

采用单环微谐振器的光滤波器特性及其局限性*

杨建义¹, 江晓清¹, 王明华¹, ZHOU Qing-jun², Chen Ray T.²

(1. 浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027; 2. Microelectronics Research Center/Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Texas at Austin, Austin TX 78758, USA)

摘要:对采用单环微谐振器的光滤波器的特性进行了分析。在给定的传递函数和相关特性公式基础上, 分析了出/入环光耦合系数与通带带宽和通带消光比间的关系, 指出了它们之间、以及与自由谱范围间存在的相互约束; 分析并给出了单环光滤波器的通带带宽比例, 带宽比例值不依赖于任何器件结构参数, 是限制单环微谐振器作为实用光滤波器的主要因素; 分析了存在于微环中光的损耗对单环光滤波器输出的影响, 小的光损耗即会导致滤波响应的巨大衰减, 大的光损耗则更是会导致带宽的展宽和带宽比例值的增大。

关键词:集成光学; 光波导; 光微环谐振器

中图分类号: TN256 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2003)01-0012-05

Characteristics and Limitations of Optical Filters Employing Single-ring Microresonators

YANG Jian-yi¹, JIANG Xiao-qing¹, WANG Ming-hua¹, ZHOU Qing-jun²,
Chen Ray T.²

(1. Dept. of Information Science & Electronics Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310037, China; 2. Microelectronics Research Center/Dept. of Electrical and Computer Engineering University of Texas at Austin, Austin TX 78758, USA)

Abstract: The transfer function was presented first and then other related formula was derived. The influence of the into-/out-of-ring coupling coefficients on the bandwidth and extinction ratio of the spectral band was investigated and the design restriction among them and free-spectral range was discussed. The analytical results show the bandwidth ratio of the spectral passband is almost independent of any structure parameters of the single-ring microresonator when the into-/out-of-ring coupling coefficients are very small. The calculated values of bandwidth ratios indicate that the bandwidth ratio is the key issue which limits the usage of the single-ring microresonator as a practical optical filter. The influence of optical loss is also analyzed. Low optical loss will cause sharp attenuation of the filtering response and severe optical loss also can widen the bandwidth and increase the bandwidth ratio.

Key words: integrated optics; optical waveguide; optical micro-ring resonator

1 引 言

高密度平面光集成是当前光波导技术发展的重要方向之一。1969 年 Marcatili^[1]提出了光微环谐振器的概念与结构, 但直至近年由于平面工艺水平不断

地提高, 基于平面波导技术的光微环谐振器才受到人们的关注和研究, 并得以迅速发展。作为基本结构, 光微环谐振器被用于研制半导体激光器^[2,3]、光波导滤波器^[4,5]和光波导调制器^[6]等。由于结构尺寸小而可实现功能多, 其已经成为高密度光集成的基本结构单

* 收稿日期: 2002-09-01 修订日期: 2002-10-28

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(G1999033104); 国家自然科学基金资助项目(60177012)

元的可能选择之一。

作为光微环谐振器的基本功能,对光波所具有的滤波特性是其主要应用之一。为了对采用微环谐振器的光滤波器特性有更为详细的把握,本文在基于转移矩阵法的传递函数基础上,对单环光滤波器进行深入的分析。首先,将讨论出/入环光耦合系数在其滤波特性中所起的作用,分析其与通带消光比、通带带宽和自由谱范围间存在的相互束缚;其次,将分析其滤波曲线所具有的带宽结构特点,指出其中存在的局限性;对微环中光传输损耗的影响也将进行分析。

2 单环光滤波器的传递函数

光微环谐振器特性的理论分析方法主要包括转移矩阵法(transfer matrix method)^[7]和耦合模理论(CMT coupled mode theory)^[8,9],有限差分域法FDTD(finite-different time domain method)^[10,11]则是主要的数值分析与模拟方法。由于转移矩阵法可以给出完整的光微环谐振器的特性分析,不仅反映出光波频谱在谐振点附近时的传输特性,也包括远离谐振点时的情况,所以本文采用转移矩阵法给出的分析公式。图 1(a)为采用单环微谐振器的光滤波器基本结构示意图,图中的光波导均要求为单模波导。图中采用了定向耦合器结构实现微环与 2 个输入/输出光波引导波导间的耦合。为此,定义 K_1 和 K_2 为出/入环光耦合系数。即对于这 2 个耦合用 2×2 定向耦合器,单位功率光波由一支波导输入时,从另一波导耦合输出的分量(不计入光波传输损耗)分别为 K_1^2 和 K_2^2 。由转移矩阵法可以得到单环光滤波器由输入端至下路通道输出端和主通道输出端的传递函数分别为^[7,12]

