

光学斯格明子的产生与调控(特邀)

周志凯, 王思聪*, 李向平**

暨南大学光子技术研究院广东省光纤传感与通讯重点实验室, 广东 广州 511443

摘要 传统斯格明子是一种在核物理和磁性材料中均已被证明具有拓扑稳定性的准粒子,可应用于逻辑器件、晶体管、量子计算等领域。近年来,光学斯格明子被人们所提出,并引起了拓扑光学与光场调控领域研究者的广泛兴趣。综述了当前光学斯格明子的研究进展,详细介绍了光学斯格明子的拓扑结构分类、不同矢量构型光学斯格明子的产生与调控,并对其潜在应用进行了展望,为本领域进一步快速发展提供了参考。

关键词 物理光学; 斯格明子; 拓扑光学; 结构光场调控

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS240431

1 引言

斯格明子(Skyrmion)是核物理和凝聚态物理中一类拥有明显矢量结构且具备拓扑保护特性的准粒子。该理论最初由英国粒子物理学家 Skyrme^[1-2]于20世纪60年代提出,用于描述元素粒子组成的稳定性。斯格明子最先在核子^[3-4]和磁性材料系统中被发现^[5-12]。随后,这种拥有拓扑保护特性的准粒子也在液晶^[13-16]、铁电体^[17-19]、极化子超流体^[20]、声学^[21]和扭转电子学^[22]等不同的经典或量子系统中得以实现和研究,并应用于逻辑器件和量子计算等领域。

随着拓扑光学的蓬勃发展,光学斯格明子的存在被科学界所证实^[23-24]。2018年, Tsesses 研究团队利用金属表面六边形光栅结构在激发的表面等离子体干涉中发现了 Néel 型电场矢量光学斯格明子^[23]。与此同时, Yuan 研究团队利用紧聚焦矢量结构光场在金属表面所激发的表面等离子体干涉中发现了 Néel 型自旋矢量光学斯格明子^[24],并进一步通过调控自旋矢量光学斯格明子对(Skyrmion pair)的自旋分布实现了 pm 级光学位移传感系统^[25],开启了光学斯格明子走向实际应用的道路。目前,具有不同拓扑结构、不同矢量构型的光学斯格明子不断涌现^[26-36],为拓扑结构光场的时空特性研究提供了新的思路和方法^[37]。

本文综述了当前光学斯格明子的研究进展,详细讨论了光学斯格明子的拓扑结构分类、不同矢量构型光学斯格明子的产生与调控,以及光学斯格明子在微位移测量、光通信编码加密的潜在应用,并为该领域的

进一步发展提供了参考。

2 斯格明子的定义和拓扑结构分类

2.1 斯格明子的定义

斯格明子在物理上被视为携带拓扑自旋结构的准粒子,在几何上被看作是限制在有限几何空间内的三维矢量场结构,可作为拓扑孤子解的唯一表现形式^[38]。在磁性材料中研究的斯格明子通常是二维的,在具有 Dzyaloshinsky-Moriya (DM) 相互作用的磁性材料中能够形成稳定的斯格明子基态^[7]。这种二维斯格明子可以被看作将一个三维的斯格明子矢量球通过球极投影的方式投射到二维平面内(图1),并将这种二维平面的三维矢量场称为“Baby skyrmions”^[7,10,24]。

这种映射可以用立体矢量球面 Σ 与平面 Γ 的投影表示^[39-40]。例如,假设投影点是 Σ 的北极,坐标为 $(r_1, r_2, r_3) = (0, 0, 1)$,则将 Γ 中的点 (x, y) 映射到 (r_1, r_2, r_3) 的变换关系^[41]为

$$(r_1, r_2, r_3) = \left(\frac{2x}{1+x^2+y^2}, \frac{2y}{1+x^2+y^2}, \frac{x^2+y^2-1}{1+x^2+y^2} \right). \quad (1)$$

平面 Γ 上点 (x, y) 的矢量场 $\mathbf{n}(x, y)$ 表示为

$$\mathbf{n}(x, y) = [n_x(x, y), n_y(x, y), n_z(x, y)]. \quad (2)$$

根据 Gauss-Bonnet 定理,平面 Γ 对应的总矢量场 $\mathbf{n}(x, y)$ 的拓扑性质可以由拓扑不变量 N ^[5,42]表示

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-01-27; 录用日期: 2024-02-02; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 科技部重点专项(2021YFB2802003)、国家自然科学基金面上项目(62375109, 61975066, 62325503)、广东省自然科学基金面上项目(2021A1515011586)

通信作者: *wangsc@jnu.edn.cn; **xiangpingli@jnu.edn.cn

$$N = \frac{1}{4\pi} \iint \mathbf{n} \left(\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial x} \times \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial y} \right) dx dy. \quad (3)$$

拓扑不变量 N 定义为斯格明子数, 在几何上表示矢量环绕单位球 Σ 的圈数。如图 1(a) 所示, 用方位角 α 和极化角 β 代替 x 和 y 表示球坐标, 用极坐标 r 和 θ 表示矢量位置, 则矢量可表示为 $\mathbf{n} = r(\cos \theta, \sin \theta)$, 其中拥有不同涡度以及螺旋度的斯格明子横向分量分布如图 1(b) 所示。 \mathbf{n} 在二维平面上的位置由 r 和 θ 决定, 进行单位球

体映射, 可用球坐标表示矢量在球面上的位置, 则 $\mathbf{n} = [\cos \alpha(\theta) \sin \beta(r), \sin \alpha(\theta) \sin \beta(r), \cos \beta(r)]$ 。

由此可以将斯格明子的拓扑不变量^[5,35]分解为

$$\begin{aligned} N &= \frac{1}{4\pi} \int_0^{r_s} dr \int_0^{2\pi} d\theta \frac{d\beta(r)}{dr} \frac{\partial \alpha(\theta)}{\partial \theta} \sin \beta(r) \\ &= \frac{1}{2} \cos \beta(r) \Big|_{r=0}^{r=r_s} \cdot \alpha(\theta) \Big|_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \\ &= p \cdot m, \end{aligned} \quad (4)$$

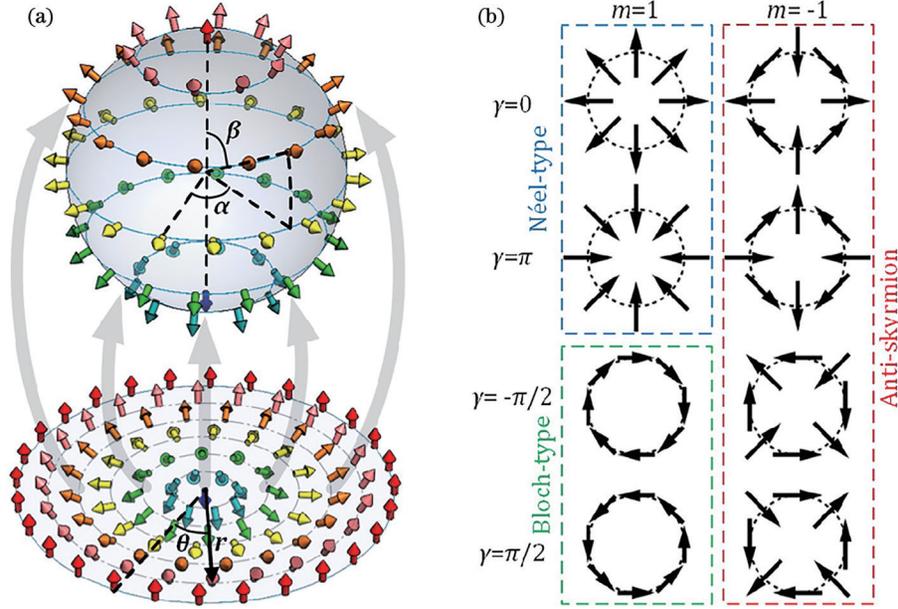


图 1 斯格明子的矢量投影映射^[35]。(a) 三维斯格明子矢量球与二维平面斯格明子的矢量映射关系; (b) 具有不同 m 和 γ 值的斯格明子的横向矢量分量分布

Fig. 1 Vector projection mapping of the skyrmion^[35]. (a) Mapping relationship between the three-dimensional skyrmion vector sphere and the two-dimensional plane skyrmion vector; (b) distribution of transverse vector components of skyrmions with different m and γ values

式中: σ 为空间受限的区域, 可以是无穷大 (对于一个孤立的区域); p 为斯格明子的极性, 表示矢量纵向分量的分布, 且 $p = \frac{1}{2} \cos \beta(r) \Big|_{r=0}^{r=r_s}$, 当 $p = +1$ 时, 中心位置的矢量方向向下, 而边缘区域矢量方向向上, 当 $p = -1$ 时则相反; m 为斯格明子的涡度, 表示矢量横向分量的分布, 且 $m = \alpha(\theta) \Big|_{\theta=0}^{\theta=2\pi}$ 。为区分不同螺旋分布, 引入初始螺旋度 γ , 即方位角 $\alpha(\theta) = m\theta + \gamma$ 。式 (4) 表明斯格明子数可以由极性和涡度共同决定^[43]。例如, 图 1(a) 中的斯格明子具有正极性 $p = +1$ 和涡度 $m = +1$, 且矢量的横向分量沿径向排列, 即螺旋度 $\gamma = 0$, 斯格明子呈现 Néel 型分布^[35]。

2.2 斯格明子的分类

斯格明子具有多种特殊的拓扑结构和特性, 因此可以被分成很多类型。改变排列在立体矢量球 Σ 上的矢量分布, 或者改变矢量球 Σ 展开到平面 Γ 上的方式, 可以获得不同的斯格明子拓扑结构。这些结构特征可以由斯格明子数 N 以及相应的拓扑不变量 (如极性 p 、

涡度 m 和螺旋度 γ) 等来区分。

图 2(左) 为 $N = +1$ 、螺旋度 $\gamma = 0$ 的 Néel 型斯格明子^[45], 图 2(中) 所示为斯格明子数与图 2(左) 相同、螺旋度 $\gamma = \pi/2$ 的 Bloch 型斯格明子^[46], 图 2(右) 所示为方位角相反, 即 $\alpha(\theta) = -m\theta$ 的反斯格明子 (Anti-skyrmions)^[47]。将矢量分布的横向分量可视化, 横向方位角采用图 2 下方的颜色梯度图表示, 使用不同颜色梯度来映射从 $-\pi$ 到 π 的横向方位角, 同时使用从白到黑的颜色梯度来表示从 -1 到 1 的纵向分量大小。

根据拓扑结构定义, 斯格明子的拓扑结构远不止上述几种基础构型。图 3(a) 为螺旋度 $\gamma = \pi/2$ 的反斯格明子; 图 3(b) 为居于 Néel 型和 Bloch 型之间螺旋度 $\gamma = \pi/4$ 的过渡态斯格明子; 图 3(c) 为涡度 $m = 2$ 的高阶斯格明子, 且随着其涡度的增加, 高阶斯格明子的斯格明子数也相应增加^[48]; 图 3(d) 为由两个半子 (Merons) 组成的双半子 (Biskyrmion) 构型^[49], 其中半子是指从三维球面向二维斯格明子矢量映射时, 以赤

