

量子涡旋陀螺若干关键参数的仿真计算 (特邀)

任元^{1,2,3}, 吴昊^{2,4*}, 王琛^{2,4}, 刘政良^{2,4}, 刘通^{2,4}, 熊振宇²

- (1. 航天工程大学基础部, 北京 101400;
2. 航天工程大学宇航科学与技术系, 北京 101400;
3. 航天工程大学量子探测与感知实验室, 北京 101400;
4. 航天工程大学激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101400)

摘要: 半导体微腔中由光驱动的激子极化激元体系是近年来热门的物理学、光学领域研究方向, 而半导体微腔中由光驱动的玻色-爱因斯坦凝聚体 (Bose-Einstein Condensates, BEC) 的量子叠加态涡旋在量子传感领域具有颠覆性的潜在应用价值。通过 Runge-Kutta 差分法和 FDTD 有限元方法构建了一个精确的数学模型来表征量子涡旋陀螺激子极化激元体系的时空演化规律。在此基础上, 研究了泵浦光、信号光与半导体微腔材料相关的一些关键参数对量子涡旋陀螺激子极化激元凝聚体演化特性的影响。其中泵浦光和信号光考虑了环形光斑的几何尺寸以及它们的光强, 而微腔材料对激子极化激元体系的影响通过数学上的变换, 折算为有效质量对 BEC 体系的影响。通过大量参数扫描, 得到了影响量子涡旋陀螺性能的一些关键因素, 包括泵浦光的几何参数和强度、泵浦光和信号光的相关影响以及半导体微腔的材料特性。通过表征不同微腔材料的有效质量与性能之间的关系, 计算了材料性能与量子涡旋陀螺仪叠加态演化之间的关系, 发现有效质量的合理值范围很窄。这些工作为量子涡旋陀螺的工程样机研发提供了重要参考。

关键词: 量子涡旋陀螺仪; 激子极化激元; 轨道角动量; 叠加态涡旋; 时空演化特性
中图分类号: O437; O469 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220004

Simulation analysis of some key parameters of quantum vortex gyroscope (Invited)

Ren Yuan^{1,2,3}, Wu Hao^{2,4*}, Wang Chen^{2,4}, Liu Zhengliang^{2,4}, Liu Tong^{2,4}, Xiong Zhenyu²

- (1. Department of Basic, Space Engineering University, Beijing 101400, China;
2. Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101400, China;
3. Lab of Quantum Detection & Awareness, Space Engineering University, Beijing 101400, China;
4. State Key Laboratory for Laser Propulsion and its Applications, Space Engineering University, Beijing 101400, China)

Abstract: The exciton polaritons in the semiconductor microcavity driven by light is a hot research field in physics and optics in recent years, and the superposition quantized vortex of the Bose-Einstein Condensates (BEC) driven by light in the microcavity has subversive potential application value in the field of quantum sensing. An accurate mathematical model via Runge-Kutta Difference and FDTD finite element method was

收稿日期: 2021-12-31; 修订日期: 2022-03-05

基金项目: 国防科技创新特区项目 (18-xxx-04-ZT-002-019-01); 国家自然科学基金 (62173342, 11772001, 61805283)

作者简介: 任元, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 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。

通讯作者: 吴昊, 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为凝聚态物理及非线性光学。

constructed to characterize the time-space evolution of the quantum vortex gyrotron polariton system. On this basis, the influence of some key parameters related to pump light, signal light and semiconductor microcavity materials on the evolution characteristics of the quantum vortex gyroscope exciton polariton condensate was studied. For the pump light and signal light, the light intensity and geometric size of the annular spot were considered. Meanwhile, the effect of the microcavity material on the exciton polariton system was converted into the effect of the effective mass on the BEC system through mathematical transformation. By scanning a lot of parameters, some key factors affecting the performance of the quantum vortex gyroscope were obtained, including the geometric parameters and intensity of the pump light, the related influence of the pump light and the signal light, and the material properties of the semiconductor microcavity. The relationship between material properties and superposition state evolution of quantum vortex gyroscope was calculated by characterizing the relationship between effective mass and properties of different microcavity materials, and the range of reasonable values for effective mass was found to be narrow. These works provided an important reference for the engineering prototype development of the quantum vortex gyroscope.

Key words: quantum vortex gyroscope; exciton polaritons; orbital angular momentum; vortex superposition state; time-space evolution characteristics

0 引言

卫星是人类航天活动,承载着导航定位、天气与气候监测、无线通信等诸多重要使命。然而,作为航天活动载体,其稳定性、灵敏操控性和精准定位等特性是履行以上使命的前提。这些都离不开高精度陀螺仪这一核心部件^[1-2]。陀螺仪的性能直接决定了卫星能否在复杂的宇宙环境中准确确定自身的运动和位置信息。在太空活动这一特定背景下,这种性能综合包括了体积性能和精度性能。具体而言,轻量化、高精度的陀螺仪可以为卫星节省更多宝贵的有效载荷空间,为超高精度、超高稳定性的飞行姿态控制提供重要前提。用于卫星的陀螺技术经历了三代发展:第一代陀螺是基于牛顿力学的转子陀螺,第二代陀螺是基于波动光学的光学陀螺,第三代陀螺是微机电(MEMS)陀螺仪。与前两代陀螺仪相比,MEMS陀螺仪成本低、体积小、可靠性高。它的出现,使得卫星姿控系统的小型化和低成本开发成为可能。但是,由于自身工作原理的限制,近年来转子陀螺、光学陀螺和微机电陀螺都遇到了瓶颈,精度提高缓慢,并且在新体制卫星载荷提出的更严苛的体积-精度要求下表现出一定的局限性。而以量子技术为核心的新型惯性导航技术为惯性导航的发展开辟了一个新的技术领域。由于其在各项指标数据上的优越性,引起了世界各国的广泛关注。

