

# 转换反射中光自旋霍尔效应的自旋堆积方向

魏桂萍 周新星 李 瑛 罗海陆 文双春

(湖南大学信息科学与工程学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 从理论上和实验上研究了转换反射中光自旋霍尔效应的自旋堆积方向的方法,建立了描述光束在空气-棱镜界面反射的自旋堆积模型,揭示了横移与光束入射偏振角的定性关系。研究发现,当入射角小于布儒斯特角时,随着入射偏振角的逐渐增大,自旋堆积的方向发生反转。而当入射角大于布儒斯特角时,自旋堆积的方向不再随入射偏振角的变化而反转。结果表明,在光束入射角为确定值且小于布儒斯特角的情况下,可以通过调控光束的入射偏振角转换自旋堆积的方向。转换自旋堆积方向的研究为有效调控光自旋霍尔效应提供了新的途径。

**关键词** 物理光学;光自旋霍尔效应;自旋堆积;弱测量;自旋角动量

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0726003

## Switching the Directions of Spin Accumulation of Spin Hall Effect of Light in Reflection

Wei Guiping Zhou Xinxing Li Ying Luo Hailu Wen Shuangchun

(Key Laboratory for Micro-Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education,

School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** The method on switching the direction of spin accumulation of spin Hall effect of light in reflection is studied theoretically and experimentally. A model describing spin accumulation of reflected light at the interface between air and prism is established. And the qualitative relation between traverse shift and the polarization angle of incident beam is revealed. The direction of spin accumulation will reverse with the increase of the polarization angle of incident light on condition that the incident angle is fixed and less than Brewster angle. But the direction of spin accumulation won't flip with polarization angle if the incident angle is bigger than Brewster angle. The results show that the direction of spin accumulation can be switched by adjusting the polarization angle of incident light while the incident angle is fixed and less than Brewster angle. The study about the direction of spin accumulation provides a new pathway for modulating the spin Hall effect of light.

**Key words** physical optics; spin Hall effect of light; spin accumulation; weak measurements; spin angular momentum

**OCIS codes** 260.5430; 260.1960; 240.5420

## 1 引 言

光束在电介质界面发生全内反射时,实际反射光束会在入射面内相对于几何反射光束产生一侧向位移,称为 Goos-Hänchen 位移<sup>[1,2]</sup>;在垂直于入射面的方向产生一横向位移,称为 Imbert-Fedorov 效

应<sup>[3]</sup>。而光自旋霍尔效应本质上就是 Imbert-Fedorov 效应。光自旋霍尔效应<sup>[4,5]</sup>是指光子在介质分界面上反射或折射时,在介质折射率梯度的作用下,光束或波包沿垂直于折射率梯度方向发生自旋分裂。光自旋霍尔效应表现为圆偏振光的右旋和

**收稿日期:** 2011-11-11; **收到修改稿日期:** 2012-02-16

**基金项目:** 国家自然科学基金(11074068)、中央高校基本科研专项优秀青年人才培养基金(531107040357)、湖南省自然科学基金(10JJ3070)和博士学科点基金(20100161120040)资助课题。

**作者简介:** 魏桂萍(1987—),女,硕士研究生,主要从事光束传输方面的研究。E-mail: xichen163@163.com

**导师简介:** 罗海陆(1980—),男,副教授,硕士生导师,主要从事微结构光子学及器件、自旋光子学等方面的研究。

E-mail: hailuluo@hnu.edu.cn(通信联系人)

左旋分量在垂直于入射面的横向产生一个很小的相对位移,即横移。但此横移值很小,在实验上一般很难观察得到。近年来随着实验技术的进步,光自旋霍尔效应获得了实验上的支持<sup>[6~9]</sup>。光自旋霍尔效应是一种弱效应,因此无论从科学研究还是应用层面看,揭示光自旋霍尔效应的增强机理并发展相应的调控方法都是有意义的。

