

光在 Metasurface 中的自旋-轨道相互作用

易煦农 李瑛 凌晓辉 张志友 范滇元

Spin-orbit interaction of light in metasurface

Yi Xu-Nong Li Ying Ling Xiao-Hui Zhang Zhi-You Fan Dian-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 244202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.244202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

从 plasmon 到 nanoplasmonics-----近代光子学前沿及液晶在其动态调制中的应用

From plasmon to nanoplasmonics-the frontiers of modern photonics and the role of liquid crystals in tune-able nanoplasmonics

物理学报.2015, 64(12): 124214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124214>

角向偏振无衍射光束的传输特性及其偏振态研究

Polarization and propagation characteristics of the azimuthally polarized non-diffracting beam

物理学报.2015, 64(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064201>

非均匀部分相干光束在自由空间中的传输

Propagation of non-uniform partially coherent beams in free space

物理学报.2015, 64(3): 034205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034205>

离轴高斯涡旋光束的深聚焦特性

Tight focusing properties of off-center Gaussian vortex beams

物理学报.2014, 63(21): 214202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214202>

高阶邦加球上柱矢量光束的变换

Conversion of cylindrical vector beams on the higher-order Poincaré sphere

物理学报.2014, 63(15): 154203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154203>

光在Metasurface中的自旋-轨道相互作用*

易煦农¹⁾²⁾ 李璚^{1)†} 凌晓辉¹⁾ 张志友¹⁾ 范滇元¹⁾¹⁾(深圳大学光电工程学院, 深圳大学-新加坡国立大学光电科技协同创新中心, 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 深圳 518060)²⁾(湖北工程学院物理与电子信息工程学院, 孝感 432000)

(2015年6月3日收到; 2015年8月17日收到修改稿)

探讨了光在Metasurface中的自旋-轨道相互作用, 理论分析了Metasurface对圆偏振和线偏振光的转换. 结果表明: 光与具有空间非均匀性和各向异性性的Metasurface的相互作用导致了自旋-轨道角动量的耦合. 采用Metasurface与螺旋相位片组合在一起进行了验证实验, 所得实验结果与理论分析完全一致. 这些结论有助于我们更加深入理解Metasurface对光的操控.

关键词: 自旋-轨道相互作用, 涡旋光束, 矢量光束**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Ja, 03.65.Vf**DOI:** 10.7498/aps.64.244202

1 引言

光具有两种不同形式的角动量: 自旋角动量和轨道角动量^[1]. 自旋角动量和光的偏振属性有关, 圆偏振光的每个光子携带 $\pm\hbar$ 的角动量, 线偏振光的每个光子携带的轨道角动量为0. 轨道角动量和光的波前形状有关, 当光具有 $\exp(im\phi)$ 的螺旋相位因子时(其中, m 为拓扑荷数, ϕ 为空间方位角), 每个光子所携带的轨道角动量为 $m\hbar$. 一般而言, 光在真空或者均匀的各向同性透明介质中传播时, 光的自旋角动量和轨道角动量不会发生相互转换^[2]. 但是, 当光通过高数值孔径透镜紧紧聚焦在均匀各向同性透明介质中传输时, 自旋角动量会部分转换为轨道角动量^[3]. 2006年, Marrucci等^[2]研究了 q 板中的自旋-轨道角动量转换过程. 实际上, q 板就是将微小的液晶单元按特定的几何图样排列的非均匀各向异性介质. 研究者们已经在利用 q 板中自旋-轨道角动量转换来产生涡旋光束等方面做了大量的研究. 但是, 由于液晶单元不能做得足够小, 从而不能有效抑制衍射现象, 导致转换效率低下. 并且, 液晶的损伤阈值较低, 也限制了 q 板在高

功率激光中的应用.

近年来, 由人工设计的金属或介质微结构阵列构成的Metarmaterial受到了研究人员的广泛关注^[4,5]. Metasurface实际上是一种二维的Metarmaterial^[6]. 通过设计微结构单元的几何形状及空间分布, 可以实现对光场振幅、相位及偏振空间分布的任意操控. 需要特别指出的是, 亚波长微结构单元使得人们可以在亚波长尺度对光波进行局域操控并消除高级次衍射光对光场质量的影响. 随着加工技术的发展, 这一特性可望让人们获得基于Metasurface的高性能的各种平面光子学器件^[6,7]. 以色列的Hasman小组通过在介质基底或金属薄膜上蚀刻亚波长沟槽来制作衍射光栅, 成功将 CO_2 激光($10.6\text{ }\mu\text{m}$)转换为涡旋光束和偏振空间非均匀分布的矢量光束^[8-10]. 法国的Brasselet等^[11]利用在金薄膜上刻写的纳米狭缝产生了涡旋光束. 在国内也有研究者开展了相关工作, 如Kang等^[12,13]探讨了基于亚波长孔阵列的增强透射(extraordinary optical transmission)现象产生涡旋光束. 涡旋光束和矢量光束由于相位奇点和偏振奇点的存在而具有奇特的光学特性^[14-20], 使得它们在光通

* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 61490713)和湖北省教育厅科学研究项目(批准号: Q20132703)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: queenly@vip.sina.com

信、信息处理、材料加工和粒子操控等领域有着巨大的潜在应用^[21,22]. 构成 Metasurface 的亚波长周期结构其光学特性类似于单周晶体, 其局域光轴方向垂直或者平行于亚波长沟槽. 最近, 利用所谓全介质 Metasurface 实现对光场相位和偏振的操控受到人们的关注^[23–26]. 这种 Metasurface 是利用飞秒激光在熔融硅中刻写微纳米结构构成的. 飞秒激光在硅玻璃中可以诱导产生所谓的形式双折射 (form birefringence), 双折射的大小取决于激光的能量和偏振等因素. 所以, 通过控制写入激光的参数即可获得所需的双折射率, 而每一个写入的微纳米结构就相当于一个微小的波片. 利用飞秒激光写入的微纳米结构, 其尺寸可为几百纳米, 能够应用在可见光波段. 由于其单元结构在亚波长量级, 可以抑制高级次的衍射光斑, 所以采用介质 Metasurface 来操控光的偏振和相位能获得很高的转换效率和较好的光束质量.

本文研究光在 Metasurface 中自旋-轨道相互作用. 首先, 我们理论分析了圆偏振光入射到相位延迟为 π 的 Metasurface 的情况. 我们发现圆偏振光通过 Metasurface 后, 不但偏振手性 (自旋角动量) 会发生反转, 而且会获得轨道角动量. 导致这种现象出现的内在物理原因是: Metasurface 的各向异性所产生的 π 相位延迟导致了偏振手性的反转, 而 Metasurface 微结构单元空间分布的不均匀性使得光通过后会获得具有螺旋结构的 Pancharatnam-Berry 相位. 我们分析了线偏振入射到 Metasurface 的情况, 表明线偏振光会被 Metasurface 转换为柱矢量光束. 由于线偏振光可以表示为左旋和右旋圆偏振光的相干叠加, 而柱矢量光束可以被分解为左旋和右旋涡旋光的叠加, 所以, 线偏振光入射实际上可以理解为左旋和右旋圆偏振光同时入射到 Metasurface 后被分别转换成了右旋和左旋圆偏振涡旋光束, 然后再相干叠加形成了柱矢量光束. 最后, 为了证明理论分析的正确性, 我们采用 Metasurface 与螺旋相位片组合在一起进行了验证实验, 所得实验结果与理论分析完全一致. 这些结果有助于更加深入地理解 Metasurface 对光的操控.

2 理论分析

考虑 Metasurface 的每一个微结构单元都具有相同的相位延迟 π , 忽略光在 Metasurface 中传输

时的衍射效应, 那么其琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}_{\text{MS}} = \begin{pmatrix} \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ \sin(2\theta) & -\cos(2\theta) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 θ 为局域慢轴方向与 x 轴的夹角. 这里, 我们假定 Metasurface 的慢轴分布可以表示为

$$\theta(r, \varphi) = q\varphi, \quad (2)$$

其中 $\phi = \arctan(y/x)$ 为空间方位角, q 为 Metasurface 的拓扑荷数. 图 1 分别给出了 $q = 1/2, 1, 3/2$ 和 3 时, Metasurface 的慢轴分布示意图.

下面, 我们首先考虑圆偏振光入射到 Metasurface 的情况. 圆偏振光的琼斯矢量可以表示为

$$\mathbf{E}_{\text{CP}}(r, \varphi) = E_0(r, \varphi) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \sigma i \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中 $\sigma = \pm 1$, “+” 代表左旋圆偏振光, “-” 代表右旋圆偏振光. 由 (1)–(3) 式可以得到 Metasurface 后的输出光场为

$$\mathbf{E}_{\text{out}}(r, \varphi) = E_0(r, \varphi) e^{\pm i 2 q \varphi} \begin{pmatrix} 1 \\ \mp i \end{pmatrix}. \quad (4)$$

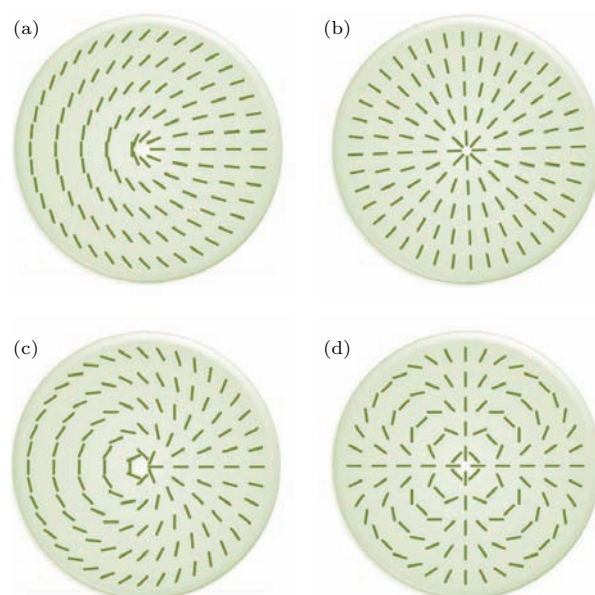


图 1 (网刊彩色) Metasurface 的慢轴分布示意图 (a) $q = 1/2$; (b) $q = 1$; (c) $q = 3/2$; (d) $q = 3$

Fig. 1. (color online) The slow axis spatial distribution of the metasurfaces: (a) $q = 1/2$; (b) $q = 1$; (c) $q = 3/2$; (d) $q = 3$.

