

非对称微腔研究进展

舒方杰¹ 杨起帆²

(¹ 商丘师范学院物理与电气信息学院, 河南 商丘 476000
² 北京大学人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 最近几年,具有非圆对称边界形状的光学微腔,即非对称微腔,已经成为微纳光子学领域中的一个重要研究方向。非对称微腔打破了常规回音壁光学微腔的边界圆对称性,使得回音壁模式的辐射具有明显方向性,无需借助外部耦合器件即能有效地同环境交换能量,有望应用于制作集成光学器件和实现自由空间光互联。概要介绍了非对称微腔中的最新研究进展,包括高准直定向发射、高效的自由空间光激发、棘轮形非对称腔以及三维非对称腔4个研究方向,概述其基本原理并展望了未来的发展。

关键词 微纳光学;非对称微腔;定向发射;自由空间耦合;棘轮;混沌

中图分类号 O43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060006

Research Progress of Asymmetric Microcavity

Shu Fangjie¹ Yang Qifan²

(¹ College of Physical and Electrical Information, Shangqiu Normal University,
Shangqiu, Henan 476000, China
² State Key Laboratory for Mesoscopic Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Recently, whispering-gallery modes in an optical microcavity gradually become an important area of research owing to its high quality factor, small mode volumes and on-chip characteristics. The cavity without circular symmetry, which is called asymmetric microcavity, is a significant branch of microcavity research. The asymmetric microcavity breaks rounded symmetry, so the cavity has directional radiation. It couples with external environment efficiently. It may be used in integrated optics and free space optical interconnects. We review the research progress of asymmetric microcavity, including directional emission of high collimation, efficient free space excitation, ratchet microcavity, and three-dimensional asymmetric microcavity. The basic principles and the prospect development are also outlined.

Key words micro-nano optics; asymmetric microcavity; directional emission; free space coupling; ratchet; chaos

OCIS codes 130.3120; 140.1540; 140.3410

1 引言

微纳光学谐振腔,包括回音壁模式(WGM)微腔、法布里-珀罗(F-P)腔、表面等离子体腔和光子晶体微腔,能够将光束缚在很小的区域,有效地增强光和物质的相互作用,是微纳光学研究的热点。其中WGM微腔尺寸从几微米到几百微米,具有品质因子Q非常高(最高可达 10^{11}),加工工艺相对容易和可集成等特点,逐渐成为一个重要的研究领域。WGM微腔既可以作为基础理论研究平台又可以实现多种应用,如研究强耦合腔量子电动力学、控制自发辐射^[1]和制造低阈值激光光源^[2]、光通讯用动态滤波器^[3]、光频率梳发生器^[4]、生物传感器^[5]和集成光学陀螺仪^[6]。

早期的WGM微腔为圆对称的球形^[7,8]、圆盘形^[9,10]或者圆柱形,支持沿腔壁内侧传播的WGM。与光纤中光线的全反射传播情形类似,WGM(即受到腔约束的电磁场本征态的空间分布)中的光入射在腔壁上,

收稿日期: 2012-02-16; **收到修改稿日期**: 2012-03-16; **网络出版日期**: 2012-05-05

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划(112300410258)、河南省科技攻关计划项目(092102210343)、河南省自然科学基金研究计划(2011A140021)和商丘师范学院青年科研基金(2010QN15)资助课题。

作者简介: 舒方杰(1980—),男,讲师,主要从事光学微腔方面的研究。E-mail: fjshu@mail.ustc.edu.cn

由于入射角满足全反射条件,光可以被很好地限制在腔内,理论上仅有微弱的隐失波泄漏。腔的圆对称性导致其辐射在腔模平面内是各向同性的。在很多重要应用中,微腔都需要同外界交换能量(耦合),圆对称腔发射能量微弱、发射方向均匀、抽运效率低等缺陷严重地限制了其应用。

提高微腔与外界的耦合效率是目前微腔研究的核心课题之一。比较直接的方法是借助近场耦合器件,其中应用最为广泛的是利用外部器件的隐失场与 WGM 耦合,如使用高折射率棱镜、腐蚀的光纤头、D 型光纤和光纤锥等。另外一种更为自然的方法是从问题的源头出发,在设计微腔本身的几何形状时就打破圆对称结构,使 WGM 的辐射不再是各向同性的,而是定向输出。人们在十多年前发现微小液滴腔在自由落体的过程中赤道面变为四极形,并且观测到出射激光具有很强的方向性^[11]。随后,又制造出当时发射强度最大、可集成的定向发射级联激光器^[12]。通过对这种非对称腔(变形腔)的发射机制进行深入理论研究,人们发现腔内部光线轨迹呈现的混沌行为决定其定向发射的性质^[13]。因此,非对称腔具有很大的实际应用前景和理论研究深度,越来越多的研究人员投入到这个有趣的领域之中^[14~16]。非对称腔不仅可应用于集成光路中器件的自由空间互联,并且提供了一个量子理论研究的平台。类似于量子混沌研究领域中的台球模型,人们可以基于非对称腔研究混沌动力学、混沌输运、动力学隧穿以及光线理论(经典光学)与波动理论(量子光学)的对应关系。此外,光学微腔也是一种开放的体系,其哈密顿量非厄米,人们可以很方便地在实验中研究非厄米体系的独特性质。

