

文章编号: 1003-501X(2010)11-0063-06

一种新型不等带宽波长交错滤波器的设计

鲁怀伟^a, 张日芳^b, 孙根强^c

(兰州交通大学 a. 数理与软件工程学院; b. 电子与信息工程学院; c. 机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 为改善常规马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器的输出特性, 提出了一种将光纤环型腔加入非平衡马赫-曾德尔干涉仪的干涉臂中构成的新型波长交错滤波器, 运用光纤传输理论和矩阵理论, 得到该器件的输出表达式。通过数值模拟分析了光纤环型腔的耦合比和光纤臂长差对该波长交错滤波器性能的影响。结果表明: 组成滤波器干涉臂的两对臂长差相等时, 光纤环型腔的耦合比取一些定值得到平坦的输出光谱, 该器件在 3 dB 处, 奇信道带宽大于 15 GHz 用于 10 Gb/s 的传输, 偶信道带宽大于 60 GHz 用于 40 Gb/s 的传输。这种滤波器在 10 Gb/s 向 10 Gb/s+40 Gb/s 升级过程中作为复用-解复用器具有很大优势。

关键词: 不等带宽波长交错滤波器; 非平衡马赫-曾德尔干涉仪; 光纤环型腔; 耦合器; 密集波分复用

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.11.012

Design of a New Type Different Bandwidth Interleaver

LU Huai-wei^a, ZHANG Ri-fang^b, SUN Gen-qiang^c

(a. School of Mathematics, Physics & Software Engineering; b. School of Electric and Information Engineering;

c. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to improve the transmission performance of the conventional Mach-Zehnder interferometer, a novel interleaver based on nonsymmetrical Mach-Zehnder interferometer with adding optical fiber ring resonator to interference arm was presented. The output expression was established and described by using the principle of fiber transmission and the matrix transfer function. Through numerical simulation, the influence of the coupling ratios of the optical fiber ring resonator and the length difference of interference arms on the different bandwidth interleaver was analyzed. The analytical results indicate when the length of interference arms is equal, the port output curves are quite ideal by taking some certain values for the coupling ratios of the optical fiber ring resonator. Between 3 dB points, odd channels have more than 15 GHz passband for 10 Gb/s and the other even channels have more than 60 GHz passband for 40 Gb/s. This kind of interleaver has more advantages as multiplexer/demultiplexer during upgrade from 10 Gb/s to 10 Gb/s plus 40 Gb/s.

Key words: different bandwidth interleaver; nonsymmetrical Mach-Zehnder interferometer; optical fiber ring resonator; coupler; dense wavelength division multiplexing

0 引言

由于信息技术迅猛发展, 密集波分复用技术已成为解决网络扩容的有效方法。为了提高光纤带宽的利用率, 相应出现了一种新型无源光子器件——波长交错滤波器。它的作用是将光纤中一组信道间隔较窄的多个波长光信号分成两组信道间隔较宽的信号^[1], 在密集波分复用系统中该器件起到复用和解复用的作用。

目前波长交错滤波器技术有多种, 如光纤马赫-曾德尔干涉仪型, 液晶型, 阵列波导光栅型, 利用偏振

收稿日期: 2010-06-29; 收到修改稿日期: 2010-08-20

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(0803RJZA027)

作者简介: 鲁怀伟(1959-), 男(汉族), 甘肃天水人。教授, 主要研究工作是光纤无源器件。E-mail: luhw@mail.lzjtu.cn。

通信作者: 张日芳(1984-), 女(汉族), 山西朔州人。硕士研究生, 主要从事光纤通信、光纤无源器件等研究。E-mail: zrf198466@sina.com。

光干涉的晶体双折射型等。这些技术实现的波长交错滤波器均属于等带宽(如 200 GHz, 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz, ...)器件。而目前商用系统中, 最佳带宽 Δf 和传输速率 v 存在近似关系: $\Delta f \geq 1.5v$, 对于传输速率为 10 Gb/s 和 40 Gb/s 所对应的最佳带宽分别为 15 GHz 和 60 GHz。因此在 40 Gb/s 的系统中, 不等带宽器件的设计存在着较大的灵活性^[1-2]。由于光纤熔融拉锥技术的成熟, 全光纤马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器结构简单、制作成本低、信道均匀性好、与系统的兼容性强, 较低的偏振相关损耗和附加损耗等优点^[3-4], 我们可以采用不同的改进方法, 通过合理优化, 得到平顶的不等带宽波长交错滤波器。

