

光自旋霍尔效应及其研究进展*

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 长沙 410082)

摘要 光束在经过非均匀介质后,自旋角动量相反(左、右旋圆偏振)的光子在垂直于入射面的横向相互分离,造成光束的自旋分裂,这种现象叫做光自旋霍尔效应.它类似于电子系统中的自旋霍尔效应:自旋光子扮演自旋电子的角色,而折射率梯度则起外场作用.光自旋霍尔效应为操控光子提供了新的途径,在纳米光学、量子信息和半导体物理方面具有重要的应用前景;同时由于它与凝聚态和高能物理中的带电粒子自旋霍尔效应有高度的相似性和共同的拓扑根源,所以又为测量自旋霍尔效应这类弱拓扑现象提供了独特而又方便的机会.文章简单介绍了光自旋霍尔效应,并总结了近几年国内外的研究进展.

关键词 自旋霍尔效应,光自旋霍尔效应,自旋光子,自旋角动量

The spin Hall effect of Light

LUO Hai-Lu WEN Shuang-Chun[†]

(Key Laboratory for Micro-/Nano-Optoelectronic Devices of Ministry of Education,
College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract When a beam propagates through inhomogeneous media, photons with opposite spin angular momenta will deviate from each other and assemble at the two sides of the beam section, leading to a spin-dependent splitting, and this phenomenon can be regarded as the spin Hall effect (SHE) of light. It is a direct optical analogy of the SHE in electronic systems where the spin electrons and electric potential are replaced by spin photons and the refractive index gradient, respectively. The SHE of light paves a new way to manipulate photons and may find important applications in nano-optics, quantum information, and semiconductor physics. Because of the close similarity and common topological roots of the effect in optics, condensed matter, and high-energy physics, the optical SHE provides indirect evidence of the intrinsic SHE in a diversity of physical systems. We present a simple introduction and overview of the latest research in this field.

Keywords spin Hall effect, spin Hall effect of light, spin photonics, spin angular momentum

1 引言

约 132 年前,美国物理学家霍尔(Edwin Hall, 1855—1938)发现,当电流通过磁场中的导体时,在垂直于电流和磁场方向的导体两侧会出现电势差.这一现象后来被称为霍尔效应(Hall effect),本质上,它是运动的载流子在磁场中受到洛伦兹力的作用而产生横向运动的结果.经典霍尔效应被发现之后的一百多年,反常霍尔效应、整数量子霍尔效应、

分数量子霍尔效应、自旋霍尔效应和轨道霍尔效应等又相继被发现,它们构成了一个霍尔效应家族.霍尔效应家族因其极其重要的科学意义和应用价值而一直受到广泛关注,仅从有关霍尔效应的研究成果曾两度获得诺贝尔奖就可见一斑.1985 和 1998 年诺贝尔物理学奖分别授予整数量子霍尔效应的发现者克利青(Klaus von Klitzing)和分数量子霍尔效应

* 国家自然科学基金(批准号:61025024,11074068)资助项目
2012-02-15 收到

[†] 通讯联系人. Email: scwen@hnu.edu.cn

的发现者崔琦等人。

最近几年,一种新型的霍尔效应——自旋霍尔效应(spin Hall effect, SHE),引起人们的强烈兴趣,自2004年被美国加州大学圣巴巴拉分校 Awschalom 团队^[1]首次在实验上观测到以来,已成为目前凝聚态物理中一个相当热门的研究方向。由于相对论效应自旋—轨道耦合作用的存在,人们发现在这样的体系中,在没有外加磁场条件下,即使是在非磁性材料中,也存在类似的霍尔效应:自旋向上的电子和自旋向下的电子分别向两边运动从而分离开来。与以往跟电荷相关的霍尔效应完全不同,这种霍尔效应与电子的自旋密切相关。由于电子的自旋与电荷一样,可以用来储存和传递信息,而且自旋霍尔效应中的电流几乎没有能量损失,也就是说不会发热,因而引发了科学界对研制新的电子元器件的设想^[2]。

