

微盘腔垂直耦合器特性的拓展分析*

舒方杰†

(商丘师范学院物理与电气信息学院, 商丘 476000)

(2012年8月12日收到; 2012年9月10日收到修改稿)

利用垂直于微盘腔边界的波导与腔耦合是一种新开发的耦合技术. 采用有限元数值模拟方法对垂直耦合器的腔尺寸适应性、波长适应性和端口扩展性做出详细分析. 结果证实: 垂直耦合器在大尺寸腔中或者多个波段均有效; 并且多个垂直耦合器可以和同一盘腔交换能量, 实现滤波、分束、光路交叉的功能. 垂直耦合器在以微腔为元件的集成光路中的应用将使材料选取和光路排布更为灵活.

关键词: 微纳光学, 微腔, 回音壁模式, 垂直耦合器

PACS: 42.60.Da, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.62.064212

1 引言

利用光在腔边界的全反射, 光学回音壁模式微谐振腔(微腔)将能量长时间地约束在腔内, 形成高品质因子(Q)、小模式体积的准束缚态^[1]. 高 Q 模式的频率响应线宽非常窄, 这使微腔作为窄带滤波^[2]、高灵敏度传感^[3]的核心元件时具有明显优势; 再加上模式体积小等优点, 微腔在集成光路、片上实验室芯片中可用作低功耗的激光光源^[4]和非线性元件^[5]等.

微腔作为光路的一部分需要同外界交换能量/信息(耦合). 目前在实验中应用最广泛的耦合方式是将外部耦合器件, 如波导^[6]、光纤锥^[7,8]和棱镜, 从侧面切向靠近微腔. 当耦合器支持的模式与腔模的倏逝场重叠, 并且二者的传播常数满足相位匹配条件时, 有效的耦合被建立. 在这种平行耦合实验中, 精确调节耦合器和微腔的间距以满足相位匹配条件, 能获得接近100%的耦合效率^[9]. 但是, 平行耦合在应用中暴露出几个问题: 第一, 微腔中的正、反转模式耦合进入波导后造成相反的两个能量发射方向, 而作为激光光源一般要求单方向发射; 第二, 耦合区域大, 使微腔的耦合接口数目受到限制; 第三, 相位匹配条件限制耦合器和微腔的

折射率之差不能取得太大. 这几个问题不但对当前微腔工作环境的稳定性提出了挑战, 并且极大地限制了今后微腔在多材料混合的集成光路^[10]中的应用.

垂直耦合器的提出解决了这些问题. 最早的垂直耦合器用来连接两个正方形微腔, 耦合微腔中形成光学分子谐振模式可类比研究双原子分子的电子态^[11]. 此后, 利用传统的平面光路制作方法, 得到连接有垂直耦合波导的方形半导体微腔激光器, 实验中观察到有效的单向发射激光^[12]. 接下来的数值模拟研究把方形谐振腔换作圆形腔, 得到65%的输出耦合效率^[13]. 随后, 一种波导和微圆柱腔间带沟槽的非接触式垂直耦合光路被设计和制作, 这种半导体微腔激光器具有更小的激发阈值^[14]. 最近, 在非对称腔边界合适的位置引出一根波导, 利用混沌辅助通道作用, 在不破坏腔模高 Q 特性的同时将激光导出, 输出耦合效率高达95%^[15]. 我们近期通过数值模拟和理论推导, 揭露垂直耦合器无须满足位相匹配条件的优异特性, 并且提出用一个垂直耦合器同时作为能量注入和输出端口^[16].

