

# 利用动力学相位和几何相位操控光自旋霍尔效应中的自旋分裂

陈 敏, 罗朝明, 万 婷, 刘 靖

湖南理工学院信息与通信工程学院, 湖南 岳阳 414006

**摘要** 从理论和实验角度, 系统研究了基于动力学相位和几何相位来实现对光自旋霍尔效应中的自旋分裂的操控, 利用推广的费马原理, 理论上分析了这两类相位对光束传输行为的影响。结果表明, 几何相位可以操控光束的自旋分裂, 分裂的大小与超表面的空间旋转率有关, 分裂的方向与几何相位的梯度方向一致。动力学相位能操控光束的整体平移, 平移大小与动力学相位梯度相关, 平移方向与动力学相位梯度的方向一致。基于空间光调制器和超表面搭建了一套实验系统, 该系统证明了基于动力学相位和几何相位操控光自旋霍尔效应中自旋分裂方法的可行性。

**关键词** 物理光学; 自旋霍尔效应; 自旋相关分裂; 动力学相位; 几何相位

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0226002

## Manipulation of Spin Splitting in Spin Hall Effect of Light Based on Dynamic and Geometric Phases

Chen Min, Luo Zhaoming, Wan Ting, Liu Jing

*College of Information and Communication Engineer, Hunan Institute of Science and Technology,  
Yueyang, Hunan 414006, China*

**Abstract** The manipulation of spin splitting in spin Hall effect of light based on the dynamic and geometric phases is systematically investigated from the theoretical and experimental standpoint. With the aid of the generalized Fermat principle, the influence of such two kinds of phases on beam propagation is theoretically analyzed. The results indicate that the spin splitting can be manipulated by the geometric phase, the size of the splitting is dependent on the space spin rate of meta-surface, and the splitting direction is coincided with that of the geometric phase gradient. The overall shift of light beam is manipulated by the dynamic phase, the size of the shift is dependent on the dynamic phase gradient, and the shift direction is consistent with that of phase gradient. An experiment system is established based on spatial light modulators and meta-surfaces, and the possibility of realizing manipulation of spin splitting in spin Hall effect based on dynamic and geometric phases is experimentally confirmed.

**Key words** physical optics; spin Hall effect; spin-dependent splitting; dynamic phase; geometric phase

**OCIS codes** 260.2110; 260.5430; 350.5030; 350.5500

## 1 引 言

光自旋霍尔效应是指光束经过非均匀介质后, 自旋相反的光子与非均匀介质相互作用, 光束分裂成两束圆偏振光并分布在入射面两侧的现象<sup>[1-7]</sup>。这种现象被认为是光的自旋-轨道相互作用的结果<sup>[2-4]</sup>。光自旋霍尔效应为光子自旋控制提供了一个新的自由度, 在 高能物理<sup>[8]</sup>、表面等离子体<sup>[9]</sup>、精密测量<sup>[10]</sup>和光学系

**收稿日期:** 2016-08-11; **收到修改稿日期:** 2016-09-18

**基金项目:** 国家自然科学基金(61205126)、湖南省科技计划项目(2016TP1021)、湖南省教育厅青年项目(2017)

**作者简介:** 陈 敏(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光束传输方面的研究。E-mail: 798863378@qq.com

**导师简介:** 罗朝明(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微结构光子学及其器件方面的研究。

E-mail: zhaomingluo@hnu.edu.cn(通信联系人)

统<sup>[11-16]</sup>等领域具有潜在的应用价值。

研究发现,光自旋霍尔效应中的自旋分裂现象与光的相位改变紧密相关。光的相位主要有几何相位和动力学相位两种。几何相位是与自旋相关的相位,主要有 Rytov-Vladimirskii-Berry 和 Pancharatnam-Berry 两类<sup>[17-22]</sup>。光束在介质界面反射和折射时产生了自旋相关的分裂,其原因是光束产生了与传播方向相关的 Rytov-Vladimirskii-Berry 几何相位<sup>[17-19]</sup>。当光束入射到不均匀的各向异性介质时,有可能产生空间变化的 Pancharatnam-Berry 几何相位,也会造成光束的自旋相关的分裂<sup>[20-24]</sup>。动力学相位是与光的传播过程密切相关的相位,该相位在矢量光束的产生<sup>[25-26]</sup>和波前校正<sup>[27-28]</sup>等方面有着较好的调控特性。关于动力学相位与光束自旋之间关系的研究不多,但它在光束分裂过程中有着较为独特的贡献。

本文系统研究了利用动力学相位和几何相位操控光自旋霍尔效应中的自旋分裂的方法。实验中激光光束分别通过空间光调制器和超表面,从而获得动力学相位和几何相位。结果发现,几何相位操控着光束自旋分裂的大小和方向,而动力学相位操控着光束的整体平移。