如上所述的各种霍尔效应都是针对电子等带电粒子的。除了电子以外,其他粒子特别是中性粒子是否也有类似的霍尔效应?2004年,日本 AIST 的 Onoda 等人^[3]从理论上明确提出,光子在介质分界面上反射或折射时同样存在类似于电子 SHE 的光自旋霍尔效应(spin Hall effect of light, SHEL):在介质折射率梯度扮演的外场作用下,光束或波包沿垂直于折射率梯度方向发生自旋分裂。2008年,美国 Illinois 大学 Hosten 和 Kwiat^[4]利用弱测量(weak measurement)方法,首次从实验上证实了这一现象。与电子 SHE 引发科学界对研制新的电子元器件的设想一样,光子作为当今时代信息和能量的重要载体,人们完全有理由期待 SHEL 的研究将导致新型光子学器件的产生,并可能衍生出一门类似于自旋电子学(spintronics)的新学科——自旋光子学(spin photonics)^[5,6]。本文简单介绍 SHEL 这一新现象并总结近几年国内外对这一现象进行研究所取得的进展。

2 光自旋霍尔效应简介

电子 SHE 依赖于两个关键因素:电子的自旋—轨道角动量耦合及其导致这种耦合作用的纵向加载的电场。光子既有内在的自旋角动量(与圆偏振的手征相关),也有外在的轨道角动量(与螺旋相位有关)。因此人们自然有理由推测,光子的自旋—轨道角动量耦合应该也能产生光的 SHE。关键问题是:谁来扮演外场的角色以及如何产生光子的自旋—轨道角动量耦合作用?

光子有自旋但却因其为中性粒子而无磁矩,因

此无法用外加场的方法去改变其自旋轴的方向。但由于光子自旋轴的方向与传播方向一致,因而使我们想到,若改变光的传播方向,将会改变光的自旋态,即自旋矢量在空间的指向;而改变光的传播方向最简单直接的方式是利用光的反射和折射,其本质是改变光在其中传播的介质的折射率。在 Hosten 和 Kwiat^[4]首次观测 SHEL 的实验中,正是介质分界面上折射率的阶跃变化(折射率梯度)充当了电子 SHE 中外加电场的角色,而圆偏振光的右旋和左旋分量分别充当了上旋和下旋电子的角色。因此,与电子的 SHE 相比较,SHEL 表现出来的特征是圆偏振光的右旋和左旋分量最后在垂直于入射面的横向产生一个很小的相对位移,如图1所示。在同一年 Bliokh 等人^[5]报道的 SHEL 实验中,将光掠入射到一根圆柱形玻璃介质中,圆柱形的界面使光在其中沿螺旋形轨迹传播,从而不断改变光子的自旋角动量并导致自旋—轨道耦合,进而产生了类似的光束分裂,如图2所示。由此我们还可以想象,若把一根光纤绕成螺旋状,光在其中传播将很容易产生自旋—轨道耦合。

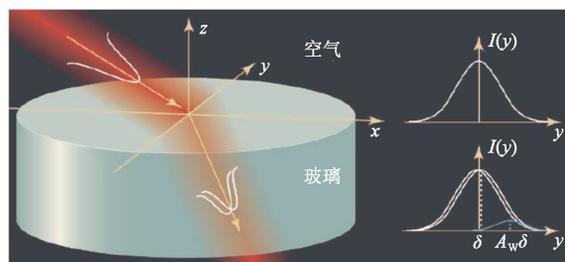


图1 光束在介质折射率梯度(空气—玻璃界面)扮演的外场作用下,沿垂直于折射率梯度方向发生自旋分裂。右上:入射光束为线偏振高斯形的强度分布。右下:折射光束强度出现自旋分裂(白线,见《物理》网刊彩图,下同)。利用弱测量方法使两自旋分量相消干涉,形成强度较弱的单个高斯形强度分布(蓝线或灰线),从而可以显著地放大光束重心的横移(约 10^4 倍)。详见参考文献[4,7]

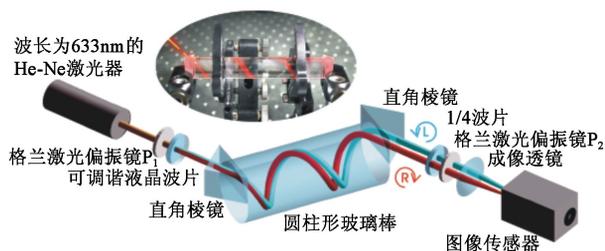


图2 测量光束在圆柱形玻璃棒中传输时的 SHEL 实验装置。详见参考文献[5]

