

涡旋光束制备及其在惯性测量领域的研究进展 (特邀)

王琛^{1,2}, 任元^{1,2*}, 吴昊^{1,2}, 邱松^{1,2}

(1. 航天工程大学 宇航科学与技术系, 北京 101416;
2. 航天工程大学 量子探测与感知实验室, 北京 101416)

摘要: 涡旋光束是一种携带轨道角动量且具有螺旋波振面的新型结构光场。自 1992 年 Allen 等首次证明了近轴条件下带有螺旋相位因子的光场具有轨道角动量以来, 涡旋光束因其在光操控、光通信、光学测量和遥感等领域中的广泛应用而备受关注, 特别是近年来涡旋光束在惯性测量领域的应用吸引了诸多学者的研究兴趣。文中主要涉及三个方面的内容: 涡旋光束制备方法研究进展; 涡旋光束在惯性测量领域中的关键应用, 具体为基于涡旋光的旋转多普勒效应和量子陀螺; 最后还就惯性测量对涡旋光束制备提出的新要求进行了讨论。

关键词: 涡旋光束; 惯性测量; 旋转多普勒效应; 玻色-爱因斯坦凝聚; 量子陀螺
中图分类号: O435; O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200463

Generation of optical vortex and its research progress in inertial measurement (*Invited*)

Wang Chen^{1,2}, Ren Yuan^{1,2*}, Wu Hao^{1,2}, Qiu Song^{1,2}

(1. Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China;
2. Lab of Quantum Detection & Awareness, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Optical vortex is a new structured light field that carries orbital angular momentum and has a helical wave vibration surface. Since Allen et al. first proved in 1992 that a light field with a spiral phase factor had orbital angular momentum under paraxial conditions, optical vortex has received much attention because of its wide applications in the fields of optical manipulation, optical communication, optical measurement, and remote sensing. Especially in recent years, the application of optical vortex in the field of inertial measurement has attracted the research interest of many scholars. This article mainly involves three aspects: the research progress of optical vortex generation; the key applications of optical vortex in the field of inertial measurement, specifically the rotating Doppler effect and quantum gyros based on optical vortex. New requirements of inertial measurement on the generation of optical vortex were also discussed.

Key words: optical vortex; inertial measurement; rotation Doppler effect; Bose-Einstein condensation; quantum gyroscope

收稿日期: 2020-11-10; 修订日期: 2021-02-03

基金项目: 国家自然科学基金 (11772001, 61805283); 173 计划重点项目 (2019-JCJQ-ZD-XXX); 国防科技卓越青年科学基金 (2020-JCJQ-ZQ-XXX)

作者简介: 王琛, 男, 博士生, 主要研究方向为涡旋光场调控。

导师(通讯作者)简介: 任元, 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为航天器制导与控制、空间量子探测及其应用技术。

0 引言

涡旋是自然界中普遍存在的力学现象,如飓风、涡旋星系等都可以解释为涡旋现象,如图 1 所示。在光学领域,涡旋场分布被定义为涡旋光束。

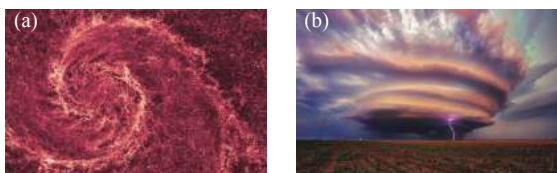


图 1 自然界中的涡旋现象。(a) 涡旋星系; (b) 飓风

Fig.1 Vortex phenomenon in nature. (a) Spiral galaxy; (b) Hurricane

涡旋光束是一种具有螺旋波前的特殊结构光场。其中空暗核,即中心光场强度为零的区域被定义为奇点(Singularity)。涡旋光束按照奇点类型分为两大类:一类是由相位奇点产生的涡旋光束,这种奇点的产生可类比晶体中出现的螺旋位错现象,如图 2 所示;另一类是由中心偏振不确定性产生的矢量涡旋光束。

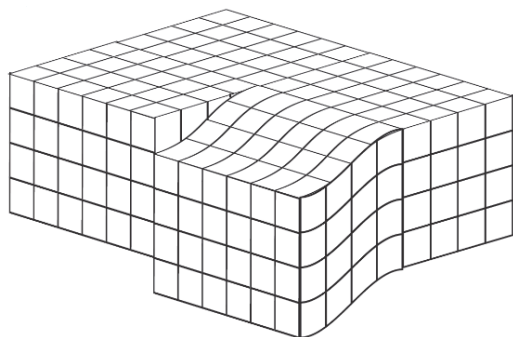


图 2 晶体中的位错现象^[1]

Fig.2 Dislocations in crystals^[1]

涡旋光束的相关研究始于 20 世纪初,许多科学家间接观察到了涡旋光束,但并未能对该光场的全部特性做出阐释。整个 20 世纪上半叶,关于涡旋光束的研究以能流相关的理论铺垫为主:最初,艾里通过坡印廷矢量表征能流密度,为后续科研工作者研究涡旋光束开辟了一条新的途径^[2];之后, V. S. Ignatovskii 将能流理论进一步深入,直到 H. Wolter 和 W. Braunbek 分别在全内反射的介质中以及完美导电半平面上观察到了涡旋能流^[3-4]。20 世纪 80 年代末, P. Couillet 等首次提出并使用“光学涡旋”(Optical vortex)这一名词。他们对涡旋光束在腔内的非线性进行研究时发现,当菲涅耳数较大时,激光腔内亦会出现和超流体涡旋类似的光学涡旋^[5]。直到 1992 年, L. Allen 发现

了涡旋光束的一个重要性质:近轴条件下带有相位因子 $\exp(im\theta)$ 的涡旋光束具有轨道角动量 (Orbit Angular Momentum, OAM) $m\hbar$, 其中 m 为拓扑荷数, \hbar 为普朗克常量, θ 为螺旋相位方位角^[6]。1994 年, L. Allen 和 S. M. Barnett 将上述工作进一步扩展,证明了非近轴条件下该光场携带的轨道角动量仍为 $m\hbar$ ^[7]。这两个结论不仅引起了科学家对涡旋光束的重视,而且明确了涡旋光束量子数和其携带的轨道角动量之间的联系,为下一步涡旋光束的广泛应用打下了坚实基础。

近年来,涡旋光束因其在光操控^[8-9]、光通信^[10]、光学测量^[11]和遥感^[12-13]等领域^[14-15]中的广泛应用而备受关注。文中将对涡旋光束制备及其在惯性测量领域的研究进展进行回顾和探讨。首先,文中介绍了涡旋光束常用制备方法及其研究进展;其次,介绍了涡旋光束在惯性测量领域的研究情况,具体为基于涡旋光的旋转多普勒效应和量子陀螺,并就惯性测量对涡旋光束制备提出的新要求进行了总结和讨论。

1 涡旋光束的制备

涡旋光束的制备是开展一系列应用研究的基础。目前,涡旋光束制备的手段主要包括模式转换、螺旋相位板、空间光调制器、超材料和 Q 板等。

使用模式转换法制备涡旋光束分为腔内和腔外产生两种手段。圆柱对称光学谐振腔中的拉盖尔-高斯模式是一种典型的涡旋光束,但是由于谐振腔中使用的 Brewster 窗以及其他光学元件会破坏腔内系统对称性,光束被迫以厄米特-高斯模谐振,故在谐振腔中很难制备高模式纯度的拉盖尔-高斯模式^[6]。若考虑腔外模式转化,利用一对柱透镜在入射的厄米特-高斯光束中引入 $\pi/2$ 相位差,可以实现拉盖尔高斯模式的制备。1993 年,荷兰科学家 M. W. Beijerbergen 等首次提出了这种方法^[16]。虽然该方案原理明晰,实验装置简单,但对光路中柱透镜对的间距与同轴精度要求较高,近十年已无明显进展。

2018 年, Y. F. Chen 等把目光转向了单柱透镜,利用其对入射光场的像散实现模式转换。与之相对的交叉相位是一种特殊的结构相位,如图 3 (a) 所示。2019 年,商丘师范学院 G. Liang 等从理论上证明了利用交叉相位同样可以实现涡旋光束的制备^[17]。实际上,交叉相位也是一种基于像散的模式转换方法,可将其看作无光学元件参与就可实现涡旋光束制备的

一种特殊的模式转换方法。2020 年, 航天工程大学任元课题组利用交叉相位实现了高阶涡旋光束的制备, 如图 3 (b) 所示, 图 3 (e) 为实验装置示意图^[18]。同年, 该课题组提出了一种高阶交叉相位, 不仅可以实现涡旋光束制备, 还可以同时实现制备的涡旋光束能流分布和奇点位置的调控, 可精确操控粒子的运动轨迹和位置, 如图 3 (c) 所示^[19]。此外, 该课题组还揭示了柱透镜和交叉相位的关系, 实现了从柱透镜中对透镜相位的有效解耦, 并利用交叉相位制备了一种新型类厄米特高斯-涡旋光束: 虽然具有类似于厄米特高斯的强度分布, 但仍保留了其奇点分布任意可控的特点, 为光学操控提供了新的途径, 如图 3 (d) 所示^[20]。该涡旋光束由于在焦平面 (或远场) 中无相位畸变, 且在远场具有较长的焦深, 对于二维、三维量子操控的实现具有现实价值。交叉相位是模式转换法中像散的一种拓展, 极大地丰富了模式转换法功能。此外, 无光学元件的参与还有效地避免了模式转换法对实验精度要求高的缺点, 对涡旋光制备及其在量子操控方面的应用具有重要意义。