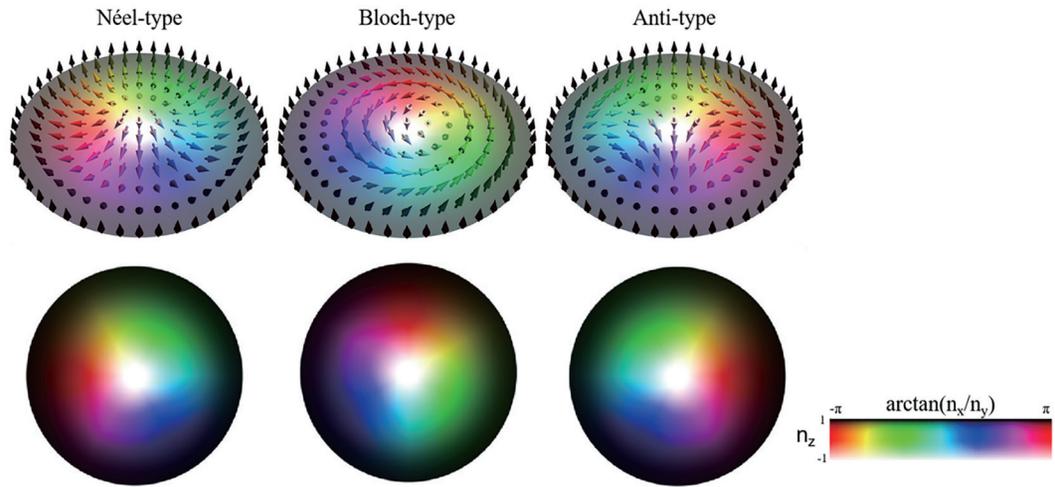


图 2 基础类型斯格明子的三维矢量结构分布(上)和横向分量分布(下), Néel 型斯格明子(左)、Bloch 型斯格明子(中)、 $N=-1$ 的反斯格明子(右)^[35,44]

Fig. 2 Three-dimensional vector structure distribution (top) and transverse component distribution (bottom) of fundamental type skyrmions, Néel-type skyrmions (left), Bloch-type skyrmions (middle), and anti-skyrmions with $N=-1$ (right)^[35,44]

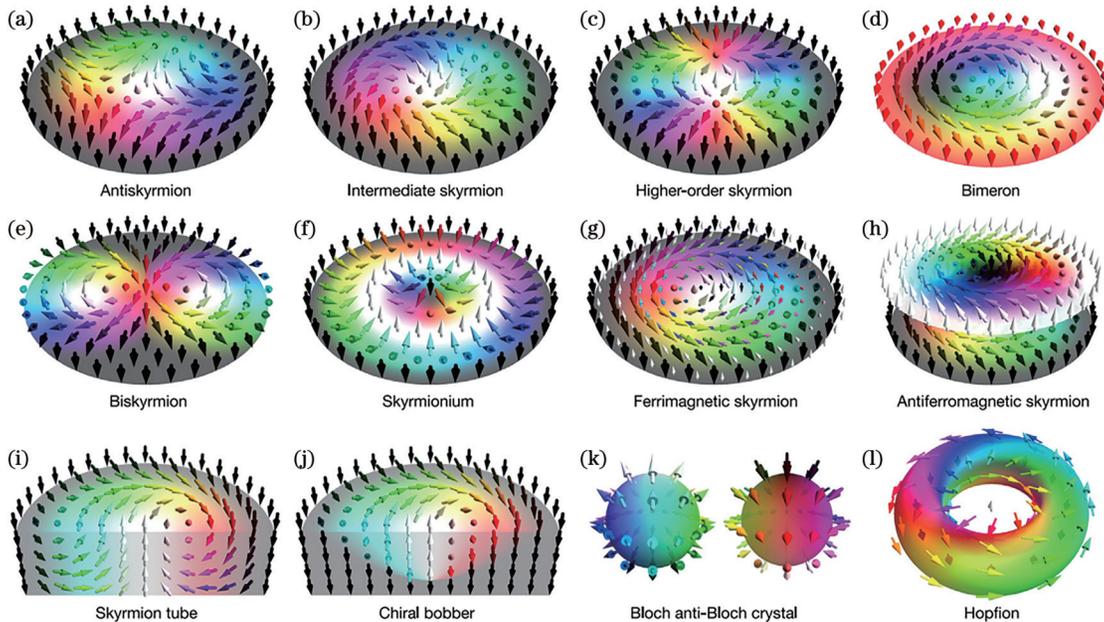


图 3 斯格明子的各类拓扑构型^[42]。(a)螺旋度 $\gamma=\pi/2$ 的反斯格明子;(b)处于 Bloch 和 Néel 型之间的螺旋度 $\gamma=\pi/4$ 斯格明子;(c)涡度 $m=2$ 、斯格明子数 $N=2$ 的高阶斯格明子;(d)双半子;(e)斯格明子数 $N=2$ 的高阶双半子;(f)斯格明子数 $N=0$ 的嵌套型斯格明子;(g)(h)亚铁磁结构与反铁磁结构斯格明子;(i)(j)斯格明子“管”;一对由 Bloch 和 anti-Bloch 型斯格明子构成的(k)三维结构(刺猬晶格)以及(l)具有三维环面拓扑结构的霍普夫子

Fig. 3 Skyrmions with various helicities and vorticities^[42]. (a) Anti-skyrmion with a vorticity $m=-1$; (b) skyrmion with an intermediate helicity $\gamma=\pi/4$ between Bloch and Néel type skyrmions; (c) higher-order skyrmion with vortex degree $m=2$ and skyrmion number $N=2$; (d) biskyrmion; (e) higher-order biskyrmion with skyrmion number $N=2$; (f) skyrmionium with skyrmion number $N=0$; (g)(h) ferrimagnetic and synthetic antiferromagnetic skyrmions; (i)(j) skyrmion “tube”; a pair of Bloch and anti-Bloch points constituting the building block of (k) a three-dimensional crystal (hedgehog lattice) and (l) the hopfion with three-dimensional toroidal topological structure

道为中心开始向其中一个极点展开的斯格明子,斯格明子数为 $1/2$ ^[50];图 3(e)为斯格明子数 $N=2$ 的高阶双半子^[51];图 3(f)为由两个极性 p 相反的斯格明子组成的嵌套型斯格明子(Skyrmionium),斯格明子数为 0 ^[52-53];图 3(g)、(h)分别表示亚铁磁结构与反铁磁结构

斯格明子;图 3(i)~(l)为具有三维空间分布的斯格明子结构,分别表示斯格明子管状拓扑结构、一对由 Bloch 型和 anti-Bloch 型斯格明子构成的三维拓扑结构(刺猬晶格)以及具有三维环面拓扑结构的霍普夫子(Hopfion)^[54-55]。

3 光学斯格明子的产生与调控

在磁性材料中,构成斯格明子的自旋结构由磁晶性质、能量和结构最小化等因素共同决定。然而,在光学领域中,这些限制条件并不存在。因此,从理论上讲,在麦克斯韦方程组的约束下,人们能更自由地实现多种不同光学矢量斯格明子的拓扑调控。本节详细讨论了不同矢量构型光学斯格明子的产生与调控。

3.1 电磁场矢量光学斯格明子

表面等离子体是由自由电子和光子在金属表面^[56]上相互作用形成的电磁振荡,具有电场增强、表面局域化^[57-59]等特性。2018年,Tsesses 研究团队利用金属表面六边形光栅结构在所激发的表面等离子体干涉中发现了 Néel 型电场矢量光学斯格明子^[23]。如图 4(a)所

示,通过在 200 nm 厚的金膜上刻蚀一个六边形光栅,光栅周期为等离子体波长,使不同方向传播的等离子体波产生特定的相位关系。在正六边形中心区域形成了如图 4(a)所示的六边形对称结构的电场矢量光学斯格明子,并且由于驻波的径向传输对称关系,该斯格明子的拓扑结构为 Néel 型^[23]。

为实现电场矢量光学斯格明子的动态测量,Davis 研究团队利用时间分辨矢量显微镜,实现了亚 fs 时间精度和 10 nm 空间精度的电场矢量光学斯格明子产生过程的动态探测^[27]。电场矢量光学斯格明子随时间的探测情况如图 4(b)所示。该研究揭示了斯格明子数从 +1 到 -1 再到 +1 的周期性转变,这种转变发生在几 fs 的时间尺度内。此外,还可以使用麦克斯韦方程组的旋度方程从电场矢量中获取表面的磁场分布信息。

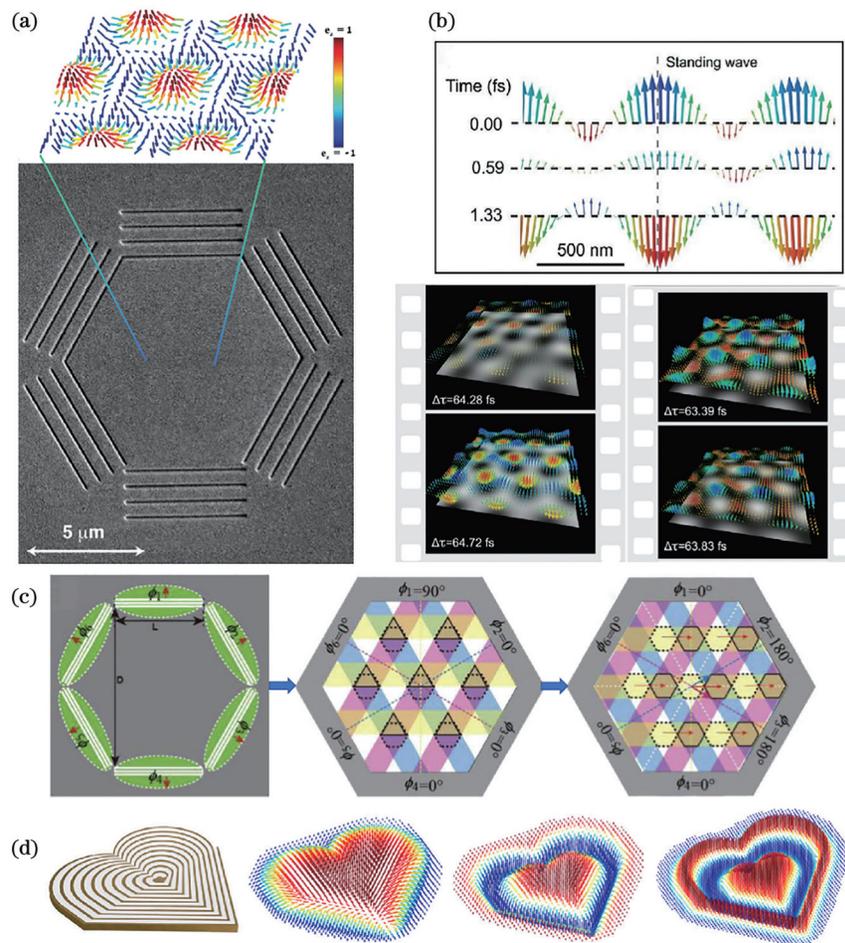


图 4 利用表面等离子体波干涉产生和调控电磁场矢量光学斯格明子。(a)利用表面等离子体波干涉产生 Néel 型电场矢量光学斯格明子分布(颜色梯度表示其纵向分量的大小),箭头表示局部电场的单位矢量方向^[23];(b)利用时间分辨矢量显微镜实现电场矢量光学斯格明子的动态测量^[27];(c)通过调整六束激发光束的相位关系改变斯格明子的位置和形状^[60];(d)利用人工局域表面等离激元产生具有拓扑稳定特征的磁矢量光学斯格明子^[34]

