

回音壁模式圆盘形微谐振腔的设计及特性研究*

金虎¹, 陆理科², 王鹏³

- (1. 兰州文理学院师范学院, 甘肃 兰州 730000;
2. 中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275;
3. 兰州大学物理科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对光通信波段, 分析了标准圆盘形结构和其他三种变体结构的 WGM 微谐振腔, 讨论了通过改变传输波导和微腔之间的间距以及改变传输波导的几何形状对耦合系数的影响, 基于 FDTD 算法, 分别计算了四种结构的耦合系数、谐振频率、模场分布及品质因数等, 发现模式的匹配程度和输入波导的弯曲损耗均对品质因数有影响, 而四种结构的品质因数和耦合系数的变化规律相反, 故具体应用中为了达到较高的耦合效率, 须在较高的品质因数与较大的耦合系数之间进行折中, 经比较得到了一种输入波导弯曲的优化圆盘形结构。

关键词: 光学器件; 微谐振腔; 耦合系数; 回音壁模式

中图分类号: O439 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2014)03-0008-07

Design and Properties of the Microdisk Resonant Cavity with Whispering Gallery Mode

JIN Hu¹, LU Like², WANG Peng³

- (1. Normal College, Lanzhou University of Arts and Science, Lanzhou 730000, China;
2. State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A standard microdisk and three kinds of variable microdisks resonant cavity with whispering gallery mode (WGM) are presented. By controlling the distance between waveguiding and micro-disk resonant cavity, as well as changing the geometry which can influence the coupling coefficient of the waveguiding and resonant cavity, the coupling coefficients, resonant frequencies, the distribution of modes, and Q-factors from mentioned four structures are calculated based on FDTD method. The degree of mode matching and the bending loss from input waveguide have influence on the Q-factors. There is opposite trend between the Q-factors of the four structures and the coupling coefficient. In order to obtain more efficient coupling efficiency, it is necessary to find a medium between the higher Q-factors and the larger coupling coefficient. Finally, an optimal microdisk with curve input waveguide are obtained.

Key words: optical devices; microdisk resonant cavity; coupling coefficient; whispering gallery mode

基于回音壁模式 WGM 的微谐振腔有奇特的线性、非线性光学性质, 由于大部分光场被封闭在腔内, 腔外的光场为近场, 是局限于腔表面附近的倏

逝波, 光场的振幅沿着矢径方向指数下降, 因此从腔内透出到腔外的平均能流为零, 这就使 WGM 微腔具有极高的品质因数和极小的模式体积, 导致了

* 收稿日期: 2013-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10974261)

作者简介: 金虎(1963年生), 男; 研究方向: 光学器件; E-mail: jgw63@sina.com

各种非线性相互作用的谐振增强^[1-3]，使其在集成光学、医药、探测等领域均有着重要的研究价值和前景。WGM 微谐振腔已被广泛应用于光通信系统的密集波分复用器 DWDM 中，通过把一个或多个微腔放置于传输波导之间，某些特定频率的光可以耦合进入微腔中，从而可以实现上下话路的信道滤波器或光开关的功能^[4]；而 WGM 的谐振频率由腔的性质（几何形状或光学特性）以及环境直接决定，所以任何附着在微腔表面的微粒都会导致 WGM 谐振频率的移动，这一移动量与微粒的数量和质量成比例，也与吸收分子的光学特性有关^[5]，这个特性使 WGM 微腔可以作为一种新型的光电探测器，由于 WGM 探测器具有极高的灵敏度，很小的体积，低廉的价格并且不受电磁干扰，很适用于物理或化学微粒和生物病原体的测量，使得它在探测、生命科学和药学的研究方面已经成为一种有效的工具^[6]；WGM 谐振腔在荧光效应和 Raman 散射中的影响也被广泛研究^[7-9]。WGM 谐振腔的制作工艺简单且造价低廉，与传统的谐振腔相比，它的小体积同时也产生了良好的机械稳定性，对腔的参数也更易调控，而这些特点又使其适于集成在光网络系统中。对谐振腔的光谱研究非常重要，因为它能正确反映出谐振腔的内部机制，WGM 谐振腔的光谱特性取决于腔形状和腔内折射率的空间分布，不存在一个一般通用的解析解法，但许多轴对称结构的 WGM 谐振腔的模式结构和光谱都有数值解法和近似的解析解法^[10-11]，本文的计算和模拟中，采用的是时域有限差分 FDTD 方法^[12-13]。

