

一种新颖的取样光纤光栅振幅版的研制*

刘 艳† 李 彬 鲁韶华 许 鸥 任文华 王燕花 冯素春 简水生

(全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京交通大学, 北京 100044)

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2006 年 11 月 25 日收到, 2007 年 1 月 17 日收到修改稿)

提出了一种新颖的用于制作取样光纤光栅的取样振幅版的设计方案, 其特点是具有渐变的取样周期和不变的占空比, 利用这种振幅版可以简单灵活地制作出反射峰波长间隔不同的取样光栅梳状滤波器, 有利于提高取样光栅的制作灵活性并降低成本. 对这种方法可能存在的不足也进行了分析. 利用制作出的取样光栅, 基于全光纤结构实现了具有游标尺式波长调谐机理的可选波长光纤激光器.

关键词: 取样光纤光栅, 梳状滤波器, 可选波长光纤激光器, 振幅版

PACC: 4280S, 4280F, 4281D

1. 引 言

光纤光栅梳状滤波器是指基于光纤光栅制成的, 具有多个波长间隔相同并且性能接近的透射光谱或反射光谱的滤波器. 这种滤波器用途很广, 可以用于 DWDM 系统的复用、解复用^[1], 抑制放大器噪声^[2]以及激光器选频或辅助激光器产生多波长激光输出^[3, 4]等.

作为 DWDM 系统中的重要器件, 光纤光栅梳状滤波器已经有多种实现方案, 如利用光纤光栅构成 F-R (Fabry-Perot) 腔进而形成梳状光谱输出^[5], 但谱范围受到光栅带宽限制; 也可以在光纤 Sagnac 环中非对称地写入均匀光栅^[6, 7], 这种方法虽然成本低廉, 但制作出的梳状滤波器可用信道数不多, 而且各信道峰值反射率不高, 均衡度也不好; 以 sinc 函数对光栅的折射率调制进行取样^[8]也可以实现梳状光谱输出, 虽然该法可根据需要实现不同的信道数, 但由于在实现 sinc 函数折射率调制的过程中要多次实现相移, 而且相移的变化次数随着信道数的增加而线性增加, 对制作精度要求很高; 另外还有一种实现方法是在同一段光纤上进行多波长光栅的重复写入^[9, 10], 该法的缺点是能够实现的最大反射峰个数有限.

相比之下, 将均匀光纤光栅的折射率调制在空间上进行周期间隔的采样来获得取样光纤光栅是实现梳状滤波的一种较易实现的常用方法^[11]. 其优点是各反射峰之间波长间隔的均匀性好, 制作方法简单, 但缺点是各反射峰反射率的均衡度不好, 反射峰包络呈 sinc 函数分布. 因此制作时需对取样参数进行优化, 尽量提高反射峰值的均匀性, 并且在使用中扬长避短, 使其更好的发挥作用.

2. 取样光纤光栅的原理

根据耦合模理论, 当光栅的折射率调制较弱时, 光栅折射率调制分布的空间特性决定着光栅的光谱特性. 由于取样光栅的折射率调制相当于在正弦调制上叠加周期方波信号, 根据时域乘积与频域卷积的对应关系, 取样光栅的光谱特性就可以通过正弦调制在频域对应的冲激响应与周期方波信号包络为 sinc 函数的离散频谱进行卷积获得. 卷积结果中的每一个冲激响应函数对应着取样光栅的一个反射峰, 而反射峰的反射率将由正比于离散频谱分量幅度的耦合系数决定. 设取样光纤光栅的取样周期为 T , 在此周期内, 有效光栅长度为 dT , $T - dT$ 段内没有栅格, 为空白段. 如果未取样光栅的耦合系数为 κ_0 , 则相应于取样光栅第 n 个反射峰的耦合系数

* 国家自然科学基金(批准号: 60707007)资助的课题.