螺旋相位板 (Spiral Phase Plate, SPP) 是一种透明的光学元件, 通过其台阶状结构对入射光引入相位差而制备得到涡旋光束。近年来, 随着加工工艺的进步, 生产连续台阶面螺旋相位板的技术也日趋成熟。围绕螺旋相位板的研究更多是利用光场可正反通过

的特性来扩展其应用场景。2017 年, 辛璟焘等结合 SPP 与萨格纳克干涉仪生成了矢量光束, 效率高、稳定性好^[21]。2018 年, 航天工程大学任元课题组提出了一种基于螺旋相位板的级联-多通方案, 实现了利用低阶螺旋相位板制备高阶涡旋光束, 扩展了螺旋相位板的适用性和灵活性^[22], 其实验装置如图 4 (a) 所示。同年, 该课题组在此基础上又提出了一种涡旋光束拓扑荷数四重加倍的解决方案^[23], 实验装置如图 4 (b) 所示, 实验结果如图 4 (c) 所示。此外, Fiber Photonics 公司制作了一种光学旋涡相位板可直接加工于光纤端部, 这使得它不需要光学校准或体积庞大的自由空间光学设备, 只需要将激光耦合入光纤, 出射光即为涡旋光束, 如图 4 (d) 所示。这种方案与空间光相位调制器、螺旋相位板相比价格更为低廉。通过将螺旋相位板与光纤相结合可以控制光纤产生的涡旋光束散度, 以此来适应涡旋光束不同的使用场景。螺旋相位板可以为入射光附加螺旋相位因子, 然而一旦制成就无法改变拓扑荷数; 且螺旋相位板无法对入射光在径向进行振幅调制, 使得出射光为超几何模式, 无法保证模式纯度。因此螺旋相位板目前多出现在诸如光镊等具体应用场景。若想实现自由地、高模式纯的制备涡旋光束还需要采用空间光调制器等方法。

空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 有反射式和透射式两种, 都是通过液晶分子的不同排列

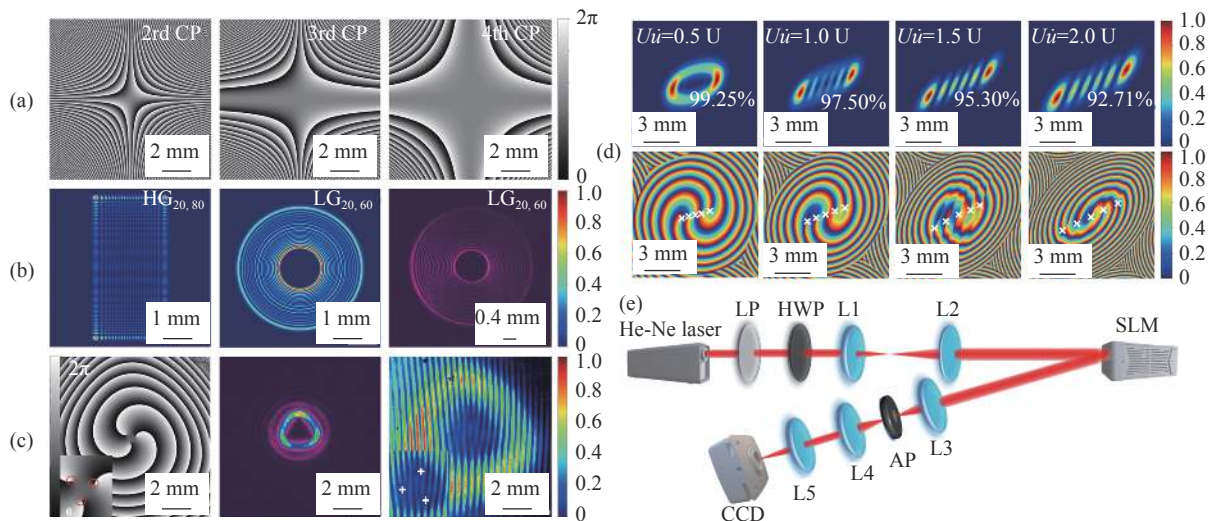


图 3 利用交叉相位实现涡旋光束制备^[18-20]。(a) 交叉相位分布; (b) 利用低阶交叉相位实现了高阶涡旋光束的制备; (c) 利用高阶交叉相位实现高阶涡旋光束的整形与奇点操控; (d) 利用低阶交叉相位制备类厄米特高斯光束; (e) 利用交叉相位实现涡旋光束制备的实验装置

Fig.3 Generation of optical vortex via the cross-phase^[18-20]. (a) Distribution of cross-phase; (b) Generation of high-order optical vortex via the low-order cross-phase; (c) Shaping and singularity manipulation of high-order optical vortex via the high-order cross-phase; (d) Generation of Hermite-Gaussian-like optical vortex via the low-order cross-phase; (e) Experimental setup for generation of optical vortex via the cross-phase

方式实现对入射光场的相位、振幅甚至是偏振进行调控。早在 1999 年, M. Reicherter 等就利用液晶显示器制备了涡旋光束, 并用它们来捕捉和操纵聚苯乙烯粒子^[24]。2002 年, D. Ganic 等通过不同方法搭建了一种由 16 个圆片状组成的 LCD, 进一步提高了初代空间光调制器的转化效率^[25]。随着空间光调制器生产水平的提高, 近年来空间光调制器的研究主要聚焦在全

息图绘制方法, 以提高涡旋光束的制备能力。2011 年, P. Fulda 等通过一个线性光谐振器将涡旋光束 LG₃³纯度由 51% 提升至 99%。2015 年, 厦门大学陈理想团队使用空间光调制器制备了多重叠加态涡旋光束, 三重叠加态轨道角动量 $l=150, 240, 360$, 四重叠加态轨道角动量 $l=30, 60, 90, 120$, 如图 5 (a) 所示^[26]。利用相位全息图可以实现光场的复振幅调制^[27-28], 但十年

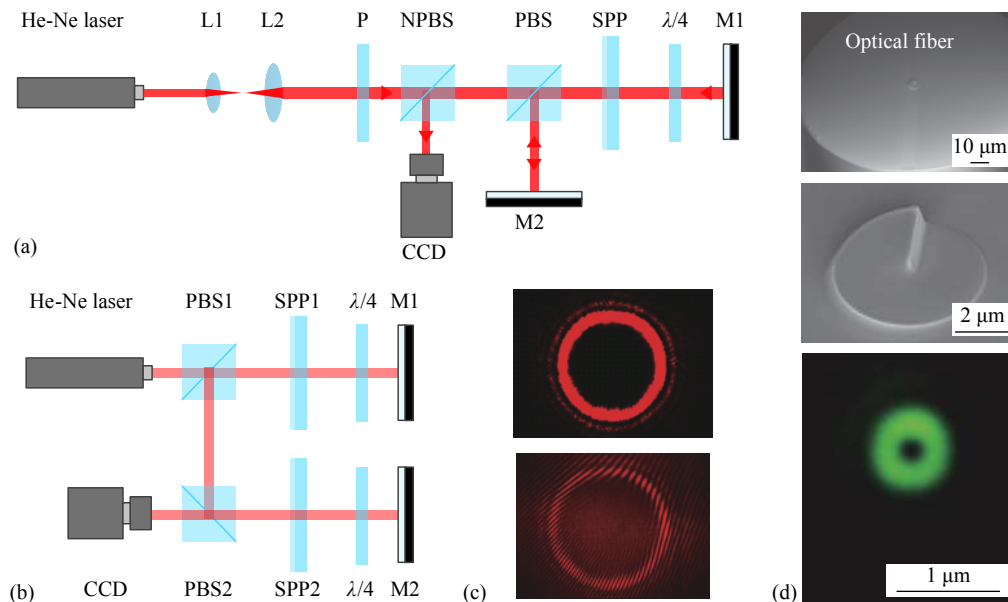


图 4 (a) 基于螺旋相位板的涡旋光束拓扑荷数四重加倍装置^[23]; (b) 基于螺旋相位板级联-多通的涡旋光束制备装置^[22]; (c) 利用螺旋相位板级联-多通制备的涡旋光束^[22]; (d) Fiber Photonics 公司制作的光纤螺旋相位板

Fig.4 (a) Setup of quadruple topological charges of optical vortex based on SPPs^[23]; (b) Setup of cascaded and double-pass SPPs^[22]; (c) Experimental intensity distributions of optical vortex via the setup of cascaded and double-pass SPPs^[22]; (d) Fiber SPP made by Fiber Photonics Co

