

具有定向出射的回音壁模式聚合物卵形微腔

马晓明¹, 魏鹤鸣^{2**}, 范书振^{3*}, 李永富^{3,4}, 刘兆军^{1,4}, 赵显^{3,4}, 方家熊^{3,4,5}¹ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237;² 上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444;³ 山东大学光学高等研究中心, 山东 青岛 266237;⁴ 山东大学激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237;⁵ 中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083

摘要 基于聚合物材料的回音壁模式卵形微腔,打破了传统微腔的圆对称性,利用微腔边缘波长级的缺口,实现了远场发散角极小的定向出射。通过三维时域有限差分法仿真分析了卵形微腔的回音壁模式及定向输出特性,重点讨论了不同的变形参数对于远场特性的影响。选用最优的变形参数,得到了波长在 536 nm 附近的回音壁模式的近场、远场的光场分布特性,以及缺口尺寸对微盘输出光谱的影响,并将卵圆形微盘结构拓展到卵球形微球结构,进一步缩小了光束发散角(约为 2.5°),其最高的定向出射效率达 93%。该结构不仅可以作为光与物质相互作用的新颖的研究平台,拓展了缺陷变形微腔在定向出射领域的研究范畴,而且有利于推动微型光子器件在生物医学及环境检测等领域的发展。

关键词 激光光学; 回音壁模式; 卵形微腔; 时域有限差分法; 定向出射

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0514001

Whispering-Gallery-Mode Polymer Oval-Shaped Microcavity with Unidirectional Emission

Ma Xiaoming¹, Wei Heming^{2**}, Fan Shuzhen^{3*}, Li Yongfu^{3,4}, Liu Zhaojun^{1,4},
Zhao Xian^{3,4}, Fang Jiexiong^{3,4,5}¹ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;² Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China;³ Center for Optics Research and Engineering (CORE), Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;⁴ Key Laboratory of Laser & Infrared System (Shandong University), Ministry of Education, Qingdao, Shandong 266237, China;⁵ Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract In this paper, a whispering-gallery-mode (WGM) oval-shaped microcavity based on polymers was proposed, breaking the circular symmetry of traditional microcavities, and its wavelength-level notch on the boundary achieved unidirectional emission at an extremely low far-field divergence angle. In addition, the three-dimensional finite-difference time-domain method was used to investigate the WGM and unidirectional emission

收稿日期: 2020-07-15; 修回日期: 2020-09-05; 录用日期: 2020-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(62005153)、上海市自然科学基金(20ZR1420300)、山东省自然科学基金(ZR2017MF038)

* E-mail: fanshuzhen@sdu.edu.cn; ** E-mail: hmwei@shu.edu.cn

performances of the proposed microcavity, especially the influence of different deformation parameters on the far-field properties. With the optimal deformation parameters, the WGM near- and far-field performances of light field distribution near the wavelength of 536 nm were obtained. Besides, the effect of notch size on the output spectrum of the proposed microdisk was also analyzed. Then, extending the oval microdisk to an ovoid microsphere further reduced the beam divergence ($\sim 2.5^\circ$), with the highest unidirectional emission efficiency being 93%. Therefore, the proposed structure can function well as an excellent platform to explore the light-matter interaction, expand the research range of notched microcavities in the field of unidirectional emission, and promote the development of photonic microdevices in the fields of biomedicine and environmental detection.

Key words laser optics; whispering-gallery-mode; oval-shaped microcavity; finite-difference time-domain method; unidirectional emission

OCIS codes 140.4780; 140.3410; 140.3945

1 引言

回音壁模式(WGM)光学微腔在现代光学中扮演着重要角色,近年来越来越受到人们的关注,并被广泛应用于从基础科学到工程物理的实际应用中^[1-6]。在这种微腔中,由于边界上的全反射效应,光波被束缚在腔体内部,大大延长了微腔内的光子寿命,且极大地增强了微腔内光与物质的相互作用,很容易实现高品质光学因子(Q值)。目前,回音壁模式圆对称性的光学微腔已广泛应用于制造超低阈值的微型激光器^[7-8]、光通信器件^[9]以及各类高灵敏度传感器^[10-11]等。然而,受限于其圆形旋转对称结构,造成输出的各向同性,导致出射能量微弱、出射方向均匀以及在自由空间内收集的效率极低,在一定程度上限制了器件在定向出射领域的集成与应用^[12-13]。为此,人们提出了变形微腔^[14-15]的概念,通过打破微腔原有的圆对称性,提高出射的方向性,有利于其在自由空间内高效地收集。

