

文章编号:1005-4642(2023)04-0053-11



光自旋霍尔效应的研究性实验教学

张志友, 张 红

(四川大学 物理学院, 四川 成都 610065)

摘 要:光自旋霍尔效应是由于光子的自旋-轨道相互作用导致自旋相反的光子相互分离的光学效应,极大地丰富了光学研究内涵,成为现代光学的研究前沿和热点. 由于光自旋霍尔效应实验与由偏振片、望远镜、显微镜等器件组装的实验相通,因此可以把光自旋霍尔效应的研究成果进行整理,设计制作出适合于本科实验教学的仪器. 本文对光自旋霍尔效应的研究进展进行了综述,并介绍了利用所开发的光自旋霍尔效应实验仪可开展的实验类型和进行研究性教学的情况.

关键词:光自旋霍尔效应;光学效应;现代光学

中图分类号:O436.4

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.04.009

近年来,教育部不断加强创新拔尖人才培养的推进力度,并于2018年发布了《关于实施基础学科拔尖学生培养计划2.0的意见》,该文件在原有“拔尖计划”基础上提出进一步提高质量和增加受益学生数量的方案. 2021年,教育部又发布了《关于2021年度基础学科拔尖学生培养基地建设工作的通知》,旨在通过加快建设一批培养基地以全面推进拔尖学生培养计划.

大学物理实验作为物理基础人才培养和拔尖人才培养的核心课程,对学生科学精神的塑造和科学素养的提升具有极其重要的作用,甚至是关键性作用. 目前,国内高校大都采用实验教学中心的教学组织形式,形成了较为稳定的专职实验教学队伍,以承担全校不同专业的基础物理实验教学. 由于实验教学中心较少开展科学前沿创新研究,一定程度制约了学生科研创新能力的培养水平. 针对该现状,北京大学基础物理实验教学中心给出了解决思路:坚持科研引领教学的理念,把实验教学和科研深度融合,实现科研与教学的无缝对接^[1]. 基于该思想和理念,笔者尝试将光自旋霍尔效应方面的研究成果转换成实验教学,研制出适用于本科实验教学的光自旋霍尔实验仪. 利用该仪器可开设从基础光学实验、综合光

学实验到科研创新的多层次光学实验,既能够满足学生的科研创新需要,又能够支撑教师的科研和教学拓展. 本文先对光自旋霍尔效应的基本原理和研究进展进行了综述,然后介绍了所研制的光自旋霍尔效应实验仪的基本功能和用于研究性教学的情况,希望为“科研引领实验教学”提供有价值的参考.

1 光自旋霍尔效应

电子除了携带电荷外,还有自旋属性,其携带的内禀角动量为 $\pm\hbar/2$, \hbar 为约化普朗克常量. 基于电子的自旋属性,发展出了活跃于前沿研究领域的新型学科——自旋电子学. 当电子的运动轨迹在外场力作用下发生变化时,自旋-轨道相互作用会导致与自旋相关的物理量产生横向分裂,该现象即为电子自旋霍尔效应^[2-4]. 类似于电子的自旋,光子携带有 $\pm\hbar$ 的内禀角动量,在几何相梯度的外场作用下,光子的自旋和轨道之间也会发生耦合^[5],从而导致与光子自旋相关的横向分裂,即为光自旋霍尔效应. 光自旋霍尔效应是纯的物理效应,其所反映的自旋-轨道相互作用的物理机制,与其他粒子体系中的自旋-轨道相互作用具有高度的相似性. 因此,可以借助光自旋霍尔效应

收稿日期:2022-10-19; **修改日期:**2023-01-04

作者简介:张志友(1978—),男,湖北襄阳人,四川大学物理学院教授,博士,从事自旋光子学、量子弱测量、微纳光学的研究和物理实验教学. E-mail: zhangzhiyou@scu.edu.cn

通信作者:张 红(1967—),女,四川大邑人,四川大学物理学院教授,博士,从事超快激光与物质相互作用及量子调控研究. E-mail: hongzhang@scu.edu.cn

的研究来模拟理解其他自旋粒子体系的物理效应. 由于光自旋霍尔效应和局域光与物质相互作用过程以及物性参量直接关联,且在微纳米尺度范围内表现出奇特的光学性质,因此基于光自旋霍尔效应可发展出丰富的自旋光子学器件及物性参量精密测量新技术.

1.1 光自旋霍尔效应产生的原理

光的自旋-轨道相互作用是光自旋霍尔效应产生的根源. 采用光的角动量与几何相位(贝里相位)来描述光的自旋-轨道相互作用具有普适性和清晰的物理图像^[6-7]. 下面从光的角动量出发,介绍自旋-轨道相互作用过程,阐述光自旋霍尔效应产生的物理机制.

根据量子力学描述,光子的自旋态与左、右旋圆偏振态相对应,携带的自旋角动量可表示为^[8]

$$\mathbf{S} = \sigma \hbar \frac{\mathbf{P}}{P}, \quad (1)$$

其中, $\sigma = \pm 1$ 分别对应左旋和右旋圆偏振,即与光束传播方向平行和反平行, \mathbf{P} 为光子的动量,可由波矢的均值表示,即 $\mathbf{P} = \hbar \langle \mathbf{k} \rangle$.

光子的轨道角动量有 2 种^[8]:

1) 外禀轨道角动量. 与坐标原点的选取、光束重心偏移量和传播路径相关,即与粒子轨道角动量类似,表示为 $\mathbf{L}^{\text{ext}} = \mathbf{R} \times \mathbf{p}$, 其中 \mathbf{R} 和 \mathbf{p} 分别为光束重心的位置矢量与动量.

2) 内禀轨道角动量. 仅与螺旋相位 $e^{il\varphi}$ (φ 为方位角; l 为轨道角动量量子数,也称拓扑荷数,取整数)波前相关,与光场空间分布的坐标选取无关,表示为 $\mathbf{L}^{\text{int}} = l\hbar \frac{\mathbf{p}}{p}$, 其中 $l\hbar$ 为光子的轨道角动量.

根据光子轨道角动量类型,自旋-轨道相互作用可分为自旋-外禀轨道角动量($\mathbf{S}\mathbf{L}^{\text{ext}}$)相互作用和自旋-内禀轨道角动量($\mathbf{S}\mathbf{L}^{\text{int}}$)相互作用. 这 2 种相互作用导致 2 类贝里相位: 第一类为自旋重定向贝里相位 (Spin-redirectation Berry phase), 常见于旋转对称性破缺的光学体系中,例如光束在空气-玻璃界面发生反射或折射等; 第二类为潘查拉特南-贝里相位 (Pancharatnam-Berry phase), 与光的偏振态演化相关,常见于旋转对称光学体系中,例如非傍轴强聚焦和散射、各向异性结构调制的光学体系等. 这 2 类贝里相位分别对应不同的光自旋霍尔效应,可用贝里相位梯度统一描述.

