\theta_+ + \theta_- = \theta$ 。

在再现过程中,用严格满足布拉格条件的读取参考光  $\mathbf{F}_-$  对偏光全息进行再现,将曝光后的介电张量公式[(1)式]代入麦克斯韦波动方程,并求解耦合波方程,可以得到再现光波  $\mathbf{G}_F$  的表达式<sup>[14]</sup>:

$$\mathbf{G}_F \propto \mathbf{X} - (\mathbf{X} \cdot \hat{\mathbf{k}}_+) \hat{\mathbf{k}}_+ = \mathbf{X}_+ + [\mathbf{X}_- - (\mathbf{X}_- \cdot \hat{\mathbf{k}}_+) \hat{\mathbf{k}}_+], \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \mathbf{X}_+ + \mathbf{X}_- \\ \mathbf{X}_+ = B(\mathbf{G}_+^* \cdot \mathbf{F}_-) \mathbf{G}_+ \\ \mathbf{X}_- = A(\mathbf{G}_+ \cdot \mathbf{G}_-^*) \mathbf{F}_- + B(\mathbf{G}_+ \cdot \mathbf{F}_-) \mathbf{G}_-^* \end{cases}. \quad (5)$$

如图 1(a)所示,信号光  $\mathbf{G}_+$  为任意线偏振光,记录参考光  $\mathbf{G}_-$  为  $p$  偏振光,满足

$$\mathbf{G}_+ = G_+ (\cos \beta \mathbf{p}_+ + \sin \beta \hat{\mathbf{s}}), \quad \mathbf{G}_- = G_- \mathbf{p}_-, \quad (6)$$

式中: $\beta$  为信号光偏振方向角; $\hat{\mathbf{s}} = [0 \ 1 \ 0]^T$ ;  $\mathbf{p}_+$  为信号光的单位振幅矢量, $\mathbf{p}_+$  与记录参考光的单位振幅矢量  $\mathbf{p}_-$  分别为

$$\mathbf{p}_+ = \begin{bmatrix} \cos \theta_+ \\ 0 \\ \sin \theta_+ \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}_- = \begin{bmatrix} \cos \theta_- \\ 0 \\ \sin \theta_- \end{bmatrix}. \quad (7)$$

在再现过程中,如图 1(b)所示,任意线偏振方向的读取参考光为

$$\hat{\mathbf{G}}_F \propto [B \cos \alpha \cos \beta + (A + B) \cos \beta \cos \alpha \cos^2 \theta + B \sin \beta \sin \alpha \cos \theta] \mathbf{p}_+ + (A \cos \beta \sin \alpha \cos \theta + B \sin \beta \cos \alpha) \hat{\mathbf{s}}. \quad (9)$$

由(9)式可见,再现光仍为线偏振光,其偏振方向不仅与信号光、记录参考光及读取参考光的偏振方向有关,还与材料强度响应光栅和偏振响应光栅的介电张量系数  $A$  和  $B$  以及  $\theta$  有关。由于相关因素太多,正常情况下,利用再现衍射光无法实现忠实再现。当记录干涉夹角  $\theta$  取  $90^\circ$  时,(9)式可简化为

$$\hat{\mathbf{G}}_F \propto B(\cos \alpha \cos \beta \mathbf{p}_+ + \cos \alpha \sin \beta \hat{\mathbf{s}}) = B \cos \alpha (\cos \beta \mathbf{p}_+ + \sin \beta \hat{\mathbf{s}}). \quad (10)$$

由(10)式可见,当记录参考光为  $p$  偏振,只要读取参考光的偏振方向角  $\alpha$  不为  $90^\circ$ ,利用再现衍射光就可以忠实再现出信号光的偏振方向。实现线偏振光忠实再现的过程避开了  $A+B=0$  这个苛刻的条件,极大降低了线偏振光的忠实再现的实验难度。因此可以得出结论,在  $\theta=90^\circ$  的条件下,当记录参考光为  $p$  偏振时,再现光可以忠实再现出信号光的偏振方向,且再现光的振幅和读取参考光的偏振方

向角  $\alpha$  的余弦值成正比,当读取参考光的偏振方向与记录参考光的偏振方向一致,即读取参考光为  $p$  偏振时,再现光的振幅最大;当读取参考光的偏振方向与记录参考光的偏振方向正交,即读取参考光为  $s$  偏振时,再现光的振幅为 0,产生零再现现象。