Fig. 4 Generating and manipulating electromagnetic field vector optical skyrmions using surface plasmon wave interference. (a) Generating Néel-type electric field vector optical skyrmion distribution using surface plasmon wave interference (color gradient represents the magnitude of its longitudinal component), with arrows indicating the unit vector direction of local electric field^[23]; (b) dynamic measurement of electric field vector optical skyrmions using time-resolved vector microscopy^[27]; (c) changing position and shape of skyrmions by adjusting the phase relationship of six excitation beams^[60]; (d) generating magnetized vector optical skyrmions with topological stability characteristics using artificially localized surface plasmons^[34]

在此基础上,2020年 Zhan 研究团队通过改变六边形光栅不同方位角方向传播的表面等离子体波相位,如图 4(c)所示,实现了 Néel 型电场矢量光学斯格明子的重新塑形以及斯格明子结构的空间移动^[60]。研究表明,光学斯格明子的电磁场结构主要由激发结构决定,不同的闭合或非闭合的几何形状将诱导不同的拓扑性质。光学斯格明子的特殊几何形状表明其对激发结构和电磁波相位间的强烈依赖关系,这意味着光栅结构在光学斯格明子拓扑表现中发挥着重要作用^[61]。电场中的 Néel 型光学斯格明子已经被证明,但是对于 Bloch 型磁矢量光学斯格明子的存在很快被证明是错误的,形成 Néel 型电场矢量光学斯格明子时,磁场形成一个没有平面外分量的平面涡旋,由于正交磁场的点积为 0,因此这个涡旋的斯格明子数为 0,未能生成 Bloch 型磁矢量光学斯格明子^[62-63]。

除基本的初级斯格明子(Elementary skyrmion)和半子外,嵌套型斯格明子也在空间卷曲超构基元中得以实现。2022年, Li 研究团队通过设计人工局域表面等离子体激元产生可控径向 $k\pi$ (k 为正整数) 扭曲的磁场,在实验上产生了等距梳状频率分布且任意形态的嵌套型磁场矢量光学斯格明子。如图 4(d)所示,通过控制该超构基元的结构,可以生成任意形状的磁场矢量光学斯格明子。这种斯格明子的偏振态和强度分布局限在一个深亚波长范围内^[34]。在此基础上,电场矢量光学斯格明子也可以在具有旋转和镜像对称性的平面微波等离子体谐振器中实现^[64]。

如图 5(a)所示,除利用表面等离子体波干涉外, Shen 研究团队发现了光学斯格明子与 Gouy 相位相关的时空转变规律,引入具有复杂拓扑结构的超环面光脉冲,对环偶极子的传输矢量场进行分析和构建,产生

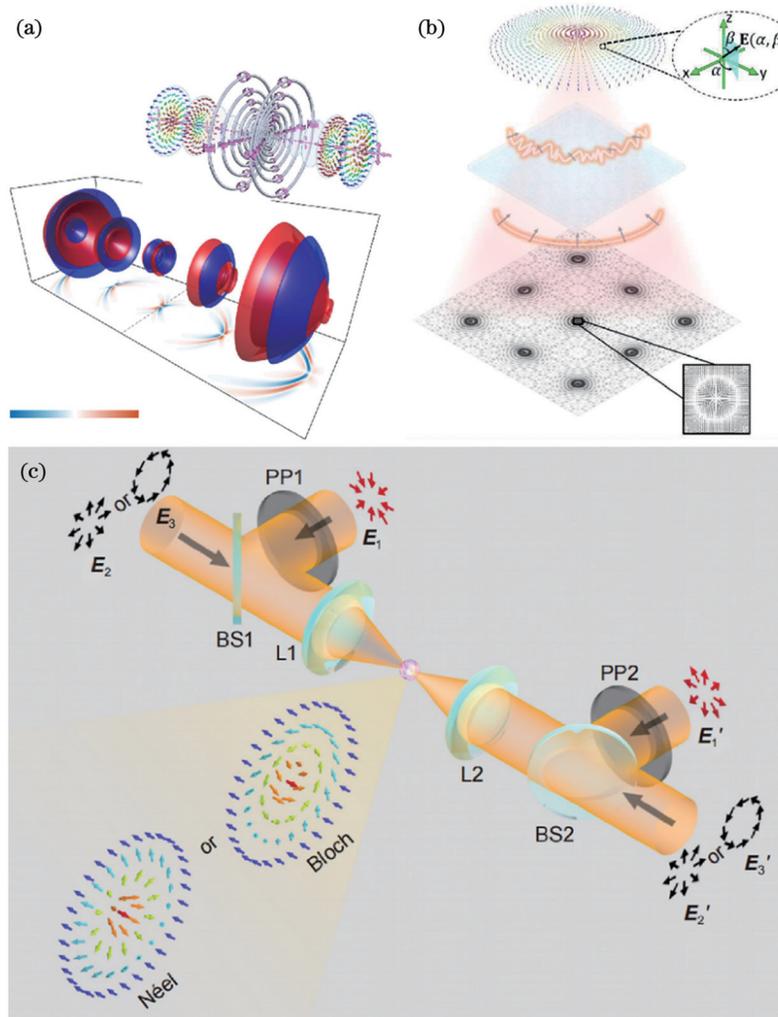


图 5 在自由空间中产生和调控电磁场矢量光学斯格明子。(a)利用具有复杂拓扑结构的超环面光脉冲产生电磁场矢量光学斯格明子^[31]; (b)利用矢量全息调控产生电磁场矢量光学斯格明子^[65]; (c)利用 4π 聚焦条件下的两对相向传播的柱矢量入射光束在聚焦空间中产生电磁场矢量光学斯格明子^[66]

Fig. 5 Generating and manipulating electromagnetic field vector optical skyrmions in free space. (a) Generating electromagnetic field vector optical skyrmions using ultrashape pulses with complex topological structures^[31]; (b) generating electromagnetic field vector optical skyrmions using vector holographic control^[65]; (c) generating electromagnetic field vector optical skyrmions in the focal space by using two pairs of counter-propagating cylindrical vector incident beams under the 4π focusing condition^[66]

了可以在自由空间中传播且携带电磁矢量斯格明子的超短脉冲^[31]。

对入射光场进行矢量全息调控是在聚焦空间(自由空间)中操控电磁场矢量的重要方法。Ren 研究团队利用矢量全息图在紧聚焦场中构建出电场矢量光学斯格明子^[65]。如图 5(b)所示,基于聚焦场所需构建的目标斯格明子的电场分布情况,预设每个傅里叶平面像素的三维偏振状态($E_{x,i}, E_{y,i}, E_{z,i}$),然后利用矢量衍射理论进行逆向设计,产生相应入射空间的矢量全息图,最后利用正向算法产生自由空间中的电场矢量光学斯格明子^[65,67]。

此外, Li 研究团队在自由空间中通过调控两对相向传播的柱矢量入射光的相位与偏振态,在 4π 聚焦系统中实现了电磁场纵向偏振分量与横向偏振分量的独立控制,并在焦面上相干产生了微纳空间尺度的 Néel 型与 Bloch 型的电磁矢量光学斯格明子^[66]。如图 5(c)所示,当其中一对相向传播的入射光是相位差为 π 的径向偏振光,另一对为相位差相同的径向偏振光时,系统焦面上产生了 Néel 型电场矢量斯格明子,而由于磁场分布缺少纵向场分量,仅表现为角向分布的纯横向场。进一步,将另一对相向传播的入射光替换为对称分布的角向偏振光,此时系统焦面上同时产生了 Bloch 型的电场矢量斯格明子与相位超前 $\pi/2$ 的磁场矢量斯格明子。

3.2 自旋矢量光学斯格明子

除电磁场矢量外,自旋矢量光学斯格明子同样得到了人们的广泛关注。2021 年, Yuan 研究团队通过变分理论阐述了光学斯格明子的形成机理,发现光学界面系统中法线方向的总角动量是守恒的,自旋结构的形成源于系统的角动量守恒性质,并受到系统对称性

保护^[68]。自旋-轨道角动量的耦合能够改变光的自旋矢量分布,从而形成与磁斯格明子相对应的光子自旋矢量斯格明子。

在电磁波中,自旋角动量^[9]的定义为

$$\mathbf{s} = \text{Im} \left(\frac{\epsilon \mathbf{E}^* \times \mathbf{E} + \mu \mathbf{H}^* \times \mathbf{H}}{4\omega} \right), \quad (5)$$

式中: \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别为电场和磁场; ω 为角频率; ϵ 和 μ 分别为介电常数和磁导率。

一般情况下,波导和表面电磁波均具有倏逝场分量,并携带横向的自旋角动量,且自旋角动量方向垂直于电磁波的传播方向。如图 6(a)所示, Yuan 研究团队基于自旋-轨道耦合作用,利用总角动量量子数 $A = 1$ 的涡旋光在金属膜表面形成的倏逝场干涉诱导产生了 Néel 型自旋矢量光学斯格明子,其局部自旋方向可在深亚波长空间尺度内实现反转(约为光波长的 $1/60$)^[24]。此外,如图 6(b)所示,利用紧聚焦圆偏振涡旋光束来激发金属与空气界面上的倏逝光学涡旋(e-OV),能够形成具有 Bloch 型自旋矢量结构的光学斯格明子。在这种光场调控状态下,自旋矢量光学斯格明子可以进行无方向限制的位移,且在移动的过程中几乎没有自旋结构的畸变^[69]。进一步,研究团队通过计算发现,六重及四重对称下的近场自旋-轨道耦合将分别形成 Abrikosov 型及 Staggered 型的能流旋涡分布,并实现如图 6(c)所示的限制在四边形对称倏逝场中的半子,其斯格明子数 N 等于 $1/2$ ^[29]。这些自旋结构对应着电磁场的能量分布最低的部分,因此具有稳定性。

