

一种新颖的超结构光纤 Bragg 光栅梳状滤波器的设计

曹 辉^{1,2)†} 孙军强¹⁾ 张新亮¹⁾ 肖凌燕³⁾ 黄德修¹⁾

¹⁾ 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

²⁾ 佛山科学技术学院物理学系, 佛山 528000)

³⁾ 武汉光讯科技有限责任公司, 武汉 430074)

(2003 年 8 月 1 日收到, 2004 年 1 月 2 日收到修改稿)

报道一种新颖的用于多波长光纤激光器的超结构光纤 Bragg 光栅(SFBG)梳状滤波器,其突出特点是仅由单个光栅构成、折射率调制和局部啁啾富于变化、反射峰均匀性好、窄带宽和标准的信道间隔.采用基于 LP 算法的 IS 光纤光栅设计技术,将整体加窗切趾法改进为各信道独立加窗切趾,成功地设计出所需的 SFBG,同时对 SFBG 的制作技术也进行了探讨.用传输矩阵法分析反射谱、时延曲线和群时延抖动.结果表明,所设计的 SFBG 满足各项设计指标要求.在 DWDM 系统中,这种新颖的 SFBG 可望成为用于多波长光纤激光器的最理想的高性能梳状滤波器.

关键词:超结构光纤 Bragg 光栅,光栅设计,梳状滤波器

PACC:4281,4280C,4280F

1. 引 言

用于密集波分复用(DWDM)光纤通信系统的多波长光纤激光器,有可能替代单个半导体激光器成为多信道信号源,近年来受到越来越多的关注^[1-3].选择合适的波长选择元件是使光纤激光器多波长工作的必要条件之一.众多研究者设计出了各种基于光纤光栅的频率选择器件来实现光纤激光器的多波长激光,如光纤光栅 F-P 谐振腔,全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪,全光纤 Sagnac 干涉仪,级联光纤光栅,光纤光栅梳状滤波器等^[4-7].这里光纤光栅梳状滤波器仅仅指具有梳状反射谱的单个光纤光栅,它具有结构简单,与光纤兼容性好,波长选择可精确确定,信道窄等优点,在多波长光纤激光器中将得到广泛应用.但基于取样光纤光栅或基于莫尔效应的相移光纤光栅的梳状滤波器反射峰峰值不均匀^[8,9],将引起激光器各纵模功率失衡.本文采用基于 LP(layer-peeling)算法的 IS(inverse scattering)技术,开拓性地采用各信道独立加窗切趾的方法,设计出一种折射率调制和啁啾分布比取样光栅更富于变化的高性能超结构光纤 Bragg 光栅(SFBG)梳状滤波器,完全满足 ITU-T 所建议的 DWDM 光纤通信系统信道

标准 8 个反射峰等强度等间距(0.4nm,对应 50GHz 信道间隔)排列, -0.5dB 带宽 0.1nm, -30dB 带宽 0.15nm,通频带内无色散.这种 SFBG 反射谱的均匀性明显优于取样光栅,而且与上述基于干涉仪结构的梳状滤波器相比,具有结构简单、附加损耗小等优点,用来代替级联的单反射峰光栅,可以减小激光器尺寸,避免多个单反射峰光栅间的熔接损耗,简化多波长光纤激光器的结构.

2. 目标反射谱的设计

DWDM 光纤通信系统要求多波长光源波长密集(通道波长间隔小),波长数目大,线宽窄以及功率谱平坦,因此用于 DWDM 系统的多波长光纤激光器对用作波长选择器的光纤光栅也提出了很高的要求,如多反射峰,反射峰间隔窄且均匀,具有高反射率,窄带宽和高的带宽利用率,同时要求无色散.据此可将光纤 Bragg 光栅(FBG)目标反射谱各项指标设计为:峰值反射率 0.95, -0.5dB 带宽 0.1nm, -30dB 带宽为 0.15nm, 8 个反射峰等强度等间距(0.4nm,对应 50GHz 信道间隔)排列,反射系数幅角为零,则理想的光纤 Bragg 光栅梳状滤波器目标反射谱可用超高斯函数表示为