在布儒斯特角附近反射时光的自旋霍尔效应<sup>[9]</sup>的研究中,在实验上实现了大的光束自旋分量横向分裂:光束在布儒斯特角附近反射时的光自旋霍尔效应产生了一个 3200 nm 的自旋分裂值,相当于折射光自旋分裂值的 50 倍。同时还发现,随着入射角的变化,自旋堆积的方向发生反转。自旋堆积方向的反转意味着由光自旋霍尔效应而导致的横移可调控,通过适当的调整入射角可使横移的大小为正值、负值或零。除了通过改变入射角<sup>[9]</sup>及折射率梯度<sup>[10,11]</sup>的方法可以转换自旋堆积的方向外,在半导体材料自旋霍尔效应的研究中,Leyder 等<sup>[12]</sup>曾提出可以通过改变入射光的偏振态来改变自旋流的堆积方向。对于光自旋霍尔效应,讨论了通过调控入射光的偏振角来转换自旋堆积的方向的可能性,分析了入射偏振角对横移的影响,提出了一种新的转换光自旋霍尔效应的自旋堆积方向的方法,并从实验上验证了该方法的正确性。该方法为有效调控光自旋霍尔效应提供了新的途径,并为新一代光学元器件的研制提供了理论和实验依据。

## 2 光束反射场的分析

建立了一个光的传输模型来描述高斯光束由空气入射到棱镜介质后产生的自旋堆积现象。如图 1 所示,  $x_i, y_i, z_i$ ,  $x_r, y_r, z_r$  分别代表入射和反射坐标系。入射高斯光束从空气中以入射角  $\theta_i$  沿  $z_i$  方向入射,经过棱镜介质界面后沿  $z_r$  方向反射,两自旋相反的分量沿垂直于入射面的横向的两侧分裂。 $\delta_+$  和  $\delta_-$  分别为圆偏振光的左旋和右旋分量的横移,  $\gamma_i$  为入射光束的偏振角。在近轴光学中,入射高斯光束的角谱表达式为

$$\tilde{\mathbf{E}}_i = \frac{\omega_0}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\omega_0^2(k_{ix}^2 + k_{iy}^2)}{4}\right], \quad (1)$$

式中  $\omega_0$  为束腰直径,  $k_{ix}, k_{iy}$  分别为波矢在  $x$  和  $y$  方向的分量。值得指出的是柱矢量光束在透射时也会产生光的自旋霍尔效应<sup>[13]</sup>。

接下来分析光束反射场。通过傅里叶变换可得到反射光束的复振幅表达式为

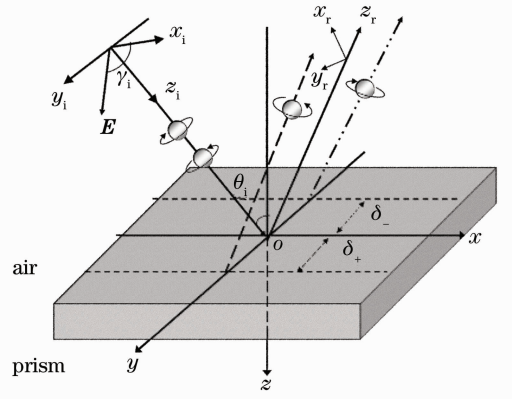


图 1 空气与棱镜界面反射的自旋堆积模型

Fig. 1 Transmission model for describing spin accumulation of reflected light at the interface between air and prism

$$\mathbf{E}_r(x_r, y_r, z_r) = \int dk_{rx} dk_{ry} \tilde{\mathbf{E}}_r(k_{rx}, k_{ry}) \times \exp[i(k_{rx}x_r + k_{ry}y_r + k_{rz}z_r)], \quad (2)$$

式中  $k_{rz} = \sqrt{k_r^2 - (k_{rx}^2 + k_{ry}^2)}$ ,  $k_{rx}, k_{ry}, k_{rz}$  表示各个方向上的波矢,  $\tilde{\mathbf{E}}_r(k_{rx}, k_{ry})$  表示反射光束角谱。反射光束的角谱与电场边界分布条件有关,其关系为<sup>[11]</sup>

