

文章编号 1004-924X(2005)06-0627-06

一种梯形干涉链可调谐光滤波器的设计与研究

潘 炜^{1,2}, 张晓霞², 罗 斌¹, 邹喜华¹, 王梦遥¹, 张伟利¹

(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院 光通信与光器件研究所, 四川 成都 610031;

2. 电子科技大学 光电信息工程学院, 四川 成都 610054)

摘要:结合 Mach-Zehnder 干涉原理和多模干涉(MMI)耦合器的散射矩阵,从理论上推导出梯形干涉链可调谐光滤波器(LTOF)输出光场的表达式,采用优化算法搜索出不同级联级数下 MMI 耦合器的最佳分光比,并分析了衍射阶数和电极长度对 LTOF 调谐输出性能的制约关系。结果表明,对应最大峰值功率,存在随级联级数增加而增大的最佳分光比;增加级联级数会导致峰值功率和 3 dB 带宽减小,峰值隔离度增大;电极长度为原电极的 1.4 倍时,可实现 LTOF 连续双向宽调谐的功能。通过比较,验证了理论模型及分析方法的正确性。

关键词:导波光学;可调谐光滤波器;梯形干涉链结构;分光比;连续调谐

中图分类号:TN256;TN713 **文献标识码:**A

Design of tunable optical filter using ladder-interference-type structure

PAN Wei^{1,2}, ZHANG Xiao-xia², LUO Bin¹, ZOU Xi-hua¹, WANG Meng-yao¹, ZHANG Wei-li¹

(1. *Optical Communication and Devices Research Laboratory, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*; 2. *School of Optoelectronic and Information, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China*)

Abstract: Based on the interference principle of Mach-Zehnder interferometer and the transfer matrix of multimode interference (MMI) coupler, the expression of the optical field at the output port was derived and the performance of the ladder-interference-type structure based tunable optical filter (LT-OF) was investigated. The results show that there is an optimum splitting ratio of the MMI coupler for different stages obtained by algorithm. The increment in number of ladders for the LTOF will lead to the reducing peak power and narrowing 3 dB bandwidth. According to the effect of the diffraction order and the length of electrodes on the tuning performance, it is proposed to prolong the length of electrode by 40% to realize the continuous tuning. An example is given to verify the availability of this method.

Key words: guided wave optics; tunable optical filter; ladder-interference-type structure; splitting ratio; continuous tuning

收稿日期:2005-06-17;修订日期:2005-09-20.

基金项目:国家自然科学基金(No. 10174057;90201011);教育部科学技术研究重点项目(No. 105148);四川省应用基础科学研究计划(No. 03JY029-048-1);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目。

1 引言

可调谐光滤波器作为波长(频率)选择器件,在光信道多路复用(DWDM等)和光网络多址技术、光编码技术、光信息处理、光传感技术和匹配滤波技术等系统中有着重要的应用。目前,可调谐光滤波器主要有 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)型,薄膜干涉滤光片型,阵列波导光栅(AWG)型,光纤光栅型,声光、电光调谐型,环形谐振器、Fabry-Perot 谐振腔型和有源半导体滤波器型等,并且已有很多研究成果^[1-6]。最近, Matsuo S 等人利用 MOCVD 技术,在 InP 衬底上制作出一种梯形干涉链可调谐光滤波器(LTOF),并给出了相关的实验报道^[7]。这种新颖的 LTOF 采用了阶梯形干涉链结构,具有调谐电极等长、面积小,尺寸紧凑,便于工艺制作和集成,无光纤耦合损耗和波导传播损耗以外的附加损耗,可实现峰值波长的双向调谐,调谐速度快(约 10 ns),调谐范围大,峰值功率增益均衡的优点,在多种系统中有着潜在的应用。故如何构建 LTOF 理论模型,并用于其结构参数设计和性能指标评估是一个值得研究的问题。本文基于 MZI 干涉原理和多模干涉(MMI)耦合器的散射矩阵,首次推导出 LTOF 输出光场的递推表达式,用于数值分析其输出和调谐性能。着重探讨 LTOF 级联级数、MMI 耦合器分光比以及衍射阶数对输出谱的影响,通过控制分光比、电极长度或波导有效折变系数等参数,体现 LTOF 传输谱设计的灵活性;并拟合实验结果,验证理论模型的正确性,提出和预测实现 LTOF 连续宽调谐的可行性方案和措施。

