

doi:10.3788/gzxb20154412.1213002

内嵌型双微盘谐振腔模式特性

陈昱任, 王卓然, 袁国慧, 任培培

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘 要: 基于直径为 $7.2 \mu\text{m}$ 的微盘谐振腔器件, 分别引入对称缺陷和非对称缺陷, 利用时域有限差分法研究缺陷位置和尺寸对各自微盘谐振腔各阶模式的影响。研究表明: 随着缺陷半径增大, 各阶谐振模式向短波长移动并且由高到低逐级受到抑制。在对称缺陷腔、非对称缺陷腔中内嵌一个微盘, 构成内嵌型双微盘谐振腔, 并优化缺陷腔、内嵌微盘尺寸及位置, 可实现 $1\ 128 \text{ nm}$ 、 $1\ 109 \text{ nm}$ 波长的稳定单模谐振。该内嵌型双微盘谐振腔微盘模式简单, 实现了谐振模式的简化, 具有广泛的应用前景。

关键词: 光学微腔; 微盘谐振腔; 回音壁模式; 腔体缺陷; 谐振模式

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)12-1213002-7

Mode Characteristics Analysis of Embedded-type Dual Microdisk Resonators

CHEN Yu-ren, WANG Zhuo-ran, YUAN Guo-hui, REN Pei-pei

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Based on a microdisk resonator device with a diameter of $7.2 \mu\text{m}$, the symmetric and asymmetric defects were introduced. By using the finite difference time domain method, the influences of the positions and dimensions of the defects on the resonant modes of microdisks were analyzed. The results show that with the increase of the radius of defects resonance modes firstly move towards shorter wavelength and then get suppressed progressively. Furthermore, a microdisk was introduced in two kinds of defects to form embedded-type dual microdisk resonators. After the optimization of the relative positions and dimensions, the single-mode resonance is realized at $1\ 128 \text{ nm}$ and $1\ 109 \text{ nm}$. This device overcomes the drawbacks of single microdisk and simplifies the resonance mode, it can be applied in wider interest fields.

Key words: Optical microcavity; Microdisk resonator; Whispering gallery mode; Cavity defects; Resonant mode

OCIS Codes: 130.3990; 230.3120; 220.4241

0 引言

光学回音壁模式 (Whispering-Gallery Mode, WGM) 微谐振腔^[1-2]可在微纳尺度下极大地提高光与物质的作用长度与强度, 具有品质因子高、体积小、自由光谱范围 (Free Spectral Range, FSR) 大等优点, 在光通信、光传感以及量子光学等方面极具发展潜力, 受到国内外科研人员广泛关注。回音壁微腔按结构可分

为微球腔^[3-4], 微管腔^[5], 微环腔^[6-7], 以及微盘腔^[8-10], 其中微盘腔制作工艺简单易控, 腔体损耗低, 模式品质因子 (Quality Factor, Q) 较高, 在光生物传感^[11-12]、光学滤波器、低阈值激光器等应用较广。但是, 微盘腔内谐振模式较微环腔复杂, 其研究和应用受到一定限制。

近年来, 人们对回音壁微盘 (尤其是硅基无源微盘腔) 的模式特性进行了大量研究, 包括模式频谱特性、

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61575038, 61107061, 61107088)、教育部留学回国人员科研启动基金 (No. 2012GJ002) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (No. NCET-12-0092) 资助

第一作者: 陈昱任 (1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微纳生物光子传感。Email: yurenchensichuan@163.com

导师 (通讯作者): 王卓然 (1977-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微纳光子学、光通信与光网络技术及生物光子传感。Email: wangzhuoran@uestc.edu.cn

收稿日期: 2015-07-24; **录用日期:** 2015-09-23

<http://www.photon.ac.cn>

品质因子 Q 值、模式输出、发射和耦合特性等(如美国耶鲁大学 Nockel 等提出可改进轴对称腔体耦合输出问题的腔体变形方案^[13]),甚至出现了对于微腔中光波混沌现象进行研究的相关报道^[14].在腔体中引入缺陷是研究模式特性的另一选择,如美国犹他大学 Apalkov 等在腔内引入线缺陷散射,实现了微盘腔输出的单方向性发射^[15];美国纽约城市大学 Deych 等在微盘中掺杂微粒,实验上观察到双峰谐振现象并且发现谐振模式的红移^[16].

本文从抑制微盘内高阶模式、筛选谐振模式出发,基于微盘谐振腔,引入对称和非对称缺陷腔,分析了腔体缺陷位置和尺寸对各阶谐振模式的影响,并提出了一种内嵌型双微盘谐振腔结构,通过优化内外双微盘结构参量,实现了内外双盘的耦合谐振匹配、模式简化和对特定谐振模式的筛选.