我们知道入射圆偏振光具有自旋角动量 $\pm\hbar$, 而轨道角动量为 0, 即入射光光子的总角动量为 $\pm\hbar$. 由 (4) 式可知, 光通过 Metasurface 后: 1) 光场

获得了 $e^{\pm i2q\varphi}$ 的螺旋相位, 即光子具有 $\pm 2q\hbar$ 的轨道角动量; 2) 光场的圆偏振手性会发生反转, 即光子自旋角动量变为 $\mp \hbar$. 这意味着出射光的总角动量变为 $(\pm 2q \mp 1)\hbar$. 因此, 圆偏振光在和非均匀各向异性介质 Metasurface 相互作用过程中所产生的总角动量改变为

$$\Delta J_{\text{LCP}} = (2q\hbar - \hbar) - \hbar = 2(q-1)\hbar \cdots, \quad (\text{左旋圆偏振光入射}), \quad (5a)$$

$$\Delta J_{\text{RCP}} = (-2q\hbar + \hbar) + \hbar = 2(-q+1)\hbar \cdots, \quad (\text{右旋圆偏振光入射}). \quad (5b)$$

在这一转换过程中, 由于总角动量必须守恒, 所以光子获得的角动量改变是光子和非均匀各向异性介质 Metasurface 交换得到的. 换句话说, Metasurface 也会获得相应的角动量. 值得注意的是, 当 $q = 1$ 时, 光子获得的总角动量改变为 0, 即光子不会与 Metasurface 产生轨道角动量交换^[2]. 这是由于当 $q = 1$ 时, Metasurface 的微结构单元分布具有圆对称性所导致的 (见图 1(b)).

我们已经假定 Metasurface 的微结构单元分布表示为 (1) 式, 因此这些微结构的排列具有空间旋转率

$$\Omega = d\theta(r, \varphi)/d\xi = q, \quad (6)$$

其中 ξ 为空间坐标. 类似于旋转多普勒效应, 当光场通过这空间非均匀各向异性介质时, 产生的几何相 (Pancharatnam-Berry phase) 为

$$\phi_{\text{PB}} = 2\sigma \int \Omega d\xi = 2\sigma q\varphi. \quad (7)$$

(7) 式表明, 光场通过 Metasurface 所获得的螺旋相位实际是由于 Metasurface 的微结构单元空间分布不均匀所导致的. 光通过非均匀材料产生了自旋-轨道角动量耦合效应, 使得透射光具有了 $2\sigma q\hbar$ 的轨道角动量. 我们还注意到, 几何相的符号依赖于入射圆偏振光的偏振手性, 即左旋圆偏振光和右旋圆偏振光所获得的几何相符号相反. 这一特性使得光通过 Metasurface 时会产生自旋分裂^[27].

下面, 我们假设偏振角为 θ_0 线偏振光入射到 Metasurface. 线偏振光的琼斯矢量可以表示为

$$\mathbf{E}_{\text{LP}}(r, \varphi) = E_0(r, \varphi) \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

与 (1), (2) 式联立可得:

$$\mathbf{E}'_{\text{out}}(r, \varphi) = E_0(r, \varphi) \begin{pmatrix} \cos(2q\varphi - \theta_0) \\ \sin(2q\varphi - \theta_0) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

不难看出, 这是一个局域偏振方向依赖于入射光偏振角的柱矢量光束. 我们知道, 线偏振光可以表示为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的等量相干叠加, 而柱矢量光束则可以表示为左旋圆偏振涡旋光和右旋圆偏振涡旋光的等量相干叠加^[28,29]. 据此, 我们将 (9) 式改写为

$$\mathbf{E}'_{\text{out}}(r, \varphi) = \frac{1}{2}E_0(r, \varphi) \left[e^{+i(2q\varphi - \theta_0)} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} + e^{-i(2q\varphi - \theta_0)} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \right]. \quad (10)$$

由 (10) 式可以看出, 线偏振光的左旋和右旋圆偏振分量通过 Metasurface 后分别被转换为右旋和左旋圆偏振涡旋光, 并且其拓扑荷数符号相反. 在出射光中, 两个等量的圆偏振分量分别携带 $+2q\hbar$ 和 $-2q\hbar$ 的轨道角动量, 即光子的总角动量改变为 0. 在这一转换过程中, Metasurface 作为自旋-轨道相互作用的媒介既不吸收也不产生轨道角动量.