## 2 理论分析

为了研究动力学相位和几何相位对自旋霍尔效应中光束分裂的操控,线偏振激光光束依次入射到空间光调制器和一维超表面,如图 1 所示,其中  $k$  表示波矢大小, $z_0$  表示观察点到空间光调制器的距离。空间光调制器加入了与  $x$  轴夹角为  $\alpha$  的一维相位,产生的动力学相位为

$$\phi_D = \frac{2\pi(x \cos \alpha + y \sin \alpha)}{d_1}, \quad (1)$$

式中  $d_1$  是相位参数,表示相位变化  $2\pi$  对应的空间距离; $2\pi/d_1$  表示该动力学相位梯度的大小。该动力学相位梯度必然引起波矢空间的变化,即

$$\Delta k_D = \nabla \phi_D = \Delta k_{Dx} \mathbf{e}_x + \Delta k_{Dy} \mathbf{e}_y = \frac{\partial \phi_D}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial \phi_D}{\partial y} \mathbf{e}_y = \frac{2\pi}{d_1} (\mathbf{e}_x \cos \alpha + \mathbf{e}_y \sin \alpha), \quad (2)$$

式中  $\Delta k_{Dx}$  和  $\Delta k_{Dy}$  分别表示动力学相位梯度引起的  $x$  和  $y$  方向的波矢空间的变化大小, $\mathbf{e}_x$  和  $\mathbf{e}_y$  分别表示  $x$  和  $y$  方向的单位矢量。超表面是指在玻璃上利用光刻方法制作的非周期光栅,可以理解为光轴方向在空间上变化的单轴晶体。选用图 1(a)所示的一维超表面<sup>[23,24]</sup>,可看成是光轴方向在空间一维变化的半波片,相位延迟为  $\pi$ 。该一维超表面与  $x$  方向的夹角为  $\beta$ ,产生的 Pancharatnam-Berry 几何相位为

$$\phi_G = \frac{2\sigma_{\pm} \pi(x \cos \beta + y \sin \beta)}{d_2}, \quad (3)$$

式中  $\sigma_+$  和  $\sigma_-$  分别表示左旋和右旋圆偏振, $d_2$  代表一维超表面的结构周期, $\pi/d_2$  表示该超表面的空间旋转率。几何相位变化梯度导致的波矢空间变化大小可表示为

$$\Delta k_G = \nabla \phi_G = \Delta k_{Gx} \mathbf{e}_x + \Delta k_{Gy} \mathbf{e}_y = \frac{\partial \phi_G}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial \phi_G}{\partial y} \mathbf{e}_y = \frac{2\sigma_{\pm} \pi}{d_2} (\mathbf{e}_x \cos \beta + \mathbf{e}_y \sin \beta), \quad (4)$$

式中  $\Delta k_{Gx}$  和  $\Delta k_{Gy}$  是几何相位梯度引起的  $x$  和  $y$  方向的波矢空间变化大小。比较动力学相位和几何相位梯度引起的波矢空间变化,即(2)式和(4)式,可以发现,动力学相位梯度引起的波矢空间变化与圆偏振的偏振态无关,而几何相位梯度引起的波矢空间变化与圆偏振的偏振态有关。

将空间光调制器和超表面看成一个系统整体,研究动力学相位和几何相位对光自旋霍尔效应中自旋分裂现象的影响。由(2)式和(4)式可知,光束经过系统后总体的波矢空间变化大小为

$$\begin{aligned} \Delta k &= \Delta k_x \mathbf{e}_x + \Delta k_y \mathbf{e}_y = \frac{\partial(\phi_D + \phi_G)}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial(\phi_D + \phi_G)}{\partial y} \mathbf{e}_y = \\ &\left( \frac{2\pi}{d_1} \cos \alpha + 2\sigma_{\pm} \frac{\pi}{d_2} \cos \beta \right) \mathbf{e}_x + \left( \frac{2\pi}{d_1} \sin \alpha + 2\sigma_{\pm} \frac{\pi}{d_2} \sin \beta \right) \mathbf{e}_y. \end{aligned} \quad (5)$$

光在传播过程中满足费马原理,但当两种介质的分界面存在相位突变时,该定理需要修正。Huang 等<sup>[24,29]</sup>修正推广了这种情况下的一维费马原理。对于图 1 所示的二维情形,该费马原理可写为