近十年来,随着国内外许多研究团队对于变形微腔的研究不断深入,各种新的变形微腔相继出现,例如螺旋形微腔^[16-17]、体育场形微腔^[18]和花生仁形微腔^[19]等。然而,这些变形微腔在Q值和光出射的方向性之间都存在着相互制约的矛盾,也就是说,如果变形微腔的Q值很高,就无法较好地实现定向出射,反之要获得很好的定向出射,则变形微腔的Q值就无法达到很高。为了在微腔的品质因子和出射方向性之间实现很好的平衡,人们后来提出了蜗牛线形微腔^[20-21],能够实现 10^4 的Q值和 40° 左右的远场发散角,但是它对介质折射率的适应性不强,只适用于折射率在2.7~3.9之间的范围,对于低折射率材料来说并不适用。

为了解决上述问题,各种非对称的面形微腔^[22-25]在变形微腔中脱颖而出,尤其是利用低折射率的聚合物材料制成的微腔,克服了传统的硅材料

对酸和碱溶液的耐腐蚀性很差,需要很高的回流温度,以及对于有机分子和量子点等功能材料并不适用等不足,可以方便地掺杂有机分子和量子点等功能材料,广泛适用于生物医学和环境检测等情况下的应用。最近,Schermer等^[26]提出一种类似“矮鸡蛋”形的聚合物面形微盘,利用交联聚合物的高硬度、高玻璃转移温度以及对酸和碱溶液出色的耐腐蚀性等优点,实现了Q值约为8000,远场发散角为 6° 的定向出射。但是这种微盘的尺寸达到 $160\ \mu\text{m}$,无法适应更小尺度下甚至纳米尺寸下的应用。为了解决上述问题,本课题组在近期的工作中,提出了一种 $10\ \mu\text{m}$ 以下的带有缺口的椭圆微盘^[27],在边缘上设计一个波长级尺寸的缺口,缺口作为微小的散射体既不会破坏腔内回音壁模式的高Q值,又能通过散射和腔体的会聚作用实现高品质的定向输出。优化椭圆的变形参数后,该结构在可见光和近红外区域实现了低至 4° 的远场发散角,最高的出射效率可达84%。但是,在左右变形参数相等的对称椭圆微盘中已很难进一步减小光束发散角,提高出射效率。

本文通过打破传统椭圆微盘的左右对称,在没有增大原有器件尺寸的情况下提出了一种变形的卵圆形微盘,并优化不同变形参数的组合,找到最佳变形微腔结构,将远场光束发散角缩小至 3° ,出射效率提高到87%,同时分析了缺口尺寸对微盘的谐振输出光谱的影响,通过优化缺口尺寸,找到最强谐振峰。然后,进一步将变形的卵圆形微盘的二维结构拓展到三维立体的卵形微球结构,从而实现 2.5° 超低的光束发散角,以及93%的最高定向出射效率。针对这种缺陷变形微腔的研究,不仅可以作为光与物质相互作用的新颖的研究平台,拓展了变形微腔在定向出射领域的研究范畴,而且有利于推动微型激光器和传感器的发展,在生物医学及环境检测等领域有广泛的应用前景。

2 结构和原理

对于常规的椭圆微盘来说,定义椭圆微盘的变形参数,其中 a 和 b 分别表示椭圆微盘的长半轴和短半轴的长度。之所以设计为椭圆形,其一是利用椭圆的聚焦性质,对于任意的折射率 $n > 1$ 的材料来说,平行于椭圆长轴入射的光,会聚焦于入射光对侧的椭圆焦点处;与之相反,从椭圆的一个焦点发出的光,会在焦点对侧的边缘上平行出射^[28],如图 1 中外围点虚线所示。本文在该椭圆(以下称为辅助椭圆)内设计一个带有缺口的对称椭圆微盘,使缺口正好位于辅助椭圆的焦点 O 处,其尺寸与谐振波长相近。图 1(b)~(d)分别为缺陷卵圆形微盘结构在 xy 、 xz 和 yz 平面上的投影图,其中高度为 h ,宽度为 w ,深度为 d 。缺口为半个椭球形,其中心位于辅助椭圆(图中点虚线)的焦点 O 处,因此自缺口入射的光,会在缺口对侧的边缘上平行出射。缺口作为微小的散射体既不会破坏腔内回音壁模式的高 Q 值,又能通过散射和腔体的会聚作用实现高品质的定向输出。其中 $r(\theta)$ 为椭圆微盘上任一点到 O 点的距离, $R(\theta)$ 为辅助椭圆上任一点到 O 点的距离。为了获得最佳的效果,椭圆微盘的边缘要尽可能地接近辅助椭圆,也就是认为 $R(\theta) - r(\theta)$ 可忽略,即 $|R(\theta) - r(\theta)|/R(\theta) \approx 1\%$ 时,在角度 θ 范围内的光

