

文章编号: 1005-5630(2014)05-0399-04

## 交叉耦合系数对光分插复用器输出光谱的影响

李 晶

(浙江工业大学 理学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 光分插复用器是集成光学的重要单元器件之一。针对光分插复用器在十字交叉处存在损耗问题,研究了交叉耦合系数对信道波导与微环间距和各信道输出光谱的影响。用耦合模理论推导了各信道输出光谱的解析表达式,并对光谱图进行分析。研究发现,信道波导与微环间距为 66.16 nm 时,交叉耦合系数最小,交叉耦合系数的存在使谱线呈法诺共振曲线。由对数值解和仿真解的比较,得出仿真解与数值解吻合得很好。

**关键词:** 集成光学; 光分插复用器; 法诺共振; 耦合模理论

**中图分类号:** TN 252 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2014.05.006

### Influence of cross coupling coefficient on output spectrum of optical add-drop multiplexer

LI Jing

(College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Optical add-drop multiplexer is one of the promising components for integrated optics. For the existence of loss at the cross of optical add-drop multiplexer, the influence of the insertion loss on the gap between channel and microring over the output spectrum is introduced. Based on mode coupling theory, the analytical expressions are derived. The output spectra are simulated and compared. The simulation results show that the cross coupling coefficient is the smallest when the gap is 66.16 nm. The spectrum exhibits an asymmetric Fano-resonance line shape because of the existence of the cross coupling. The finite difference time domain (FDTD) simulation results agree well with the analytical results from the comparison between FDTD and analytical results.

**Key words:** integrated optics; optical add-drop multiplexer; Fano resonances; coupling mode theory

### 引 言

光分插复用器是波分复用光网络的关键网元之一,可以不经光/电转换,直接在光域中有选择地上/下某些波长信道,实现支路信号的分插和复用,具有高度的透明性、可重构性和可扩展性。可重构的光分插复用器(ROADM)能灵活地完成波长调度,朝着“无色”、“无方向性”和“无竞争性”的上/下路方向发展。随着通信市场的发展,使得ROADM成为下一代传送网络的发展方向<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2014-03-06

作者简介: 李 晶(1988-),女,硕士研究生,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: 315292462@qq.com

大部分基于微环的光分插复用器的研究报道都没有考虑十字交叉波导结构在交叉处的交叉损耗,而交叉损耗会对输出光谱产生很大的影响。由于交叉损耗的存在,使得谱线呈法诺共振形状。法诺共振最早是出现在量子力学中,是由原子的激发态和连续态发生相互作用引起的。最近发现,在光学上也出现了类似的谱线形状,这是因为薛定谔方程和波动方程是相似的<sup>[3-5]</sup>。Dotan 等提出了由两个微腔,两个直波导构成的两种结构的 Add-Drop 滤波器(ADF)。结构一采用的为 2D 结构,由两个同轴的椭圆微环谐振器和两个在同一平面内直波导构成;结构二采用 3D 多层结构,由两个同轴且相同的圆形微环谐振器和两个在同一平面内直波导构成,且两个圆形谐振器在直波导两侧。这两种结构的输出光谱都呈法诺共振谱线<sup>[3]</sup>。Lu 等提出了一种存在反馈的环形谐振 Drop 滤波器,Drop 端与同输入端口的光发生相互作用的一弧形相连,由于反馈环的存在,使得输出光谱呈法诺谱线共振<sup>[4]</sup>。Zhang 等提出了 2 个和 3 个串联的球体同一锥形波导的耦合,得出谱线形状也呈法诺谱线共振<sup>[5]</sup>。但鉴于上面结构的复杂性及不通用性,本文提出了常见的十字交叉波导微环结构。

本文针对基于绝缘体上硅(SOI)材料<sup>[6]</sup>的光分叉复用器展开研究,采用耦合模理论推导出各信道的相对光强的解析表达式,进而分析了交叉耦合系数对输出光谱的影响。

## 1 结构和原理

光分插复用器采用 SOI 材料,由波导芯区截面尺寸和芯区及包层折射率分布完全相同的两个直波导和一个微环构成。图 1 为光分插复用器的结构示意图。粗十字线表示交叉处的交叉损耗。微环的半径为  $R$ ,芯区的宽度和高度分别为 350 nm,300 nm<sup>[7]</sup>。直波导和微环的芯区采用硅材料,折射率为 3.48,包层采用  $\text{SiO}_2$  材料,折射率为 1.46,工作波长为 1 520~1 580 nm。