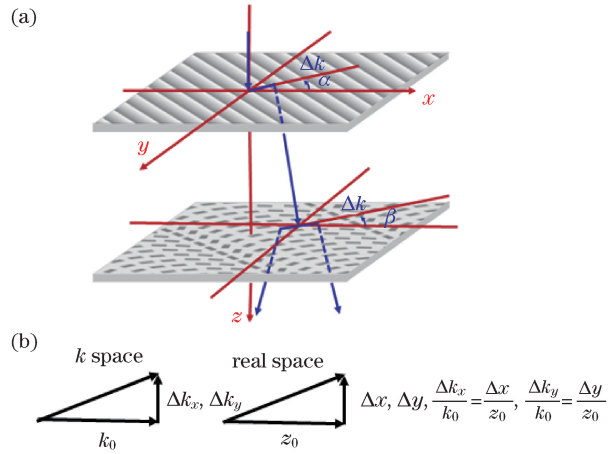


图 1 (a) 线偏振光束通过空间光调制器和一维超表面组成的系统后的光束分裂示意图；  
(b)  $\Delta k_x$  ( $\Delta k_y$ ) 与被诱导的实空间变化  $\Delta x$  ( $\Delta y$ ) 的对应关系

Fig. 1 (a) Schematic diagram of light beam splitting for linearly polarized beam passing through a system composed of spatial light modulator and 1D meta-surface;  
(b) relationship between  $\Delta k_x$  ( $\Delta k_y$ ) and induced real-space change  $\Delta x$  ( $\Delta y$ )

$$\begin{cases} n_t \sin \theta_{tx} - n_i \sin \theta_{ix} = \frac{1}{k_0} \Delta k_x \\ n_t \sin \theta_{ty} - n_i \sin \theta_{iy} = \frac{1}{k_0} \Delta k_y \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $n_i$  和  $n_t$  分别表示入射介质和折射介质的折射率,  $\theta_{ix}$  和  $\theta_{iy}$  分别表示入射光束与  $x$  和  $y$  轴的夹角,  $\theta_{tx}$  和  $\theta_{ty}$  分别表示折射光束与  $x$  和  $y$  轴的夹角,  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  表示真空中的波矢大小,  $\lambda$  为光波波长。根据(2)、(4)、(6)式,在系统中单独考虑动力学相位和几何相位的影响。若只引入动力学相位梯度,波矢空间的变化大小  $\Delta k_0$  是自旋无关的,则左右旋圆偏振光具有相同的折射角,从而线偏振的光束发生整体平移;若只引入几何相位梯度,波矢空间的变化大小  $\Delta k_G$  是自旋相关的,则左右旋圆偏振光有不同的折射角,从而光束会发生自旋分裂。

另外,在光束传输中波矢空间的变化必然会引起坐标空间的改变。在傍轴条件下,根据图 1(b)所示的波矢空间和坐标空间的关系,有

$$\begin{cases} \Delta x = (\Delta k_x / k_0) z_0 \\ \Delta y = (\Delta k_y / k_0) z_0 \end{cases}. \quad (7)$$

因此,通过观察距离空间光调制器为  $z = z_0$  处的坐标空间的变化  $\Delta x$  和  $\Delta y$ ,就能推算出波矢空间的变化大小  $\Delta k_x$  和  $\Delta k_y$ 。结合前面的分析以及(2)、(4)、(7)式可知:动力学相位能操控光束的整体平移,平移大小与动力学相位梯度  $2\pi/d_1$  相关,平移方向与所加动力学相位梯度的方向一致(即一维相位与  $x$  轴夹角  $\alpha$ );几何相位能操控光束的自旋分裂,光束自旋分裂大小与超表面的空间旋转率  $\pi/d_2$  有关,分裂的方向与几何相位梯度的方向一致(即一维超表面与  $x$  方向夹角  $\beta$ )。

激光光束入射角谱表达式为

$$\tilde{E}_i(k_x, k_y) = \frac{w_0}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z_R(k_x^2 + k_y^2)}{2k_0}\right], \quad (8)$$

式中  $w_0$  为束腰宽度;  $z_R = k_0 w_0^2 / 2$  为瑞利距离;  $k_x$  和  $k_y$  分别表示波矢在  $x$  和  $y$  方向的分量大小。根据(5)式可知,图 1 所示的系统使出射光束的波矢空间相对于入射光变化  $\Delta k$ ,从而出射光束的角谱可表示为

$$\tilde{E}_t(k_x, k_y) = \frac{w_0}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{z_R[(k_x + \Delta k_x)^2 + (k_y + \Delta k_y)^2]}{2k_0}\right\}, \quad (9)$$

利用傅里叶逆变换和傍轴近似可以得到出射光束的光场复振幅表示为

$$E_t(x, y) = \frac{k_0 \omega_0 \exp(ik_0 z)}{\sqrt{2\pi}(z_R + iz)} \exp\left\{ \frac{ik_0 [2z_R \Delta k_x x + 2z_R \Delta k_y y + ik_0(x^2 + y^2)]^2 - z_R z (\Delta k_x^2 + \Delta k_y^2)}{2k_0(z_R + iz)} \right\}, \quad (10)$$