† Email: foshancaohui@sina.com; 电话: 0757-83961158.

$$r(\lambda) = \sqrt{0.95} \times \sum_{j=1}^8 \exp(-(\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} - \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_j})^2 251^2), \quad (1)$$

其中,有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.446$;中心波长 $\lambda_j = (1548 + j \times 0.4) \text{ nm}$ $j = 1, 2, \dots, 8$. 图 1(a)给出了这种理想目标反射谱的图形.

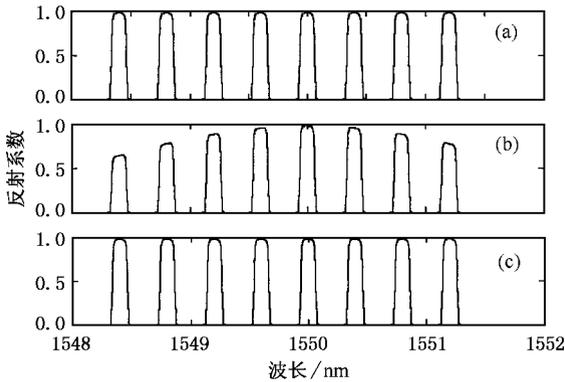


图 1 (a)目标反射谱 (b)由整体加窗切趾法得到的物理可实现反射谱 (c)由各信道独立加窗切趾法得到的物理可实现反射谱

3. 光栅设计方法

所谓光栅设计就是由实际要求的目标反射谱来确定光栅结构使目标谱得以实现的过程,较常用的一阶波恩近似法由于只考虑了介质的一次反射,因此只适用于低反射率光栅设计,而另一种是积分法,通过精确求解描述光栅中光波传播特性的积分方程得到光栅结构参数,由于直接求解积分方程存在困难,需要将目标谱加以有理化近似或采用迭代的方法求解^[10],计算结果精确度不高,计算效率较低.这里采用基于 LP 算法的 IS 技术^[11-13],它是一种设计灵活、简便、高效、精确的光纤光栅合成方法,由 Feced 等人首先运用于 FBG 滤波器设计.该方法是利用光栅结构参数(切趾函数和局部啁啾量)与光栅反射谱之间满足的因果关系,通过设定优良的目标特征曲线,如设定平顶、窄间距、窄带宽、高带宽利用率、高反射率的目标反射谱和水平的目标时延曲线,将光栅看作由 M 层(M 足够大,使长为 Δ 的各段光栅的耦合系数可视为常数)复反射器级联而成,由目标特征曲线出发,反演推算出每段光栅的耦合系数,再由耦合系数与切趾函数和局部啁啾量分布之间的关系确定光栅结构.具体的公式推导和证明已有文献报道^[11, 12].为行文和计算方便,给出有关

公式和迭代过程.

该方法的具体计算将用到下列公式^[11]:

$$\rho_j = F^{-1}[r_j(\lambda)]_{z=0} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M r_j(n), \quad (2)$$

$$\rho_j = -\tanh(|q_j| \Delta) \frac{q_j^*}{q_j}, \quad (3)$$

$$r_{j+1}(\lambda) = e^{-2\delta\Delta} \frac{r_j(\lambda) - \rho_j}{1 - \rho_j^* r_j(\lambda)}, \quad (4)$$

$$q(z) = \frac{\pi \Delta n_0(z)}{\lambda} \exp\left(i\left(\frac{\pi}{2} + \theta(z)\right)\right), \quad (5)$$

$$\frac{d\theta(z)}{dz} = -\frac{2\pi z}{\Lambda^2} \frac{d\Lambda(z)}{dz}, \quad (6)$$