1 模型

在各种几何形状的 WGM 微谐振腔中，圆形微盘是比较好的一种腔结构。它制作简单，体积小，易于集成。WGM 圆盘微腔利用光在不同折射率材料之间的曲面边界上发生内全反射，使得符合谐振条件的特定波长的光得以在微盘内绕着微盘壁循环传播，而不会从微盘内出射到周围低折射率的介质中去。本文的计算中，WGM 微谐振腔系统中的传输波导为基于 Si 材料的矩形波导，波导的宽度 $w = 0.3 \mu\text{m}$ ，高度 $h = 0.45 \mu\text{m}$ ，长度为无限长。

一个标准的圆盘形 WGM 微谐振腔的结构示意图如图 1 所示，它是由一个圆盘形微腔和两条平行放置的传输波导组成。其中，圆盘微谐振腔和传输波导的材料为 Si，折射率 $n = 3.5$ 。考虑微腔系统的厚度 $h = 0.45 \mu\text{m}$ ，通过有效折射率法（EIM）计算得到其有效折射率为 $n_{\text{eff}} = 3.2$ ^[14]。整个系统

放置于真空中，真空的折射率为 1.0，微盘的半径为 $r = 2.5 \mu\text{m}$ ，输入、输出波导的宽度均为 $w = 0.3 \mu\text{m}$ 。

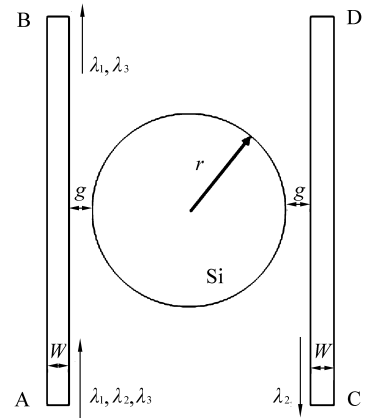


图 1 标准的圆盘形 WGM 微谐振腔结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a standard WGM microdisk resonator

2 讨论

WGM 微谐振腔的耦合效率是由传输系数和耦合系数共同作用决定的^[15]。较大的耦合系数有利于微腔获得较高的耦合效率，讨论微腔的几何参数对耦合系数的影响以及 Q 值的变化情况，目的是要找到一个优化的结构。需要指出的是，耦合系数应该是关于微腔结构对称的，也就是说，单一次输入波导 AB 和微腔之间的耦合输入系数应该与微腔和输出波导 CD 之间的耦合输出系数相等，因此在计算中仅考察输入波导与微腔的耦合情况。

作为一个重要的设计参数，传输波导和微腔之间的间距 g 可以改变耦合区域的大小，进而改变耦合进入谐振腔的能量百分比，即耦合系数，图 2 给出了 FDTD 计算得到的输入波导与 WGM 微腔之间的耦合系数。图中考虑的是横电模的耦合系数，其频率范围从 175 ~ 249 THz 的光波的耦合情况。

当间距 g 的大小在 $0 \sim 0.30 \mu\text{m}$ 之间变化时，从图 2 (a) 可以看到两个明显的变化趋势，即：耦合系数会随着间距 g 和频率 f 的变化而变化。首先，对于一个给定的频率 f ，耦合进入微腔的光能量随着间距 g 的增大而减少，耦合系数亦呈递减趋势。为了能够更清楚的看到这一点，特抽取图 2 (a) 中的一个频率为 $f = 201 \text{ THz}$ 的光波进行考察，其耦合系数随着间距 g 的变化情况如图 2 (b) 所示。随着 g 的增加，耦合系数迅速减小，在 $g =$

0 时, 即输入波导紧贴微腔壁的情况, 耦合系数达 59.05%, 有一半以上的能量进入微腔中, 当间距增大到 $g = 0.20 \mu\text{m}$ 时, 耦合系数减小至 3.81%。可以看出当 g 在 0 到 $0.20 \mu\text{m}$ 范围内变化时, 耦合系数对间距的变化非常敏感。当 $g > 0.20 \mu\text{m}$ 时, 耦合系数随着间距 g 的减小程度趋于缓和。其次对于一个给定的间距宽度 g , 耦合进入谐振腔的能量随着频率 f 的增大而减少, 耦合系数随着频率 f 变化是因为频率 f 越高, 相对应的波长 λ 越小, 其有效间距就越大。另外由耦合系数曲线随着间距 g 的递减而递增的规律也可以看到, 即使在 $g \rightarrow 0$ 的极限情况下, 耦合区域仍然“足够小”, 不会出现耦合进入微腔的能量反耦合进入输入波导的情况。由于耦合系数是关于腔结构对称的, 因此从理论上说, 制作小间距的微谐振腔系统以获得某一范围内的高耦合系数的方法是可行的, 但由于实际刻蚀技术的限制, 不可能实现无限小的间距。以上 FDTD 的模拟结果表明, 耦合系数对输入、输出波导和微腔之间的间距非常敏感。