3.3 斯托克斯矢量光学斯格明子

在傍轴光束中,电磁场在自由空间传播时其偏振态总是垂直于光束传播方向,即横向偏振态分布,因此

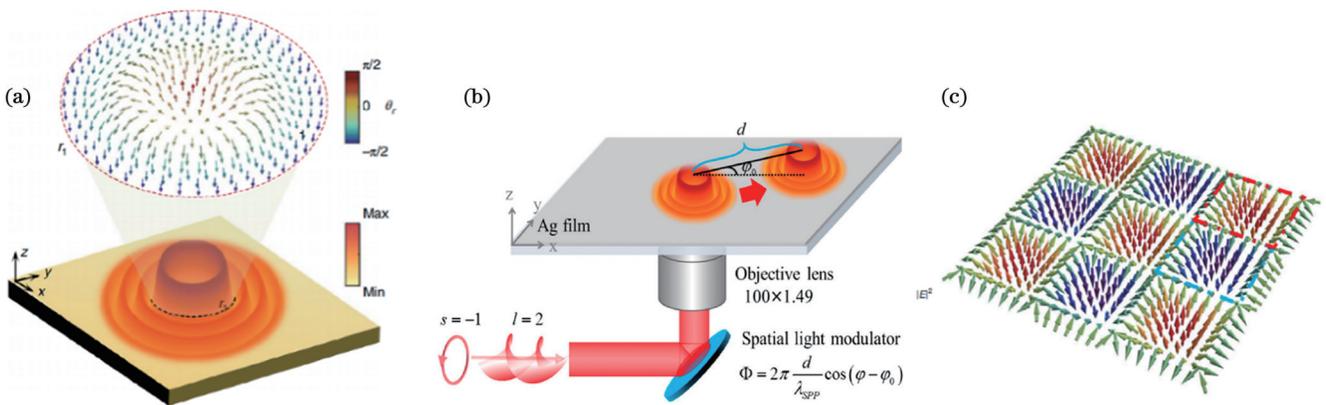


图 6 倏逝场中的自旋矢量光学斯格明子和半子。(a)利用总角动量量子数 $A=1$ 的涡旋光在金属膜表面产生 Néel 型自旋矢量光学斯格明子^[24]; (b)利用紧聚焦圆偏振涡旋光在金属表面产生 Bloch 型自旋矢量光学斯格明子,并实现无方向限制的斯格明子空间位移^[69]; (c)结合能量稳定条件实现四边形对称结构的光学半子^[29]

Fig. 6 Spin vector optical skyrmions and merons in evanescent fields. (a) Generating Néel-type spin vector optical skyrmions on the surface of a metal film using vortex light with total angular momentum quantum number $A=1$ ^[24]; (b) generating Bloch-type spin vector optical skyrmions on a metal surface using tightly focused circularly polarized vortex light and achieving unrestricted spatial displacement of skyrmions^[69]; (c) realizing optical merons with a quadrilateral symmetric structure by combining energy stability conditions^[29]

很难在自由空间中构造三维矢量场结构。然而,用庞加莱球对偏振态进行描述时,庞加莱球上每点都可以对应一个偏振状态,并且每点的坐标分别对应三个斯托克斯(Stokes)参量: S_1 、 S_2 和 S_3 ,这三个参量可以用来定义三维的斯托克斯矢量。傍轴光束理论上可以包含所有的偏振态,对应着庞加莱球上的所有点,因此可以用斯托克斯矢量来构造完整的斯格明子矢量。

为构造斯托克斯矢量光学斯格明子,研究者们提出了基于有理映射构建斯格明子的理论。如图 7 所示,在与光束传播方向垂直的 Γ 平面上的每个位置 (x, y) 所表示的偏振态,都可以唯一地映射到 Stokes 矢量 $\mathbf{S}(x, y) = [S_1(x, y), S_2(x, y), S_3(x, y)]^T$ 上。其中,单位矢量 $\mathbf{S}(x, y)$ 的尖端对应庞加莱球上的一个点,表示局部偏振状态,具体表现为一个偏振椭圆。斯格明子数 N 表示矢量 $\mathbf{S}(r)$ 的尖端覆盖整个庞加莱球面的次数。在图 7 中,由下至上, Γ 平面上的偏振分布既可以用偏振椭圆表示,也可以用斯托克斯矢量表示。平面 Γ 通过逆投影到三维斯格明子球 Σ 上,进一步球 Σ 又与庞加莱球相互映射^[41]。

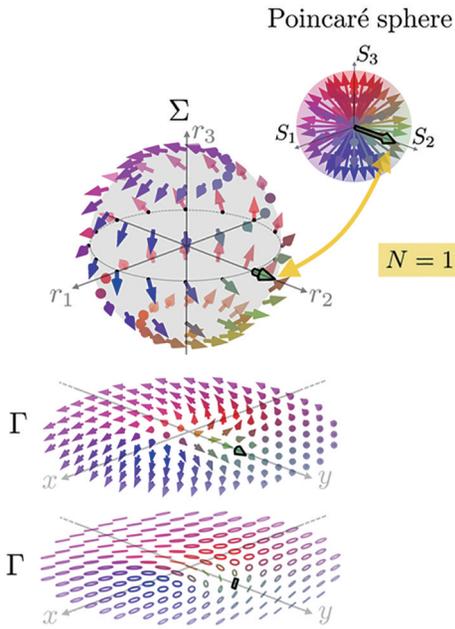


图 7 基于有理映射构建斯格明子数为 1 的斯格明子^[41]

Fig. 7 Constructing skyrmions with skyrmion number 1 based on rational mapping^[41]

对于傍轴光束中的斯格明子,目前大多是叠加一对正交偏振的拉盖尔高斯(Laguerre-Gaussian, LG)模产生^[35,39],其模式 $|\psi(\mathbf{r})\rangle$ (其中矢量 \mathbf{r} 为角谱矢量)可以写作

$$|\psi(\mathbf{r})\rangle = u_0(\mathbf{r})|0\rangle + \exp(i\phi)u_1(\mathbf{r})|1\rangle = M_{\text{LG}, l_0, n_0}|0\rangle + M_{\text{LG}, l_1, n_1}\exp(i\phi)|1\rangle, \quad (6)$$

式中: $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 为任意两个正交的偏振态; ϕ 为相位差;

$u_0(\mathbf{r})$ 、 $u_1(\mathbf{r})$ 为两个正交的空间模式; M_{LG} 为 LG 模,与拓扑荷(l_0, l_1)和径向波节数(n_0, n_1)有关,其中拓扑荷代表轨道角动量。在不影响一般性的情况下,忽略相位附加项 $\exp(i\phi)$ 。可将式(6)改写为

$$|\psi\rangle = \frac{|0\rangle + \mu(\mathbf{r})|1\rangle}{\sqrt{1 + |\mu(\mathbf{r})|^2}}, \quad (7)$$

式中: $\mu(\mathbf{r}) = M_{\text{LG}, l_1, n_1} / M_{\text{LG}, l_0, n_0}$,为两个 LG 模复振幅之比。斯托克斯参量 $S_i (i=1, 2, 3)$ 为

$$S_i = [\psi(\mathbf{r}) | \sigma_i | \psi(\mathbf{r})], \quad (8)$$

式中: σ_i 为泡利矩阵。最终斯托克斯矢量 \mathbf{S} 的形式为

$$\mathbf{S} = \frac{1}{1 + |\mu(\mathbf{r})|^2} \times \{2\text{Re}[\mu(\mathbf{r})], 2\text{Im}[\mu(\mathbf{r})], 1 - |\mu(\mathbf{r})|^2\}. \quad (9)$$

基于有理映射,理论上不仅可以对 Néel 型和 Bloch 型斯格明子、反斯格明子以及双半子等基础光学斯格明子进行建模,还可以应用于构建高阶斯格明子和嵌套型斯格明子^[41]。

由式(6)叠加一对正交模式的高斯光束,可以得到实验上具体的光束表达式

$$\psi = \psi_0 R + \exp(i\phi)\psi_l L, \quad (10)$$

式中: ψ_0 为高斯光束基模; ψ_l 为拓扑荷数为 l 的涡旋高斯光束模式; R 和 L 分别表示右旋圆偏振态和左旋圆偏振态。通过对叠加光束进行调控,可以产生不同拓扑结构和斯格明子数的斯托克斯矢量光学斯格明子。相位差 ϕ 决定了斯格明子的螺旋度 γ , 拓扑荷数 l 决定了斯格明子的涡度 m , 正交偏振态 R 和 L 决定了极性 p , 它们共同决定了斯格明子的拓扑结构。如果在特定的高斯光束模式中加入径向量子数调控,如图 8 所示,能够产生纵向矢量从中心到边缘角度 $k\pi$ 扭转的嵌套型斯格明子^[35]。

除此之外, Król 研究团队利用液晶分子的各向异性折射率结构,在充满液晶分子的微腔中生成了斯托克斯矢量光学斯格明子^[28]。如图 9(a)所示,该微腔通过其各向异性的折射率结构产生了可调节的矢量结构光场,并进一步通过微腔与矢量结构光场的相互耦合产生斯托克斯矢量光学斯格明子。2023 年, Lin 研究团队将特定的角光栅放置在微环腔上,如图 9(b)所示,产生了斯托克斯矢量光学斯格明子,其中斯格明子数可以通过控制角光栅数进行调节^[70]。

产生斯托克斯矢量光学斯格明子本质上是产生特定的光场偏振态空间分布,一束结构光的 Stokes 矢量可以通过一个偏振转换器进行调控^[72],并改变斯托克斯矢量光学斯格明子的拓扑结构。如图 9(c)所示, Zhan 研究团队利用穆勒矩阵偏振转换器件,实现了 Néel 型与 Bloch 型斯托克斯矢量光学斯格明子的相互转化^[71]。

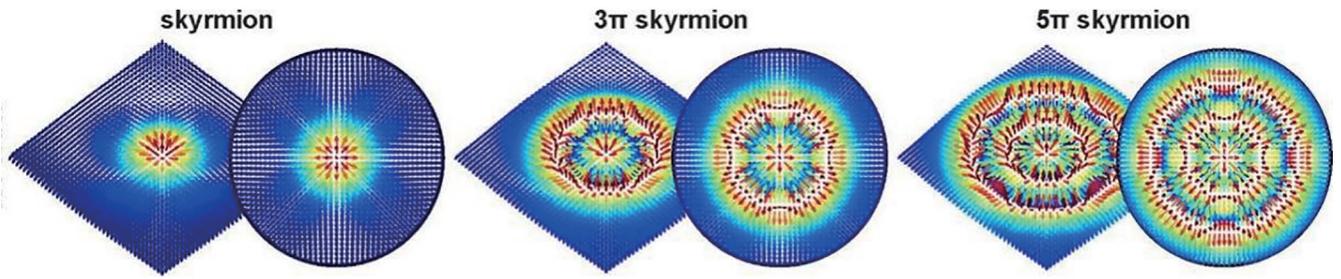


图 8 与 Néel 型斯格明子(左)对应的纵向矢量角度 $k\pi$ 径向扭转的嵌套型斯格明子,包括 3π 径向扭转(中)与 5π 径向扭转(右)的嵌套型斯格明子^[35]

Fig. 8 Skyrmionium with longitudinal vector angles $k\pi$ corresponding to the Néel-type skyrmion (left), including skyrmionium with 3π radial twist (middle) and 5π radial twist (right)^[35]