其中 ρ_j 表征第 j 个复反射器在时间 $t = 0$ 时的脉冲效应(时域反射系数)(3)式反映了 ρ_j 与第 j 段光栅耦合系数之间的关系(4)式为频域反射系数的迭代公式,其中 r_1 要求是物理可实现的目标反射系数,设计中可借鉴有限长单位冲击响应(FIR)数字滤波器设计方法中的窗函数设计思想,通过对理想目标谱 $r(\lambda)$ 进行加窗切趾得到(5)式描述了耦合系数与折射率调制幅度 $\Delta n_0(z)$ 和光栅相位 $\theta(z)$ 之间的关系(6)式中 $\Lambda(z)$ 为待求的光栅啁啾函数.由物理可实现目标反射谱到光栅结构的迭代过程如下:

- 1) 根据设计要求写出 $r_1(\lambda)$ 的表达式并离散化.
- 2) 令 $j = 1$.
- 3) 由(2)式计算 ρ_j , 进而根据(3)式计算出 q_j .
- 4) 由(4)式计算出 $r_{j+1}(\lambda)$.
- 5) $j = j + 1$.
- 6) 重复步骤 3)–5)直到计算出所有 q_j .
- 7) 利用 5)和 6)确定光栅结构(折射率调制和局部啁啾分布).

4. 加窗切趾

迭代过程中的第一步是该设计方法的关键,需要根据要求确定光栅目标反射谱,并用恰当的方法进行加窗切趾以得到物理可实现反射谱.以往的研究均直接对整个光栅反射谱进行加窗切趾,使窗外的脉冲响应为零,并将整个脉冲响应进行移位使之在 $t = 0$ 时激励,得到 $r_1(\lambda)$ ^[11-13].若采用这种惯用的加窗方法,选取汉宁窗(Hanning)作为窗函数,以(1)式作为光栅目标反射谱,取波长计算范围 $\Delta\lambda = 8 \text{ nm}$,光栅长度 $L = 10 \text{ cm}$,则加窗切趾后的物理可实现反射谱为

$$r_1(\lambda) = \left(r(\lambda) \times \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right) \right) \right) \times \exp \left(i2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) L \right). \quad (7)$$

由(7)式计算得出的物理可实现反射谱如图 1(b)所示,可见这种物理可实现反射谱出现明显的余弦型包络调制,各信道峰值反射率相差较大,与图 1(a)所示的理想目标反射谱有很大的偏离,不能满足多波长光纤激光器对波长选择器件各信道性能一致的要求。

这里将具有(1)式反射谱的超结构光纤 Bragg 光栅视为由 8 个一般结构光栅叠加而成,每个一般结构光栅的反射谱对应 SFBG 反射谱的一个信道,而每个一般结构光栅的反射谱应该是物理可实现的,这可通过对每个信道单独加窗切趾实现,然后将 8 个已加窗的物理可实现反射谱相加得到 SFBG 物理可实现反射谱.图 2 给出了各信道独立加窗切趾的示意图,具体的数学表达式为

$$r_1(\lambda) = \sqrt{0.95} \times \sum_{j=1}^8 \left[\exp \left(- \left(\frac{2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_j} \right)}{251} \right)^{10} \right) \times \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{\lambda - \lambda_j}{\Delta\lambda} \right) \right) \times \exp \left(i2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_j} \right) L \right) \right]. \quad (8)$$

按(8)式计算得到的物理可实现反射谱如图 1(c)所示,与图 1(a)所示理想目标反射谱相比,两者接近程度很高.这样采用各信道独立加窗切趾的方法,一方面保证了所设计的 SFBG 反射谱是物理可实现的,可用 LP 算法设计;另一方面保证了物理可实现反射谱满足实际要求。

