

文章编号: 0258-7025(2009)03-0587-05

# 迈克耳孙 Gires-Tournois 干涉仪型梳状滤波器的奇偶周期特性分析

张娟 王昌 杨小伟

(上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网省部共建教育部重点实验室, 上海 200072)

**摘要** 随着密集波分复用(DWDM)技术的不断发展,光学梳状滤波器(Interleaver)从原始功能的两路输出谱带宽相等的等带宽器件向不等带宽器件发展,以灵活应用于复杂网络的分插复用及不同网络平台间的过渡等。迈克耳孙 Gires-Tournois 干涉仪(MGTI)型 interleaver 具有结构紧凑、成本低、参数简单易调节、性能优异等特点,是实现 interleaver 的一个典型方案。从严格的数学角度推导了判定 MGTI 型 interleaver 周期的理论依据,并给出了几个具体的 MGTI 结构周期的判定实例。任何参数结构的 MGTI 型 interleaver,当 GT 腔镜面反射率发生变化时,等带宽与不等带宽 MGTI 型 interleaver 的奇、偶两路输出光谱光强相交点处的特性不同。具体给出了该不同特性的实例。这些结论可用来指导设计满足不同周期和带宽要求的 MGTI 型 interleaver,对设计特种光学干涉滤波器也可起到一定的指导性作用。

**关键词** 光通信;密集波分复用;梳状滤波器;Gires-Tournois 谐振腔;周期

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0587

## Odd and Even Periodic Characteristics Analysis of Interleaver Based on Michelson-Gires-Tournois Interferometer

Zhang Juan Wang Chang Yang Xiaowei

(The Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai, 200072, China)

**Abstract** With the development of the dense wavelength division multiplexer (DWDM) technique, asymmetrical interleaver is emerged. It can be used in optical add-drop multiplexer (OADM) system and other complex networks. Michelson-Gires-Tournois interferometer (MGTI) interleaver is one of the typical schemes. It has the characteristics of compact size, low cost, simple parameters, high performance and so on. The theoretical iteration to determine the period of the MGTI interleaver is deduced from mathematical aspect, and some examples are given in detail to support it. When the reflectances of Gires-Tournois etalon (GTE) mirrors are changed, the characteristics of the intersection of the odd and even output spectrum for symmetrical and asymmetrical interleavers are different. Examples of these different characteristics are given. These conclusions will be useful for designing interleavers based on MGTI that have specified period and bandwidth characteristics. It also has instructional function for the design of special optical interference filter.

**Key words** optical communication; dense wavelength-division multiplexing; interleaver; Gires-Tournois etalon; period

### 1 引言

密集波分复用(DWDM)技术是目前提高通信容量普遍采用的一种技术方案,正向着高密度、高速和高灵活性方向发展<sup>[1~4]</sup>。光学梳状滤波器

(interleaver)是将一路间隔密集的波长光信号分成两路分别包含奇数和偶数信道的间隔倍增的光信号,是 DWDM 系统中的重要器件<sup>[5]</sup>。目前研究的 interleaver 大多属于等带宽器件<sup>[6~9]</sup>,其两路输出

收稿日期: 2008-08-15; 收到修改稿日期: 2008-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(10804070)资助课题。

作者简介: 张娟(1976-),女,博士,副教授,主要从事光通信无源器件、光信号处理和晶体光学等方面的研究。

E-mail: juanzhang@staff.shu.edu.cn

谱带宽相等。为了更好地提高带宽利用率,近年出现了不等带宽型 interleaver<sup>[10~12]</sup>。迈克耳孙 Gires-Tournois 干涉仪(MGTI)型 interleaver 具有结构紧凑、成本低、参数简单、易调节等特点,很多研究都是针对此类型进行的<sup>[13~15]</sup>。周期是光谱透射率的一个很重要的特征参数。虽然决定该特征参数的理论都已被众多研究者普遍采用,但目前还未有人从严格的数学角度给出决定该结构光梳状滤波器周期的理论判据。此外,目前已有的研究大都只是针对两镜或三镜级联结构的 GT 腔单独或同时替代迈克耳孙干涉仪的两个全反镜的结构进行的。