### 3 实验装置与材料

为了验证以上线偏振光的忠实再现条件,搭建了如图 2 所示的实验装置。通过空间滤波器将一束波长为 532 nm 的激光光束直径扩束为 8 mm,并将该光束通过偏振分束器 PBS1,使之分为信号光路和参考光路。半波片 HWP1 可以控制信号光和记录参考光的光强大小,使信号光和参考光的光强比为 1:1。信号光的偏振方向可以通过半波片 HWP2 改变。记录所用的偏振敏感材料为底面正方形边长为 1 cm 的 PQ/PMMA 块状材料<sup>[15-16]</sup>,如图 3 所示。

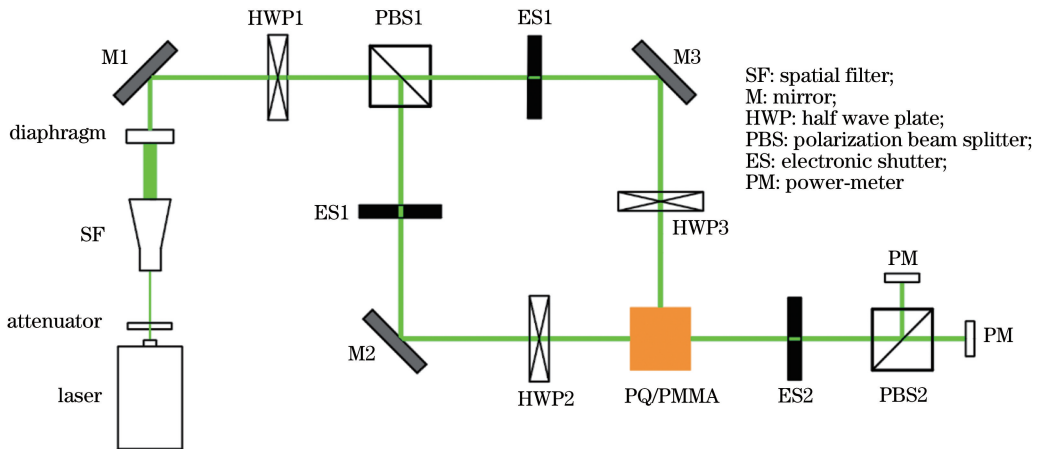


图 2 线偏振光全息光路图

Fig. 2 Light path of hologram of linearly polarized light

两束光从块状材料的相邻面正入射,保证了两束光的干涉夹角在块状材料内部为  $90^\circ$ 。为了实时观察记录材料对偏振干涉光场的响应,在记录过程中,需要短暂观察全息光栅记录的程度,实验通过周

期性地交替开关电子快门 ES1 和 ES3,控制偏振光全息干涉记录和短暂观察再现光的时间,每一个周期的干涉记录时间为 4 s,观察再现光的时间为 0.6 s。当再现光光强随着曝光时间的增加无明显

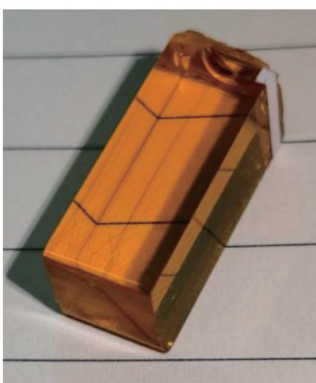


图 3 PQ/PMMA 块状材料  
Fig. 3 PQ/PMMA block material

上升趋势且光强大小保持相对稳定时,停止偏光全息记录。在偏振光的再现过程中,电子快门 ES1 关闭,电子快门 ES2 和 ES3 周期性地同步开、关,控制短暂观察再现光的时间为 0.6 s。在电子快门 ES2 关闭的情况下,通过半波片 HWP3 来改变读取参考光的偏振方向,从而观察再现光的偏振方向变化。再现光由 PBS2 分为 p 偏振分量和 s 偏振分量,二者再分别由后方功率计检测其光强的变化情况,以此可分析出再现光的偏振方向。