从 SHEL 表现出来的特征看,它似乎违背了经典几何光学,或者说它很难单独用经典几何光学(如 Snell 定律和 Fresnel 公式)来解释。牛顿光学认为:

当一束光在介质分界面上反射和折射时,反射光和折射光都处于入射面内.然而,这违背了光的角动量守恒定律.1955年,Fedorov^[8]在理论上预言:当一束圆偏振光发生全内反射时,光束重心将产生一个垂直于入射面的横向漂移.当考虑了这一横向漂移后,光在反射时满足角动量守恒定律.1972年,Imbert^[9]用实验证实了这一现象.后来这一现象被称为 Fedorov-Imbert 效应.其实,SHEL 本质上就是 Fedorov-Imbert 效应.

Fedorov-Imbert 效应关注的是单一圆偏振光的光束重心的横向漂移现象,漂移方向与圆偏振的旋转方向相关.光波的偏振是大量光子集合的宏观概念.经典电动力学告诉我们:不同的偏振态描述了光波的电矢量的各种不同的振动方向和方式;线偏振、椭圆偏振、部分偏振等光束都可以由作为基础的左、右旋圆偏振光束组合而成.也就是说,一束线偏振光可以分解为两束同频率的左旋和右旋圆偏振光.因此,基于 Fedorov-Imbert 效应可以推断,一束线偏振光在全反射时其左旋和右旋圆偏振分量将依其旋转方向而沿横向向不同方向分裂,变成两束光,这种现象正是所谓的 SHEL.

SHEL 导致的光束横向分裂值很小,通常在亚波长尺度,所以实验上一般很难观察到. Hosten 和 Kwiat^[4]里程碑式的实验工作,其意义不仅在于首次从实验上观测到了 SHEL,还在于实现了 20 年前 Aharonov 等人^[10]的预言:利用弱测量技术可以放大并测量很小的效应.理论上,SHEL 导致的光束横向分裂的定量公式至今仍有很多分歧.但业已清楚的是,SHEL 导致的光束横向分裂值与入射光的波长成正比,并且随入射角显著变化:正入射时 SHEL 消失,掠入射即入射角接近 90° 时分裂最明显;此外,显而易见的是,SHEL 与介质的折射率有关,因而包含了构成介质分界面的材料信息,这既为利用材料特性操控 SHEL,也为利用 SHEL 研究材料特性及其中的物理现象提供了可能.

可以从多个角度解释 SHEL 产生的原因.基于光子自旋与光波偏振之间的关系以及光子的总角动量守恒,可以对这一现象提供一个简单直观的解释.由于光波具有动量,因而当分析光波的电矢量处于旋转状态时,人们必定想到左、右旋圆偏振光具有一定的角动量.事实上,根据量子力学,每个光子都携带角动量,其大小为 \hbar (约化普朗克常量),也就是说,任何频率的光子都具有相同大小的角动量,这种固有的物理现象称为光子的自旋;自旋角动量的方

向取决于圆偏振是右旋还是左旋:右旋和左旋(光子自旋方向分别平行和反平行于光束传播方向)圆偏振光子分别具有 $+\hbar$ 和 $-\hbar$ 的角动量.因为任何一个微观粒子具有的角动量是它的自旋角动量与轨道角动量之和,而光子自旋轴的方向与传播方向一致,所以若只考虑沿光的传播方向上的总角动量,则此时的轨道角动量为零,也即光子在传播方向上总的角动量就是其自身的自旋角动量.

当光从光疏介质射入光密介质时,如图 1 所示的光从空气进入玻璃,光将偏向介质分界面的法线方向,也就是说折射角小于入射角.由于对称性,左旋或右旋圆偏振光子的总角动量 J 必须守恒,而当光从空气进入玻璃介质后,光子自旋角动量沿 z 方向的分量增加,如图 3 所示,为此右旋圆偏振光子必须向 $-y$ 方向移动,以产生一个向上的轨道角动量(图 3(a)),而左旋圆偏振光子必须向 $+y$ 方向移动,以产生一个向下的轨道角动量(图 3(b)),才能抵消 z 方向自旋角动量的增量.也就是说,当一束线偏振光从光疏介质射入光密介质后,其左旋和右旋圆偏振分量都将分别获取一个与其法向自旋角动量方向相反的轨道角动量,以保持法线方向的总角动量守恒.正是这两个方向相反的轨道角动量,导致了左旋和右旋圆偏振光分量的横向分裂.同理可解释光从光密介质射入光疏介质或光在介质界面反射时的 SHEL.这种解释虽然不是非常严格,但简单直观^[11].