3 实验结果

我们采用图 2 所示的实验装置来观察光在 Metasurface 中的自旋-轨道相互作用. 实验中光源采用 THORLABS 公司的 He-Ne 激光器 (波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 输出功率 17 mW). 一个格兰激光偏振镜 (GLP1) 和四分之一波片 (QWP1) 一起控制输入光束的偏振态. 我们分别采用拓扑荷数 $q = 1/2$ 和 $q = 3/2$ 的 Metasurface (MS) 进行实验. 根据前述理论分析, 光场通过 Metasurface 后会产生自旋相关的螺旋相位. 测量螺旋相位拓扑荷数的典型方法是干涉方法. 这里我们采用另外一个简单有效的方法, 即在 Metasurface 后插入一个具有相应拓扑荷数的螺旋相位片^[30]. 当 Metasurface 的拓扑荷数 $q = 1/2$ 时, 圆偏振光通过后产生的螺旋相位拓扑荷数为 $\pm 2q = \pm 1$, 所以, 如果我们在 Metasurface 后插入一个拓扑荷数为 +1 的螺旋相位片, 则光再通过螺旋相位片后其螺旋相位拓扑荷数会变为 2 (左旋圆偏振入射) 或者 0 (右旋圆偏振入射). 当螺旋相位拓扑荷数为 2 时, 由于相位奇点的存在, 光束强度分布为环状; 而当螺旋相位拓扑荷数为 0

时, 由于没有相位奇点, 光斑应为实心亮斑. 因此, 我们只需要用电荷耦合器 (CCD) 在螺旋相位片后观测光斑是实心还是空心即可判断光束是否携带螺旋相位. 此外, 为了判断输出光的圆偏振手性, 我们在螺旋相位片后插入了另一个四分之一波片 (QWP2) 和另一个格兰激光偏振镜 (GLP2) 来测量光场的斯托克斯参数 S_3 . $S_3 = +1$ 时, 表明光场为左旋圆偏振光; $S_3 = -1$ 时, 则表示光场为右旋圆偏振光.

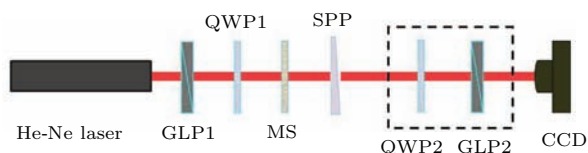


图2 (网刊彩色) 实验装置示意图 (GLP, 格兰激光偏振镜; QWP, 四分之一波片; MS, Metasurface; SPP, 螺旋相位片)

Fig. 2. (color online) Schematic diagram of the experimental setup (GLP, Glan laser polarizer; QWP, quarter-wave plate; MS, Metasurface; SPP, spiral phase plate).

图3给出了光通过 $q = 1/2$ 的 Metasurface 的实验结果. 图3(a)和图3(b)分别为左旋圆偏振光通过 Metasurface 和螺旋相位片后的光场分布. 图中所示光场强度均为环状分布, 并且我们可以看到图3(b)的环半径比图3(a)的环半径更大. 根据(4)式, 左旋圆偏振光通过 Metasurface 后变为右旋圆偏振涡旋光束, 其涡旋拓扑荷数为 +1. 当这右旋涡旋光束再通过拓扑荷数为 +1 螺旋相位片后, 其涡旋拓扑荷数变为 +2. 我们知道, 涡旋拓扑荷数越大, 光束半径就会越大, 这就是图3(b)的光束环半径比图3(a)的环半径更大的原因. 为了判断光场的圆偏振手性, 我们测定了光场的 S_3 参数. 实验结果如图3(c)所示. 由图3(c)可以看出, 环状透射光束的 S_3 参数为 -1, 即光场的偏振态为右旋圆偏振. 众所周知, 螺旋相位片并不改变光的偏振态, 所以根据以上实验结果, 我们可以判断出左旋圆偏振光通过 Metasurface 后确实变成了右旋圆偏振涡旋光束.

图3(d)—(f)是右旋圆偏振光入射的实验结果. 根据前述理论计算, 右旋圆偏振光通过 Metasurface 后变为左旋圆偏振涡旋光束, 其涡旋拓扑荷数为 -1. 当这个左旋圆偏振涡旋光束再通过拓扑荷数为 +1 螺旋相位片后, 其涡旋拓扑荷数应变为 0. 图3(d)显示 Metasurface 将高斯光束

转换成了环状光束, 而图3(e)显示螺旋相位片后的光强为实心分布. 可见, 这些实验结果与前述理论预期是一致的. 图3(f)是输出光场的 S_3 参数. 由图可见输出的实心光场的 S_3 参数为 +1 即输出光为左旋圆偏振光. 所以, 实验结果表明, 右旋圆偏振光通过 Metasurface 后被转换为左旋圆偏振涡旋光束, 且其涡旋拓扑荷数为 -1.