不过垂直耦合器的研究仍处于探索初期, 很多问题有待解决. 例如, 以前研究的对象多是尺寸较小的微腔, 那么垂直耦合器能否和较大的微腔耦合

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11204169)和河南省教育厅科研基金(批准号: 2011A140021)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fjsu@mail.ustc.edu.cn

目前尚不清楚. 此外, 同一耦合系统在不同波长下是否都能保持高耦合性能? 如何利用垂直耦合器耦合区域小的优势, 在一个微腔上接入多个垂直耦合器实现集成光路中的滤波、分光等功能? 本文通过研究以上几方面的问题, 进一步拓展垂直耦合器在大腔中和多波长下的应用, 明确多端口垂直耦合器的耦合特性, 为今后实验研究提供参考.

2 大腔的耦合

本文利用有限元方法模拟研究等效到二维平面的波导垂直耦合器(波导)和微盘腔的耦合, 只考虑 TM 偏振即电场矢量垂直于盘平面的情况. 设定微盘腔等效折射率 $n_0 = 3.3$, 周围介质是空气, 折射率 $n = 1$; 波导等效折射率在没有特别提及的情况下定为 $n_w = 3.3$; 根据文献^[16]对耦合效率优化的结果, 设定波导与微腔的间距 $0.2 \mu\text{m}$; 波导宽度也为 $0.2 \mu\text{m}$. 支持单基模传播, 符合集成光路中单模传播的通常做法^[17].

单个垂直耦合器和微腔连接. 耦合至波导中的那部分能量对光路来说是有效的, 而辐射至空气中的是不利的能量消耗, 因此定义垂直耦合器的耦合效率: 单位时间通过波导的能量 / (单位时间通过波导的能量 + 单位时间辐射至空气中的能量). 其他参数不变, 仅改变腔的大小和波导的折射率, 计算通信波长 1550 nm 附近的谐振模式的耦合效率(图 1(a)). 微腔尺寸较大时, 虽然耦合效率随波导折射率的变小有所降低, 但是在折射率大于 2 时耦合效率均保持在 50% 以上, 与传统的平行耦合方式中耦合效率关于波导折射率和波导与腔间距极度敏感的特点形成鲜明对比. 这说明垂直耦合器与微腔耦合时不需要考虑相位匹配的优异特性在腔较大时仍然保持(图 1(b), 图中显示的是场强的对数分布, 全文中场强分布图均以对数坐标显示相对强度).

在四种折射率的波导中, 耦合效率随腔半径变化的趋势一致, 都是在半径由 $1 \mu\text{m}$ 变为 $2 \mu\text{m}$ 时耦合效率明显增大, 保持一段之后又略微下降, 半径大于 $4 \mu\text{m}$ 之后耦合效率在某个稳定值附近做周期性的小幅振荡. 第一阶段的增大是因为微腔的 Q 值随尺寸变大指数增长. 微腔半径为 $1 \mu\text{m}$ 时, 基模(基模是指沿径向的极大值数目为 1 的模式, 又称回音壁模)的 Q 值较低, 即向四周均匀辐射的能量较多, 则耦合进入波导的能量占总辐射能量的比例较

小. 微腔半径为 $2 \mu\text{m}$ 时, 基模的 Q 值显著增大, 均匀辐射能减少, 耦合效率增大. 第二阶段中耦合效率略微下降, 是因为谐振模式延伸至腔外的倏逝场长度与腔边界的曲率半径反相关. 微腔半径在 $2\text{--}3 \mu\text{m}$ 范围时, 腔模倏逝场较长, 与腔间隔 $0.2 \mu\text{m}$ 的波导有效耦合, 激发较强的传播场. 而微腔半径大于 $4 \mu\text{m}$ 时, 倏逝场变短, 相比较而言激发的传播场减弱. 因此, 在大腔耦合系统中通过调节波导和腔之间的间距, 耦合效率有望增大.