本文系统分析了整一类型的 MGTI 结构 interleaver,即以任意面镜级联结构的 GT 腔单独或同时替代迈克耳孙干涉仪的两个全反镜,研究 MGTI 结构参数对输出光谱周期、3dB 相交点的影响。得出的结论适用于任意结构参数的 MGTI 结构。该结论可用来指导设计满足不同周期和带宽要求的 MGTI 型 interleaver,对设计特种光学干涉滤波器也可起到一定的指导性作用。

## 2 原 理

MGTI 型 interleaver 是基于 Michelson 干涉仪的干涉效应和多镜 GT 腔的调相作用<sup>[14]</sup>设计的,结构如图 1,多镜 GT 腔代替 Michelson 干涉仪的一面或两面全反射镜,其奇、偶两路输出光谱光波归一化光强<sup>[15]</sup>分别为

$$I_1 = \frac{1}{2}[1 - \cos(\Omega - \Theta_x^1 + \Theta_y^2)], \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{1}{2}[1 + \cos(\Omega - \Theta_x^1 + \Theta_y^2)], \quad (2)$$

式中  $\Omega = \frac{2\pi n \cdot 2\Delta L}{c}f$ ,  $c$  为真空中光速,  $f$  为光频率,  $n$  为介质折射率(取空气介质,  $n = 1$ ),  $\Delta L = L_1 - L_2$  为 Michelson 干涉仪的两个臂长差,  $\Theta_x^1$  和  $\Theta_y^2$  分别是多镜 GT 腔的相位响应,即

$$\Theta_x^1 = -2\arctan\left[a_x \tan\left(\frac{2\pi n d_x^1}{c}f - \Theta_{x-1}^1\right)\right], \quad (3)$$

$$\Theta_y^2 = -2\arctan\left[b_y \tan\left(\frac{2\pi n d_y^2}{c}f - \Theta_{y-1}^2\right)\right], \quad (4)$$

$$a_x = \frac{1 - r_x^1}{1 + r_x^1}, \quad (5)$$

$$b_y = \frac{1 - r_y^2}{1 + r_y^2}, \quad (6)$$

$r_x^1, r_y^2$  分别是多镜 GT 腔第  $x, y$  面镜的光波电振幅反射率,  $d_x^1, d_y^2$  是多镜 GT 腔的腔长。由以上公式可知,

输出光谱光强受  $\Delta L, r_x^1, r_y^2, d_x^1, d_y^2$  参数的影响,因而只要选择合适的参数值即可以得到性能优良的等带宽或不等带宽的输出光谱。

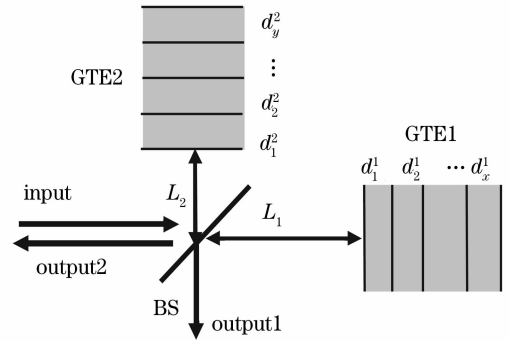


图 1 基于 MGTI 的梳状滤波器

Fig. 1 Structure of an interleaver based on MGTI

## 3 光谱周期的数学判定

数学上,设  $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$  都是集  $M$  上的有限个周期函数,  $T_1, T_2, \dots, T_n$  分别是它们的周期,若  $T_1, T_2, \dots, T_n$  中任意两个之比都是有理数,则此  $n$  个函数之和、差、积也是  $M$  上的周期函数,它们的最小正周期是  $T_1, T_2, \dots, T_n$  的最小公倍数。若  $F(x) = \cos[U(x) + V(x) + W(x)]$ ,应用三角函数和差化积公式化简  $F(x)$  可得

$$\begin{aligned} F(x) &= \cos[U(x)]\cos[V(x)]\cos[W(x)] + \\ &\sin[U(x)]\sin[V(x)]\cos[W(x)] + \\ &\cos[U(x)]\sin[V(x)]\sin[W(x)] - \\ &\sin[U(x)]\cos[V(x)]\sin[W(x)] = \\ &f_1(x) + f_2(x) + f_3(x) + f_4(x), \quad (7) \end{aligned}$$