图3(g)—(i)是沿 x 方向振动的线偏振光入射的实验结果. 根据(9)式, 沿 x 方向振动的线偏振光通过 $q = 1/2$ 的 Metasurface 后应被转换为径向偏振光. 根据(10)式, 径向偏振光可以分解为左旋和圆偏振圆偏振涡旋光的相干叠加. 值得注意的是, 径向偏振的右旋圆偏振分量携带的螺旋相位拓扑荷数为 +1, 而左旋圆偏振分量携带的螺旋相位拓扑荷数为 -1. 当这两个圆偏振分量通过拓扑荷数为 +1 的螺旋相位片时, 右旋圆偏振分量的螺旋相位拓扑荷数应变为 +2, 而左旋圆偏振分量的螺旋相位拓扑荷数应变为 0. 由图3(g)我们可以看到 Metasurface 后的光强分布仍为环状, 这是由于输出光场为径向偏振光, 光场存在偏振奇点所导致的. 光场再通过螺旋相位片后, 由于径向偏振光的左旋圆偏振涡旋分量的螺旋相位将会被螺旋相位片所抵消, 故其左旋圆偏振分量通过螺旋相位片后光强应变为实心分布; 而径向偏振光的右旋圆偏振涡旋分量的螺旋相位通过螺旋相位片后涡旋拓扑荷数增加为 +2, 故其右旋圆偏振分量通过螺旋相位片后光强应呈环状分布. 所以, 螺旋相位片后的总光强分布应为一个实心光斑和一个环状光斑的叠加. 图3(h)为实验测得的螺旋相位片后的光强分布, 实验测得的 S_3 参数如图3(i)所示. 实验结果显示: 光斑外围的环状光斑为右旋圆偏振, 而中心处的实心光斑为左旋圆偏振. 径向偏振的两个圆偏振分量通过螺旋相位片后因为具有不同的螺旋相位拓扑荷数而被分离开来. 由此可见, 实验结果与前面的理论分析是一致的.

图4给出了光通过 $q = 3/2$ 的 Metasurface 的实验结果. 为了消除右旋圆偏振光入射后产生的螺旋相位, 我们将 Metasurface 后的螺旋相位片更换成拓扑荷数为 +3 的螺旋相位片. 图4(a)—(c)为左旋圆偏振入射的实验结果. 比较图4(a)与图4(b)可以发现光通过螺旋相位片后环状光束的半径增大, 这是由于右旋圆偏振涡旋光束通过螺旋相位片后其螺旋相位拓扑荷数增加为 +6 所导致的.

图4(c)是实验测得的 S_3 参数. 从中可以看到输出光束的 S_3 参数为 -1 , 即光场的偏振态为右旋圆偏振. 所以, 综合图4(a)—(c)我们可以得到结论: 由

于光与物质的自旋-轨道相互作用, 左旋圆偏振光通过 $q = 3/2$ 的Metasurface后被转换为携带轨道角动量为 $3\hbar$ 右旋圆偏振涡旋光.