其中,量子体制的陀螺仪中最具代表性的是原子陀螺和量子涡旋陀螺。以原子干涉陀螺和原子自旋陀螺为代表的原子陀螺是一种全新的惯性测量仪器,以其超高的精度和灵敏度潜力受到越来越多国家的关注。但是,鉴于未来导航领域同时对陀螺仪的精度、体积和启动速度提出极高的要求,原子自旋陀螺仪和原子干涉陀螺仪都存在一些固有的缺陷,难以同时满足超高精度和微小体积的要求。近年来,人们逐渐发现了某些准粒子的玻色-爱因斯坦凝聚体(Bose-Einstein Condensates, BEC)中自发产生的量子化涡旋具有陀螺特性。BEC的超流动性及其丰富地存在于准粒子间的非线性作用,如可操控性、相位印刻、复杂涡旋叠加效应等具有巨大潜在应用价值的特性,逐渐引起人们的关注^[3-9]。

2003年, Hodby 和 Hopkins 等人通过测量剪式振荡的进动速率,首次观察到气态 BEC 中涡旋的陀螺效应^[10]。这标志着 BEC 涡旋与惯性测量领域的交集的产生。2012年, Thanvanthri 和 Kapale 等人提出了一种基于冷原子 BEC 系统的超稳定物质波陀螺模型,该模型利用基于轨道角动量(Optical-Angular-Momentum, OAM)传递的叠加涡旋的 Sagnac 效应来精确测量系统的旋转速率^[11]。在此基础上,2016年, Moxley 和 Dowling 等人提出了一种基于激子极化激元凝聚(一种“电子-空穴-光子”耦合而成的准粒子在泵浦光作用下形成的凝聚体)的陀螺模型^[12]。该模型

描述了这样一个物理过程: 通过叠加态涡旋光相位印刻和泵浦作用, 形成激子极化激元的自发干涉, 再结合利用激子极化激元的超流特性, 实现可直接观测的超高灵敏度的陀螺效应^[13-15]。2020 年, Jiahuan Ren 等人在有机物材料中实现了室温下激子极化激元 BEC 的产生, 这为常温量子器件的研制提供了新的途径^[16]。

2016 年, 针对现有陀螺仪精度和体积之间的突出矛盾, 结合最新的研究成果, 笔者所在课题组提出了基于室温半导体材料的量子涡旋陀螺仪的概念^[17]。这一概念与未来卫星等航天载体对陀螺高精度、小体积、快速启动的迫切需求不谋而合。量子涡旋陀螺利用涡旋光操纵半导体微腔内的激子极化激元凝聚体, 使其产生超流特性的叠加态涡旋。以室温下半导体微腔中激子极化激元凝聚体的叠加态涡旋的陀螺效应为基础, 有望实现一种基于半导体微腔激子极化子的新型系统量子涡旋陀螺。目前, 关于半导体微腔激子极化子 BEC 的形成和操控的理论及实验研究不断涌现, 但这些工作很少专门针对量子涡旋陀螺, 导致与影响量子涡旋陀螺有效实现相关的许多物理本质还有待发现, 许多关键问题有待回答, 一些关键边界条件尚未确定。文中采用 Runge-Kutta 差分法和 FDTD 有限元法对量子涡旋陀螺的激子极化激元 BEC 体系进行了建模。通过对几个关键参数的分析, 得到了维持量子涡旋陀螺 BEC 系统稳定性的一些边界条件。这些工作为量子涡旋陀螺工程样机的研发提供了重要的参考意义。

1 理论与数值建模

激子极化激元是在半导体微腔中在一定条件下出现的一种准粒子。这种准粒子是激子(强耦合作用下的电子-空穴对)与光子的耦合。它的粒子自旋符合玻色-爱因斯坦统计。在量子涡旋陀螺的概念下, 激子极化激元被囚禁在一个具有圆周对称性的半导体微腔中。微腔的上下表面为分布式布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)。这样, 一定波长的泵浦光就可以在微腔内来回振荡, 形成平板形法布里-珀罗腔。光子在微腔中来回振荡的传播模式称为腔模。这样可以在微腔中形成激子-光子强耦合, 使它们在极化作用下形成“激子极化激元”。当泵浦光

超过一定阈值时, 这些激子由于其强烈的非线性相互作用, 能量会逐渐减低到基态, 形成 BEC。通过携带 OAM 的涡旋光对这种凝聚态进行操纵, 可以得到量子化的叠加态涡旋, 这种量子化的叠加态涡旋可以表征 BEC 体系在惯性系下显示出的陀螺效应。

如图 1 所示, 考虑陀螺仪的旋转特性, 笔者研究了光驱动下圆周对称平面半导体微腔中激子极化激元凝聚的演化过程。激子极化激元场分布可以看做是激子场和光子场相互耦合形成的, 具有典型的双分量结构。但是, 它同时又是独立的, 因此, 根据研究对象的不同, 研究激子极化激元的激发特性可以从两个方面着手, 即双分量模型和单分量模型。

这里用色散关系来描述微腔中激子和光子之间的能量耦合。色散关系由下列数学表达式给出:

$$H = \int d^2r \sum_{i,j}^{(X,C)} \hat{\psi}_i^+(r) [h_{ij} + V_{ij}(r)\delta_{ij}] \hat{\psi}_j(r) + \frac{\hbar g_X}{2} \int d^2r \hat{\psi}_X^+(r) \hat{\psi}_X^+(r) \hat{\psi}_X(r) \hat{\psi}_X(r) + \int d^2r \hbar F_P(r) \hat{\psi}_C^+(r) + H.c \quad (1)$$

半导体微腔中的激子极化激元场可以用激子场 $\hat{\psi}_X(r, t)$ 与光子场 $\hat{\psi}_C(r, t)$ 的耦合来描述。这是一个写在极坐标空间中的双分量模型哈密顿量。 $i, j \in \{X, C\}$ 表示空间坐标, 分别表示激子场和光子场的分量。这些分量满足玻色交换关系, 即:

$$[\hat{\psi}_i(r), \hat{\psi}_j^+(r')] = \delta^2(r-r')\delta_{ij} \quad (2)$$

单个粒子的哈密顿量 h 为:

$$h = \hbar \begin{pmatrix} \omega_X & \Omega_R \\ \Omega_R & \omega_C \end{pmatrix} \quad (3)$$

此时, 激子与光子之间的耦合可以用矩阵中的 Ω_R 项来描述, 称为拉比分裂。光子场的色散关系由以下公式给出:

$$\omega_C(k) = \omega_C^0 + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_C} \quad (4)$$

