

手征和运动介质界面异常光自旋霍尔效应<sup>\*</sup>曾天海<sup>1</sup> 王海雷<sup>2</sup> 张向东<sup>1,2,†</sup>

(1 北京理工大学物理学院 北京 100081)

(2 北京师范大学物理系 北京 100875)

**摘要** 文章讨论了偏振高斯光束在空气—手征介质界面的反射和折射问题,发现了反射和折射光束的异常自旋霍尔效应.在某些特定的角度下,反射高斯光束重心的移动可以达到几十个波长的量级,通过调节手征参数,甚至会出现折射光重心移动方向由正到负的转变.文章还讨论了任意偏振高斯光束在空气—运动介质界面的反射和透射问题,当介质垂直于入射平面运动时,反射和透射光束的横向移动可以达到几个波长的量级,甚至在某些运动速度下可以实现移动方向正负的改变.这些研究对控制光的自旋霍尔效应提供了可能的途径.

**关键词** 自旋霍尔效应,手征介质,运动介质,横向移动,偏振高斯光束

## Anomalous spin Hall effects of light on the interfaces of chiral and moving media

ZENG Tian-Hai<sup>1</sup> WANG Hai-Lei<sup>2</sup> ZHANG Xiang-Dong<sup>1,2,†</sup>

(1 School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract** We discuss the issue of reflection and refraction of a polarized Gaussian beam at the interface between a transparent medium and a chiral metamaterial. Some unusual spin Hall effects of the reflected and transmitted light have been found. It is shown that the spin-dependent displacements of the reflected beam centroid can not only reach several tens of wavelengths at certain incident angles, but also the reverse effect for the transmitted beams can be realized by tuning the chiral parameters. We also discuss the issue of reflection and refraction of a polarized Gaussian beam at the interface between the dielectric medium and the moving medium. The Imbert-Fedorov shifts of the reflected and transmitted beams can reach several wavelengths of incident beam at a certain velocity when the slab moves perpendicularly to the incident plane. These findings provide a pathway for controlling the spin Hall effects of light.

**Keywords** spin Hall effect, chiral media, moving media, transverse shift, polarized Gaussian beam

### 1 引言

与电子自旋霍尔效应相对应,最近人们对光的自旋霍尔效应做了很多研究<sup>[1-8]</sup>.光束在两个匀质各向同性介质界面的反射和折射行为与平面波的不同,会出现相对入射点的重心位置的偏移,也就是垂直入射面的横向移动和在入射面内的纵向移动.早在1672年,牛顿就在他的光学理论中预言,光束在两种介质的界面上发生全反射时,其反射光束相对几何反射会发生移动,但由于其移动量只能达到光波长的量级,实验上很难观察到,所以该现象一直没

有受到人们的重视<sup>[9]</sup>.直到1947年,Goos和Hänchen在实验上观察到光束有平行于入射面的纵向移动(也称为GH移动)现象后,才引起人们的重视;1955年,Fedorov预言了横向移动,1972年,Imbert从实验上观察到了这一现象(也称为IF移动)<sup>[1,9]</sup>,这实际上就是光的霍尔效应,只不过那时还没有光的霍尔效应的提法.

直到2004年,文献[1]作者才提出了光自旋霍尔效应的概念.与电子自旋霍尔效应所不同的是,用

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:10825416)资助项目  
2012-01-31收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: zhangxd@bnu.edu.cn