由于  $U(x), V(x), W(x)$  的正、余弦函数均为周期函数,故  $F(x)$  也是周期函数,  $F(x)$  的最小正周期就是  $U(x), V(x), W(x)$  正、余弦函数周期的最小公倍数。

(1) 式用数学上的三角函数和差化积公式化简可得

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{2}[1 - (\cos \Omega \cos \Theta_x^1 \cos \Theta_y^2 + \\ &\sin \Omega \sin \Theta_x^1 \cos \Theta_y^2 + \\ &\cos \Omega \sin \Theta_x^1 \sin \Theta_y^2 - \\ &\sin \Omega \cos \Theta_x^1 \sin \Theta_y^2)], \quad (8) \end{aligned}$$

关于  $\Omega, \Theta_x^1, \Theta_y^2$  的正、余弦三角函数都是周期函数,那么归一化输出光强  $I_1$  也是周期函数,它的周期受 MI, GT 腔影响,由  $\Omega, \Theta_x^1, \Theta_y^2$  正、余弦函数的周期决定。由  $\Omega$  的定义, (3) 式, (4) 式得出,关于  $\Omega$  的正、余弦函数周期为  $c/(2\Delta L)$ ; 关于  $\Theta_x^1, \Theta_y^2$  的正、余弦函数

周期分别为  $c/(2d_p^1), c/(2d_q^2)$  ( $p = 1, 2, \dots, x, q = 1, 2, \dots, y$ ) 的最小公倍数。如果  $\Delta L, d_p^1, d_q^2$  的比值是有理数, 则输出光强的最小正周期是  $c/(2\Delta L), c/(2d_p^1), c/(2d_q^2)$  的最小公倍数。偶路输出光谱光强周期由公式 (2) 同理推出, 最小正周期也是  $c/(2\Delta L), c/(2d_p^1), c/(2d_q^2)$  的最小公倍数。

利用上述数学理论依据计算  $x \leq 3, y \leq 3$  的所

表 1 不同周期的 MGTI 结构参数和理论周期

Table 1 Structural parameters and theoretical period of different MGTI interleaver

Scheme	$\Delta L$	$d_1^1, d_2^1, d_1^2, d_2^2$	$c/(2\Delta L)$ /GHz	$c/(2d_p^1)$ /GHz	$c/(2d_q^2)$ /GHz	Least common multiple /GHz	Theoretical period /GHz
Example 1	$D$	$d_1^1 = 2D;$ $d_2^1 = d_1^2 = d_2^2 = 0$	100	50	0	100	100
Example 2	$2D$	$d_1^1 = d_1^2 = 2D;$ $d_2^1 = d_2^2 = 0$	50	50	50	50	50
Example 3	$D/2$	$d_1^1 = d_1^2 = D/2;$ $d_2^1 = d_2^2 = 0$	200	200	0	200	200
Example 4	$D$	$d_1^1 = d_2^1 = d_1^2 = d_2^2 = D$	100	100	100	100	100
Example 5	$D$	$d_1^1 = d_1^2 = D;$ $d_2^1 = 2D; d_2^2 = 0$	100	100	50	100	100