2 理论模型

LTOF 的结构如图 1 所示,它由等长的输入/输出波导,交叉波导阵列和 MMI 耦合器构成的干涉链和调谐电极组成。交叉波导阵列是一组以 ΔS 长度逐级递增(类似于 AWG)的波导,用于连接输入和输出波导,同时形成光波干涉的静态(无调谐动作)相位延迟。为达到调谐的目的,仅有静态相位延迟是不够的,还需要引入动态相位延迟,因而在各级输入、输出波导上制作出长度为 L 的

调谐电极(与 AWG 方案相比^[2],LTOF 电极所占面积小、且等长)。通过调谐电极注入电流,动态改变输入(或输出)波导的折射率,从而在原本等长的输入/输出波导之间形成了相对动态相位延迟。这样,静态、动态相位延迟迭加成 LTOF 的总相位延迟,同时它也决定了 LTOF 的峰值波长。

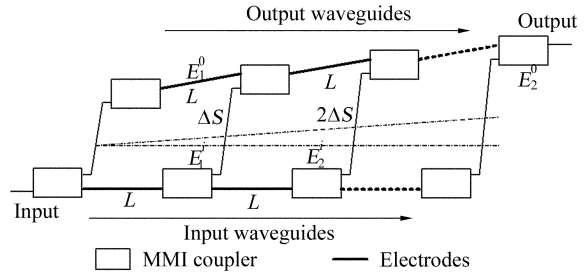


图 1 阶梯形干涉链可调谐光滤波器的结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the tunable optical filter using ladder-interference-type structure

在 LTOF 干涉链结构中,光波经输入波导注入后,被输入 MMI 耦合器分成两束;一束沿输入波导传输,不断地被分成两束;另一束通过交叉波导后,与输出波导中的光束在输出 MMI 耦合器发生干涉形成新的输出波导光束,干涉作用的产生源自动态和静态相位延迟。依此类推,实现逐级多光束干涉的滤波现象。分析 LTOF 的结构和干涉原理,不难发现,相邻两级阶梯型结构可等效为基于 MMI 耦合器的 MZI。因此,结合 MZI 的干涉原理和 MMI 耦合器的散射矩阵,以 N 级干涉链结构、衍射阶数为 m 的 LTOF 为例。设第 n ($0 \leq n \leq N$) 级输入、输出波导中的光场分别为 E_n^i 和 E_n^o ,输入、输出 MMI 耦合器的直通分光比分别为 α 、 β ,则 2×2 MMI 耦合器的散射矩阵为^[4, 8]

$$\begin{bmatrix} \alpha^{1/2} & (1-\alpha)^{1/2} \exp[-j(\Delta\Phi_1)] \\ (1-\alpha)^{1/2} \exp[-j(\Delta\Phi_1)] & \alpha^{1/2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \beta^{1/2} & (1-\beta)^{1/2} \exp[-j(\Delta\Phi_2)] \\ (1-\beta)^{1/2} \exp[-j(\Delta\Phi_2)] & \beta^{1/2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

忽略波导的传输损耗,则 LTOF 中光场满足下面的递推关系

$$\begin{bmatrix} E_{n+1}^o \\ E_{n+1}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta^{1/2} & (1-\alpha)^{1/2}(1-\beta)^{1/2} \exp[-j(\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 + \gamma + (n-1)\Delta\gamma)] \\ 0 & \alpha^{1/2} \exp(-j\Delta\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_n^o \\ E_n^i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$E_N^o = E_0^i (1-\alpha)^{1/2} (1-\beta)^{1/2} \exp[-j(\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 + \gamma)] \times \sum_{k=0}^{N-1} \alpha^{k/2} \beta^{(N-1-k)/2} \exp[-jk(\Delta\theta + \Delta\gamma)]. \quad (4)$$