本文提出了一种新型非平衡马赫-曾德尔干涉仪型不等带宽波长交错滤波器, 通过改变干涉臂长差和耦合器的耦合角来决定输出波的周期和波形, 同时利用光纤环型腔产生的多光束干涉效应, 对输出波形进行改善, 使波形更加平坦, 隔离度更高。

1 器件结构和理论基础

这种新型不等带宽波长交错滤波器的设计是基于非平衡马赫-曾德尔干涉仪的干涉效应和光纤环型腔的相位调节作用^[5-7], 结构如图 1。利用二级马赫-曾德尔干涉仪, 即三个光纤定向耦合器 C_1 , C_2 , C_3 级联构成非平衡马赫-曾德尔干涉仪, 在耦合器 C_2 和 C_3 之间的干涉短臂上分别加入光纤环型腔 C_4 , C_5 , 这能使该滤波器的通带形状得以改善, 实际上是因为光纤环型腔的加入, 其作用相当于在短臂的传输系数上加入了一个相位延迟因子 φ , 使得奇偶两信道输出的波形更加平坦, 也使得隔离度大大提高。

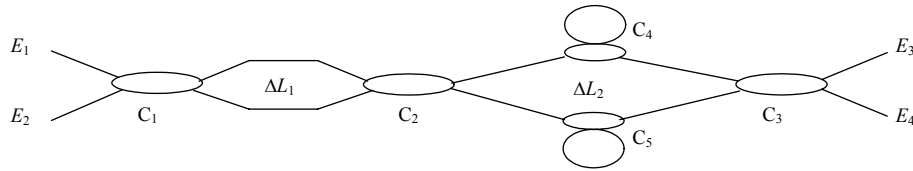


图 1 不等带宽波长交错滤波器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of different bandwidth interleaver

光纤 2×2 定向耦合器的传输矩阵 T_{ci} 表示为

$$T_{ci} = \begin{bmatrix} \cos b_i & -j \sin b_i \\ -j \sin b_i & \cos b_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $i=1, 2, 3$; b_i 为定向耦合器的耦合角。利用耦合模方程可推导出光纤环型腔产生相移 φ 的表达式^[8]:

$$\varphi = \arg \frac{A_i \exp(j\theta) - 1}{A_i - \exp(j\theta)} \quad (2)$$

式(2)中: \arg 为复数取幅角的运算, $\theta = \beta R$, R 是环周长, β 为光纤中基模的传输常数, $A_i = \sqrt{1 - k_i}$ 是与耦合比有关的参数, $k_i = \cos^2 \Phi_i$ 是组成光纤环型腔的耦合器的耦合比(其中 $i=4, 5$)。当满足共振条件时, $\theta = \pi + 2\beta \Delta L$, $R = 2\Delta L - \lambda_0/2n$, λ_0 为中心波长, n 为光纤的有效折射率, ΔL 为原马赫-曾德尔干涉仪两臂的几何长度差。

两对干涉臂的传输矩阵分别为

$$T_1 = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta\Delta L_1) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_2 = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta\Delta L_2) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Delta\varphi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中 ΔL_1 和 ΔL_2 分别为两对干涉臂的长度差。

$\Delta\varphi$ 为光波通过两个光纤环型腔产生的相移, 表达式如下:

$$\Delta\varphi = \varphi_5 - \varphi_4 = \arg \frac{A_5 \exp(j\theta) - 1}{A_5 - \exp(j\theta)} - \arg \frac{A_4 \exp(j\theta) - 1}{A_4 - \exp(j\theta)} \quad (4)$$