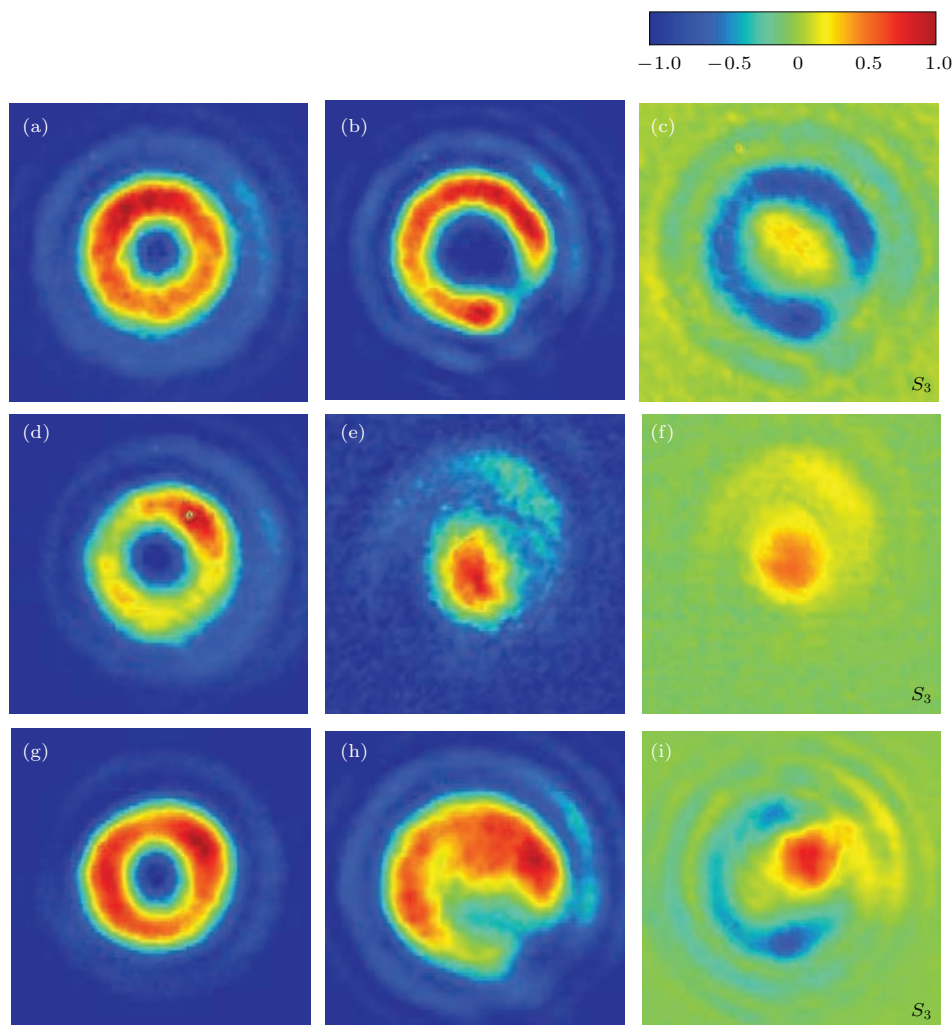


图3 (网刊彩色) 光通过 $q = 1/2$ 的Metasurface和拓扑荷数为 $+1$ 的螺旋相位片后的光强分布和 S_3 参数. 图中第一行为左旋圆偏振入射的实验结果; 第二行为右旋圆偏振入射的实验结果; 第三行为线偏振入射的实验结果; 第一列为在Metasurface后测得的光强分布; 第二列为在螺旋相位片后测得的光强分布; 第三列为在螺旋相位片后测得的 S_3 参数.

Fig. 3. (color online) The intensity distribution and S_3 parameter when the light passing through the metasurface with $q = 1/2$ and spiral phase plate with topological charge $+1$. The first row is the experimental results for a left circularly polarized light input; the second row is the experimental results for a left circularly polarized light input; the third row is the experimental results for a linearly polarized light input; the first column is the intensity distribution after metasurface; the second column is the intensity distribution after spiral phase plate; the third column is the S_3 parameter.

图4(d)—(f)为右旋圆偏振光入射的实验结果. 类似地, 从图中我们同样看到右旋圆偏振光通过Metasurface后其偏振手性发生反转, 即出射光子所携带的自旋角动量与入射光子所携带的自旋角动量符号相反. 同时, 由于Metasurface具有空间非均匀各向异性, 光通过这样的材料会产生自旋-轨道角动量相互耦合作用, 导致圆偏振光通过后会携带轨道角动量.

图4(g)—(i)为沿 x 方向振动的线偏振光入射的实验结果. (9)式表明: Metasurface会将线偏振光转换为径向偏振光. 所以, 当线偏振光入射到Metasurface时, 输出光也应为环状光束. 图4(g)所显示的光强分布与这一理论预期是符合的. 图4(h)和图4(i)分别为螺旋相位片后的光强分布和 S_3 参数. 由图我们可以得到同线偏振光入射到 $q = 1/2$ 的Metasurface类似的结论: 径向偏

振光的左旋圆偏振涡旋分量通过螺旋相位片后其涡旋拓扑荷数增加为+6, 而右旋圆偏振涡旋分量的涡旋拓扑荷数变为0; 螺旋相位片后的输出光斑中心处为不携带轨道角动量的左旋圆偏振光, 而光斑外围的环状光束则为携带轨道角动量 $6\hbar$ 的右

旋圆偏振涡旋光束.

综上所述, Metasurface 是一种很好的自旋-轨道相互作用媒介. 通过设计 Metasurface 的几何参数, 我们可以方便地利用自旋-轨道相互作用对光的相位和偏振进行操控.