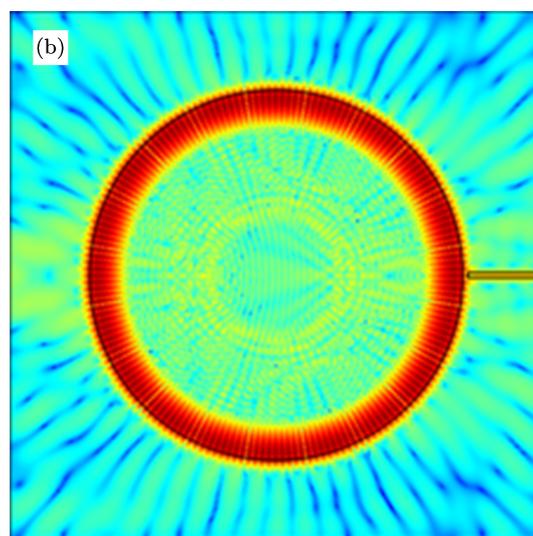
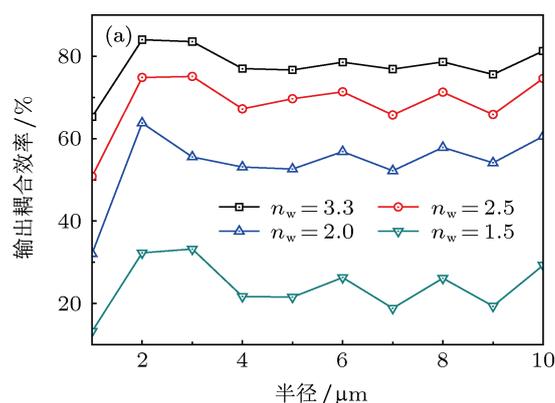


图 1 (a) 四种折射率的波导, 耦合效率与腔半径的关系; (b) 半径 $r = 7 \mu\text{m}$, 波导折射率 $n_w = 3.3$ 的大腔中的谐振模式(场强分布的对数坐标)

第三阶段, 耦合效率的振荡是因为波导的加入打破盘腔的圆对称性, 使得盘腔中角动量不同的高、低 Q 模式之间可以发生耦合(图 2(a))^[18]. 高 Q 的基模能量耦合进入与其谐振频率相近的低 Q 模式, 向腔外的辐射会显著增强(图 2(b)), 则耦合进入波导的能量比例减少, 耦合效率降低. 因为相邻基模的频率间距比低 Q 的高阶模式间距小, 因此随着腔半径的逐渐变大, 相应高、低 Q 模式之间的频率

间距周期性变化,造成耦合效率的周期性变化.此外,虽然受限于计算机的计算能力,最大只算到半径 $10\ \mu\text{m}$ 的腔,但是,从耦合效率随半径变化的趋势可见,垂直耦合器与尺寸更大的微腔也能形成有效耦合.

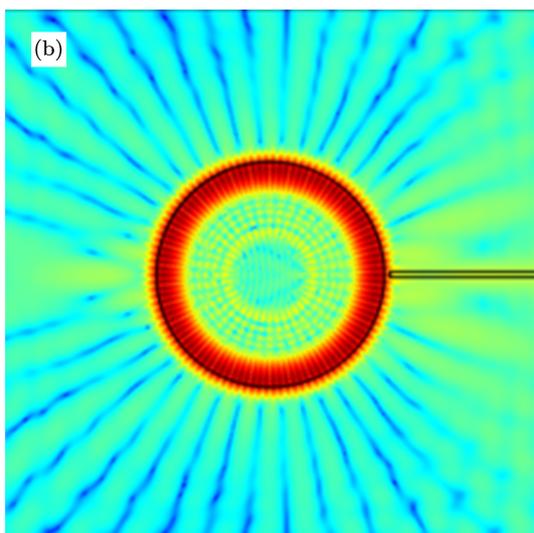
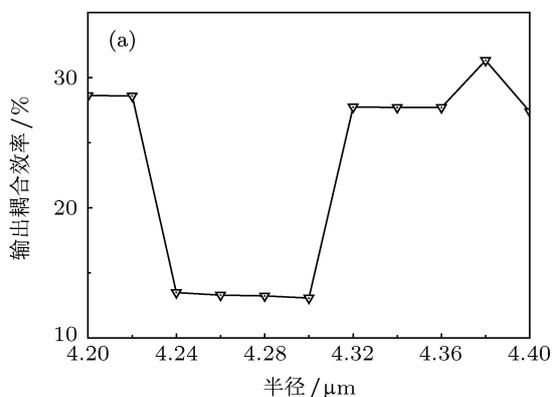