## 2 耦合模理论和传输矩阵法

耦合模理论是光电子器件中基本的模型处理方法之一。耦合模理论(CMT)用振幅耦合系数,振幅透射系数,波导损耗等来表示输出端及下载端的光强。将耦合模理论与传输矩阵法结合起来描述从主信道波导耦合至微环,再从微环耦合至下信道输出端或主信道的传递函数。

结构参数的描述如图 1 所示。图中的两个耦合区域内,由于直波导和微环的波导芯区截面尺寸和芯区及包层折射率分布完全相同,所采用的材料也是相同的,因而可认为两耦合区内的交叉耦合系数是相同的。在耦合区内,传递函数可表示为<sup>[8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & -jk \\ -jk & t \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & -jk \\ -jk & t \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $a_1, a_2, a_3, a_4$  为耦合区的输入振幅; $b_1, b_2, b_3, b_4$  为耦合区的输出振幅; $k, t$  分别为振幅耦合系数和振幅透射系数,且  $|k|^2 + |t|^2 = 1$ 。

光分插复用器振幅之间的关系如下:

$$a_1 = a_{10} e^{-j\phi_{L1}}; a_2 = b_3 e^{-j\phi_1}; a_3 = b_2 e^{-j\phi_2}; a_4 = k_c e^{-2j\phi_{L2}} b_1 + t_c e^{-j(\phi_{L3} + \phi_{L2})} a_{40} \quad (3)$$

$$b_{10} = t_c e^{-j(\phi_{L2} + \phi_{L4})} b_1 + k_c e^{-j(\phi_{L3} + \phi_{L4})} a_{40} \quad (4)$$

$$b_{40} = b_4 e^{-j\phi_{L5}} \quad (5)$$

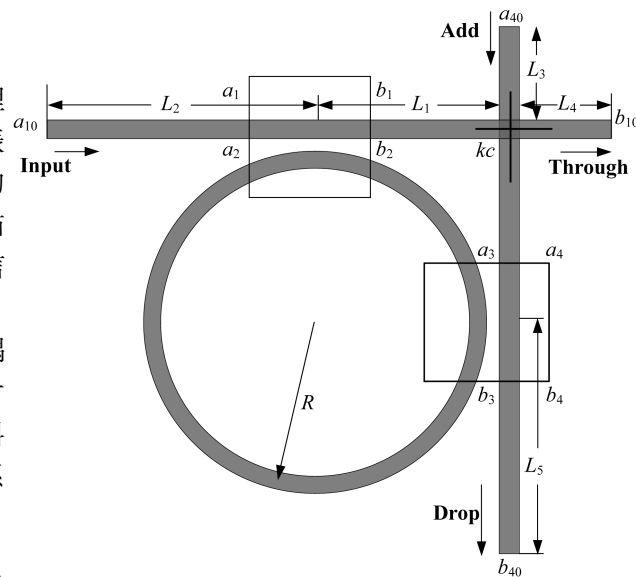


图 1 光分插复用器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical add-drop multiplexer

式中,  $\phi_x = x(\beta - j\alpha_L)$ ,  $x = L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$ ,  $\phi_1 = \frac{3}{2}\pi R(\beta - j\alpha_R)$ ,  $\phi_2 = \frac{1}{2}\pi R(\beta - j\alpha_R)$ 。

$\phi_x$  为所对应的信道波导段的光程差,  $\phi_1, \phi_2$  为对应圆环段的光程差。 $\alpha_L, \alpha_R$  分别为信道波导和微环波导中模式的损耗系数。 $\beta$  为信道波导与微环波导的模式传播常数。 $k_c$  为十字交叉波导结构在交叉处引起的串扰程度的系数。 $\phi_x, \phi_1, \phi_2$  与不考虑十字交叉波导结构在交叉处的插入损耗相同。 $2k_c^2 + t_c^2 \approx 1$ 。