关于非对称微腔早期的理论进展和实验进展已有较全面的论述^[1,2,17~20]。本文将阐述非对称微腔研究最新的 4 个发展方向:高准直定向发射腔、高效自由空间光激发非对称微腔、棘轮形非对称腔和三维非对称腔。

2 高准直定向发射

准直性是衡量光束的一个重要参数,小的发散角不仅意味着光束能保持高亮度,还表明微腔能够高效地收集信号。这在微腔用于激光指示器、自由空间光通讯或者光生物传感器时都有重要意义。

如图 1(a)所示,传统的圆盘 WGM 微腔中,由于其圆对称性,腔内任何光线在边界上连续反射的入射角都保持不变,因此在经典理论中起始入射角大于全反射角的光线永远也不会跑出微腔,这也就是圆对称的 WGM 微腔具有非常高的 Q 值的原因。而在非对称的微腔中,光线在腔内全反射的角度不再恒定不变,一部分光线在多次反射后的入射角小于全反射角,因而这部分光线会以折射方式发射到腔外[图 1(b)],使得非对称微腔的 Q 值大大降低。在较大的腔中(即腔尺寸远大于波长,忽略光的波动性质),腔内能量的泄漏可以根据光线轨迹来预测。显然,腔定向发射的位置和方向仅由其折射率及边界形状决定,在特定折射率下设计恰当的腔形,可以让微腔仅在边界上有限的区域有较强的能量泄漏[图 1(c)],对应远场特定角方向上的较亮光斑[图 1(d)]^[13],这就是非对称腔的定向发射。已发现多种非对称微腔既有定向发射又保持较高 Q 值,但是因为光束近似切向出射,所以它们发出的光束准直性差,远场发散角(远处的光斑以微腔为中心张开的角度)一般超过 10° ^[12,21~26]。

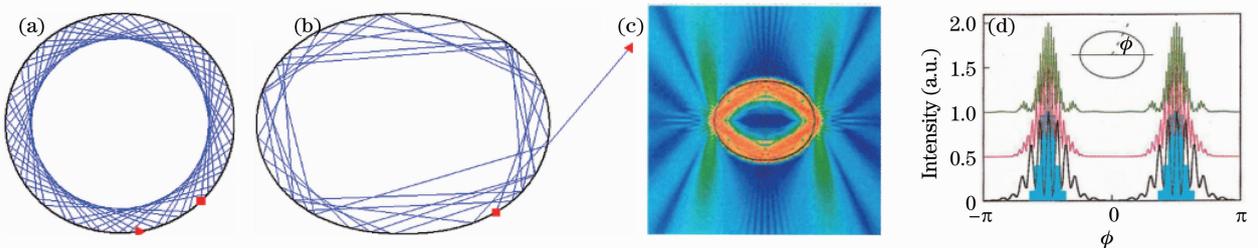


图 1 (a)圆盘腔中的 WGM 光线轨迹;(b)四极腔中的光线轨迹;(c)数值模拟得到的非对称腔模式;(d)三种模式的远场分布图

Fig. 1 (a) Ray trajectory of WGM in circular micro-disk; (b) ray trajectory in quadrupole microcavity; (c) false-color representation of the field intensity determined from the numerical solution; (d) far-field plots of the intensity of three resonances

最近,人们在实验中发现花生形的微腔可以实现高准直的定向发射^[27]。如图 2(a)所示,该腔由内外两层材料组成,内核是两根并排光纤构成的“花生仁”,外层包裹上有机或无机材料,包裹材料中可以选择掺杂增益介质若丹明 B。实验发现该类腔可以实现 4 个方向的激光发射,在每个方向上的最小发散角仅 2° 。本课题组在理论上对花生腔进行深入地研究后发现其准直发射特性得益于腔凹陷部位的集光作用和腔边界类似球透镜的会聚作用[图 2(b)]^[28,29]。优化得到折射率为 1.52 的正花生形微腔的理论发散角约为 2.5° ,同实验相符。其中不稳定的双五边形轨道对应的模式是实现准直发射的主模式[图 2(c)]。区别于之前的连续光滑 WGM 腔中的切向发射,这种腔的准直发射来源于光线近轴入射到圆形边界上被边界会聚,其入射及折射角都很小。而在之前研究的近圆形变形腔中,出射光大多与出射点的边界相切,准直性取决于折射临界线附近的非稳定固定点对应的流形的位置,很难实现高准直性。