图2 (a) 效率随半径变化的细节 ($n_w = 1.5$); (b) 基模与低 Q 的高阶模式耦合, $r = 4.24\ \mu\text{m}$

3 不同波段的耦合

以半径 $2\ \mu\text{m}$ 的微盘和单个垂直耦合器的耦合为例,计算出在波长 $1550\ \text{nm}$ (m 约 22, m 是正整数, $2m$ 为模式沿角向分布的极大值数目) 附近的基模耦合效率随波长的变化(图3).除了 $m = 21$ 时的耦合效率降低至 50% 左右以外,在其他谐振波长下耦合效率都保持在 70% 以上,垂直耦合器可以工作在多个波段.查看场分布(限于篇幅,文中并未给出)可知 $m = 21$ 时耦合效率的降低依然是因为基模与低 Q 的高阶模式耦合造成的.在器件设计时应尽量避免基模和高阶模式的耦合,这样耦合效率就能在多波段保持较高水平.可以预见,如果用只支持基

模发生谐振的圆环腔代替圆盘腔,可以避免因为与高阶模式耦合导致的输出耦合效率的下降.

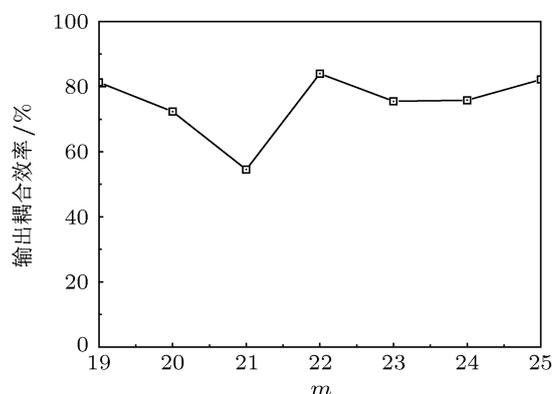


图3 耦合效率与 m 代表的波长的关系

4 多端口

建立双耦合端口模型(图4(a)),其中微盘腔半径为 $2\ \mu\text{m}$.在该模型下求解得到波长 $1550\ \text{nm}$ 附近有 $m = 22$ 关于水平对称轴偶对称的基模(图4(a)),其谐振频率为 $1.910817 \times 10^{14}\ \text{Hz}$.同样的 $m = 22$ 基模频率在单一波导和不加波导的盘中分别是: $1.910818 \times 10^{14}\ \text{Hz}$ 和 $1.910823 \times 10^{14}\ \text{Hz}$.以上三个频率,直到小数点后第5位有效数字时才有差别,可见波导的引入对发生谐振的频率影响不大.这是因为波导距离微腔较远,没有深入腔倏逝场强度较大区域,因此对腔模有效折射率的影响很小.那么可以预见在引入更多波导时,谐振频率也不会有大的变动,所以在下面研究多端口传输时选定与腔共振的输入信号频率为 $1.910817 \times 10^{14}\ \text{Hz}$.另一方面,有两个因素导致腔内能量损耗:往空气中的辐射和向波导的耦合(忽略材料吸收损耗).有波导时的损耗明显增大,相应的 Q 值降低,且外接波导数目越多损耗越大,这表明有一部分能量通过耦合进入波导而离开微腔.