式(4)中 φ_4 和 φ_5 分别为光纤环型腔 C_4 和 C_5 产生的相移。

根据定向耦合器和干涉臂的传输矩阵, 忽略光纤, 光纤环型腔及耦合器的损耗, 利用式(1)~(4), 可推导出该器件的输入输出关系表达式:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos b_3 & -j\sin b_3 \\ -j\sin b_3 & \cos b_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp(-j\beta\Delta L_2) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Delta\varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos b_2 & -j\sin b_2 \\ -j\sin b_2 & \cos b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp(-j\beta\Delta L_1) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos b_1 & -j\sin b_1 \\ -j\sin b_1 & \cos b_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据光强公式 $P=EE^*$ (其中 E^* 是 E 的共轭复数), 假设光源仅从 E_1 输入, 得到输入端口 E_1 的光强为 $P_1=E_1E_1^*$, 输出端口 E_3 和 E_4 的光强分别为 $P_3=E_3E_3^*$ 和 $P_4=E_4E_4^*$, 归一化的输出光强分别为 $P'_3=10\log(P_3/P_1)$ 和 $P'_4=10\log(P_4/P_1)^{[9-10]}$ 。

2 数值分析

利用以上的推导结果, 经过计算机模拟, 即可获得该滤波器的输出图谱。在计算中, 假设 $E_1=1, E_2=0$, $\lambda_0=1550\text{ nm}$, n 取 1.454, 耦合器 C_1, C_2, C_3 的耦合角分别为 $b_1=\pi/7.5, b_2=\pi/4, b_3=\pi/7.5, \Delta L_1=\Delta L_2=1.5\text{ mm}$ 。如果不考虑光纤环型腔的相位调节作用, 得到图 2(a)的输出光谱, 该图显示了归一化输出光强随频率变化的曲线, 实线代表宽带宽, 虚线代表窄带宽, 分析结果表明: 0.5 dB 透过带宽分别为 13.3 GHz 和 46.8 GHz, 25 dB 截止带宽分别为 18.5 GHz 和 53.5 GHz, 3 dB 处带宽分别为 32.5 GHz 和 72.5 GHz。

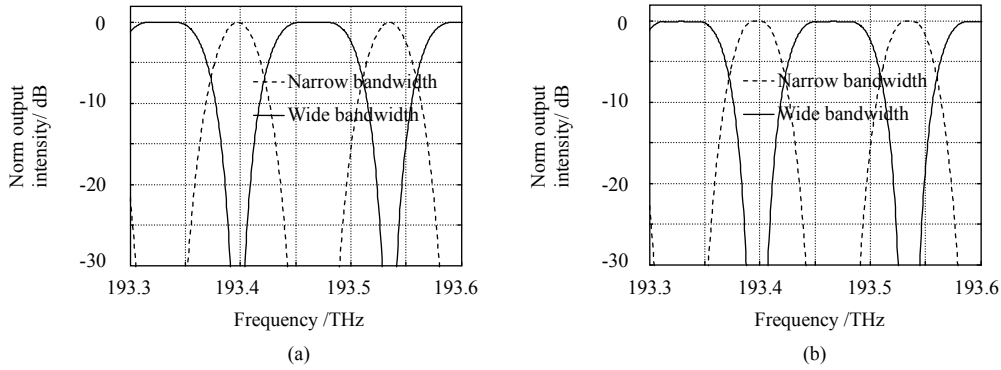


图 2 (a) 当 $k_4=0, k_5=0$ 时, 不等带宽 interleaver 的输出光谱;

(b) 当 $k_4=0.75, k_5=0.85$ 时, 平顶不等带宽 interleaver 的输出光谱

Fig.2 (a) The output spectrum of asymmetric interleaver when $k_4=0, k_5=0$;

(b) The output spectrum of flat-top asymmetric interleaver when $k_4=0.75, k_5=0.85$