#### 4 实验结果与分析

实验中采用 p 偏振作为记录参考光,信号光分

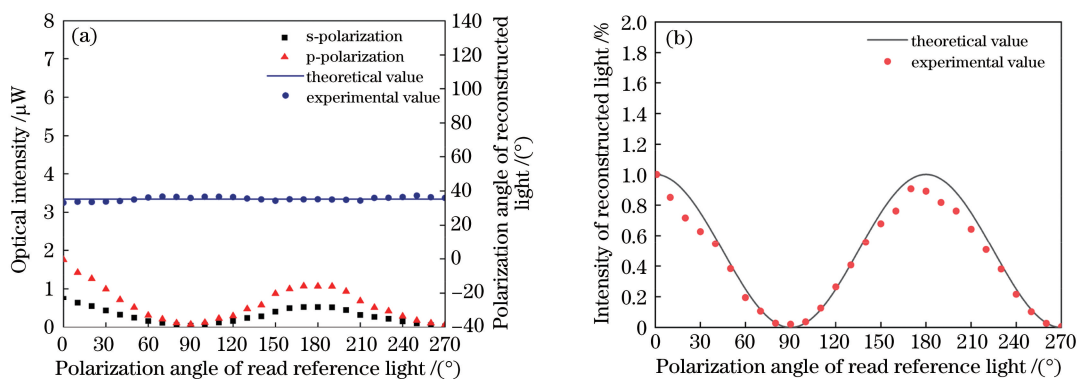


图 4 信号光为 p 偏振光时,再现光的偏振角度及 p 偏振、s 偏振光强与读取参考光偏振角度的关系,以及再现光光强与读取参考光偏振角度的关系。(a)再现光的偏振角度及 p 偏振、s 偏振光强与读取参考光偏振角度的关系;(b)再现光光强与读取参考光偏振角度的关系

Fig. 4 Relationship among polarization angle of reconstructed light, p-polarization light intensity, s-polarization light intensity, and polarization angle of read reference light, and relationship between intensity of reconstructed light and polarization angle of read reference light when signal light is p linear polarization light. (a) Relationship among polarization angle of reconstructed light, p-polarization light intensity, s-polarization light intensity, and polarization angle of read reference light; (b) relationship between intensity of reconstructed light and polarization angle of read reference light

由图 4~8 可见,当使用不同线偏振光进行记录时,无论读取参考光的偏振方向如何变化,再现光的

别选用偏振方向角  $\beta$  为  $0^\circ, 35.26^\circ, 45^\circ, 54.74^\circ, 90^\circ$  这 5 种情况下的线偏振光进行实验研究,如表 1 所示。

表 1 线偏振光的全息信号光波

Table 1 Holographic signal light of linear polarization light

$\beta / (^\circ)$	Optical intensity ratio of p-polarization and s-polarization
0	$+\infty$
35.26	2:1
45	1:1
54.74	1:2
90	0

当  $\beta$  为这 5 个数值时,信号光中 p 偏振分量与 s 偏振分量的光强比值为整数,这时方便进行实验观察,并可减小实验测量误差。再现过程中采用任意线偏振光作为读取参考光,实验结果如图 4~8 所示。图 4(a)、5(a)、6(a)、7(a)、8(a)中,三角形点和方块点分别表示实验测得的再现光中 p 偏振分量和 s 偏振分量的光强,圆点和实线分别表示再现光偏振方向角的实验值和理论值(右侧纵坐标);图 4(b)、5(b)、6(b)、7(b)、8(b)中,三角形点表示再现光 p 偏振分量与 s 偏振分量光强之和,实线表示再现光强理论值。