与腔共振的单色光沿左侧的输入波导朝向微腔入射,在右侧输出波导中观测到有效的能量输出(图4(b)).测算辐射能流,不计输入波导所在的区域,得到输出波导的耦合效率达 82%.同时,如果非谐振时的耦合能被有效抑制的话,这种双端口结构就可以用作滤波器或光开关.在入射端做 $m = 23$ 基模谐振频率 $1.988523 \times 10^{14}\ \text{Hz}$ 附近的扫描,模拟得到各频率下的场分布.以出射端波导横截面上场强度的积分表示输出波强度,做归一化处理得到频

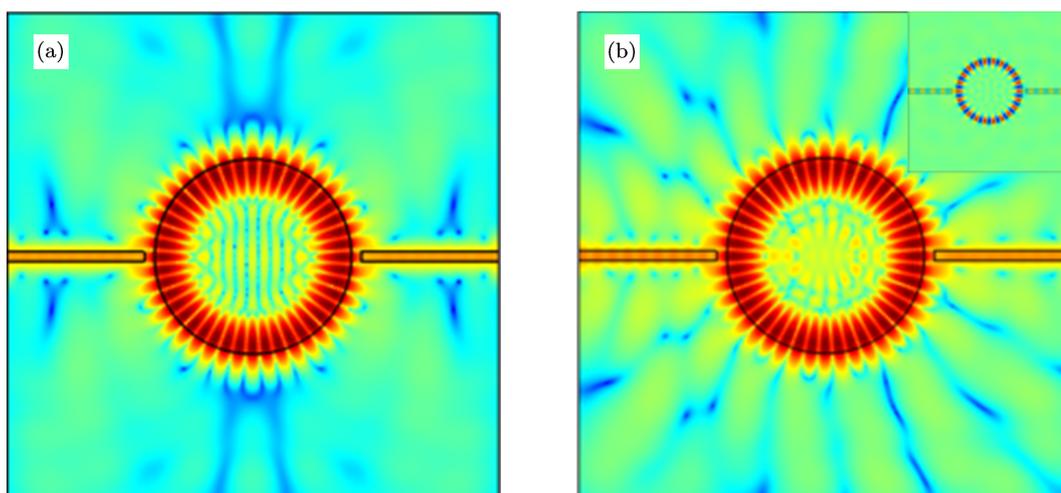


图4 2端口 (a) 场强分布表示的谐振模式; (b) 由左端输入谐振信号所激发的光场, 插图为电场复振幅的实部

谱响应曲线(图5黑线). 输出频谱响应曲线关于谐振频率呈非对称分布, 左低右高的线形正好与文献[16]中单端口输入时反射谱左高右低的 Fano 线形互补, 大体上满足能量守恒的关系. 从频谱响应上看, 从低频侧接近谐振频率形成的峰很陡峭, 频率变化仅 0.0001×10^{14} Hz, 透射强度就从约 0.02 增长到 1. 合理利用这个陡峰再配合微腔调谐技术就可以将双端口的盘腔用作光路中的高速、高隔离的光开关. 但是输出频率响应曲线在远离谐振频率时, 特别是高频侧依旧有较大的强度. 这样的输出响应从滤波的角度来看, 不能有效地滤除复色光中失谐的频率成分. 分析失谐时的场分布(限于篇幅, 文中并未给出), 发现较大的透射强度是由入射端口出射的光沿直线穿透微腔再进入输出端口形成的. 基于谐振情况下场分布的对称性, 转动输出波导, 只要腔模关于输出波导所处的直线仍然是偶对称则依然能够实现有效耦合[16]. 例如, 将输出波导以盘腔圆心为中心逆时针转过 86° 角, 建立新的模型, 再做扫描得到输出光谱(图5灰线). 在这种输入输出波导不在同一直线的情况下, 失谐的光就不能耦合进入输出波导, 透过率接近零. 另外, 透过峰的半高宽约为 0.0001×10^{14} Hz. 在不计较元件插入损耗的情况下, 该输出频率响应线形表明盘腔加两个成一定角度的垂直耦合器可以实现窄带滤波功能.