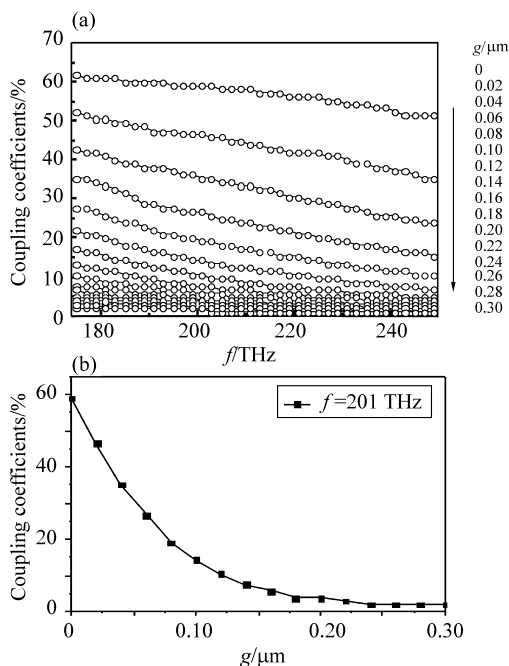


图2 (a) 微腔和输入波导之间的间距 g 和频率 f 的变化对耦合系数的影响;
(b) 当 $f = 201$ THz 时, 耦合系数随间距 g 的变化
Fig. 2 (a) The curves of coupling coefficients as a function of frequency f with different gaps (g) between the microdisk and the input waveguide.
(b) The curve of coupling coefficients as a function of gap size at $f = 201$ THz

除了改变间距 g 之外, 耦合系数还可以通过改变输入、输出波导和微腔的几何形状来进行调节。下面保持输出波导不变, 改变输入波导的几何形状来观察耦合系数及 Q 值等基本参数的变化情况。

如图 3 所示, 最左边为标准的圆盘形 WGM 微谐振腔结构, 圆盘的半径 r , 传输波导的宽度 w 以及材料的有效折射率 n_{eff} 等参数与前面相同: $r = 2.5 \mu\text{m}$, $w = 0.3 \mu\text{m}$, $n_{\text{eff}} = 3.2$ 。从标准的微腔结构出发, 弯曲输入波导, 衍生出图 3 右侧的 3 种新的变体结构, 这 3 种结构分别表示为: 结构 1、结构 2 和结构 3。这么做主要是为了增加输入波导和微谐振腔之间的耦合区域, 从而达到提高耦合效率的目的。在这些结构的计算中, 间距 g 固定为 $g = 0.23 \mu\text{m}$ 。

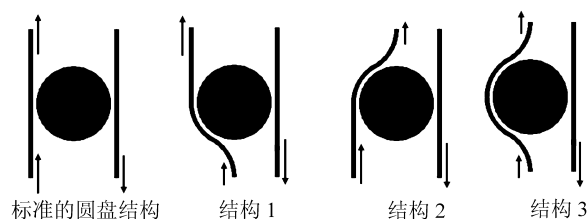


图3 标准的圆盘形 WGM 微腔结构和 3 种变体结构

Fig. 3 Schematic diagrams of standard WGM microdisk resonator and its three variations

标准的圆盘结构、结构 1、结构 2 和结构 3 这 4 种几何结构的 WGM 微腔的耦合系数随频率 f 的变化如图 4 所示。由图中可以看出, 3 种变体结构的 WGM 微腔的耦合系数均比标准圆形微腔的耦合系数有明显提高, 且这 3 种变体结构的耦合系数相互间的差别不大。整体来说, 这 4 种微腔结构的耦合系数的大小顺序为结构 2、结构 1、结构 3、标准结构。标准圆盘形结构微腔的耦合区域最小, 因此耦合系数也最小, 结构 1 和结构 2 都存在严重的模式不匹配, 这种不匹配是由于微腔结构的不对称引起的, 同时输入波导的弯曲也造成波导弯曲损耗增加, 但是波导的弯曲大大增加了耦合区域, 这三方面共同作用的结果使这两种结构中单次耦合进入微腔的能量是最大的, 结构 3 虽然模式匹配, 但由于输入波导呈 90° 弯曲, 弯曲损耗比结构 1 和结构 2 大的多, 考虑这两方面的因素, 结构 3 的耦合系数比前两者都略低一些, 但仍高于标准的圆形结构。结构 1、2 和 3 的共同优点是: 弯曲的输入波导大大增加了耦合区域的长度。