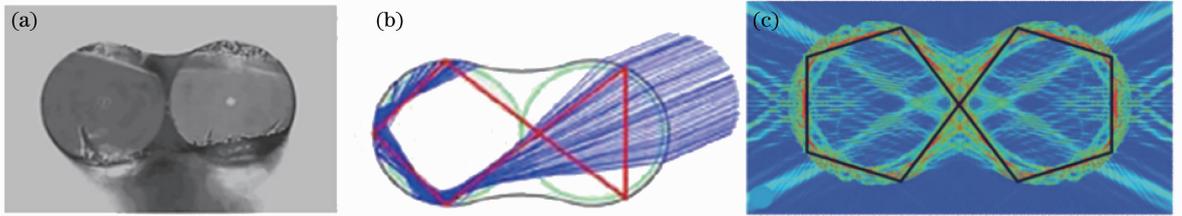


图 2 花生腔。(a)实验制作光纤腔的横切面;(b)展示准直发射机理的光线示意图;(c)花生腔中的双五边形模式
Fig. 2 Peanut-shaped microcavity. (a) cross section of a peanut-shaped microcavity; (b) ray trajectories forming a collimated broad ray beam; (c) near-field pattern of double-pentagon mode

应用边界透镜原理,也可以引入缺陷来实现微腔的高准直定向发射。在普通的圆盘腔附近放置纳米颗粒^[30]或者在其边界上去掉一小部分,都相当于引入点缺陷。在这种情况下,光线在盘腔中全反射时会被点缺陷散射,散射的光线再被边界聚焦,实现准直的定向发射。进一步可设计边界上带有一个波长量级的缺口的椭圆盘腔[图 3(a)]^[31]。缺口作为微小的散射体不会破坏腔内 WGM 的高 Q 值,又能通过散射和腔体的会聚作用定向输出[图 3(b)、(c)]。模拟计算得到该激光腔在盘平面内的发散角仅为 5° [图 3(d)],实验测量值也只有 6° 。

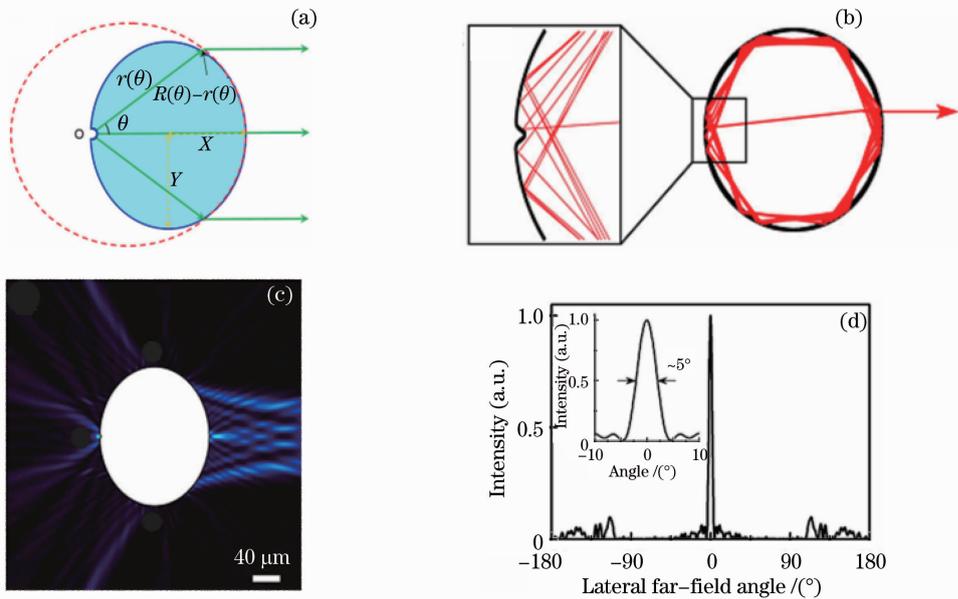


图 3 缺陷腔。(a)带缺口的椭圆盘腔示意图;(b)缺陷腔中典型的光线传播路径;(c)模式的腔外近场分布;(d)远场分布
Fig. 3 Defective cavity. (a) Schematic illustration of the notched-elliptical resonator; (b) ray simulation of WGM dynamics; (c) external near-field intensity distribution of a mode; (d) simulated far-field intensity distribution

3 自由空间光耦合

光线在圆对称的腔内传播时入射角是保角的,那么不仅内部大于全反射角的光线不能折射出腔,从外部折射进入腔的光线也不能被腔囚禁[图 4(a)].因此,在实验中很难通过自由空间的光束有效地激发微腔。而非对称腔既然可以不借助外部耦合器件实现定向发射,那么根据光路可逆原理也应该能够方便地实现自由空间光向腔内的耦合。如图 4(b)所示,外部光线折射进入四极形非对称腔,光线可以在腔内通过全反射走过很长的距离,从而大大增强了入射光和腔模的耦合长度,使腔内模式能够在外场的激发下获取谐振能^[32]。