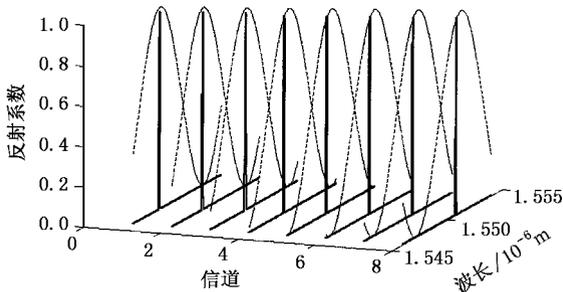


图 2 各信道独立加窗切趾法示意图,实线为 8 信道反射谱,虚线为分别加窗切趾 8 信道的汉宁窗函数曲线

按照上述方法设计的 SFBG 切趾函数和局部啁

啾量分布分别如图 3(a)和(b)所示,可见所设计的 SFBG 切趾函数不同于常规的钟形对称切趾函数,折射率调制集中在光栅中部且振荡变化,啁啾也是非线性的,且在光栅前部啁啾较大,这是一种特殊的 SFBG,其折射率调制和局部啁啾甚至比称为 SFBG 的取样光栅更富于变化,因而具有比取样光栅更优良的反射谱。

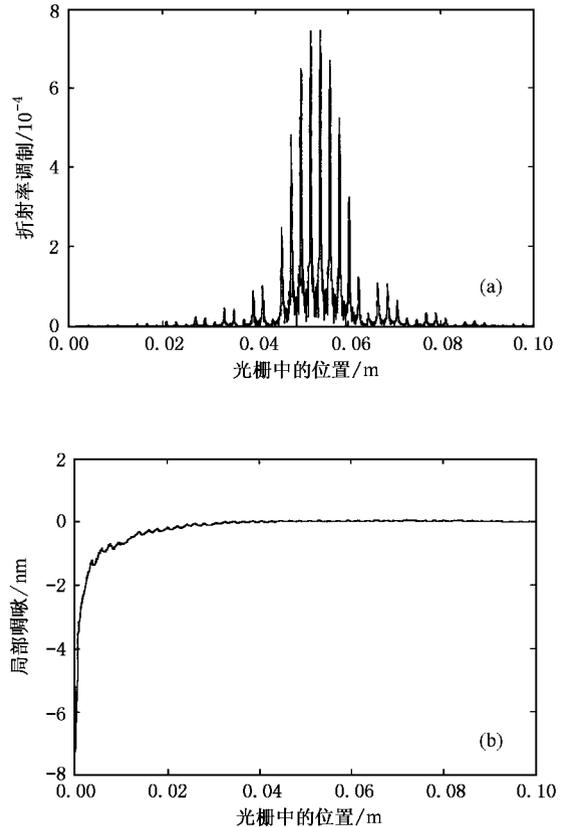


图 3 光栅结构 (a) 折射率调制随光栅位置的变化曲线 (b) 局部啁啾随光栅位置的变化曲线

5. SFBG 的制作方法

如图 3(a)所示,此光栅要求的最大折射率调制达 7.45×10^{-4} ,这可采用氢焰清洁法、光纤高掺杂法和高压载氢等方法提高光纤光敏性而实现,但切趾函数和啁啾形式的特殊性使这种超结构光纤 Bragg 光栅的制作还需要解决两个关键问题:一是非线性局部啁啾的实现,二是随位置变化的折射率调制度的调节和控制.为此,设计了如图 4 所示的制作方案.众所周知,如图 3(b)所示的复杂啁啾曲线,采用相位掩模板倾斜或光纤/模板抖动等方法都无法实现,但如图 4 所示,采用一种杨氏模量为熔融石