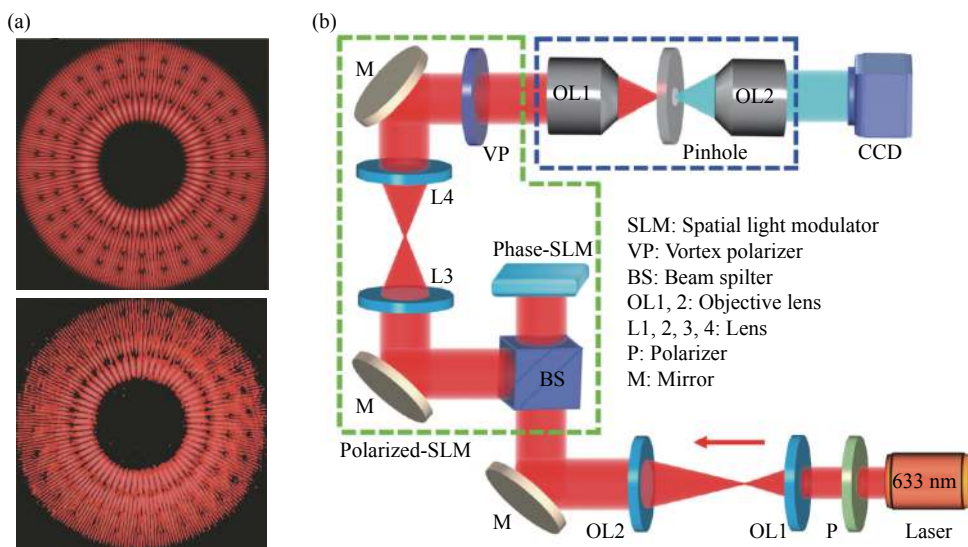


图 5 (a) 多重叠加态涡旋光束^[26]; (b) 使用纯相位 SLM 实现像素级的偏振态调控^[29]

Fig.5 (a) Superposition of multiple optical vortices^[26]; (b) Pixel-level polarization modulation via the pure phase SLM^[29]

来对于相位和振幅之外的更多参数调控一直没有明显进展。直到 2020 年, X. Weng 等使用纯相位空间光调制器实现了像素级的偏振态调控^[29], 为使用空间光调制器进行多维度光场调控以实现涡旋光束的精确制备拓宽了道路, 如图 5 (b) 所示。

此外, 还可以使用超材料^[30]、Q 板等方法制备涡旋光束^[31]。除了这些常用方法, 航天工程大学任元课题组还于 2018 年开展了基于 Sagnac 干涉仪的涡旋光束制备方法研究^[32]。近日, 宾夕法尼亚大学冯亮教授课题组主导完成了可调控涡旋激光器和涡旋光束探

测器, 首次在光子芯片上实现了可调控涡旋激光的制备, 如图 6 所示。在光源方面, 不同于固定荷值的涡旋激光器, 该课题组通过设计和控制非厄米对称性的方式动态调控结构材料的损耗和增益来达成对涡旋光束荷值的控制。具体来说, 通过设计微腔和波导间的可控非厄米耦合使得微腔中两个自旋-轨道锁定的涡旋态能进行单向耦合, 从而选取激发一个特定的涡旋态。基于总角动量守恒的原理, 将自旋角动量转换为轨道角动量从而进一步增加拓扑荷数的可调控范围^[33]。

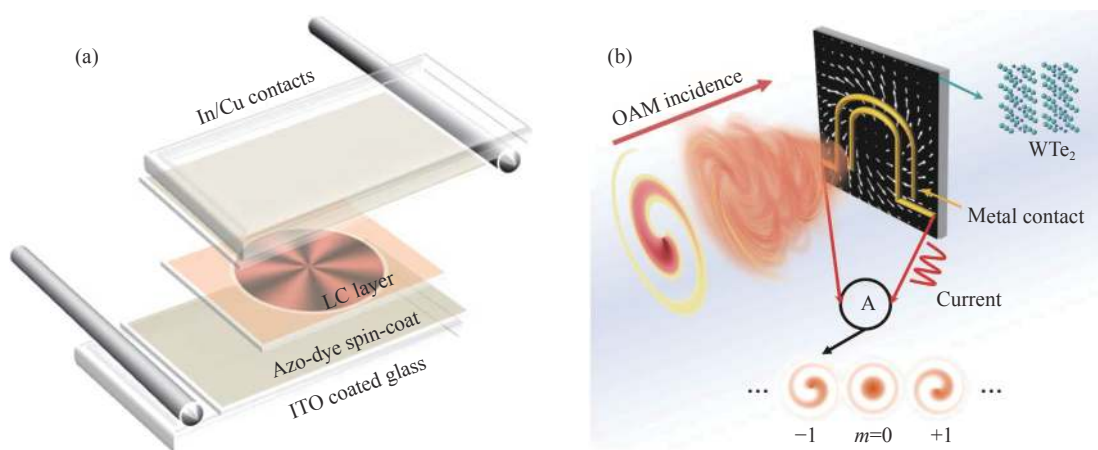


图 6 可调控涡旋激光器和涡旋光束探测器^[33]。(a) Q 板结构; (b) 可调控

Fig.6 Adjustable vortex laser and optical vortex detector^[33]. (a) Structure of Q-board; (b) Adjustable

总的来说, 涡旋光制备相关研究根据不同的需求牵引逐步向两个方向发展: 一是以科研需求为牵引, 致力于发展现有的涡旋操控手段, 拓展现有光场调控能力, 实现光场的多维精确调控^[34], 或是发展新的光场调控手段, 以实现某一光场参数调控的跃升; 另一方面则是以光镊等实际应用需求为牵引, 由于光镊或通讯等实际应用对于振幅、相位或者偏振的多维精确调控要求不高, 相关研究聚焦于涡旋制备器件的小型化、集成化发展。针对涡旋光在惯性测量的实际应用, 涡旋光制备需求又有其特殊性, 将在下文做详细介绍。

2 涡旋光束在惯性测量中的应用

2.1 旋转多普勒效应

自 19 世纪被发现以来, 多普勒效应 (Doppler effect) 广泛出现在各个行业的工程科学研究中。经典多普勒效应主要聚焦于平面波, 能够直接探测与光源具有

相对运动的物体, 而对与光束传播方向垂直平面内的运动无能为力。随着光束圆偏振态的发现, 利用多普勒效应测量物体的旋转运动也成为了可能。20 世纪 70 年代, B. A. Garetz 等人就发现一束圆偏振的光束绕其转轴以转速 Ω 旋转时会产生一个大小为 $\sigma\Omega$ 的频移, 其中 σ 取 +1 或 -1, 取决于光束的偏振状态为左旋或右旋^[35-36]。到了 1989 年, P. Couillet 课题组首次得到了麦克斯韦方程组的涡旋表达式解并提出了涡旋光束的概念, 拉开了涡旋光束的研究序幕^[37]。此后, 随着人们对涡旋光束研究的进一步深入, 发现涡旋光束具备探测物体旋转运动的潜力, 而这一能力的本质便是旋转多普勒效应, 格拉斯哥大学的 Padgett 教授将其归结为由于涡旋光束的坡印廷矢量与光束之间的夹角引起的一种效应^[38]。

2011 年, A. Belmonte 利用微小散射体在结构光束垂直平面内运动的模型, 证明了涡旋光束在遥感探测领域的潜力, 如图 7 (a) 所示^[39]。2013 年, P. Lavery

等指出对于具有螺旋相位的光束当入射到沿着光轴旋转的物体表面时, 观察者接收到的物体表面散射光

的频率改变量为 $\Delta f = m\omega/2\pi$, 若采用正反叠加态的涡旋光束, 实际检测到的频率信号为 $\Delta f = 2m\omega/2\pi$ 。其