都满足上述的聚焦效应。之所以设计为椭圆形,其二是根据折射定律,椭圆微盘的变形参数与材料折射率之间必须满足以下关系: $\epsilon = (2 - 2/n_r)^{1/2}$,其中 n_r 为微腔材料的折射率,对于本结构所选的聚合物材料对应的变形参数不为 1,也就是说长短轴不相等,为椭圆形结构。之前的工作已经证实对带有缺口的聚合物对称椭圆微盘(如图 1 中虚线所示)能够实现低至 4° 的光束发散角以及 84% 的出射效率^[28]。将对称椭圆微盘变形为卵形微腔之后, $\theta' > \theta$,即可使更多的光满足聚焦效应,从而提高定向出射的效率。确切地说,卵形微腔由左右两个长径比不同的椭圆组成,其中 a_1 和 b 分别表示右侧椭圆的长半轴和短半轴的长度, a_2 和 b 分别表示左侧椭圆的长半轴和短半轴的长度,两个椭圆具有相同的短半轴 b ,以便实现平滑的过渡,因此两个椭圆的变形参数分别为 $\epsilon_1 = b/a_1$ 和 $\epsilon_2 = b/a_2$ 。另外,如上所述,为了获得最大的角度 θ' ,实现最强的定向出射,卵形微腔的右侧椭圆应与辅助椭圆重合,即具有相同的变形参数 ϵ_1 。对于所选的聚合物变形微腔来说, $n_r = 1.52$ ^[29],可以得到相应的变形参数为 0.819,即右侧椭圆微盘的最佳长径比为 0.819。为了配合纤芯直径大多为 $10 \mu\text{m}$ 左右的单模光纤耦合使用,本文将设置 $a_1 = 5.0 \mu\text{m}$,从而得到 $b = 4.1 \mu\text{m}$ 。

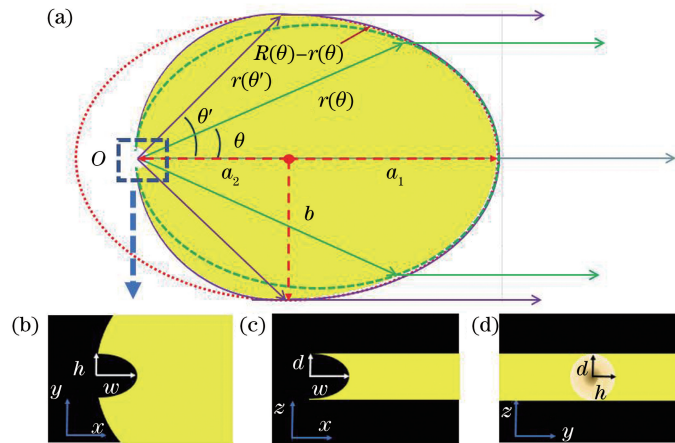


图 1 带有缺口的回音壁模式卵圆形微盘的示意图和投影图。(a)带有缺口的回音壁模式卵圆形微盘和对称椭圆微盘的示意图;(b)~(d)缺口在 xy 、 xz 和 yz 平面上的投影图

Fig. 1 Schematic and projection views of a whispering-gallery-mode oval microdisk. (a) Schematic view of a whispering-gallery-mode oval microdisk and a symmetric elliptical microdisk with a notch; (b)~(d) projections of notch on xy , xz , and yz plane, respectively

根据麦克斯韦电磁边界条件,Mie 和 Debye 为来自球形粒子的散射光提供了完全严格的解,然后通过确定散射系数的分母的根(即超越方程的解)来

找到球形谐振腔的谐振条件^[9]

$$\frac{[n_h x y_m(n_h x)]'}{y_m(n_h x)} = N \frac{[n_r x j_m(n_r x)]'}{j_m(n_r x)}, \quad (1)$$

式中: $j_m(x)$ 和 $y_m(x)$ 分别为第一类和第二类球贝

塞尔函数; $x = nh\omega_0 R/c$ 为尺寸系数; n_h 为基底介质材料的折射率; c 为光速; N 为常数[对横电(TE)模式, $N=1$; 对横磁(TM)模式, $N=n_h^2/n_c^2$]; R 为谐振腔的半径。由此可见, 每个回音壁模式都发生在一个分立的频率上, 并且一般来说, 线宽也不同。要得到该方程精确的解析解通常是不可能的, 因此只能利用数值的或解析的近似值来获得谐振频率。可以利用贝塞尔方程的解析近似得到一个闭式表达式, 用来表示球形谐振腔中回音壁模式的谐振位置和辐射线宽。确切地说, 利用 Lam 近似, 回音壁模式出现在频率 ω_0 时, 要满足以下方程

$$nx \approx \nu + \frac{\alpha_s \nu^{1/3}}{2^{1/3}} - \frac{P}{(n^2 - 1)^{1/2}} + \frac{3}{10} \frac{\alpha_s^2}{2^{2/3} \nu^{1/3}} - \frac{P(n^2 - 2P/3)}{(n^2 - 1)^{3/2}} \frac{\alpha_s^2}{2^{2/3} \nu^{2/3}} + \dots, \quad (2)$$