英光纤小 $1/10^4$ (仅为 $1\text{--}10\text{MPa}$) 的新型材料聚二甲
 基硅氧烷橡胶 (PDMS) 制作掩模板, 通过灵活设计沿
 光栅轴向变化的 PDMS 横截面, 采用扫描曝光技术,
 并在不同的扫描位置根据啁啾曲线的要求动态调节
 作用在 PDMS 掩模板上的拉力, 几乎可以制作任何
 啁啾形式的光纤 Bragg 光栅^[14]. 同样, 简单地采用加入
 振幅掩模板的方法也难以实现图 3 (a) 所示的折射
 率调制曲线, 图 4 中采用将相位掩模板法和逐点
 写入法相结合的扫描写入法^[15], 利用光致折射率变
 化 Δn 与曝光量 F 之间满足的关系式

$$\Delta n = AF^B, \quad (9)$$

其中 A, B 为取决于光纤材料和紫外光波长而与紫
 外光强无关的系数^[16], 通过计算机控制不同扫描位
 置的扫描速度和扫描时间, 按切趾函数要求根据 (9)
 式调控曝光量, 可以实现折射率调制度的调节和控
 制. 可见, 通过在不同的扫描位置分别控制作用在
 PDMS 掩模板上的拉力和控制扫描速度与时间, 以
 独立实现非线性局部啁啾和随位置变化的折射率调
 制度, 可在一定程度上降低工艺要求, 同时也提高了
 该方案的可行性和参考价值.

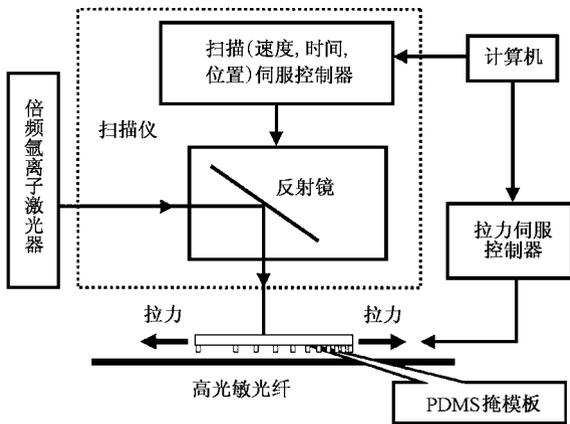


图 4 SFBG 制作装置示意图

6. 数值模拟分析

在实际制作光栅前, 通过数值模拟研究该方法
 设计 SFBG 的有效性是很有必要的. 这里根据设计
 出的耦合系数, 采用传输矩阵法分析 SFBG 的特
 征曲线并与物理可实现特征曲线进行比较. 图 5 (a)
 比较了 SFBG 反射率的数值模拟曲线和物理可
 实现曲线, 图 5 (b) 则比较了中心波长在 1550nm
 和 1550.4nm 处两反射峰带宽内群时延的数值模
 拟曲线和物理可实现曲线.

线和物理可实现曲线, 可知各数值模拟曲线与物
 理可实现曲线非常吻合. 图 6 (a) 给出了 1548—
 1551.5nm 范围内 SFBG 的群时延曲线, 在 8 个反
 射峰带宽内群时延曲线均为水平的, 且在同一高
 度, 说明此 SFBG 的 8 个信道均无色散. 图 6 (b)
 则进一步给出了 1550nm 和 1550.4nm 处反射峰
 带宽内群时延抖动, 抖动值介于 $-0.74\text{ps}\text{--}1.03\text{ps}$
 之间, 特征指标良好. 分析表明所设计的 SFBG
 完全达到各项设计指标要求, 且各信道性能一
 致性好, 信道间隔均匀, 可直接用作多波长激
 光器的波长选择器件.