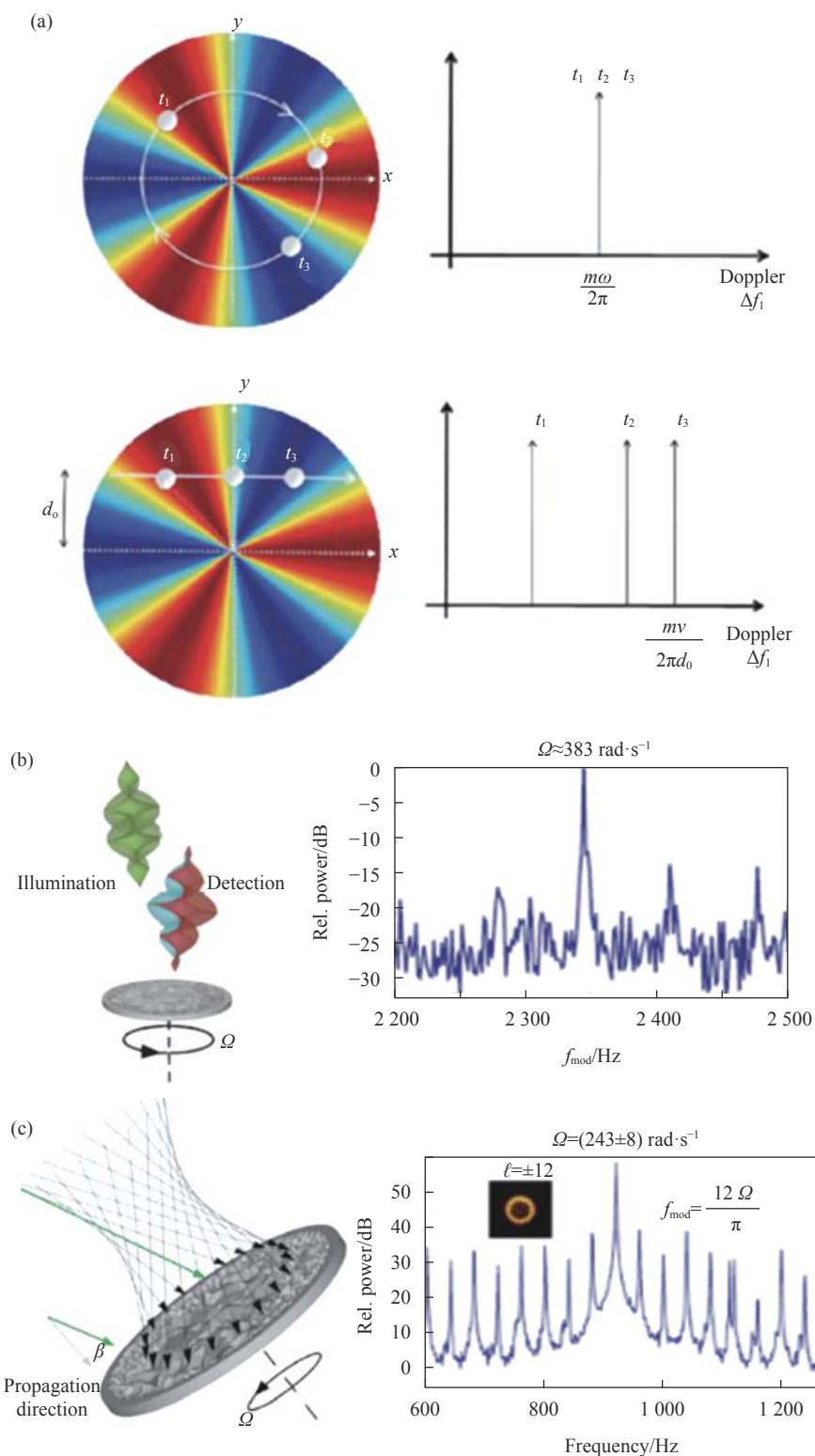


图 7 (a) 螺旋相位中运动的微小散射体^[39]; (b) 入射光和散射光之间产生的频移信号^[40]; (c) 连续谱白光产生信号谱^[41]

Fig.7 (a) Small scatterer in the spiral phase^[39]; (b) Frequency shift between the illumination and the detection light^[40]; (c) Observed power spectrum under the illumination of white light^[41]

实验装置如图 7 (b) 所示^[40]。他们的工作采用了两种方案：一种是用轨道角动量为 $\pm m$ 的叠加态光束作为入射光，检测物体表面散射光的频移；另一种是利用普通高斯光束作为入射光，然后探测轨道角动量为 $\pm m$ 叠加的散射光的频移，实验测得的信号与理论预测值完全一致。该成果在高精度远程遥感探测技术中有着重要的应用价值，也为后续研究打下了坚实基础。该研究小组于 2014 年还将这一效应在普通白光基础上进行了验证，证明了利用这一效应制作传感器的可行性^[41]，如图 7 (c) 所示。

2014 年，C. Rosales-Guzman 在普通旋转多普勒效应的基础上给涡旋光束加上了一个方向已知的旋转速率，这样在观察频移信号时，根据频移量大小的偏移就能够得出物体的旋转方向信息，是涡旋光束旋转多普勒效应的一种延伸应用^[42]。同年，D. B. Phillips 成功利用涡旋光束旋转多普勒效应测量了微米级粒子的旋转速度^[43]。除了在不同应用场合下的研究，北京理工大学高春清团队在 2017 年还利用高阶贝塞尔高斯光束证明了旋转多普勒效应在有障碍物情况下依然存在的现象^[44]，这一研究拓宽了旋转多普勒效应转速测量的应用范围，对于存在障碍物情况下的转速测量具有重要应用价值。2018 年，厦门大学陈理想团队首次将转速测量的实验装置搬到了室外进行，在 120 m 自由空间内克服了大气扰动的影响，基于单光子计数实现了旋转多普勒效应对物体转速的测量，如图 8 所示。研究表明旋转多普勒效应在远距离探测物体转速及对称性方面有着很大的潜力^[45]。

尽管基于旋转多普勒测转速的相关研究层出不穷，但大部分报道都是基于涡旋光束传播轴与物体转轴相重合的条件，这一条件在实际应用中较难实现。针对这一问题，航天工程大学任元课题组在 2019 年展开了涡旋光束传播轴与物体转轴不重合条件下的物体转速探测研究。首先研究了具有光束传播轴与物体转轴具有相对横向位移条件下的多普勒频移分布规律，提出了基于涡旋光束的横向不对准条件下的转速探测方法^[46]。在此基础上进一步研究了光束倾斜照射条件下的物体转速探测规律^[47]，基本阐明了基本非合作条件下的旋转多普勒效应机理。该课题组的研究主要采用微小散射体模型，这一研究思路随后被张子敬等进一步研究并拓展，在大横向位移条件下依旧可实现物体转速的测量，如图 9 所示^[48]。这些研究极大的丰富了旋转多普勒效应的应用场景，为旋转多普勒效应的工程化打下了坚实基础。

目前关于旋转多普勒效应的研究有以下特点：(1) 国内外开展的相关研究仍停留在实验验证阶段。从 2013 年首次实验报道至今，已有近百篇论文对该技术进行了报道，但均以实验室研究为主。2019 年，虽然厦门大学在室外进行了旋转物体的转动测量，但仍停留在入射光轴与转动轴完全重合的情况。此外，远距离传输使得回波光场微弱，其信号检测无法保证实时测量，探测效率还有较大提升空间。(2) 国内外主流实验研究方案集中于特殊的对准情况。一方面是学术界仍在试图通过不同模型对该效应做出理论解释，另一方面是还未有相关单位将其与实际的应用

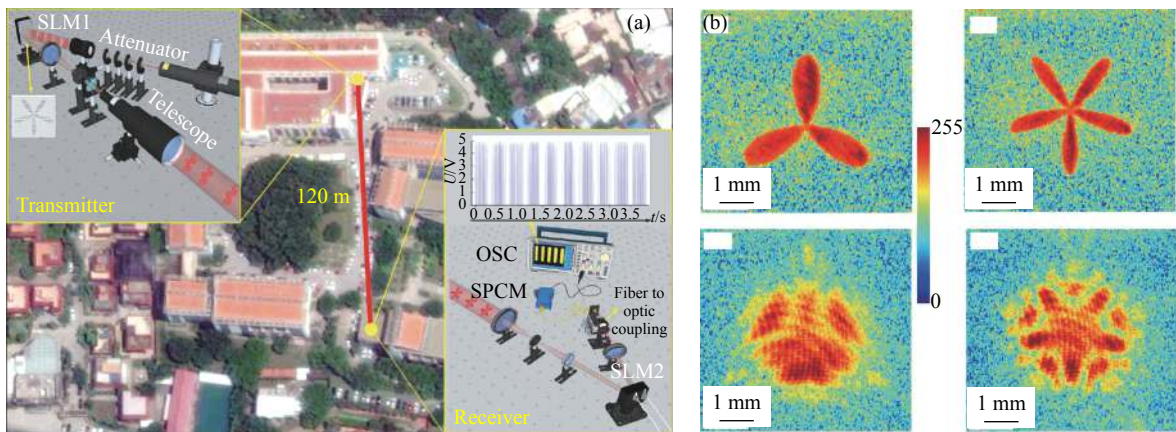


图 8 (a) 自由空间探测；(b) 具有对称性物体的探测结果^[45]

Fig.8 (a) Free space detection; (b) Detection results of symmetrical objects^[45]

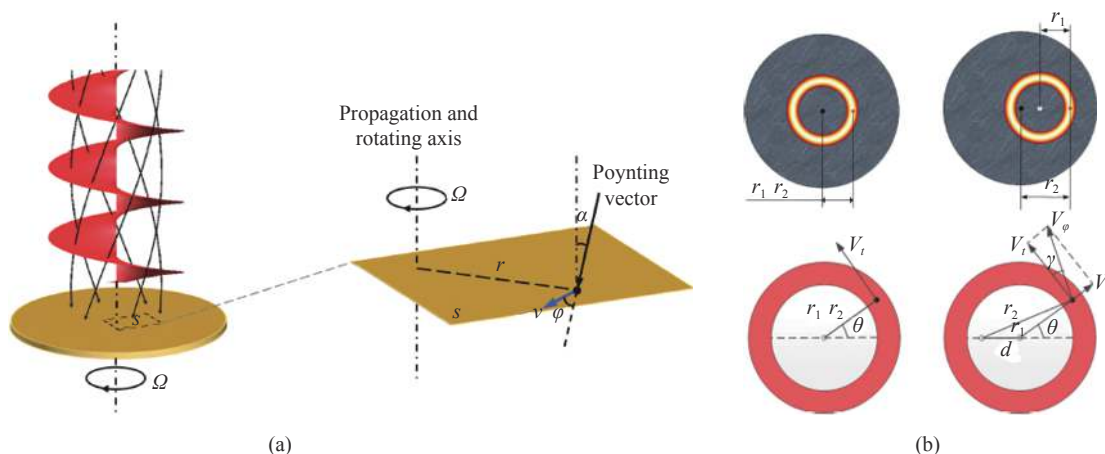


图 9 (a) 微小散射体模型^[47]; (b) 具有微小横向位移下的探测原理^[47]

Fig.9 (a) Tiny scatter model^[47]; (b) Detection principle with small lateral displacement^[47]