实验中用透镜将激光束聚焦到非对称微腔上,透射光被探测器收集后送往频谱分析仪[图 4(c)].调谐激光器的频率,如果在微腔的谐振频率附近的话,那么通过频谱分析可以得到透射光有一个洛仑兹线形的波谷[图 4(d)],这表明当激光频率与微腔模式的频率匹配时,一部分入射激光的能量已经耦合进入微腔^[33]。

这种自由空间耦合方式由于其独特的优势而被很多实验采用,进行了一些很重要的工作:1)用可调谐的窄光束在与光纤垂直的平面内折射进入横断面为四极形的光纤腔,发现出射光中只含有满足干涉增强谐振条件的频率成分^[34]。用几何光学分析腔内的周期轨道长度得到的出射光的自由光谱区与实验结果一致。这种微腔可以作为频率删选器使用。2)利用微腔内的光子寿命远大于腔的机械振动周期的特点,通过自由空间耦合激发 WGM 吸收机械振动的能量,可以冷却腔的机械振动到仅有 37 个声子数的超低温能级,实验框图如图 4(c)所示^[33]。3)一种利用脉冲激光简单高效地制作三维非对称腔的方法被开发出来^[35],改进后可制作半圆扁四极扁球腔^[36],该腔保留超高 Q 值(10^8)又能被自由空间光束有效激发,并且可发出定向激光。

另外,用液体柱形非对称腔作为研究对象,采用自由空间光抽运激发腔内激光模式的研究长期而且系统,在实验和理论研究中都取得了一些进展。早期用半径远大于腔线度的宽口径激光束作为抽运光源,实验观测到量子混沌预言的高 Q 值(10^6)“疤痕模式”的存在^[24],另外用光线模拟、波动模拟和实验全面地研究了混沌辅助的非谐振抽运效率和入射方向的关系^[32]。近几年来,采用经聚焦的束腰宽度约为腔半径 $1/20$ 的细光束在腔边界不同位置以不同角度入射抽运,更为细致地研究了自由空间光耦合进入微腔的问题。实验得到的类四极腔的最有效耦合抽运方向与光线追迹给出的定向发射方向一致^[37],这表明经典光线理论在描述微腔的激发时仍然适用。不过在使用经典光线动力学时,需要注意量子力学不确定性原理对变形腔中光线混沌输运过程的抑制作用^[38]。另外,由于光的波动性,直接隧穿耦合以及混沌辅助耦合在实际情况中的作用不可忽略。因此,实验研究还就变形度较大的腔采用折射耦合方式,研究了高 Q 值模式的激发,用混沌辅助耦合模理论给出定量解释^[39]。然而,关于自由空间激发方式中耦合效率的计算和提高耦合效率等问题还需要理论和实验上的进一步研究。

4 棘轮形非对称腔

之前大部分理论和实验研究都集中于边界呈轴对称形状的腔,这种微腔在实验上比较容易制备,并且利

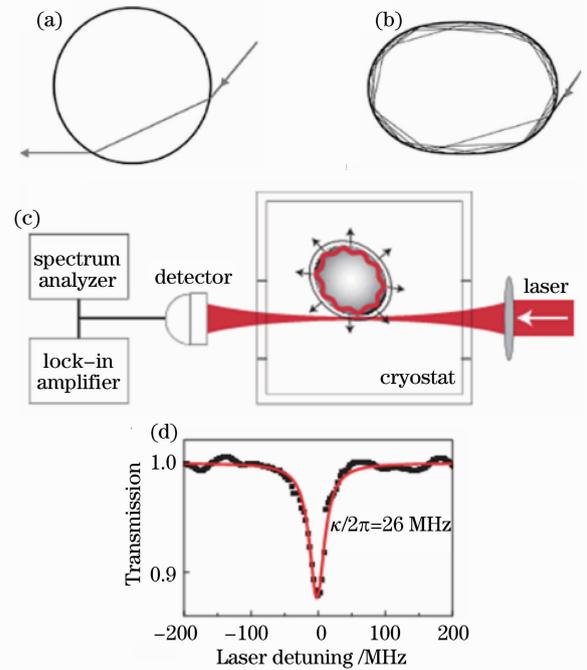


图 4 自由空间耦合的光线示意图及实验图示。(a)圆腔;(b)四极腔;(c)通过自由空间隐失场激发变形球腔的 WGM 实现辐射冷却的实验框图;(d)透射谱

Fig. 4 Schematic diagrams of free-space coupling ray simulation and experiment. (a) Circle-shaped cavity; (b) quadrupole shaped cavity; (c) schematic diagram of the experimental setup for radiation-pressure cooling through free-space evanescent excitation of WGM in a deformed silica microsphere; (d) optical transmission spectrum