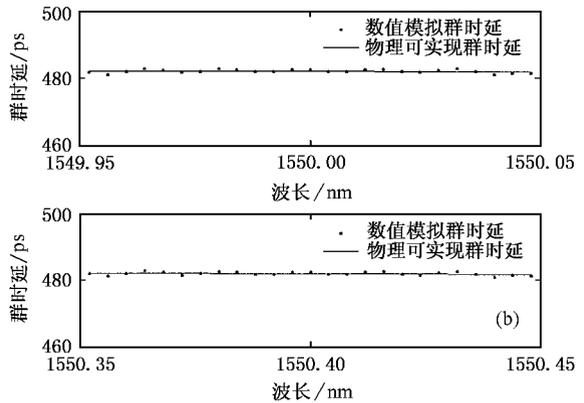
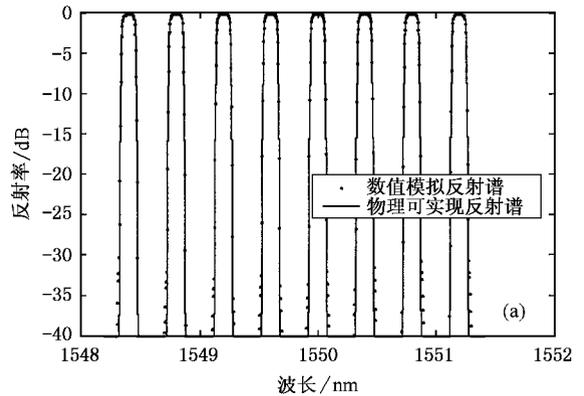


图 5 (a) 所设计光栅的数值模拟反射谱与物理可实现反射谱的
 比较 (b) 在 1550nm 和 1550.4nm 两反射峰带宽内, 所设计光栅的
 数值模拟群时延与物理可实现群时延的比较

7. 结 论

采用基于 LP 算法的 IS 光纤光栅设计技术, 通
 过改进整体加窗切趾法, 提出和运用各信道独立加
 窗切趾法, 设计出一种有别于取样光栅的高性能超
 结构光纤 Bragg 光栅梳状滤波器, 满足 ITU-T 所建
 议的 DWDM 光纤通信系统信道标准, 并达到以下各
 项

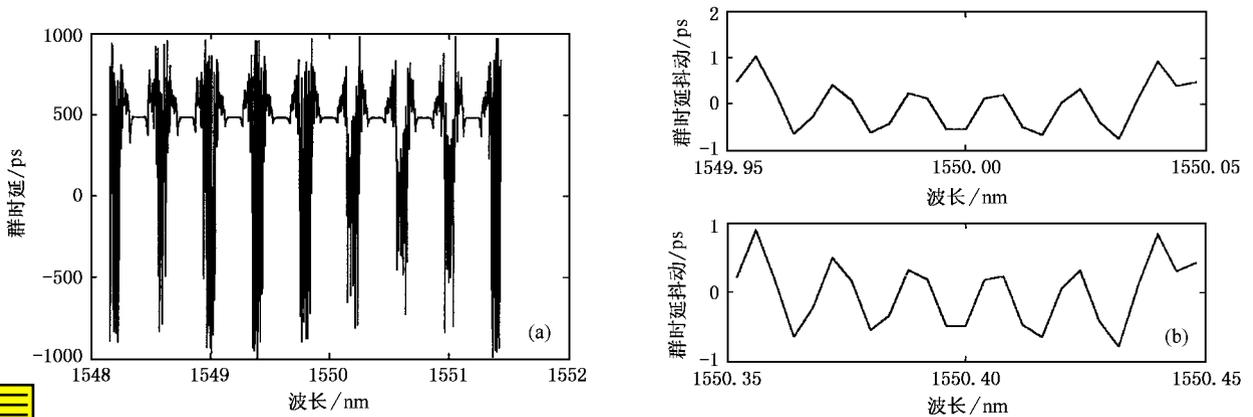


图 6 (a) 所设计光栅群时延随波长的变化 (b) 在 1550nm 和 1550.4nm 两反射峰带宽内, 所设计光栅群时延抖动随波长的变化

指标: 8 信道, 峰值反射率 0.95, 各反射峰等强度等间距 (0.4nm) 排列, -0.5dB 带宽 0.1nm, -30dB 带宽 0.15nm, 基本无色散, 可以很好地作为多波长光纤激光器的选频元件。同时应该指出, 这种超结构光纤 Bragg 光栅切趾函数和啁啾分布通常情况下富于变化, 制作存在一定的技术难度, 为此设计出了对非