表 1 中  $D$  为 100 GHz 周期的 GT 腔所对应的腔长, 即  $D = 1.49896$  mm。

按照表中的结构参数设计 MGTI 结构, 得出系列输出光谱, 其奇、偶路输出光谱如图 2 所示。直观地看到, 输出光谱周期与理论周期是相一致的。

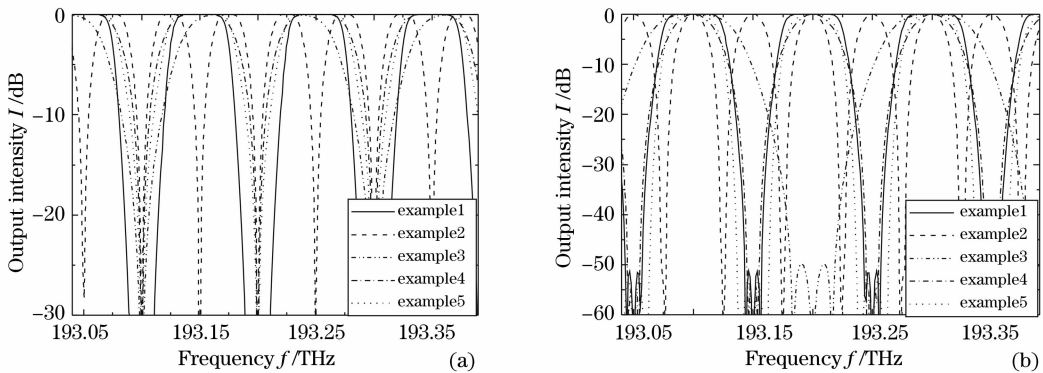


图 2 (a) 不同 MGTI 型 interleaver 结构的宽口输出光谱; (b) 不同 MGTI 型 interleaver 结构的窄口输出光谱

Fig. 2 (a) Output spectrum of interleaver based on different MGTI structures on wide port; (b) output spectrum of interleaver based on different MGTI structures on narrow port

#### 4 输出光谱 3 dB 处相交点

由奇路与偶路输出光谱光强的表达式和能量守恒原则易知, 任何参数结构的 MGTI 型 interleaver, 其奇偶两路输出光谱光强总是相交于  $1/2$  (即 3 dB) 处, 而与 GT 腔镜面反射率、臂长差、GT 腔腔长的取值都无关。

对等带宽 interleaver 而言, 相同臂长差与腔长的 MGTI 结构情况下, 由于奇偶两路输出光谱光强的相

有情况结构, 即单个全反射镜用两镜 GT 腔替换 (例 1)、两个全反射镜用两镜 GT 腔替换 (例 2)、单个反射镜用三镜 GT 腔替换 (例 3)、两个反射镜用三镜 GT 腔替换 (例 4)、一个反射镜用两镜 GT 腔而另一面反射镜用三镜 GT 腔替换 (例 5) 的周期。各不同结构的参数 (本文所指结构参数仅是臂长差与腔长, 不包含 GT 腔反射率等其他参数) 如表 1 所示。

交点对应的频率距离输出光谱光强中心频率点为周期的  $1/4$ , 即当中心频率确定时该相交点也是确定的。当 GT 腔镜面反射率发生变化时, 奇偶两路输出光谱光强还是在 3 dB 对应的确定频率点处相交。以两个全反射镜用三镜 GT 腔替换的 MGTI 结构举例。当结构参数  $\Delta L/d_1^1 = 1/2, d_1^1 : d_2^1 : d_1^2 : d_2^2 = 2 : 2 : 2 : 2$ , 可得到等带宽 interleaver。图 3 为该结构 interleaver 当 GT 腔反射率发生变化时的奇偶两路

输出谱,其中图3(b)为奇偶两路输出光谱光强在3 dB相交点处的放大图。从图3可知,当GT腔镜面反射率发生变化时,奇偶两路输出光谱光强仍在3 dB处相交,并且此相交点对应的频率也是固定不变的,所有偶路(或者所有奇路)输出光谱光强相交点均为3 dB。对其他类型的等带宽MGTI也有同样的性质。

对不等带宽interleaver而言,相同臂长差与腔长的MGTI结构情况下,由于奇偶两路输出光谱光强的相交点对应的频率距离输出光谱光强中心频率点不再是周期的1/4处,随着GT腔镜面反射率的变化,奇偶两路输出光谱在相交点3 dB处对应的频