激子极化激元的色散关系由对角化的单粒子哈密顿量 h 给出, 即:

$$\omega_{UPLP}(k) = \frac{1}{2} \left\{ \left[\omega_X^0 + \omega_C(k) \right] \pm \sqrt{\left[\omega_X^0 - \omega_C(k) \right]^2 + 4\Omega_R^2} \right\} \quad (5)$$

以上是激子极化激元相位刻印的理论基础和实

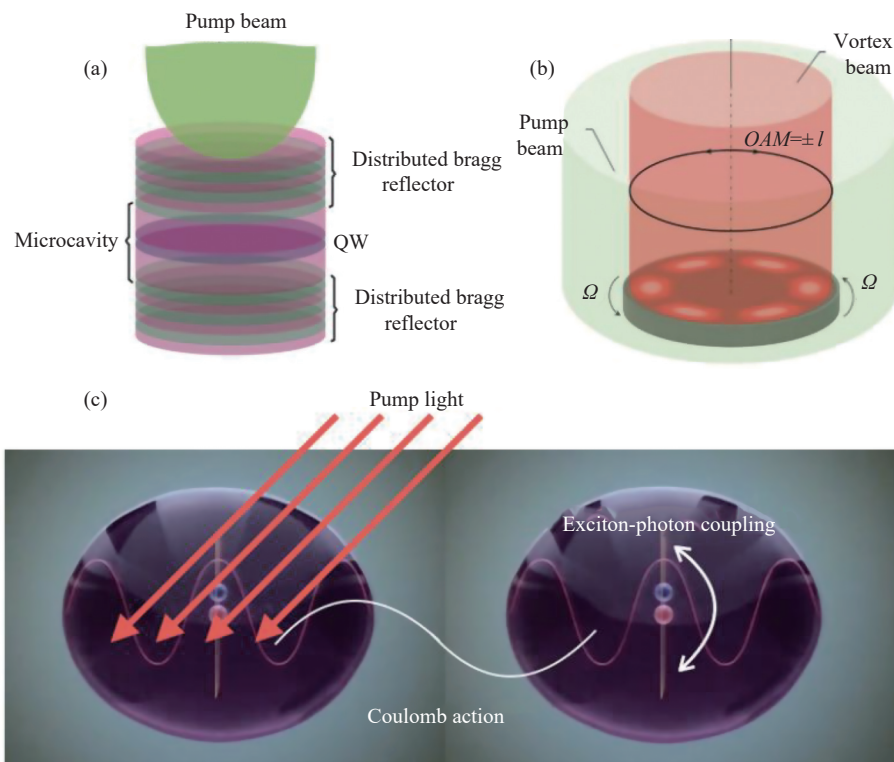


图 1 量子涡旋陀螺半导体微腔中的激子极化激元体系。(a) 泵浦光驱动的平板微腔结构；(b) 激子极化激元在旋转状态下凝聚的体系；(c) 光激发下激子极化激元形成过程^[15]

Fig.1 Exciton polariton system in microcavity of quantum vortex gyroscope. (a) Flat microcavity structure driven by pump light; (b) System of exciton polariton condensates on the rotational state; (c) Formation process of exciton polariton under light excitation^[15]

现原理。其本质在于光子与激子的耦合，而耦合过程就是能量与相位信息传递的过程。

量子涡旋陀螺仪体系的数值模拟，主要研究对象是半导体微腔中受激电子-空穴对的叠加态和演化特征，不包括光子成分。基于此，考虑选择一种单分量模型^[10]：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(r) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_{ext}(r) + g|\psi(r)|^2 + \frac{i}{2} (P(r) - \gamma - \eta|\psi(r)|^2) \right] \psi(r) \quad (6)$$

这也称为 Gross-Pitaevskii (GP) 方程。用波函数 $\psi(r)$ 来描述激子极化激元场，其中 $V_{ext}(r)$ 为激子场感受到的结构势垒； $P(r)$ 为泵浦项； g 表示激子极化激元之间的非线性相互作用； γ 为系统损耗项； η 为激励饱和参数。

为了便于计算各系统参数对陀螺效应的影响，建立了 GP 方程的数值模型，并根据该模型计算和研究了不同初始值和边界条件下激子极化激元的演化过程。数值模型构建方法如图 2 所示。该 GP 方程的数

值模型由主程序和若干子程序组成。其中主程序为系统各变量赋值并定义初始解，然后在 for 循环中实现激子极化激元叠加态涡旋随时间演化的过程的计算，得到 $\psi(r)$ 的概率密度 $|\psi(r)|^2$ 和相位分布随时间演化的结果。每个子程序都可以被主程序调用。差分方法如图 3 所示。

子程序主要包括系统几何参数的定义、仿真变量的定义、势函数 $V_{ext}(r)$ 的定义、四阶 Runge-Kutta 法差分、时域 FDTD、柱坐标下的拉普拉斯算子，以及泵浦光和信号光的数值模型。通过系统变量的定义，将所有变量定义在一个字典中，实现子程序之间的相互调用。数值模型的变量如表 1 所示，均进行了无量纲处理。为了保证变量具有正确的物理意义，并使计算过程正确，对这些变量的取值范围和取值类型进行了指定，具体规定将在下文体现。通过调整系统差分步长和系统仿真总时间来控制计算精度和迭代速度。通过调整激子极化激元系统特性变量可以研究失谐、非线性相关因子、驰豫与饱和因子等重要系统特性对系