式中: $\nu = m + 1/2$, m 为谐振级次; α_s 为艾里函数 $\text{Ai}(-z)=0$ 的根; P 为 n (对 TE 模式) 或 $1/n$ (对 TM 模式)。上述方程的第一阶近似为

$$m\lambda_0 = 2\pi R n_r = C n_r, \quad (3)$$

式中: λ_0 为回音壁模式的谐振波长, 也就是光在谐振腔圆周上往返时的相干波长; C 为变形谐振腔的周长。利用这种近似方法, 可以方便地计算变形谐振腔的光学特性。

另外, 微腔中回音壁模式存储的能量 $P(\omega)$ 可以表示为^[30]

$$P(\omega) = P_0 \frac{(\Delta\lambda/2)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\Delta\lambda_{\text{FWHM}}/2)^2}, \quad (4)$$

式中: P_0 为振幅; ω_0 为谐振频率; $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ 为光谱的半峰全宽。Q 值是衡量光学微腔损耗特性的一个重要参数, 其定义是腔中所储存的能量和每个光学周期中消耗的能量的比值, 其大小反映了输出光谱的尖锐程度。通常来说, 在光学微腔中要考虑以下三种类型的损耗: 材料损耗 (Q_{mat})、辐射损耗 (Q_{rad}) 以及表面散射损耗 (Q_{scatt})^[31]。

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{mat}}} + \frac{1}{Q_{\text{rad}}} + \frac{1}{Q_{\text{scatt}}}, \quad (5)$$

式中: $1/Q_{\text{mat}}$ 主要来自于光学微腔材料本身的损耗, 一般这部分损耗非常微小; $1/Q_{\text{rad}}$ 主要是由于光学微腔弯曲的边界造成的本征辐射损耗, 由微腔的直径 D 与谐振波长 λ 的比值决定, D/λ 的值越大, 这部分损耗呈指数趋势减小, 当 $D/\lambda \geq 15$ 时, $1/Q_{\text{rad}} < 10^{-11}$, 其中 D 为微腔直径, λ 为谐振波长, 故 $1/Q_{\text{rad}}$ 可以忽略不计^[32]。因此, 总的 Q 值主要

由散射损耗决定, 也就是说微腔表面边界上的缺陷或粗糙度等本征缺陷引起的瑞利散射所导致的损耗对微腔的 Q 值起决定作用。根据输出光谱, 光学微腔的 Q 值可以近似地用下式计算得出

$$Q = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}}, \quad (6)$$

式中: λ_0 为谐振波长。

3 分析与讨论

利用三维时域有限差分(FDTD)法, 研究卵形微腔的近场和远场输出特性以及定向出射的性能。对计算区域的所有表面均使用厚度为 $1 \mu\text{m}$ 的完美匹配层(PML)作为边界条件。由于该结构具有关于长轴的对称性, 因此可以设置对称边界来节省仿真资源, 并缩短仿真时间。

首先, 考虑卵形微腔为卵圆形微盘的情况时, 如上所述, 已经确定了右侧椭圆的变形参数 ϵ_1 , 现在通过研究左椭圆的变形参数 ϵ_2 变化时的远场出射图来找到最佳的左椭圆变形参数。如图 2 所示, 显然, 只有当 $\epsilon_2 = 1.0$ 时, 才能获得光束发散角最小的最佳定向出射。根据该变形参数, 可以确定左椭圆的长半轴 a_2 的长度与短半轴 b 的长度一样, 为 $4.1 \mu\text{m}$ 。

卵圆形微盘的具体尺寸确定之后, 采用多个偶极子点光源在微盘边缘激发回音壁模式, 其输出光谱图如图 3 所示, 最强谐振峰出现在 536.3 nm 处, 如图 3(a)和(b)所示。根据(3)式可知, 光在回音壁模式光学微腔内的光程必须为波长的整数倍, 满足该基本条件的谐振光在微腔内得到谐振增强, 相邻阶回音壁模式的波长差约为 6 nm , 符合图中光谱的谱线波长差。同时, 优化设计卵圆形结构边缘缺口的尺寸和形状, 使得特定波长的谐振光能在缺口处被散射, 从而在缺口对侧形成特定波长的定向出射。因此, 针对本文提出的结构, 我们设计得到的最强谐振峰在 536.3 nm 附近, 也可以通过放大或缩小微盘的尺寸来调节谐振峰位置, 同时相应地优化缺口尺寸, 实现不同波长的最佳定向出射^[27]。由图 3(c)中插图可知, 谐振波长为 536.3 nm 附近输出光谱的响应曲线的半峰全宽为 0.18 nm , 根据(6)式可得, 该卵圆形微腔的 Q 值大约为 3000。图 3(d)为当卵圆形微盘的变形参数固定, 而缺口尺寸改变时, 微盘在 536 nm 附近的输出光谱响应曲线。由图可见, 当缺口尺寸为 0, 即没有缺口时, 微盘的输出光谱在多个谐振波长下有响应, 形成了 3 个谐振峰。