由于光纤环型腔和干涉臂长差的相位调节, 通过调整两个光纤环型腔的耦合比和干涉臂长差, 使其相位差之和在透过带附近尽量接近零, 而在截止带的区域尽可能的大。这样, 经过这种周期相位调制的干涉光谱曲线将产生陡峭边缘, 得到近似于方波的曲线。经过优化计算, 满足密集波分复用所需的截止度和平坦度的光纤环型腔的最佳耦合比为 $k_4=0.75, k_5=0.85$ 。将两个光纤环型腔的非线性相位差 $\Delta\varphi$ 和干涉臂长差取得 1.5 mm 时产生的线性相位画在同一张图上, 如图 3 所示, 该图显示了非线性相位差 $\Delta\varphi$ 和线性相位随频率变化的情况。

将耦合器 C_2 和 C_3 之间加入两个光纤环型腔 C_4, C_5 , 得到图 2(b)的输出图谱, 图谱显示了归一化输出光强随频率变化的曲线, 实线代表宽带宽, 虚线代表窄带宽, 该不等带宽波长交错滤波器的 0.5 dB 透过带宽度分别为 22.3 GHz 和 49.8 GHz, 25 dB 截止带宽度分别为 25.5

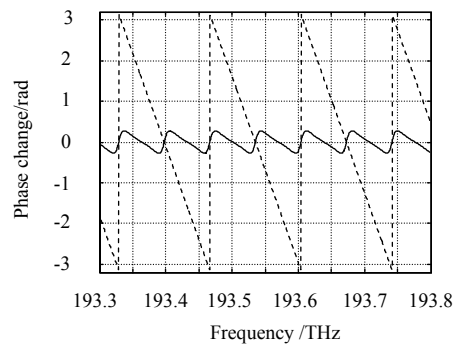


图 3 实线两个光纤环型腔相位差曲线, 虚线干涉臂线性相位曲线

Fig.3 Two optical fiber ring resonator matching phase difference curve with the solid line interference arm matching the linear phase curve with the dotted line

GHz 和 55.6 GHz, 分析结果表明, 本文设计的新型不等带宽波长交错滤波器具有更宽的 0.5 dB 的透过带和 25 dB 的截止带。实线 X 信道在 3 dB 处带宽为 73.2 GHz, 虚线 Y 信道在 3 dB 处带宽为 38.5 GHz, 比旧系统有所提高, 且满足奇信道带宽大于 15 GHz 用于 10 Gb/s 的传输, 偶信道带宽大于 60 GHz 用于 40 Gb/s 的传输, 同时满足 DWDM 系统需要的信道隔离度大于 25 dB 的要求。

2.1 光纤环型腔的耦合比对输出光谱的影响

决定和影响波长交错滤波器性能的因素有很多, 对于新加入两个光纤环的不等带宽波长交错滤波器, 新增参量的变化是影响其滤波性能的关键因素。系统对光纤环的长度有严格的要求, 假设两对干涉臂的长度差 ΔL_1 和 ΔL_2 保持不变, 当光纤环的长度产生微小的变化时, 就会破坏了条件式 $R=2\Delta L-\lambda_0/2n$ 的匹配要求, 使得滤波器的信道隔离度降低, 中心波长发生漂移。文献[6]和文献[7]已经讨论了光纤环长度对输出光谱的影响, 这里就不在赘述。系统对光纤环型腔的耦合比也有严格的要求, 由于两个光纤环型腔 C_4 和 C_5 的耦合比 k_4 和 k_5 的选取决定了输出谱的形状和隔离度的大小, 因此分析其耦合比偏离最佳值对滤波性能的影响是很重要的。

图 4 是当 $k_5=0.85$ 时, 光纤环型腔 C_4 的耦合比 k_4 单独发生变化时, 对输出的宽带和窄带波形影响。当 k_4 大于 0.75 时, 窄带波形顶端变得比较陡峭, 不是很平坦; 当 k_4 小于 0.75 时, 波形的隔离度会大大降低。通常器件的波纹度应当小于 0.3 dB, 考虑波纹度对器件性能的影响, 经过计算模拟, 得出 k_4 的变化范围是 0.68~0.80。