式中 $\Delta\Phi_1$ 、 $\Delta\Phi_2$ 分别为输入/输出 MMI 耦合器各输出端的相对相位差; $\Delta\theta$ 为输入/输出波导的相对相位延迟(未调谐时为 0); γ 、 $\Delta\gamma$ 分别为第一级交叉波导和交叉波导中 ΔS 引起的相位延迟。

由递推关系式可知, LTOF 的滤波和调谐功能主要由相位延迟因子 $(\Delta\theta + \Delta\gamma)$ 、分光比 $(\alpha$ 和 $\beta)$ 和级联级数决定。相位延迟因子对应输出谱的峰值波长, 通过电极调节 $\Delta\gamma$ 的大小, 从而动态改变相位延迟对应的峰值波长。这里, 尽管 MMI 耦合器输出端之间存在相位差, 但在模型中将其处理成多光束中的绝对相位延迟, 不会对干涉现象造成影响, 简化了分析模型复杂度。分光比主要影响 LTOF 输出谱的峰值功率、隔离度等, 它决定多次干涉作用中两光波分量的大小, 从而影响逐级干涉的效果。对式(4)展开数值分析可知, 对应确定的级联级数, 存在一最佳分光比, 使得输出谱的峰值功率最大。运用最佳数值逼近算法^[6,9-10], 针对 LTOF 峰值功率随分光比 $(\alpha$ 和 $\beta)$ 变化的三维图进行搜索, 表 1 给出了不同级数下最佳分光比的搜索结果。不难看出, 仅当分光比 α 与 β 相等时, 输出谱的峰值功率最大。同时, 最佳分光比会随着级联级数的增加而增大。此外, 衍射阶数也将对输出谱施加一定的影响, 这将在数值分析部分加以描述。

表 1 不同 N 对应的最佳分光比

Tab. 1 Optimum splitting ratio for different N

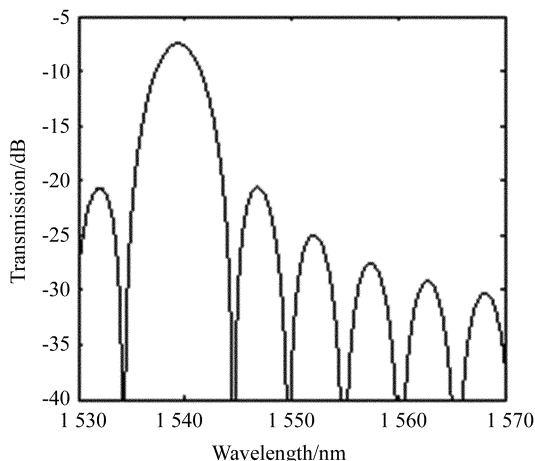
| N | Peak power/dB | Ratio α | Ratio β |
|----|---------------|----------------|---------------|
| 5 | -4.36 | 0.67 | 0.67 |
| 10 | -5.86 | 0.82 | 0.82 |
| 15 | -7.33 | 0.88 | 0.87 |
| 20 | -8.80 | 0.91 | 0.90 |
| 25 | -10.26 | 0.92 | 0.92 |
| 30 | -11.73 | 0.93 | 0.94 |