1 回音壁微盘腔基本理论

光通过耦合方式进入微盘腔内,满足微盘腔谐振条件($2\pi R n_{\text{eff}} = m\lambda_0$)和全反射条件的光可在微盘腔内形成稳定的行波传输模式,即回音壁谐振模.典型的微盘谐振腔与直波导耦合模型如图 1.

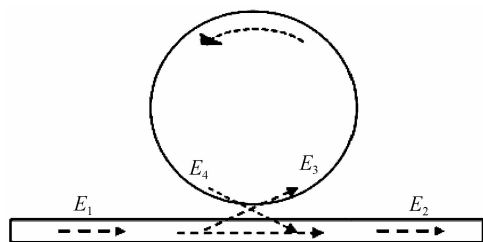


图 1 微盘谐振腔与直波导耦合模型

Fig. 1 Coupling model of waveguide and microdisk

根据耦合模理论^[17],直波导耦合微盘模型的光强关系为

$$\begin{bmatrix} E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau & -i\kappa \\ -i\kappa & \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E_4 = \alpha \cdot e^{-i\theta} \cdot E_3 \quad (2)$$

式中 τ 、 κ 分别为耦合器的场振幅传输系数和耦合系数,对于无损耦合有 $\tau^2 + \kappa^2 = 1$; α 和 θ 分别表示光在微盘中传播一周的振幅损耗和相位延迟.则直波导输出端的透射率表示为

$$T = \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^* = \frac{\tau - \alpha e^{-i\theta}}{1 - \tau \alpha e^{-i\theta}} = \frac{\tau^2 + \alpha^2 - 2\tau\alpha \cdot \cos \theta}{1 + \tau^2 \alpha^2 - 2\tau\alpha \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

当微盘腔的本征损耗与耦合损耗相等时,直波导中的传输光场与微盘耦合进入直波导的光场形成干涉

相消,直波导输出端功率降为零,即得到呈梳状的传输谱线.

2 微盘谐振腔建模

由于 Si_3N_4 材料在短波长段的吸收损耗低,在整个波长段具有很好的透明性,所以实验中分别选择 Si_3N_4 和 SiO_2 作为微盘腔波导和衬底材料,建立包括微盘谐振腔和耦合直波导在内的微盘谐振器模型,如图 2(a).

为了实现高性能的微盘谐振器,首先对器件结构参量进行优化.耦合输出直波导横截面长 \times 宽经过模拟后选为 $400 \text{ nm} \times 220 \text{ nm}$,在此条件下该波导可以满足单模传输的要求.微盘谐振腔的优化主要是对微盘直径和耦合间距的优化,模拟结果表明,当微盘直径为 $7.2 \mu\text{m}$ 、耦合间距为 230 nm 时,微盘谐振器的总损耗最低,并且达到了临界耦合的要求,品质因子高达 3.74×10^4 ,其透射输出谱线如图 2(b).

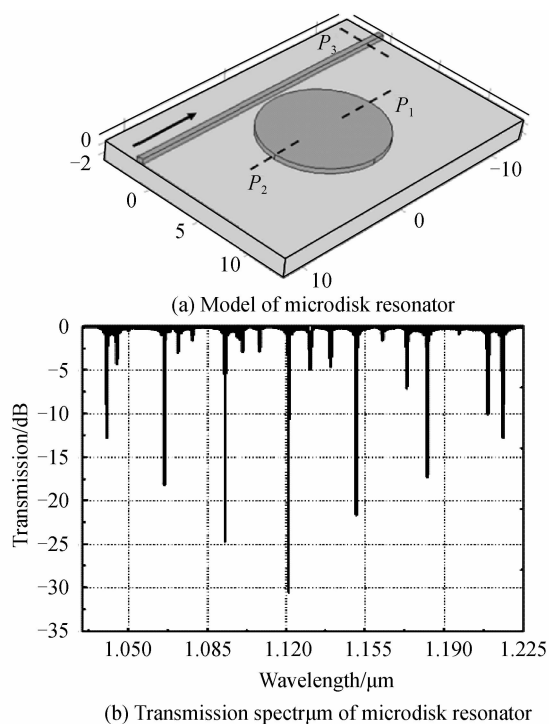


图 2 微盘腔模型及其输出谱线

Fig. 2 Model and transmission spectrum of microdisk resonator

图 2(b) 中的透射输出谱线含三种谐振模式,包括径向一阶、二阶和三阶谐振模式,所对应的波长分别为 $1.121 \mu\text{m}$ 、 $1.131 \mu\text{m}$ 和 $1.139 \mu\text{m}$,各模式的场分布如图 3.图 3 中的光环数表示径向模式阶数,而组成每个光环的圆形光斑数表示角向模式阶数,越靠近微盘内部,径向模式阶数越高.