联立式(1)、式(2)并结合振幅间的关系,可得主信道及垂直信道输出端口的输出振幅分别为

$$b_{10} = M_1 a_{10} + N_1 a_{40} \quad (6)$$

$$b_{40} = M_2 a_{10} + N_2 a_{40} \quad (7)$$

式中:

$$M_1 = \frac{t_c t e^{-j(\phi_{L2} + \phi_{L4} + \phi_{L1})} (1 + e^{-j(\phi_1 + \phi_2)})}{1 - t^2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2)} + k_c^2 e^{-j(\phi_1 + 2\phi_{L2})}} \quad (8)$$

$$N_1 = \frac{k_c e^{-j(\phi_{L3} + \phi_{L4})} - k_c t^2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2 + \phi_{L3} + \phi_{L4})} + k^2 k_c e^{-j(\phi_1 + 2\phi_{L2} + \phi_{L3} + \phi_{L4})} (k_c - t_c)}{1 - t^2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2)} + k_c^2 e^{-j(\phi_1 + 2\phi_{L2})}} \quad (9)$$

$$M_2 = \frac{t^2 k_c e^{-j(2\phi_{L2} + \phi_{L1} + \phi_{L5})} (1 - e^{-j(\phi_1 + \phi_2)})^2}{(1 - t^2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2)}) \times (1 - t^2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2)} + k_c^2 e^{-j(\phi_1 + 2\phi_{L2})})} - \frac{k^2 e^{-j(\phi_2 + \phi_{L1} + \phi_{L5})}}{1 - t^2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2)}} \quad (10)$$

$$N_2 = \frac{t e^{-j\phi_{L5}} (1 - e^{-j(\phi_1 + \phi_2)})}{(1 - t^2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2)}) \times (1 - t^2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2)} + k_c^2 e^{-j(\phi_1 + 2\phi_{L2})})} \times (t_c e^{-j(\phi_{L2} + \phi_{L3})} - t_c t^2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2 + \phi_{L2} + \phi_{L3})} + k^2 k_c e^{-j(\phi_1 + 3\phi_{L2} + \phi_{L3})} (t_c - k_c)) \quad (11)$$

为了从垂直信道的 Drop 端口得到某些特定波长的光,要求不能同时从主信道的 Input 端口和垂直信道的 Add 端口输入光,即要求  $a_{10}$  和  $a_{40}$  必须有一个为 0。

主信道的 Through 端口和垂直信道的 Drop 端口的传输光谱分别为

$$\begin{cases} I_{\text{Through}} = 10 \log_{10} \left( \left| \frac{b_{10}}{a_x} \right|^2 \right) \\ I_{\text{Drop}} = 10 \log_{10} \left( \left| \frac{b_{40}}{a_x} \right|^2 \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $a_x$  为  $a_{10}$  或  $a_{20}$ 。

### 3 结果和讨论

#### 3.1 波导结构对交叉耦合系数的影响

交叉耦合系数  $k_c$  随直波导与微环间距的变化如图 2 所示。从图 2 可看出直波导与微环间距  $Gap$  在  $0.05 \sim 0.45 \mu\text{m}$  范围内变化时,  $k_c$  随  $Gap$  的变化为先减小后增大, 当  $Gap$  为  $66.16 \text{ nm}$  时,  $k_c$  最小为  $0.05$ 。间距  $Gap$  在  $56.16 \sim 76.16 \text{ nm}$  范围变化时,  $k_c$  的变化幅度为  $0.02$ 。仿真中微环的半径  $R = 5 \mu\text{m}$ ,  $L_1 = L_5 = 10 \mu\text{m}$ ,  $L_3 = L_4 = 5 \mu\text{m}$ ,  $L_2 = R + Gap$ , 振幅透射系数  $t = 0.98$ 。

#### 3.2 交叉耦合系数对输出光谱的影响

主信道和垂直信道的输出光谱图如图 3 所示。仿真中  $k_c = 0.01$ 。从图 3(a) 中可以看出, 当光从 Input 端口输入时, 不满足共振条件波长的光从 Through 端口输出, 而满足共振条件波长的光从 Drop 端口输出, 且光在共振波长两侧呈洛伦兹分布。从图 3(b) 中可以看出, 当光从 Add 端输入时, 不满足共振条件波长的光从 Drop 端口输出, 而满足共振条件波长的光从 Input 端口输出, 光谱曲线不再在共振波长两侧呈洛伦兹分布, 而是呈法诺分布, 交叉耦合系数的存在使谱线呈法诺共