光子自旋在动量空间的重定向导致的贝里相位产生第一类光自旋霍尔效应. 例如,光在界面反射或折射时,其传播方向发生改变,对应于波矢在动量空间的球面上移动. 根据平面电磁波的横波特性(偏振方向总是垂直于波矢方向,即与波矢空间的球面相切),可知偏振矢量在整体上发生转动,从而诱导出与圆偏振光 \mathbf{E}^σ (自旋光子 $\sigma = \pm 1$) 相关的贝里相位. 在实验室球坐标系下可用贝里联络 (Berry connection) $\mathbf{A}^\sigma(\mathbf{k})$ 和贝里曲率 (Berry curvature) $\mathbf{F}^\sigma(\mathbf{k})$ 表示为^[9]

$$\mathbf{A}^\sigma(\mathbf{k}) = -i\mathbf{E}^{\sigma*}(\mathbf{k}) \cdot [\nabla_{\mathbf{k}}\mathbf{E}^\sigma(\mathbf{k})], \quad (2)$$

$$\mathbf{F}^\sigma(\mathbf{k}) = \nabla_{\mathbf{k}} \times \mathbf{A}^\sigma(\mathbf{k}), \quad (3)$$

其中 \mathbf{k} 为波矢,贝里联络和贝里曲率在动量空间中分别扮演等效的“矢势”和“磁场”. \mathbf{E}^σ 在参量空间中的闭合路径 C 上进行平行移动所获得的额外贝里相位为

$$\Phi_G = \iint_C \mathbf{A}^\sigma(\mathbf{k}) \cdot d\mathbf{k}. \quad (4)$$

动量空间自旋重定向所产生的额外贝里相位将导致光子在坐标空间的自旋分裂,其分裂的位移可由贝里相位梯度给出^[10],即

$$\Delta \mathbf{r} = \frac{\partial \Phi_G(k_x, k_y)}{\partial k_x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial \Phi_G(k_x, k_y)}{\partial k_y} \mathbf{e}_y. \quad (5)$$

光的偏振态演化导致的贝里相位诱导出第二类光自旋霍尔效应,可用斯托克斯 (Stokes) 参量空间来描述. 偏振态 $\psi(\mathbf{R})$ 在斯托克斯参量空间的演化,所对应的贝里联络 $\mathbf{A}^\sigma(\mathbf{k})$ 和贝里曲率 $\mathbf{F}^\sigma(\mathbf{k})$ 表示为^[8]

$$\mathbf{A}^\sigma(\mathbf{R}) = -i\psi^*(\mathbf{R}) \cdot [\nabla_{\mathbf{R}}\psi(\mathbf{R})], \quad (6)$$

$$\mathbf{F}^\sigma(\mathbf{R}) = \nabla_{\mathbf{R}} \times \mathbf{A}^\sigma(\mathbf{R}). \quad (7)$$

这里的贝里联络和贝里曲率也分别扮演等效的“矢势”和“磁场”. $\psi(\mathbf{R})$ 在参量空间中的闭合路径 C 上进行平移,所获得的额外贝里相位为

$$\Phi_G = \iint_C \mathbf{F}^\sigma(\mathbf{R}) \cdot d\mathbf{S}, \quad (8)$$

其在坐标空间的贝里相位梯度导致的动量空间自旋分裂位移为

$$\Delta \mathbf{k} = \frac{\partial \Phi_G(x, y)}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial \Phi_G(x, y)}{\partial y} \mathbf{e}_y. \quad (9)$$

光的自旋-轨道相互作用、自旋分裂都源于贝里相位梯度,只是自旋分裂表现的方式不同,前者体现在位置空间,后者体现在动量空间.

1.2 光自旋霍尔效应的研究进展

光在与物质相互作用过程中通常伴随光子的

自旋-轨道相互作用,从而诱导出光自旋霍尔效应. 上世纪50年代 Fedorov 在理论上预言:光束在玻璃-空气界面发生全内反射后会与左、右圆偏振相关的垂直于入射面的横向位移^[11],该位移非常小,因此很难被实验观测. 直到1972年, Imbert 利用多次反射放大横向位移,才在实验中首次观察到该横移,因此该横移被称为 Imbert-Fedorov 位移^[12]. 2004年,日本学者 Onoda 等人引入光子自旋角动量,从自旋-轨道相互作用的角度阐述了左、右旋圆偏振光束在界面反射或折射产生重心横移的机制,光自旋霍尔效应这一概念才开始被使用^[5]. 2006年, Bliokh 等人基于电磁场理论考虑了所有光子的总角动量守恒,给出了光自旋霍尔效应横向位移大小的精确描述,该描述成为后来光自旋霍尔效应的主要理论^[6]. 2008年, Hosten 等人利用量子弱测量技术精确测量了光束折射时产生的自旋横移^[13],精度达到了0.1 nm,该工作是光子自旋和量子弱测量研究领域的重要里程碑,此后,光自旋霍尔效应的研究和应用得到了飞速发展.

光自旋霍尔效应普遍存在于光与物质相互作用的界面上,与材料界面的结构和性质等密切相关. 下文将对不同材料界面和微纳结构中的光自旋霍尔效应进行介绍.

1.2.1 界面反射、折射诱导的光自旋霍尔效应

根据傅里叶光学的角谱理论,空间受限的实际光束可表示为无数不同波矢的平面波叠加,这些波矢之间存在微小的差异,导致在2种介质的界面发生反射或折射时,会因自旋重定向产生附加贝里相位,从而诱导出光自旋霍尔效应,如图1所示. 该自旋分裂很小,需利用量子弱测量技术(以下简称“弱测量”)进行观测.

基于弱测量,人们观测了光束反射时产生的光自旋霍尔效应,发现在布儒斯特角附近会产生极大的光自旋分裂现象^[14],以及当光束以布儒斯特角入射时,会产生面内自旋分裂对入射光偏振态异常敏感^[15]的现象. 基于光自旋霍尔效应对偏振态的敏感性发展出了物质手征光信号高精度、高灵敏度检测新方法^[16-17],其中高灵敏度的折射率传感^[18-20]和磁光信号测量方法,其精度达到了 10^{-6} rad^[21-23]. 此外,人们还利用光自旋霍尔效应测量了薄膜材料的厚度、复折射率和光电导^[24-26]以及石墨烯层数等^[27]. 目前,光自旋霍尔

效应已为物性参量高精度测量和高灵敏度的化学、生物传感开辟了新途径. 对于如何利用弱测量观测光自旋霍尔效应,将在本文的2.2节“光自旋霍尔效应实验教学”进行介绍.