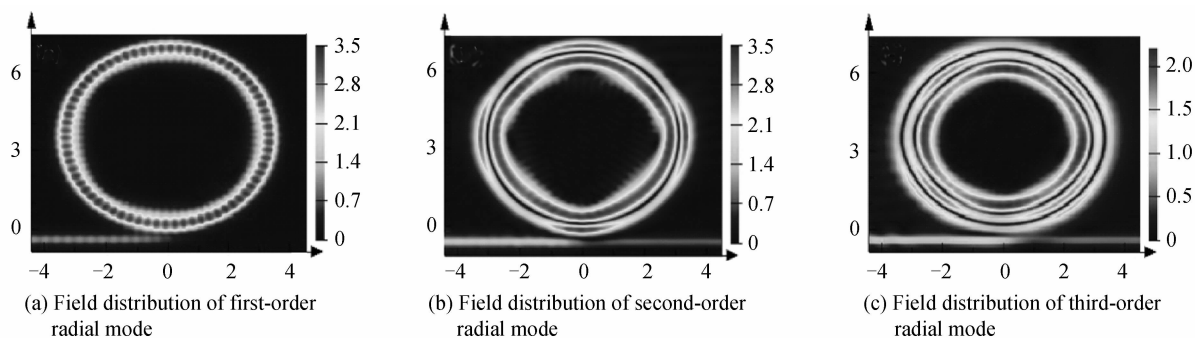


图3 微盘腔一、二、三阶径向模场分布

Fig. 3 Field distribution of first, second and third-order radial modes of microdisk resonator

3 微盘腔体缺陷对谐振模式的影响

缺陷位置对各阶谐振模式产生影响决定腔体的对称性,缺陷尺寸直接影响微盘的谐振模式特性.根据缺

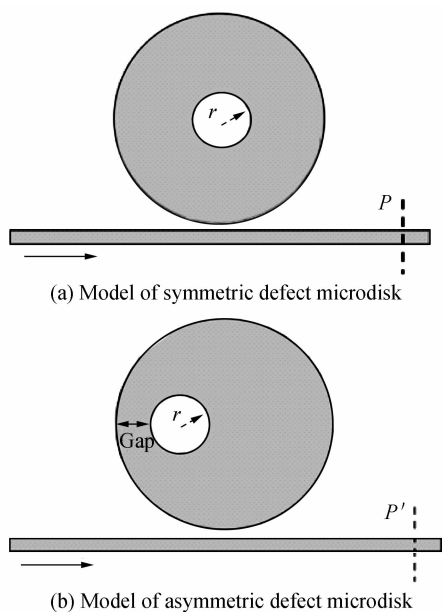


图4 对称与非对称缺陷微盘腔模型

Fig. 4 Model of symmetric and asymmetric defect microdisk

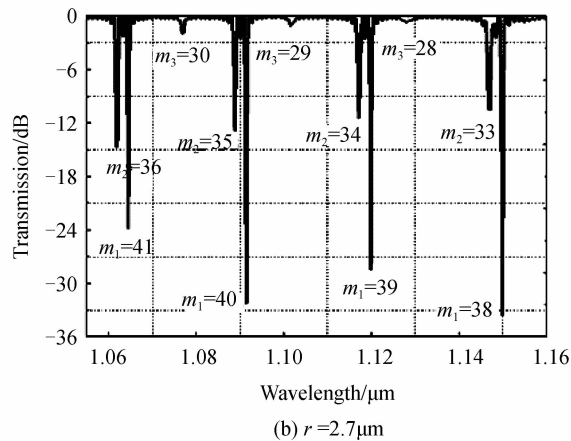
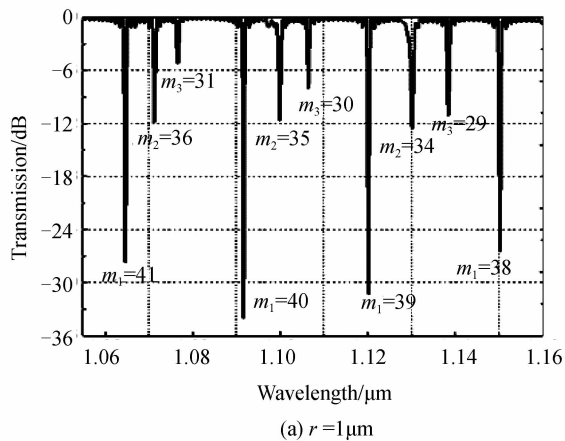
陷腔体的几何对称性,将微盘缺陷腔分为对称和非对称两种,而本文讨论的缺陷仅限于规则的圆形结构,不考虑非规则的缺陷结构.