进而可以得到出射光束的光强分布。

### 3 实验结果与分析

实验采用 Thorlabs 公司的 He-Ne 激光(波长为 632.8 nm, 功率为 21 mW), 利用格兰激光偏振器(GLP)得到水平偏振的基模高斯光束, 将其入射到由空间光调制器(SLM)和超表面(MS)组成的图 1 所示的系统中, 实验装置图如图 2 所示。采用德国 Holoeye Pluto-vis 空间光调制器, 其液晶显示屏的像素尺寸为  $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ , 合适地定义最小单元就可得到所需的相位梯度。将图 1 所示的一维相位引入到空间光调制器中, 相位参数  $d_1$  分别取 256, 512, 768, 1536  $\mu\text{m}$ 。超表面选用图 1 所示的一维超表面, 超表面的结构周期  $d_2$  分别取 500  $\mu\text{m}$  和 1000  $\mu\text{m}$ 。电荷耦合器件(CCD)解析点阵为  $1280 \times 1024$ , 像素尺寸为  $6.7 \mu\text{m} \times 6.7 \mu\text{m}$ 。在距离空间光调制器  $z_0 = 150 \text{ cm}$  处设置 CCD 来记录光束经过该系统后的光强分布, 并根据文献[30]的方法, 借助四分之一波片(QWP)和格兰激光偏振器(GLP)得到该光束经过系统后的斯托克斯参数  $s_3$ , 从而测量光束的分裂情况。

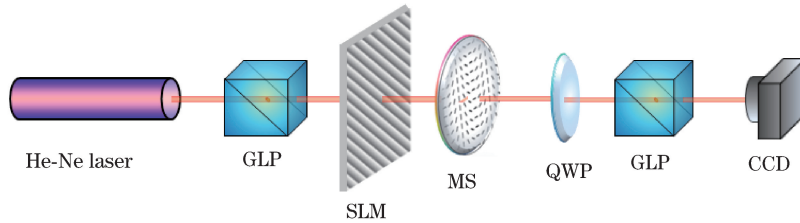


图 2 验证两类相位对光束传输影响的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for testing influence of two kinds of phases on light beam propagation

首先研究  $x$  方向的分裂。利用空间光调制器对光束在  $x$  方向(即  $\alpha = 0$ )施加图 1(a)所示的一维相位, 产生  $x$  方向的动力学相位梯度; 同时将图 1(a)中的一维超表面与  $x$  方向的夹角设置为  $\beta = 0$ , 产生沿  $x$  方向的几何相位梯度。图 3 为线偏振的激光光束经过该系统后实验得出的参数  $s_3$ [图 3(a)~(f)]和由(9)式得到的理论光强分布图[图 3(a')~(f')]。由图 3(a)~(c)和图 3(a')~(c')可以看出, 光束分裂大小与空间光调制器加入的动力学相位梯度  $2\pi/d_1$  大小(包括是否加入)无关; 动力学相位梯度的大小只影响分裂光束的整体平移,  $d_1$  越小, 相位梯度越大, 整体移动越大。结合图 3(d)~(f)和图 3(d')~(f')可以得出, 光束分裂的大小只与一维超表面引入的几何相位有关, 且一维超表面结构周期  $d_2$  越小, 其空间旋转率  $\pi/d_2$  越大, 光束自旋分裂越大。从图 3 可以看出, 实验得出的参数  $s_3$  分布与理论模拟的光强分布吻合很好。

调节一维相位与  $x$  轴的夹角  $\alpha$  可使自旋分裂光束整体移动到其他方向。利用空间光调制器给光束加入  $y$  方向的动力学相位梯度, 即  $\alpha = 90^\circ$ , 一维超表面与  $x$  方向的夹角仍然设置为  $\beta = 0$ , 则  $x$  方向自旋分裂光束整体沿  $y$  方向移动。图 4 为线偏振光束经过系统后产生的  $x$  方向分裂和  $y$  方向整体平移的传输图。比较图 4(a)~(f)和图 4(a')~(f')可以看出, 实验得到的参数  $s_3$  分布与理论模拟的光强分布吻合较好。对照图 3 和图 4, 从实验和理论上都可进一步得出: 分裂光束的整体平移由动力学相位梯度的大小以及方向决定; 平移大小由加入的动力学相位梯度大小  $2\pi/d_1$  决定,  $d_1$  越大, 整体平移越小; 平移方向则与加入的动力学相位方向一致。通过合适地调整动力学相位参数, 能使分裂的光束按照所需方向进行整体平移。