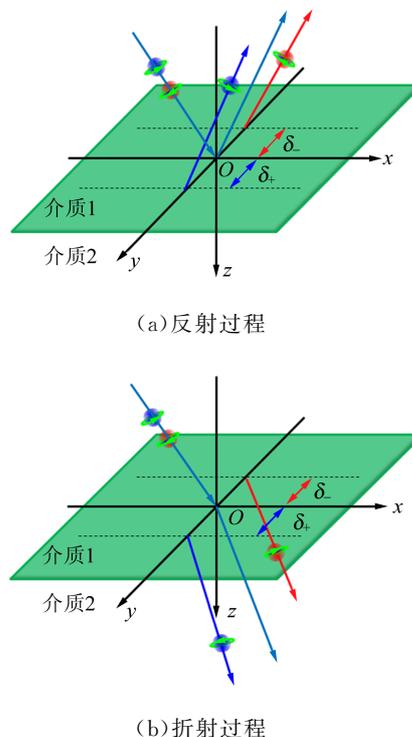


图1 光在界面反射和折射时发生光自旋霍尔效应示意图

1.2.2 亚波长结构中的光自旋霍尔效应

亚波长结构可以在更高自由度上调控光的传输特性,通过贝里相位设计可以产生奇异的自旋关联的光传输现象. 2013年, Yin 等人利用超表面产生强的光子自旋-轨道耦合,实现了垂直入射产生较大的光子自旋分裂现象^[28]. 2017年, Hasman 团队利用量子弱测量观测了纳米结构的弱无序相诱发的光自旋霍尔效应和强无序相产生的随机光学 Rashba 效应^[29]. 2020年, Wang 等人探测了随机磁性超表面的纳米级形貌^[30]. 随着微纳加工技术的发展,人们基于光自旋-轨道相互作用诱导的贝里相位,通过设计高阶模式的相位分布和光轴分布的超表面,发展出非常丰富的自旋关联的结构光场调控方法. 罗海陆课题组利用非均匀双折射超表面材料,精确产生了高阶庞加莱球上任意点的矢量光束^[31],以及混合阶庞加莱球上任意点的矢量涡旋光束^[32]. 自旋光子学集成器件,因其强大的偏振与相位调控能力而具有广泛且重要的应用前景.

1.2.3 基于光自旋霍尔效应的光学微分运算

当线偏振光斜入射到空气-玻璃界面,由于光自旋霍尔效应,反射光的左、右旋偏振分量会产生相反的微小位移(即构筑了光学微分运算的差分量),利用正交的后选择偏振态可使产生相反位移的 2 束光进行反相位叠加(即构筑了数学微分运算中的两函数相减运算),从而实现了光场的空间微分运算^[33-35]. 当沿 x 方向的偏振光在空气-玻璃界面反射时,由于光自旋霍尔效应,左旋偏振光和右旋偏振光在垂直于入射面的方向会发生相反方向的位移,即

$$E_r(x, y) = E_{in}(x, y + \Delta y) | + \rangle + E_{in}(x, y - \Delta y) | - \rangle, \quad (10)$$

反射光再通过偏振轴沿 y 方向的偏振片后的输出光场为

$$E_{out}(x, y) = E_{in}(x, y + \Delta y) - E_{in}(x, y - \Delta y) \approx 2\Delta y \frac{\partial E_{in}(x, y)}{\partial y}. \quad (11)$$

基于上述原理,可以通过微纳结构(超表面)在动量空间或位置空间构筑光自旋分裂和用产生的差分来构造光学微分运算系统. 另外,也可以用双折射晶体或偏转光路来构筑位置空间或动量空间的微分量,实现任意方向可调、差分可调、正负可区分的光学微分运算. 未来光学微分运算有望在高速计算、医学图像处理、波前传感等领域展现出巨大的应用前景.

2 光自旋霍尔效应的本科物理实验教学

2.1 光自旋霍尔效应实验仪

光自旋霍尔效应是光学领域的研究前沿,具有丰富的物理内涵和研究内容,为理解凝聚态和高能粒子等领域的自旋-轨道相互作用机制和效应提供了很好的模拟手段. 光在界面反射或折射是产生光自旋霍尔效应的简单方式,但由于其自旋分裂的位移很小,因此需要借助量子弱测量技术进行弱值放大,以方便观测. 由于实验中的“弱值放大”和“传输放大”所对应的光路和光学器件与大学物理中的偏振光实验(起偏、检偏)和其他基础物理实验所用的光路和器件相通,这意味着可以把光自旋霍尔效应的研究成果进行整理,发展出适合用于本科教学实验的仪器. 为此,通过对大学物理中的光学实验进行梳理,结合光自旋霍尔效应的研究前沿,研制出了方便学生开展科

研创新训练的实验仪器,该仪器具有较强的灵活性和综合性.

自制的光自旋霍尔效应实验仪器如图 2 所示. 该仪器借鉴了分光计的精密角度测量和旋转控制,以方便、精确地调节入射角. 另外,在此基础上还做了以下设计:

- 1) 把分光计实验仪的两臂换成导轨,平行光管和望远镜换成分离的光学元件系统.
- 2) 把望远镜的目镜观察改用 CCD 探测.
- 3) 把分光计的光源替换为激光器.
- 4) 为适应实验室的自然光条件,该仪器采用同轴光学系统.

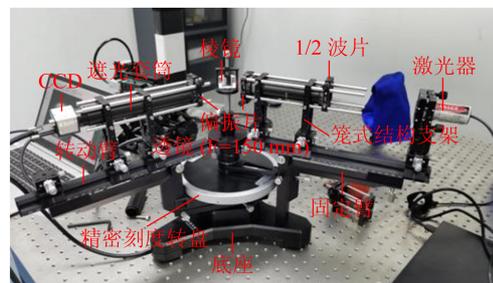


图 2 光自旋霍尔效应实验仪

自制的光自旋霍尔效应实验仪器可开展的实验类型:

1) 基础光学实验. 该仪器依托分光计平台,保证了角度的精确调节和测量,两臂采用导轨和分离的光学元件,并配置有高精度的偏振片、波片、成像透镜和载物台,各光学元件可任意更换、调节和组合,因此该仪器可开展各种基础光学实验,例如成像光学实验、分光计的调节和使用、介质折射率的测定、光栅衍射及光栅常量测定,以及光的干涉、衍射和偏振等.

2) 与光自旋霍尔效应原理及应用相关的实验. 例如,观察光自旋霍尔效应、精确测量光在介质表面反射和折射时产生的自旋分裂,以及界面的物性表征和测量等.

3) 自旋霍尔效应的外场调控实验. 例如,观察磁场、电场作用下光自旋霍尔效应随外场的变化关系,研究外场作用下光与材料的相互作用和新特性等. 另外,还可为学生设置多个与应用相关的综合性实验和科研训练题目,也可用于教师开展相关科研工作.

4) 量子弱测量实验. 以光自旋霍尔效应实验

为例,展示量子弱测量的基本原理和技术,开展光学精密测量和传感方面的课题研究.另外,还可为学生设置与量子弱测量相关的综合实验和科研训练题目,并方便教师开展相关科研工作.

2.2 光自旋霍尔效应实验教学

基于弱测量原理观测光自旋霍尔效应的实验光路如图 3 所示.