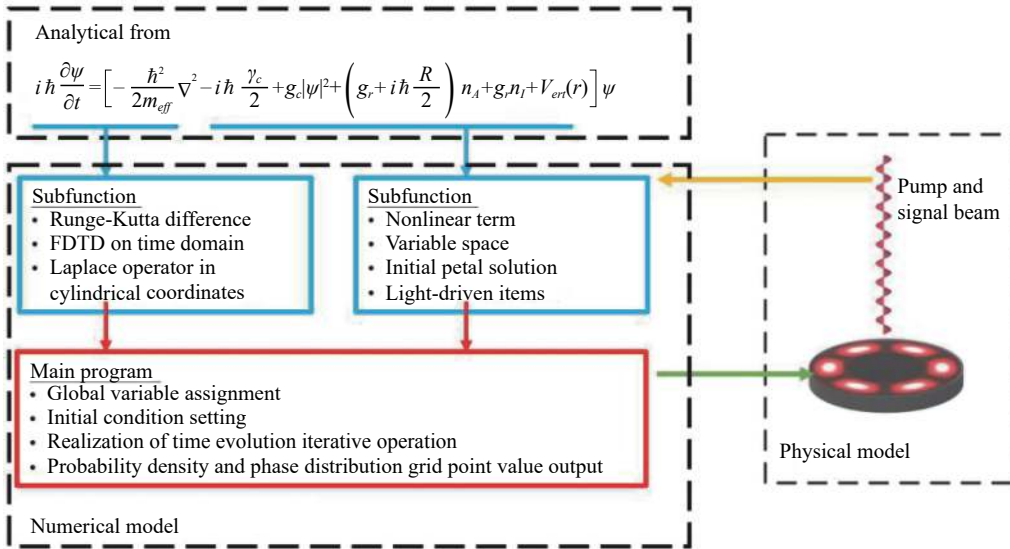


图 2 数值模型构建方法

Fig.2 Numerical model construction method

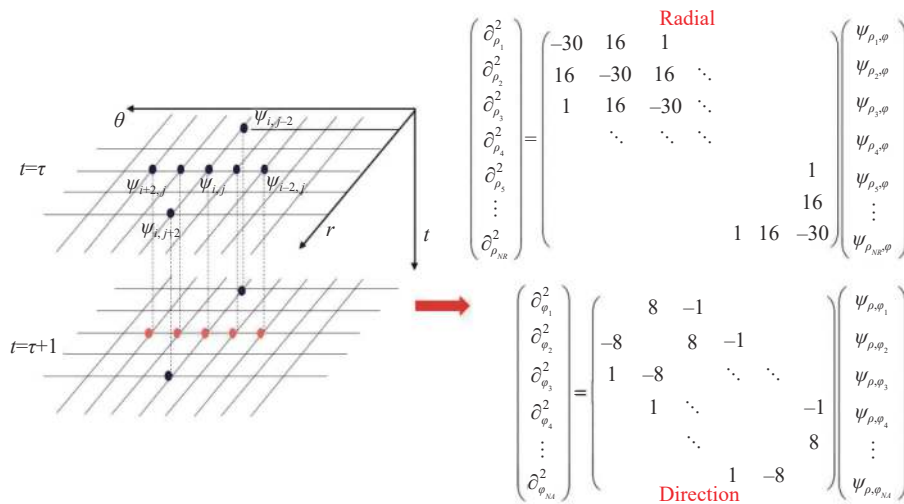


图 3 数值模型差分方法

Fig.3 Difference methods in numerical models

表 1 数值模型的关键参数及参数含义

Tab.1 Key parameters of the numerical model and the corresponding parameter meaning

Important parameters	Parameter meaning	Important parameters	Parameter meaning
t_0	Time step	n_t	Calculate the total time
t_order	Time difference order	I_{OAM}	Topological charge number
N_{DIM}	Radial lattice number	N_{ANGLE}	Angular lattice number
r_1	Microcavity inner diameter	r_2	Microcavity outer diameter
D_R	Radial lattice length	D_A	Angular lattice point length
M_{eff}	Effective mass	g	Nonlinear interaction
γ	Inherent loss of system	η	Saturation compensation term
P_w	Pump light size	$P_{amplitude}$	Pump light intensity
r_0	Pump optical center	r_w	Light center
$nr_{halfwave}$	Radial half wavelength number	φ_0	Initial wave function

统演化过程的影响,并以此进一步求出系统稳定或失稳的边界值。此外,通过调节泵浦光的参数,可以研究不同结构和不同强度的泵浦光对系统稳定性的重要影响。

2 量子涡旋陀螺仪的关键参数分析

量子涡旋陀螺仪的激子极化激元体系实际上是一个驱动耗散型的动力学系统。由于各种因素的干扰,系统的弱动力学平衡会被打破,从而失去产生陀螺效应的可能性。文中主要从泵浦光和信号光的几何参数和强度分布以及微腔的材料参数两个方面分析了量子涡旋陀螺仪的 BEC 体系。主要分析了这两个参数对叠加态系统演化过程、实空间分布和相位分布的影响,验证了上述数学模型的可行性。

2.1 环型泵浦光几何参数与量子涡旋陀螺仪演化特性的关系

量子涡旋陀螺仪的工作区域是一个嵌入在一个平坦的微腔中圆形对称的量子阱。需要在叠加态涡

旋的“花瓣状”条纹区域周围产生环形泵浦,将激子连续泵入热激子库,建立一个“泵浦-弛豫”的过程。因此,环形泵浦光的几何参数已成为影响量子涡旋陀螺仪演化和稳定性的关键因素。这部分主要研究了环的宽度和环直径的影响。

如图 4 所示,当环形泵浦光的半径沿径向变化时,激子极化激元 BEC 叠加态涡旋体系的演化过程明显不同。这里时间单位是 \hbar/meV , 对应于物理时间 $6.582 \times 10^{-13} \text{ s}$ 。下文都将用这个时间单位来描述演化时间。根据计算结果可以得出,当泵浦光相对靠近环形微腔内侧时,如图 4 (a) 所示,量子涡旋陀螺仪系统的演化过程存在明显的周期性波动,演化曲线如图 4 (d) 所示。类似的情况发生在泵浦光接近环形微腔的外侧,如图 4(c) 和图 4(f) 所示。当泵浦光处于环型微腔的中心时,如图 4(b) 所示,演化的量子涡旋陀螺仪激子极化激元系统是最稳定的,见图 4 (e)。此外还发现,当泵浦光处于环型微腔中心时,体系叠加态的演化更快地接近稳定。这可以通过比较图 4 (d)、