偏振方向角始终在记录所用信号光的偏振方向角附近,且光强度随着读取参考光的偏振方向角呈余弦

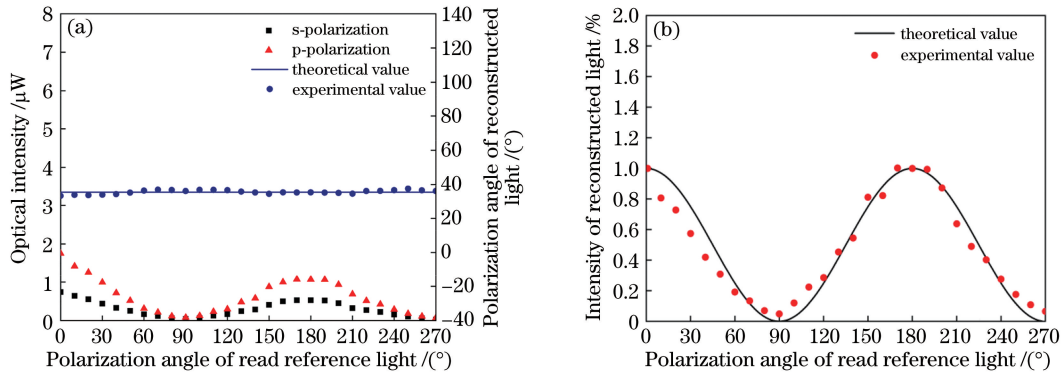


图 5 信号光为  $\beta=35.26^\circ$  的线偏振光时,再现光的偏振角度及 p 偏振、s 偏振光强与读取参考光偏振角度的关系,以及再现光光强与读取参考光偏振角度的关系。(a)再现光的偏振角度及 p 偏振、s 偏振光强与读取参考光偏振角度的关系;(b)再现光光强与读取参考光偏振角度的关系

Fig. 5 Relationship among polarization angle of reconstructed light, p-polarization light intensity, s-polarization light intensity, and polarization angle of read reference light, and relationship between intensity of reconstructed light and polarization angle of read reference light when signal light is linear polarization light with  $\beta$  of  $35.26^\circ$ . (a) Relationship among polarization angle of reconstructed light, p-polarization light intensity, s-polarization light intensity, and polarization angle of read reference light; (b) relationship between intensity of reconstructed light and polarization angle of read reference light

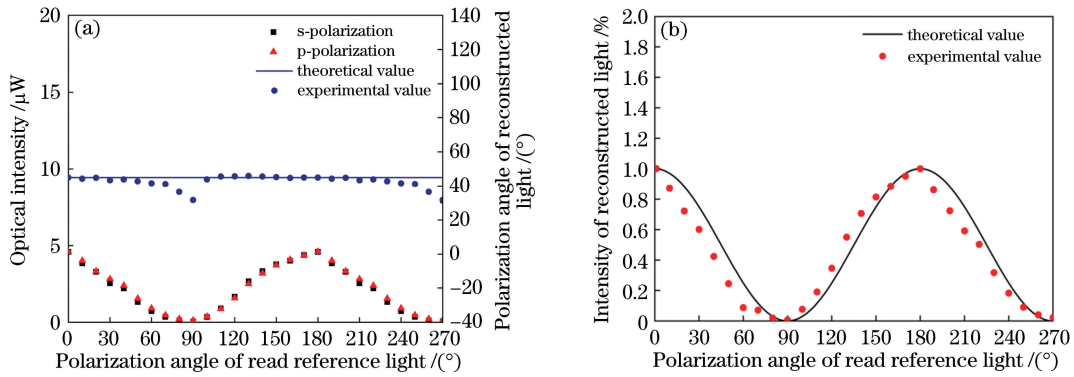


图 6 信号光为  $\beta=45^\circ$  的线偏振光时,再现光的偏振角度及 p 偏振、s 偏振光强与读取参考光偏振角度的关系,以及再现光光强与读取参考光偏振角度的关系。(a)再现光的偏振角度及 p 偏振、s 偏振光强与读取参考光偏振角度的关系;(b)再现光光强与读取参考光偏振角度的关系

Fig. 6 Relationship among polarization angle of reconstructed light, p-polarization light intensity, s-polarization light intensity, and polarization angle of read reference light, and relationship between intensity of reconstructed light and polarization angle of read reference light when signal light is linear polarization light with  $\beta$  of  $45^\circ$ . (a) Relationship among polarization angle of reconstructed light, p-polarization light intensity, s-polarization light intensity, and polarization angle of read reference light; (b) relationship between intensity of reconstructed light and polarization angle of read reference light

函数的二次方变化。需要注意的是,当读取参考光的偏振方向角在  $90^\circ$  与  $270^\circ$  这两个角度附近时,再现光偏振方向角的实验值与理论值有较大偏差,造成这个现象的原因是在读取参考光偏振方向角  $\alpha$  为  $90^\circ$  与  $270^\circ$  时,读取参考光偏振方向与参考光偏振方向相互正交,再现光的光强几乎为 0,产生零再现现象,而读取参考光偏振方向角取这两个角度附近的值时,再现光光强比较微弱,受外界干扰光的影响较