用对称性,理论分析的难度也会大大降低。然而,人们依然对非轴对称的微腔具有浓厚兴趣。将棘轮腔作为边界形状非轴对称的腔的总称,这一类腔在打破圆腔的圆对称性的基础上进一步破坏腔的镜面反射对称性,即该型腔在镜中的影像不能通过在平面内的旋转操作变回原腔形。棘轮腔和轴对称腔的最大区别是正反转的不对称性,也就是说假如用这种腔形做车轮,那么往前滚动和往后滚动经历的势能变化是不相同的。在正反转对称的微腔中,光在腔内可以有顺时针行走和逆时针行走两种完全相同的形式,而在棘轮腔中正反转行波模式将经历不完全相同的路径。因此,可以期待棘轮腔会具有与众不同的光学模式特性。这类腔形中最有名的要数螺旋形微腔,该腔边界形状在极坐标下定义为

$$r(\phi) = r_0 \left(1 + \frac{\varepsilon}{2\pi} \phi \right). \quad (1)$$

式中 ε 为变形度, r_0 为螺旋腔在极角 $\phi = 0$ 时的半径。在螺旋形微腔的起源文献中^[22],人们首次制作出单方向发射的非对称腔即螺旋腔,分析得出发生谐振的激光 WGM 为顺时针模式,能量通过缺口处的散射耦合到腔外[图 5(a)]。螺旋腔中的周期性轨道至少要有有一个位于缺口处的顶点,用混沌光线动力学方法研究发现腔中的很大一部分谐振模式和这些周期轨道没有关系,所以称为“伪疤痕模”[图 5(a)]^[40]。进一步实验测量半导体螺旋激光腔的发射谱,通过等波长间隔法将谱中的谐振模式分类,分析出螺旋腔的广角发射是各类模式窄角发射叠加的结果^[41]。此外,将螺旋腔和环形腔耦合,利用游标效应可在螺旋腔缺口处输出单频激光^[42,43]。

最近,文献^[44]证实棘轮腔中近简并模式对不正交,并提出边缘光滑的两种新的棘轮腔:非对称蚌形腔和恒宽腔。其中非对称蚌形腔中存在近、远场均单向发射的模式[图 5(b)]。另外,受缺陷腔的启发,在圆腔周围隐失场内粘附两个或者多个不同尺寸的纳米颗粒,这时圆腔和纳米颗粒作为一个整体也可当成一种棘轮腔[图 5(c)]^[45]。研究发现不正交的一对模式具有相同的手性,即正、反转行波成分之比为不等于 1 的一个数。在模式的场分布图中表现为,沿腔边界分布的场不能形成完全的驻波,观察不到场强为零的节点。这种模式分布的手性来源是腔形的非轴对称性,要注意与轴对称腔中通过选择外场耦合方向获得的行波模式相区别。

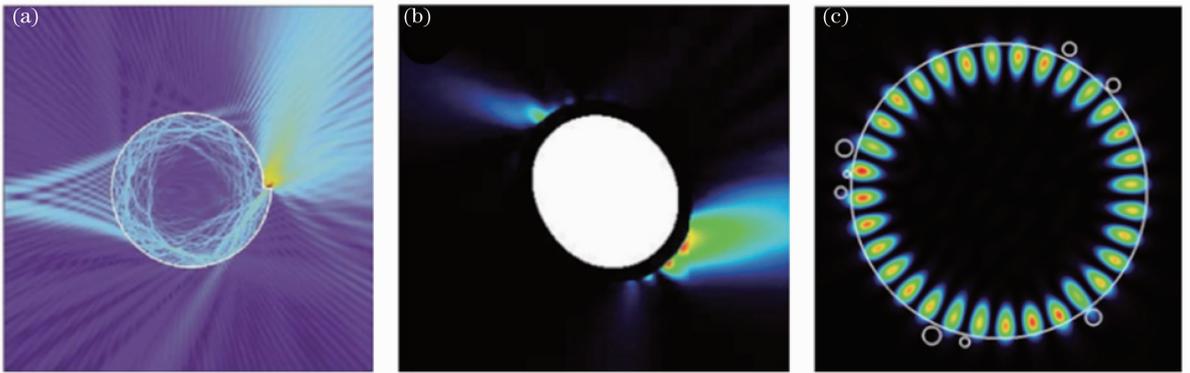


图 5 棘轮腔。(a)波动模拟得到螺旋形微腔的单向发射腔模;(b)非对称蚌形腔的单向发射现象;
(c)粘附有 8 个纳米颗粒的微盘腔

Fig. 5 Ratchet cavity. (a) Mode of the electric field for a calculated quasibound state; (b) exterior mode pattern of an asymmetric limaçon cavity; (c) intensity of a mode in a microdisk perturbed by eight nanoparticles