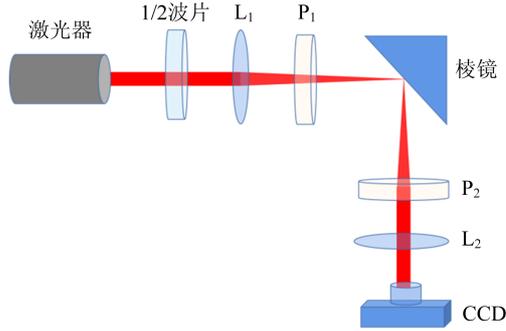


图 3 光自旋霍尔效应实验的光路图

具体实验步骤为:

1) 制备系统的前选择态 $|\psi_{\text{pre}}\rangle$ 和仪器初态 $|\varphi_i\rangle$. 由激光器产生的线偏振高斯光束依次通过 1/2 波片(用于调节光强,避免探测器饱和)、平凸透镜 L_1 (焦距为 50 mm)和高消光比的偏振片 P_1 后,会聚于棱镜的斜面上. 在弱测量理论框架下^[15],以中心波矢和界面法线构成入射面,由平行此入射面的 H 偏振态和垂直于此入射面的 V 偏振态构成两态量子系统(简称“系统”). 旋转 P_1 ,使入射到棱镜界面的光束为 H 偏振态,即系统的前选择态 $|\psi_{\text{pre}}\rangle = |H\rangle$. 透镜 L_1 将激光器输出的准直高斯光束进行角谱展宽,制备出仪器的初态,即入射高斯光束的波矢空间的光场分布为测量仪器初态 $|\varphi_i\rangle$,波矢为仪器的指针变量.

2) 系统和仪器之间发生弱相互作用,即弱测量. 当光束在空气-棱镜界面反射时,发生光子自旋-轨道相互作用,产生光自旋霍尔效应. 此过程中,光子的自旋算符 $\hat{\sigma}_3$ 为系统的可观测量,光自旋霍尔效应的横向分裂量 δ 对应于系统和仪器的耦合强度.

3) 后选择测量. 反射光束通过平凸透镜 L_2 (焦距为 250 mm)、高消光比的偏振片 P_2 后,进入光电探测器 CCD,进行图像采集和数据分析. 其中,偏振片 P_2 的透振方向与 P_1 透振方向的夹角为 β (P_1 和 P_2 的偏振方向接近垂直,即 $\beta =$

$90^\circ - \epsilon, \epsilon < 2^\circ$),经过 P_2 后的偏振态即为后选择态 $|\psi_f\rangle = \cos \beta |H\rangle + \sin \beta |V\rangle$. 透镜 L_2 和 L_1 共焦,将光束从角谱空间重新变为坐标空间.

上述过程的数学描述如下:系统的前选择态为 $|\psi_{\text{pre}}\rangle = |H\rangle$,仪器的初始态 $|\varphi_i\rangle$ 为高斯光束的空间模式,具体表示为

$$|\varphi_i\rangle = \iint dk_{ix} dk_{iy} \psi(k_{ix}, k_{iy}) |k_{ix}\rangle |k_{iy}\rangle, \quad (12)$$

由仪器和系统构成的总初态为

$$|\psi_i\rangle = |\varphi_i\rangle |\psi_{\text{pre}}\rangle = \iint dk_{ix} dk_{iy} \psi(k_{ix}, k_{iy}) |k_{ix}\rangle |k_{iy}\rangle |H\rangle, \quad (13)$$

可观测量用自旋算符 $\hat{\sigma}_3 = |+\rangle\langle+| - |-\rangle\langle-|$ 表示,指针变量用光子动量(即波矢)表示. 当光束在界面反射时,会发生自旋-轨道相互作用,其波函数演化为

$$|\psi_f\rangle = \iint dk_{rx} dk_{ry} \psi(k_{rx}, k_{ry}) |k_{rx}\rangle |k_{ry}\rangle \hat{M} |\psi_i\rangle, \quad (14)$$

其中 $\hat{M} = \text{diag}(r_p, r_s)$ 表示光束在反射之后的偏振态变化. 光束通过偏振片 P_2 后的态为

$$|\psi_f\rangle = \cos \beta |H\rangle + \sin \beta |V\rangle, \quad (15)$$

后选择之后的波函数可表示为

$$\begin{aligned} |\Psi_f\rangle &= |\psi_f\rangle \langle \psi_f | \psi_f \rangle = \\ &= \iint dk_{rx} dk_{ry} \psi(k_{rx}, k_{ry}) |k_{rx}\rangle |k_{ry}\rangle \cdot \\ &\exp \left[\frac{i(k_{rx}^2 + k_{ry}^2)z}{2k_r} \right] \langle \psi_f | \exp(-ik_y \delta \hat{\sigma}_3) \hat{M} | \psi_i \rangle, \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $\exp \left[\frac{i(k_{rx}^2 + k_{ry}^2)z}{2k_r} \right]$ 为系统的自由演化, \hat{M} 为非涅尔反射系数, $\hat{M} |\psi_i\rangle$ 为光束经空气-玻璃界面反射后系统的态,后选择之后的光场通过透镜 L_2 准直后进入 CCD,记录光束整体重心位移为

$$\begin{aligned} \langle y \rangle &= \frac{\langle \Psi_f | y | \Psi_f \rangle}{\langle \Psi_f | \Psi_f \rangle} = \frac{\langle \Psi_f | i \frac{\partial}{\partial k_{ry}} | \Psi_f \rangle}{\langle \Psi_f | \Psi_f \rangle} \approx \\ &= F \cdot \text{Im} [A_w] \cdot \delta, \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $F = z/z_R$ 为传输放大因子,与传输距离有关. 其中 $z_R = k_0 \omega_0^2 / 2$ 为瑞利距离, z 为传输距离. 在实验中,激光波长为 632.8 nm,经过 L_1 聚焦后,光束的束腰半径 $\omega_0 = 27 \mu\text{m}$;传输距离 $z = 250 \text{ mm}$,此时传输放大因子 $F \approx 69$. 另外,弱值

$$A_w = \frac{\langle \psi_f | \hat{\sigma}_3 | \psi_i \rangle}{\langle \psi_f | \psi_i \rangle} = i \tan \beta = i \cot \epsilon, \text{ 实验中 } \epsilon =$$

0.2°, 可得弱值放大倍数为 286. 于是, 通过传输放大和弱值放大, 光自旋霍尔效应的初始横移 δ 将被放大约 $F \cdot \text{Im}[A_w] = 69 \times 286 \approx 2 \times 10^4$ 倍, 实现了对光自旋霍尔效应的精密测量和观察.

实验内容:

1) 搭建光自旋霍尔效应实验光路, 调出严格的 H 偏振光及布儒斯特角, 观察 H 偏振光以布儒斯特角入射时的反射光特点. (H 偏振光是指偏振方向平行于中心波矢, 并和界面法线构成入射面的光. H 偏振光以布儒斯特角入射时, 放大后的光自旋霍尔效应的重心横移为零, 并与偏振片 P_2 的透振方向的选择无关.)