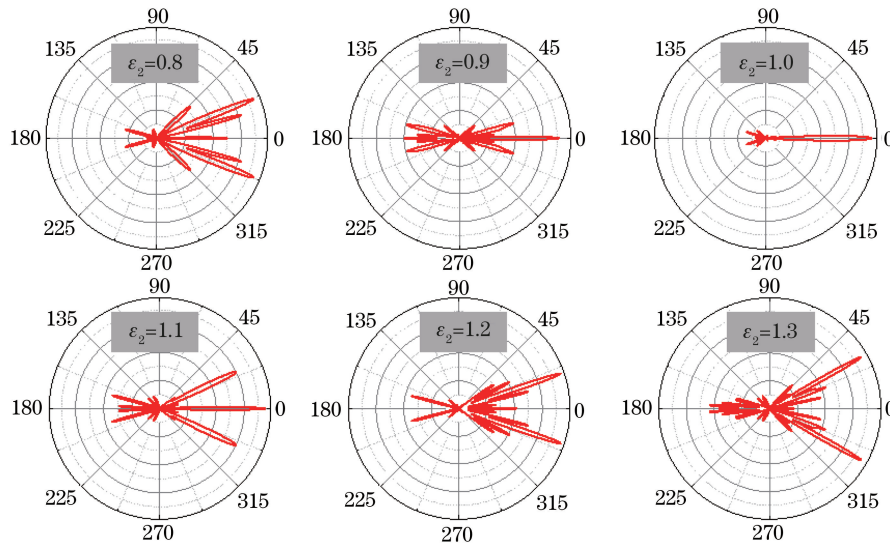


图 2 卵形微腔在不同的左椭圆微盘变形参数 ϵ_2 下的远场出射图

Fig. 2 Far-field profiles of an oval microdisk under different deformation parameters ϵ_2 of the left elliptical microdisk

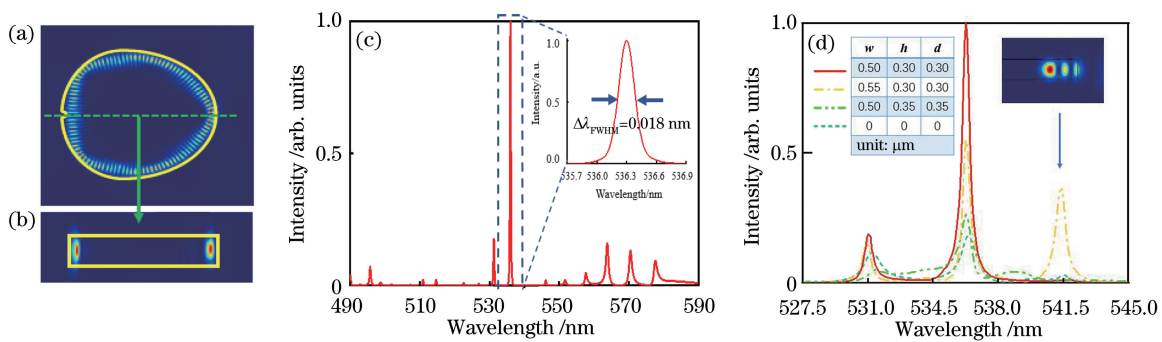


图 3 输出光谱图。(a)卵圆形微腔中的一阶回音壁近场模式图;(b)图(a)虚线处纵剖面的近场模式图;(c)卵圆形微腔的输出光谱响应曲线(插图为虚线矩形中最强谐振峰的放大视图);(d)缺口尺寸变化时,最强谐振峰附近的输出光谱响应曲线(插图为该谐振峰的高阶回音壁模式图)

Fig. 3 Output spectrum. (a) First-order whispering-gallery-mode near-field profile of an oval microdisk; (b) near-field profile of cross section along dotted line in Fig. (a); (c) output spectral response curve of oval microdisk (inset is enlarged view of strongest resonance peak in dotted rectangle); (d) output spectral response curves of around the highest resonance peak under different notch sizes (inset is high-order WGM resonance peak)