在双端口耦合模型的基础上增加一个输出端口形成三端口光路(图6). 图6(a)所示的三根波导呈夹角 120° 的对称分布, 从左侧波导输入电磁波信号. 从腔内场强和波导场强的对比可见, 此时能量主要集中在腔内而未能被输出波导有效导出. 原

因仍然是腔场的复振幅关于输出波导所在的直线近似奇对称, 而波导中只支持偶对称的基模, 二者的重叠积分即耦合系数很小. 调整输出波导的位置到与水平对称轴呈 57° 角(图6(b)), 此时两输出波导中均有较强的耦合场. 这种三端口结构可以在集成光路中作为 3 dB 功分器使用, 或者调整输出波导的角度呈非对称分布实现所需要的分光比.

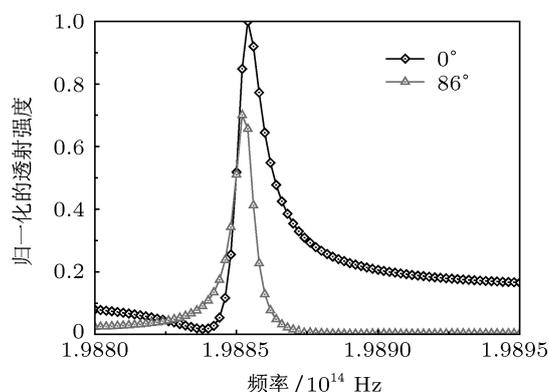


图5 频谱响应曲线

继续增加端口至四个(图7), 四根波导对称分布时, 以 $m = 22$ 的谐振波长从左侧端口入射, 三根输出波导均有显著的能量导出(图7(a)). 如果改为 $m = 23$ 的谐振波长入射, 则只有处于右侧的输出波导与微腔发生强耦合被激发出传导模式, 而上下两侧的输出波导中无能量注入(图7(b)). 能量在三根输出波导中做不同分配的原因在三端口模型中已经阐述. 对于四端口模型可以推断, 输入谐振波长对应的 m 为奇数时, 仅右侧的波导有显著的能量导出, 根据对称性, 从上(下)侧波导输入的光也只能