$$D(\theta) = \frac{\alpha^{1/2} K_1 K_2 \exp(-j\theta/2)}{1 - \alpha T_1 T_2 \exp(-j\theta)} \quad (1a)$$

$$B(\theta) = \frac{T_1 - \alpha T_2 \exp(-j\theta)}{1 - \alpha T_1 T_2 \exp(-j\theta)} \quad (1b)$$

式中, $T_i^2 = 1 - K_i^2$, $i = 1, 2$; α 为单位功率光波在微环中传输一周后的功率值; θ 定义为归一化光波频率

$$\theta = \frac{2\pi\nu}{FSR_\nu} - 2\pi M \quad (2)$$

式中 M 为正整数。即为不同频率 ν 的光波在微环中传输 1 周后的相位延迟量; FSR_ν 为微环的频率自由谱范围。当 $\theta = 2\pi N$ (N 为整数) 时,式(1)出现谐振点。由于其固有的 2π 周期性,所以仅需分析 θ 在零点谐振点附近的 1 个周期。

图 1(b)和(c)给出了采用单环微谐振器的光滤波器的典型光强传输函数曲线。可以看到,下路通道

是典型的带通滤波器,由式(1a)可以得出其相应的光强度传递函数为

$$|D(\theta)|^2 = \frac{\alpha K_1^2 K_2^2}{(1 - \alpha T_1 T_2)^2 + 4\alpha T_1 T_2 \sin^2(\theta/2)} \quad (3)$$

在谐振点附近,即 θ 满足条件 $|\theta| \ll 1$, 有 $\sin(\theta/2) \approx \theta/2$, 式(3)变为

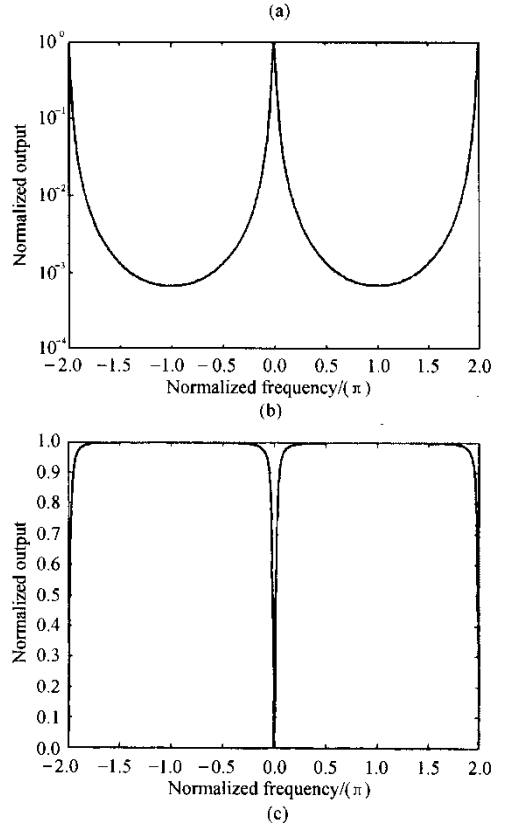
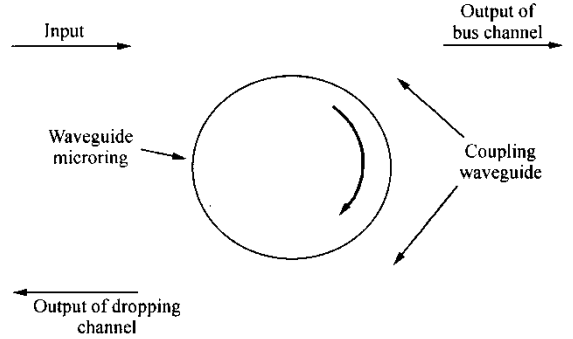