光子的自旋代替了电子的自旋,用折射率梯度代替了电场梯度,通过一个实际的模型,文献[2]研究了光在各向同性介质表面的自旋霍尔效应,即当一束高斯光束入射到介质表面时,透射光束会分裂为两束光:左旋圆偏振光和右旋圆偏振光,得出了 IF 移动的精确解,以及 IF 移动与角动量守恒和自旋霍尔效应的关系.文献[3]作者通过弱测量的方法,在实验上验证了光的自旋霍尔效应的存在.折射率梯度是在两种不同材料的分界面产生的,当一束偏振高斯光束通过界面时,可以观察到光的自旋霍尔效应<sup>[4-8]</sup>,这是光子角动量守恒的要求.文献[6]研究了左手材料界面的自旋霍尔效应,并给出了虽然左手材料的折射率梯度与常规材料相反,但是其自旋霍尔效应并不相反的结论.此外,在其他的一些系统中,人们也观察到了这种效应<sup>[10-17]</sup>.在上述所有讨论中,与光自旋霍尔效应相关的 IF 移动值在一个波长量级.最近,我们从理论上推导出了关于手征和运动介质界面的异常光自旋霍尔效应<sup>[18,19]</sup>,利用一阶近似,得到了偏振高斯光束在空气—手征介质界面以及运动介质界面的反射和折射的解析式,进而利用求重心的方法,给出了与光的自旋霍尔效应相关的 IF 移动的解析表达式.在适当选取参数的情况下,IF 移动值可以大到几十个波长量级,并且 IF 移动方向随参数变化会出现反转.

## 2 手征介质界面的异常光自旋霍尔效应

这里考虑一束偏振高斯光束,以入射角  $\theta_i$  由一匀质各向同性的介电介质(如空气)入射到一个手征介质表面的情形(如图 1 所示).手征介质的本构关系为<sup>[20-22]</sup>:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} + i \frac{\kappa}{c} \mathbf{H}, \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + i \frac{\kappa}{c} \mathbf{E}, \quad (2)$$

式中  $\kappa$  为手征参数, $c$  是真空中光速. $\epsilon$  和  $\mu$  分别为手征介质的介电常数和磁导率.折射高斯光在手征介质中分为两束:右旋圆偏振光和左旋圆偏振光.坐标系  $(x, y, z)$  的  $z$  轴与空气—手征介质界面 ( $z=0$ ) 相垂直.对入射、反射以及折射光束,我们引入伴随坐标系  $(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$ ,即分别伴随四路光的坐标系,如图 1 所示,其中  $\alpha = i, r, 1, 2$  分别代表入射、反射和折射的右旋圆偏振和左旋圆偏振光束.在近

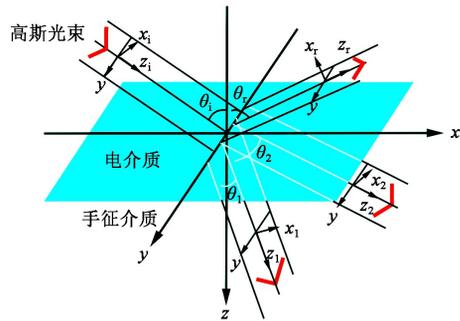


图 1 偏振高斯光束在空气—手征介质界面的反射和折射示意图  
轴近似下,任意极化的入射高斯光束可以写成下面的形式:

$$\mathbf{E}_i(x_i, y_i, z_i) = (\mathbf{E}_{ir} \mathbf{e}_{ir} + \mathbf{E}_{iy} \mathbf{e}_{iy}) \exp \left[ -\frac{k_0}{2} \frac{x_i^2 + y_i^2}{Z_R + iZ_r} \right]. \quad (3)$$

这里  $Z_R = k_0 \omega_0^2 / 2$  是光束的瑞利长度,  $k_0 = \omega / c$  为真空中的波矢,  $\omega_0$  是最小束宽.复数矢量  $\mathbf{E}_{ir}$  和  $\mathbf{E}_{iy}$  描述了入射光束的极化方向和相位,它们满足的关系式为:  $\sigma = i(\mathbf{E}_{ir} \mathbf{E}_{iy}^* - \mathbf{E}_{iy}^* \mathbf{E}_{ir})$ ,其中极化算符  $\sigma = \pm 1$  分别对应于左旋和右旋圆偏振光束.通过傅里叶变换,可以得到反射场的积分形式.利用边界条件和近轴近似,可以得到反射波的角频谱与入射场分量、入射角、反射波波矢分量和反射系数间的关系式<sup>[18]</sup>.最后得到在  $Z_r > 0$  区域的反射场的解析表达式.类似地,可以得到折射光束的角频谱,得到在手征介质区域两束折射场的解析形式.再利用反射光束电场和两折射光束的电场的近轴近似解,得到与电磁场相关的线性动量密度,由此可以得到电磁场的强度分布,得到反射光束与折射光束的右旋圆偏振光和左旋圆偏振光的横向移动的解析表达式<sup>[18]</sup>.