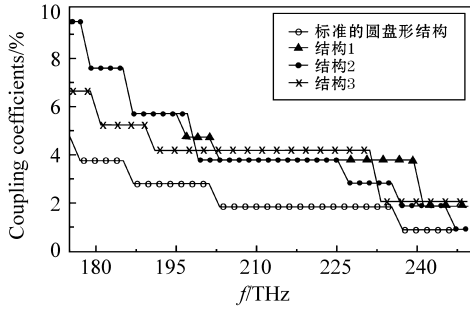


图 4 标准的圆盘形结构、结构 1、结构 2 和结构 3 的 WGM 微腔的耦合系数，其中， $g = 0.23 \mu\text{m}$

Fig. 4 The curves of coupling coefficients of the standard WGM microdisk resonator and its three variations as a function of frequency with a gap of $0.23 \mu\text{m}$

3 频谱分析

下面再结合这 4 种微腔的频谱更详细的分析它们的耦合输入和输出问题。

3.1 标准圆盘形 WGM 微腔结构及其频谱

标准圆盘形 WGM 微谐振腔的频谱如图 5 所示。需要说明的是，WGM 可以用半径模阶数 l ，半角模阶数 m 来描述^[16]。图 5 中所标示的 $l = 1$ 为一阶模，也就是基模， $l = 2$ 为二阶模。微腔在这些尖锐的峰值位置产生谐振，光在微腔内循环传播，不断地进行相干叠加，耦合增强，当光波每次经过微腔与输出波导的耦合区域时，就有一部分光耦合进入输出波导，再从输出端口 C（见图 1）输出，图 6 是其模场分布图。

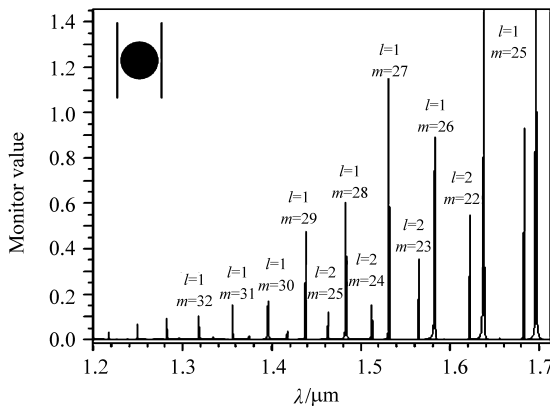


图 5 标准圆盘形 WGM 微腔的频谱

Fig. 5 Frequency spectrum of the standard WGM microdisk resonator

由图 6 (a) 可见，当 $f_1 = 195.92 \text{ THz}$ ($\lambda_1 = 1.53 \mu\text{m}$) 时为一阶模，在微腔中 WGM 沿着腔的