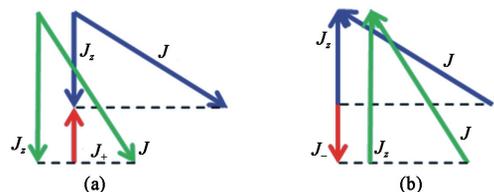


图 3 光从光疏介质射入光密介质时,入射光子(蓝线)和折射光子(绿线)的总角动量 J 及其在法线方向的分量 J_z ((a) 和 (b) 分别是右旋和左旋圆偏振光子情形, J_+ 和 J_- 分别是它们为保持 J_z 守恒而获取的额外轨道角动量)

从傅里叶光学的角谱理论看,光束可看作是由与其传输轴成一定夹角的若干平面波所组成,每个平面波即为一角谱分量.当光束在介质界面改变方向(反射或折射)或在非均匀折射率介质中传输时,不同角谱分量的偏振将经历不同的旋转量,而这种旋转量又与相位相关,因此不同角谱分量相互干涉的结果产生两束分裂的光束.从数学上讲,光的偏振和相位之间的相互作用好比电子系统中电子 SHE 的自旋-轨道相互作用.人们习惯于把光看成是波,并且认为光学效应比起相应的量子力学效应来更为

寻常一些,尽管这两种物理效应事实上是等价的,无论是用量子力学的方法还是用经典的方法去描述 SHEL,两者的本质都是一致的:光的自旋-轨道相互作用是导致 SHEL 中光束重心自旋分裂的内在物理原因.从 Berry 相位理论看,与电子 SHE 一样, SHEL 显示了自旋粒子在外场中演化的深层次几何动力学关系^[5,6].

3 研究进展

3.1 折射和反射中的光自旋霍尔效应

最早在实验上观察到 SHEL 是在光的折射中.折射光束重心的横向漂移只有几分之一波长,因此用常规的方法难以测量如此微小的位移值.2008年,Hosten 和 Kwiat 采用弱测量方法探测到了 SHEL^[4].其实验装置如图 4 所示.氦氖激光器产生一束线偏振高斯光束,首先通过半波片,然后经过短焦距透镜聚焦后,再通过格兰激光偏振镜入射到样品(BK7 棱镜)中.旋转半波片可以调节入射光光强,以避免超过位置敏感探测仪的测量范围,旋转第一个格兰激光偏振镜可以改变入射光的偏振方向.变角棱镜可保证透射光束垂直通过棱镜的第二个界面,以保证只在第一个界面上发生 SHEL.两块透镜组成共焦腔:第一块透镜为短聚焦透镜,用来聚焦光束,第二块透镜为长焦距透镜,用来准直光束.由于折射率梯度在 SHEL 中扮演着外场的角色,左旋和右旋圆偏振分量在垂直于入射面方向发生分裂.经过第二个格兰激光偏振镜后,两自旋分量干涉产生一强度较弱的单个高斯形强度分布,其重心偏移位置远大于自旋分量的初始横向漂移.利用此方法能够有效地测量出 SHEL 的初始横移值.

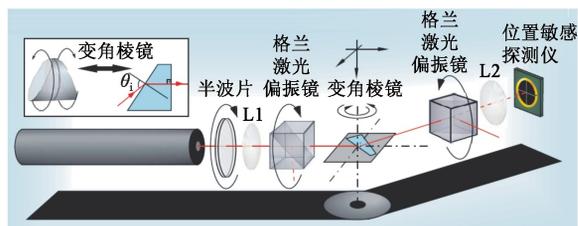


图 4 测量光束在空气-玻璃界面折射时的光自旋霍尔效应的弱测量实验装置.光源是功率为 10mW、波长为 633nm 的 He-Ne 激光器; L1 和 L2 是有效焦距分别为 25mm 和 125mm 的透镜.变角棱镜使折射光束传输方向垂直出射界面(见插图).详见参考文献^[4]

北京大学龚旗煌、李焱小组同样利用弱测量方法观测到了光束在空气和棱镜界面反射时的 SHEL^[12].当入射光束为垂直偏振态时,其自旋分裂

量先随入射角的增大而增大,当入射角增大到约 48°时达到最大,之后随入射角的增大而减小.当入射光束为平行偏振态时,自旋分裂量在布儒斯特角附近迅速增大.当光束以确定的入射角入射时,反射光束的自旋分裂值随入射光偏振方向的改变而改变.此外,他们还观测到一个非常有趣的现象:自旋分裂不仅发生在垂直入射面方向,而且在入射面内同样存在类似的自旋分裂现象,其分裂距离可以达到数百纳米^[13].