而随着加入缺口并优化缺口尺寸后,最适合的波长级缺口尺寸为 $h = d = 0.3 \mu\text{m}$, $w = 0.5 \mu\text{m}$,利用先进的三维激光直写工艺,面内分辨率可达 100 nm ,可以精确地制备这种带有缺口的卵圆形微腔。微腔在 536.3 nm 的谐振得到了明显的增强,有最强的谐振峰,如图 3(d)中插图所示,卵圆形微腔大于该最强峰右侧的峰为高阶回音壁模式,腔内损耗较大,增加缺口后其模式受到抑制,无法形成有效的定向出射,反映在谐振光谱上为该峰被削弱。这种带有缺口的卵圆形微腔特别适合于低折射率的聚合物材料,并且因其克服了传统的硅材料对酸和碱溶液的耐腐蚀性差、需要很高的回流温度、对于有机分子和

量子点等功能材料并不适用等不足,可以方便地掺杂有机分子和量子点等功能材料。采用电子束光刻技术或者采用先进的光学光刻技术,例如基于双光子聚合的飞秒激光直写工艺,其面内分辨率可达 100 nm ,从而可以精确地制备这种带有缺口的卵圆形微腔。

其次,准直性是衡量光束的一个重要参数,较小的远场光束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、自由空间光通信或者光生物传感器时都有重要意义。因此本文通过对比卵圆形微腔和对称椭圆微腔的远场出射情况,来研究卵圆形微腔的定

向出射。如图 4 所示,卵圆形微盘的远场发散角大约为 3° , 小于对称椭圆微盘的远场发散角, 而且出射强度也更高。图 4(b) 为距离变形微腔 1 m 处的半球形远场监视器上得到的远场模式图, 可以看出其远场出色的定向出射能力, 此原理可应用于新型微纳激光器和传感器的设计^[33]。

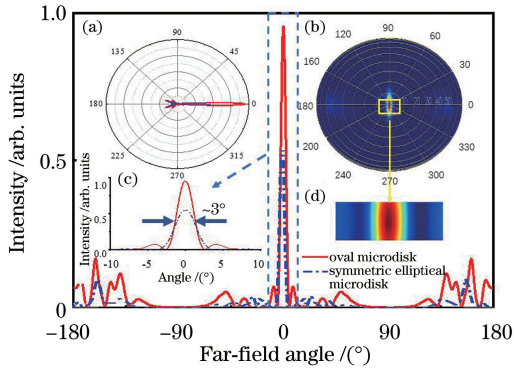


图 4 卵圆形微盘和对称椭圆微盘的远场发散角对比图。
(a) 卵圆形微盘和对称椭圆微盘的远场发散角的极坐标视图; (b) 卵圆形微盘定向出射的远场模式图; (c) 远场发散角中虚线矩形的放大视图; (d) 图 4(b) 中矩形的放大视图

Fig. 4 Comparison of far-field divergence angle of oval microdisk and symmetric elliptical microdisk. (a) Polar plots of far-field divergence angle of oval microdisk and symmetric elliptical microdisk; (b) far-field pattern of unidirectional emission of oval microdisk; (c) enlarged view of dotted rectangle in far-field divergence angle; (d) enlarged view of rectangle in Fig. 4(b)

最后, 光学微腔的三维特性是在微腔发展到面向应用阶段时必须考虑的问题。在上述基础上, 我们将卵圆形微盘绕其对称轴旋转 180° , 得到一个带有缺口的立体的卵形微球结构[图 5(a)], 光线在三维腔中的传播比在二维腔中具有更多自由度, 以及更丰富的物理内涵。由于立体的卵形微球结构过其对称轴上的任意纵剖面的周长与上述卵圆形微盘的周长相等, 因此其输出光谱响应曲线的最强谐振峰位置不变, 如图 5(d) 所示, 但半峰全宽略窄, 根据(6)式可知, 卵形微球结构的 Q 值约为 3600。图 5(b) 和(c) 表示立体的卵形微球结构的远场发散角仅为 2.5° , 同时由图 5(e) 可以看出, 由于立体的卵形微球结构具有旋转对称性, 故其远场监视器中的远场模式图比图 4(b) 的远场模式图更加集中。

为了定量地表征定向出射的方向性, 引入下列定向出射效率方程, 表示为

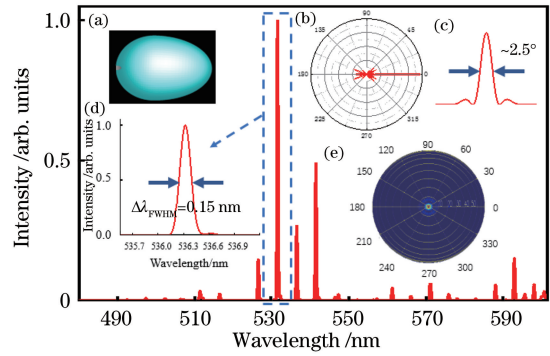


图 5 立体的卵形微球结构的输出光谱响应曲线。(a) 立体的卵形微球的结构示意图; (b) 远场发散角的极坐标视图; (c) 远场发散角的放大视图; (d) 虚线矩形中最强谐振峰的放大视图; (e) 定向出射的远场模式图