率也发生了变化。以两个全反镜用三镜GT腔替换的MGTI结构举例。当结构参数 $\Delta L/d_1^1 = 1/1$ ,  $d_1^1:d_2^1:d_3^1:d_2^2 = 1:1:1:1$ ,可得到不等带宽interleaver。图4为该结构interleaver当GT腔反射率发生变化时的奇偶两路输出谱,其中图4(b)为奇偶两路输出光谱光强在3 dB相交点处的放大图。从图4可知,当GT腔镜面反射率变化时,奇偶两路输出光谱光强也总在3 dB处相交,但该相交点对应的频率不是固定不变的。对其他类型的不等带宽MGTI也有同样的性质。

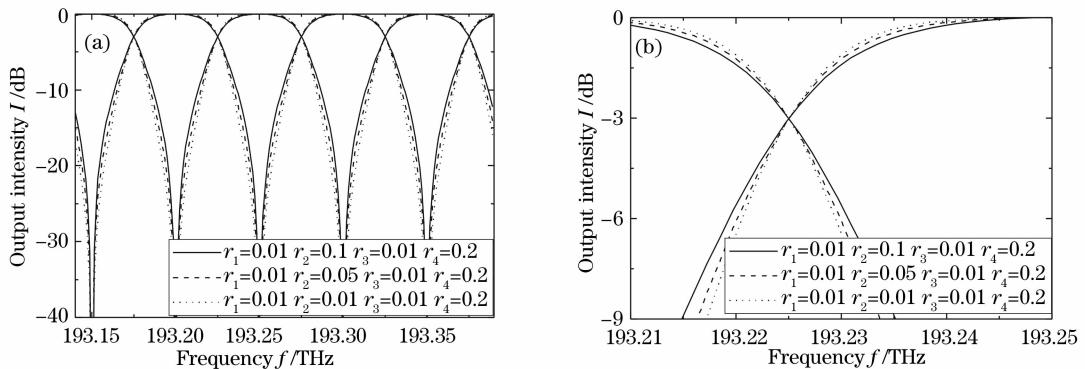


图3 (a)等带宽输出光谱;(b)相交的3 dB处局部放大

Fig. 3 (a) Symmetrical output spectrum; (b) local magnifying of intersect 3 dB

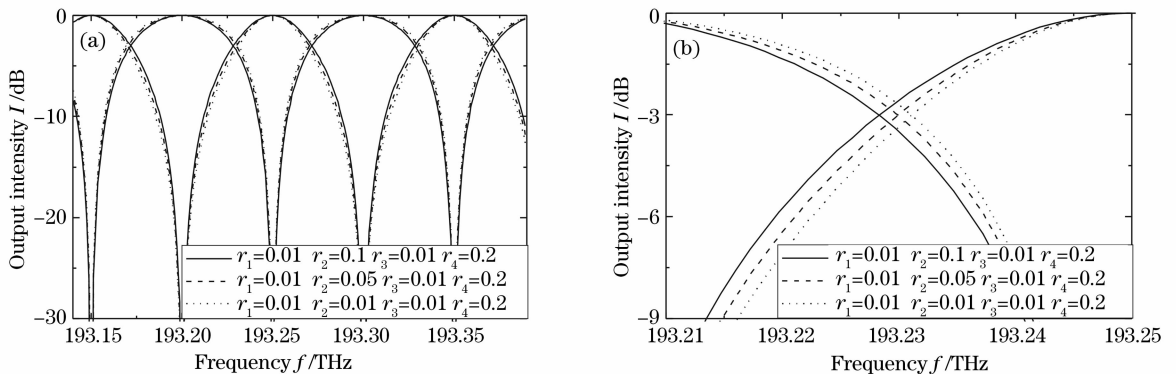


图4 (a)不等带宽输出光谱;(b)相交的3 dB处局部放大

Fig. 4 (a) Asymmetrical output spectrum; (b) local magnifying of intersect 3 dB

以上是对MGTI型interleaver在相同的臂长差和相同的GT腔间距情况下,对反射率发生变化时的情况进行的分析。当臂长差和GT腔间距发生变化时输出光谱光强相交点也有一定的规律。以两个两镜GT腔替换两面全反射镜的MGTI结构为例,当 $\Delta L, d_x^1, d_y^2, r_x^1, r_y^2$ 发生变化时,偶路输出光谱光强有相交点,奇路输出光谱光强也有相交点,但它们各自对应的都不再是3 dB处。这方面特性还有