探索 SHEL 的增强机制和方法对 SHEL 的实验研究和应用无疑至关重要.我们小组在这方面做了一些尝试,最近在实验上实现了迄今为止最大的光束自旋分量横向分裂^[14]:光束在布儒斯特角附近反射时的 SHEL 产生了一个 3200nm 的自旋分裂值,相当于折射光自旋分裂值的 50 倍,实验装置如图 5 所示.我们用光束的非傍轴传输模型描述光的自旋-轨道相互作用,预言了这种大的自旋分裂,并发现布儒斯特角附近强的自旋-轨道相互作用是导致大的自旋分裂的内在物理原因.

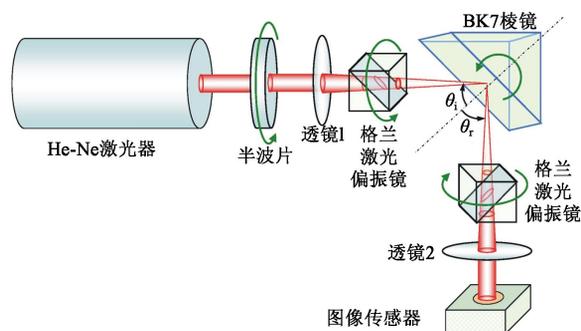


图 5 测量光束在布儒斯特角附近反射时的光自旋霍尔效应实验装置. He-Ne 激光器的功率为 17mW,波长为 632.8nm;透镜 1 和透镜 2 的有效焦距分别为 50mm 和 250mm.详见参考文献^[14]

与此同时,研究人员还研究了最近几年发展起来的超常材料(metamaterials)界面上光的反射和折射中的 SHEL.超常材料^[15,16]是一种新型的人工电磁材料,其电磁特性可以人为设计,在理论上甚至在最近几年的一些实验上,能实现负折射率、近零折射率和超高折射率,这为创造各种形式的折射率梯度提供了极大的自由度,因而可以用来增强和调控 SHEL.在负折射率超常材料中,许多光学现象都将反转,但我们小组^[17]最近证明,在这种材料中, SHEL 并不因为折射率为负而反转,其原因在于,光从常规介质进入负折射率超常材料后,其自旋角动量和轨道角动量均不反转.北京师范大学张向东小组^[18]最近发现,在手征超常材料中,通过调节手征超常材料的参数能够有效地调控 SHEL.

3.2 表面等离子结构中的光自旋霍尔效应

光和亚波长金属结构之间的相互作用可能产生诸如纳米孔的超强透射、金属表面局域场能得到几百倍甚至上千倍于入射场的增强效应等等这些奇异的光学现象. 这些有趣的现象是由于自由电子与光场产生共振而引发的表面等离子效应导致的. 基于表面等离子效应的各种纳米光子器件被认为是当今最有希望实现纳米全光集成电路的基础. 以色列 Hasman 小组^[19,20]在实验中证实了存在与自旋相关的表面等离子效应. 表面等离子结构用聚焦离子束刻蚀的方法制作在 100nm 厚的金膜上, 其内环由周期为 500nm 的耦合光栅, 外环由周期为 250nm 的布拉格光栅所组成, 如图 6(a) 所示. 用一束左旋或右旋圆偏振光去激发这一纳米结构, 用近场光学显微镜可以观测到和自旋相关的强度分布. 当激发光束为左旋圆偏振光时, 表面等离子波重心产生一正的横移, 如图 6(b), (d) 所示; 当激发光束为右旋圆偏振光时, 表面等离子波重心产生负的横移, 如图 6(c), (e) 所示. 这一有趣的现象将激发人们去研究新的和自旋相关的表面等离子效应, 探索其在新型微纳光子学器件方面的应用.