5 三维非对称腔

为了理论研究的方便,一般将实验上的非对称腔近似到二维平面上,再讨论其中的光学问题。一般情况下,对于厚度远小于半径的微盘腔和大部分高 Q 值模式能量分布在赤道面上的微球腔,都可以忽略光线在垂直平面的自由度。然而,实际的微腔都是三维的,实验中的方向性发射和激发都包含了垂直方向的分布,并且某些情况下二维近似也不成立,所以有进一步考虑非对称腔三维性质的必要性。例如在边缘带缺陷的单向性微盘腔实验中^[31],在与腔平面垂直的方向上测量得到因薄盘衍射作用形成的光斑的发散角为 20° ,远大于盘平面内的 5° 发散角[图 6(a), θ 是盘平面内的角, ϕ 是垂直于盘平面的角],影响立体光束的准直性。

因此,在研究三维微腔的发射特性、无对称轴变形球腔或者高维光线动力学时,采用三维模型是微腔研

究发展的趋势之一。在三维腔中传播的光线比在二维腔中具有更多自由度,其混沌光学路径的性质与二维情况不完全一样,有更丰富的物理内涵。例如:在二维的腔中,其相空间中的各种结构之间是不连通的,方向性发射主要由直接隧穿或非稳定流形引导的折射引起;而在三维情况下,混沌区域则相互连通,这种现象被称为阿诺德扩散。将预制作的两个带杆球腔用二氧化碳激光束缓慢加热融合到一起制成变形球腔,实验结果表明,可以在比二维理论所预言的变形度更小的情况下观察到其定向发射^[46]。

深入研究三维台球腔(闭腔)内的光线动力学对分析腔内模式特性和泄漏机制也很有帮助,人们可以通过三维模拟对微腔侧面形状进行优化,实现三维的准直出射光束。近期,文献^[47]提出一种广义三维跑道型台球腔[图 6(b)],证实该腔内光线轨迹是混沌形态,无测度非零的周期轨道。对流形、李雅普洛夫指数等混沌特性做出讨论,结果表明混沌来源于柱形腔体的散焦作用。最近,这种广义跑道腔被推广为由平面在圆柱体上切出来的三维腔体,如图 6(c)所示^[48],并利用参数空间分析该高维台球腔中的轨道稳定性。另外,还有三维碗状微腔[图 6(d)]^[49]和三维回音壁长瓶腔[图 6(e)]^[50]。

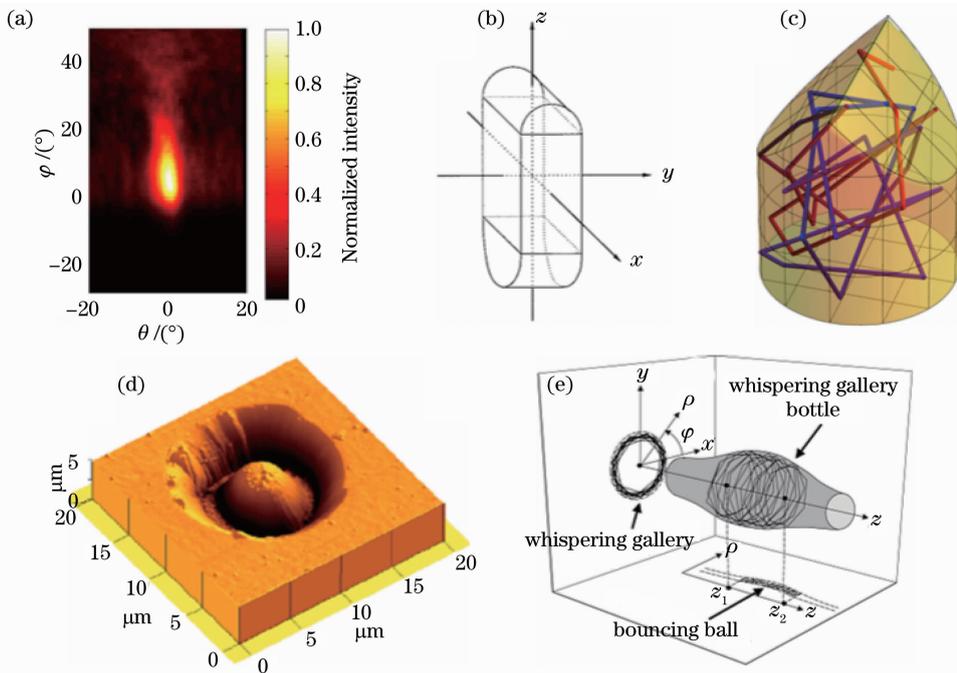


图 6 三维腔。(a)带缺口的椭圆盘腔的二维焦斑照片;(b)三维跑道腔;(c)推广的三维跑道腔和腔内可能的光线轨迹;(d)三维碗状微腔;(e)三维瓶腔

Fig. 6 Three-dimensional microcavities. (a) Measured two-dimensional far-field intensity distribution of a defective microcavity laser; (b) three-dimensional generalization of the stadium billiard; (c) motion of a point particle in a three-dimensional cylindrical domain; (d) a parabolic dome; (e) illustration of the whispering-gallery bottles