调节图 1(a)所示的一维超表面的参数  $\beta = 90^\circ$ , 产生  $y$  方向的几何相位梯度, 空间光调制器仍然将调制的一维相位与  $x$  方向的夹角设置为  $\alpha = 0$ , 产生  $x$  方向的动力学相位梯度, 光束在  $y$  方向发生光束自旋分裂。图 5 为线偏振光束经过系统后产生的  $y$  方向分裂和  $x$  方向整体平移的传输图。将角度参数设置为  $\alpha = 90^\circ$  和  $\beta = 90^\circ$ , 可使线偏振激光光束在  $y$  方向分裂和在  $y$  方向整体平移。图 6 为线偏振光束经过系统后产生的  $y$  方向分裂和  $y$  方向整体平移的传输图。从图 5 和图 6 可以看出, 实验得出的参数  $s_3$  图与理论模拟的光强分布图吻合很好。分别对照图 3 和图 5、图 4 和图 6 可知, 分裂光束大小和方向由加入的几何相位的大小和方向决定, 分裂的大小由超表面的空间旋转率  $\pi/d_2$  决定, 分裂的方向由加入的几何相位的梯度方向决定, 这些结论与理论分析是一致的。通过合适地调整几何相位参数, 可使光束按照所需的方式分裂。

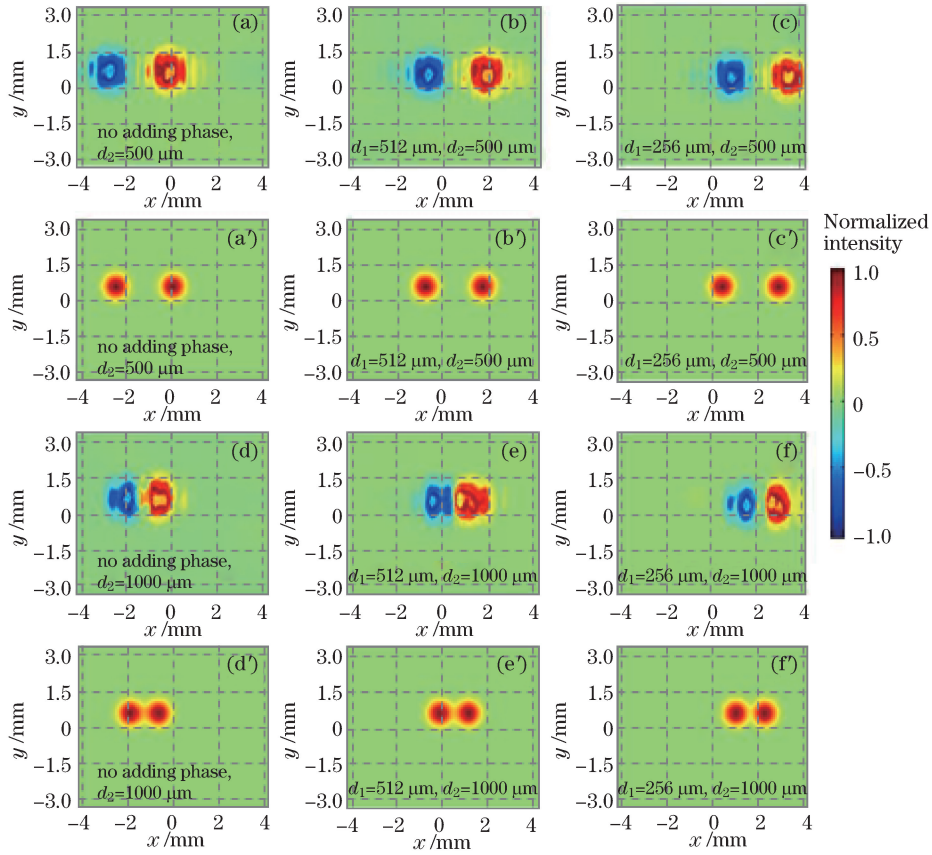


图 3 线偏振光束经过系统后产生沿  $x$  方向的分裂和整体平移的传输图。

(a)~(f) 实验获得的参数  $s_3$ ; (a')~(f') 理论仿真得到的光强分布

Fig. 3 Propagation plots for a linearly polarized beam through the system with splitting and overall shift occurring along  $x$  direction. (a)-(f)  $s_3$  parameters acquired from experiment;