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{E}}_r^H \\ \tilde{\mathbf{E}}_r^V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p & \frac{k_{iy}(r_p + r_s) \cot \theta_i}{k_0} \\ -\frac{k_{iy}(r_p + r_s) \cot \theta_i}{k_0} & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{E}}_i^H \\ \tilde{\mathbf{E}}_i^V \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $r_p, r_s$  分别为菲涅耳反射系数的平行分量和垂直分量。

$$\tilde{\mathbf{E}}_a^H = \frac{1}{\sqrt{2}}(\tilde{\mathbf{E}}_{a+} + \tilde{\mathbf{E}}_{a-}), \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}_a^V = \frac{1}{\sqrt{2}}i(\tilde{\mathbf{E}}_{a-} - \tilde{\mathbf{E}}_{a+}), \quad (5)$$

式中 H 和 V 分别表示水平偏振和垂直偏振,  $a = i, r$  分别表示入射和反射,  $\tilde{\mathbf{E}}_{a+} = (e_{ax} + ie_{ay}) \tilde{\mathbf{E}}_a / \sqrt{2}$  和  $\tilde{\mathbf{E}}_{a-} = (e_{ax} - ie_{ay}) \tilde{\mathbf{E}}_a / \sqrt{2}$  分别表示左旋和右旋圆偏振分量。

由斯涅耳定律可得到入射光与反射光各个波矢之间的关系  $k_{rx} = -k_{ix}$  及  $k_{ry} = k_{iy}$ 。引入边界条件,结合(1)~(5)式得到反射场的近似表达式

$$\mathbf{E}_{\pm}^H = \frac{r_p(e_{rx} \pm ie_{ry})}{\sqrt{\pi}\omega_0} \frac{z_R}{z_R + iz_r} \exp(ik_r z_r) \times \exp\left[-\frac{k_0}{2} \frac{x_r^2 + (y_r \pm \delta_r^H)^2}{z_R + iz_r}\right], \quad (6)$$

$$\mathbf{E}_{\pm}^V = \frac{\mp i r_s (\mathbf{e}_{rx} \pm i \mathbf{e}_{ry})}{\sqrt{\pi} \omega_0} \frac{z_R}{z_R + i z_r} \exp(ik_r z_r) \times \exp\left[-\frac{k_0}{2} \frac{x_r^2 + (y_r \pm \delta_r^V)^2}{z_R + i z_r}\right], \quad (7)$$

式中  $\delta_r^H = (1 + r_s/r_p) \cot \theta_i/k_0$ ,  $\delta_r^V = (1 + r_p/r_s) \cot \theta_i/k_0$ ,  $k_0 = \omega/c$  为真空中的波数,  $z_R = k_0 \omega_0^2/2$  为自由空间中的瑞利距离。由(6)式和(7)式可知, 高斯光束的反射场分布与非涅耳系数密切相关。由于横移是光自旋霍尔效应的一个重要表现<sup>[4]</sup>, 且横移的变化表征着自旋堆积的变化。因此接下来分析反射场的横移。

电场强度的分布与坡印廷矢量成正比, 即  $I(x_r, y_r, z_r) \propto \mathbf{S}_r \cdot \mathbf{e}_{rz}$ , 其中坡印廷矢量为  $\mathbf{S}_r \propto \text{Re} \times [\mathbf{E}_r^* \times \mathbf{H}_r]$ , 磁场表达式为  $\mathbf{H}_r = -ik_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}_r$ 。因此, 在任意给定平面  $z_r$  固定的情况下, 光束质心横移<sup>[14]</sup> 可以表示为

$$\delta = \frac{\iint y_r I(x_r, y_r, z_r) dx_r dy_r}{\iint I(x_r, y_r, z_r) dx_r dy_r}. \quad (8)$$

把(6)式和(7)式代人(8)式得横移表达式

$$\delta_{\pm}^H = \mp \frac{\lambda}{2\pi} [1 + (r_s/r_p)] \cot \theta_i, \quad (9)$$

$$\delta_{\pm}^V = \mp \frac{\lambda}{2\pi} [1 + (r_p/r_s)] \cot \theta_i, \quad (10)$$