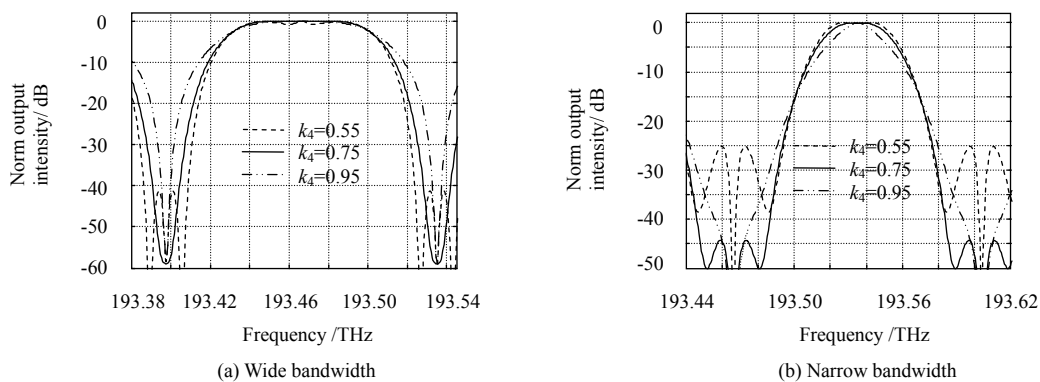


图 4 k_4 变化的不等带宽宽带和窄带输出光谱

Fig.4 Asymmetrical output spectrum of different k_4 on wide bandwidth and narrow bandwidth

图 5 是当 $k_4=0.75$ 时, 耦合比 k_5 单独变化时对输出的宽带和窄带的影响。当 k_5 大于 0.85 时, 宽带的波纹度逐渐大于 0.3 dB, 窄带的隔离度逐渐降低; 当 k_5 小于 0.85 时, 窄带波形顶端变得比较陡峭, 不是很平

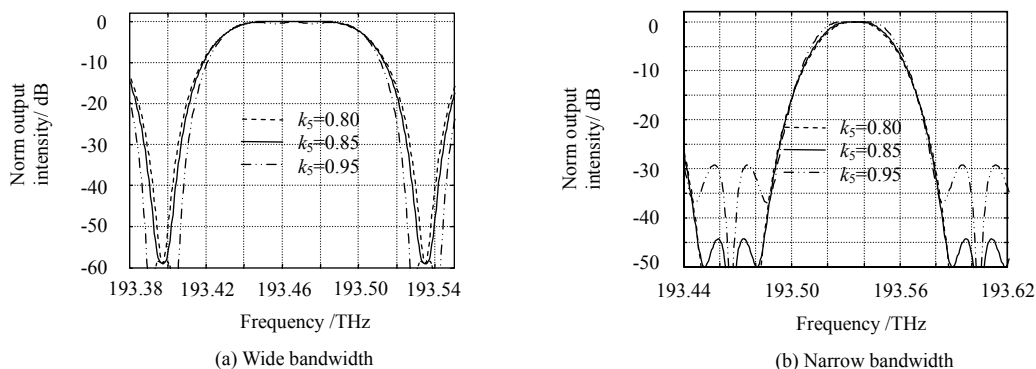


图 5 k_5 变化的不等带宽宽带和窄带输出光谱

Fig.5 Asymmetrical output spectrum of different k_5 on wide bandwidth and narrow bandwidth

坦。经过计算模拟, 得出 k_5 的变化范围是 0.82~0.90。因此, 对于同一方波而言, 光纤环型腔 C_5 的耦合比需要更加精确的控制。

2.2 干涉臂长差对输出光谱的影响

数值模拟中, 发现所设计的不等带宽波长交错滤波器的输出谱对干涉臂长差变化特别敏感, 这主要是本文所设计的结构, 要求两组光纤的干涉臂长差相等, 即 $\Delta L_1 = \Delta L_2$ 。我们假设其他参数不变, 模拟 ΔL_1 和 ΔL_2 长度不相等时, 对器件宽带和窄带波形的影响, 如图 6 所示。分析表明, 两组干涉臂长差的偏离将对器件的窄带隔离度产生特别大的影响, 随着偏离值的增加, 隔离度会逐渐下降, 而纹波度也会稍微增大; 对于器件宽带, 随着偏离值的增加, 对纹波度产生了特别大的影响, 波形波纹度逐渐大于 0.3 dB。综上所述, 要想使器件的波纹度小于 0.3 dB, 并且获得 25 dB 以上的隔离度, 必须要求偏差在 35 nm 范围内。