利用这些解析关系式进行数值计算,可以对横向移动随入射角和手征参数等的变化进行很好的分析(见图 2).相对磁导率、p 波与 s 波的相位差和振幅取定值.对手征介质  $\kappa = 0$  的情况,如图 2(a)所示,我们的计算结果与其他人的研究结果相同<sup>[2,4]</sup>,即反射光束的横向移动一般小于一个波长;然而,随着手征参数的变化,可以大幅度地改变横向移动的大小.在某些特定的角度下,横向移动的距离可以变得很大.如图 2(d)所示,在  $\kappa = 1.4, \theta_i = 0.8^\circ$  的参数下,可以有高达  $21.4\lambda$  的横向移动,这是普通介质界面情形的几十倍.这其中的物理机制可以通过光的角动量守恒定律得到很好的解释<sup>[18]</sup>.对单光子而言,其总角动量的  $z$  分量可以表示成轨道角动量和自旋角动量之和,IF 移动是与轨道角动量成正比的,而反射光束和透射光束的总角动量为所有光子

的轨道角动量和自旋角动量之和,计算结果表明,反射光束和透射光束的 IF 移动的变化是满足总角动量守恒的结果,包括反射光束和透射光束的 IF 移动极值的出现,都是总角动量守恒的要求.

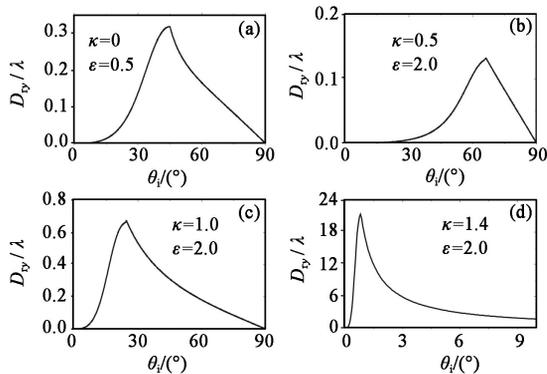


图2 反射光束的横向移动  $D_{y}/\lambda$  随入射角的变化

最近的研究表明,可以通过调节手征参数实现材料的负折射.对于我们的模型,手征介质的相对介电常数和相对磁导率为  $\epsilon = 2.0$  和  $\mu = 1$ .因此当  $\kappa < 1.414$  时,手征材料为正折射材料,而当  $\kappa > 1.414$  时,折射的左旋圆偏振光束就发生了负折射.我们的结果表明,在负折射区域的透射光束的横向移动与在正折射区域对称.这说明与正折射材料相比,虽然负折射材料的折射率梯度相反,但是其透射光线的自旋霍尔效应并没有因此而反转.这也证实了文献 [6,23] 的结论.

我们不仅得到了大的横向移动,而且还得到了下面的反转结果,即引起两折射光束中的一束的横向移动从负方向变到了正方向,如图3所示.此前,人们的研究表明,当一束光从空气入射到一匀质各向同性的介质界面上时,折射的左旋和右旋圆偏振光在界面上会发生方向相反的横向移动,且其移动是相互对称的,尽管一般认为在介质内部折射光线并没有分为两束<sup>[4]</sup>.然而,当我们加上手征参数时,情况就变得不同了.图3给出了不同的入射角度时,折射光束横向移动的变化情况.图3(a),(b),(c),(d)分别选取了不同的手征参数: $\kappa=0, 0.2, 0.4$  和  $0.6$ .实线对应右旋圆偏振光,虚线对应左旋圆偏振光.可以很明显的看出,随着手征参数  $\kappa$  的增加,两种极化光束的横向移动变得不再对称了.更有意思的是,当手征参数增加到  $\kappa=0.414$  时,左旋圆偏振光束的横向移动从负方向变到了正方向,使得两束光的移动方向不再反向.