背景结合。旋转多普勒效应一经报道,就被业界公认为是一种全新的目标转速测量手段,但是这种特殊的对准情况无法覆盖一般情况。虽然航天工程大学对转轴、光轴不重合或者存在偏心照射情况下的转速探测进行了研究,但要应用于实际情况还有诸多难关需要攻克: 1) 平动、转动存在耦合,其解耦方式尚不明确。实际的运动往往存在多种运动状态,若目标转动的同时还进行快速线性平动运动,旋转多普勒效应的回波信号会存在耦合。2) 前视盲区对探测的影响尚未开展相关研究。当探测光束与物体转轴呈直角时,还未有相关研究报道该情况下是否存在转动分量引起的旋转多普勒效应,即是否与相控阵雷达一样存在类似的前视盲区。

此外,涡旋光束的制备会对探测信号产生影响。在基于旋转多普勒效应的转速探测中存在两种探测方案:一种是直接使用叠加态涡旋光束探测;另一种是使用单一态涡旋光束作为探测光,然后与本振涡旋光束进行外差拍频,得到最终光束频移。虽然原理类似,但是探测信号在频谱的分布是不同的。最近的研究中,美国科罗拉多大学的 A. Q. Anderson 等人发现,叠加态涡旋光束探测主要对旋转物体的振幅敏感,而对相位不敏感;单一态光束外差探测主要对旋转物体的相位敏感,而对振幅不敏感^[49]。这一发现对后续提高转速探测信号的信噪比具有一定指导意义。涡旋光束的模式纯度也会影响信噪比,若模式纯度过低,频谱展宽过大会使信号淹没,无法提取信号。拓扑荷数的大小直接决定信号的频率大小,如果可以提高拓

扑荷数就可以使目标信号规避低频噪声;然而,提高拓扑荷数又会降低制备涡旋光束的模式纯度。目前尚未有激光器可直接产生大功率涡旋光。激光器的功率直接影响回波信号的收集难度和探测效率。中南大学谢文科团队率先在大功率涡旋光制备方面做出了有益尝试。他们通过相干合成的方法近似产生大功率涡旋光,突破了传统调制器件低损伤阈值的局限性。但由于纯相位调制其制备涡旋光为超几何模式,仍存在模式纯度不高、发散程度较大等问题需要解决^[50]。

2.2 量子涡旋陀螺

涡旋光束操控下的玻色-爱因斯坦凝聚因具有陀螺敏感的潜在应用价值逐渐得到重视。2003年, E. Hodby 等通过对剪式振荡 (Scissors oscillation) 的旋进速率的测量,首次观测到气态玻色-爱因斯坦凝聚体 (Bose-Einstein Condensate, BEC) 中涡旋的陀螺效应,图 10(a) 便是电子显微镜下气态玻色-爱因斯坦凝聚的观测结果^[51],这标志着 BEC 涡旋与惯性测量领域产生交集。2012年, S. Thanvanthri 等提出了基于冷原子 BEC 体系的超稳物质波陀螺模型,这一模型利用基于轨道角动量传递的叠加态涡旋的 Sagnac 效应,准确测得了体系的旋转速率^[52]。在此基础上,2016年, F. I. Moxley 等人提出了基于激子极化激元凝聚 (Exciton-polariton condensates) 体系的陀螺模型,通过叠加态涡旋光束相位印刻使激子极化激元产生自发干涉,并利用激子极化激元的超流特性实现超高灵敏度的陀螺效应 (达到 $10\sim 11 \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 量级), 分别如

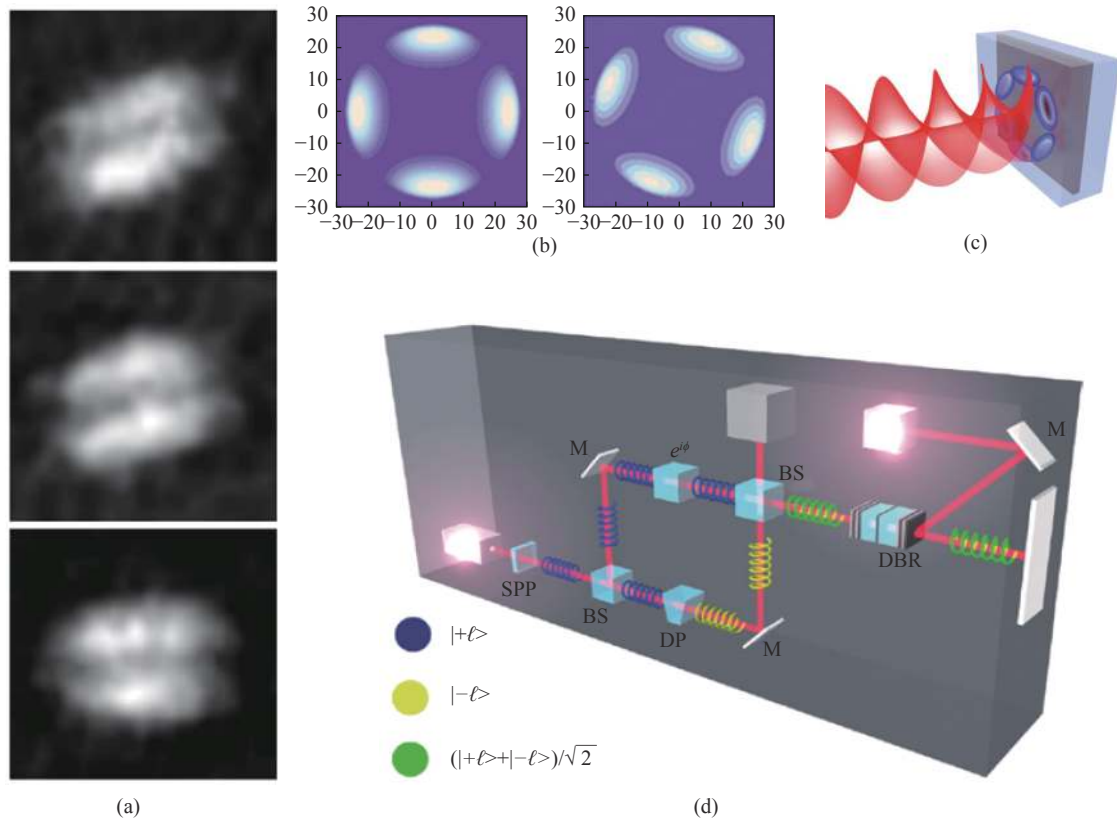


图 10 玻色-爱因斯坦凝聚体涡旋的操控及其陀螺效应^[52]。(a) 气态玻色-爱因斯坦凝聚体中涡旋的陀螺效应；(b) 冷原子体系中基于物质波的玻色-爱因斯坦凝聚体陀螺模型；(c) 携带轨道角动量的涡旋光束对激子极化激元的操控；(d) 由叠加态涡旋光束相位印刻形成的激子极化激元自发干涉

Fig.10 Manipulation and the gyroscopic effect of vortices in BEC^[52]. (a) Gyroscopic effect of vortices in gasiform BEC; (b) BEC gyroscope model based on matter wave in the system of cold atom; (c) Manipulation on the excitation-polaritons by optical vortex carrying orbital angular momentum; (d) Spontaneous interference of excitation-polaritons due to the phase imprinting of the superimposed optical vortices

图 10(b)、(c)、(d) 所示^[53]。

另一方面,随着平板半导体微腔引入,玻色-爱因斯坦凝聚^[54]的可操控性得到了极大的增强,这也为此后玻色-爱因斯坦凝聚与量子陀螺仪的诸多结合提供了可能。如图 11 所示,平板半导体微腔是由若干布拉格反射镜和半导体量子阱组成的,激子极化激元束缚在量子阱中,经过布拉格反射镜的多次反射完成与激发光子场的耦合,实现能量和相位信息的传递。1998 年, D. G. Lidzey 等首次在平板半导体微腔中实现了激子极化激元的玻色-爱因斯坦凝聚并实现了实验上对激子极化激元的反交叉色散行为的观测。观测结果表明,色散曲线在零波矢附近区域有一个明显的下陷,这表明微腔激子极化激元的有效质量非常轻,很容易实现玻色-爱因斯坦凝聚。这一结果首次向世人展现了半导体微腔结构中的玻色-爱因斯坦凝

聚具有极大的研究价值。此后,平板半导体微腔中激子极化激元凝聚的研究逐渐成为凝聚态物理领域内一个重要的分支,而随着半导体微腔材料研究的不断深入,人们从最初需要在几开尔文的超低温环境中实现半导体微腔激子极化激元的凝聚和操控,逐渐发展到现在的可以初步在室温下实现半导体微腔中激子极化激元的凝聚与操控,这一进步为涡旋操控下的激子极化激元凝聚实现工程化应用奠定了基础。2014 年, K. S. Daskalaki 等揭示了室温环境下,处于有机物半导体微腔中的 Wannier-Mott 激子极化激元凝聚的一系列非线性作用^[55],而这些非线性作用正是涡旋产生和涡旋光束与极化子之间通过能量耦合实现轨道角动量传递的理论基础,为室温下实现涡旋操控并更进一步实现激子极化激元凝聚体系的陀螺效应提供了有力的理论支撑。