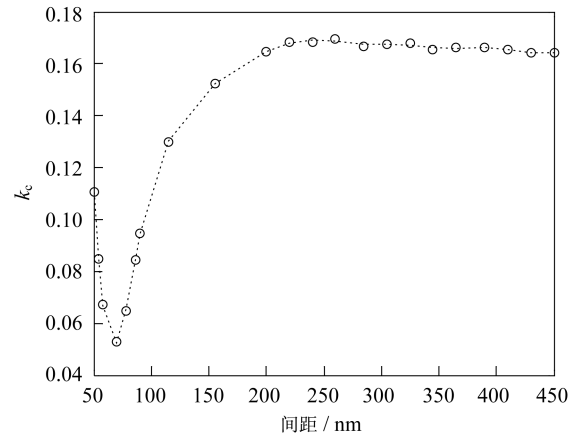


图 2  $k_c$  随直波导与微环间距的变化

Fig. 2 Cross coupling coefficient  $k_c$  varies with gap between the straight waveguide and microring

振曲线。首先在环形谐振器的共振波长处缓慢增至最小值,然后随着波长的增加迅速增至最大值,接着随波长的增加缓慢减小且慢慢趋于一稳定值,直至波长增至下一级谐振波长,之后呈周期性变化。

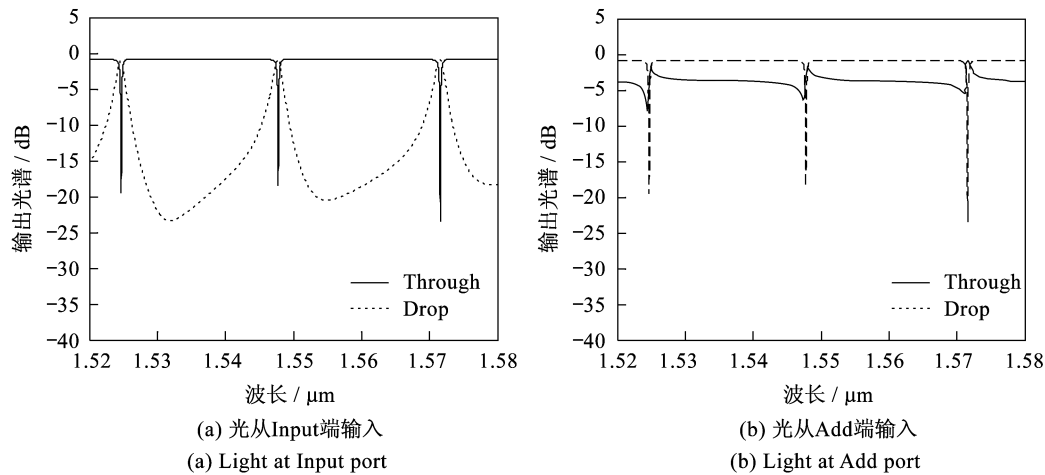


图 3 各信道的输出光谱图

Fig. 3 Calculated output spectrum for different channels

### 3.3 数值解与仿真光谱图的比较

数值解与时域有限差分法(FDTD)仿真解的比较曲线如图 4 所示。从图中可看出,数值解与 FDTD 仿真解的总体变化趋势一致,进一步验证了数值解的正确性。仿真解所需的计算机内存大,时间长<sup>[9]</sup>,采用有效折射率法将三维结构降为二维结构来进行处理<sup>[10]</sup>。但两者间存在一定的偏差。仿真解从理论上更接近实际结果。偏差的原因是由以下两个方面引起的:一方面是由于在 FDTD 仿真中,直波导与弯曲波导耦合处部分模式的不匹配引起的;另一方面,是由于微环内光的反射引起的功率损耗引起的。