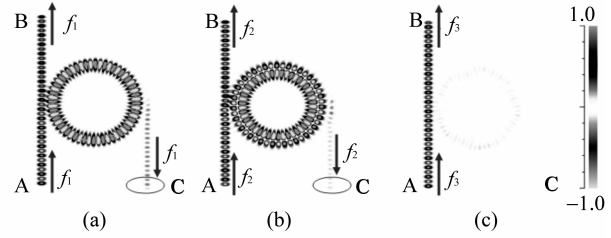


图 6 标准的圆盘形 WGM 微腔的模场分布图

Fig. 6 Mode field distributions of the standard WGM microdisk resonator

内壁形成 54 个能量极值的椭圆花纹， $m = 27$ 。同时也观察到，耦合进入微腔的能量很多，微腔内干涉增强的光波沿着腔壁形成了稳定规则的驻波图案，并且明显观察到有光从端口 C 输出，在图中用红色的圈示出，但是大部分的光仍然留在腔中，这是因为标准的圆形 WGM 微腔结构的单次耦合系数很小，每次耦合进入输出波导的能量也很少，同时由于其相位和模式匹配且传输波导不存在弯曲损耗，它的 Q 值比变体结构 1、2、3 都要高：在 $f_1 = 195.92 \text{ THz}$ 处， $Q = 2552.0$ 。而在图 6 (b) 中， $f_2 = 191.69 \text{ THz}$ ($\lambda_2 = 1.57 \mu\text{m}$) 时为二阶模，WGM 在腔内形成两个圆环的分布，峰值向圆心处移动，并且观察到有能量从输出端口 C 输出，但较一阶模式弱。在图 6 (c) 中，非谐振频率 $f_3 = 194.45 \text{ THz}$ ($\lambda_3 = 1.54 \mu\text{m}$) 处，几乎没有光耦合进入谐振腔，绝大部分光从端口 B 输出，因此这样的 WGM 微腔可以实现滤波或选频的功能。

3.2 结构 1 的 WGM 微谐振腔及其频谱

结构 1 的 WGM 微谐振腔的结构示意图如图 7 (a)。它是将标准的圆盘形微腔中的输入直波导在耦合区域前进行了 45° 的弯曲，弯曲半径与圆盘的半径相等，为 $2.5 \mu\text{m}$ ，即有 $1/4$ 的微盘圆周被波导“包裹”。这样的结构使得波导与微腔之间的耦合区域大大增加，另一方面，输入波导的弯曲损耗也随之增大，在尚未进入耦合范围时有一部分光能就会被“提前”耗散掉。经计算得到其频谱如图 7 (b) 所示。

图 8 为结构 1 的模场分布图。结构 1 中的 WGM 模场分布规律与标准的圆盘形 WGM 微腔相似，由模场分布图可以看出，虽然增加耦合长度有利于增大单次耦合进入谐振腔的能量百分比，但是由于输入波导的弯曲而产生了模式不匹配，使得微腔的 Q 值降低，与标准的圆盘形 WGM 微腔相比，无论是一阶模 ($f_1 = 195.94 \text{ THz}$, $\lambda_1 = 1.53 \mu\text{m}$) 还是二阶模 ($f_2 = 191.69 \text{ THz}$, $\lambda_2 = 1.57 \mu\text{m}$)，

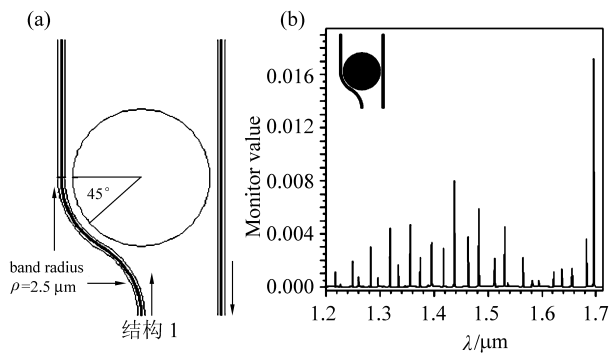


图 7 (a) 结构 1 的 WGM 微腔结构示意图;
(b) 结构 1 的频谱

Fig. 7 (a) Schematic diagram and (b) frequency spectrum of the WGM microdisk resonator structure 1

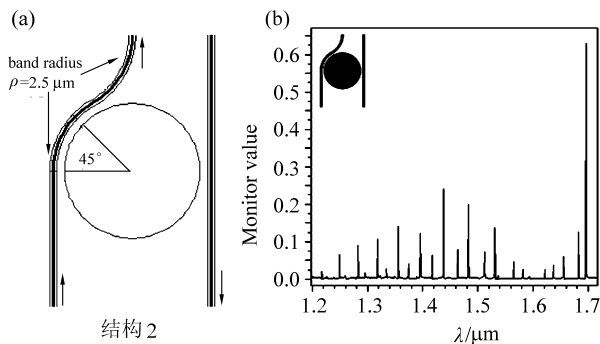


图 9 (a) 结构 2 的 WGM 微腔结构示意图;
(b) 结构 2 的频谱

Fig. 9 (a) Schematic diagram and (b) frequency spectrum of the WGM microdisk resonator structure 2

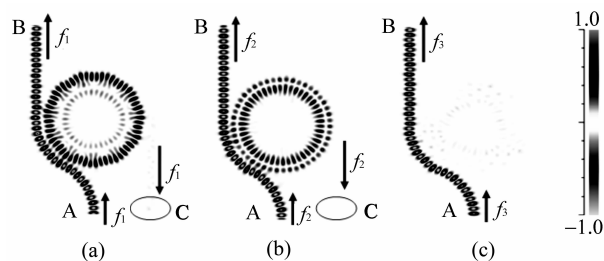


图 8 结构 1 的 WGM 微腔的模式场分布图
Fig. 8 Mode field distributions of the WGM microdisk resonator structure 1