图 1 (a) 采用单环微谐振器的光滤波器结构示意图;
(b) 下路通道输出光强的典型传递函数;
(c) 主通道输出光强的典型传递函数

Fig. 1 The schematic diagram of an optical resonator with single-ring-microresonator (a); The typical curve of the intensity transfer function of the dropping channel (b); The typical curve of the intensity transfer function of the main channel (c)

$$|D(\theta)|^2 = \frac{\alpha K_1^2 K_2^2}{(1 - \alpha T_1 T_2)^2 + \alpha T_1 T_2 \theta^2} \quad (4)$$

图2给出了式(4)与式(3)间的比较。假设滤波器通带带宽远远小于 FSR_v (这是器件应用设计时的实际情况,即对带宽的分析仅需考虑谐振点附近),则下路通道传输函数的通带归一化带宽可以表示为

$$BW_\eta = 2 \sqrt{\eta - 1} \frac{K^2}{T} \quad (5)$$

式中, $T^2 = \alpha T_1 T_2$, $K^2 = 1 - T^2$; η 则定义为带宽因子。式(5)给出的即为光强降低 $10 \lg \eta$ (dB) 后的通带带宽。

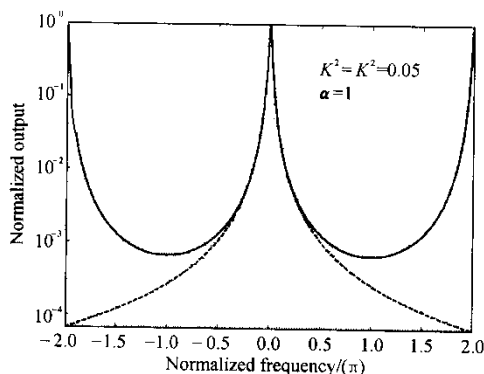


图2 在谐振点附近的式(4)曲线(虚线)与典型光强传递函数曲线(实线)间的比较

Fig. 2 The comparison of the (4) (dash line) with the typical curve of the intensity transfer (solid line) near the resonance point

由式(1b)可以获得主通道的光强度传输递数

$$\begin{aligned} |B(\theta)|^2 &= \frac{T_1^2 + (\alpha T_2)^2 - 2\alpha T_1 T_2 \cos \theta}{1 + (\alpha T_1 T_2)^2 - 2\alpha T_1 T_2 \cos \theta} \\ &= 1 - \frac{1 - \alpha^2 T_2^2}{\alpha K_2^2} \frac{\alpha K_1^2 K_2^2}{(1 - \alpha T_1 T_2)^2 + 4\alpha T_1 T_2 \sin^2(\theta/2)} \\ &= 1 - \frac{1 - \alpha^2 T_2^2}{\alpha K_2^2} |D(\theta)|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

可以看到,通过对下路通道的分析即可知晓主通道的频谱特性。

3 单环光滤波器的特性分析

3.1 出/入环光耦合系数的影响

假设光在波导中无损耗传输,且 $K_1 = K_2$ 。单环光滤波器的 3 dB 带宽公式可由式(5)导出(计入 FSR 的影响),即为

$$BW_{3\text{ dB}} \approx \frac{K_1^2 FSR}{\pi T} \approx \frac{K_1^2 FSR}{\pi} \quad (7)$$

上式的后一近似在 $K_1^2 \ll 1$ 时成立。式(7)说明,在 FSR_v 一定的情况下, K_1^2 越大,单环光滤波器所能

提供的 3 dB 带宽越大。由于 FSR_v 是由微环的周长和波导中光的有效折射率决定的。对采用圆结构的微环,若半径 R 不能够达到足够小(或是由于波导弯曲损耗因素,或是由于工艺水平和条件) K_1^2 将可以增大带宽。但需要注意的是, K_1^2 也与通带的消光比密切相关。此时,在谐振点,有 $|D(0)|^2 = 1$, 为最大值。在 $\theta = \pi$ 处, $|D(\theta)|^2$ 达到最小值:

$$|D(\pi)|^2 = \frac{K_1^4}{(1 + T_1^2)^2} = \frac{K_1^4}{4(1 - K_1^2/2)^2} \approx \frac{K_1^4}{4} \quad (8)$$

式(8)将决定,作为光滤波器,单环光微谐振器的下路通道通带可以达到的带内与带外间的最大消光比水平 $10 \lg(|D(0)|^2/|D(\pi)|^2)$ 。可以知道,大的消光比要求 K_1^2 要尽可能的小。