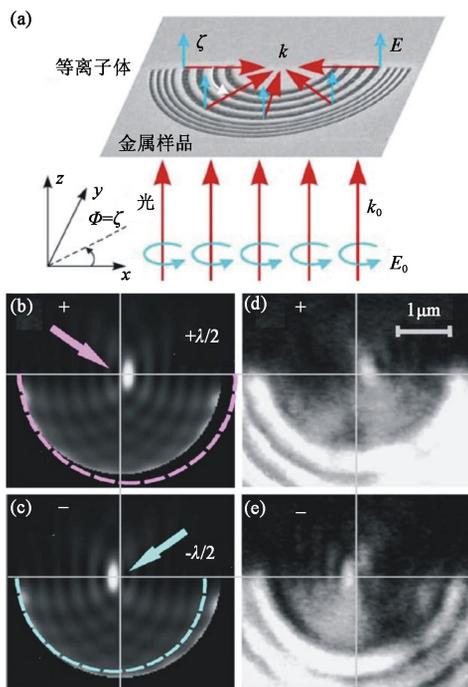


图 6 表面等离子结构中的光自旋霍尔效应 ((a) 为表面等离子结构; (b), (c) 表示表面等离子波左旋、右旋分量重心分别产生正、负横向漂移; (d), (e) 是相应的实验结果. 详见参考文献 [19])

从经典力学角度看, 旋转体系中作直线运动的质点由于惯性作用, 有沿原有运动方向继续运动的

趋势, 但是由于质点所在体系本身是旋转的, 在经历了一段时间的运动之后, 体系中质点的位置会有所变化, 如果以旋转体系的视角去观察, 将会发生与其原有运动方向有一定程度的偏离. 为了描述旋转体系的运动, 需要在运动方程中引入一个假想的力, 这就是科里奥利力. 如果旋转体系的角速度相反, 在其中运动的质点所受的科里奥力的方向也相反. 当表面波在旋转参考系中传输时, 其左、右旋偏振分量受到类似于力学系统中的科里奥利力, 两自旋分量发生横向分裂^[19]. 这为我们提供了一个简单的方式去理解表面等离子结构中的 SHEL.

3.3 半导体材料中的光自旋霍尔效应

光自旋霍尔效应可以在纳米尺度范围内诱导和探测半导体内电子自旋的空间分布, 这为利用 SHEL 调控半导体中的电子自旋提供了新的手段, 同时为电子自旋的有效注入提供了新的途径. 将自旋光子入射到半导体材料中, 会激发起半导体中自由电子有规则的空间分布, 即自旋向上的电子和自旋向下的电子堆积在对应的区域. 其中 SHEL 导致的自旋分裂大小可以通过改变光束入射角和调节半导体的材料特性来调控. 加拿大 Menard 等人^[21,22]首次利用半导体中电子的空间分布来测量 SHEL. 他们的构想如图 7 所示, 半导体界面处于 $x-y$ 平面, 光束入射面在 $x-z$ 平面, 泵浦光从 $x-y$ 平面斜入射到样品 (砷化镓) 中, 在折射率梯度扮演的外力作用下, SHEL 引起泵浦光的左、右旋圆偏振分量的分离, 从而间接引起了半导体材料中自旋电子的有规律堆积. 为了探测自旋堆积 (spin accumulation) 的非均匀分布, 利用一束强聚焦的探测光束垂直扫描这一区域, 最后测量出射光对于不同圆偏振探测光入射时的透射强度来判断 SHEL 的分裂横移. 这里探测光的传输系数正比于半导体中的载流子密度, 因此可利用 SHEL 来探测半导体中的载流子空间分布^[23].