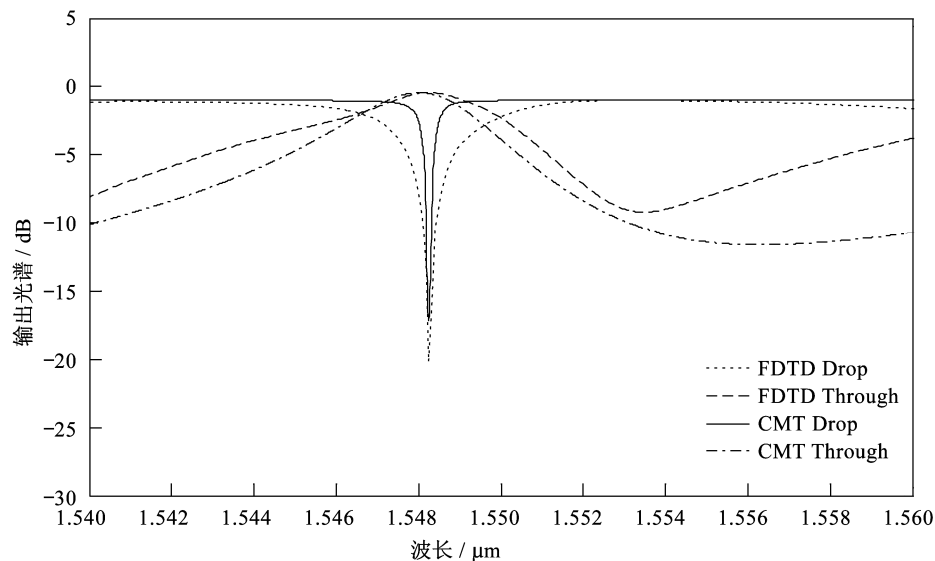


图 4 数值解与 FDTD 仿真解的比较

Fig. 4 Comparison between analytical and FDTD simulations

## 4 结 论

用耦合模理论推导了各信道传输光谱的解析表达式,研究了交叉耦合系数对信道波导与微环间距和  
(下转第 408 页)

## 4 结 论

本文设计了一种新的基于 FPGA 的高速 9/7 提升小波变换结构,通过使用流水线结构,改进提升算法,使用 CSD 乘法器,满足了系统高速运行的要求。在二维小波变换中,采用改进的基于行的变换方法,减少了存储空间消耗及系统延迟。

### 参考文献:

- [1] 孔德照,沈学举,林超,等. 基于分数小波变换的双随机相位光学图像加密技术[J]. 光学仪器,2013,35(4):17-21.
- [2] SILVA S V, BAMPI S. Area and throughput trade-offs in the design of pipelined discrete wavelet transform architectures[J]. *IEEE Design, Automation and Test in Europe*, 2005, 3: 32-37.
- [3] 朱斌杰,杜慧敏,杨晓强,等. 二维 9/7 小波变换 VLSI 设计[J]. 电子设计工程,2009,17(2):11-16.
- [4] 韩建,何学兰,魏运峰. 基于 FPGA 的 FIR 数字滤波器算法的改进及仿真[J]. 光学仪器,2013,35(5):56-59.
- [5] WU B F, LIN C F. A rescheduling and fast pipeline VLSI architecture for lifting-based discrete wavelet transform[C]. Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, 2003, 2: 732-735.
- [6] 钟广军,成礼智,陈火旺. 基于提升方法的简单 9/7 小波滤波器[J]. 计算机工程与科学,2003,25(1):35-55.
- [7] 熊承义,田金文,柳建. 基于 CSD 编码的高速乘法器 IP 设计[J]. 计算机工程与应用,2003(31):38-40.

=====

(上接第 402 页)

各信道输出光谱的影响,并对光谱图进行了分析。研究发现,信道波导与微环间距为 66.16 nm 时,交叉耦合系数最小。交叉耦合系数对从 Add 端口输入的光影响很大,并由仿真解验证了数值解的正确性。

### 参考文献:

- [1] TANG X M, FU C P, YANG Z, *et al.* Research on erbium-doped fiber amplifier array for next-generation ROADMs[J]. *Optical Communication Technology*, 2013, 37(10): 30-33.
- [2] XU Z G, LI Y, ZHANG H Y, *et al.* Study on the reconfigurable multi-channel optical add/drop multiplexer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(9): 1085-1089.
- [3] DOTAN I E, SCHEUER J. Fano resonances in vertically and horizontally coupled micro-resonators[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(16): 3475-3482.
- [4] LU Y, FU X Y, CHU D P, *et al.* Fano resonance and spectral compression in a ring resonator drop filter with feedback[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 476-479.
- [5] ZHANG J, ZHANG Y D, WANG J F, *et al.* Light transfer characteristic in microspheric resonators[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2012, 10(2): 196-206.
- [6] LI G B, LONG W H, JIA K M, *et al.* Study of silicon-on-glass waveguides[J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(6): 53-57.
- [7] LE Z C, LI R, HU J H, *et al.* Vertical nano-microring resonators with enhanced tolerance to fabrication misalignments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 123001.
- [8] MA C S, LIU S Y. Theory of optical waveguide mode[M]. Changchun: Jilin University Press, 2006: 335-382.
- [9] BO Z Y, XU J F, BAI J, *et al.* A new FDTD subdomains-synthesized method for the efficiency promoting of simulation[J]. *Optical Instruments*, 2006, 28(6): 38-42.
- [10] TSENG C W, TSAI C W, LIN K C, *et al.* Study of coupling loss on strongly-coupled, ultra compact microring resonators[J]. *Optics Express*, 2013, 21(6): 7250-7257.