对称缺陷腔是指缺陷中心与微盘腔中心重合,如图4(a).对称腔的缺陷是一个与微盘同心且半径为 r 的圆,即在微盘腔中心刻蚀出一个圆形洞.非对称缺陷腔是指缺陷中心与微盘腔中心不重合,如图4(b),不失一般性,将半径为 r 的缺陷中心设于微盘半径的中点位置.

3.1 对称缺陷腔的谐振模式

在研究对称缺陷微盘腔模式特性时,缺陷半径 r 是一个重要的参量.设 r 的初始值为 $1\ \mu\text{m}$,逐渐增大 r 值,可以得到各缺陷半径下的输出端谐振谱线,如图5,各图中谱线峰处标注了相应模式阶数,数字1~3表示径向模式阶数, $m_1\sim m_3$ 组合则表示相应径向模式所对应的角向模式阶数.

研究发现,当缺陷半径 r 为 $1\ \mu\text{m}$ 时,缺陷腔谐振模式与微盘腔模式一致,即缺陷对微盘模式特性没有影响;随着 r 增大至 $3.1\ \mu\text{m}$,三阶模式被抑制并且各低阶模式往短波长移动;当 r 达到 $3.2\ \mu\text{m}$ 时,二阶模式也被抑制,微盘腔内只有一阶模式的存在,此时微盘腔已经相当于宽度为 $400\ \text{nm}$ 的微环腔.



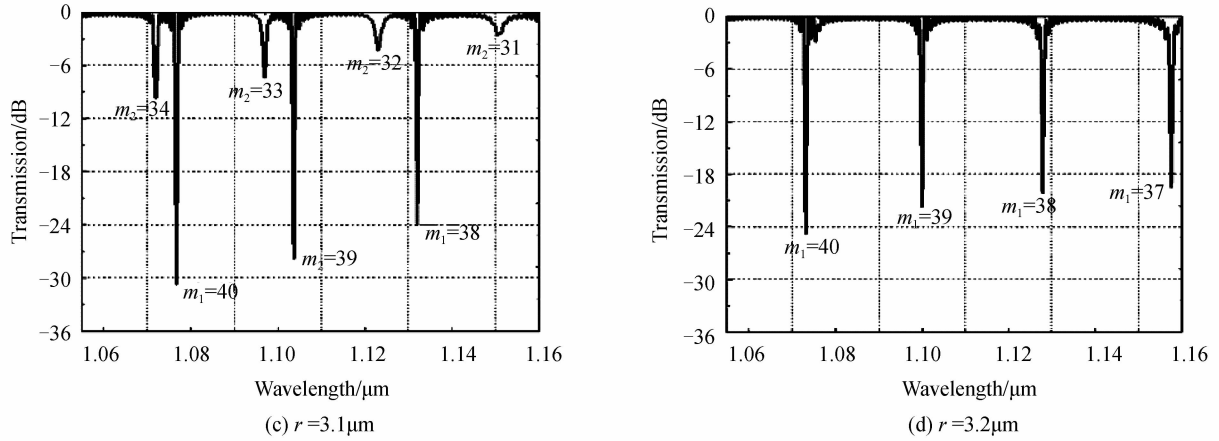


图 5 不同缺陷半径 r 下对称缺陷微盘腔输出谱线

Fig. 5 Transmission of symmetrical defect microdisks at different radii (r) of defects

3.2 非对称缺陷腔的谐振模式

在研究非对称缺陷腔的模式特性时,主要研究参数包括缺陷半径 r 和缺陷边距 gap . 已设定缺陷中心位

于微盘半径的中点位置,缺陷半径初始值为 $0.35 \mu\text{m}$, 然后逐渐增大缺陷半径 r , 得到各缺陷半径下的输出端谐振谱线,如图 6.