Fig. 5 Output spectral response curves of ovoid microsphere structure. (a) Schematic view of ovoid microsphere structure; (b) polar plots of far-field divergence angle; (c) enlarged view of far-field divergence angle; (d) enlarged view of strongest resonance peak in dotted rectangle; (e) far-field pattern of unidirectional emission

$$U = \frac{\int_{-\varphi}^{\varphi} I(\varphi) d\varphi}{\int_{-\pi}^{\pi} I(\varphi) d\varphi}, \quad (7)$$

式中: $I(\varphi)$ 表示远场中电磁通量的角度强度分布。我们将 φ 设置为 30° , 也就是说计算 $\pm 30^\circ$ 角度范围内的出射光强占总出射光强的比例, U 值越高, 则说明该范围内的光强越强, 定向出射的方向性越好。图 6 为对称椭圆微盘、卵圆形微盘和卵形微球结构的定向出射效率与谐振波长之间的关系。如图 6 所示, 对称椭圆微盘、卵圆形微盘和卵形微球结构的出射效率依次升高。因此, 将对称椭圆微盘变为卵圆形微盘之后, 实现了最大程度地与辅助椭圆的

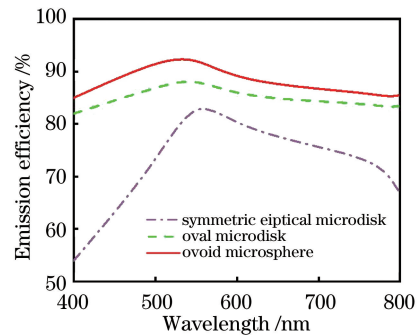


图 6 三种结构的谐振波长与定向出射效率的关系图
Fig. 6 Relationship between resonance wavelengths and unidirectional emission efficiencies of three structures

边缘重合,从而使更多的光聚焦于定向出射,获得了更高的出射效率(约为 87%)。进一步将卵圆形微盘变为卵形微球之后,球体的聚焦效应优于圆盘,在垂直于椭圆面上,得到了 93% 的出射效率。

4 结 论

本文提出了一种利用聚合物材料制成的带有波长级缺口的卵形微腔,打破了传统微腔的圆对称性,实现了远场发散角极小的定向出射。通过三维 FDTD 仿真,得到了最佳变形系数,使整个结构的谐振波长为 536 nm, Q 值为 3000, 实现很低的远场发散角(约为 3°)和高达 87% 的出射效率,同时分析了缺口尺寸对微腔的谐振输出光谱的影响。进而将卵圆形微盘绕对称轴旋转 180°, 得到卵形微球,研究发现,谐振波长保持不变, Q 值为 3600, 其远场发散角更低(约为 2.5°), 出射效率更高(93%)。因此,本文所提结构不仅可以作为光与物质相互作用的新颖的研究平台,拓展缺陷变形微腔在定向出射领域的研究范畴,而且有利于推动微型激光器和传感器的发展,在生物医学及环境检测等领域有广泛的应用前景。