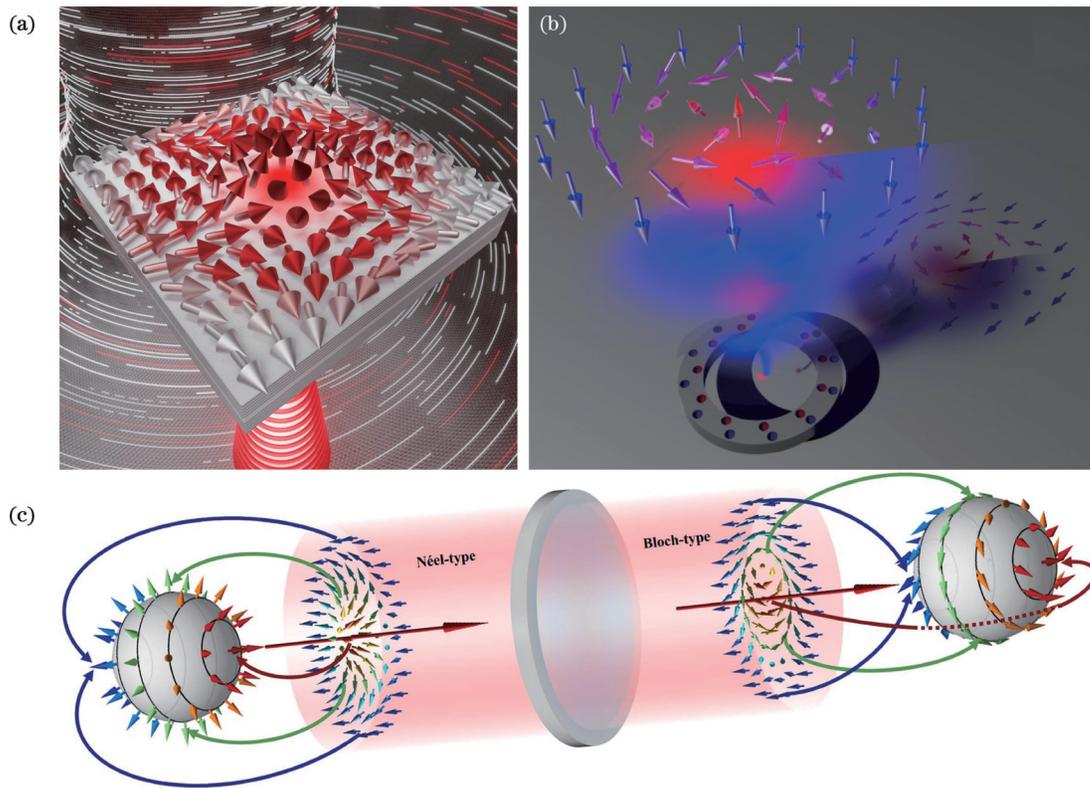


图 9 斯托克斯矢量光学斯格明子产生与调控方法。(a)利用液晶的各向异性产生斯托克斯矢量光学斯格明子^[28]; (b)利用环微腔产生斯格明子数可调的斯托克斯矢量光学斯格明子^[70]; (c)利用偏振转换器件实现 Néel 型与 Bloch 型斯托克斯矢量光学斯格明子的相互转化^[71]

Fig. 9 Methods for generation and manipulation of Stokes vector optical skyrmions. (a) Generating Stokes vector optical skyrmions using the anisotropy of liquid crystals^[28]; (b) generating Stokes vector optical skyrmions with adjustable skyrmion number using ring microcavities^[70]; (c) interconversion between Néel-type and Bloch-type Stokes vector optical skyrmions using polarization conversion devices^[71]

3.4 光学霍普夫子

近年来,除二维平面斯格明子外,具有多维空间分布的光学斯格明子结构也得到了广泛关注,其中最具有代表性的是光学霍普夫子。2021年,Sugic 研究团队通过对具有斯托克斯矢量斯格明子结构的傍轴光束进行聚焦,在透镜焦点附近产生了三维空间分布的光学霍普夫子^[32]。如图 10(b)所示,光学霍普夫子是由斯托克斯矢量光学斯格明子闭环扭曲形成的拓扑结构,其每根“光丝”均对应于特定的偏振椭圆轨迹,形成了

霍普夫子矢量光束。

2023年,Shen 研究团队利用具有特定偏振模式的傍轴拉盖尔-高斯光束叠加构造出拓扑形态可自由转换的斯托克斯矢量光学霍普夫子,其形态包括 Néel 型、Bloch 型、反斯格明子型结构以及众多中间拓扑态^[44]。对于每种拓扑形态,霍普夫子的拓扑荷还可以控制为任意整数,实现高阶霍普夫子。

除了矢量光学霍普夫子,Zhan 研究团队还利用时

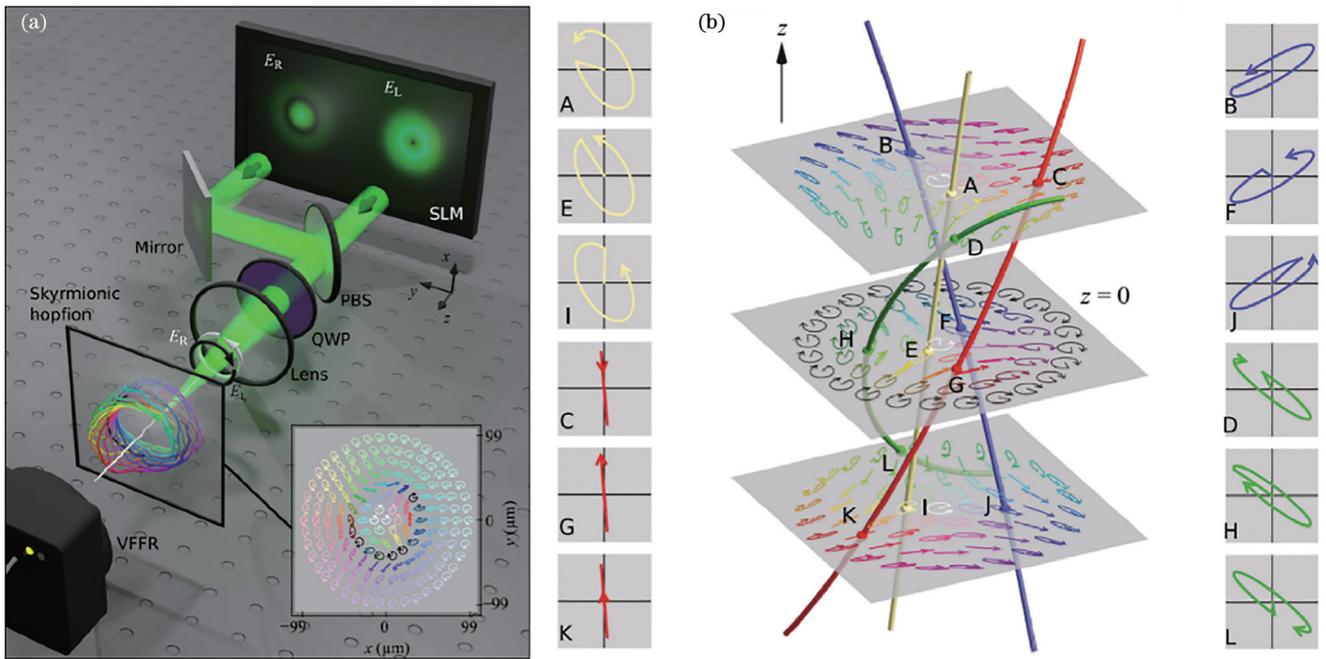


图 10 光学霍普夫子的产生和偏振态分布^[32]。(a)通过对具有斯托克斯矢量斯格明子结构的傍轴光束进行聚焦产生光学霍普夫子；(b)霍普夫子每根“光纤”均对应特定的偏振椭圆轨迹,形成霍普夫子矢量光束

Fig. 10 Generation and polarization distribution of optical hopfion^[32]. (a) Optical hopfions are generated by focusing a paraxial beam with a Stokes vector skyrmion structure; (b) each “strand” of the hopfion corresponds to a specific polarization elliptical trajectory, forming a hopfion vector beam

空光束整形技术构建了时空标量光学霍普夫子^[73]。霍普夫子的映射框架(Hopf框架)描绘了一个从四维空间(S^3)的单位球到三维空间(S^2)的单位球的映射。 S^2 中任意任意点的前像在 S^3 中都是不相交且相互连接的圆(S^1),通过立体投影,可以“看到”位于四维空间 S^3 ,并保留了闭环连接性的拓扑特征。在矢量霍普夫子中, S^2 中的每个点对应于一个具有多个自由度的向量,相反,标量霍普夫子 S^2 中的每个点都用标量参数值来区分,对应的前像是一个由具有相同标量值的所有点组成的闭环。如图 11 所示,标量光学霍普夫子由一系

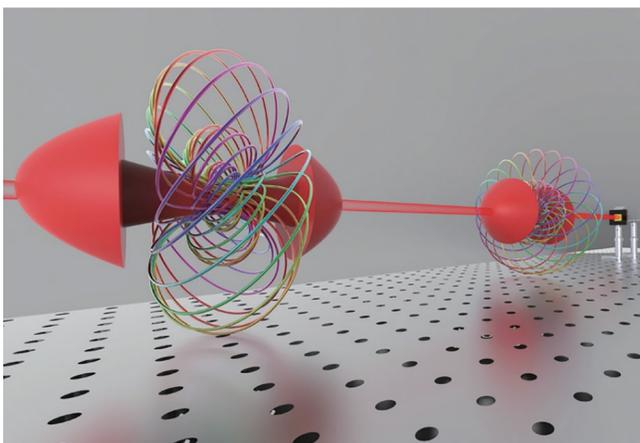


图 11 利用时空光束整形技术实现等相位线标量霍普夫子^[74]
Fig. 11 Realizing equiphase line scalar hopfion using spatiotemporal beam shaping techniques^[74]

列闭环等相位线交织嵌套而成,不同颜色的闭合环线代表不同的相位。这种具有时空脉冲结构的标量霍普夫子,有望实现时间维度编码和光学拓扑信息的传输^[74]。

3.5 其他矢量光学斯格明子

作为光场的另一重要特性,光场能流矢量在光散射和光力效应中起着至关重要的作用。针对能流矢量的拓扑特性,Li研究团队利用两对相向传播的柱矢量涡旋光束在 4π 聚焦系统中构造出了坡印廷矢量光学斯格明子^[75]。如图 12(a)所示,由坡印廷矢量形成的斯格明子结构可以在亚波长空间范围内沿着光传播的方向实现 Néel-Bloch-Néel 型的斯格明子拓扑结构转换。

除此之外,如图 12(b)所示,Karnieli研究团队利用三维非线性光子晶体中的三波混频效应实现了有效磁化强度矢量构造的斯格明子,即赝自旋(Pseudospin)斯格明子^[76-77]。进一步,利用高阶赝自旋矢量斯格明子与光场的相互作用,可实现斯格明子拓扑霍尔效应(Topological Hall effect),拓扑霍尔效应是指在特殊材料中,电子的运动会导致电导率表现出非常鲜明的分段特性,这种现象可以解释为电子在材料内部形成一种特殊的几何结构,类似于在环面上运动的电子,从而表现出拓扑性质,为新型光子霍尔器件的应用提供了有力的工具^[36]。