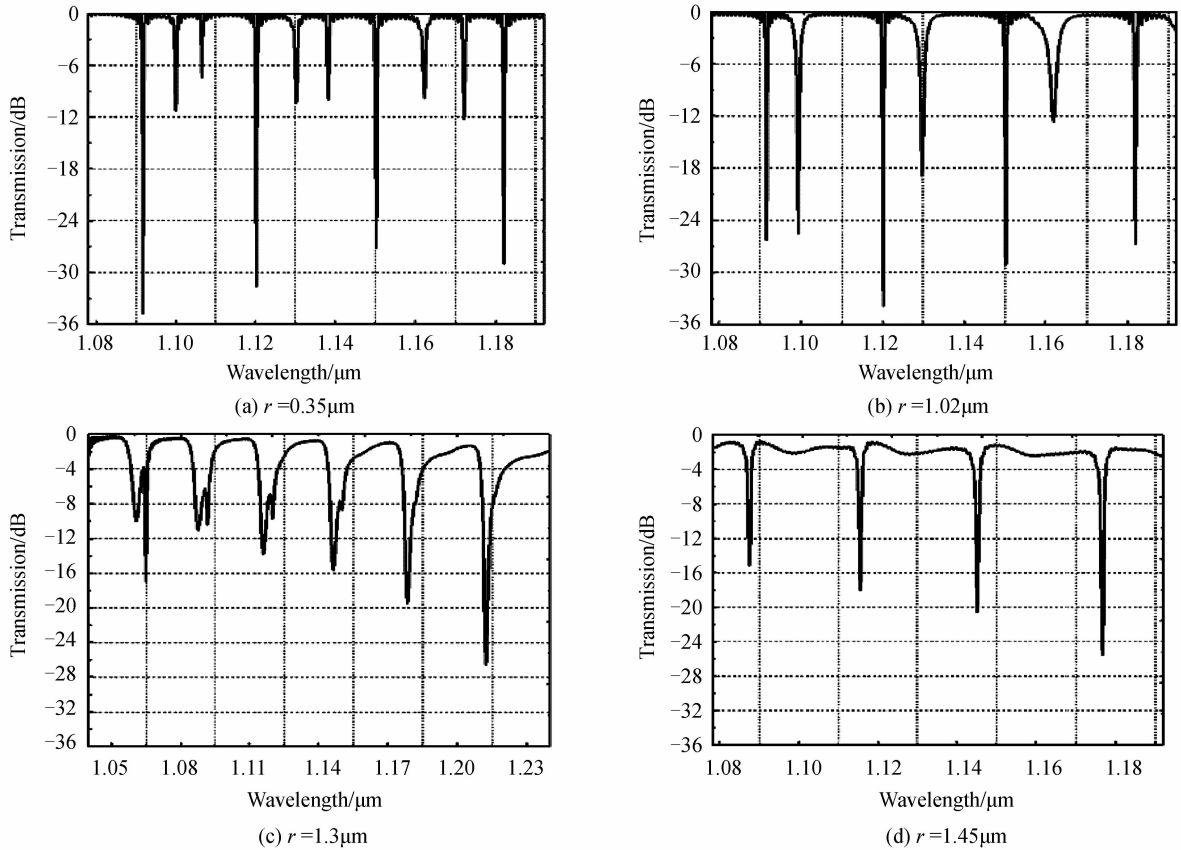


图 6 不同缺陷半径 r 下非对称缺陷微盘腔输出谱线

Fig. 6 Transmission of asymmetric defect microdisk at different radius (r) of defects

研究发现,当缺陷半径 r 为 $0.35 \mu\text{m}$ 时,缺陷腔谐振模式与微盘腔的模式一致,即缺陷对微盘模式特性没有影响;随着缺陷半径 r 增大至 $1.3 \mu\text{m}$,三阶模式被抑制、各低阶模式往短波长移动,并且发现相邻的二阶模式和一阶模式发生重叠;当 r 达到 $1.45 \mu\text{m}$ 时,微盘腔内只有一阶模式的存在.

缺陷边距 gap 也是一个很重要的结构参量,将缺陷半径 r 设为定值 $1 \mu\text{m}$, 然后从原缺陷中心位置开始, 逐渐往外移动缺陷位置,使得缺陷边距 gap 逐渐减小, 图 7 表明了各阶模式随缺陷边距的变化情况. 与对称缺陷腔类似,各阶模式受缺陷的影响由高到低逐级被抑制. 同时,在缺陷边距为 $0.44 \mu\text{m}$ 和 $0.78 \mu\text{m}$ 时,相

邻的模式之间发生交叉耦合,这与图6中谱线重叠现象相吻合.

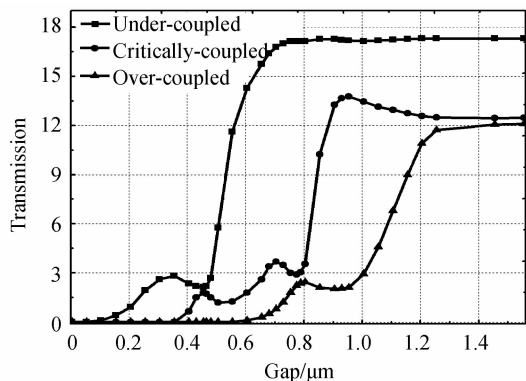


图7 缺陷边距 gap 对各阶模式的影响

Fig. 7 The influence of defect margins on each order modes

由模拟结果可知,对称缺陷和非对称缺陷都具有抑制高阶模的能力.并且当缺陷半径增大到一定程度时,对称缺陷微腔相当于一个微环腔,微环腔具有更简单的模式,故对称缺陷腔对高阶模的抑制效果更好.