2) 固定 H 偏振光入射, 入射角偏离布儒斯特角 2° 左右, 研究光自旋霍尔效应重心横移随后选择角 (P_2 偏振片透振方向) 的变化关系.

3) 调节 P_1 偏振片, 使入射光为 H 偏振态 (即前旋转态为 $|H\rangle$), 设置 $\beta = 89^\circ$, 研究光自旋霍尔效应重心横移随入射角的变化关系.

2.3 光自旋霍尔效应的研究性教学情况

该课程由四川大学物理实验教学中心以物理“双创”实验课程的形式开设, 主要对象为物理学拔尖班和强基计划大二、大三的学生, 约 30 人/年. 课程计划 48 学时, 其中讲授 18 学时, 实验 30 学时. 目前, 实验室有自制光自旋霍尔效应实验仪 5 套, 实验分组进行, 其中拔尖班 12~15 人, 分 3 组; 强基班 20 人, 分 4 组. 讲授课程为大班进行, 实验课程为分组进行, 平时实验室全天开放, 学生可通过预约自由进行实验. 课程要求及成绩组成:

1) 独立完成光自旋霍尔效应实验仪的组装、光路调节和光自旋霍尔效应的实验观测等基本内容, 分值占比 35%.

2) 完成 1 个科研训练项目 (题目由教师事先给定), 并撰写研究报告, 分值占比 50%.

3) 通过 PPT 进展汇报和答辩, 分值占比 15%.

2.4 已开设的研究性题目情况

2.4.1 基于光自旋霍尔效应的手征光信号测量

将待测手性样品的折射率和旋光谱转换为与光子自旋分裂相关的测量参量 (即以光自旋霍尔效应的横移为测量参量), 利用量子弱测量放大技术对光子自旋分裂横移进行测定, 可同时高精度地获得待测样品的折射率和旋光谱, 进而得到样

品中手性对映体的含量, 其实验装置示意图如图 4 所示.

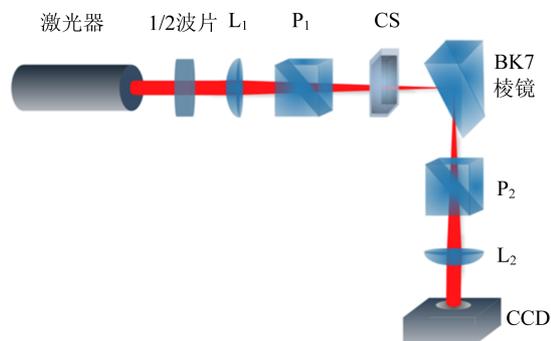
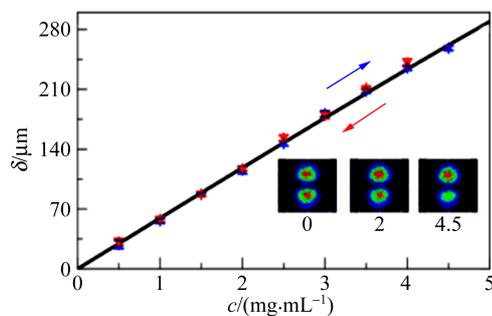
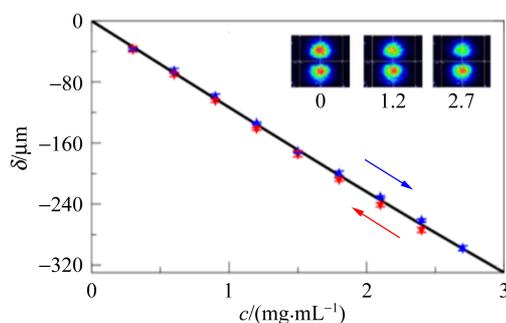


图 4 基于光自旋霍尔效应的手性溶液旋光性测量实验装置示意图^[16]

在光自旋霍尔效应实验装置中的偏振片 P_1 后面放入待测手性溶液 CS, 把通过手性溶液后的光的偏振态视为待测的前选择态, 由于光子自旋分裂对入射到棱镜界面的偏振态很敏感, 可以通过观测放大后的自旋分裂来测量手性溶液的旋光性^[16]. 图 5 为光束质心横移随样品浓度的变化关系; 图 6 为手性溶液为葡萄糖和果糖不同比例混合时, 放大后的光子自旋分裂的变化情况.

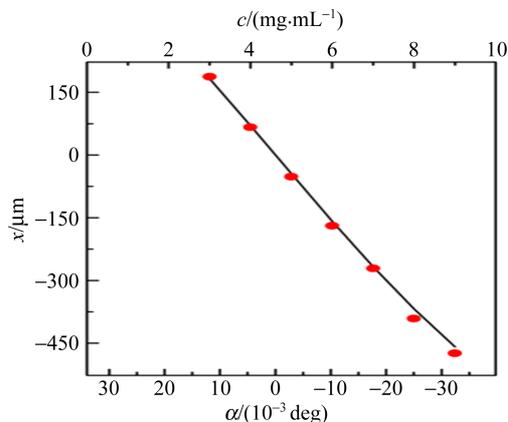


(a) 葡萄糖水溶液

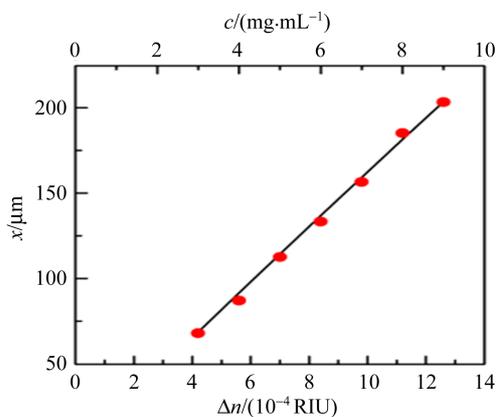


(b) 果糖水溶液

图 5 光束质心横移 δ 随样品浓度 c 的变化关系^[16]



(a) 指针偏移量 x 随旋光度 α 的变化曲线



(b) 指针偏移量 x 随折射率改变量 Δn 的变化曲线

图 6 不同比例葡萄糖和果糖混合溶液的旋光度和折射率变化所对应的弱测量放大后的指针偏移量变化曲线^[17]

由于 CCD 读取的是经过后选择的光束质心,光强的整体变化并不影响质心的位置,从而抑制了光源不稳定性和环境扰动引起的光强变化噪声,其质心的变化主要来源于手性溶液引起的偏振态变化(即前选择态的变化),因此利用光子自旋分裂能够很好地抑制噪声,提高测量精度(测量精度可达 10^{-6} rad 以上),为手征光信号精确测定和手性反应实时在线分析提供了新手段,在手性药物的研发领域也具有重要应用。

基于自制的光自旋霍尔实验仪可开设与手性光信号测量和手性传感相关的研究性实验。学生在科研训练中发现光以布儒斯特角入射,界面处的面内光子自旋分裂与堆积方式对前选择偏振态异常敏感^[15];利用量子弱测量技术对面内光子自旋分裂进行测量可用于对入射光偏振态变化的高