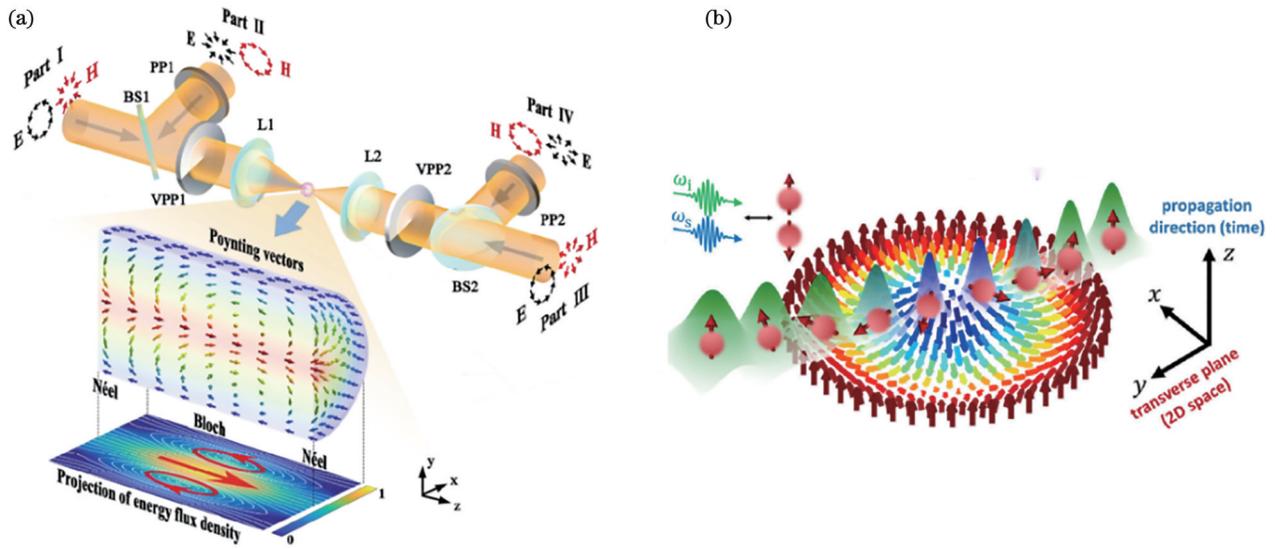


图 12 其他矢量光学斯格明子。(a)利用两对相向传播的柱矢量涡旋光束产生坡印廷矢量光学斯格明子^[75]；(b)非线性光子晶体中的赝自旋矢量光学斯格明子^[36]

Fig. 12 Other optical vector skyrmions. (a) Generating Poynting vector optical skyrmions using two pairs of counter-propagating cylindrical vector vortex beams^[75]; (b) pseudospin vector optical skyrmions in nonlinear photonic crystals^[36]

4 光学斯格明子的潜在应用

传统磁斯格明子可应用于逻辑设备^[78]、晶体管^[79]、磁隧道结^[80-82]、纳米振荡器^[83]、微波器件^[84]或磁振子 (Magnonic) 器件^[85]、神经网络及类脑计算^[86-87]、储备池计算^[88-89]、概率计算^[90-91]和量子计算^[92-93]等领域。这些应用取决于斯格明子超微、超快、拓扑多样性以及拓扑稳定性^[94-97]等优异特性。

基于斯格明子的超微特性,自旋矢量光学斯格明子首先被应用于精密测量。如图 13(a)所示, Yuan 研究团队将一对相距亚波长空间尺度、拓扑荷

相反的倏逝光涡旋所产生的自旋矢量光学斯格明子进行叠加,并对叠加后的坡印廷矢量和自旋结构进行分析,发现自旋角动量在两斯格明子中心连线的方向上呈线性变化^[25]。利用此特性,通过调节两斯格明子的空间距离,自旋角动量线性变化范围的长度可达 0.4 个波长,且在此范围内电场强度可达到最大值。进一步,如图 13(b)所示,将其应用于位移与位置传感系统,至少在 100 nm 的空间尺度内,基于自旋的位移传感灵敏度可以达到 pm 量级。此工作正式开启了光学斯格明子走向实际应用的道路。

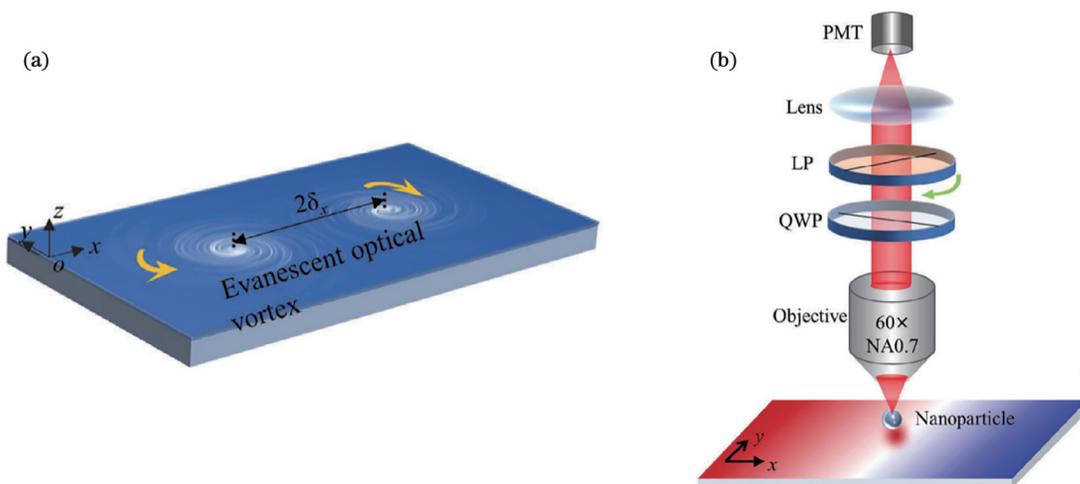


图 13 将自旋矢量光学斯格明子应用于位移测量^[25]。(a)在金属膜上叠加一对拓扑荷相反的倏逝光涡旋所产生的自旋矢量光学斯格明子对；(b)利用旋转线性偏振系统感知聚苯乙烯纳米颗粒在斯格明子对间的运动

Fig. 13 Applying spin vector optical skyrmions to displacement measurement^[25]. (a) Generating a spin vector optical skyrmion pair, with opposite topological charges, by overlaying counter-propagating optical vortices on a metal film; (b) sensing the motion of polystyrene nanoparticles between the skyrmion pair using a rotating linear polarization system

斯格明子的拓扑多样性在信息编码和处理方面拥有巨大的应用潜力。2023年,Shen研究团队依托斯托克斯矢量光学斯格明子,提出了一种基于光学拓扑准粒子的高容量光通信安全加密方案^[98-99]。如图 14 所示,该方案基于梯度折射率(GRIN)透镜,借助光学拓扑准粒子的拓扑不变量进行信息编码,能够抵御环境扰动的高安全性光学加密^[100]。

斯格明子的超微和超快特性对于超越衍射极限的

超分辨成像和微纳测量至关重要;拓扑结构的多样性使得光学斯格明子在光通信、信息加密、量子计算等方面拥有巨大的应用潜力;拓扑稳定性使得光学斯格明子在经过无序的随机散射介质后仍保持其拓扑特征^[65],为实现复杂系统高质量光通信和成像提供了可行性。发掘光学斯格明子的实际应用仍处于起步阶段,诸多基本问题亟待解决。随着拓扑光学研究的进步,新的应用将会不断涌现。

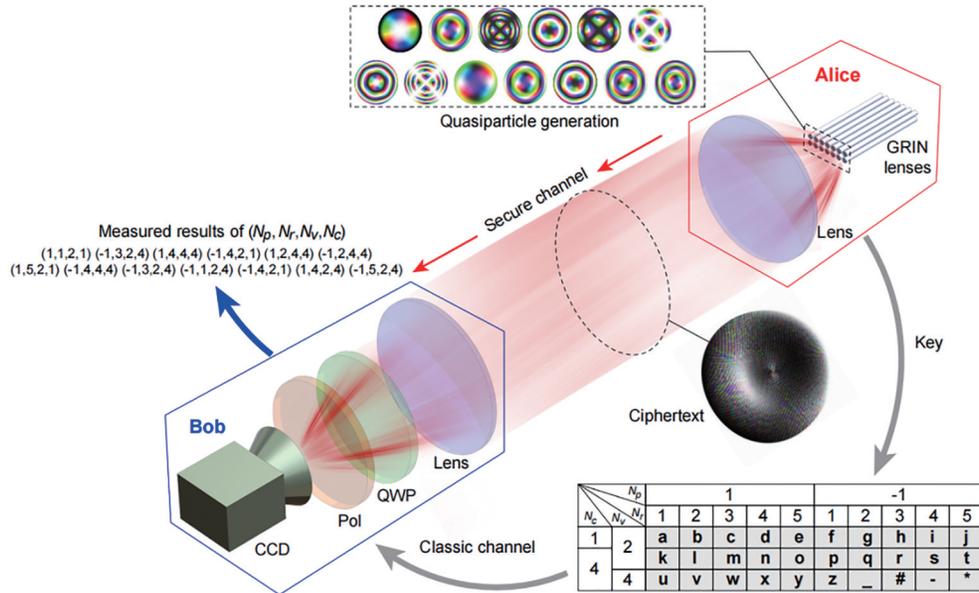


图 14 基于光学拓扑准粒子的高安全性信息加密^[100]

Fig. 14 High-security information encryption based on optical topological quasiparticles^[100]

5 结束语

光学斯格明子可以用各种三维矢量场构造,比如电磁场矢量、自旋角动量分量、坡印廷矢量、偏振斯托克斯矢量和赝自旋矢量等。关于倏逝场中光学斯格明子,在六重对称谐振腔中叠加表面等离子激元驻波构造了动态的电磁场矢量光学斯格明子,并利用自旋矢量构造了静态的光学斯格明子,但是倏逝场中只存在 Néel 型斯格明子,对称谐振腔的驻波组合使其不能合成拥有沿角向变化的平面分量的 Bloch 型电磁场矢量光学斯格明子,并且倏逝场中的光学斯格明子难以稳定地长距离传输以及应用于自由空间中。对于倏逝场中的自旋矢量光学斯格明子,由于其具有出色的超微特性,被应用于精密测量研究,但其与倏逝场中电磁场矢量光学斯格明子类似,难以形成拓扑结构自由调控的光学斯格明子并应用于自由空间。另外,也通过紧聚焦场来合成三维矢量分布的光学斯格明子,包括自旋矢量、电磁场矢量以及坡印廷矢量。在 4π 聚焦系统中通过叠加特殊的偏振和相位关系实现了坡印廷矢量以及电磁场矢量光学斯格明子拓扑结构的自由调控,但是 4π 紧聚焦的系统难度较大并且应用场景比较局限,形成的三维矢量场难以传输。另外可以利用全息

图紧聚焦形成电场矢量的光学斯格明子,全息图是基于矢量衍射理论进行的逆向设计,虽然能够构建不同拓扑结构的斯格明子,但是由于构建的斯格明子和设计的像素密度有关,并非是过渡平滑的物理场,因此产生的斯格明子为准斯格明子。斯托克斯矢量是基于光束的偏振结构构造的准物理矢量,只需要面内的电磁场分量即可构建三维矢量的光学斯格明子,其可以在自由空间中自由传输,且自由调控拓扑结构,可应用于光通信以及光信息编码加密。