4 内嵌型双微盘谐振腔

为了抑制微盘腔内复杂的高阶模式,筛选特定的谐振模式,提出基于非对称缺陷腔与基于对称缺陷腔的内嵌型双微盘谐振腔结构,如图8,即在缺陷内部引入一个新的微盘谐振腔,并对其位置与大小进行优化设计.

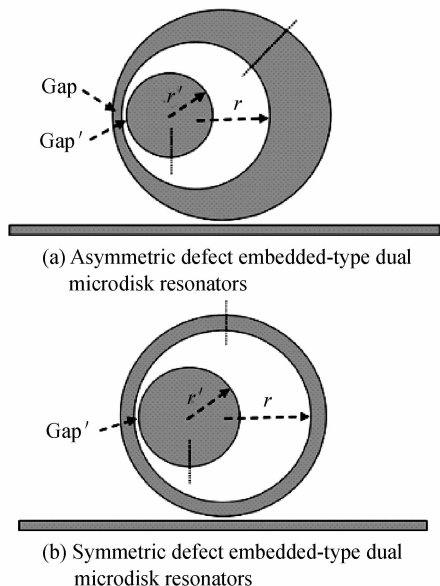


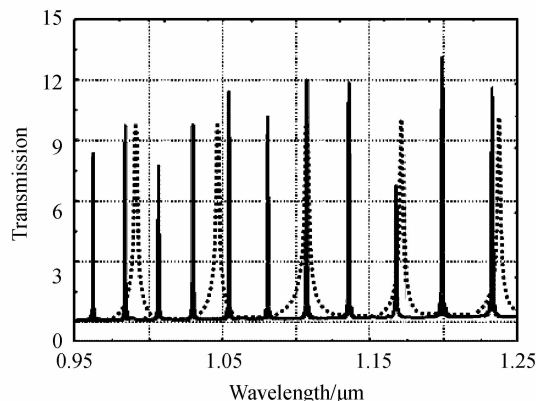
图8 非对称与对称缺陷内嵌型双微盘谐振腔模型

Fig. 8 Illustrations of symmetric and asymmetric defect embedded-type dual microdisk resonators

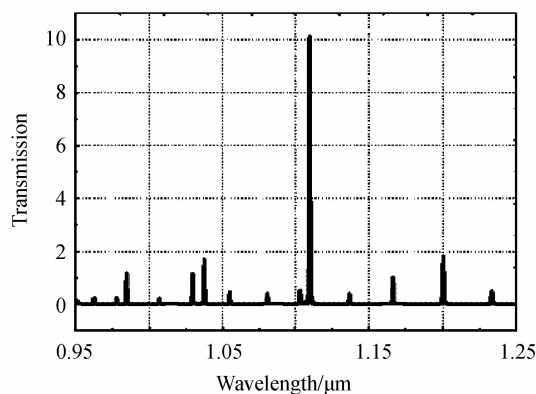
欲使缺陷外盘与内嵌盘发生耦合,显然,能够耦合进入内嵌盘的模式必然同时是缺陷外盘的谐振模式.当选择一个合适的内嵌盘半径 r' ,使得两盘的谐振波长重叠,那么该波长的模式光将耦合进入内嵌盘发生

谐振.根据FSR的定义,内嵌盘比缺陷外盘尺寸小,其自由光谱范围(FSR)比缺陷外盘大.在一定波长范围内,两个盘中发生重叠的谐振波长个数将是唯一的,使得内嵌盘的工作波长能被单独筛选出来.

对于非对称缺陷腔的内嵌微盘结构,设缺陷半径 r 为 $2.6 \mu\text{m}$ 、缺陷边距 gap 为 300 nm ;对于对称缺陷腔的内嵌微盘结构,则 r 选定为 $3.2 \mu\text{m}$ 、gap 为 400 nm .通过优化内嵌微盘的半径 r' 和耦合间距 gap' ,可以实现内外双盘的谐振模式匹配,筛选出所需的工作波长.对于非对称缺陷腔内嵌微盘结构,进一步优化内嵌盘的结构参量.当内嵌盘半径 r' 为 $1.58 \mu\text{m}$ 、耦合间距 gap' 为 80 nm 时,缺陷外盘与内嵌盘发生耦合谐振匹配,如图9.图9(a)中虚线是内嵌盘的理论谐振模式,实线是缺陷外盘的谐振模式,在波长 $1.109 \mu\text{m}$ 处发生重叠匹配.图9(b)中波长为 1.109 的模式光被筛选出来单独耦合进入内嵌盘发生稳定谐振



(a) Mode matching of inside and outside microdisks of asymmetric defect embedded-type dual microdisk when $r'=1.58\mu\text{m}$ 、 $\text{gap}'=80\text{nm}$