† E-mail: bjtyly@163.com

$\kappa(n)$ 为^[12]

$$\kappa(n) = \kappa_0 \frac{dT}{T} \frac{\sin(\pi \cdot n \cdot dT/T)}{\pi \cdot n \cdot dT/T} e^{-i\pi \cdot n \cdot dT/T} \quad (1)$$

$$r(\lambda) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{i\kappa^*(n) \sinh[q(n) \cdot L]}{q(n) \cosh[q(n) \cdot L] - i \cdot \alpha(n) \cdot \sinh[q(n) \cdot L]} \quad (2)$$

其中 $\alpha(n) = 2\pi \cdot n_{\text{eff}}/\lambda + i \cdot \alpha/2 - \pi/\Lambda - \pi \cdot n/T$, α 为功率损耗系数, n_{eff} 为有效折射率, n 为衍射级数, $[q(n)]^2 = [\alpha(n)]^2 - [\kappa(n)]^2$, Λ 为每小段光栅的折射率调制周期, L 为光栅的总长度.

则取样光栅的各反射峰具有如下特点:

1) 各反射峰之间的波长间隔相同, 为

$$\Delta\lambda_p = \lambda^2(2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot T) \quad (3)$$

因此取样光栅反射峰的波长间隔与取样周期 T 成反比.

2) 各反射峰峰值反射率的均衡度由反射峰的包络和光栅的交流折射率调制决定. 如果定义占空比 $r_z = dT/T$, 根据(1)式可知, 取样光栅反射峰的总包络呈 sinc 函数分布, 包络第一级零点决定的主包络内反射峰的个数为 $N_m = \text{Int}(T/dT)$, $\text{Int}(\ast)$ 表示取整, 则取样光栅主包络中反射峰的个数与取样占空比成反比, 即占空比越小, 取样光栅主包络内反射峰数量越多, 各反射峰峰值反射率的均衡度越好. 而在占空比相同的条件下, 更大的交流折射率调制将有助于光栅反射率的饱和, 也使取样光栅反射率峰值的均衡度更好.

3. 新型取样振幅版的设计

取样光纤光栅的制作方法有两种, 一种是在利用相位掩模版制作光栅时, 使激光脉冲对光纤进行间歇性扫描^[13], 由于需要对很多参量进行实时控制, 此法实现难度较高, 重复性不好. 还有一种广为

使用的取样光栅的总光谱特性可以由各谱分量对光栅特性的贡献相加而得

使用的方法是在相位掩模版前面放置一块能够对激光光强进行周期性遮挡的取样振幅版, 其中取样振幅版呈现出均匀的梳状条纹结构, 其条纹周期即为光栅的取样周期. 但是由于取样光纤光栅的各种应用领域经常需要用到具有不同峰值间隔的光栅, 采用这种方法来制作取样光栅时, 每种峰值间隔的光栅都必须由相应取样周期的振幅版来制作, 这种一对一的制作方法所带来的高成本是不言而喻的.

针对以上问题, 我们提出了一种取样周期渐变而取样占空比不变的取样振幅版的设计方案, 配合高度可调装置来调节振幅版的透光位置, 利用一块这种振幅版就可以方便地制作出具有不同峰值间隔的取样光栅, 并且同时保持光栅的总反射包络特性不变, 其平面结构如图1所示, 图中阴影部分表示透光区域, 版上其余部分不透光.

根据(3)式可知, 取样光栅反射峰的波长间隔由振幅版的取样周期决定, 因此改变取样振幅版梳状条纹周期就可以改变取样光栅的反射峰波长间隔, 同时如果使条纹宽度也以等比例的方式渐变, 则在制作光栅时选取振幅版的不同位置进行曝光, 就可以对光栅以不同周期进行取样, 并保持取样占空比不变, 这就是这种取样振幅版的设计原则. 设该取样振幅版在条纹区的上边沿处取得的最大取样周期为 T_1 , 透光区域宽 dT_1 (透光区域宽度相当于一个取样周期内的有效光栅长度), 在下边沿处取得的最小取样周期为 T_2 , 透光区域宽 dT_2 , 参数之间满足如下关系 $dT_1/T_1 = dT_2/T_2$.