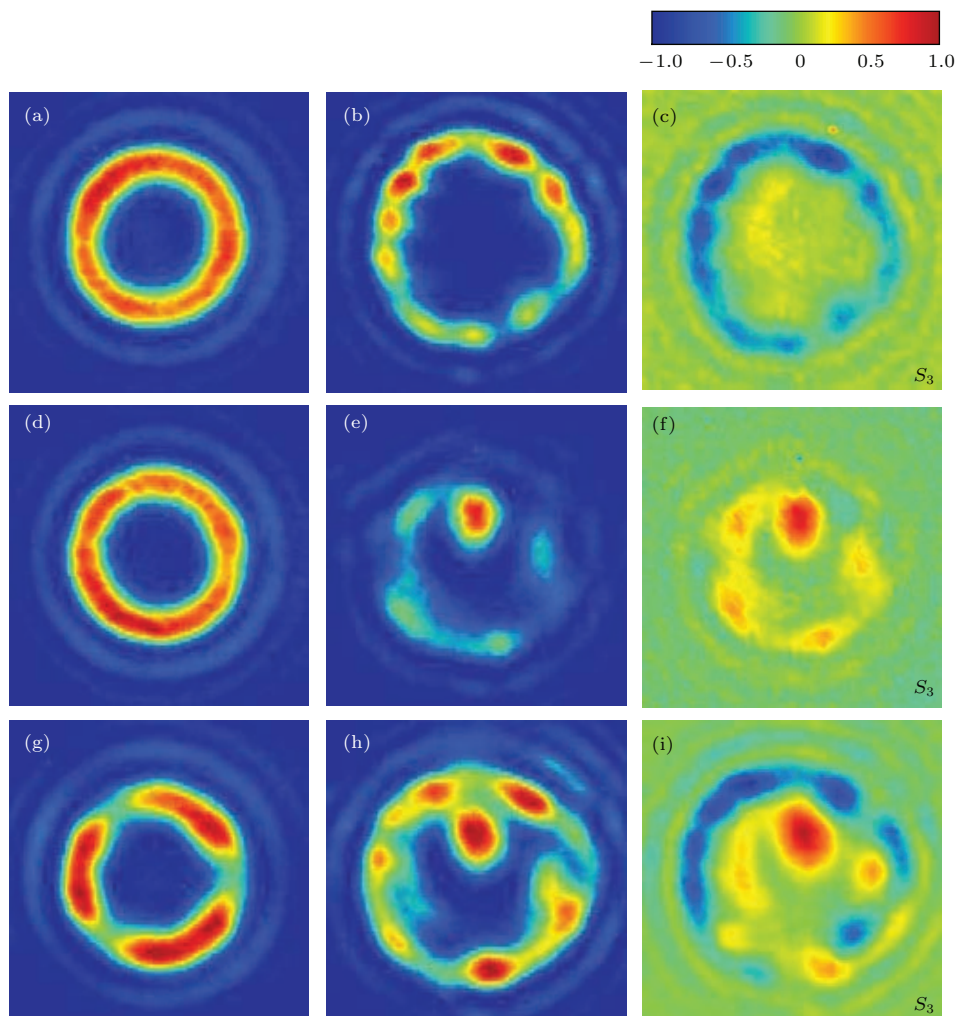


图4 (网刊彩色) 光通过 $q = 3/2$ 的 Metasurface 和拓扑荷数为+3的螺旋相位片后的光强分布和 S_3 参数. 图中第一行为左旋圆偏振入射的实验结果; 第二行为右旋圆偏振入射的实验结果; 第三行为线偏振入射的实验结果; 第一列为在 Metasurface 后测得的光强分布; 第二列为在螺旋相位片后测得的光强分布; 第三列为在螺旋相位片后测得的 S_3 参数.

Fig. 4. (color online) The intensity distribution and S_3 parameter when the light passing through the metasurface with $q = 3/2$ and spiral phase plate with topological charge +3. The first row is the experimental results for a left circularly polarized light input; the second row is the experimental results for a left circularly polarized light input; the third row is the experimental results for a linearly polarized light input; the first column is the intensity distribution after metasurface; the second column is the intensity distribution after spiral phase plate; the third column is the S_3 parameter.

4 结 论

本文研究了光在 Metasurface 的自旋-轨道相互作用. 理论分析表明, 由于 Metasurface 的空间分布非均匀性, 使得通过它的圆偏振光会获

得一个和圆偏振手性(自旋相关)的螺旋相位(即 Pancharatnam-Berry 相位); 而由于 Metasurface 的各向异性, 每个单元结构具有 π 的相位延迟, 所以圆偏振光的偏振手性也会发生反转. 换句话说, 由于自旋-轨道相互作用, Metasurface 会使光子的自旋角动量符号发生反转并携带轨道角动量. 为了证

明理论分析的的正确性, 我们采用 Metasurface 与具有相应拓扑荷数的螺旋相位片一起进行了验证实验, 所得实验结果与理论分析完全一致. 本文结论有助于更加深入地认识 Metasurface 对光的操控原理.