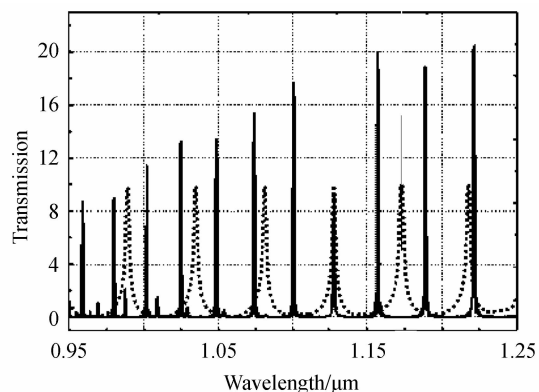


(b) The selection of $1.109\mu\text{m}$ wavelength

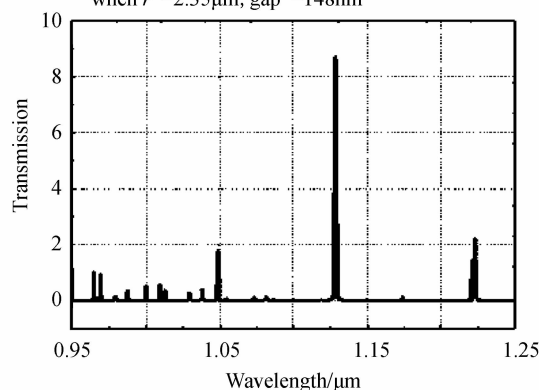
图9 非对称内嵌盘 $r'=1.58\mu\text{m}$ 、 $\text{gap}'=80\text{nm}$ 时内外双盘的谐振模式匹配及对 $1.109 \mu\text{m}$ 波长的筛选

Fig. 9 Mode matching and selection of asymmetric defect embedded-type dual microdisk

同理,在对称缺陷腔内嵌微盘结构中,当内嵌盘半径 r' 为 $2.35 \mu\text{m}$ 、耦合间距 gap' 为 148 nm 时,波长为 $1.128 \mu\text{m}$ 的模式光被筛选出来,单独耦合进入内嵌盘发生稳定谐振,如图10.



(a) Mode matching of inside and outside microdisks of symmetric defect embedded-type dual microdisk when $r'=2.35\mu\text{m}$, $\text{gap}'=148\text{nm}$



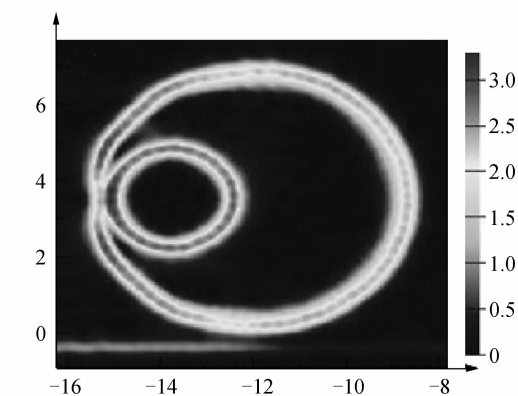
(b) The selection of $1.128\mu\text{m}$ wavelength

图 10 对称内嵌盘 $r'=2.35\mu\text{m}$ 、 $\text{gap}'=1.48\text{nm}$ 时内外双盘的谐振模式匹配及对 $1.128\mu\text{m}$ 波长的筛选

Fig.10 Mode matching and selection of symmetric defect embedded-type dual microdisk

非对称缺陷和对称缺陷内嵌微盘谐振腔分别在波长 $1.109\mu\text{m}$ 和 $1.128\mu\text{m}$ 处的光模式场分布如图 11, 可见满足筛选条件的模式为一阶模式, 光同时在内外双盘发生稳定谐振。

对比图 9(b) 与图 10(b), 可以看出非对称缺陷内嵌微盘腔具有更高的消光比, 故非对称缺陷内嵌微盘腔对谐振模式的筛选效果更好。



(a) Field distribution of asymmetric defect embedded-type dual microdisk when $\lambda=1.109\mu\text{m}$

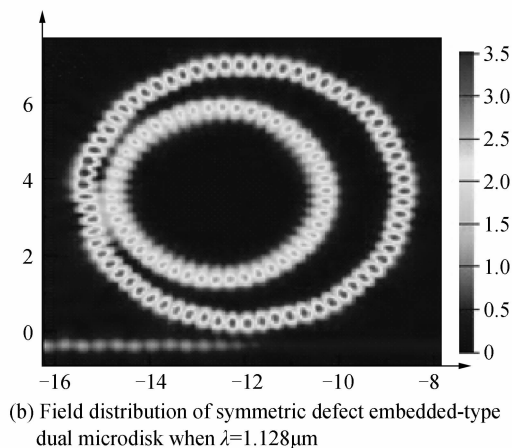


图 11 非对称与对称缺陷内嵌微盘在腔筛选波长处的光模场分布

Fig.11 Field distribution at selected wavelength of asymmetric and symmetric defect embedded-type dual microdisk resonators

