

# 八边形谐振腔滤波器研究

卢兴建, 肖金标, 孙小菡

(东南大学电子工程系电子学与光通信研究室 南京 210096)

**摘要:**建立了八边形微谐振腔的射线理论模型,推导出了其特征方程,分析了单个八边形谐振腔及两个谐振腔耦合中的模式问题。所得结果与采用时域有限差分法模拟结果符合很好。最后给出了优化后的八边形谐振腔滤波器的材料、具体尺寸、滤波谱图、FSR 以及模场分布图。

**关键词:**微谐振腔; WG 模式; 耦合; 上/下路滤波器。

## Study of the Filter with Octagonal Cavity

LU Xing-jian, XIAO Jin-biao, SUN Xiao-han

**Abstract:** In the study of Whispering-Gallery Modes in octagonal micro-pillar cavities, the eigenequation, deriving from a method based on ray optics, is solved to obtain the resonance wavelength, which agrees very well with the FDTD simulation results. The field distributions of single mode resonance in single and coupled octagonal micro-pillar cavities are observed through the FDTD method. The optimized geometry of the octagonal cavity filter, the material, through and drop spectra, and FSR, are also given.

**Keywords:** Microcavities; optical resonator; WG mode; coupling, add/drop filter

## 1 引言

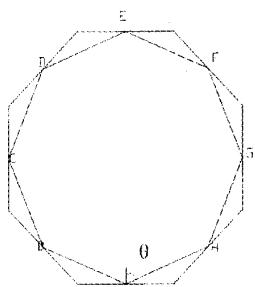
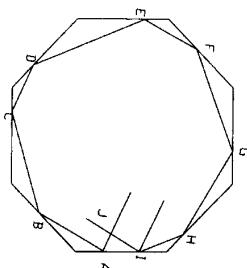
近年来,微环形、微盘型、及多边形谐振腔得到了越来越多的关注。它们被广泛应用在光滤波器、光开关、MUX/DMUX(多路复用器/解复用器)以及半导体激光器等领域<sup>[1]</sup>。与传统的 F-P(法布里-珀罗)谐振腔相比,与最大的优势在于易于实现单片集成。微盘形、多边形谐振腔微环形谐振腔相比加工工艺更加简单,并且微盘形及多边形谐振腔所支持的 WGM(whispering-gallery modes)具有极高的 Q 值。由微盘型及多边形谐振腔做成的光滤波器具有很宽的自由空间谱宽、高的精细度、很好的消光比及微小的几何尺寸。由微盘形及多边形谐振腔可以实现半导体激光器的低阈值甚至零阈值。多边形谐振腔比微盘型谐振腔具有更长的耦合长度,因此具有更好的耦合效率,况且在远场耦合中可以采用相对较宽的耦合间距,易于加工<sup>[2]</sup>。因此研究多边形谐振腔中的光学特性问题具有重要意义。

本文首先从射线光学的原理出发,光波在谐振腔中传播时由于发生全内反射(TIR),光被束缚在谐振腔中<sup>[3]</sup>。当光线在谐振腔中传播一周时只有

满足波形匹配条件的特定波长的光才能产生谐振现象。据此我们导出谐振波长的特征方程。接着我们采用 FDTD(finite-difference time-domain)数值模拟方法对微谐振腔进行分析<sup>[4,5]</sup>,所得结果与采用射线光学模型所得结果符合很好,并得到了谐振情况下的模场分布图。然后我们对两个谐振腔耦合的情况进行了分析,得到了耦合情况下的模场分布情况。文章最后对边长为  $2 \mu\text{m}$ ,介质折射率为 2 的八边形谐振腔滤波器进行了模拟,得到了滤波谱图。

## 2 八边形谐振腔的射线光学模型

光线在八边形谐振腔中的传播情况如图 1 所示,当入射角恰好为  $3\pi/8$  时如图 1,光线经过八次全内反射,其轨迹形成一个封闭的八边形。光在谐振腔中传播的总长度为  $8 a \sin(3\pi/8)$ 。其中  $a$  为谐振腔的边长。更多的情况下,入射角  $\theta \neq 3\pi/8$ ,并且满足  $\theta_c < \theta < 3\pi/4$ 。其中  $\theta_c$  是发生全内反射时的临界角。如图 2,光线在谐振腔中的轨迹不再是一个封闭的多边形,但通过分析可知仍可能满足相位匹配条件。我们可以采用把谐振腔中的光线“拉直”的方法,如图 3 所示:

图 1 入射角为  $3\pi/8$  时图 2 入射角不等于  $3\pi/8$  时

因此可以把多边形谐振腔等效成为一腔长为的 F-P 腔。通过推导可得, 在相同的人射角的情况下, 光线在谐振腔中运行一周的长度是不变的, 也就是说与具体的人射位置无关, 即,  $l = 4na(\sin\theta + \sin(3\pi/4 - \theta))$ ,  $n$  为介质折射率。由此可得满足相位匹配的特征方程为:

$$kl + 4\phi(\theta) + 4\phi(3\pi/4 - \theta) = m2\pi$$

其中,  $\phi(\theta)$  和  $\phi(3\pi/4 - \theta)$  分别为入射角为  $\theta$  和  $3\pi/4 - \theta$  时由于发生全内反射引起的相位变化。 $k$  为自由空间波矢。 $m$  为自然数。

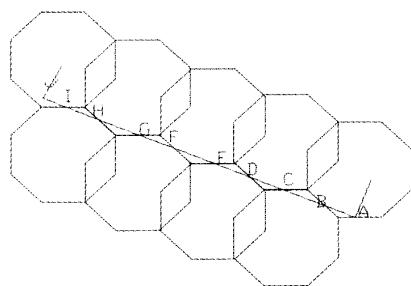
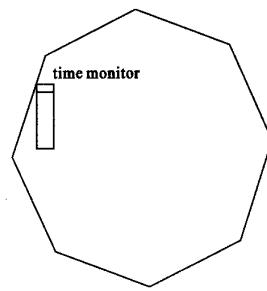


图 3 谐振腔中的光线轨迹等效图

### 3 谐振腔中的模式问题

采用二维 FDTD 方法对边长为  $2 \mu\text{m}$ , 介质折射率为  $2(\text{Si}_3\text{N}_4)$  的微八边形谐振腔进行分析, 如图 4 所示。

图 4 边长为  $2 \mu\text{m}$ , 入射角  $3\pi/8$ 

考虑理想状态下: 在谐振腔中加入一段波导, 使沿此波导入射的本征模与八边形谐振腔边界的入射角度恰好为  $3\pi/8$ 。这段波导与谐振腔具有相同的折射率, 只起到导波的作用而并不影响谐振腔的结构。在宽度为  $0.4 \mu\text{m}$ , 长为  $0.6$  倍谐振腔边长的波导端加载一中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ ,  $10 \text{ fs}$  的高斯脉冲。该电磁波为 TM 波, 如图 4 所示。并在入射端设置监控器, 用来测试电磁场的强度。在此设置格点精度为  $0.01 \mu\text{m}$ , 时间步长为  $0.01 \text{ fs}$ 。采用  $0.5 \mu\text{m}$  的 PML 边界条件, 其反射率设为  $10^8$ 。图 5 为经过  $600 \text{ fs}$  的运算后所得到的谐振谱图。从图 5 可以看出: 谐振波长的间距是变化的。随着波长的增加间距越来越大, 与理论分析一致。

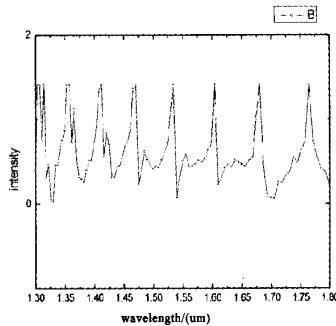
图 5 经过  $600 \text{ fs}$  计算后得到的谐振谱

图 6 所示为波长为  $1.534 \text{ nm}$  的 TM 偏振波以  $3\pi/8$  角度连续波入射, 经历  $600 \text{ fs}$  达到稳定情况地谐振模场图。从图中可清晰地观察到单模谐振的情况。

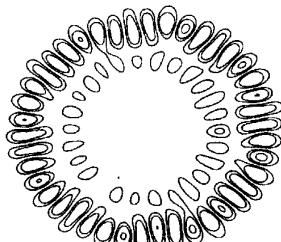
图 6 单个谐振腔的模场示意图 谐振波长为  $1.534 \text{ nm}$