线性局部啁啾和折射率调制度单独进行控制的制作方案, 可在一定程度上降低工艺要求。可以预计, 随着制作成本的下降, 制作工艺的提高, 这种峰值反射率高、峰值均匀、信道间隔满足 DWDM 系统要求、结构简单的高性能光纤 Bragg 光栅梳状滤波器在多波长光纤激光器以及光纤通信系统中将具有广泛应用。

- [1] Sun J Q *et al* 2000 *Chinese Journal of Lasers* **27** 773 (in Chinese)
[孙军强等 2000 中国激光 **27** 773]
- [2] Zhao D H *et al* 1998 *Acta Photonica Sinica* **27** 459 (in Chinese) [赵东晖等 1998 光子学报 **27** 459]
- [3] Chang-Seok Kim *et al* 2002 *OFC* **3** 242
- [4] Wang M G *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 609 (in Chinese) [王目光等 2003 物理学报 **52** 609]
- [5] Shu X W *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1731 (in Chinese) [舒学文等 2000 物理学报 **49** 1731]
- [6] Seung Kwan Kim *et al* 2001 *OFC* **3** WDD19-1
- [7] Zhang J S *et al* 2001 *Acta Electronica Sinica* **29** 698 (in Chinese)
[张劲松等 2001 电子学报 **29** 698]
- [8] Lu Q N *et al* 2002 *J. Optoelectronics Laser* **13** 926 (in Chinese) [吕

- 且妮等 2002 光电子·激光 **13** 926]
- [9] Liu Y *et al* 2002 *Acta Photonica Sinica* **31** 824 (in Chinese)
[刘 勇等 2002 光子学报 **31** 824]
- [10] Peral E *et al* 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 2078
- [11] Skaar J *et al* 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 165
- [12] Fedec R *et al* 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 1105
- [13] Xiao L Y *et al* 2003 *Study on Optical Communications* **115** 58 (in Chinese) [肖凌燕等 2003 光通信研究 **115** 58]
- [14] Lien V *et al* 2003 *IEEE Photo. Technol. Lett.* **15** 712
- [15] Li Y H *et al* 2001 *Semiconductor Optoelectronics* **22**(1) 15 (in Chinese) [李翔辉等 2001 半导体光电 **22**(1) 15]
- [16] Grubsky V *et al* 1999 *OFC/IOOC '99* **4** 21

A novel design methodology for superstructure fiber Bragg grating comb-filter

Cao Hui^{1,2)†} Sun Jun-Qiang¹⁾ Zhang Xing-Liang¹⁾ Xiao Ling-Yan³⁾ Huang De-Xiu¹⁾

¹⁾ (Department of Optoelectronics Engineering , Huazhong University of Science & Technology , Wuhan 430074 , China)

²⁾ (Department of Physics , Foshan University , Foshan 528000 , China)

³⁾ (Accelink Technologies Co. , Ltd. , Wuhan 430074 , China)

(Received 1 August 2003 ; revised manuscript received 2 January 2004)

Abstract

A novel superstructure fiber Bragg grating (SFBG) comb-filter for multi-wavelength laser is proposed. This SFBG is characterized by its single-grating structure , both refractive index modulation and local chirp abundant in variation , symmetrical reflection peaks , narrow bandwidth and standard channel spacing. Based on layer-peeling inverse scattering technique , adopting independent channel-by-channel apodizing-windowing method rather than integral apodizing-windowing procedure , the desired SFBG is figured out successfully. The fabrication techniques for this SFBG are discussed as well. Reflection spectrum , group time delay and group time delay ripple are analyzed by the method of transformation matrix. The results show that this SFBG satisfied all requirements of designing target. In DWDM optical fiber telecommunication systems , this novel SFBG is a promising candidate for the perfect high performance comb-filter used in multi-wavelength laser.

Keywords : superstructure fiber Bragg grating , grating design , comb-filter

PACC : 4281 , 4280C , 4280F