进一步研究表明,左旋圆偏振光横向移动从负到正的变化是与负折射无关的.我们的结果还表明,

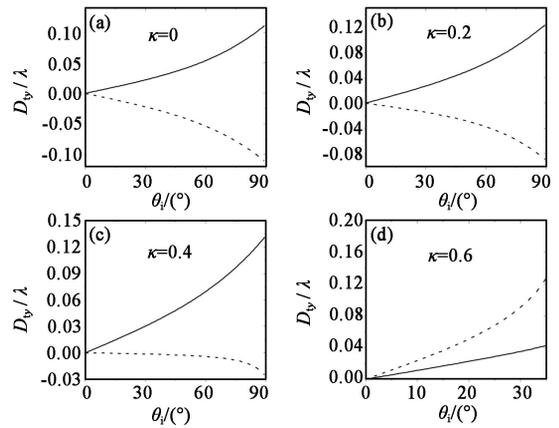


图3 不同的入射角时折射光束的横向移动  $D_{y}/\lambda$  的变化

在右手介质和左手介质两个区域,两束折射光的横向移动也是彼此对称的.同时,在左旋圆偏振光发生全反射的区域,右旋折射光束同样也发生了横向移动.其移动特性与左旋圆偏振光类似.产生这种现象的物理机理也可以通过角动量守恒来理解.

### 3 运动介质界面的异常光自旋霍尔效应

光束不仅入射到手征介质界面会出现异常的自旋霍尔效应,入射到运动介质界面也会出现异常自旋霍尔效应.对于平面波在运动介质界面的反射和折射问题,过去曾有过很多讨论<sup>[24-28]</sup>.对于偏振高斯光束在空气-运动介质界面的反射和折射,问题变得更加复杂.最近,我们给出了这一问题的理论解析式和数值计算结果<sup>[19]</sup>.结果表明,在特定的运动速度下,反射光束和透射光束的 IF 移动可以达到几个波长的量级,这是静止介质界面情形的几十倍,并且在某些速度下可以实现移动方向的反转.

我们研究了运动介质界面垂直 ( $y$ ) 和平行 ( $x$ ) 入射平面 ( $x-z$  平面) 运动的两种情况.理论推导出了反射和透射光束的 IF 移动 ( $D_{iy}$ ) 的表达式.通过数值计算,讨论了当介质沿着  $y$  轴方向运动时,反射光束和透射光束在空气-运动介质界面的 IF 移动.图4给出了当入射光束为右旋圆偏振光时,反射光束在沿  $y$  轴方向运动的介质表面的 IF 移动情况,其中图4(a),(b)分别为在不同的速度下,反射光束的 IF 移动随着入射角度的变化情况.图4(a)中对应的运动方向为  $y$  轴正方向,其中实线、虚线、点线和点虚线分别为介质运动速度与光速之比(以下简称运动速度)  $\beta=0, 0.5, 0.7$  以及  $0.9$  的情况.当运动速度为零时,可以看到反射光束的 IF 移动最大值仅为波长

的几分之一( $0.118\lambda$ ),此时的 IF 移动的解析形式也完全退化到文献[6]所给出的结果.而随着运动速度的增大,反射光束的 IF 移动量也在相应的增大,在运动速度  $\beta=0.9$  时(图 4(a)中的点虚线所示),在某个特定的入射角度( $\theta_i=70^\circ$ )下,反射光束的 IF 移动可以达到  $5.5\lambda$ .