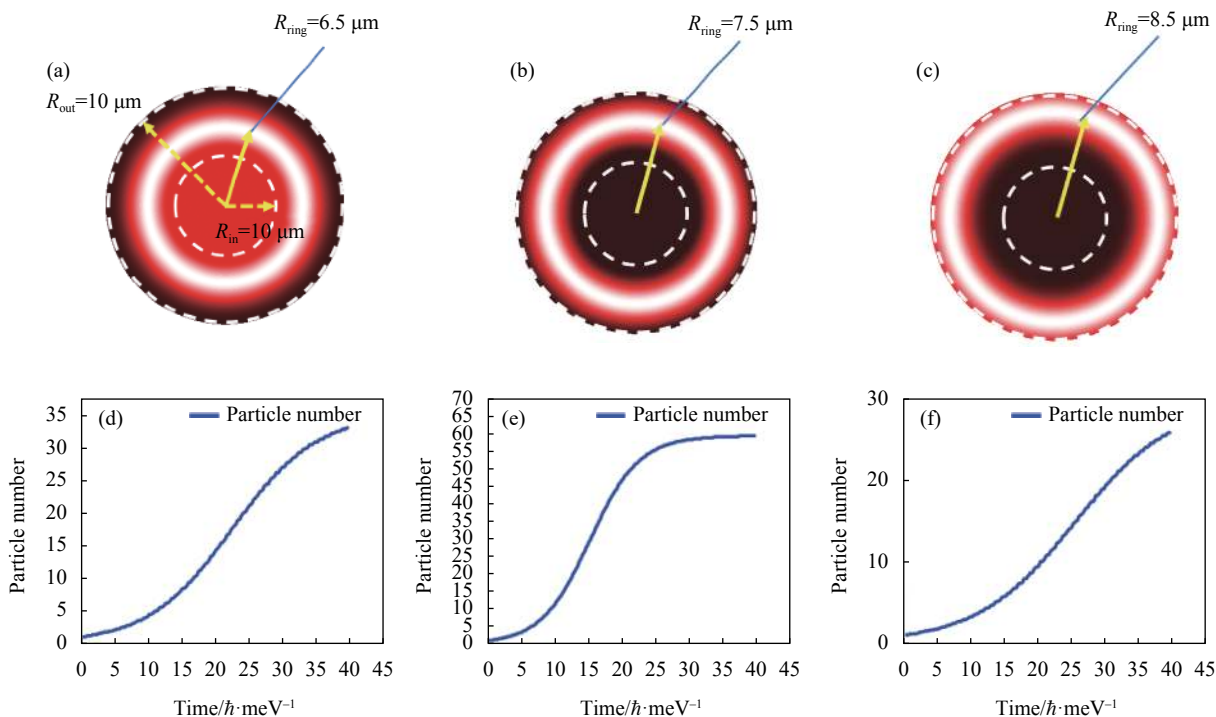


图 4 不同泵浦光位置对量子涡旋陀螺仪演化的影响。(a)~(c) 泵浦光与环形量子阱的相对位置,其中环形量子阱是被白色虚线圈包围的部分,内径为 5 μm,外径为 10 μm;(d)~(f) 量子涡旋陀螺仪体系中激子极化激元随时间的演化规律,演化时间为 40 \hbar/meV

Fig.4 Influence of different pump light positions on the evolution of quantum vortex gyroscope. (a)-(c) Relative position of the pump light and the ring quantum well, where the ring quantum well is the part surrounded by a white dashed circle, with the inside diameter of 5 μm and the outer diameter of 10 μm; (d)-(f) Evolution law of exciton polariton in quantum gyro system with time in period of 40 \hbar/meV

(e)、(f) 的纵坐标, 借助数学模型发现, 当泵浦光的位置在环型微腔的中心时, 体系的演化是最好的, 此时径向物质波容易发生干涉产生叠加态花瓣, 这也有助于叠加态涡旋的稳定演化。

2.2 泵浦光与信号光的相对关系对 BEC 系统的影响

量子涡旋陀螺仪是一种全光操控的陀螺仪。叠加态涡旋的形成在于泵浦光的能量泵浦和涡旋光轨道角动量传递的双重作用。在研究泵浦光几何尺寸和强度对系统演化特性影响的基础上, 有必要研究泵浦光和信号光对叠加态系统的组合效应。

可以明显地发现, 泵浦光的强度和宽度对激子极化激元体系的演化和稳定性有影响。图 5 中右侧标度 0 代表环形微腔中的激子极化激元 BEC 体系随时间演化最终在数学计算上会发散, 即“不稳定”, 1 则代表“稳定”。这一稳定性判别方法通过 GP 方程线性化后求得的通解再代入引入微扰非线性项的方程中求出特解, 并将算符对角化, 提取特征值, 对特征值虚部的符号判断得来。那么从三维图则可以反映泵浦光强度-尺寸对环形微腔中的激子极化激元 BEC 体系稳定性的联合影响, 以及泵浦强度-涡旋光(信号光) 强度对激子极化激元 BEC 体系稳定性的联合影响。从图 5 (a) 中可以看出, 当泵浦光的宽度小于一定范围时, 泵浦光的强度对叠加态涡旋的稳定

演化有显著的影响。根据计算, 在能量密度允许的情况下, 泵浦光直径应保持在势阱直径的 10 倍以上。此时系统将处于非常稳定的状态, 泵浦光强的变化对系统的稳定性影响相对较小。此外, 研究了泵浦光和信号光(涡旋光) 对叠加态涡旋系统的共同影响, 如图 5 (b) 所示。泵浦光和信号光对系统演化和稳定性的影响近似线性。然而, 这里的信号光强度远远高于泵浦光。当信号光强度与泵浦光强度之差小于 200% 时, 无法计算出信号光对系统稳定性的影响。

随后, 研究了泵浦光与信号光的相对位置对激子极化激元叠加态体系演化的影响, 如图 6 所示。在第一种情况下, 当泵浦光(半径为 15 μm) 完全覆盖半径为 10 μm 的信号光时, 激子极化激元叠加态涡旋相对稳定; 叠加态涡旋的干涉花瓣分布区域随时间周期性振荡, 如图 6 (b)~(d) 所示。在第二种情况下, 泵浦光的范围(半径为 14.8 μm) 和信号光(半径 15 μm) 几乎是相同的, 叠加态的激子极化激元涡旋也相对稳定, 然而干涉花瓣的振荡区域消失, 花瓣会稳定在一个固定的位置。在第三种情况下, 泵浦光(半径为 7.5 μm) 的范围明显小于信号光(半径为 10 μm), 此时可以发现, 激子极化激元叠加态涡旋发生了明显的变化, 随着时间的推移, 干扰花瓣的区域会显著旋转, 干涉花