半导体中自旋流的产生、注入与探测技术也是当今物理学中比较热门的研究方向^[24]. 在半导体材料中, 自旋霍尔效应诱导电子在空间上产生自旋分裂. 因此, 可以利用自旋霍尔效应有效操控电子器件中的电子自旋. 然而由于快速的退相干和衰变, 半导体中的自旋流持续时间往往不长, 难以观测. 法国 Leyder 等人^[25,26]提出利用光学方法产生电子自旋分裂, 即用光学的方法产生电子的自旋霍尔效应 (optical spin Hall effect). 通过改变入射光的偏振态, 可以改变自旋流的堆积方向, 由此方法产生的自

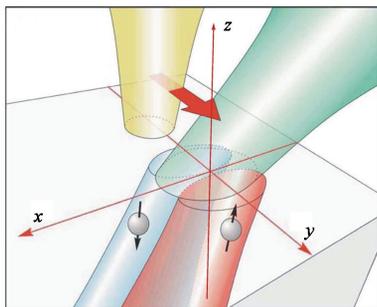


图7 光束在半导体界面反射时的光自旋霍尔效应. 一束线偏振泵浦光(绿色)由 $x-z$ 平面以一定角度斜入射到 GaAs(砷化镓)晶体界面,左旋(蓝色)和右旋(红色)圆偏振分量在 y 方向发生横向分裂,从而诱导自旋向下和自旋向上的电子激发区. 探测光束(黄色)处于 $y-z$ 平面沿 y 轴垂直于 $x-y$ 平面横向扫描通过激发区,最后测量出射光对于不同圆偏振探测光入射时的透射强度,其传输系数正比于载流子密度. 详见参考文献[21]

旋流的存在时间大大提升,其有效传播距离达到了 $100\mu\text{m}$. 这为产生和探测电子自旋流提供了一种方便而且有效的办法.

3.4 多层纳米结构中的光自旋霍尔效应

在 SHEL 中,折射率梯度扮演着类似于电子 SHE 中外加电场的角色. 在两种不同介质分界面的折射和反射问题中,自旋-轨道相互作用单一,因此不便于调控 SHEL;而在多层纳米结构中,折射率梯度在高折射率和低折射率之间交替变化,这相当于电子 SHE 中的外场不断交替变化,从而可以不断调控 SHEL. 当多层纳米结构的结构参数满足一定的条件时,光波在多层结构中发生法布里-珀罗共振. 我们小组^[27]在研究多层纳米结构中的 SHEL 时发现,光束的自旋-轨道相互作用可随法布里-珀罗腔长的改变而发生周期性振荡,利用多层纳米结构中的光学共振可以有效提升、压缩甚至消除 SHEL,这为有效调控光自旋-轨道相互作用找到了一条可行途径. 利用多层纳米结构可以操控 SHEL,反过来,利用 SHEL 也可揭示纳米结构的物理特性及其中的物理现象.

光子隧穿结构可看作是一种典型的多层纳米结构. 光隧穿效应是经典电动力学和量子力学中的一块重要的基石,在当今的纳米光子学中扮演越来越重要的角色. 量子力学认为,波包或者粒子可以穿越一个从经典的角度上来说是不可穿越的势垒. 光的受抑全内反射可以被当作是一个量子隧穿的经典例子. 我们考虑光子通过两块玻璃之间的空气间隔构成的空气势垒的隧穿效应,如图8所示. 光从玻璃射向空气,当入射角大于临界角时,将产生全内反射现象,即光将全部反射回玻璃而不会传入到空气中,但

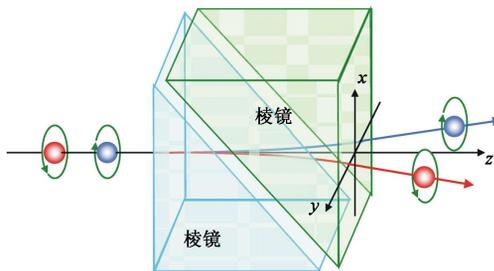


图8 光子隧穿效应中的光自旋霍尔效应. 两块棱镜之间的空气间隔构成一空气势垒. 光子隧穿通过空气势垒后,产生与自旋相关的横向漂移. 详见参考文献[28]

一部分电磁场会以倏逝波的形式穿过玻璃和空气之间的边界进入到空气中,而倏逝波并不携带能量. 如果第二层玻璃距第一层玻璃足够近,那么倏逝波就会在第二层玻璃中形成传输光波,只是它的强度比起第一层玻璃中的光波强度要弱得多. 这种有趣的光学现象就是光子隧穿效应. 传统的观点认为,光子隧穿效应是一个二维过程,即光子只在入射面内发生隧穿. 我们小组^[28]发现,自旋光子在隧穿通过空气势垒后会在垂直于入射面的方向产生一横向漂移;如果考虑一线偏振波包的隧穿效应,则两个自旋分量会产生一个横向分裂,如图8所示. 因此,光子隧穿实际上是一个三维过程. 光子隧穿效应中的自旋分裂可以推广到其他物理系统.