精度、高灵敏度探测。将该原理应用于手性药物的手征光信号探测,可实现对极其微弱手征光信号的提取^[16],以及对手性对映体含量的精确测定^[17,36],通过科研创新训练使学生的综合光学实验能力得到充分的培养和提升。

2.4.2 基于光自旋霍尔效应的磁光参数测量

磁性材料及其相关器件以其独特的信息存储备受关注,高精度、高灵敏度的磁光克尔测量对磁学领域的发展具有重要意义。图 7 为测量磁光参量的实验装置图,光束在磁光材料表面反射时,光子自旋分裂与外加磁场密切相关^[23],可以利用此性质测量磁光参量和磁滞回线。图 8 为利用光自旋霍尔效应测量的镍铁合金薄膜的磁滞回线,图中的 O, a, b 分别为起始点、正向饱和磁场强度点、反向饱和磁场强度点。以光自旋霍尔效应为探针,结合弱值放大效应,可高精度测量各种磁性材料的磁光性质。基于自制的光自旋霍尔实验仪,学生观测了磁性金属薄膜表面的光自旋霍尔效应,并精确测量了磁光系数、磁性薄膜材料的磁光克尔旋转角和磁滞回线^[23-25],测量精密和灵敏度可媲美现有磁光测量的高端科研设备。

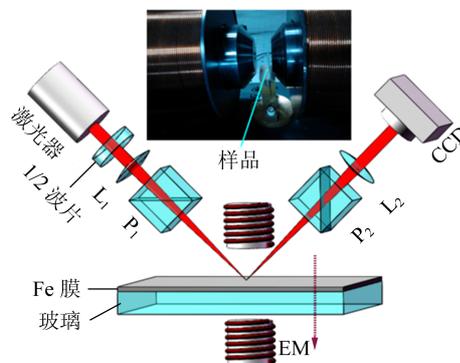


图 7 基于光自旋霍尔的磁性参量测量装置示意图

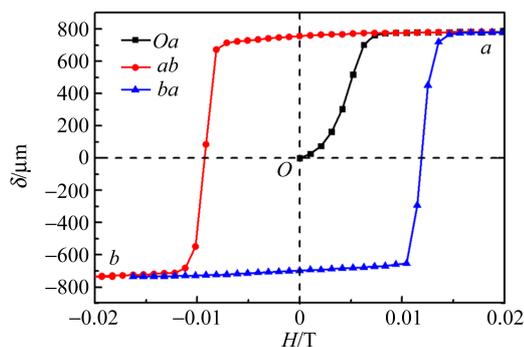


图 8 镍铁合金薄膜的磁滞回线^[23]

2.4.3 基于光自旋霍尔效应的生物学传感

以金属膜表面发生表面等离子体共振 (SPR) 产生的光自旋霍尔效应为测量参量, 通过对弱测量指针的重新定义, 实现超高灵敏度的折射率传感. 其中, 基于光自旋霍尔效应和弱测量技术的表面等离子体共振折射率传感实验装置如图 9 所示. 当附着在金属表面的样品折射率改变时, 会引起光子自旋分离的敏感变化, 通过弱测量放大该变化量可实现高灵敏度的折射率传感 (见图 10). 基于自制的光自旋霍尔实验仪和样品加载池, 发展出基于量子弱测量的新型表面等离子体共振传感技术, 比现有的 SPR 传感器的灵敏度提高了 2 个数量级, 且对金属膜厚度不敏感, 从而极大降低了耗材成本^[18,37], 对发展新型的高端生化检测仪器设备具有重要意义.

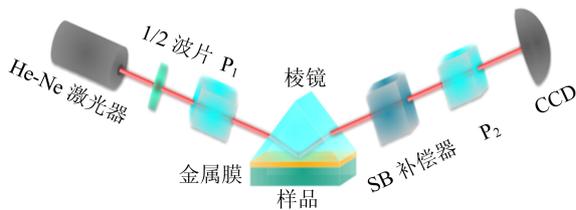
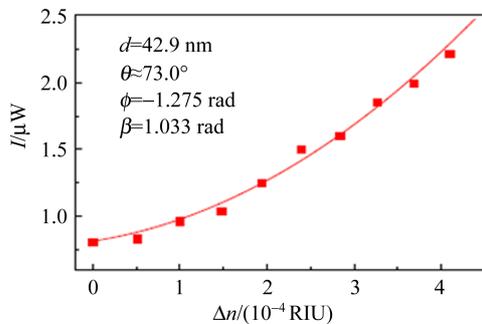
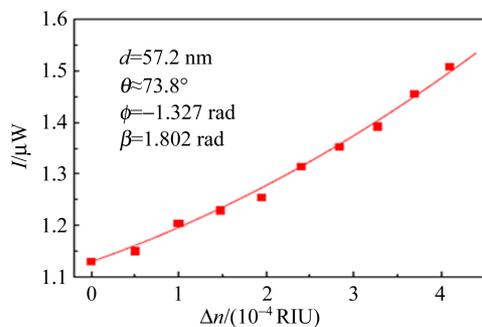


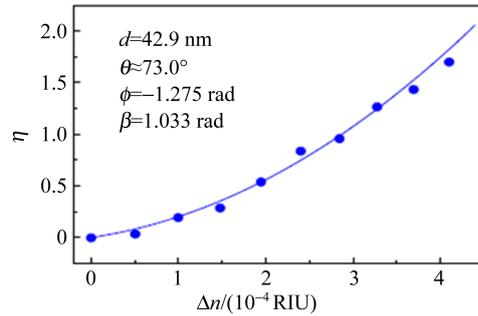
图 9 基于弱值放大的 SPR 传感装置示意图^[18]



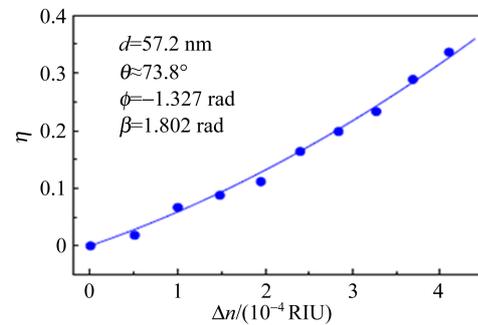
(a) 金属膜厚度为 42.9 nm 时, 后选择强度 I 随溶液折射率改变量 Δn 的变化曲线



(b) 金属膜厚度为 57.2 nm 时, 后选择强度 I 随溶液折射率改变量 Δn 的变化曲线



(c) 对应于 (a) 的指针放大偏移量 η 随折射率改变量 Δn 的变化曲线



(d) 对应于 (b) 的指针放大偏移量 η 随折射率改变量 Δn 的变化曲线

图 10 基于弱测量放大的 SPR 传感实验结果^[18]