在结构 1 中微腔内的能量有所减少, 进而从输出端口 C 输出的能量更少。另外在模拟中也发现, 结构 1 达到稳定耦合所需的时间比标准的圆盘形 WGM 微腔更长。

3.3 结构 2 的 WGM 微谐振腔及其频谱

结构 2 的 WGM 微谐振腔的结构示意图如图 9 (a) 所示。它与结构 1 在几何结构上相似, 只是弯曲的位置不同: 结构 1 的波导在耦合区域前面弯曲, 而结构 2 在耦合区域之后发生弯曲, 其频谱如图 9 (b) 所示。

图 10 为结构 2 的模式场分布图。结构 2 的模式场分布规律也与标准圆盘形结构和结构 1 相似, 结合图 4 的耦合系数的计算可以看出, 因为结构 2 和 1 的耦合区域大小相等, 结构 2 中单次耦合进入微腔内的能量与结构 1 仅有微小差别。并且结构 1 和 2 都存在由于输入波导的弯曲而引起的模式不匹配, 这种不匹配使得微腔的 Q 值有所降低: 在结构 1 中, 在 $f_1 = 195.94 \text{ THz}$ ($\lambda_1 = 1.53 \text{ }\mu\text{m}$) 处, $Q = 2126.5$; 结构 2 在 $f_1 = 195.94 \text{ THz}$ ($\lambda_1 = 1.53 \text{ }\mu\text{m}$) 处, $Q = 2187.2$ 。但是在结构 2 中,

微腔内谐振的光能量增多, 进而耦合从端口 C 输出的光能也增加, 尤其是基模的情况。这主要是因为输入波导的弯曲发生在耦合区域的后半段, 在进入耦合区域之前输入波导仍保持直线的形状, 虽然这种结构仍然不会改变模式不匹配的状况, 但与结构 1 相比, 结构 2 能有效阻止弯曲损耗导致的耦合进入谐振腔内的光能“过早的”衰减, 因此结构 2 是比结构 1 更优化的一种变体结构。

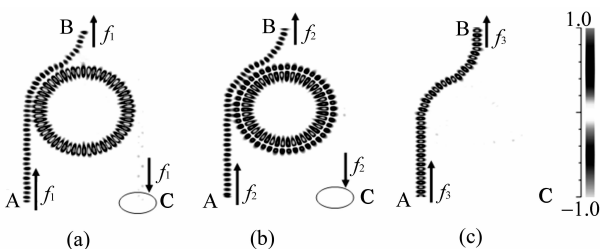


图 10 结构 2 的 WGM 微腔的模式场分布图
Fig. 10 Mode field distributions of the WGM microdisk resonator structure 2

3.4 结构 3 的 WGM 微谐振腔及其频谱

结构 3 的 WGM 微谐振腔的结构示意图如图 11 (a)。这是一种把结构 1 和结构 2 的弯曲结构推向极端的一种结构。在耦合区域的前后, 输入波导都发生了 45° 的弯曲, 圆盘形微腔的一半圆周都被输入波导“包裹”, 其频谱如图 11 (b) 所示。

图 12 为结构 3 的模式场分布图。结构 3 的模式场分布规律与标准圆盘结构、结构 1 和结构 2 相似。由于输入波导呈 90° 弯曲, 弯曲损耗很大, 导致这种结构的单次耦合系数较结构 1 和 2 小, 但是这种结构的几何形状呈对称分布, 使得耦合进入微腔的光波模式匹配, 综合考虑到这两个因素的影响, 其

Q 值较前两种结构的要大些：在 $f_1 = 195.94$ THz ($\lambda_1 = 1.53 \mu\text{m}$) 处, $Q = 2\,285.2$ 。并且在模拟过程中也观察到, 结构 3 用了最长的时间才使耦合的模场达到稳定分布, 这主要是由于输入波导的大幅度弯曲造成的。