致谢 感谢山东大学光学高等研究中心房常峰老师对本研究的帮助与支持。

参 考 文 献

- [1] Vahala K J. Optical microcavities[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839-846.
- [2] Peng B, Özdemir S K, Rotter S, et al. Loss-induced suppression and revival of lasing[J]. *Science*, 2014, 346(6207): 328-332.
- [3] Lu Q J, Wu G Z, Chen D R, et al. Optimal design and application of surface plasmon polaritons microdisk[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0714002.
卢启景, 吴根柱, 陈达如, 等. 表面等离子体激元微盘的优化设计及应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0714002.
- [4] Ma X M, Wei H M, Fan S Z, et al. Multi-wavelength microresonator based on notched-elliptical polymer microdisks with unidirectional emission[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23928-23935.
- [5] Guo D, Zou C L, Ren H L, et al. Measurement of heat dissipation rate based on optic-thermo oscillations in CaF₂ optical micro-cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0512004.
郭栋, 邹长铃, 任宏亮, 等. CaF₂ 光学微谐振腔中基于光热振荡的热耗散率测量[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0512004.
- [6] Mu Z, Liu C J, Wu X S, et al. Feedback-coupled waveguide microring resonator based on slot structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1213001.
穆洲, 刘春娟, 吴小所, 等. 基于 slot 结构的反馈耦合波导微环谐振器[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1213001.
- [7] Zhang B, Wei W Q, Wang J H, et al. 1310 nm InAs quantum-dot microdisk lasers on SOI by hybrid epitaxy[J]. *Optics Express*, 2019, 27(14): 19348-19358.
- [8] Wang Q J, Yan C, Yu N, et al. Whispering-gallery mode resonators for highly unidirectional laser action[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(52): 22407-22412.
- [9] Wang Z W, Dong G N, Yuan S X, et al. Voltage-actuated thermally tunable on-chip terahertz filters based on a whispering gallery mode resonator[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(19): 4670-4673.
- [10] Ma X M, Fan S Z, Wei H M, et al. Miniature resonator sensor based on a hybrid plasmonic nanoring[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33051-33060.
- [11] Foreman M R, Swaim J D, Vollmer F. Whispering gallery mode sensors[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 168-240.
- [12] Cao H, Wiersig J. Dielectric microcavities: model systems for wave chaos and non-Hermitian physics[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(1): 61-111.
- [13] Yang S C, Wang Y, Sun H D. Advances and prospects for whispering gallery mode microcavities[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1136-1162.
- [14] Nöckel J U, Douglas Stone A. Ray and wave chaos in asymmetric resonant optical cavities[J]. *Nature*, 1997, 385(6611): 45-47.
- [15] Jiang X F, Zou C L, Wang L, et al. Whispering-gallery microcavities with unidirectional laser emission[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(1): 40-61.
- [16] Yang Y D, Zhang Y, Huang Y Z, et al. Directly modulated waveguide-coupled microspiral disk lasers with spatially selective injection for on-chip optical interconnects[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 824-838.
- [17] Zhan X P, Ku J F, Xu Y X, et al. Unidirectional lasing from a spiral-shaped microcavity of dye-doped polymers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,

- 2015, 27(3): 311-314.
- [18] Lee S Y, Kurdoglyan M S, Rim S, et al. Resonance patterns in a stadium-shaped microcavity [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(2): 023809.
- [19] Shu F J, Zou C L, Sun F W, et al. Mechanism of directional emission from a peanut-shaped microcavity [J]. *Physical Review A*, 2011, 83(5): 053835.
- [20] Yan C L, Xu L, Feng Y, et al. Micro-cavity lasers with directional emission and comparison of their characteristics [J]. *Laser Physics*, 2014, 24 (4): 045811.
- [21] Song Q H, Ge L, Stone A D, et al. Directional laser emission from a wavelength-scale chaotic microcavity [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105 (10): 103902.
- [22] Zou C L, Sun F W, Dong C H, et al. High-Q and unidirectional emission whispering gallery modes: principles and design [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(5): 1-6.
- [23] Jiang X F, Xiao Y F, Zou C L, et al. Highly unidirectional emission and ultralow-threshold lasing from on-chip ultrahigh-Q microcavities[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(35): 260-264.
- [24] Liu Z P, Jiang X F, Li Y, et al. High-Q asymmetric polymer microcavities directly fabricated by two-photon polymerization[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(22): 221108.
- [25] Xiao G L, Dou W Y, Yang H Y, et al. Band-stop filter based on metal-insulator-metal waveguide with asymmetric circular resonant cavities[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0513001.
肖功利, 窦婉滢, 杨宏艳, 等. 基于非对称圆形谐振腔金属-介质-金属波导结构的带阻滤波器[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0513001.
- [26] Schermer M, Bittner S, Singh G, et al. Unidirectional light emission from low-index polymer microlasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106 (10): 101107.
- [27] Ma X M, Fan S Z, Wei H M, et al. Notched-elliptical polymer microdisk resonator for unidirectional emission at visible and near-infrared wavelengths[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13 (5): 052002.
- [28] Luneburg R K. *Mathematical theory of optics*[M]. Berkeley: University of California Press, 1964.
- [29] Dottermusch S, Busko D, Langenhorst M, et al. Exposure-dependent refractive index of Nanoscribe IP-Dip photoresist layers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 29-32.
- [30] Yang X. Raman modulation of whispering gallery mode microresonators and its application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016: 9-14.
杨旭. 回音壁模式光学微腔的拉曼调制及其应用 [D]. 北京: 清华大学, 2016: 9-14.
- [31] Ku J F, Chen Q D, Zhang R, et al. Whispering-gallery-mode microdisk lasers produced by femtosecond laser direct writing[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(15): 2871-2873.
- [32] Gorodetsky M L, Savchenkov A A, Ilchenko V S. Ultimate Q of optical microsphere resonators [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2799: 389-391.
- [33] Ta V D, Yang S C, Wang Y, et al. Multicolor lasing prints[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(22): 221103.