(9)式和(10)式的结果与文献[11]结果一致。由横移表达式可知, 反射场的横移与光束入射角及菲涅耳反射系数比有关, 左旋和右旋圆偏振分量的横移等值反向。

### 3 自旋堆积反转现象与实验验证

对于横移表达(9)式和(10)式, 可以把光束分成平行偏振分量和垂直偏振分量来讨论。为了探讨入射偏振角  $\gamma_i$  与横移的关系, 需要考虑任意线偏振光。那么反射场的横移可表示为<sup>[7]</sup>

$$\delta_{\pm} = \delta_{\pm}^H \cos^2 \gamma_r + \delta_{\pm}^V \sin^2 \gamma_r, \quad (11)$$

其中  $\gamma_r$  为反射偏振角。基于经典电动力学, 反射偏振角与入射偏振角的关系表达式为

$$\cos \gamma_r = \frac{r_p \cos \gamma_i}{\sqrt{r_p^2 \cos^2 \gamma_i + r_s^2 \sin^2 \gamma_i}}, \quad (12)$$

$$\sin \gamma_r = \frac{r_s \sin \gamma_i}{\sqrt{r_p^2 \cos^2 \gamma_i + r_s^2 \sin^2 \gamma_i}}. \quad (13)$$

由(11)~(13)式可知, 反射的横移不仅与入射光束的入射角  $\theta_i$  有关, 还与入射光束的偏振角  $\gamma_i$  有关。在光束偏振角为固定值的情况下, 入射角对反

射场横移变化的影响我们已有结论<sup>[9,15]</sup>。接下来从理论上分析入射角为固定值时入射光束的偏振角对自旋堆积方向的影响, 并通过实验来验证理论结果。

如图2所示, 选取的入射角分别为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 。由图2可知, 当入射角为  $30^\circ$  和  $45^\circ$  时, 随着入射光束的偏振角的增大, 左旋圆偏振分量的横移由正值变到负值; 右旋圆偏振分量的横移由负值变到正值。左旋和右旋圆偏振分量的横移符号的变化也意味着自旋堆积方向发生了变化。也就是说, 随着入射偏振角的逐渐增大, 自旋堆积的方向发生反转。但值得注意的是, 当入射角为  $60^\circ$  时, 自旋堆积的方向并没反转。下面解释该仿真结果。

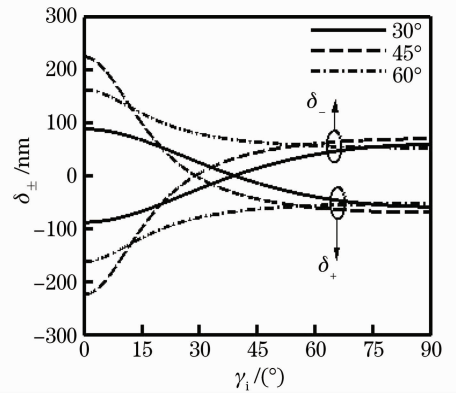


图2 当入射角为不同的确定值时偏振角对自旋堆积方向的影响

Fig. 2 Influence of polarization angle on the direction of spin accumulation when incident angles are different values

在单一考虑线偏振光的平行偏振分量或垂直偏振分量<sup>[8,9]</sup>情况下, 对于平行偏振分量, 当入射光束的入射角小于布儒斯特角时, 圆偏振光的左旋分量的横移为正值, 右旋分量的横移为负值; 当入射光束的入射角大于布儒斯特角时, 圆偏振光的左旋分量的横移为负值, 右旋分量的横移为正值。而对于垂直偏振分量, 圆偏振光左旋分量的横移为负值, 右旋分量的横移为正值。由于分析讨论的是任意线偏振光, 左、右旋分量横移的变化结合了线偏振光的水平偏振分量和垂直偏振分量的变化。因此当入射角小于布儒斯特角时, 随着偏振角的增大横移有正负值的改变; 当入射角大于布儒斯特角时, 在偏振角增大时, 左旋分量的横移总为负值, 右旋分量的横移总为正值。这与仿真结果是一致的。由此可以推断, 在入射角小于布儒斯特角的情况下, 适当地调整入射偏振角可以转换自旋堆积的方向。