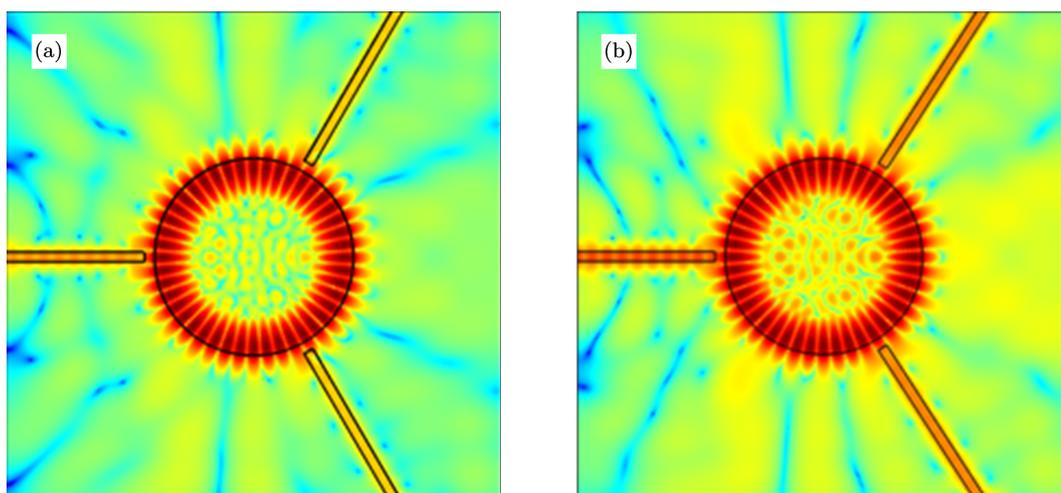


图 6 3 端口 (a) 右侧波导与水平轴呈 60° 夹角; (b) 57° 夹角

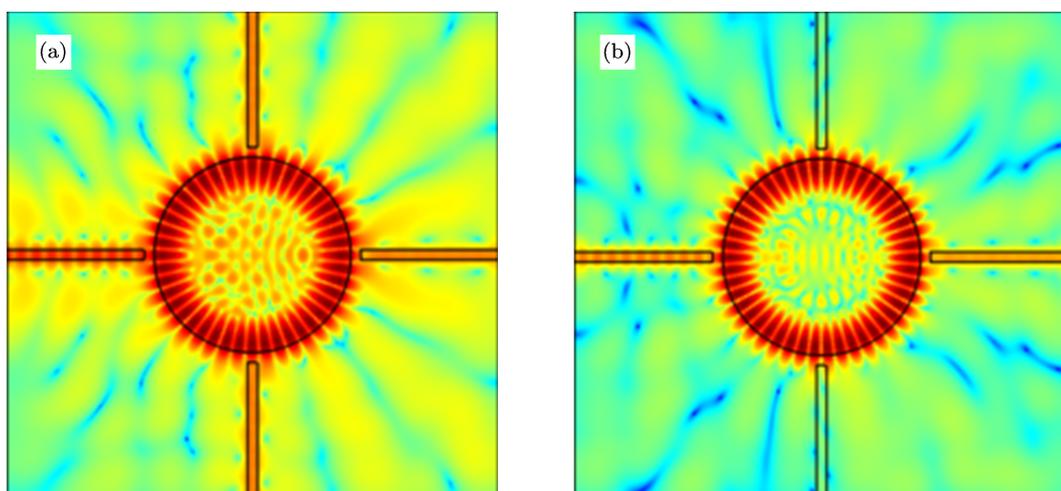


图 7 4 端口 (a) $m = 22$; (b) $m = 23$

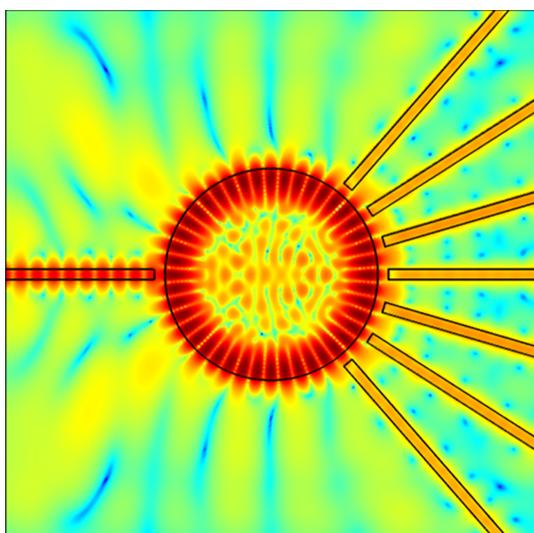


图 8 8 端口

被下(上)侧波导耦合输出,这时四端口结构可以作为光路中的低窜扰交叉路口使用.

更多路的波导同样可以与一个微腔耦合.如图 8 所示,一个输入端口和七个输出端口构成分光光路.

5 结论

垂直耦合器耦合区域小、无须相位匹配的优点不受微腔大小和工作波长的影响.设计得到的双端口光路频率响应曲线满足作为滤波器和光开关的基本特征,三端口光路则可以作为功分器使用,四端口光路除分光功能外,还可以让光路在同一平面内相交.这些特性和功能,使得垂直耦合器在复杂的集成光路中更具应用前景.