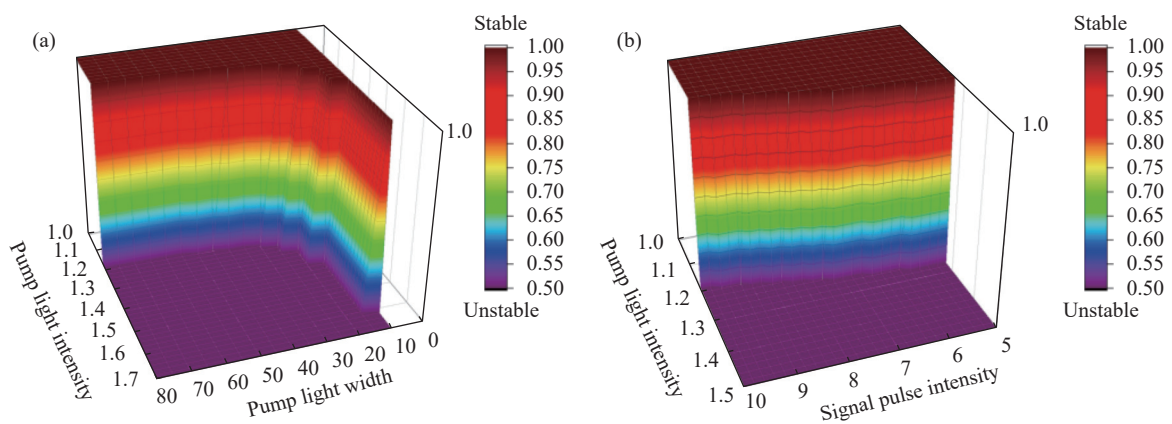


图 5 仅在泵浦光作用下叠加态涡旋的演化稳定性和泵浦光/信号光联合作用下的演化稳定性。(a) 仅在泵浦光作用下, 泵浦光大小和泵浦光强度对系统演化特性的影响; (b) 泵浦光和信号光对涡旋叠加状态的联合影响

Fig.5 Evolution stability of the superposition state of the vortex only under the action of the pump light and the evolution stability under the combined action of the pump light/signal light. (a) Influence of pump light size and pump light intensity on the evolution characteristics of the system only under the action of pump light; (b) Joint influence of pump light and signal light on superposition state of vortex

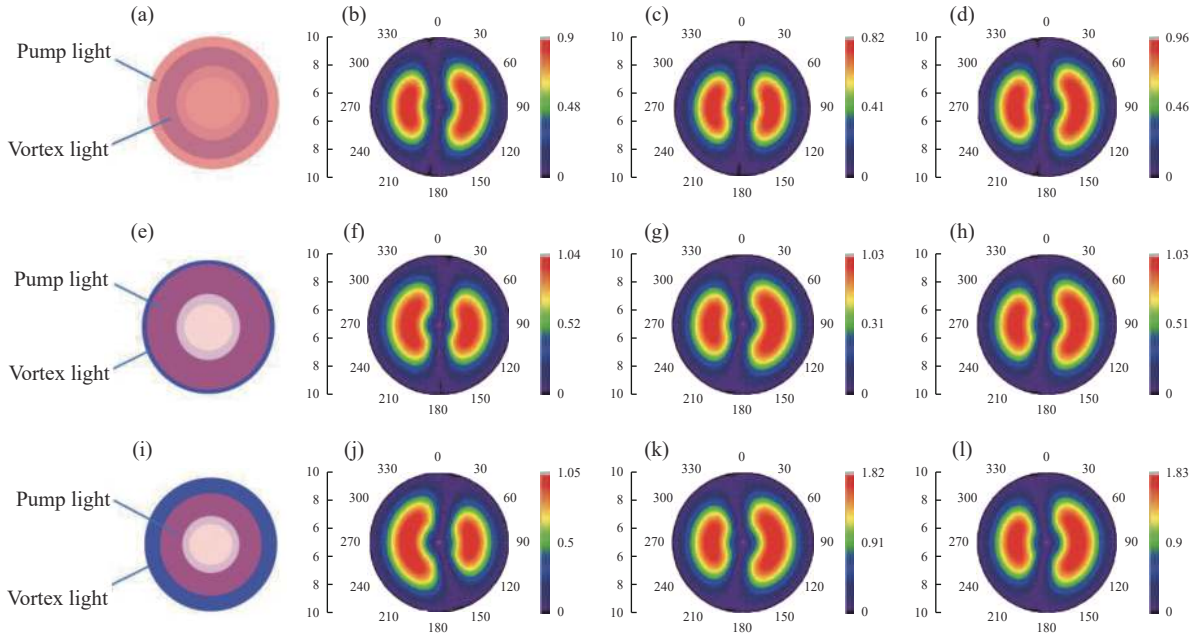


图 6 泵浦光与信号光不同位置关系下量子涡旋陀螺仪激子极化激元叠加态演化特征。(a)、(e) 和 (i) 泵浦光与信号光的不同位置关系 (红色区域为泵浦光, 蓝色区域为信号光); (b)~(d) 轨道角动量 $\pm 1@20 \hbar/\text{meV}$, $40 \hbar/\text{meV}$ 和 $60 \hbar/\text{meV}$ 的涡叠加态; (f)~(h) 轨道角动量 $\pm 1@20 \hbar/\text{meV}$, $40 \hbar/\text{meV}$ 和 $60 \hbar/\text{meV}$ 的涡叠加态; (j)~(l) 轨道角动量 $\pm 1@20 \hbar/\text{meV}$, $40 \hbar/\text{meV}$ 和 $60 \hbar/\text{meV}$ 的叠加态涡旋

Fig.6 Evolution characteristics of the superposition state of the exciton polarization exciton of the quantum vortex gyroscope under the different positional relationship between the pump light and the signal light. (a), (e) and (i) Different positional relationship between pump light and signal light (the red area is pump light, and the blue area is signal light); (b)-(d) Vortex superposition state with orbital angular momentum $\pm 1@20 \hbar/\text{meV}$, $40 \hbar/\text{meV}$ and $60 \hbar/\text{meV}$; (f)-(h) Vortex superposition state with orbital angular momentum $\pm 1@20 \hbar/\text{meV}$, $40 \hbar/\text{meV}$ and $60 \hbar/\text{meV}$; (j)-(l) Vortex superposition state with orbital angular momentum $\pm 1@20 \hbar/\text{meV}$, $40 \hbar/\text{meV}$ and $60 \hbar/\text{meV}$