(a')-(f') optical intensity distribution acquired from theoretical simulation

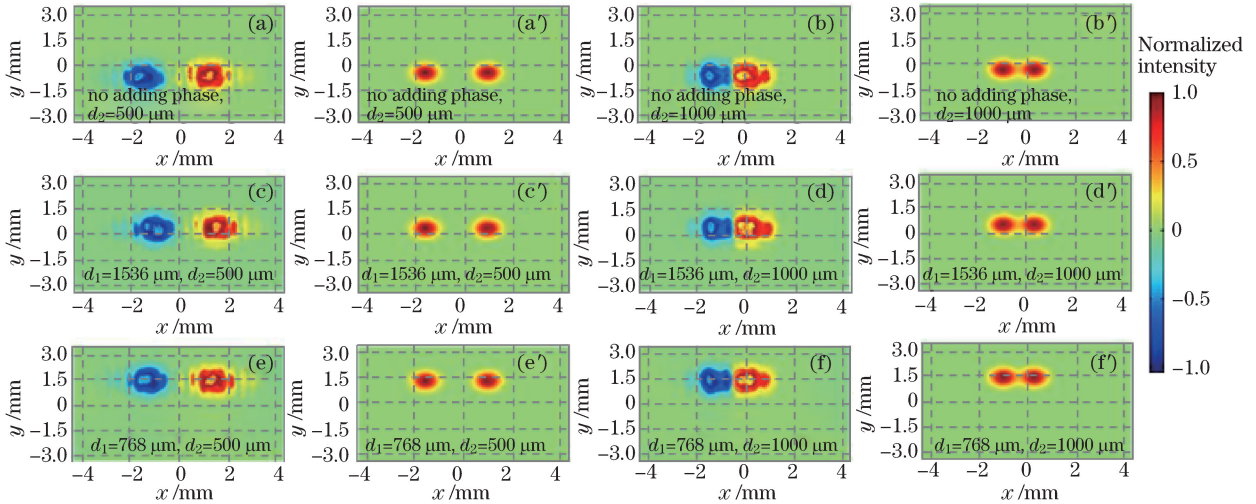


图 4 线偏振光束经过系统后产生的  $x$  方向分裂和  $y$  方向整体平移的传输图。

(a)~(f) 实验获得的参数  $s_3$ ; (a')~(f') 理论仿真得到的光强分布

Fig. 4 Propagation plots for a linearly polarized beam through the system with splitting occurring along  $x$  direction and overall shift occurring along  $y$  direction. (a)-(f)  $s_3$  parameters acquired from experiment;

(a')-(f') optical intensity distribution acquired from theoretical simulation

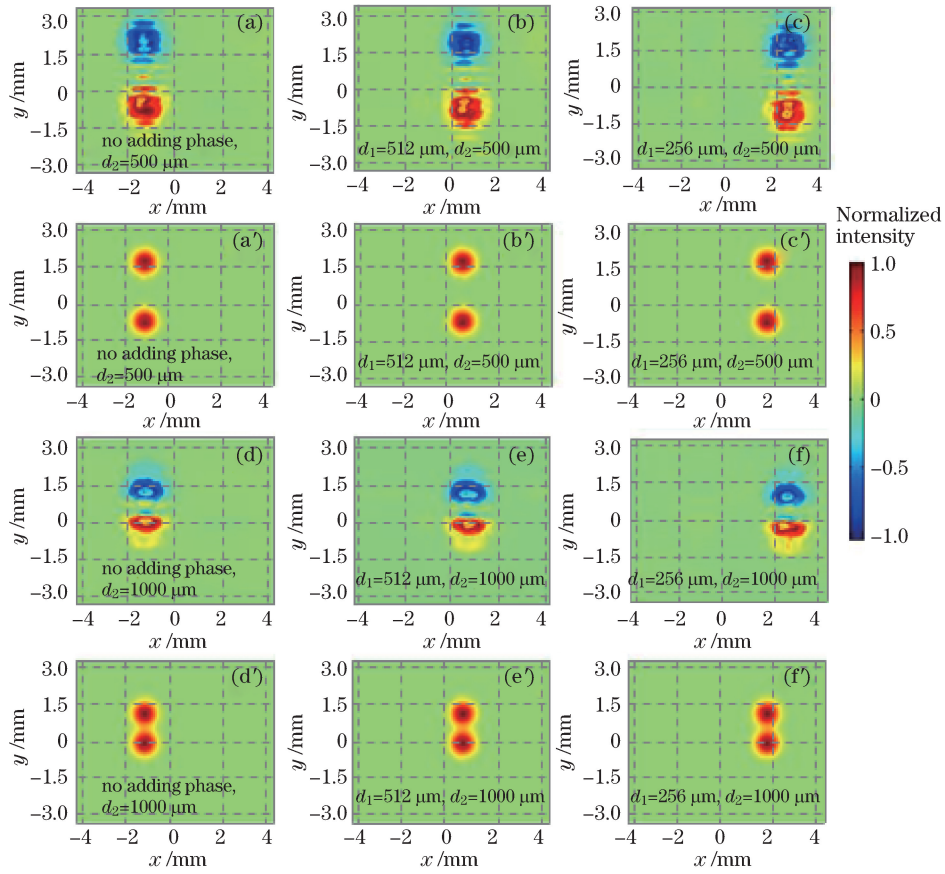


图 5 线偏振光束经过系统后产生的  $y$  方向分裂和  $x$  方向整体平移的传输图。(a)~(f) 实验获得的参数  $s_3$  ; (a')~(f') 理论仿真得到的光强分布