光学斯格明子为新型结构光场的产生和应用开辟了新的方向。总结了不同矢量光学斯格明子的产生和调控方法,具体包括电磁场矢量、自旋矢量、斯托克斯矢量、坡印廷矢量以及赝自旋矢量光学斯格明子,并分别讨论了在自由空间和非自由空间内产生各类光学斯格明子的具体方法。光学斯格明子作为斯格明子在光学领域上的延伸,其保留了相应的拓扑特性,并且增加了在自由空间内产生和自由调控拓扑结构的可能。目前对于光学斯格明子的研究仍处于初步阶段,光学斯格明子的各类优异特性及其实际应用还有待进一步发掘,光学斯格明子与物质间的相互作用还需要更加深入地探索。

参 考 文 献

- [1] Skyrme T H R. A non-linear field theory[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1961, 260(1300): 127-138.
- [2] Skyrme T H R. A unified field theory of mesons and baryons[J]. Nuclear Physics, 1962, 31: 556-569.
- [3] Naya C, Sutcliffe P. Skyrmions and clustering in light nuclei[J]. Physical Review Letters, 2018, 121(23): 232002.
- [4] Halcrow C, Harland D. Attractive spin-orbit potential from the Skyrme model[J]. Physical Review Letters, 2020, 125(4): 042501.
- [5] Nagaosa N, Tokura Y. Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions[J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(12): 899-911.
- [6] Wiesendanger R. Nanoscale magnetic skyrmions in metallic films and multilayers: a new twist for spintronics[J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(7): 16044.
- [7] Fert A, Reyren N, Cros V. Magnetic skyrmions: advances in physics and potential applications[J]. Nature Reviews Materials, 2017, 2(7): 17031.
- [8] Bogdanov A N, Panagopoulos C. Physical foundations and basic properties of magnetic skyrmions[J]. Nature Reviews Physics, 2020, 2: 492-498.
- [9] Tokura Y, Kanazawa N. Magnetic skyrmion materials[J]. Chemical Reviews, 2021, 121(5): 2857-2897.
- [10] Zhang X C, Zhou Y, Song K M, et al. Skyrmion-electronics: writing, deleting, reading and processing magnetic skyrmions toward spintronic applications[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2020, 32(14): 143001.
- [11] Han L, Addiego C, Prokhorenko S, et al. High-density switchable skyrmion-like polar nanodomains integrated on silicon [J]. Nature, 2022, 603(7899): 63-67.
- [12] Lima Fernandes I, Blügel S, Lounis S. Spin-orbit enabled all-electrical readout of chiral spin-textures[J]. Nature Communications, 2022, 13: 1576.
- [13] Smalyukh I I, Lansac Y, Clark N A, et al. Three-dimensional structure and multistable optical switching of triple-twisted particle-like excitations in anisotropic fluids[J]. Nature Materials, 2010, 9(2): 139-145.
- [14] Foster D, Kind C, Ackerman P J, et al. Two-dimensional skyrmion bags in liquid crystals and ferromagnets[J]. Nature Physics, 2019, 15: 655-659.
- [15] Duzgun A, Nisoli C. Skyrmion spin ice in liquid crystals[J]. Physical Review Letters, 2021, 126(4): 047801.
- [16] Pišljarić J, Ghosh S, Turlapati S, et al. Blue phase III: topological fluid of skyrmions[J]. Physical Review X, 2022, 12(1): 011003.
- [17] Nahas Y, Prokhorenko S, Louis L, et al. Discovery of stable skyrmionic state in ferroelectric nanocomposites[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8542.
- [18] Das S, Tang Y L, Hong Z, et al. Observation of room-temperature polar skyrmions[J]. Nature, 2019, 568(7752): 368-372.
- [19] Das S, Hong Z, Stoica V A, et al. Local negative permittivity and topological phase transition in polar skyrmions[J]. Nature Materials, 2021, 20(2): 194-201.
- [20] Donati S, Dominici L, Dagvadorj G, et al. Twist of generalized skyrmions and spin vortices in a polariton superfluid[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 2016, 113(52): 14926-14931.
- [21] Ge H, Xu X Y, Liu L, et al. Observation of acoustic skyrmions [J]. Physical Review Letters, 2021, 127(14): 144502.
- [22] Khalaf E, Chatterjee S, Bultinck N, et al. Charged skyrmions and topological origin of superconductivity in magic-angle graphene[J]. Science Advances, 2021, 7(19): eabf5299.
- [23] Tsesses S, Ostrovsky E, Cohen K, et al. Optical skyrmion lattice in evanescent electromagnetic fields[J]. Science, 2018, 361(6406): 993-996.
- [24] Du L P, Yang A P, Zayats A V, et al. Deep-subwavelength features of photonic skyrmions in a confined electromagnetic field with orbital angular momentum[J]. Nature Physics, 2019, 15: 650-654.
- [25] Yang A P, Lei X R, Shi P, et al. Spin-manipulated photonic skyrmion-pair for pico-metric displacement sensing[J]. Advanced Science, 2023, 10(12): e2205249.
- [26] Dai Y N, Zhou Z K, Ghosh A, et al. Plasmonic topological quasiparticle on the nanometre and femtosecond scales[J]. Nature, 2020, 588(7839): 616-619.
- [27] Davis T J, Janoschka D, Dreher P, et al. Ultrafast vector imaging of plasmonic skyrmion dynamics with deep subwavelength resolution[J]. Science, 2020, 368(6489): eaba6415.
- [28] Król M, Sigurdsson H, Rechcińska K, et al. Observation of second-order meron polarization textures in optical microcavities [J]. Optica, 2021, 8(2): 255-261.
- [29] Lei X R, Yang A P, Shi P, et al. Photonic spin lattices: symmetry constraints for skyrmion and meron topologies[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(23): 237403.
- [30] Shen Y J. Topological bimeronic beams[J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3737-3740.
- [31] Shen Y J, Hou Y N, Papisimakis N, et al. Supertoroidal light pulses as electromagnetic skyrmions propagating in free space[J]. Nature Communications, 2021, 12: 5891.
- [32] Sugic D, Droop R, Otte E, et al. Particle-like topologies in light [J]. Nature Communications, 2021, 12: 6785.
- [33] Zhang Q, Xie Z W, Du L P, et al. Bloch-type photonic skyrmions in optical chiral multilayers[J]. Physical Review Research, 2021, 3(2): 023109.
- [34] Deng Z L, Shi T, Krasnok A, et al. Observation of localized magnetic plasmon skyrmions[J]. Nature Communications, 2022, 13: 8.
- [35] Shen Y J, Martínez E C, Rosales-Guzmán C. Generation of optical skyrmions with tunable topological textures[J]. ACS Photonics, 2022, 9(1): 296-303.
- [36] Karnieli A, Tsesses S, Bartal G, et al. Emulating spin transport with nonlinear optics, from high-order skyrmions to the topological Hall effect[J]. Nature Communications, 2021, 12: 1092.
- [37] Rivera N, Kaminer I. Light-matter interactions with photonic quasiparticles[J]. Nature Reviews Physics, 2020, 2: 538-561.
- [38] Manton N, Sutcliffe P. Topological solitons[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [39] Gao S J, Speirits F C, Castellucci F, et al. Paraxial skyrmionic beams[J]. Physical Review A, 2020, 102(5): 053513.
- [40] McWilliam A, Cisowski C, Ye Z J, et al. Topological approach of characterizing optical skyrmions and skyrmion lattices[EB/OL]. (2022-09-14)[2023-11-12]. <https://arxiv.org/abs/2209.06734>.
- [41] Cisowski C, Ross C, Franke-Arnold S. Building paraxial optical skyrmions using rational maps[J]. Advanced Photonics Research, 2023, 4(4): 2370007.
- [42] Göbel B, Mertig I, Tretiakov O A. Beyond skyrmions: review and perspectives of alternative magnetic quasiparticles[J]. Physics Reports, 2021, 895: 1-28.
- [43] Tretiakov O A, Tchernyshyov O. Vortices in thin ferromagnetic films and the skyrmion number[J]. Physical Review B, 2007, 75(1): 012408.
- [44] Shen Y J, Yu B S, Wu H J, et al. Topological transformation and free-space transport of photonic hopfions[J]. Advanced Photonics, 2023, 5(1): 015001.
- [45] Kézsmárki I, Bordács S, Milde P, et al. Néel-type skyrmion lattice with confined orientation in the polar magnetic