6 结 论

光兼具粒子和波的性质,在经典的光线动力学下其粒子性导致了经典混沌,同时其量子特性又引发了隧穿等行为,而这些都可以在非对称腔中观察到,使得非对称微腔具有很多有趣的性质。一方面,通过花生形或者引入缺陷的形式可以实现高准直定向发射,反过来也可以通过自由空间光束实现有效的激发,使非对称腔拥有巨大的实际应用价值。另外一方面,棘轮腔的研究丰富了变形腔的内涵,可以与实验结合研究正反转模式的分裂,开放(非厄米)量子体系的本征模式特性,以及在相空间中混沌辅助的隧穿。而微腔的三维特性是在微腔发展到面向应用阶段时必须要考虑的问题,并且可以采用光线动力学研究高维的混沌行为并优化实际的三维微腔形状。

参 考 文 献

1 K. J. Vahala. Optical Microcavities[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 839~846

- 2 T. Harayama, S. Shinohara. Two-dimensional microcavity lasers [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2011, **5**(2): 247~271
- 3 Yun Binfeng, Hu Guohua, Cui Yiping. Polymer micro-ring resonator filter with high quality factor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1013002
恽斌峰, 胡国华, 崔一平. 高品质因子聚合物波导微环谐振腔滤波器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1013002
- 4 P. Del'Haye, A. Schliesser, O. Arcizet *et al.*. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator [J]. *Nature*, 2007, **450**(7173): 1214~1217
- 5 Li Hao, Shang Lei, Tu Xin *et al.*. Coupling variation induced ultrasensitive label-free biosensing by using single mode coupled microcavity laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(3): 03SC021
李 皓, 尚 磊, 涂 鑫 等. 基于单频耦合微腔激光器的超高灵敏度生物无标记传感[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(3): 03SC021
- 6 Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. Research on Kerr-effect-induced noise of integrated optical gyroscope based on silicon on SiO₂ waveguide resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1013003
于怀勇, 张春熹, 冯丽爽 等. 谐振式硅基二氧化硅集成光学陀螺的克尔噪声研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1013003
- 7 S. X. Qian, J. B. Snow, H. M. Tzeng *et al.*. Lasing droplets: highlighting the liquid-air interface by laser emission[J]. *Science*, 1986, **231**(4737): 486~488
- 8 Yan Yingzhan, Ji Zhe, Wang Baohua *et al.*. Evanescent wave excitation of microsphere high-Q model using tapered fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1789~1793
严英占, 吉 喆, 王宝花 等. 锥形光纤倏逝场激发微球腔高 Q 模式[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 0106006
- 9 S. L. Mcall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher *et al.*. Whispering-gallery mode microdisk lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(3): 289~291
- 10 Wang Jiaxian, Li Junjie, Wu Wenguang *et al.*. Coupled-mode characteristics of coupled-microdisks and single microdisk cavity with an output waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 73~78
王加贤, 李俊杰, 吴文广 等. 耦合微盘及带输出波导的单微盘腔的耦合模式特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 73~78
- 11 J. U. Nöckel, A. D. Stone, G. Chen *et al.*. Directional emission from asymmetric resonant cavities[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1609~1611
- 12 C. Gmachl, F. Capasso, E. E. Narimanov *et al.*. High-power directional emission from microlasers with chaotic resonators [J]. *Science*, 1998, **280**(5369): 1556~1564
- 13 J. U. Nöckel, A. D. Stone. Ray and wave chaos in asymmetric resonant optical cavities[J]. *Nature*, 1997, **385**(6611): 45~47
- 14 V. M. Apalkov, M. E. Raikh. Directional emission from a microdisk resonator with a linear defect[J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **70**(19): 195317
- 15 V. A. Podolskiy, E. Narimanov, W. Fang *et al.*. Chaotic microlasers based on dynamical localization[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2004, **101**(29): 10498~10500
- 16 J. Wiersig, M. Hentschel. Unidirectional light emission from high-Q modes in optical microcavities[J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **73**(3): 031802(R)
- 17 H. E. Türeci, H. G. L. Schwefel, P. Jacquod *et al.*. Modes of wave-chaotic dielectric resonators[J]. *Progress in Optics*, 2005, **47**: 75~137
- 18 S. Feng, T. Lei, H. Chen *et al.*. Silicon photonics: from a microresonator perspective[J]. *Laser Photon. Rev.*, 2012, **6**(2): 145~177
- 19 Xiao Yunfeng, Zou Changling, Li Yan *et al.*. Asymmetric resonant cavities and their applications in optics and photonics: a review[J]. *Front. Optoelectron. China*, 2010, **3**(2): 109~124
- 20 J. Ward, O. Benson. WGM microresonators; sensing, lasing and fundamental optics with microspheres[J]. *Laser Photon. Rev.*, 2011, **5**(4): 1863~8899
- 21 M. Lebental, J. S. Lauret, R. Hierle *et al.*. Highly directional stadium-shaped polymer microlasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(3): 031108
- 22 G. D. Chern, H. E. Tureci, A. D. Stone *et al.*. Unidirectional lasing from InGaN multiple-quantum-well spiral-shaped micropillars[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(9): 1710~1712
- 23 A. Tulek, Z. V. Vardeny. Unidirectional laser emission from π -conjugated polymer microcavities with broken symmetry [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(16): 161106
- 24 S. B. Lee, J. H. Lee, J. S. Chang *et al.*. Observation of scarred modes in asymmetrically deformed microcylinder lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(3): 033903