Fig. 5 Propagation plots for a linearly polarized beam through the system with splitting occurring along  $y$  direction and overall shift occurring along  $x$  direction. (a)-(f)  $s_3$  parameters acquired from experiment; (a')-(f') optical intensity distribution acquired from theoretical simulation

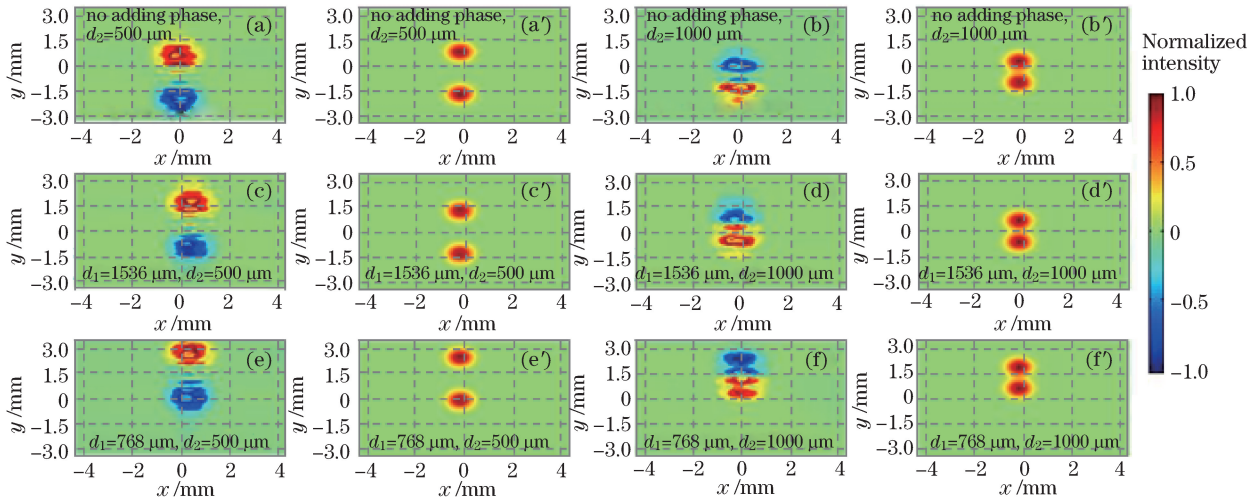


图 6 线偏振光束经过系统后产生的  $y$  方向分裂和  $y$  方向整体平移的传输图。(a)~(f) 实验获得的参数  $s_3$  ; (a')~(f') 理论仿真得到的光强分布

Fig. 6 Propagation plots for a linearly polarized beam through the system with splitting occurring along  $y$  direction and overall shift occurring along  $y$  direction. (a)-(f)  $s_3$  parameters acquired from experiment; (a')-(f') optical intensity distribution acquired from theoretical simulation

综上所述,光自旋霍尔效应中的光束分裂与几何相位紧密相关,而光束的整体平移可以通过动力学相位来操控。合适地设置一维超表面的空间旋转率  $\pi/d_2$  以及该一维超表面与  $x$  轴的夹角  $\beta$ ,可以获得所需的自旋分裂大小和方向;适当地调节加入空间光调制器的一维相位梯度大小以及该一维相位与  $x$  方向的夹角  $\alpha$ ,可使自旋分裂的光束整体平移到预期的位置。因此,可以利用动力学相位和几何相位操控光自旋霍尔效应中的自旋分裂。

## 4 结 论

从理论和实验上验证了利用动力学相位和几何相位操控光自旋霍尔效应中的自旋分裂的可行性。将费马原理推广到二维情况,得到了光束经过空间光调制器和超表面的理论方程。基于该方程进行了理论分析,发现几何相位操控着光束的自旋分裂,光束自旋分裂大小与超表面的空间旋转率紧密相关,分裂的方向与几何相位梯度的方向一致;动力学相位操控着光束的整体平移,平移大小由动力学相位梯度来决定,平移的方向与所加动力学相位的方向一致。基于空间光调制器和超表面搭建了实验系统,激光光束依次通过空间光调制器和超表面,引入不同的动力学相位和几何相位,借助 CCD 观察光束的分裂情况,实验结果与理论分析吻合较好。研究结果对进一步操控光自旋霍尔效应中的自旋分裂及相关器件的应用开发具有指导意义。