由此可以得到结论,采用 K_1^2 来增大带宽是受限制的,无论是对大 FSR_v 要求的光滤波器,还是对具有小 FSR_v 要求的光交叉复用器(interleaver)。对普通的光滤波器,大 FSR_v 将是主要器件设计因素,它将对器件的应用能力和结构的其它参数的设计冗余度起到至关重要的影响。利用微环光谐振器的周期滤波特性,可以研制光交叉复用器,但是,由于 FSR_v 的取值受到限制,则需要通过对 K_1^2 的精确控制,以协调并满足通带消光比和通带带宽的实际要求。这一应用是受到单环光微谐振器固有特性制约的。

3.2 下路通道的通带带宽特性

对光滤波器来说,其通带形状是一项重要指标。理想的带通滤波器要求在通带带顶平坦,而带边则迅速截止。这一特性是通过比较不同定义下的滤波器带宽大小来衡量的。式(5)给出了单环光滤波器的通带归一化带宽一般表达式。表1列出了单环光微谐振器的常用归一化带宽表达式,以及各带宽间的大小比例。需要指出的是,表中各带宽间的大小比例是不依赖于单环光滤波器的任何设计参数的。考虑到获得式(4)时所进行的假设,如果 $|\theta|$ 已经相当大,则带宽间的大小比例将会继续拉大,特别是 1 dB(或 3 dB)带宽与 20 dB(或 30 dB)带宽间的比例。从图2中便可以看出这一趋势。

从表中可以看到,由单个微环谐振器构成的光带通滤波器的通带带顶不够平坦,同时边缘又降落得很慢,带宽特性离目前的一些标准(如 Telcordia GR-1209)要求存在一定的距离。通过简单的级连方式可以改善单环光滤波器的通带带宽特性,但更为有效的方法是通过串联或并联多个微环的方法实现^[8]。但这又会在实际制作中引入环与环间的谐振调谐问题与多点出/入环光耦合系数同时精确控制问题。这些

问题将严重制约采用串联与并联型高阶多环微谐振器来研制光滤波器,作者将另文详细讨论解决方案。

表 1 单环光微谐振器的几种常用带宽(归一化)表达式及各带宽间的大小比例

Formula	1 dB	3 dB	20 dB	30 dB
$BW_{1\text{ dB}} \approx K^2/T$	1 : 1	1 : 2	1 : 20	1 : 63
$BW_{3\text{ dB}} \approx 2K^2/T$	2 : 1	1 : 1	1 : 10	1 : 32
$BW_{20\text{ dB}} \approx 20K^2/T$	20 : 1	10 : 1	1 : 1	1 : 3
$BW_{30\text{ dB}} \approx 63K^2/T$	63 : 1	32 : 1	3 : 1	1 : 1

3.3 光传输损耗的影响

当波导无损耗时,下路通道的通带在谐振点有最大值有 $|D(0)|^2=1$,同时主通道的在谐振频率处无输出 $|B(0)|^2=0$ 。但是,作为光波导微环,弯曲损耗和波导损耗是难以避免的。由于谐振时微环谐振器内积累了相当的光能量(K_2^2 越小,这个积累越大),所

以,从输出/输入端来看,微环对光的损耗具有放大作用。小的弯曲损耗和波导损耗就会导致下路通道输出端的滤波光输出迅速下降。对主通道的影响则相对弱一些。这从式(6)中的因子 $(1-\alpha^2T_2^2)/\alpha K_2^2$ 也可以看出。当损耗存在时, $(1-\alpha^2T_2^2)/\alpha K_2^2$ 将大于 1。图 3 给出了损耗对谐振点光输出的衰减。

若 K_1^2 给定,即 T_1^2 给定,则控制 $T_2=T_1/\alpha$ 时,主通道的在谐振点保持无输出 $|B(0)|^2=0$ 。但是,为了满足这一要求,付出的代价是对下路通道的光耦合输出大大减小,以补偿光的损耗引起的环内光的衰减,所以下路通道远远没有达到最大输出。当 T_2 在 αT_1 附近时,下路通道输出会达到其最大可能输出,而这才是光带通滤波器的目标。图 3 比较了 $T_2=T_1/\alpha$ 、 $T_2=T_1$ 和 $T_2=\alpha T_1$ 时,损耗对谐振点光输出的影响。式(5)和(6)表明,传输损耗对通带带宽结构特性没有特别大的影响。仅当损耗过大时,带宽间的结构大小比例会被进一步扩大。决定具体带宽大小的因素为 $T^2=\alpha T_1T_2$,说明损耗将会使带宽变宽。