3 数值分析

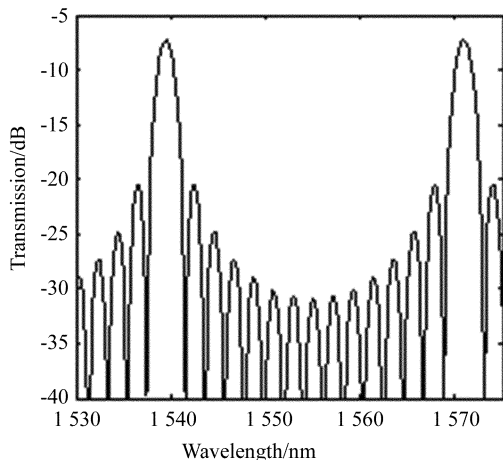
3.1 LTOF 输出谱特性

利用建立的理论模型, 对输出谱进行数值分

析。为便于对比实验文献报道的结果, 采用 $m = 20$, $N = 15$, $\alpha = \beta = 0.85$, 以及 MMI 耦合器 0.29 dB 的损耗^[7] 等结构参数, LTOF 的输出谱(波长在 1 530~1 570 nm) 如图 2(a) 所示, 数值结果与实验测量结果一致。同时, 为验证衍射阶数对输出谱及 3 dB 带宽的作用, m 增加到 50 时对应的输出谱见图 2(b)。此时的输出谱相当于图 2(a) 在频域进行了压缩, 峰值波长之间的间隔(自由频谱区 FSR) 和 3 dB 带宽明显减小, 亦与文



(a) $m = 20$



(b) $m = 50$

图 2 计算得到的输出谱: $N = 15$

Fig. 2 Calculated transmission spectra for $N = 15$

献中的分析完全一致。也就是说,3 dB 带宽的减小提高了波长选择的精度,但其带来的负面影响也是显而易见的,即 FSR 的下降减小了调谐的范围。因而在实际设计中,需要折中考虑这两方面的因素。

级联级数与输出谱的关系,如图 3 所示。这里采用表 1 获得的最佳分光比,观察不同级联级数下 LTOF 的输出谱。可见,随着级联级数增加(从 5 级到 30 级),峰值功率和 3 dB 带宽减小,峰值隔离度增大。这是因为级联级数的增大,意味着 MMI 耦合器的损耗累积增大;同时,模型中采用输出 MMI 耦合器,本质上也存在着光场的泄漏(这也是本模型不足之处),级联级数的增大同样也会导致更大的损耗。但是,峰值功率并没有随级联级数的增大而线性递减,完全得益于最佳分光比的搜索。最佳分光比递增,既改善了逐级干涉的效果,又降低了每一级输出 MMI 耦合器的泄漏光场。

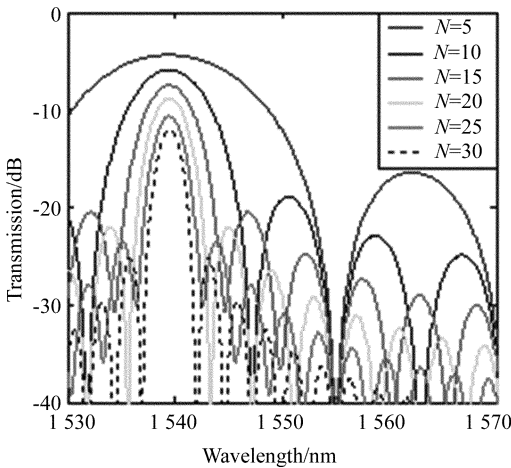


图 3 不同级联级数 N 对应的输出谱

Fig. 3 Transmission spectra for different stage N

3.2 LTOF 连续调谐特性设计

LTOF 的主要特色是调谐性能,其优越性体现在双峰值波长的双向大范围调谐,响应速度快(约 10 ns),并且峰值功率在调谐过程中增益均衡。增益均衡器已经作为一种新型的无源器件问世,有着更为广泛的应用领域。就其物理机制而言,LTOF 增益均衡是由于 MMI 耦合器的波长相关性损耗在 1570 nm 附近最小,以 1570 nm 为 FSR 的中心,克服了随注入载流子浓度增加而增大的传输损耗^[4,8]。

$$\text{FSR} = \frac{1570}{m-0.5}, \quad (5)$$

在实际调谐过程中,向输入波导电极区注入电流,导致输入波导的有效折射率减小,输出波导和交叉波导之间的光程差减小,从而右峰值波长向短波长方向移动,即

$$\Delta\lambda_R = -\frac{\Delta n_e L}{m-1}, \quad (6)$$

反之,向输出波导电极区注入电流,左峰值波长将向长波长方向移动

$$\Delta\lambda_L = +\frac{\Delta n_e L}{m}, \quad (7)$$

其中 Δn_e 为波导有效折射率的改变量。由上述分析可知,左、右峰值波长的调谐漂移是不对称的,右峰值波长漂移的程度略大于左峰值波长。图 4 拟合了峰值波长与调谐电流平方根的关系,当注入电流控制在 0~30 mA 时,两者满足良好的线性关系。因而在实际设计中,完全可以根据式(6-7)或图 4 反映的调谐电流与峰值波长的关系,注入适当大小的调谐电流来获得所需的峰值波长。当然,实际器件因波导不完全理想或电极的效率等因素,需要对调谐电流进行补偿。