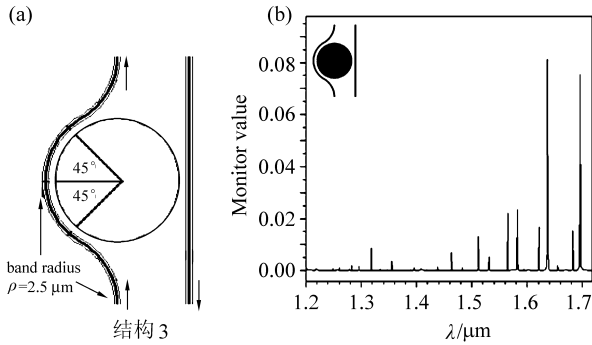


图 11 (a) 结构 3 WGM 微谐振腔结构示意图；
(b) 结构 3 的频谱

Fig. 11 (a) Schematic diagram and (b) frequency spectrum of the WGM microdisk resonator structure 3

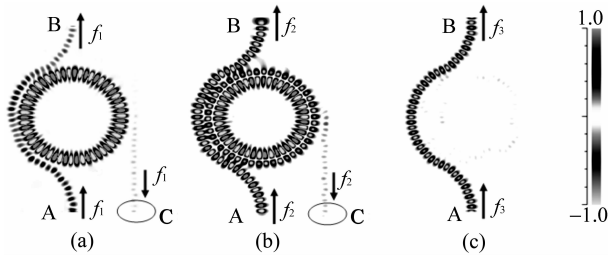


图 12 结构 3 的 WGM 微腔的模场分布图

Fig. 12 Mode field distributions of the WGM microdisk resonator structure 3

4 结 论

如前所述, 综合考虑模式的匹配程度和输入波导的弯曲损耗, 这 4 种结构的 WGM 微谐振腔的 Q 值大小顺序为: 标准圆盘形结构 WGM 微腔最大, 结构 3 其次, 然后才是结构 2 和结构 1。例如选取 $l = 1$ 时计算这 4 种微腔的 Q 值, 可以得到标准圆盘形结构为 2 552.0, 结构 3 为 2 285.2, 结构 2 为 2 187.2, 结构 1 为 2 126.5。 Q 值按照标准圆盘结构、结构 3、结构 2、结构 1 的顺序缓慢降低的原因是: 标准圆形微腔结构的模式和相位均匹配且输入波导的弯曲损耗为 0, 因此 Q 值最大, 结构 1 和结构 2 由于输入波导的单边弯曲引起了微腔结构的不对称, 都存在着严重的模式不匹配, 同时弯曲也造成输入波导的弯曲损耗增加, 因此这两种结构的

Q 值在 4 种结构中最小。结构 3 图形对称, 不存在模式不匹配的问题, 但由于输入波导呈 90° 弯曲, 弯曲损耗比结构 1 和结构 2 大的多, 使得结构 3 的 Q 值比标准的圆盘形结构略低一些, 又比结构 1 和结构 2 高。因此在具体应用中, 以高品质因素为主要目标时, 优先选择顺序依次为: 标准圆盘形结构、结构 3、结构 2、结构 1。

另结合前面的计算分析可以看出, 这 4 种结构的 Q 值和耦合系数的变化规律相反: 对于 Q 值最高的标准圆盘形结构, 它的耦合系数最小; 而对于耦合系数最大的结构 2, 其 Q 值又有较大幅度的降低, 因此在具体的应用中, 为了达到一个较高的耦合效率, 必须在较高的 Q 值和较大的耦合系数中进行一个折中的取舍。本文模拟计算的这 4 种结构中, 结构 3 的耦合系数较标准的圆盘形结构大, 同时也可以保持有 2 200 左右的高 Q 值, 因此, 结构 3 为这 4 种结构中的优化结构。

参考文献:

- [1] BRAGINSKY V B, GORODETSKY M L, ILCHENKO V S. Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering gallery modes[J]. Phys Lett A, 1989, 137(8): 393 - 397.
- [2] VERNOOY D W, ILCHENKO V S, MABUCHI H, et al. High- Q measurements of fused-silica microspheres in the near infrared[J]. Opt Lett, 1998, 23(4): 247 - 249.
- [3] CAMPILLO A J, EVERSOLE J D, LIN H B. Cavity quantum electrodynamic enhancement of stimulated emission in microdroplets[J]. Phys Rev Lett, 1991, 67(4): 437 - 440.
- [4] MORAND A, ZHANG Y, MARTIN B, et al. Ultra-compact microdisk resonator filters on SOI substrate[J]. Opt Express, 2006, 14(26): 12814 - 12821.
- [5] FRANCOIS A, KRISHNAMOORTHY S, HIMMELHAUS M. Advances in label-free optical biosensing: direct comparison of whispering gallery mode sensors with surface Plasmon resonance [J]. Proc SPIE, 2008, 6862: 686211.
- [6] NOTO M, KHOSHSIMA M, KANG D, et al. Molecular weight dependence of a whispering gallery mode biosensor [J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(22): 223901.
- [7] HILL S C, BENNER R E, RUSHFORTH C K, et al. Sizing dielectric spheres and cylinders by aligning measured and computed resonance locations: algorithm for multiple orders[J]. Appl Opt, 1985, 24(15): 2380 - 2390.