参考文献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [2] Marrucci L, Manzo C, Paparo D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 163905
- [3] Zhao Y, Edgar J S, Jeffries G D M, McGloin D, Chiu D T 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 073901
- [4] Luo H, Ren Z, Shu W, Li F 2007 *Appl. Phys. A* **87** 245
- [5] Li L, Wang J, Du H, Wang J, Qu S 2015 *Chin. Phys. B* **24** 064201
- [6] Yu N, Capasso F 2014 *Nature Mater.* **13** 139
- [7] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M 2013 *Science* **339** 1289
- [8] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, Hasman E 2001 *Opt. Lett.* **26** 33
- [9] Niv A, Biener G, Kleiner V, Hasman E 2003 *Opt. Lett.* **28** 510
- [10] Niv A, Biener G, Kleiner V, Hasman E 2005 *Opt. Lett.* **30** 2933
- [11] Brasselet E, Gervinskas G, Seniutinas G, Juodkazis S 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 193901
- [12] Kang M, Guo Q, Chen J, Gu B, Li Y, Wang H 2011 *Phys. Rev. A* **84** 045803
- [13] Kang M, Chen J, Wang X, Wang H 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **29** 572
- [14] Wang X, Ding J, Ni W, Guo C, Wang H 2007 *Opt. Lett.* **32** 3549
- [15] Cai Y, Lin Q, Eyyuboğlu H T, Baykal Y 2008 *Opt. Express* **16** 7665
- [16] Ding P F, Pu J X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094204 (in Chinese) [丁攀峰, 蒲继雄 2011 物理学报 **60** 094204]
- [17] Dai H, Liu Y, Luo D, Sun X 2011 *Opt. Lett.* **36** 1617
- [18] Chen H, Hao J, Zhang B, Xu J, Ding J, Wang H 2011 *Opt. Lett.* **36** 3137
- [19] Deng D, Chen C, Zhao X 2013 *Appl. Phys. B* **110** 433
- [20] Qian X, Zhu W, Rao R 2015 *Chin. Phys. B* **24** 044201
- [21] Zhan Q W 2009 *Adv. Opt. Photon.* **1** 1
- [22] Wang Z, Zhang N, Yuan X 2011 *Opt. Express* **19** 482
- [23] Beresna M, Gecevičius M, Kazansky P G, Gertus T 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 201101
- [24] Liu Y, Ling X, Yi X, Zhou X, Luo H, Wen S 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 191110
- [25] Yi X, Ling X, Zhang Z, Li Y, Zhou X, Liu Y, Chen S, Luo H, Wen S 2014 *Opt. Express* **22** 17207
- [26] Yi X N, Li Y, Liu Y C, Ling X H, Zhang Z Y, Luo H L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 094203 (in Chinese) [易煦农, 李瑛, 刘亚超, 凌晓辉, 张志友, 罗海陆 2014 物理学报 **63** 094203]
- [27] Ling X, Yi X, Zhou X, Liu Y, Shu W, Luo H, Wen S 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 151101
- [28] Milione G, Sztul H I, Nolan D A, Alfano R R 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 053601
- [29] Yi X, Liu Y, Ling X, Zhou X, Ke Y, Luo H, Wen S, Fan D 2015 *Phys. Rev. A* **91** 023801
- [30] Niv A, Gorodetski Y, Kleiner V, Hasman E 2008 *Opt. Lett.* **33** 2910

Spin-orbit interaction of light in metasurface*

Yi Xu-Nong¹⁾²⁾ Li Ying^{1)†} Ling Xiao-Hui¹⁾ Zhang Zhi-You¹⁾ Fan Dian-Yuan¹⁾

1) (SZU-NUS Collaborative Innovation Center for Optoelectronic Science and Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

2) (College of Physics and Electronic Information Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China)

(Received 3 June 2015; revised manuscript received 17 August 2015)

Abstract

Spin-orbit interaction of light in metasurface is investigated in this paper. We theoretically analyze the transformation of circularly and linearly polarized light by metasurface with Jones matrix. The results indicate that the interaction of light with spatially inhomogeneous and anisotropic metasurface leads to a coupling of spin-orbital angular momentum. The nanostructures of metasurfaces are arranged at a definite rate of rotation, which induces an additional space-variant geometrical phase (i.e., Pancharatnam-Berry phase). The Pancharatnam-Berry phase is dependent on the polarization handedness of the incident wave. This characteristic can result in spin-dependent split. A left/right-circular polarized beam is transformed into a right/left-circular polarized vortex beam by the metasurfaces. In the conversion process, the sign of spin angular momentum of photons is inverted. At the same time, each photon can acquire orbital angular momentum from the inhomogeneous and anisotropic media. The case that a linearly polarized beam inputs the metasurfaces also is considered. A linearly polarized wave can be regarded as the linear superposition of left-circular and right-circular polarized wave. The two circularly polarized components are respectively converted into circularly polarized vortex beam with reverse polarization handedness. The coherent superposition of the two output components forms a cylindrical vector beam. Finally, we adopt the combination of a metasurface and spiral phase plate to verify the theoretical results. The vortex phase can be eliminated by the spiral phase plate when a left-circular polarized light is input, while topological charge of vortex phase will increase when a right-circular polarized light is input. For the case of inputting linearly polarized beam, one of the two outputting circularly polarized components can be eliminated by the helical phase through using the spiral phase plate, while the topological charge of another component increases. It results in the fact that the intensity pattern splits into two parts. The central part does not have helical phase, while the ambient ring-shaped intensity has helical phase. In order to judge the polarization handedness of output wave, the Stokes parameter S_3 is measured by inserting a Glan laser polarizer and a quarter wave plate behind the spiral phase plate. The experimental results are in good agreement with theoretical analyses. These results are helpful for understanding the manipulation of light with metasurface.

Keywords: spin-orbit interaction, vortex beam, vector beam

PACS: 42.25.-p, 42.25.Ja, 03.65.Vf

DOI: 10.7498/aps.64.244202

* Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61490713) and the Foundation of Hubei Educational Committee, China (Grant No. Q20132703).

† Corresponding author. E-mail: queenly@vip.sina.com