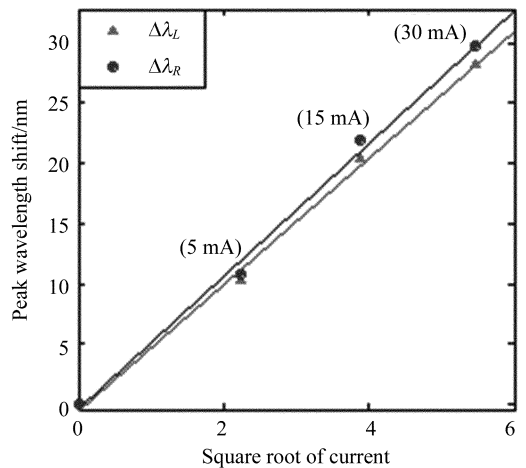


图 4 峰值波长随调谐电流平方根的变化关系

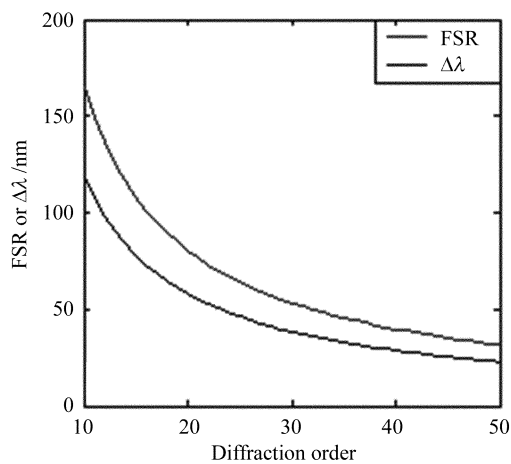
Fig. 4 Variation of left/right peak wavelength shift with square root of current

LTOF 大范围调谐的优势体现在已达 58 nm 的实验调谐结果,但面对的挑战就是调谐范围不能覆盖整个 FSR^[7],无法实现在整个 FSR 中连续调谐,这将给实际应用带来不便。因而,本文在实验报道的器件参数和调谐参数基础上,尝试提出一种实现 LTOF 连续宽调谐的可行方案。结合

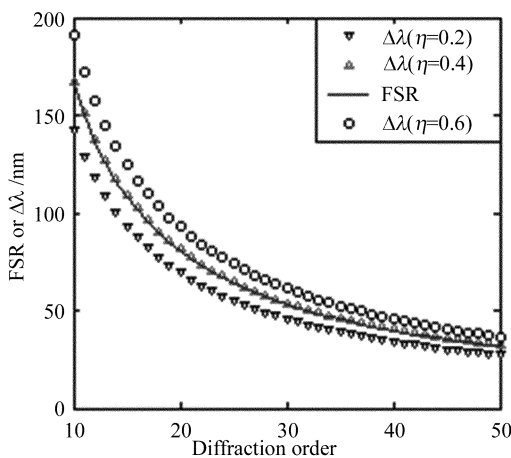
式(6-7),电极长度 L 和衍射阶数 m 对调谐范围 $\Delta\lambda$ 的影响可表示为

$$\Delta\lambda = (1 + \eta)L\Delta n \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m-1} \right), \quad (8)$$

其中 η 表示电极的伸缩比例, Δn_e 表示 Δn_e 的最大值。不难发现, LTOF 调谐范围与衍射阶数和电极长度相关, 本文结合式(5-8), 从这两方面入手加以分析和讨论。仅改变衍射阶数, FSR 曲线与 $\Delta\lambda$ 曲线逐渐接近, 见图 5(a)。理论上可以这样认为: 当 m 增大到一定值, 就可以实现连续调谐。但如前文的输出谱分析可知, 无限增大 m 反而得不偿失, 因为调谐范围将大大减小。因而仅改变