2.4.4 光自旋霍尔效应的外场调控研究

类似于自旋电流的注入, 当光自旋霍尔效应发生时, 左右旋光的光子会在介质界面上向相反的方向聚集. 学生基于自制的光自旋霍尔效应实验仪发现线偏振光在 2 种介质的界面发生反射或透射时, 左旋圆偏振光和右旋圆偏振光在垂直于入射面的方向会产生分离和自旋聚集的现象; 当光以布儒斯特角入射时, 光子的自旋聚集行为对入射光偏振态的响应异常敏感. 利用磁场和电场调控自旋光子堆积的周期性变化, 电压调制仅为 0.09 V^[38-39]. 图 11 为利用磁场调控光自旋霍尔效应的实验装置图, 在外加磁场的作用下可以实现左右旋光光子的分裂反转. 图 12~13 分别为利用磁场和电场调控光自旋霍尔效应的实验曲线, 从图中可以看出, 通过外场可以实现对自旋光子分裂的空间位移和符号的有效控制. 当光束斜入射到半导体表面时, 由于自旋-轨道相互作用的存在, 光子的角动量会传递给半导体材料中的电子, 使得自旋取向不同的电子也会在材料中发生

相应的空间位置改变^[40],因此有望通过光子自旋来调控电子自旋行为. 以上发现可能在基于自旋的纳米光子器件中具有重要的应用价值.

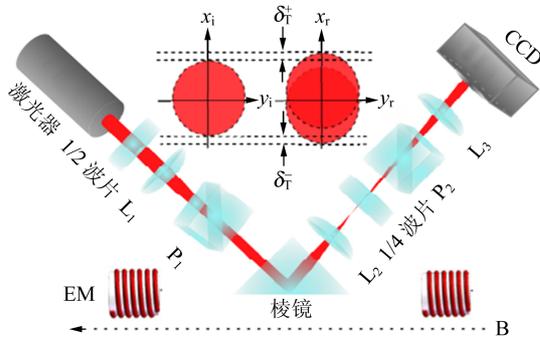


图 11 利用磁场调控光子自旋堆积的实验装置

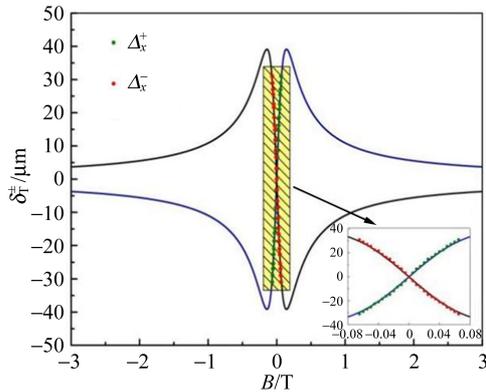
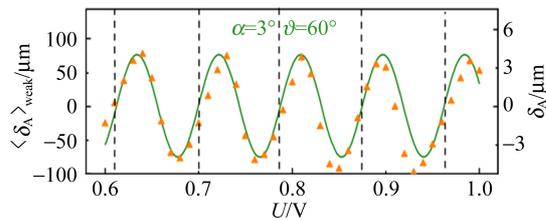
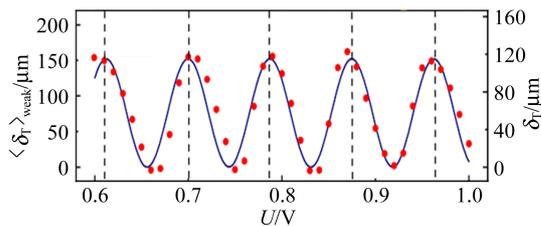


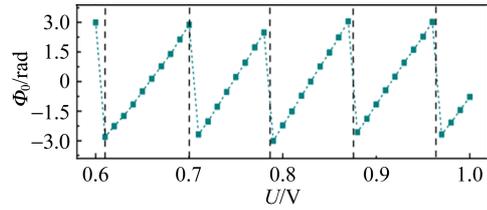
图 12 面内光自旋霍尔效应诱导的自旋堆积随外磁场的变化曲线^[38]



(a) $\langle \delta_L \rangle_{\text{weak}}$ 与外加电压的关系



(b) $\langle \delta_T \rangle_{\text{weak}}$ 与外加电压的关系



(c) Φ_0 与外加电压的关系

图 13 光与晶轴夹角为 60° 时,光自旋霍尔效应的角移 $\langle \delta_L \rangle_{\text{weak}}$, $\langle \delta_T \rangle_{\text{weak}}$ 和液晶相位调制器引入的相位差 Φ_0 与外加电压的关系^[39]

3 结束语

在很多物理体系中都存在粒子的自旋-轨道相互作用,并表现出与自旋相关联的物理效应,但观测起来十分困难. 例如凝聚态系统中,由于杂质散射和噪声影响会导致电子的轨迹难以测量,需要极为苛刻、复杂的实验条件才有可能观测到电子的自旋霍尔效应;高能物理中,目前的实验能力还难以观测到相对论粒子的自旋-轨道相互作用. 光自旋霍尔效应与上述诸多物理体系中粒子的自旋-轨道相互作用有很大的相似性,又是纯的物理效应,因此可为模拟其他粒子体系中的自旋-轨道相互作用过程提供方法. 光自旋霍尔效应可以展示光在纳米尺度范围内的自旋-轨道强耦合作用,为光场调控提供了自旋自由度,极大丰富了现代光学研究内容. 另外,光自旋霍尔效应在微纳光学领域和量子光学等领域发展迅速,有望发展出新的分支学科——自旋光子学. 光自旋霍尔效应观测可借助量子弱测量技术,它是利用前、后选择测量来确定量子系统统计性质的测量方法,可以在系统与仪器之间耦合很弱的情况下实现指针偏移量的放大,是新的弱信号检测技术和光学精密测量技术. 光自旋霍尔效应和量子弱测量是目前物理学领域的研究前沿和热点,能否将这些前沿研究恰当地转化为教学,值得探索. 本文研制的光自旋霍尔实验仪可适用于本科生实验教学,基于该仪器可以开展基础光学实验、综合光学实验以及科研创新的多层次光学实验等,既可以满足学生的科研创新,也可以支撑教师进行科研和教学拓展.