4 结束语

光自旋霍尔效应是目前物理学领域的一个热门研究方向. 人们已经探索了不同物理系统中的 SHEL,并且认识到光子的自旋-轨道耦合作用是导致 SHEL 的内在物理原因. SHEL 是一种弱效应,因此无论从科学研究还是从应用层面看,揭示 SHEL 的增强机理并发展相应的调控方法无疑是有意义的,这方面虽然已经有一些理论和实验工作,但还远远不够.

对 SHEL 的应用研究还处在非常原始的设想和探索阶段^[4-7, 21]. 原理上,可以使 SHEL 这种弱效应导致的光束分裂变得很大,从而分离出不同的自旋态或不同的轨道角动量态,因此 SHEL 有望作为操控光子角动量的工具,应用于量子信息领域. 此外, SHEL 本身可以发展成为一种精密的计量工具,例如用来表征亚波长尺度上的折射率变化,或为研究纳米结构中的物理特性提供一种灵敏的方式. 特别是由于 SHEL 与凝聚态物理和高能物理中的 SHE 有高度的相似性和共同的拓扑根源,所以

SHEL 的研究将不仅对光学,同时还对其他学科产生重要影响.例如,对相对论粒子来说,目前的实验能力尚远不够测量其 SHE;而对凝聚态系统来说,由于杂质散射导致的各种内在效应的竞争以及追踪电子轨迹的不可能性,观测电子 SHE 的实验条件非常复杂.因此,SHEL 作为一种尽管很弱但又很纯(clean)的物理效应,为测量 SHE 这类弱拓扑现象提供了独特而又方便的机会.

参考文献

- [1] Kato Y K, Myers R C, Gossard A C *et al.* *Science*, 2004, 306:1910
- [2] Qi X L, Zhang S C. *Physics Today*, 2010, 63:33
- [3] Onoda M, Murakami S, Nagaosa N. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 94:083901
- [4] Hosten O, Kwiat P G. *Science*, 2008, 319: 787
- [5] Bliokh K Y, Niv A, Kleiner V *et al.* *Nature Photonics*, 2008, 2:748
- [6] Nori F. *Nature Photonics*, 2008, 2: 716
- [7] Resch K J. *Science*, 2008, 319:733
- [8] Fedorov F I. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1955, 105:465
- [9] Imbert C. *Phys. Rev. D*, 1972, 5:4
- [10] Aharonov Y, Albert D Z, Vaidman L. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, 60:1351
- [11] Day C. *Physics Today*, 2008, 61:18
- [12] Qin Y, Li Y, He H Y *et al.* *Opt. Lett.*, 2009, 34:17
- [13] Qin Y, Li Y, Feng X B *et al.* *Opt. Express*, 2011, 19:10
- [14] Luo H L, Zhou X X, Shu W X *et al.* *Phys. Rev. A*, 2011, 84: 043806
- [15] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. *Science*, 2004, 305: 788
- [16] Pendry J B. *Nature*, 2009, 459:504
- [17] Luo H L, Wen S C, Shu W X *et al.* *Phys. Rev. A*, 2009, 80: 043810
- [18] Wang H L, Zhang X D. *Phys. Rev. A*, 2011, 83:053820
- [19] Bliokh K Y, Gorodetski Y, Kleiner V *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 101:030404
- [20] Gorodetski Y, Niv A, Kleiner V *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101:043903
- [21] Menard J M, Mattacchione E, Driel H M V. *Phys. Rev. B*, 2010, 82:045303
- [22] Menard J M, Mattacchione A E, Betz M *et al.* *Opt. Lett.*, 2009, 34:15
- [23] Furdyna J K. *Physics*, 2010, 3:56
- [24] Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A *et al.* *Science*, 2001, 294:1488
- [25] Leyder C, Romanelli M, Karr J P *et al.* *Nature Physics*, 2007, 3:628
- [26] Kavokin A, Malpuech G, Glazov M. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95:136601
- [27] Luo H L, Ling X H, Zhou X X *et al.* *Phys. Rev. A*, 2011, 84: 033801
- [28] Luo H L, Wen S C, Shu W X *et al.* *Phys. Rev. A*, 2010, 82: 043825