(a)

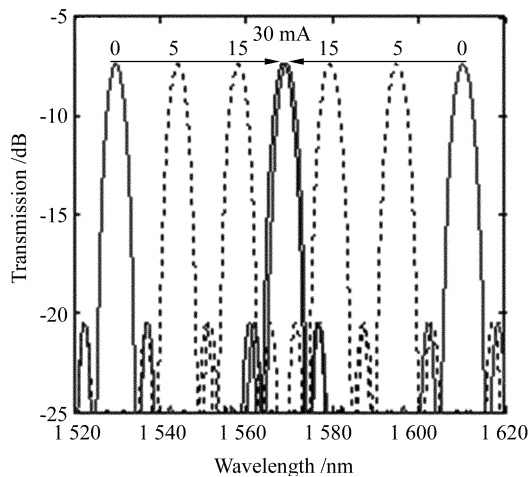


(b)

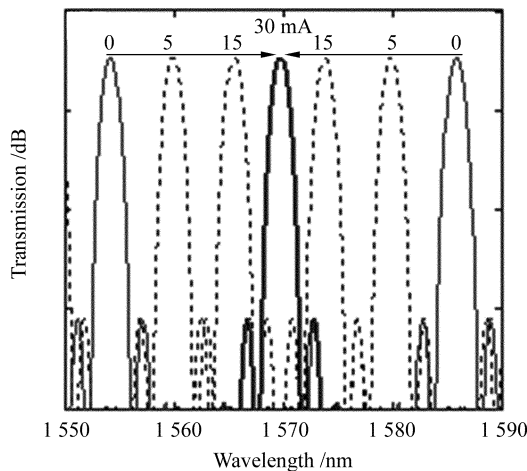
图 5 (a) FSR, $\Delta\lambda$ 与衍射阶数 m 的对应关系, (b) 不同电极长度伸缩比下, FSR, $\Delta\lambda$ 与衍射阶数 m 的对应关系

Fig. 5 (a) Variation of FSR, $\Delta\lambda$ with the diffraction order; (b) Variation of $\Delta\lambda$ with the diffraction order for prolonged electrode

衍射阶数的连续调谐方案是不实际的。控制电极长度伸缩比 η 从 0.2 到 0.6 变化, $\Delta\lambda$ 曲线将逐渐接近并超越 FSR 曲线, 尤其是在 $\eta=0.4$ 处两曲线几乎重合, 对应图 5(b)。这说明将电极长度延长至原来的 1.4 倍, 即可在所有衍射阶数下实现整个 FSR 的连续调谐。因而在方案的设计中, 不需要考虑 LTOF 结构中的敏感结构参数—衍射阶数, 不必分析衍射阶数带来的波长选择精度和调谐范围的连锁反应, 简化了设计和分析的难度。基于上述分析结果, 提出了一种简洁的方案, 即将报道的输入、输出波导电极延长到原来的 1.4 倍, 构建连续调谐的 LTOF。注入电流控制在 0~30 mA 范围内, 对不同的衍射阶数 $m=20$ 和 50 的情形, LTOF 都能在整个 FSR 中连续调谐, 具体模拟结果如图 6 所示。该方案的实现并不困难, 若



(a) $m=20$



(b) $m=50$

图 6 LTOF 连续调谐的数值结果

Fig. 6 Continuous tuning performance of LTOF

输入/输出波导的长度足够,直接增大电极长度即可;若长度不够,在设计时将输入/输出波导同时增大到原电极的 1.4 倍,再制作电极。由于 LTOF 模型中干涉作用仅与输入/输出波导的相对相位延迟 $\Delta\theta$ 有关,这种绝对相位延迟的增加并不会影响 LTOF 的性能。当然,采用增大波导有效折变系数的方法也可等效于电极长度的延伸,同样可实现 LTOF 的连续宽调谐,但它涉及到波导材料、电极的构造等问题,相对而言要复杂些。