接下来通过弱测量<sup>[7,9]</sup>的方法来验证理论结

果,实验装置如图 3 所示。氦氖激光器 (He-Ne laser, 功率 17 mW, 波长 632.8 nm) 产生一线偏振高斯光束, 先后经过半波片 (HWP)、短焦距透镜 (lens 1, 焦距 50 mm) 和第一个格兰激光偏振镜 (GLP 1) 入射到棱镜界面。入射光束在棱镜界面发生反射, 左旋与右旋圆偏振分量沿垂直于入射面的横向发生自旋分裂, 分裂成两束光。反射光经过第二个格兰激光偏振镜 (GLP 2) 后, 再经长焦距透镜 (lens 2, 焦距 250 mm), 最后由图像传感器 (CCD) 接收。旋转半波片用来调节入射光的光强以确保 CCD 接收的光强在合适的范围内; 短聚焦透镜用来聚焦光束; 旋转的 GLP 1 可以改变入射光的偏振方向; GLP 2 与 GLP 1 相互垂直, 当 GLP 2 转动一个很小的角度 ( $\Delta$ ) 时, 两自旋分量发生相消干涉产生一强度较弱的单个高斯型强度分布, 其重心偏移位置远大于自旋分量的初始横向漂移。棱镜安装在可旋转的安装台上, 方便调控入射光束的入射角。长聚焦透镜用来准直光束, CCD 用来检测光强。通过此实验装置, 观测入射角确定时入射偏振角对自旋堆积方向的影响。

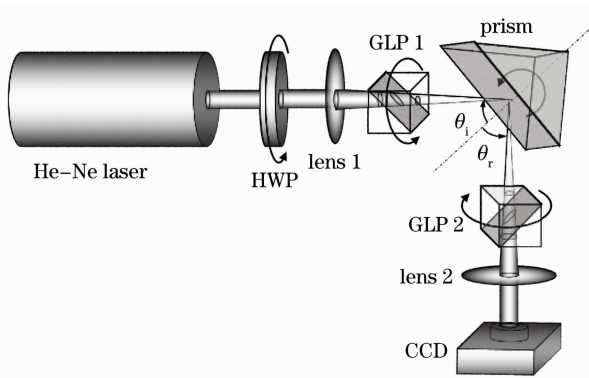


图 3 验证自旋堆积方向转换的实验装置

Fig. 3 Experimental setup for verifying the direction switching of spin accumulation

实验中选取  $\Delta = 1^\circ$ , 选取固定入射角为  $30^\circ$  (小于布儒斯特角) 和  $60^\circ$  (大于布儒斯特角), 分别测量入射偏振角为  $0^\circ$  (水平偏振) 和  $90^\circ$  (垂直偏振) 时的横移。实验结果如图 4 所示, 图 4(a), (b) 分别表示入射角为  $30^\circ$ , 入射偏振角分别为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时的实验结果; 图 4(c), (d) 分别表示入射角为  $60^\circ$ , 入射偏振角分别为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  的实验结果。图中光斑位置与自旋堆积的方向一致, 光斑位置的变化对应着图 3 中横移的变化, 也对应着自旋堆积方向的变化。横移为零时, 光斑处于中心位置; 横移为正值时, 光斑的位置在上方; 横移为负值时, 光斑的位置在下方。比

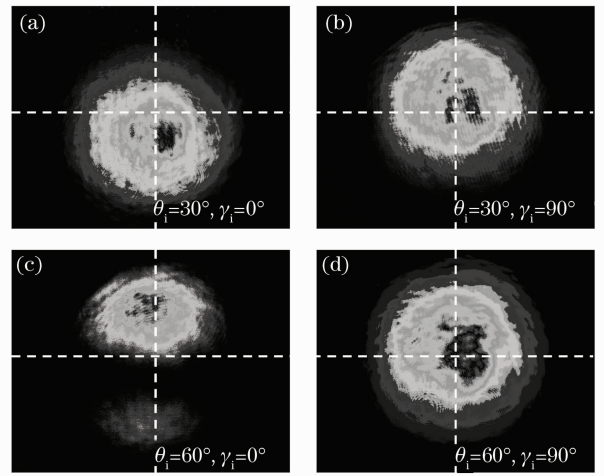


图 4 入射偏振角对自旋堆积方向影响的实验结果图

Fig. 4 Experimental results for verifying influence of the polarization angle on the direction of spin accumulation