- [1] Zou C L, Dong C H, Cui J M, Sun F W, Yang Y, Wu X W, Han Z F, Guo G C 2012 *Sci. Sin. Phys. Mech. & Astron.* **42** 1155 (in Chinese) [邹长铃, 董春华, 崔金明, 孙方稳, 杨勇, 吴晓伟, 韩正甫, 郭光灿 2012 中国科学: 物理学 力学 天文学 **42** 1155]
- [2] Zhou L, Poon A W 2007 *Opt. Express* **15** 9194
- [3] Yan Y Z, Zou C L, Yan S B, Sun F W, Liu J, Xue C Y, Zhang Y G, Wang L, Zhang W D, Xiong J J 2011 *IEEE Photon. Tech. L.* **23** 1736
- [4] Harayama T, Shinohara S 2011 *Laser Photon. Rev.* **5** 247
- [5] Fürst J U, Strelakov D V, Elser D, Lassen M, Andersen U L, Marquardt C, Leuchs G 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 153901
- [6] Choi S J, Djordjev K, Dapkus P D 2003 *IEEE Photon. Tech. L.* **15** 1330
- [7] Min B K, Ostby E, Sorger V, Ulin-Avila E, Yang L, Zhang X, Vahala K J 2009 *Nature* **457** 455
- [8] Yang R, Yu W H, Bao Y, Zhang Y X, Pu X Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6412 (in Chinese) [杨睿, 於文华, 鲍洋, 张远宪, 普小云 2008 物理学报 **57** 6412]
- [9] Cai M, Painter O, Vahala K J 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 74
- [10] Feng S, Lei T, Chen H, Cai H, Luo X, Poon A W 2012 *Laser Photon. Rev.* **6** 145
- [11] Bayer M, Gutbrod T, Reithmaier J P, Forchel A, Reinecke T L, Knipp P A, Dremin A A, Kulakovskii V D 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 2582
- [12] Huang Y Z, Che K J, Yang Y D, Wang S J, Du Y, Fan Z C 2008 *Opt. Lett.* **33** 2170
- [13] Yang Y D, Wang S J, Huang Y Z 2009 *Opt. Express* **17** 23010
- [14] Ou F, Li X, Liu B, Huang Y, Ho S T 2010 *Opt. Lett.* **35** 1722
- [15] Song Q, Ge L, Redding B, Cao H 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 243902
- [16] Shu F J, Zou C L, Sun F W 2012 *Opt. Lett.* **37** 3123
- [17] Zhu G X, Yu T B, Chen S W, Shi Z, Hu S J, Lai Z Q, Lai Z Q, Liao Q H, Huang Y Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1014 (in Chinese) [朱桂新, 于天宝, 陈淑文, 石哲, 胡淑娟, 赖珍荃, 廖清华, 黄永箴 2009 物理学报 **58** 1014]
- [18] Wang J X, Li J J, Wu W G, Huang Y Z 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0106006 (in Chinese) [王加贤, 李俊杰, 吴文广, 黄永箴 2011 光学学报 **31** 0106006]

Analysis of features of the microdisk cavity perpendicular coupler *

Shu Fang-Jie[†]

(Department of Physics, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China)

(Received 12 August 2012; revised manuscript received 10 September 2012)

Abstract

The use of a waveguide perpendicular to boundaries of the microdisk cavity is a newly developed coupling technique. We make a detailed analysis about the adaptation of the cavity size, the adaptation of the wavelength and the expansibility of the ports. The results confirm that the perpendicular coupler is valid in large cavity or multiple bands. It is shown that multiple perpendicular couplers can exchange energy with a microdisk cavity and work as filter, beam splitter, and crossroads of optical path. The usage of perpendicular coupler in integrated optical circuit with microcavity components will make the selection of materials and arrangement of the optical path more flexible.

Keywords: micro-nano optics, microcavity, whispering-gallery mode, perpendicular coupler

PACS: 42.60.Da, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.62.064212

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11204169) and the Scientific Research Foundation of the Education Bureau of Henan Province, China (Grant No. 2011A140021).

† Corresponding author. E-mail: fjsu@mail.ustc.edu.cn