大,所以实验上在这两个角度附近会产生较大误差。去除这两个角度附近的无效数据,当信号光分别为 p 偏振光、 $\beta=35.26^\circ$  的线偏振光、 $\beta=45^\circ$  的线偏振光、 $\beta=54.74^\circ$  的线偏振光、s 偏振光时,再现光的偏振方向角  $\alpha'$  的平均误差为  $1.40^\circ$ 、 $0.95^\circ$ 、 $1.05^\circ$ 、 $0.70^\circ$ 、 $1.44^\circ$ 。由此可见再现光可以相对准确地反映出信号光的偏振状态。

综上所述,从实验中可得到以下结论:在干涉夹

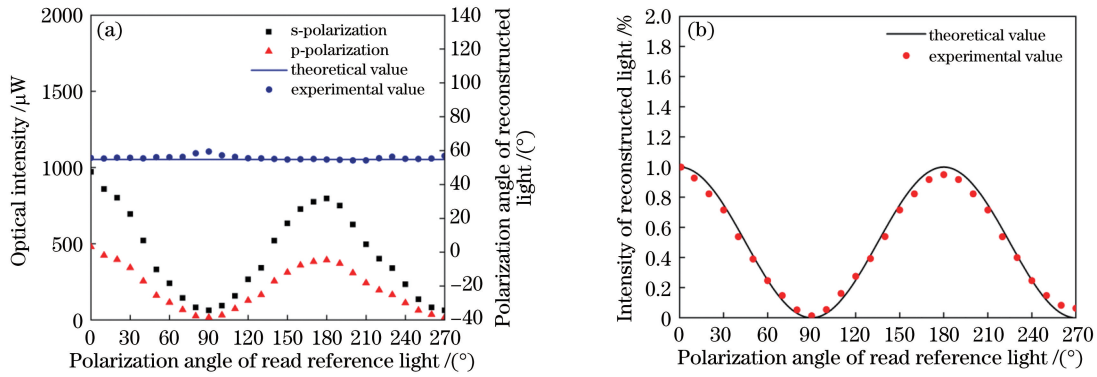


图 7 信号光为  $\beta=54.74^\circ$  的线偏振光时,再现光的偏振角度及 p 偏振、s 偏振光强与读取参考光偏振角度的关系,以及再现光光强与读取参考光偏振角度的关系。(a)再现光的偏振角度及 p 偏振、s 偏振光强与读取参考光偏振角度的关系;(b)再现光光强与读取参考光偏振角度的关系

Fig. 7 Relationship among polarization angle of reconstructed light, p-polarization light intensity, s-polarization light intensity, and polarization angle of read reference light, and relationship between intensity of reconstructed light and polarization angle of read reference light when signal light is linear polarization light with  $\beta$  of  $\beta=54.74^\circ$ . (a) Relationship among polarization angle of reconstructed light, p-polarization light intensity, s-polarization light intensity, and polarization angle of read reference light; (b) relationship between intensity of reconstructed light and polarization angle of read reference light

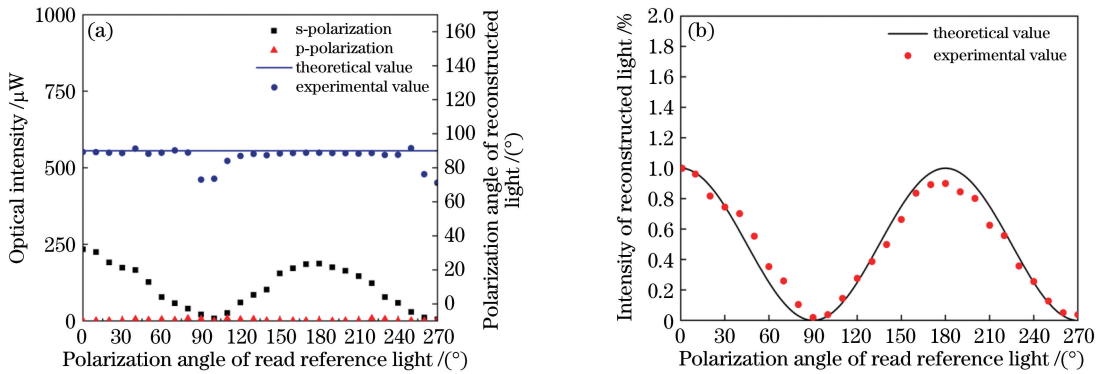


图 8 信号光为 s 偏振光时,再现光的偏振角度及 p 偏振、s 偏振光强与读取参考光偏振角度的关系,以及再现光光强与读取参考光偏振角度的关系。(a)再现光的偏振角度及 p 偏振、s 偏振光强与读取参考光偏振角度的关系;(b)再现光光强与读取参考光偏振角度的关系