待于进一步的研究。

## 5 结论

针对任意面镜级联结构的MGTI型interleaver,本文从数学角度严格推导了决定其周期的理论依据,并详细分析了腔镜面反射率发生变化时,奇、偶两路输出光谱光强相交点的频率特性。所得结论可以应用于设计不同需求(如不同周期和带宽要求)的

MGTI 型 interleaver。目前随着光网络的不断发展,interleaver 将朝着任意不等带宽要求的方向发展,因此,这方面研究工作对该器件的发展具有重要的指导意义。

### 参 考 文 献

- 1 He Jun, Liu Deming, Li Wei *et al.*. Utilization of hybrid optical wavelength conversion in wavelength division multiplexing optical networks[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 963~966  
何 军,刘德明,李 蔚等. 混合光波长转换在波分复用光网络中的应用[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 963~966
- 2 Yang Chunyong, Liu Deming, Li Wei *et al.*. Blocking probability analysis of wavelength division multiplexing wavelength routing nodes[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 544~548  
杨春勇,刘德明,李 蔚等. 波分复用波长路由节点的阻塞特性分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 544~548
- 3 Zhang Huijian, Zuo Meng, Zhong Jingshun *et al.*. Study of two stage modulation formats in high-speed dense wavelength division multiplexing systems[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 815~819  
张慧剑,左 萌,钟锦舜等. 高速密集波分复用系统中的二级调制格式研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 815~819
- 4 Li Wei, Chen Long, Huang Dexiu. Design and implementation of an array optical receiver device of density wavelength-division multiplexing-PIN-TIA for wavelength-division multiplexing passive optical networks[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 82~86  
李 蔚,陈 龙,黄德修. 一种应用于波分复用无源光网络系统中的滤波片-PIN-TIA 阵列光接收组件[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 82~86
- 5 Shine B, Bautista J. Interleavers make high-channel-count system economical[J]. *Lightwave*, 2000, (8): 140~144
- 6 Juan Zhang, Liren Liu. Novel Mach-Zehnder interferometer structure for tunable optical interleaver[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(4): 045003
- 7 Juan Zhang, Liren Liu, Yu Zhou. Novel and simple approach for designing lattice-for interleaver filter[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(18): 2217~2224
- 8 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Flattening optimization of spectral transmittance for birefringent filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 426~430  
张 娟,刘立人,周 煜等. 双折射滤波器光谱透射率函数的平坦化优化计算[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 426~430
- 9 Juan Zhang, Liren Liu, Yu Zhou. A tunable interleaver filter based on analog birefringent units[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **227**(4~6): 283~294
- 10 Shao Yonghong, Miao Tongqun, Jiang Yaoliang *et al.*. A novel interleaver with different output spectrum bandwidth[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 948~950  
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
- 11 Zhang Ting, Chen Kai, Zhao Shuai *et al.*. A novel unequal passband interleaver employing high birefringence fiber sagnac loop mirror[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(4): 436~440  
张 婷,陈 凯,赵 帅等. 双折射光纤环镜不等带宽交错复用器的研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4): 436~440
- 12 Zhang Ruifeng, Wang Shuhui, Ge Chunfeng *et al.*. Design of different bandwidth interleaver[J]. *J. Tianjin University*, 2006, **39**(3): 365~368  
张瑞峰,王书慧,葛春风等. 不等带宽奇偶交错滤波器设计[J]. *天津大学学报*, 2006, **39**(3): 365~368
- 13 Chi-hao Cheng. Asymmetrical interleaver structure based on the modified Michelson interferometer [J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(11): 115003
- 14 Benjamin B. Dingel, Masayuki Izutsu, Koji Murakawa. Optical wave-front transformer using the multiple-reflection interference effect inside a resonator[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(19): 1449~1451
- 15 L. Wei, J. W. Y. Lit. Design optimization of flattop interleaver and its dispersion compensation [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 6439~6457