5 结论

本文从微盘谐振模式特性出发分析了微盘缺陷的位置和尺寸对谐振模式的影响, 结果表明随着缺陷半径增大和缺陷边距减小, 微盘谐振模式向短波长移动并且由高到低逐级被抑制。提出了对称与非对称缺陷腔的内嵌型双微盘谐振腔结构。对于非对称内嵌型双微盘谐振腔而言, 当缺陷半径为 $2.6\mu\text{m}$ 、缺陷边距为 300nm 、内嵌微盘半径为 $1.58\mu\text{m}$ 、耦合间距为 80nm 时, 能够实现 $1.109\mu\text{m}$ 波长的单模谐振; 而对于对称内嵌型双微盘谐振腔而言, 缺陷半径为 $3.2\mu\text{m}$ 、缺陷边距为 400nm 、内嵌微盘半径为 $2.35\mu\text{m}$ 、耦合间距为 148nm 时, 能实现 $1.128\mu\text{m}$ 波长的单模谐振。内嵌型双微盘谐振腔与传统的单微盘谐振腔相比, 可以较好地克服微盘模式复杂的缺点, 并可实现特定谐振模式的筛选; 与常见的双盘结构相比, 结构尺寸更小, 有利于器件的微型化与集成化。若结合垂直耦合器或光纤耦合器, 还可构建高性能传感器。

参考文献

- [1] 阎守胜, 甘子钊. 介观物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 1995, 276-287.
- [2] ZOU Chang-ling, DONG Chun-hua, CUI Jin-ming, *et al.* Whispering gallery mode optical microresonators: fundamentals and applications[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2012, **42**(11): 1155-1175.
邹长铃, 董春华, 崔金明, 等. 回音壁模式光学微腔: 基础与应用[J]. *中国科学 物理学 力学 天文学 (中文版)*, 2012, **42**(11): 1155-1175.
- [3] ARNOLD S, KHOSHIMA M, TERAOKA I, *et al.* Shift of whispering-gallery modes in microspheres by protein adsorption[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(4): 272-274.
- [4] VOLLMER F, ARNOLD S, KENG D. Single virus detection from reactive shift of whispering gallery mode[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, **105**(52): 20701-20704.

- [5] ARMANI A M, KULKARNI R P, FRASER S E, *et al.* Label-free single-molecule detection with optical microcavities [J]. *Science*, 2007, **317**(5839): 783-787.
- [6] IQBAL M, GLESON M, SPAUGH B, *et al.* Label-free biosensor arrays based on silicon ring resonators and high speed optical scanning instrumentation [J]. *IEEE Journal*, 2010, **16**(3): 654-661.
- [7] CHAO C Y, GUO L J. Biochemical sensors based on polymer microrings with sharp asymmetrical resonance [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **83**(8): 1527-1529.
- [8] YEGRAYAN S, ROMAN W, LU H, *et al.* On-chip integration of microfluidic channels with ultra-high Q silicon microdisk resonators for lab-on-a-chip sensing applications [C]. IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, Lake Buena Vista, 2007, 50-51.
- [9] KIPPENBERG T J, VAHALA K J. Demonstration of high-Q microdisk resonators; fabrication and nonlinear properties [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics of OSA, America, 2007, CFH5.
- [10] ARMANI D K, KIPPENBERG T J, *et al.* Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip [J]. *Nature*, 2003, **421**(6926): 925-928.
- [11] 夏志轩. 光学微环生物传感器的设计与优化 [D]. 华中科技大学, 2007.
- [12] JIANG Jun-feng, LIU Tie-gen, LI Hai-wei, *et al.* Review on label-free optical bio-sensing technology based on whisper-gallery-mode [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2010, **30**(11): 3076-3080.
江俊峰, 刘铁根, 李海伟, 等. 基于回音壁谐振模的无标记光学生物传感技术 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(11): 3076-3080.
- [13] NÖCKEL J U, STONE A D, CHEN G, *et al.* Directional emission from asymmetric resonant cavities [J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(19): 1609-1611.
- [14] FANG W, YAMILOV A, CAO H. Analysis of high-quality modes in open chaotic microcavities [J]. *Physical Review A*, 2005, **72**(2): 023815.
- [15] APALKOV V M, RAIKH M E. Directional emission from a microdisk resonator with a linear defect [J]. *Physical Review B*, 2004, **70**(19): 195317.
- [16] DEYCH L, OSTROWSKI M, YI Y. Defect-induced whispering gallery mode resonances in optical microdisk resonators [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(16): 3154-3156.
- [17] 宋贵才, 全薇. 光波导原理与器件 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012, 119-123.