瓣的形状也发生了明显的变化。据此推测: 当泵浦光的边缘落在信号光的作用范围内时, 它所形成的激子库阻碍了叠加态涡旋在微腔中的传播, 这样, 激子极化激元叠加态涡旋的相位就会被破坏。

2.3 材料因素对量子涡旋陀螺仪的影响

文中用来捕获激子的量子阱是基于宽禁带半导体材料, 如 GaAs、GaN、ZnO、卤化物钙钛矿等。在不同的量子阱材料中, 激子极化激元的有效质量因材料的各向异性而不同, 也间接影响激子极化激元体系与腔光子之间的耦合, 可以从色散关系推导出来。此外, 微腔材料在不同的生长和涂层过程中表现出不同的均匀性, 也导致了材料的无序。这种无序会明显干扰量子涡旋陀螺仪的实际应用效果, 因为在不同的干涉区域可能存在不同的耦合强度, 将极大地破坏量子涡旋陀螺仪的稳定相位分布。因此, 从表征材料自然特性的有效质量和表征材料工程特性的无序噪声两

个方面研究这些参数对量子涡旋陀螺仪涡旋叠加体系演化过程的影响。

首先, 考虑不同材料的各向异性引起激子极化激元有效质量的差异。微腔有效质量的差异与激子极化激元和腔光子在微腔中的耦合和能量传递直接相关。这也对应于微腔失谐参数, 该参数是表征微腔材料性能的重要参数。在数值计算中, “mass”(有效质量) 被用来表征失谐。这一定义的理论基础是激子极化激元的色散关系:

$$\omega = \frac{1}{2} \left[E_C(k) + E_X(k) - \sqrt{(E_C(k) - E_X(k))^2 + 4\Omega^2} \right] \quad (7)$$

对其进行泰勒展开, 可得到近似解:

$$\omega = E_{C0} + E_{X0} + \alpha k^2 + \beta k^2 - \sqrt{(E_{C0} - E_{X0} + \alpha k^2 - \beta k^2)^2 + 4\Omega^2} \quad (8)$$

忽略无穷小量, 简化如下:

$$\omega = E_0 + Ak^2 \quad (9)$$

其中,系数 A 可以反映系统的失谐,且 $A \propto \frac{\hbar}{2m}$ 。这样,微腔的失谐可以用有效质量“mass”来表征。为了使其具有实际的物理意义,在计算过程中取 $mass \in (0.1, 10)$ 。

当有效质量处于使系统不稳定的临界值时激子极化激元叠加态的实空间分布及演化特性曲线如图 7 所示。通过数值模型计算出有效质量的临界值为 0.523,图 7 (a)、(c) 为叠加态涡旋 $OAM=\pm 3$ 的实空间分布和演化过程的曲线。当质量减少到 0.523 时会

出现一个现象:经过演化后,由于激子极化激元向中心势垒边缘移动,原本分布在花瓣位置的叠加态涡旋明显减弱。相反,在中心势垒的边缘出现了激子极化激元密集分布的现象。同时,与有效质量为 1 时相比,局域粒子数量显著增加,这意味着系统中激发的激子更多。当有效质量进一步降低到 0.48 时,系统中的激子被急剧激发。相对于质量的临界值 0.523,局域粒子数在演化过程中的极值为 1728.23,该值急剧增加到 102438.9,演化曲线急剧振荡,系统已经失稳,如图 7 (d) 所示。此时,叠加态涡旋消失,所有激子都分布在中心势垒边缘的一个很窄的范围内,如图 7 (b) 所示。

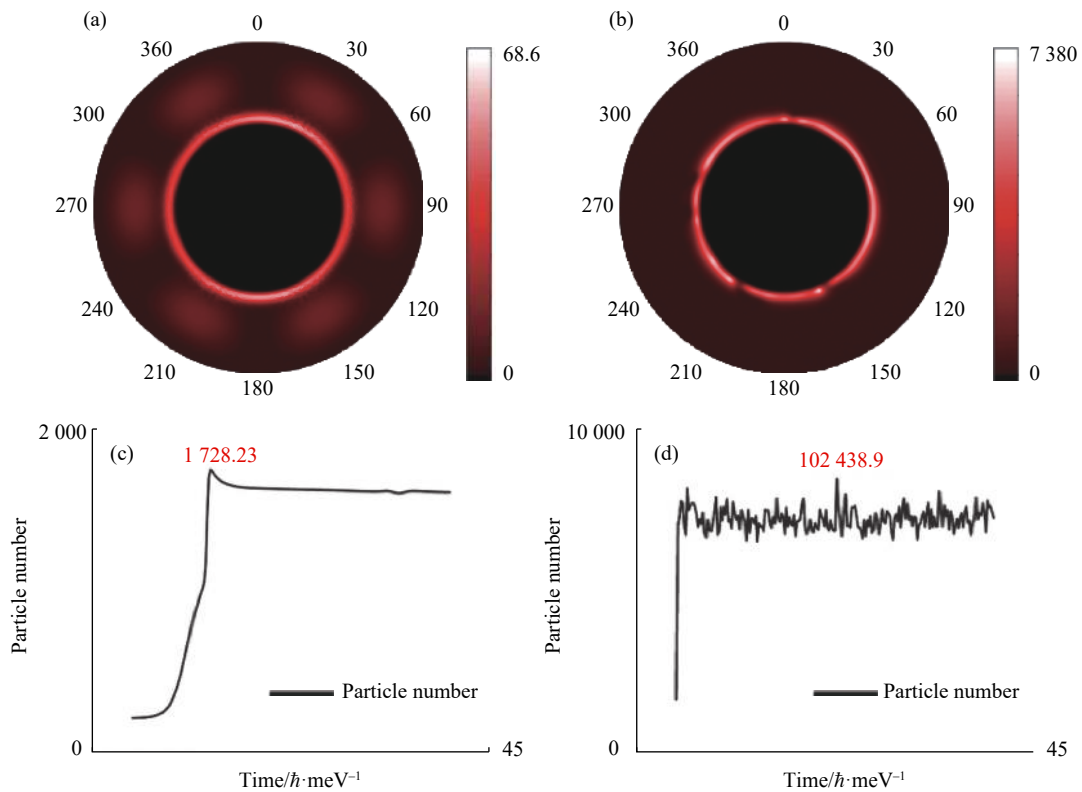


图 7 有效质量达到使系统不稳定的临界值时激子极化激元叠加态的实空间分布及演化特性曲线

Fig.7 Real-space distribution and evolution characteristic curve of the superposition state of the exciton polarization exciton when the effective mass is at the critical value that makes the system unstable