较图 4(a), (b) 可以看出, 入射偏振角由  $0^\circ$  变化到  $90^\circ$ , 光斑位置从下方移到上方, 即自旋堆积的方向发生反转。比较图 4(c), (d) 可以看出, 当偏振角为  $0^\circ$  时, 光斑位置在上方; 当偏振角为  $90^\circ$  时, 光斑接近中心位置但并没有反转, 即自旋堆积的方向不发生反转。由图 4 可知, 当入射角为  $30^\circ$  时, 自旋堆积的方向随入射偏振角的变化发生反转; 当入射角为  $60^\circ$  时, 自旋堆积的方向不随入射偏振角的变化而反转。实验结果与理论结果相吻合。

## 4 结 论

从平面角谱理论出发, 建立了描述光束在空气—棱镜界面反射的自旋堆积模型。结合反射光场的理论, 通过分析得知自旋堆积方向受线偏振光束入射偏振角的影响。研究表明, 当入射角为确定值且小于布儒斯特角时, 随着入射偏振角的增大, 自旋堆积的方向发生反转; 当入射角大于布儒斯特角时, 自旋堆积的方向不再随入射偏振角的变化而反转。由此提出了一种新的转换光自旋霍尔效应的自旋堆积方向的方法, 而在入射角为确定值且小于布儒斯特角情况下, 通过调控入射偏振角可以转换自旋堆积的方向。这一转换自旋堆积方向的新方法为有效调控光自旋霍尔效应提供了新的途径, 并为新一代光学元器件的研制提供了理论和实验依据。

## 参 考 文 献

1 Zhu Qibiao, Li Chunfang, Chen Xi. Goos-Hanchen shift of the transmitted light beam in a two-prism configuration [J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 673~677
- 朱绮彪, 李春芳, 陈 玺. 双棱镜结构中透射光束的古斯汉位位移[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 673~677
- 2 Zhou Huiling, Chen Xi, Li Chunfang. Lateral and transverse shift of arbitrarily polarized beam in total internal reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1852~1856
- 周惠玲, 陈 玺, 李春芳. 任意偏振态光束全反射时的侧向和横向位移[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1852~1856
- 3 C. Imbert. Calculation and experimental proof of the transverse shift induced by total internal reflection of a circularly polarized light beam [J]. *Phys. Rev. D*, 1972, **5**(4): 787~796
- 4 M. Onoda, S. Murakami, N. Nagaosa. Hall effect of light [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(8): 083901
- 5 K. Y. Bliokh, Y. P. Bliokh. 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
- 6 K. Y. Bliokh, A. Niv, E. Hasman *et al.*. Geometrodynamics of spinning light [J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**(12): 748~753
- 7 O. Hosen, P. Kwiat. Observation of the spin Hall effect of light via weak measurements [J]. *Science*, 2008, **319** (5864): 787~790
- 8 Y. Qin, Y. Li, H. Y. He *et al.*. Measurement of spin Hall effect of reflected light [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34** (17): 2551~2553
- 9 H. L. Luo, X. X. Zhou, W. X. Shu *et al.*. Enhanced and switchable spin Hall effect of light near the Brewster angle on reflection [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **84**(4): 043806
- 10 H. L. Luo, S. C. Wen, W. X. Shu *et al.*. Spin Hall effect of light in photon tunneling [J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **82**(4): 043825
- 11 H. L. Luo, S. C. Wen, D. Y. Fan *et al.*. Enhancing or suppressing the spin Hall effect of light in layered nanostructures [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **84**(3): 033801
- 12 C. Leyder, M. Romanelli, J. P. Karr *et al.*. Observation of the optical spin Hall effect [J]. *Nature Phys.*, 2007, **3**(9): 628~631
- 13 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
- 14 H. L. Luo, S. C. Wen, W. X. Shu *et al.*. Spin Hall effect of a light beam in left-handed materials [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **80**(4): 043810
- 15 Yin Hongfang, Luo Hailu, Wen Shuangchun. Study on influencing factors of transverse shift in spin Hall effect of light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0326002
- 尹红芳, 罗海陆, 文双春. 光自旋霍尔效应中横移的影响因素研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0326002

栏目编辑：李文喆