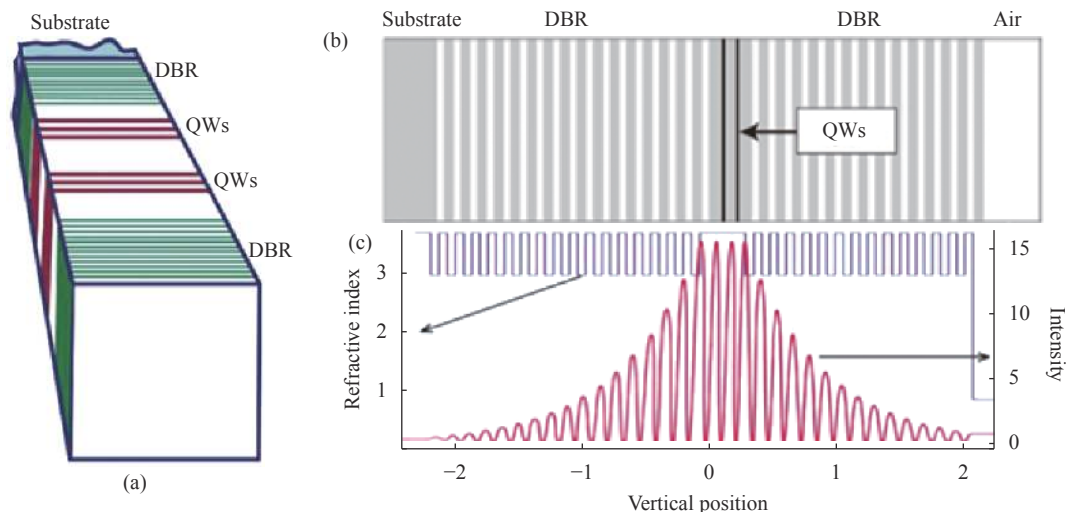


图 11 平板半导体微腔中的激子极化激元凝聚^[54]。(a) 分布式 Bragg 反射镜构成的平板半导体微腔；(b) 平板半导体微腔的侧视图；(c) 对应于 (b) 图的平板微腔折射率以及腔内场强的位置分布

Fig.11 Bose-Einstein Condensates of Exciton Polariton in the semiconductor flat microcavity^[54]. (a) Semiconductor flat microcavity formed with distributed Bragg mirrors where the semiconductor quantum wells enmeshed in the microcavity; (b) Side view of the semiconductor flat microcavity; (c) Location distribution of refractive index and field intensity in the microcavity corresponding to Fig.11(b)

大量的此类研究证明, 玻色-爱因斯坦凝聚从实验室走向工程实践是完全有可能的。而激子极化激元凝聚体系中可操控的量子化涡旋可用于量子导航、量子计算、量子传输等诸多领域。显然, 半导体微腔中激子极化激元与光的强耦合作用、其超流特性以及其复杂的非线性等天然属性决定了基于激子极化激元 BEC 量子化涡旋构建波-粒涡旋陀螺仪在量子导航领域具有极大的潜在应用价值。基于此, 2016 年航天工程大学任元课题组首次提出基于半导体材料的波-粒涡旋陀螺概念^[56-57], 即利用涡旋光束操控半导体微腔中的激子极化激元, 使其产生具有超流特性的涡旋叠加态, 从而实现陀螺效应。基于半导体微腔的激子极化激元体系具备易于实现设备小型化和常温涡旋操控的良好特性。在随后的研究中, 该课题组建立了旋转状态下的泵浦-耗散体系模型, 其数值仿真的一些关键性结果如图 12 所示, 其中图 12(a)反映了半导体微腔中激子极化激元凝聚的动力学特性, 而图 12(b)反映了由涡旋光束操控得到的激子极化激元涡旋叠加态的含时演化, 由此得出了在广泛应用场景下半导体微腔激子极化激元体系模型均能实现稳定的陀螺效应的结论^[58]。同时, 虽然陀螺效应的激发对于激发光场的调制要求较低, 但是若需进一步发展多种结构的势垒, 如复杂光场结构, 携带轨道角动量的多边形

光场, 或者多相位奇点可控的涡旋光束, 则对光场调控提出了新的要求。该研究成果正式将叠加态涡旋光束与惯性测量结合起来, 展现出涡旋光束在惯性测量领域的广阔前景。

针对航天工程领域的实际应用场景, 2020 年, 航天工程大学任元课题组将研究进一步深入。为了探究实际搭载转动系统时陀螺的稳定性, 研究了激子极化激元涡旋叠加态的旋转动力学特性, 图 13(a) 和 (b) 分别展示了他们的主要工作内容以及不同转速的旋转状态下激子极化激元涡旋叠加态的演化过程的仿真结果。研究表明, 半导体微腔极化激元 BEC 体系的旋转速率对激子极化激元凝聚叠加态的演化过程及其动力学特性有重要影响, 若转速过高会严重影响该陀螺的稳定性。这一发现划定了量子陀螺仪的测量极限, 为其应用范围提供了实际参考。

目前关于量子涡旋陀螺的研究有以下特点。(1) 虽然国内外对激子极化基元 BEC 的研究方兴未艾, 但大多集中在激子极化激元 BEC 轨道角动量操控、自旋特性研究、类铁氧体操控等方面, 偏向激子极化激元 BEC 的物理特性和机理研究, 其应用方向也大多向量子计算和存储等方向靠近, 对基于激子极化激元 BEC 的量子涡旋陀螺鲜有研究, 且大多集中于理论研究和初步的实验探索。例如 2016 年 F. I. M. Iii 等人

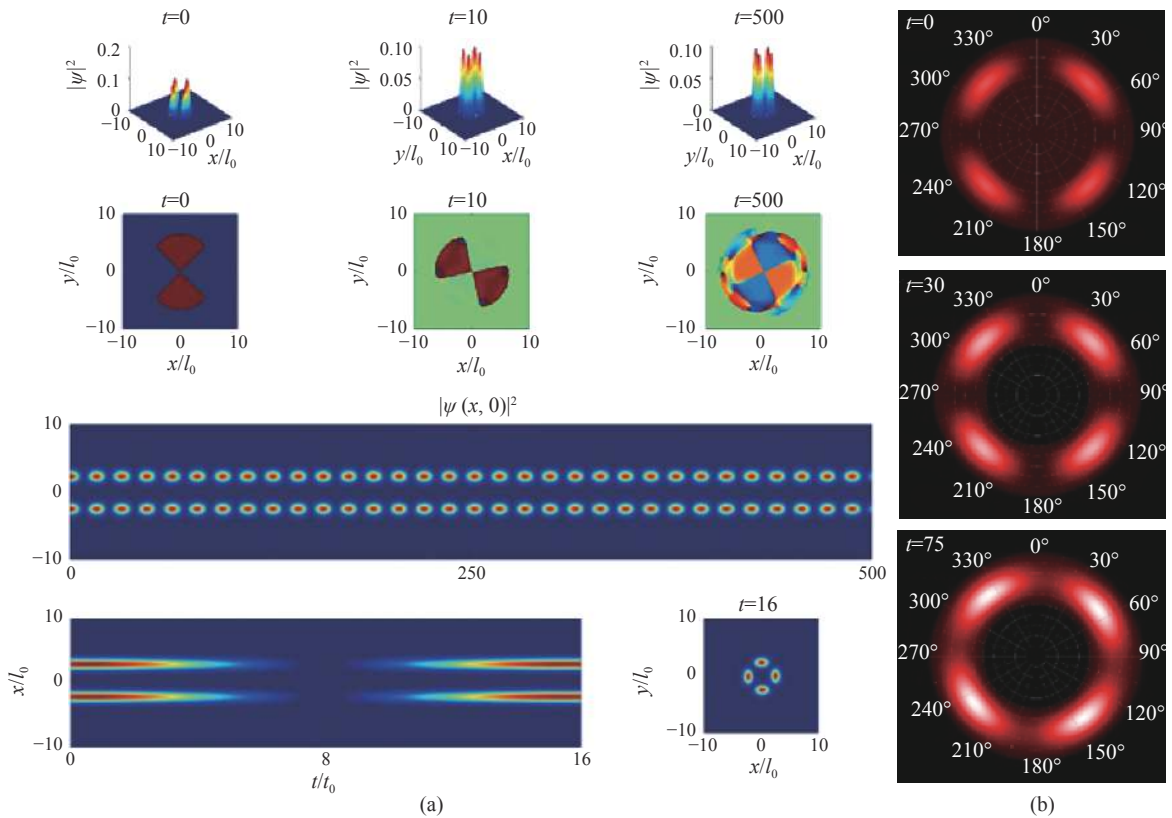


图 12 半导体微腔中激子极化激元 BEC 凝聚的动力学特性^[58]。(a) 泵浦驱动下激子极化激元叠加态涡旋的演化；(b) 旋转状态下激子极化激元叠加态涡旋的动力学特性

Fig.12 Dynamic characteristic of excitation-polariton BEC in semiconductor microcavities^[58]. (a) Evolution of superposition of excitation-polariton vortices driven by pump beam; (b) Rotary dynamic characteristic of superposition of excitation-polariton vortices