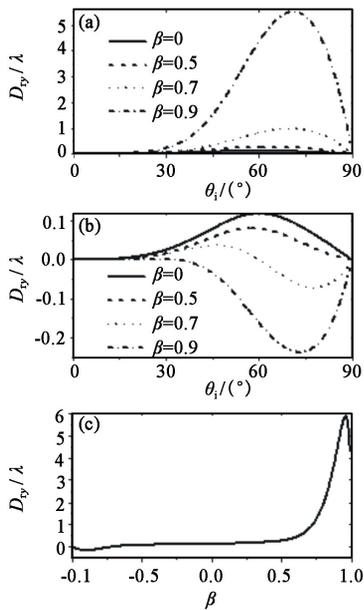


图 4 (a),(b)是入射光束为右旋圆偏振高斯光束时,反射光束在沿  $y$  方向运动的介质表面的 IF 移动随入射角度的变化关系;(c)对应的 IF 移动随介质运动速度的变化关系

图 4(b)给出了运动方向为  $y$  轴负方向时,不同的运动速度下,IF 移动随入射角度的变化.有意思的是,随着运动速度的增加,对应的 IF 移动由正变负.为了更清楚地了解运动速度对其产生的影响,在图 4(c)中我们给出了 IF 移动随运动速度的变化关系,入射角度为  $\theta_i = \pi/3$ .我们发现,在运动速度  $\beta=0.96$  时,IF 移动达到最大值  $6\lambda$ ,是运动速度为零时 IF 移动量的 50 倍.这里运动介质的介电常数和磁导率分别为  $\epsilon=2.0$  和  $\mu=1$ .

类似地,我们还研究了透射光束的 IF 移动情况,发现透射光束的 IF 移动是随着速度的增大而增大的,在运动速度  $\beta=1$  时,IF 移动量大约为 1 个波长,而这比运动速度为零情况的 IF 移动量增大了近 20 倍.此时的入射角为  $\theta_i = \pi/3$ .

以上介绍了当入射光束为右旋圆偏振光时,反射光束和透射光束的 IF 移动随运动速度的变化关系.值得强调的是,由于速度为零时,反射光束和透射光束的 IF 移动不为零,因此当介质沿着  $y$  方向运动时,无论反射光束还是透射光束,对于速度大小相同方向相反的情况,其 IF 移动并不相等.上面

的讨论只是针对入射光束为右旋圆偏振光的情况.当入射光束为左旋圆偏振光时,可以得到与右旋光相对称的结果:即当入射光为左旋圆偏振光时,沿  $y$  轴正(负)方向运动的介质界面的 IF 移动,与入射光为右旋圆偏振光时,沿  $y$  轴负(正)方向运动的介质界面的 IF 移动相同.还是利用角动量守恒定律,可以理解这里给出的移动情况的物理机理.

当介质的运动方向为  $x$  方向时,类似也可以得出反射光束和透射光束的 IF 移动解析式.我们发现,虽然其 IF 移动的解析式在形式上与非运动的情况完全相同,但是由于运动速度对反射系数的影响,反射光束的 IF 移动也会随运动速度的变化出现较为奇特的特征.通过数值计算和作图,发现介质沿着  $x$  正方向的速度对 IF 移动产生了一定的影响;而沿着  $x$  轴负方向运动时,反射光束的 IF 移动会随着速度的增大而由正变到负.在一定的入射角度( $\theta_i = \pi/3$ )下,IF 移动并不随着运动速度的增大而单调地增加,而是在某个运动速度( $\beta=0.83$ )时达到极大值,并且当介质沿  $x$  轴的正、负方向运动时,IF 移动是不对称的.

对透射光束来讲,沿  $x$  方向运动的介质界面的 IF 移动,从表达形式上与非运动介质的略有不同,这是因为运动介质的本构关系是双各向异性的.从数值结果和作图(略)来看,在较大的运动速度下,透射光束的 IF 移动也会发生移动方向的反转.在一定的入射角度( $\theta_i = \pi/3$ )下,运动速度对透射光束的 IF 移动也产生了一定的影响,并且也是与运动方向不对称的.与介质沿  $y$  方向运动的界面的 IF 移动相似,也可以通过总角动量守恒的条件来验证和理解沿  $x$  方向运动时的反射光束和透射光束的 IF 移动.