在实验中, 控制干涉臂长差的方法可以参照文献[11]和[12]。文献[11]利用微小放大原理, 将长度测量转化为角度测量; 文献[12]利用光谱分析仪(OSA)技术和干涉臂上加入移相器的方法对臂长差进行监控。我们可以根据实验条件, 合理选择方案。

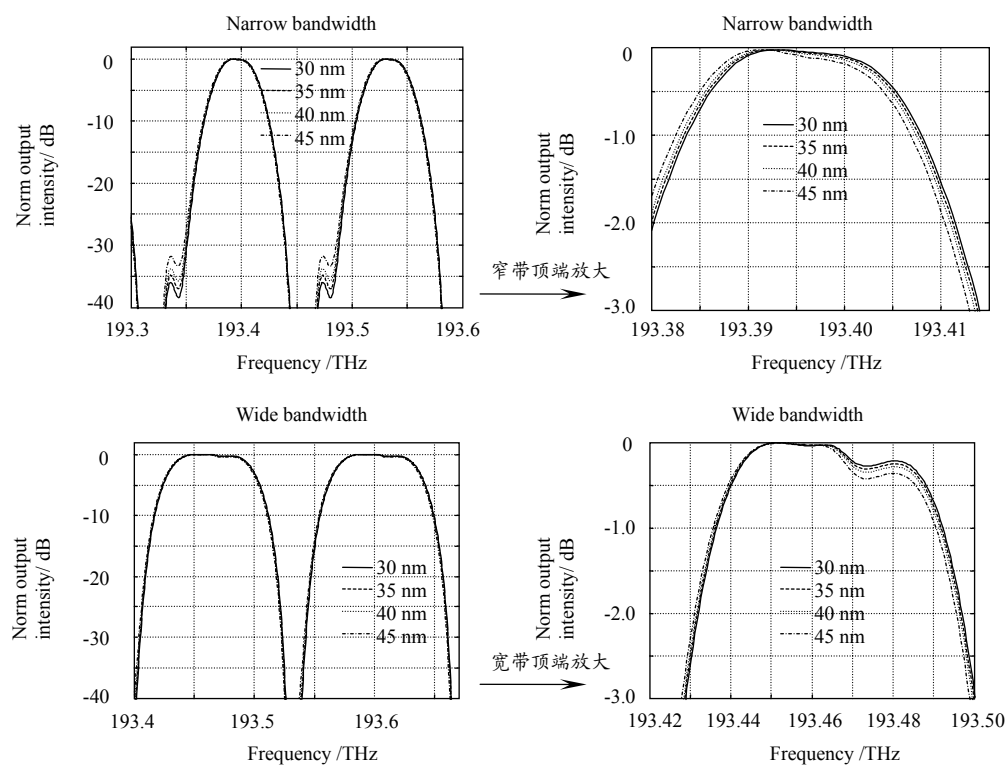


图 6 ΔL 的变化对输出图谱的影响

Fig.6 Influence from change of ΔL

3 结 论

本文提出了一种将光纤环型腔加入非平衡马赫-曾德尔干涉仪的干涉臂中构成的新型的不等带宽波长交错滤波器, 模拟分析结果表明改进后的光纤熔锥非平衡马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器具有更好的滤波效果。利用光纤环型腔的相移作用, 合理地配制好系统各个参数后, 可以得到具有平顶和低谷的不等带宽波长交错滤波器。这种滤波器单个信道的透过带宽较宽, 这样就降低了对入射信号的要求, 充分有效的利用带宽资源; 但是, 同时系统要求更加严格的制作和封装工艺, 以满足系统各参数的需要。

参考文献:

[1] 张佳宁, 赵海发, 郑嘉敏. 不等带宽光学梳状滤波器 [J]. 光子学报, 2007, 36(11): 2046-2048.