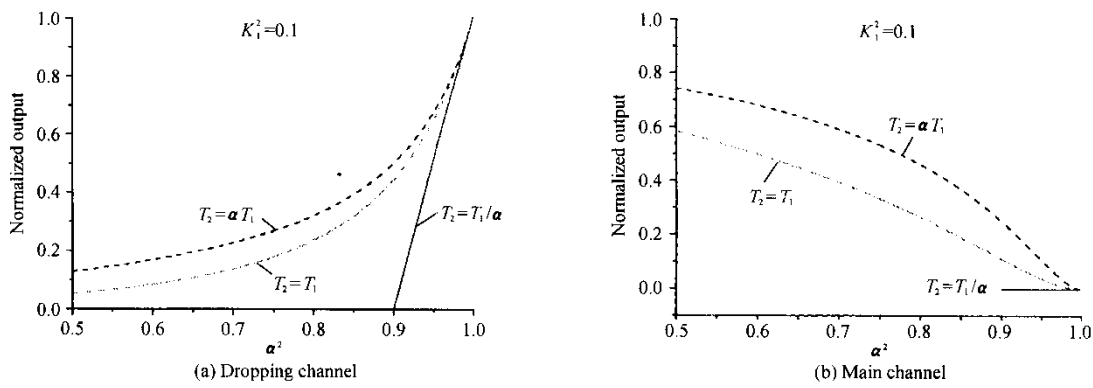


图 3 损耗对谐振点光输出的影响
Fig. 3 The loss effects on the output intensity

4 结 论

本文对采用单环微谐振器的光滤波器的特性进行了分析。分析表明,对单环光滤波器,出/入环光耦合系数的大小取值同时受限于通带带宽与通带消光比的要求,仅当微环自由谱范围足够大时,才有相当的设计冗余度。需要特别指出的是,单环光滤波器的通带结构比例存在严重局限性。从应用角度说,改善通带结构是其实用化的关键所在。存在于微环中光的损耗对单环光滤波器的输出通带结构无显著影响,但对输出幅度衰减很大。所以,良好的工艺制作手段与弯曲结构设计,以减小存在微环对光的损耗,也是非

常重要的。

参 考 文 献:

[1] Marcatili. Optical frequency filters using disc cavity [P]. US Patent, 3558213. Filed in 1968, Patented in 1971.
[2] J P Zhang, D Y Chu, S L Wu, et al. Photonic-wire laser [J]. Phys. Rev. Lett., 1995, 75(14): 2678-2681.
[3] Masayuki Fujita, Toshihiko Baba. Microgear laser [J]. App. Phys. Lett., 2002, 80(12): 2051-2053.
[4] Hryniewicz J V Absil P P Little B E, et al. Higher order filter response in coupled microring resonators [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2000, 12(3): 320-322.

- [5] Little B E, Foresi J S, Steinmeyer G, Thoen, *et al.* Ultra-compact Si-SiO₂/sub 2/ microring resonator optical channel dropping filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4): 549-551.
- [6] P Rabiei, W Steier, C Zhang, *et al.* Integrated WDM polymer modulator [A]. *OFC2002* [C]. California USA: OSA, 2002, 31-33.
- [7] Orta R, Savi P, Tascone R, *et al.* Synthesis of multiple-ring-resonator filters for optical systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(12): 1447-1449.
- [8] Little B E, Chu S T, Haus H A, *et al.* Microring resonator channel dropping filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 998-1005.
- [9] Manolatu C, Khan M J, Fan S, *et al.* Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(9): 1322-1331.
- [10] Chu S T, Chaudhuri S K. A finite-difference time-domain

method for the design and analysis of guided-wave optical structures [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(12): 2033-2038.

- [11] Hagness S C, Rafizadeh D, Ho S T, *et al.* FDTD microcavity simulations: design and experimental realization of waveguide-coupled single-mode ring and whispering-gallery-mode disk resonators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(11): 2154-2165.
- [12] G Griffel. Synthesis of optical filters using ring resonator arrays [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7): 810-812.

作者简介:

杨建义 (1969—), 男, 浙江人, 博士, 副教授, 目前主要从事光波导理论与器件、集成光学、光微机械与微系统、光纤通信与光互连等的研究, 已发表相关论文 80 余篇, 获 2 项专利。

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、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/>