图7所示为相同入射波的情况下,两个间距为 $0.2\mu\text{m}$ 的谐振盘经历2 000 fs后所得到的谐振模场图。由于相同的谐振腔尺寸及入射条件,因此所得模场形状是一致的。包括径向与角向的模斑个数与形状。

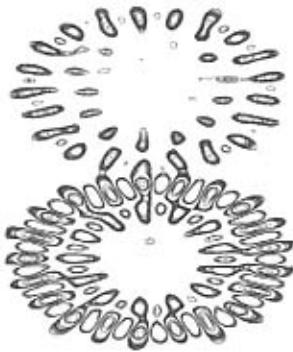


图7 两个谐振腔耦合的模场示意图 谐振波长1 534 nm  
间距 $0.2\mu\text{m}$ 。

#### 4 八边形谐振腔型滤波器的滤波特性分析

图8所示谐振腔的边长为 $2\mu\text{m}$ ,输入波导宽度为 $0.4\mu\text{m}$ ,波导与谐振腔的间隙为 $0.2\mu\text{m}$ 。介质折射率仍为2。采用了厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 的BPM边界条件,反射率为 $10^\circ$ 。图9为10 fs的高斯脉冲经过1 000 fs后所得到的滤波谱图。从图中可以看出FSR(自由振荡光谱范围)为80 nm,精细度为8 nm,并具有很高的Q值。

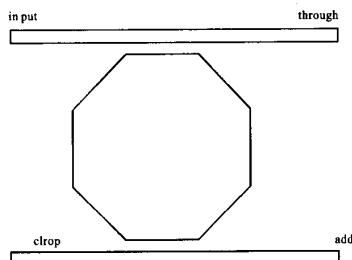


图8 八边形谐振腔滤波器示意图

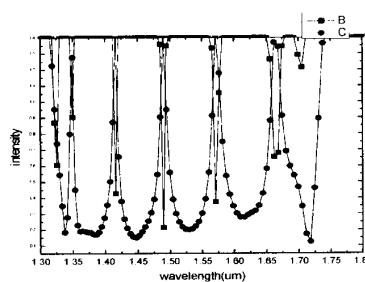


图9 滤波器的滤波谱图

#### 5 结论

建立了八边形谐振腔的射线理论模型,简单分析了其模式。然后采用FDTD的数值计算方法对一边长为 $2\mu\text{m}$ ,介质折射率为2的谐振腔进行了分析,得到了预想的单模谐振结果。并对两个谐振腔耦合的情况进行了分析。画出了其模场分布示意图。最后对八边形谐振腔滤波器的具体滤波情况进行了分析。得到了具体的滤波谱图(FSR)。从图中可看出该滤波器具有较好的自由空间谱宽、精细度以及消光比。

#### 参考文献:

- [1] Andrey B. Matsko and Vladimir S. Ilchenko, Optical Resonators With Whispering-Gallery Modes-Part I: Basics. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2006, 12, 3-14.
- [2] Alain Morand, Kien Phan-Huy, Yohan Desieres, and Pierre Benech. Analytical Study of the Microdisk's Resonant Modes Coupling With a Waveguide Based on the Perturbation Theory. *J. Lightwave. Technol.*, 2004, 22, 827-832.
- [3] Frankie Kin Lam Tung, Ning Ma and Andrew W. Poon, FDTD simulation of hexagonal micropillar cavities. Proceeding of SPIE Vol. 5116, pp. 488-494, 2003.
- [4] S. C. Hagness, D. Rafizadeh, S. T. Ho, and A. Taflove. FDTD Microcavity Simulations; Design and Experimental Realization of Waveguide-Coupled Single-Mode Ring and Whispering-Gallery-Mode Disk Resonators. *J. Lightwave. Technol.*, 1997, 15, 2154-2165.
- [5] T. Yamamoto and M. Koshiba. Analysis of propagation characteristics of whispering gallery modes in a dielectric disk or a curved rectangular dielectric waveguides. *J. Lightwave Technol.*, 1993, 11, 400-404.

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>