4 结 论

综上所述,本文所构建的理论模型和导出的

LTOF 输出光场表达式,不仅拟合了文献的实验结果还从数值上预测了 LTOF 的输出和调谐性能。研究表明,对应 LTOF 最大峰值功率,存在随级联级数增加而增大的最佳分光比;随着级联级数增加,峰值功率和 3 dB 带宽减小,峰值隔离度缓慢增大。当注入电流控制在 0~30 mA 范围内,峰值波长与调谐电流平方根满足线性关系,LTOF 左右调谐存在微弱的不对称性。通过合理设计电极长度或增大波导有效折变系数,可实现不同衍射级数的连续调谐。同样这种梯形干涉链结构,对于增益均衡器和光编解码器等光无源器件的设计也有所裨益。

参考文献:

- [1] KOSTRZEWA C, MOOSBURGER R, FISCHBECH G, *et al.* Tunable polymer optical add/drop filter for multi-wavelength networks[J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1997, 9(11): 1487-1489.
- [2] TOYODA T, OOBA N, KITO T, *et al.* Wide tuning range and low operating power AWG-based thermo-optic wavelength tunable filter using polymer waveguide[J]. *Electron. Lett.*, 2001, 37(18): 1130-1132.
- [3] VAZQUEZ C, VARGAS S, PENA J M. Tunable optical filters using compound ring resonators for DWDM [J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 2003, 15(8): 1085-1087.
- [4] BACHMANN M, BESSE P A, MELCHIOR H. General self-imaging properties in $N \times N$ multimode interference couplers including phase relations[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(18): 3905-3911.
- [5] SPISSER A, LEDANTEC R, SEASSAL C, *et al.* Highly selective and widely tunable 1.55 μm InP/air-gap micromachined Fabry-Perot filter for optical communications[J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1998, 10(9): 1259-1261.
- [6] 潘炜, 张晓霞, 罗斌, 等. 垂直腔半导体光放大器双稳及逻辑特性的理论研究[J]. *半导体学报*, 2005, 26(2): 357-362. PAN W, ZHANG X X, LUO B, *et al.* Theoretical study of bistable and logic characteristics in vertical cavity semiconductor optical amplifier[J]. *Chinese J. of Semiconductors*, 2005, 26(2): 357-362. (in Chinese)
- [7] MATSUO S, YOSHIKUNI Y, SEGAWA T, *et al.* A widely tunable optical filter using ladder-type structure[J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 2003, 15(8): 1114-1116.
- [8] 邹喜华, 潘炜, 罗斌, 等. 倾角对光纤 Bragg 光栅型 OADM 性能的影响[J]. *光电子·激光*, 2004, 15(8): 910-913. ZUO X H, PAN W, LUO B, *et al.* Effects of tilt angle on the performance of fiber Bragg gratings assisted OADM [J]. *J. of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(8): 910-913. (in Chinese)
- [9] LÜ H CH, LUO B, PAN W, *et al.* Tunable output power varying with the splitting ratio of a coupler from a fiber ring semiconductor laser[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(9): 1764-1766.
- [10] 孙德贵, 刘志福, Ho S T, 等. 自聚焦超晶格波导调制器[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4): 386-392. SUN D G, LIU ZH F, Ho S T, *et al.* Electro-optic modulators with self-assembled superlattice waveguides[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(4): 386-392. (in Chinese)

作者简介:潘 炜(1959—),男,湖南岳阳人,教授,博士生导师,西南交通大学信息科学与技术学院(原计算机与通信工程学院)通信工程系主任,电子科技大学客座教授,主持完成多项国家、省、部级和企业合作科研项目,在国内外重要学术期刊发表论文 80 余篇,主要从事光通信与光器件的研究。

张晓霞(1961—),女,河北蠡县人,电子科技大学教授,博士生导师,主要从事半导体物理及光电子器件研究。

邹喜华(1981—),男,湖南衡阳人,西南交通大学博士研究生,主要从事光通信与光器件的研究。