## 4 结论与展望

本文讨论了偏振高斯光束在匀质各向同性和手征介质表面的反射和折射光束的横向移动问题.这种横向移动是与光的自旋霍尔效应紧密相关的.结果表明,在某些特定的入射角度和手征参数下,反射光束的横向移动可以达到几十个波长的量级;通过调节手征参数,还可以实现左旋圆偏振折射光束的 IF 移动方向由负到正的反转.随着技术的发展,目前人工手征材料可以制备出来<sup>[21,22]</sup>.因此,这种在匀质各向同性和手征介质表面调控光的自旋霍尔效应实验是可以观察到的,这为我们进一步开发与光的极性相关的新的纳米光学器件提供了可能的应用

前景. 本文还讨论了在特定的运动速度下, 任意极化的高斯光束在空气-运动介质界面的反射和透射光束的 IF 移动可以达到几个波长的量级, 并且在某些速度下可以实现移动方向的反转. 我们也对沿  $x$  方向运动的介质表面的 IF 移动问题做了研究, 并得到了一些有意义的结果. 这些结果对天体测量、飞行器探测等也会有一定参考价值.

## 参考文献

- [1] Onoda M, Murakami S, Nagaosa N. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93:083901; *Phys. Rev. E*, 2006, 74:066610
- [2] Bliokh K Y, Bliokh Y P. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96:073903; *Phys. Rev. E*, 2007, 75:066609
- [3] Hosten O, Kwiat P. *Science*, 2008, 319:787
- [4] Li C F. *Phys. Rev. A*, 2007, 76:013811
- [5] Aiello A, Woerdman J P. *Opt. Lett.*, 2008, 33:1437
- [6] Luo H L, Wen S C, Shu W X *et al.* *Phys. Rev. A*, 2009, 80:043810
- [7] Fedoseyev V G. *Opt. Commun.*, 2009, 282:1247
- [8] Qin Y, Li Y, He H Y *et al.* *Opt. Lett.*, 2009, 34:2551; *Opt. Express*, 2010, 18:16832
- [9] 张纪岳, 李春芳, 杨晓燕. *物理*, 2004, 33(10):722 [Zhang J Y, Li C F, Yang X Y. *Wuli (Physics)*, 2004, 33(10):722]
- [10] Kavokin A, Malpuech G, Glazov M. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95:136601
- [11] Leyder C, Romanelli M, Karr J P *et al.* *Nature Physics*, 2007, 3:628
- [12] Bliokh K Y, Gorodetski Y, Kleiner V *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101:030404
- [13] Bliokh K Y, Niv A, Kleiner V *et al.* *Nature Photon.*, 2008, 2:748
- [14] Haefner D, Sukhov S, Dogariu A. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:123903
- [15] Aiello A, Lindlein N, Marquardt C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 103:100401
- [16] Merano M, Aiello A, van Exter M P *et al.* *Nat. Photonics*, 2009, 3:337
- [17] M'enaud J M, Mattacchione A E, van Driel H M *et al.* *Phys. Rev. B*, 2010, 82:045303
- [18] Wang H L, Zhang X D. *Phys. Rev. A*, 2011, 83:053820
- [19] Wang H L, Zhang X D. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2012, 29:1218
- [20] Pendry J B. *Science*, 2004, 306:1353
- [21] Wang B, Zhou J, Koschny T *et al.* *Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, 11:114003
- [22] Gansel J K, Thiel M, Rill M S *et al.* *Science*, 2009, 325:1513
- [23] Krowne C M. *Phys. Lett. A*, 2009, 373:466
- [24] Kong J A. *Theory of Electromagnetic Waves*. New York: John Wiley & Sons, 1975
- [25] Da H X, Li Z Y. *Phys. Rev. B*, 2007, 76:012409
- [26] Grzegorzczuk T M, Kong J A. *Phys. Rev. B*, 2006, 74:033102
- [27] Huang Y X. *J. Appl. Phys.*, 1994, 76:2575; *J. Mod. Opt.*, 1997, 44:623
- [28] Wang H L, Zhang X D. *J. Appl. Phys.*, 2010, 107:104108