- semiconductor GaV_4S_8 [J]. *Nature Materials*, 2015, 14(11): 1116-1122.
- [46] Milde P, Köhler D, Seidel J, et al. Unwinding of a skyrmion lattice by magnetic monopoles[J]. *Science*, 2013, 340(6136): 1076-1080.
- [47] Nayak A K, Kumar V, Ma T P, et al. Magnetic antiskyrmions above room temperature in tetragonal Heusler materials[J]. *Nature*, 2017, 548(7669): 561-566.
- [48] Zhang S L, van der Laan G, Hesjedal T. Direct experimental determination of the topological winding number of skyrmions in Cu_2OSeO_3 [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14619.
- [49] Jani H, Lin J C, Chen J H, et al. Antiferromagnetic half-skyrmions and bimerons at room temperature[J]. *Nature*, 2021, 590(7844): 74-79.
- [50] Bera S, Mandal S S. Theory of the skyrmion, meron, antiskyrmion, and antimeron in chiral magnets[J]. *Physical Review Research*, 2019, 1(3): 033109.
- [51] Yu X Z, Tokunaga Y, Kaneko Y, et al. Biskyrmion states and their current-driven motion in a layered manganite[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3198.
- [52] Zhang X C, Xia J, Zhou Y, et al. Control and manipulation of a magnetic skyrmion in nanostructures[J]. *Physical Review B*, 2016, 94(9): 094420.
- [53] Song C K, Ma Y X, Jin C D, et al. Field-tuned spin excitation spectrum of $k\pi$ skyrmion[J]. *New Journal of Physics*, 2019, 21(8): 083006.
- [54] Wang X S, Qaiumzadeh A, Brataas A. Current-driven dynamics of magnetic hopfions[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(14): 147203.
- [55] Luk'yanchuk I, Tikhonov Y, Razumnaya A, et al. Hopfions emerge in ferroelectrics[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2433.
- [56] Raether H. Surface plasmons on gratings[M]//Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings. Springer tracts in modern physics. Heidelberg: Springer, 1988, 111: 91-116.
- [57] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [58] Lalanne P, Hugonin J P, Rodier J C. Theory of surface plasmon generation at nanoslit apertures[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(26): 263902.
- [59] Gjonaj B, David A, Blau Y, et al. Sub-100 nm focusing of short wavelength plasmons in homogeneous 2D space[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(10): 5598-5602.
- [60] Bai C Y, Chen J, Zhang Y X, et al. Dynamic tailoring of an optical skyrmion lattice in surface plasmon polaritons[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10320-10328.
- [61] Chen J Y, Ji B Y, Lang P, et al. Impact of the geometry of the excitation structure on optical skyrmion[J]. *Optics Express*, 2023, 31(23): 37929-37942.
- [62] Meiler T, Frank B, Giessen H. Dynamic tailoring of an optical skyrmion lattice in surface plasmon polaritons: comment[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 33614-33615.
- [63] Bai C Y, Chen J, Zhang D, et al. Dynamic tailoring of an optical skyrmion lattice in surface plasmon polaritons: reply[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 33616-33618.
- [64] Yang J, Zheng X Z, Wang J F, et al. Symmetry-protected spoof localized surface plasmonic skyrmion[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2200007.
- [65] Liu C X, Zhang S, Maier S A, et al. Disorder-induced topological state transition in the optical skyrmion family[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(26): 267401.
- [66] 孙家琳, 王思聪, 周志凯, 等. 基于 4π 聚焦系统的电磁矢量光学斯格明子的产生[J]. *光电工程*, 2022, 50(6): 230059.
- Sun J L, Wang S C, Zhou Z K, et al. Generation of optical skyrmions formed by electromagnetic field vectors under 4π focal configurations[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(6): 230059.
- [67] Ren H R, Shao W, Li Y, et al. Three-dimensional vectorial holography based on machine learning inverse design[J]. *Science Advances*, 2020, 6(16): eaaz4261.
- [68] Shi P, Du L P, Li M J, et al. Symmetry-protected photonic chiral spin textures by spin-orbit coupling[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(9): 2000554.
- [69] Lin M, Zhang W L, Liu C, et al. Photonic spin skyrmion with dynamic position control[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(9): 2567-2572.
- [70] Lin W B, Ota Y, Arakawa Y, et al. Microcavity-based generation of full Poincaré beams with arbitrary skyrmion numbers[J]. *Physical Review Research*, 2021, 3(2): 023055.
- [71] Teng H A, Zhong J Z, Chen J, et al. Physical conversion and superposition of optical skyrmion topologies[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(12): 2042-2053.
- [72] Ye C. Construction of an optical rotator using quarter-wave plates and an optical retarder[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(10): 3031-3035.
- [73] Wan C H, Shen Y J, Chong A, et al. Scalar optical hopfions[J]. *eLight*, 2022, 2(1): 22.
- [74] Li C H, Wang S C, Li X P. Spatiotemporal pulse weaving scalar optical hopfions[J]. *Light, Science & Applications*, 2023, 12(1): 54.
- [75] Wang S C, Sun J L, Zheng Z C, et al. Topological structures of energy flow: Poynting vector skyrmions[EB/OL]. (2023-06-08) [2023-11-12]. <https://arxiv.org/abs/2306.05191>.
- [76] Karnieli A, Arie A. Fully controllable adiabatic geometric phase in nonlinear optics[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4920-4932.
- [77] Karnieli A, Arie A. All-optical stern-gerlach effect[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(5): 053901.
- [78] Zhang X C, Ezawa M, Zhou Y. Magnetic skyrmion logic gates: conversion, duplication and merging of skyrmions[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9400.
- [79] Zhang X C, Zhou Y, Ezawa M, et al. Magnetic skyrmion transistor: skyrmion motion in a voltage-gated nanotrack[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11369.
- [80] Zhou Y, Ezawa M. A reversible conversion between a skyrmion and a domain-wall pair in a junction geometry[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4652.
- [81] Kasai S, Sugimoto S, Nakatani Y, et al. Voltage-controlled magnetic skyrmions in magnetic tunnel junctions[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(8): 083001.
- [82] Penthorn N E, Hao X, Wang Z, et al. Experimental observation of single skyrmion signatures in a magnetic tunnel junction[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(25): 257201.
- [83] Shen L C, Xia J, Zhao G P, et al. Spin torque nano-oscillators based on antiferromagnetic skyrmions[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(4): 042402.
- [84] Wang W W, Beg M, Zhang B, et al. Driving magnetic skyrmions with microwave fields[J]. *Physical Review B*, 2015, 92(2): 020403.
- [85] Zhang X C, Ezawa M, Xiao D, et al. All-magnetic control of skyrmions in nanowires by a spin wave[J]. *Nanotechnology*, 2015, 26(22): 225701.
- [86] Huang Y Q, Kang W, Zhang X C, et al. Magnetic skyrmion-based synaptic devices[J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(8): 08LT02.
- [87] Li S, Kang W, Huang Y Q, et al. Magnetic skyrmion-based artificial neuron device[J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(31): 31LT01.
- [88] Prychynenko D, Sitte M, Litzius K, et al. Magnetic skyrmion as a nonlinear resistive element: a potential building block for reservoir computing[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9(1): 014034.
- [89] Pinna D, Bourianoff G, Everschor-Sitte K. Reservoir computing with random skyrmion textures[J]. *Physical Review Applied*,

- 2020, 14(5): 054020.
- [90] Pinna D, Araujo F A, Kim J V, et al. Skyrmion gas manipulation for probabilistic computing[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9(6): 064018.
- [91] Zázvorka J, Jakobs F, Heinze D, et al. Thermal skyrmion diffusion used in a reshuffler device[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(7): 658-661.
- [92] Hals K M D, Schechter M, Rudner M S. Composite topological excitations in ferromagnet-superconductor heterostructures[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(1): 017001.
- [93] Yang G, Stano P, Klinovaja J, et al. Majorana bound states in magnetic skyrmions[J]. *Physical Review B*, 2016, 93(22): 224505.
- [94] Hagemeyer J, Romming N, von Bergmann K, et al. Stability of single skyrmionic bits[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8455.
- [95] Oike H, Kikkawa A, Kanazawa N, et al. Interplay between topological and thermodynamic stability in a metastable magnetic skyrmion lattice[J]. *Nature Physics*, 2016, 12: 62-66.
- [96] Cortés-Ortuño D, Wang W W, Beg M, et al. Thermal stability and topological protection of skyrmions in nanotracks[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4060.
- [97] Je S G, Han H S, Kim S K, et al. Direct demonstration of topological stability of magnetic skyrmions *via* topology manipulation[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 3251-3258.
- [98] He C, Chang J T, Hu Q, et al. Complex vectorial optics through gradient index lens cascades[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4264.
- [99] He C, Chang J T, Salter P S, et al. Revealing complex optical phenomena through vectorial metrics[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(2): 026001.
- [100] Shen Y J, He C, Song Z P, et al. Topologically controlled multiskyrmions in photonic gradient-index lenses[J]. *Physical Review Applied*, 2024, 21(2): 024025.

Generation and Manipulation of Optical Skyrmions (Invited)

Zhou Zhikai, Wang Sicong*, Li Xiangping**

Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 511443, Guangdong, China

Abstract

Significance The significance of optical skyrmions and the research around them cannot be overstated. Optical skyrmions which are topologically protected spin textures have attracted considerable attention due to their unique properties and potential applications in various fields. The skyrmion is a unified model of nucleons initially proposed by British particle physicist Tony Skyrme in 1962 and behaves like a nano-scale magnetic vortex with intricate textures. Meanwhile, it occupies significant positions in quantum field theory, solid-state physics, and magnetic materials. Skyrmions are widely regarded as efficient information carriers thanks to their unique topological stability, high speed, high density, and low energy consumption. However, generating optically controlled skyrmions remains a significant challenge. Breaking the limitation of topological control for skyrmions will unlock infinite possibilities for the next-generation information revolution, including applications in optical communication, information encryption, and topological phase transitions. This will present new opportunities for the expansion and practical application of advanced fundamental theories of photonics. Optical skyrmions exhibit nontrivial topological structures, robustness against external perturbations, and ultra-fast motion dynamics, serving as promising candidates for the development of novel information storage and processing technologies. Studying optical skyrmions is essential for several reasons. First, optical skyrmions provide a new paradigm for information storage with high-density and low-energy requirements. Their topological nature ensures stability against thermal fluctuations and material defects, which makes them highly reliable for long-term data retention. This property is particularly valuable in the era of big data and cloud computing, where efficient and durable information storage solutions are in high demand. Second, the unique properties of optical skyrmions make them ideal for spintronic applications. Spintronics, which utilizes the spin of electrons for information processing, has emerged as a promising field for the development of next-generation electronic devices. Optical skyrmions provide a means of manipulating and controlling spin currents, thus enabling the design of novel spin-based devices, such as spin transistors, logic gates, and memory elements, with enhanced functionality and reduced power consumption. Furthermore, the study of optical skyrmions can shed light on fundamental physics principles and contribute to our understanding of condensed matter physics. The complex interplay between spin, magnetism, and topology in optical skyrmions poses intriguing scientific challenges and opens up new avenues for exploring new phenomena. Additionally, investigating the formation, dynamics, and interactions of optical skyrmions can provide valuable insights into the fundamental laws governing quantum systems and promote the development of advanced theoretical frameworks. Meanwhile, optical skyrmions hold promise for applications in photonics and optoelectronics. The ability to control and manipulate light at the nanoscale is of significance in fields such as

telecommunications, data transmission, and sensing. Optical skyrmions provide a new approach to achieving efficient light modulation, waveguiding, and information encoding, thereby enabling the development of compact and high-speed photonic devices with improved performance. In summary, the study of optical skyrmions is of paramount significance due to their potential applications in information storage, spintronics, fundamental physics research, and photonics. By unraveling the unique properties and behavior of optical skyrmions, researchers can pave the way for innovative technologies that can revolutionize various domains. Continuous exploration of this field will undoubtedly lead to exciting discoveries and transformative advancements in science and technology. In recent years, there has been a continuous emergence of optical skyrmions with different topological structures and vector configurations, including transient field skyrmions, structured medium skyrmions, free-space skyrmions, spacetime skyrmions, and momentum space skyrmions. In particular, spin skyrmions in transient fields and Stokes skyrmions in free space provide valuable references for skyrmion applications. However, the practical applications of optical skyrmions still face a series of challenges. Therefore, it is important and necessary to summarize the existing research achievements and provide more rational guidance for the future development of this field's applications.

Progress We review the current research progress of optical skyrmions, and discuss in detail the topological structure classification of optical skyrmions, the generation and manipulation of optical skyrmions with different vector configurations, and the potential applications of optical skyrmions in micro-displacement measurement and optical communication encoding and encryption. As a result, references are provided for further development in this field. With the flourishing topological optics, the existence of optical skyrmions has been confirmed by the scientific community. In 2018, the research team led by Tsesses first realized Néel-type electric field vector optical skyrmions via surface plasmon interference excited by metal surface hexagonal grating structures [Fig. 4(a)]. Meanwhile, the research team led by Yuan realized Néel-type spin vector optical skyrmions via surface plasmon interference excited by tightly focused vector structured light fields on a metal surface [Fig. 6(a)]. Additionally, they further developed a sub-nanometer optical displacement sensing system by controlling the spin distribution of optical skyrmions on a skyrmion pair (Fig. 13), opening up the path for practical applications of optical skyrmions. In 2023, the research team led by Shen proposed a high-capacity optical communication and secure encryption scheme based on optical topological quasi-particles, with the reliance on Stokes vector optical skyrmions (Fig. 14). Currently, optical skyrmions with different topological structures and vector configurations continue to emerge, providing new ideas and methods for the study of spatio-temporal characteristics of topological structured light fields.

Conclusions and Prospects Optical skyrmions have become a major focus in the research on topological optics. Skyrmions can be formed and controlled within optical fields, and the development of high-dimensional structured light provides possibilities for constructing complex topological structures of high-dimensional skyrmions. In conclusion, if the topological limitations of skyrmions can be overcome to achieve freely controllable topological states, infinite possibilities will be posed to the next-generation information revolution. Applications such as optical communication, information encryption, spin-orbit interactions, and topological phase transitions will benefit from the expansion and practical applications of advanced photonics fundamentals.

Key words physical optics; skyrmions; topological optics; structured light field manipulation