## 5 致 谢

感谢罗海陆副教授和刘亚超博士提供的帮助和有益讨论。

## 参 考 文 献

- [1] Onoda M, Murakami S, Nagaosa N. Hall effect of light[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(8): 083901.
- [2] Bliokh K Y, Bliokh Y P. Conservation of angular momentum, transverse shift, and spin Hall effect in reflection and refraction of an electromagnetic wave packet[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 96(7): 073903.
- [3] Hosten O, Kwiat P. Observation of the spin Hall effect of light via weak measurements[J]. *Science*, 2008, 319(5864): 787-790.
- [4] Bliokh K Y, Niv A, Kleiner V, *et al.* Geometrodynamics of spinning light[J]. *Nat Photonics*, 2008, 2: 748-753.
- [5] Qin Y, Li Y, He H, *et al.* Measurement of spin Hall effect of reflected light[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(17): 2551-2553.
- [6] Li Hanxing, Yang Shuangyan. Spin Hall effect of cylindrical vector beams in the transmission[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1026001.  
李寒星, 杨双燕. 柱矢量光束在透射时的自旋霍尔效应[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1026001.
- [7] Zhang Jin, Luo Zhaoming, Luo Hailu, *et al.* Steering asymmetric spin splitting in photonic spin Hall effect orbital angular momentum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1126002.  
张 进, 罗朝明, 罗海陆, 等. 利用轨道角动量操控光子自旋霍尔效应中的非对称自旋分裂[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1126002.
- [8] Gosselin P, Bérard A, Mohrbach H. Spin Hall effect of photons in a static gravitational field[J]. *Phys Rev D*, 2007, 75(8): 084035.
- [9] Gorodetski Y, Niv A, Kleiner V, *et al.* Observation of the spin-based plasmonic effect in nanoscale structures[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101(4): 043903.
- [10] Li Xing, Zhou Xinxing, Luo Hailu. Optimal weak measurements of photonic spin Hall effect in nanometal film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0731002.  
李 星, 周新星, 罗海陆. 纳米金属薄膜中光子自旋霍尔效应的最佳弱测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0731002.
- [11] Haefner D, Sukhov S, Dogariu A. Spin Hall effect of light in spherical geometry[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(12): 123903.
- [12] Aiello A, Lindlein N, Marquardt C, *et al.* Transverse angular momentum and geometric spin Hall effect of light[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 103(10): 100401.
- [13] Luo H, Ling X, Zhou X, *et al.* Enhancing or suppressing the spin Hall effect of light in layered nanostructures[J]. *Phys Rev A*, 2011, 84(3): 033801.
- [14] Wang H, Zhang X. Unusual spin Hall effect of a light beam in chiral metamaterials[J]. *Phys Rev A*, 2011, 83(5):

053820.

- [15] Qin Y, Li Y, Feng X, *et al.* Observation of the in-plane spin separation of light[J]. Opt Express, 2011, 19(10): 9636-9645.
- [16] Zhou X, Xiao Z, Luo H, *et al.* Experimental observation of the spin Hall effect of light on a nanometal film via weak measurements[J]. Phys Rev A, 2012, 85(4): 043809.
- [17] Rytov S M. On the transition from wave to geometrical optics[C]. Dokl Akad Nauk SSSR, 1938, 18(2): 263-267.
- [18] Chiao R Y, Wu Y S. Manifestations of Berry's topological phase for the photon[J]. Phys Rev Lett, 1986, 57(8): 933-936.
- [19] Berry M V. Interpreting the anholonomy of coiled light[J]. Nature, 1987, 326(6110): 277-278.
- [20] Pancharatnam S. Generalized theory of interference and its applications[C]. Proc India Acad Sci Sec A, 1956, 44(6): 398-417.
- [21] Berry M V. The adiabatic phase and Pancharatnam's phase for polarized light[J]. J Mod Opt, 1987, 34(11): 1401-1407.
- [22] Bhandari R, Samuel J. Observation of topological phase by use of a laser interferometer[J]. Phys Rev Lett, 1988, 60(13): 1211-1213.
- [23] Ling X, Zhou X, Yi X, *et al.* Giant photonic spin Hall effect in momentum space in a structured metamaterial with spatially varying birefringence[J]. Light: Sci Appl, 2015, 4(5): e290.
- [24] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, *et al.* Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. Nano Lett, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [25] Guo C S, Rong Z Y, Wang S Z. Double-channel vector spatial light modulator for generation of arbitrary complex vector beams[J]. Opt Lett, 2014, 39(2): 386-389.
- [26] Luo Zhaoming, Chen Shizhen, Ling Xiaohui, *et al.* Conversion of cylindrical vector beams on the higher-order Poincaré sphere[J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(15): 154203.  
罗朝明, 陈世祯, 凌晓辉, 等. 高阶邦加球上柱矢量光束的变换[J]. 物理学报, 2014, 63(15): 154203.
- [27] Hu L, Xuan L, Liu Y, *et al.* Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision[J]. Opt Express, 2005, 12(26): 6403-6409.
- [28] Cai Dongmei, Yao Jun, Jiang Wenhan. Performance of liquid-crystal spatial light modulator using for wave-front correction[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 285-291.  
蔡冬梅, 姚 军, 姜文汉. 液晶空间光调制器用于波前校正的性能[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 285-291.
- [29] Yu N, Genevet P, Kats M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [30] Born M, Wolf E. Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 31-33.