- character height model of guide signs based on 3D technology and information processing characteristics of Chinese drivers[C] // Proceedings of the Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE), 2010:188 - 194.
- [4] TOI S, KIYOTAM, YOSHITAKE, et al. A method for planning of road sign system in highway using straying index [J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005, 6(7): 981 - 996.
- [5] 黄敏,余志,张小兰. 基于交叉口特征的指路标志建模方法[J]. 西南交通大学学报, 2007,42(1): 110 - 114.
- [6] 黄敏,饶明雷,李敏. 指路标志诱导系统指引连贯性的分析评价[J]. 公路交通科技学报, 2012, 29(11): 110 - 115.
- [7] LIU Y C. A simulated study on the effects of information volume on traffic signs, viewing strategies and sign familiarity upon driver's visual search performance[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005, 35(12): 1147 - 1158.
- [8] 郭敏,楼晓寅. 标志指路体系的模型[J]. 公路交通科技学报,2009, 26(10):130 - 134.
- [9] 姜军,陆建,李娅. 基于驾驶人视认特性的城市指路标志设置[J]. 东南大学学报,2010,40(5):1089 - 1092.
- [10] ZWAHLEN H T, SCHNELL T. Legibility of traffic sign text and symbols [J]. Transportation Research Record, 1999,1692: 142 - 151.
- [11] 邓兴栋. 城市道路指路标志信息选取方法研究[J]. 交通科学与工程, 2010,26(1): 97 - 102.
- [12] 肖国荣,余志,黄敏. 基于偏离指数的指路标志优化模型研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(1): 38 - 41.
- [13] 王新华. 环形交叉口的优化控制[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2009, 48(4): 141 - 144.
- [14] 黄敏,吴海宾,饶明雷,等. 城市道路指路标志数据模型设计及应用[J]. 测绘科学技术学报, 2011,28(6): 454 - 457.
- [15] 蒋海峰,韩文元,侯德藻. 指路交通标志信息分级及发布原则研究[J]. 公路交通科技学报, 2009, 51(3):31 - 36.
- [16] 李美娟,陈国宏,陈衍泰. 综合评价中指标标准化方法研究[J]. 中国管理科学学报, 2004, 12(10):45 - 48.

(上接第13页)

- [8] QIAN S X, SNOW J B, CHANG R K. Coherent raman mixing and coherent anti-stokes raman scattering from individual micrometer-size droplets[J]. Opt Lett, 1985, 10(10): 499 - 501.
- [9] ILCHENKO V S, MATSKO A B, SAVCHENKOV A A, et al. High efficiency microwave and millimeter-wave electro-optical modulation with whispering-gallery resonators[J]. Proc SPIE, 2002, 4629: 158 - 163.
- [10] BORISKINA S V, SEWELL P, BENSON T M, et al. Accurate simulation of two-dimensional optical microcavities with uniquely solvable boundary integral equations and trigonometric galerkin discretization[J]. Opt Soc Amer B, 2004, 21(3): 393 - 402.
- [11] BORISKINA S V, BENSON T M, SEWELL P, et al. Spectral shift and Q change of circular and square-shaped optical microcavity modes due to periodic sidewall surface roughness[J]. Opt Soc Amer B, 2004, 21(10): 1792 - 1796.
- [12] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell equations in isotropic media [J]. IEEE Trans on Anten and Prop, 1966 14(3): 302 - 307.
- [13] 陈晓文,刘叶新,吴添洪,等. 条形波导的三维标量 FDTD 法分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005,44(3): 119 - 121.
- [14] 孙飞,刘润民,李国正. 有效折射率法的研究[J]. 半导体光电,2001,22(1): 34 - 37.
- [15] YARIV A. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides [J]. Electronics Lett, 2000, 36(4): 321 - 322.
- [16] 张晓燕,周庆,曾军英,等. 回音壁模圆盘谐振腔的光能分布[J]. 云南大学学报, 2004,26(5): 425 - 428.