- 25 J. Wiersig, M. Hentschel. Combining directional light output and ultralow loss in deformed microdisks[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(3): 033901
- 26 S. Lacey, H. L. Wang, D. H. Foster *et al.*. Directional tunneling escape from nearly spherical optical resonators[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(3): 033902
- 27 L. Shang, L. Liu, L. Xu. Highly collimated laser emission from a peanut-shaped microcavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(7): 071111
- 28 S. Y. Lee. Optical Mode Properties of 2-D Deformed Microcavities[M]. Rijeka: Intech, 2010. 273~292
- 29 F. J. Shu, C. L. Zou, F. W. Sun *et al.*. Mechanism of directional emission from a peanut-shaped microcavity[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **83**(5): 053835
- 30 Q. H. Song, H. Cao. Highly directional output from long-lived resonances in optical microcavity[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(2): 103~105
- 31 Q. J. Wang, C. L. Yan, N. F. Yu *et al.*. Whispering-gallery mode resonators for highly unidirectional laser action[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2010, **107**(52): 22407~22412
- 32 S. B. Lee, J. Yang, S. Moon *et al.*. Chaos-assisted nonresonant optical pumping of quadrupole-deformed microlasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(4): 041106
- 33 Y. S. Park, H. L. Wang. Resolved-sideband and cryogenic cooling of an optomechanical resonator[J]. *Nature Phys.*, 2009, **5**(7): 489~493
- 34 M. Hentschel, M. Vojta. Multiple beam interference in a quadrupolar glass fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(22): 1764~1766
- 35 Y. F. Xiao, C. H. Dong, Z. F. Han *et al.*. Directional escape from a high-Q deformed microsphere induced by short CO₂ laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6): 644~646
- 36 Y. F. Xiao, C. H. Dong, C. L. Zou *et al.*. Low-threshold microlaser in a high-Q asymmetrical microcavity[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(4): 509~511
- 37 J. Yang, S. B. Lee, J. B. Shim *et al.*. Enhanced nonresonant optical pumping based on turnstile transport in a chaotic microcavity laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(6): 061101
- 38 J. B. Shim, S. B. Lee, S. W. Kim *et al.*. Uncertainty-limited turnstile transport in deformed microcavities[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(17): 174102
- 39 J. Yang, S. B. Lee, S. Moon *et al.*. Pump-induced dynamical tunneling in a deformed microcavity laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **104**(24): 243601
- 40 S. Y. Lee, S. W. Rim, J. W. Ryu *et al.*. Quasiscattered resonances in a spiral-shaped microcavity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(16): 164102
- 41 M. W. Kim, K. W. Park, C. H. Yi *et al.*. Analysis of broad emission direction in a spiral-shaped microcavity laser[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(23): 4503~4505
- 42 X. Wu, H. Li, L. Liu *et al.*. Unidirectional single-frequency lasing from a ring-spiral coupled microcavity laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(8): 081105
- 43 Wu Xiang, Shang Lei, Li Hao *et al.*. Unidirectional single-frequency whispering-gallery modes lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(2): 15
吴翔, 尚磊, 李皓等. 单频单方向回音壁模式微腔激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(2): 15
- 44 J. Wiersig, A. Eberspacher, J. B. Shim *et al.*. Nonorthogonal pairs of copropagating optical modes in deformed microdisk cavities[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **84**(2): 023845
- 45 J. Wiersig. Structure of whispering-gallery modes in optical microdisks perturbed by nanoparticles[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **84**(6): 063828
- 46 S. Lacey, H. L. Wang. Directional emission from whispering-gallery modes in deformed fused-silica microspheres[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(24): 1943~1945
- 47 T. Rapenbrock. Numerical study of a three-dimensional generalized stadium billiard[J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **61**(4): 4626~4628
- 48 T. Gilbert, D. P. Sanders. Stable and unstable regimes in higher-dimensional convex billiards with cylindrical shape[J]. *New J. Phys.*, 2011, **13**(2): 023040
- 49 J. U. Nöckel, G. Bourdon, R. E. Le *et al.*. Mode structure and ray dynamics of a parabolic dome microcavity[J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **62**(6): 8677~8699
- 50 M. Sumetsky. Whispering-gallery-bottle microcavities: 3D etalon[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 8~10