参考文献:

[1] Hirsch J. Spin Hall effect [J]. Physical Review

- Letters, 1999,83(9):1834-1837.
- [2] Sinova J, Culcer D, Niu Q, et al. Universal intrinsic spin Hall effect [J]. Physical Review Letters, 2004,92(12):126603.
- [3] Sinova J, Valenzuela S O, Wunderlich J, et al. Spin Hall effects [J]. Review of Modern Physics, 2015, 87(4):1213-1259.
- [4] Andrews D L, Babiker M. The angular momentum of light [M]. London: Cambridge University Press, 2013:174-245.
- [5] Onoda M, Murakami S, Nagaosa N. Hall effect of light [J]. Physical Review Letters, 2004,93(8):083901.
- [6] 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]. Physical Review Letters, 2006, 96(7):073903.
- [7] Beth R A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light [J]. Physical Review, 1936,50(2):115-125.
- [8] Bliokh K Y, Rodriguez-Fouruno F J, Nori F, et al. Spin-orbit interactions of light [J]. Nature Photonics, 2015,9(12):796-808.
- [9] Bliokh K Y, Niv A, Kleiner V, et al. Geometrodynamics of spinning light [J]. Nature Photonics, 2008,2(12):748-753.
- [10] Ling X, Zhou X, Huang K, et al. Recent advances in the spin Hall effect of light [J]. Reports on Progress in Physics Physical Society (Great Britain), 2017,80(6):066401.
- [11] Fedorov F I. To the theory of total reflection [J]. Journal of Optics, 2013,15(1):4002.
- [12] Imbert C. Calculation and experimental proof of the transverse shift induced by total internal reflection of a circularly polarized light beam [J]. Physical Review D, 1972,5(4):787-796.
- [13] Hosten O, Kwiat P. Observation of the spin Hall effect of light via weak measurements [J]. Science, 2008,319(5864):787-790.
- [14] Luo H L, Zhou X X, Shu W X, et al. Enhanced and switchable spin Hall effect of light near the Brewster angle on reflection [J]. Physical Review A, 2011,84(4):043806.
- [15] Qiu X D, Zhang Z Y, Xie L G, et al. Incident-polarization-sensitive and large in-plane-photonic-spin-splitting at the Brewster angle [J]. Optics Letters, 2015,40(5):1018-1021.
- [16] Qiu X D, Xie L G, Liu X, et al. Estimation of optical rotation of chiral molecules with weak measurements [J]. Optics Letters, 2016, 41 (17): 4032-4035.
- [17] Xie L G, Qiu X D, Luo L, et al. Quantitative detection of the respective concentrations of chiral compounds with weak measurements [J]. Applied Physics Letters, 2017,111(19):191106.
- [18] Luo L, Qiu X D, Xie L G, et al. Precision improvement of surface plasmon resonance sensors based on weak-value amplification [J]. Optics Express, 2017,25(18):21107-21114.
- [19] Sheng L J, Xie L G, Luo H L, et al. Sensitivity enhanced refractive index sensor by reducing the influence of in-plane wavevector in photonic spin Hall effect [J]. IEEE Photonics Journal, 2018,10(5):6501209.
- [20] Xu L P, Luo L, Wu H, et al. Measurement of chiral molecular parameters based on a combination of surface plasmon resonance and weak value amplification [J]. ACS Sensors, 2020, 5 (8): 2398-2407.
- [21] Qiu X D, Zhou X X, Hu D J, et al. Determination of magneto-optical constant of Fe films with weak measurements [J]. Applied Physics Letters, 2014,105(13):131111.
- [22] Wang Q, Li T, Luo L, et al. Measurement of hysteresis loop based on weak measurement [J]. Optics Letters, 2020,45(5):1075-1078.
- [23] Li T, Wang Q, Taallah A, et al. Measurement of the magnetic properties of thin films based on the spin Hall effect of light [J]. Optics Express, 2020,28(20):29086-29097.
- [24] Zhou X X, Xiao Z C, Luo H L, et al. Experimental observation of the spin Hall effect of light on a nanometal film via weak measurements [J]. Physical Review A, 2012,85(4):043809.
- [25] Chen S Z, Ling X H, Shu W X, et al. Precision measurement of the optical conductivity of atomically thin crystals via the photonic spin Hall effect [J]. Physical Review Applied, 2020, 13 (1): 014057.
- [26] Chen S Z, Zhou X X, Ling X H, et al. Measurement of the optical constants of monolayer MoS₂ via the photonic spin Hall effect [J]. Applied Physics Letters, 2021,118(11):111104.

- [27] Zhou X X, Ling X H, Luo H L, et al. Identifying graphene layers via spin Hall effect of light [J]. *Applied Physics Letters*, 2012,101(25):251602.
- [28] Yin X B, Ye Z L, Rho J, et al. Photonic spin Hall effect at metasurfaces [J]. *Science*, 2013, 339 (6126):1405-1407.
- [29] Maguid E, Yannai M, Faerman A, et al. Disorder-induced optical transition from spin Hall to random Rashba effect [J]. *Science*, 2017, 358 (6369):1411-1415.
- [30] Wang B, Rong K X, Maguid E, et al. Probing nanoscale fluctuation of ferromagnetic meta-atoms with a stochastic photonic spin Hall effect [J]. *Nature Nanotechnology*, 2020,15(6):450-456.
- [31] Liu Y C, Ling X H, Yi X N, et al. Realization of polarization evolution on higher-order Poincaré sphere with metasurface [J]. *Applied Physics Letters*, 2014,104(19):191110.
- [32] Liu Z X, Liu Y Y, Ke Y G, et al. Generation of arbitrary vector vortex beams on hybrid-order Poincaré sphere [J]. *Photonics Research*, 2017,5 (1):15-21.
- [33] Zhu T F, Lou Y J, Zhou Y H, et al. Generalized spatial differentiation from the spin Hall effect of light and its application in image processing of edge detection [J]. *Physical Review Applied*, 2019,11(3):034043.
- [34] Xu D Y, He S S, Zhou J X, et al. Optical analog computing of two-dimensional spatial differentiation based on the Brewster effect [J]. *Optics Letters*, 2020,45(24):6867-6870.
- [35] Zhu T, Guo C, Huang J, et al. Topological optical differentiator [J]. *Nature Communications*, 2021,12(1):680.
- [36] Zhou H, Wei Y J, Hao W J, et al. Estimating constituents of optical isomers in mixed solution based on spin Hall effect of light [J]. *Applied Optics*, 2017,56(21):5794-5798.
- [37] Wang H L, Li W K, Huang J L, et al. Surface plasmon resonance (SPR) sensor based on optimal pre- and post-selection [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019,11(2):6801207.
- [38] He Y, Xie L G, Qiu J D, et al. Manipulating photonic spin accumulation with a magnetic field [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125 (2): 023101.
- [39] He Y, Xie L G, Qiu J D, et al. Periodically manipulating the photonic spin Hall effect with an electric field [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(9):092009.
- [40] Ménard J M, Mattacchione A E, Driel H M, et al. Ultrafast optical imaging of the spin Hall effect of light in semiconductors [J]. *Physical Review B*, 2010,82(4):045303.

Research-oriented teaching in experiment of spin Hall effect of light

ZHANG Zhiyou, ZHANG Hong

(College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The spin-orbit interaction can result in a spatial separation of the left- and right-handed circularly polarized photons, which is termed the spin Hall effect of light (SHEL). The SHEL enriched the content of optics and has become the hotspots in research. Due to the resemblance between the SHEL experimental setup and standard telescope or microscope system, such as the polarizers, telescopes and microscopes, it was probable to develop an instrument for undergraduate teaching based on the achievements of the SHEL. In this paper, we reviewed the research of the SHEL and briefed the type of experiment and the study of teaching using the self-made instrument.

Key words: spin Hall effect of light; optical effect; content of optics

[责任编辑:郭 伟]