ZHANG Jia-ning, ZHAO Hai-fa, ZHENG Jia-min. A novel asymmetric interleaver [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(11):

- 2046-2048.
- [2] 邵永红, 缪同群, 姜耀亮, 等. 一种不等带宽光学梳状滤波器 [J]. 光子学报, 2003, **32**(8): 948-950.
SHAO Yong-hong, MIAO Tong-qun, JIANG Yao-liang, *et al.* A novel interleaver with different output spectrum bandwidth [J]. **Acta Photonica Sinica**, 2003, **32**(8): 948-950.
- [3] 鲁怀伟, 张玉娥, 罗冠炜. 基于 2×2 和 3×3 耦合器的级联马赫-曾德干涉仪型波长交错滤波器 [J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(7): 1021-1025.
LU Huai-wei, ZHANG Yu-e, LUO Guan-wei. Flat-top interleaver of cascaded M-Z interferometer with 2×2 and 3×3 fiber couplers [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(7): 1021-1025.
- [4] 章宝歌, 王天鹏, 鲁怀伟. 四级方向耦合器组成的全光纤波长交错滤波器 [J]. 光电工程, 2009, **36**(3): 93-96.
ZHANG Bao-ge, WANG Tian-peng, LU Huai-wei. An All-fiber Interleaver Using Four Directional Couplers [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, **36**(3): 93-96.
- [5] 张婷, 赵帅, 陈凯, 等. 一种基于双光纤环形腔的 M-Z 型交错复用器 [J]. 光子学报, 2005, **34**(7): 1053-1056.
ZHANG Ting, ZHAO Shuai, CHEN Kai, *et al.* A flat-top interleaver based on a M-Z interferometer with two ring cavities [J]. **Acta Photonica Sinica**, 2005, **34**(7): 1053-1056.
- [6] 李卫彬, 孙军强. 一种基于双耦合器谐振环的梳状滤波器特性分析 [J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1191-1194.
LI Wei-bin, SUN Jun-qiang. Analysis of Characteristics of the Interleaver Based on a Double-Coupler Resonator [J]. **Chinese Journal of Lasers**, 2008, **35**(8): 1191-1194.
- [7] 周广, 赵春柳, 黄勇林, 等. 光纤环对非平衡马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器性能的改善 [J]. 光学学报, 2002, **22**(6): 702-705.
ZHOU Guang, ZHAO Chun-liu, HUANG Yong-lin, *et al.* Improvement of the Capability of Nonsymmetrical Mach-Zehnder Interferometric Interleaver Using Fiber Loop [J]. **Acta Optica Sinica**, 2002, **22**(6): 702-705.
- [8] 张婷, 余和军, 陈凯, 等. 一种改善 MZI 型 Interleaver 滤波特性新结构的理论研究 [J]. 南开大学学报: 自然科学版, 2006, **39**(1): 74-78.
ZHANG Ting, YU He-jun, CHEN Kai, *et al.* Theoretical Studies of a Novel Design of Interleaver Based on Mach-zehnder Interferometer [J]. **Naturalium Universitatis Nankaiensis: Acta Scientiarum**, 2006, **39**(1): 74-78.
- [9] 张娟, 杨小伟, 于帅. 任意占空比不等带宽迈克尔逊 Gires-Tournois 干涉型光纤交错复用器的设计方法 [J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 155-161.
ZHANG Juan, YANG Xiao-wei, YU Shuai. Design of Asymmetrical Optical Interleavers with Arbitrary Duty Cycles Based on Michelson Gires-Tournois interferometer [J]. **Chinese Journal of Lasers**, 2010, **37**(1): 155-161.
- [10] 廖延彪. 光纤光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
LIAO Yan-biao. **Fiber and Optics** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [11] 张佳宁. 非对称光学奇偶交错复用器的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 42-43.
ZHANG Jia-ning. Design of asymmetric optical interleaver [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 42-43.
- [12] WANG Qi-jie, ZHANG Ying, Yeng Chai Soh. All-Fiber 3×3 Interleaver Design With Flat-Top Passband [J]. **IEEE Photon Technol. Lett**(S1041-1135), 2004, **16**(1): 168-170.

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/>