的研究工作虽然实现了激子极化激元 BEC 的陀螺效应,但其陀螺效应并不稳定^[60],而其他研究团队也鲜见实现激子极化激元 BEC 较长时间的稳定陀螺效应以支撑量子涡旋陀螺实现的成果。(2) 国内外主流激子极化激元 BEC 的研究方向均为超低温环境下 BEC 物理特性和操控特性,例如冷原子体系的 BEC 或超低温环境下 GaAs 基激子极化激元 BEC 的研究,而超低温环境本身的庞大体积和对实验环境的苛刻要求就与研究量子涡旋陀螺以突破体积和精度、灵敏度的矛盾这一瓶颈的初衷相违背。虽然航天工程大学创造性地提出在常温有机物半导体中实现激子极化激元 BEC 的陀螺效应并已经取得阶段性进展,但要取得进一步的可以利于实验以至于实际应用的进展依旧需要付出巨大努力,突破诸多难关:(1) 有机物半导体材料中激子极化激元的特性并不明确,其复杂的非线性相关作用会给涡旋操控的过程带来非常多的不确定因素,可能会极大地影响操控的能量传递效

率、系统响应时间、操控稳定性等重要指标;(2) 有机物半导体材料平板微腔中光子-激子的耦合形式以及腔光子的传播模式等都是未知的,这就为有机物半导体材料微腔中激子极化激元自发辐射以及其 Sagnac 干涉的存在与否或存在形式带来了极大的不确定性,也大大增加了操控实验的难度。

叠加态激子极化激元 BEC 的操控和及其陀螺效应的形成与激发涡旋光的光场调控有着紧密联系。首先,激子极化激元准粒子间的非线性作用在不同的势垒的构造下具有很大差异,这种差异是各种复杂操控的基础,而构造各种复杂的势垒仅仅依靠半导体微腔材料的本征属性是远远不够的,还需要通过复杂涡旋光场结构在半导体微腔中形成复杂的粒子源(即光势),再利用光势与激子场的复杂耦合关系,实现复杂的随时空演变的能量传递,得到复杂的操控模式。例如携带轨道角动量的多边形光场或者多相位奇点可控的涡旋光场就可以得到复杂的类铁氧体 BEC 涡旋

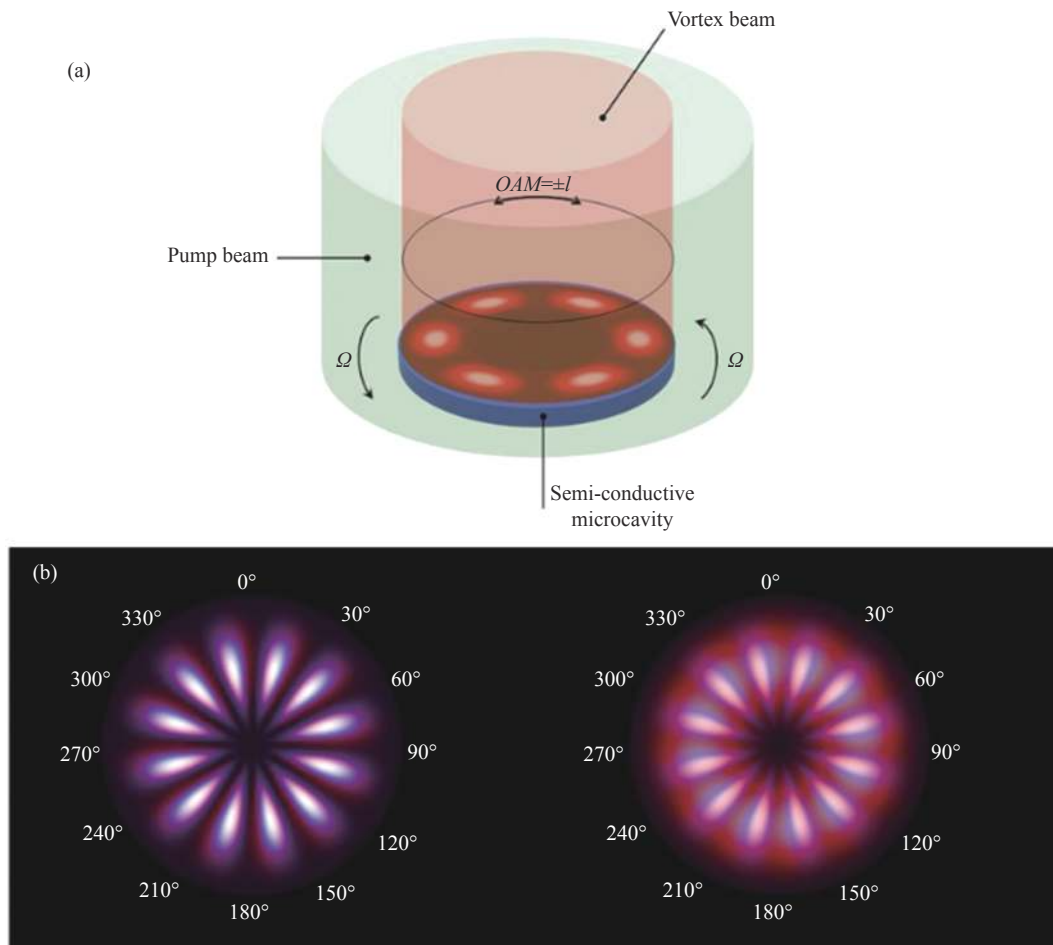


图 13 旋转状态下的激子极化激元凝聚体系^[59]。(a) 旋转状态下的激子极化激元涡旋叠加态体系；(b) 激子极化激元涡旋叠加态瞬时转动角速率与体系转速的关系 (限定时间内转速为 $\Omega=2 \times 10^{-7}$ 和 $\Omega=8 \times 10^{-7}$ 情况下涡旋叠加态转过的角度对比)

Fig.13 System of exciton polariton condensates on the rotational state^[59]. (a) System of vortice superposition state of exciton polariton condensates on the rotational state; (b) Relationship between the instantaneous angular rate of the superposition state of exciton polariton vortices and the rotate speed of the system (the rotation angle at the rotation rate of $\Omega=2 \times 10^{-7}$ and $\Omega=8 \times 10^{-7}$)

阵列。其次,量子陀螺精度和灵敏度与操控涡旋光拓扑荷数有密切联系,实现超高精度量子陀螺必须利用大拓扑荷数涡旋光束进行相位传递和操控。然而,当拓扑荷数超过一定范围后,BEC 操控体系的粒子涨落噪声显著增加,量子陀螺的灵敏度也会随之急剧下降,因而需要掌握大拓扑荷数的叠加态涡旋光制备方法并通过合适的方法将其拓扑荷数调整到恰当的激发区间,以平衡精度和灵敏度两个重要的量子陀螺指标参数。此外,涡旋光场的结构、拓扑荷数和质量与量子陀螺操控体系的操控响应速度及操控稳定度也有着紧密关联,针对不同微腔尺寸和势阱深度,调节涡旋光场的结构和拓扑荷数,微腔中光子场-激子场能量耦合从建立到形成稳态的时间会发生显著改变,

而这将直接决定操控过程的响应速度。

3 结束语

文中首先介绍了涡旋光束制备的常用手段,主要有模式转换,螺旋相位板,空间光调制器等。总结了涡旋光制备相关研究根据不同的需求牵引逐步向两个方向发展:一是以科研需求为牵引,致力于发展现有的涡旋操控手段或是发展新的光场调控手段,以实现某一光场参数调控的跃升;二是以光镊等实际应用需求为牵引,相关研究聚焦于涡旋制备器件的小型化、集成化发展。着重介绍了涡旋光束在惯性测量领域中关键应用技术及其最新进展。其一是主动探测目标:基于涡旋光束旋转多普勒效应的目标转速探

测。虽然相关理论模型、外场实验相继报道,但是目前对于目标探测还仅停留在固定形状的小角度入射。对于更加一般的情况,如任意探测目标结构、大角度斜入射探测目标表面等还未见相关报道。其二是被动接受位姿信息:基于叠加态涡旋光束的量子涡旋陀螺。虽然该陀螺理论上具有高灵敏度、小体积等优点,但目前对于该种陀螺的研究还停留在理论仿真阶段,真正将其应用于实际情况还将有漫长的道路。首先要解决的问题是如何在常温下实现 BEC 的激发,其次是如何在小体积的情况下保证所激发的 BEC 的稳定状态。针对涡旋光在惯性测量的实际应用,涡旋光制备需求又有其特殊性,文中还就以上二者对涡旋光束制备的要求进行了讨论。前者要求制备的涡旋光束具有高模式纯度、大拓扑荷数。若想进一步增加探测距离,还需要增加激光功率,这就需要考虑光场调控器件的损伤阈值。后者要求制备的涡旋光束具有任意的强度分布和奇点分布调控能力。目前来看,还没有一种涡旋光束制备手段可以满足上述两种应用的所有需求。这就从应用层面反过来对光场调控手段提出了现实要求。无论是涡旋光制备还是其具体应用,所有技术的发展都是互为支撑,螺旋上升,任一方面的发展不可偏废。科学的道路上只有勠力同心,披荆斩棘,才能让科学研究真正落地,开花结果。

参考文献:

- [1] Gbur G. Singular Optics[M]. US: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2015.
- [2] Born M, Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light [M]. 7th ed. Britain: Pergamon Press, 1999.
- [3] Wolter H. Concerning the path of light upon total reflection [J]. *Journal of Optics A Pure & Applied Optics*, 2009, 11(9): 090401.
- [4] Braunbek W, Laukien G. Features of refraction by a semi-plane[J]. *Optik*, 1952, 9: 174-179.
- [5] Couillet P, Gil L, Rocca F. Optical vortices [J]. *Optics Communications*, 1989, 73(5): 403-408.
- [6] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [7] Barnett S M, Allen L. Orbital angular momentum and nonparaxial light beams [J]. *Optics Communications*, 1994, 110(5-6): 670-678.
- [8] Zhang Y Q, Zeng X Y, Ma L, et al. Manipulation for superposition of orbital angular momentum states in surface plasmon polaritons [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(18): 1900372.
- [9] Yang W, Qiu X, Chen L. Research progress in detection, imaging, sensing, and micromanipulation application of orbital angular momentum of beams [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500013. (in Chinese)
- [10] Wang Jian, Liu Jun, Zhao Yifan. Research progress of structured light coding/decoding communications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126013. (in Chinese)
- [11] Gu Y L, Gbur G. Measurement of atmospheric turbulence strength by vortex beam [J]. *Opt Commun*, 2010, 283(7): 1209-1212.
- [12] Zhang W, Zhang D, Qiu X, et al. Quantum remote sensing of the angular rotation of structured objects [J]. *Physical Review A*, 2019, 100(4): 043832.
- [13] Lavery M P J, Peuntinger C, Günthner K, et al. Free-space propagation of high-dimensional structured optical fields in an urban environment [J]. *Science Advances*, 2017, 3(10): e1700552.
- [14] Man Zhongsheng, Xi Zheng, Yuan Xiacong, et al. Dual coaxial longitudinal polarization vortex structures [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(10): 103901.
- [15] Shen Y, Wang X, Xie Z, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 90.
- [16] Beijersbergen M W, Allen L, Veen H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum [J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1-3): 123-132.
- [17] Liang G, Wang Q. Controllable conversion between Hermite Gaussian and Laguerre Gaussian modes due to cross phase [J]. *Opt Express*, 2019, 27(8): 10684-10691.
- [18] Wang C, Ren Y, Liu T, et al. Generation and measurement of high-order optical vortices by using the cross phase [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(13): 4040.
- [19] Ren Y, Wang C, Liu T, et al. Polygonal shaping and multi-singularity manipulation of optical vortices via high-order cross-phase [J]. *Opt Express*, 2020, 28(18): 26257-26266.
- [20] Wang C, Ren Y, Liu T, et al. New kind of Hermite-Gaussian-like optical vortex generated by cross phase [J]. *Chinese Optics*

- Letters*, 2020, 18(10): 100501.
- [21] Xin Jingtao, Li Kai, Zhang Wen, et al. Generation of vector beams by Sagnac interferometer and spiral phase plates [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0217001. (in Chinese)
- [22] Wang C, Liu T, Ren Y, et al. Generating optical vortex with large topological charges by spiral phase plates in cascaded and double-pass configuration [J]. *Optik*, 2018, 171: 404-412.
- [23] Wang Chen, Liu Tong, Shao Qionglng, et al. Quadrupling topological charges of vortex using multi-passed spiral phase plate[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0918008. (in Chinese)
- [24] Wagemann E U, Tiziani H J, Reicherter M, et al. Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(9): 608.
- [25] Ganic D, Hain M, Gu M, et al. Generation of doughnut laser beams by use of a liquid-crystal cell with a conversion efficiency near 100% [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(15): 1351.
- [26] Chen Lixiang, Zhang Yuanying. Research progress on preparation, manipulation, and remote sensing applications of high-order orbital angular momentum of photons [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(16): 164210. (in Chinese)
- [27] Takashima S, Kobayashi H, Iwashita K. Integer multiplier for the orbital angular momentum of light using a circular-sector transformation [J]. *Physical Review A*, 2019, 100(6): 063822.
- [28] Clark T W, Offer R F, Franke-Arnold S, et al. Comparison of beam generation techniques using a phase only spatial light modulator [J]. *Opt Express*, 2016, 24(6): 6249-6264.
- [29] Weng X, Liu L, Sui G, et al. Real-time pixel-level polarization modulation using polarized-spatial light modulator based on phase vectorization [J]. *arXiv e-prints*, 2020: 2004.00446.
- [30] He Y, Liu Z, Liu Y, et al. Higher-order laser mode converters with dielectric metasurfaces [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5506.
- [31] Yang Weidong, Qiu Xiaodong, Chen Lixiang. Research progress in detection, imaging, sensing, and micromanipulation application of orbital angular momentum of beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500013. (in Chinese)
- [32] Wang Chen, Liu Tong, Shao Qionglng, et al. Method research of optical vortex generation based on sagnac interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 326002. (in Chinese)
- [33] Ji Z, Liu W, Krylyuk S, et al. Photocurrent detection of the orbital angular momentum of light [J]. *Science*, 2020, 368(6492): 763-767.
- [34] Liu Q, Pan J, Wan Z, et al. Generation methods for complex vortex structured light field [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500006. (in Chinese)
- [35] Garetz B A, Arnold S. Variable frequency shifting of circularly polarized laser radiation via a rotating half-wave retardation plate [J]. *Optics Communications*, 1979, 31(1): 1-3.
- [36] Garetz B A. Angular Doppler effect [J]. *J Opt Soc Am A*, 1981, 71(5): 609-611.
- [37] Barnett S M, Zambrini R. *Orbital Angular Momentum of Light* [M]. New York: Springer, 2007: 277-311.
- [38] Padgett M. A new twist on the Doppler shift [J]. *Physics Today*, 2014, 67(2): 58-59.
- [39] Belmonte A, Torres J P. Optical Doppler shift with structured light [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(22): 4437-4439.
- [40] Lavery M P, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum [J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537-540.
- [41] Speirits F C, Lavery M P J, Padgett M J, et al. Observation of the rotational Doppler shift of a white-light, orbital-angular-momentum-carrying beam backscattered from a rotating body [J]. *Optica*, 2014, 1(1): 1-4.
- [42] Rosales-Guzmán C, Hermosa N, Belmonte A, et al. Direction-sensitive transverse velocity measurement by phase-modulated structured light beams [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(18): 5415-5418.
- [43] Phillips M P L D B, Speirits F C, Barnett S M, et al. Rotational Doppler velocimetry to probe the angular velocity of spinning microparticles [J]. *Physical Review*, 2014, 90(1): 011801.
- [44] Fu S, Gao C, Wang T, et al. Non-diffractive Bessel-Gauss beams for the detection of rotating object free of obstructions [J]. *Opt Express*, 2017, 25(17): 20098-20108.
- [45] Zhang W, Gao J, Zhang D, et al. Free-space remote sensing of rotation at the photon-counting level [J]. *Phys Rev A*, 2018, 10(4): 044014.
- [46] Qiu S, Liu T, Li Z, et al. Influence of lateral misalignment on the optical rotational Doppler effect [J]. *Appl Opt*, 2019, 58(10): 2650-2655.
- [47] Qiu S, Liu T, Ren Y, et al. Detection of spinning objects at oblique light incidence using the optical rotational Doppler effect [J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24781-24792.
- [48] Zhang Z, Cen L, Zhang J, et al. Rotation velocity detection with orbital angular momentum light spot completely deviated out of the rotation center [J]. *Opt Express*, 2020, 28(5): 6859-6867.
- [49] Anderson A Q, Strong E F, Heffernan B M, et al. Detection technique effect on rotational Doppler measurements [J]. *Opt Lett*, 2020, 45(9): 2636-2639.

- [50] Yu T, Xia H, Fan Z, et al. Study on the influence of phase noise on coherent beam combined Bessel-Gaussian beam[J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 14-20.
- [51] Hodby E, Hopkins S A, Hechenblaikner G, et al. Experimental observation of a superfluid gyroscope in a dilute Bose-Einstein condensate [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(9): 090403.
- [52] Thanvanthri S, Kapale K T, Dowling J P. Ultra-stable matter-wave gyroscopy with counter-rotating vortex superpositions in Bose-Einstein condensates [J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(13): 1180-1185.
- [53] Moxley F I, Dowling J P, Dai W, et al. Sagnac interferometry with coherent vortex superposition states in exciton-polariton condensates [J]. *Physical Review A*, 2016, 93(5): 053603.
- [54] Lidzey D G, Bradley D D C, Skolnick M S, et al. Strong exciton-photon coupling in an organic semiconductor microcavity [J]. *Nature*, 1998, 395(6697): 53-55.
- [55] Daskalakis K S, Maier S A, Kena-Cohen S. Spatial coherence and stability in a disordered organic polariton condensate [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(3): 5301.
- [56] Ren Yuan, Cheng Rui, Xie Lu, et al. Wave-particle vortex gyro: China, ZL201610318157.8[P]. 2016-05-12.
- [57] Ren Yuan, Wang Gang, Xie Lu, et al. Vortex optical circulator: China, ZL201610319453. X [P]. 2016-05-12.
- [58] Chen Haijun, Ren Yuan, Wang Hua. The dynamics of a matter-wave soliton under the effect of a two-dimensional constant external force field [J]. *Physica Scripta*, 2019, 94(11): 115221.
- [59] Wu H, Ren Y, Liu T, et al. Research on rotational dynamics characteristics of planar superimposed vortexes of exciton polariton condensates[J]. *Acta Phys Sin*, 2020, 69(23): 230303.
- [60] Moxley F I, Dowling J P, Dai W, et al. Sagnac interferometry with coherent vortex superposition states in exciton-polariton condensates[J]. *Physical Review A*, 2016, 93(5): 053603 .