Fig. 8 Relationship among polarization angle of reconstructed light, p-polarization light intensity, s-polarization light intensity, and polarization angle of read reference light, and relationship between intensity of reconstructed light and polarization angle of read reference light when signal light is s linear polarization light. (a) Relationship among polarization angle of reconstructed light, p-polarization light intensity, s-polarization light intensity, and polarization angle of read reference light; (b) relationship between intensity of reconstructed light and polarization angle of read reference light

角为  $90^\circ$  并使用 p 偏振光作为记录参考光时,对于任意偏振方向的线偏振信号光,只需读取参考光偏振方向与记录参考光偏振方向不相互正交,再现光就可以忠实再现出信号光的偏振状态。再现光光强与读取参考光偏振方向角  $\alpha$  有关,且与  $\cos^2 \alpha$  的值成正比。当读取参考光偏振方向与记录参考光偏振方向一致时,再现光光强最大;当读取参考光偏振方向与记录参考光偏振方向正交时,再现光光强为零,出

现零再现。该实验结果与理论相吻合。

## 5 结 论

通过控制记录夹角实现了线偏振光的忠实再现,通过理论和实验验证在干涉夹角为  $90^\circ$ 、记录参考光为 p 偏振光的条件下,使用任意线偏振光作为读取参考光,只需读取参考光偏振方向与记录参考光偏振方向不相互正交,就可以忠实再现出任意偏

振方向的线偏振信号光,这验证了在更宽松的条件下实现对信号光波的忠实再现的可能性。以往的研究已经表明偏振光全息有设计多功能光学器件(如双焦偏振全息透镜)的能力,而本研究结果也验证了偏振光全息具有制作偏振光学元件的潜力,由于本实验装置所采用的干涉记录夹角为 $90^\circ$ ,即入射光的传播方向与衍射光的夹角为 $90^\circ$ ,可以依此方式设计和制作出用于改变入射光传播方向的偏振器件。

## 参 考 文 献

- [1] Ren Z B, Edmund Y. Progress in optical scanning holography[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111009.  
任振波, 林彦民. 光学扫描全息术研究进展[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111009.
- [2] Qian G L, Wu J H, Li C M, et al. Design of 3D locking system for interference fringes of holographic grating [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0405001.  
钱国林, 吴建宏, 李朝明, 等. 全息光栅干涉条纹三维锁定系统的设计[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0405001.
- [3] Gao C, Wen Y F, Cheng H B, et al. Automatic phase-distortion compensation algorithm in digital holography[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1209001.  
高超, 文永富, 程灏波, 等. 数字全息中的自动相位畸变补偿算法 [J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1209001.
- [4] Lohmann A W. Reconstruction of vectorial wavefronts[J]. Applied Optics, 1965, 4(12): 1667-1668.
- [5] Fournery M, Waggoner A P, Mate K V. Recording polarization effects via holography[J]. Journal of the Optical Society of America, 1968, 58(5): 701-702.
- [6] Kakichashvili S D. Method for phase polarization recording of holograms [J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1974, 4(6): 795-798.
- [7] Nikolova L, Ramanujam P S. Polarization holography[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [8] Kuroda K, Matsubashi Y, Shimura T. Reconstruction characteristics of polarization holograms[C]//2012 11th Euro-American Workshop on Information Optics, August 20-24, 2012, Quebec City, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2012: 1-2.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Kuroda K, Matsubashi Y, Fujimura R, et al. Theory of polarization holography[J]. Optical Review, 2011, 18(5): 374-382.
- [14] Zang J L. Fundamental research on polarization holography based on tensor theory [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017: 54-58.  
臧金亮. 基于张量理论的偏光全息基础研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017: 54-58.
- [15] Liu Y, Fan F L, Hong Y F, et al. Volume holographic recording in Irgacure 784-doped PMMA photopolymer[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20654-20662.
- [16] Lin S H, Lin J H, Chen P L, et al. Doped poly (methyl methacrylate) photopolymers for holographic data storage [J]. Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 2006, 15(2): 239-252.