通过对衡量系统失谐参数的变量 $mass$ 的计算和分析,可以得知,失谐参数大于临界值 ($mass$ 小于临界值 0.523) 时,系统会失稳,无法形成稳定的叠加态涡旋。当失谐参数小于临界值 ($mass$ 大于临界值 2.19) 时,虽然系统依然存在花瓣解的叠加态涡旋,但这种叠加态涡旋的相位分布并不稳定,不是最优

解。通过对一组不同 $mass$ 取值的局域粒子数演化曲线的对比可以发现,当 $mass$ 变量过大或过小时,系统都会失稳,处于激子极化激元数量反复增加-耗散的震荡过程。如图 8 所示,可以发现存在一个系统稳定区间,此时 $mass \in (0.7, 10)$ 。

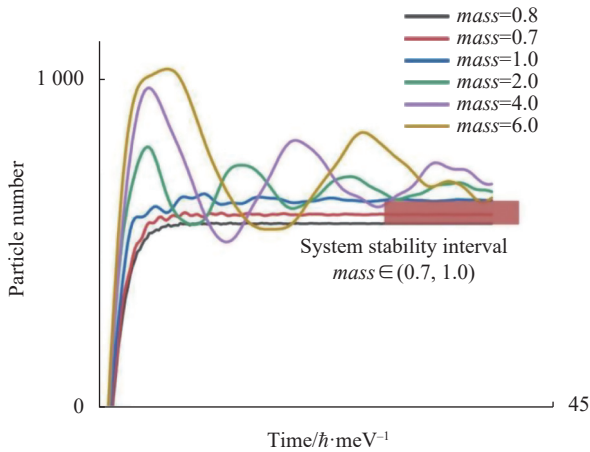


图 8 有效质量与激子极化激元叠加态涡旋演化过程的相关性
Fig.8 Correlation between the effective mass and the evolution process of the superposition state of exciton polarization exciton vortex

3 结 论

文中从平均场近似方程 (Gross-Pitaevskii 方程) 出发,建立了精确的数值模型来描述量子涡旋陀螺仪激子极化激元凝聚态的演化过程。通过该模型,从几个关键参数出发,研究了量子涡旋陀螺仪的驱动因素(泵浦光和信号光)和材料因素在真实物理意义上对系统演化的影响。发现泵浦光的位置和大小与激子极化激元涡旋叠加态体系在环型量子阱中的演化有很强的相关性。此外还发现,当泵浦光的尺寸较大时,涡旋叠加态的演化稳定性与泵浦光强之间的相关性会降低。同时,通过计算确定了信号光和泵浦光对系统的演化有共同的影响。这种联合影响包括光强和相对位置,可以显著影响体系的演化稳定性和激子场的实空间分布。最后,通过表征不同微腔材料的有效质量与性能之间的关系,计算了材料性能与量子涡旋陀螺仪叠加态演化之间的关系,发现有效质量的合理值范围很窄。文中的工作为量子涡旋陀螺仪工程样机的研制提供了参考。

参考文献:

[1] Popov E, Barantsev K, Litvinov A. Theoretical simulation of a signal for the scheme of an atomic spin gyro with optical detection [J]. *Quantum Electronics*, 2019, 49: 169-177.
[2] Barrett B, Cheiney P, Battelier B, et al. Multidimensional atom optics and interferometry [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 043604.
[3] Porras D, Ciuti C, Baumberg J J, et al. Polariton dynamics and

Bose-Einstein condensation in semiconductor microcavities [J]. *Physical Review B*, 2002, 66: 085304.
[4] Saba M, Ciuti C, Kundermann S, et al. Polariton parametric amplification in semiconductor microcavities [J]. *Journal of Modern Optics*, 2002, 49: 2437-2458.
[5] Hartmann M J. Quantum simulation with interacting photons [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18: 104005.
[6] Lenef A, Hammond T D, Smith E T, et al. Rotation sensing with an atom interferometer [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78: 760-763.
[7] Rahimi-Iman A. Towards Polariton Condensates and Devices [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2020.
[8] Wang Chen, Ren Yuan, Wu Hao, et al. Generation of optical vortex and its research progress in inertial measurement (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20200463. (in Chinese)
[9] Ding You, Ding Yuansheng, Qiu Song, et al. Rotational frequency detection of spinning objects at general incidence using vortex beam (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210451. (in Chinese)
[10] Hodby E, Hopkins S A, Hechenblaikner G, et al. Experimental observation of a superfluid gyroscope in a dilute Bose-Einstein condensate [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91: 090403.
[11] 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: 1180-1185.
[12] 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: 053603.
[13] Cristofolini P, Dreismann A, Christmann G, et al. Optical superfluid phase transitions and trapping of polariton condensates [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110: 186403.
[14] Han Q, Wang J, Lu J, et al. Transition between exciton-polariton and coherent photonic lasing in all-inorganic perovskite microcuboid [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7: 454-462.
[15] Chestnov I Y, Kavokin A V, Yulin A V. The optical control of phase locking of polariton condensates [J]. *New Journal of Physics*, 2019, 21: 113009.
[16] Ren J, Liao Q, Huang H, et al. Efficient bosonic condensation of exciton polaritons in an h-aggregate organic single-crystal microcavity [J]. *Nano Letters*, 2020, 20: 7550-7557.
[17] Wu H, Ren Y, Liu T, et al. Rotational dynamics characteristics of planar superimposed vortices of exciton polariton condensates [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(23): 230303.