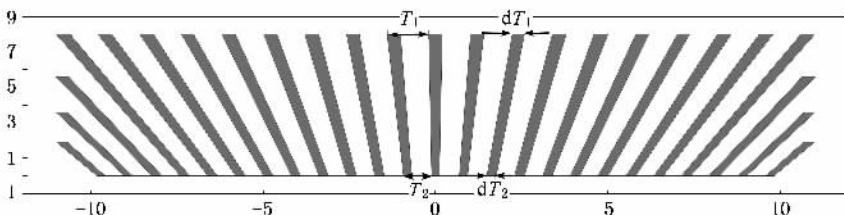


图1 取样周期可变而占空比不变的取样振幅版的示意图(阴影部分表示透光区域)

下面说明这种取样振幅版的设计方法.

可以将图1中梳状条纹分为条纹内边沿与外边

沿两部分(设每条透光条纹靠近中心的边为内边沿,远离中心的边为外边沿)。首先来考虑各条纹外边沿的确定。由于条纹区呈轴对称分布,所以只需考虑其中心轴单侧部分即可,此时可获得条纹的外边沿分布如图 2 所示。设条纹区高度为 H , 长度为 L 。定义从中心轴线到条纹区右边沿的斜线依次为第 1 级, 第 2 级, ..., 第 n 级。第 1 级斜线两顶点到上下边沿原点 O_H 和 O 的距离分别为振幅版上下边沿处条纹

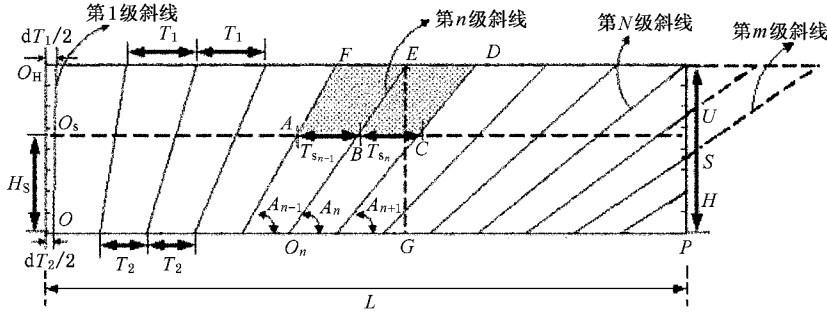


图 2 取样振幅版梳状条纹外边沿的分布图

根据刚才的斜线确定方法可知,除第 1 级斜线外,各级斜线在条纹区域上边沿和下边沿分割出的线段长度是相等的。如果截取其中某高度作水平线,则可以证明各条斜线在该水平线上分割出的线段长度也是相等的,过程如下。

设距离条纹区下边沿高度为 H_s 的水平线与中心轴线的交点为 O_s , 而第 $n-1, n, n+1$ 级斜线与该水平线的交点分别为 A, B, C , 与条纹区上边沿的交点分别为 F, E, D 。则第 $n-1$ 级斜线和第 n 级斜线在高度为 H_s 的水平线上分割点的间距 $T_{s_{n-1}} = AB$, 而第 n 级斜线和第 $n+1$ 级斜线分割点间距 $T_{s_n} = BC$ 。定义 $\Delta T = T_1 - T_2, \Delta dT = dT_1 - dT_2$, 则第 1 级、第 2 级以及第 n 级斜线与水平方向夹角 A_1, A_2 与 A_n 的正切分别为

$$\begin{aligned} \tan(A_1) &= H(\Delta dT/2), \\ \tan(A_2) &= H(\Delta T + \Delta dT/2), \\ &\dots \\ \tan(A_n) &= H(n-1) \cdot \Delta T + \Delta dT/2. \end{aligned} \quad (4)$$

因此可以获得 A, B, C 与 O_s 之间的间距为

$$\begin{aligned} O_s A &= (n-1) \cdot T_2 + dT_2/2 + H_s/\tan(A_{n-1}), \\ O_s B &= (n) \cdot T_2 + dT_2/2 + H_s/\tan(A_n), \\ O_s C &= (n+1) \cdot T_2 + dT_2/2 + H_s/\tan(A_{n+1}). \end{aligned} \quad (5)$$

进一步结合(4)式可得

半宽度 $dT_1/2$ 和 $dT_2/2$, 而第 2 级斜线上顶点到第 1 级斜线上顶点的距离为 T_1 , 下顶点距离第 1 级斜线下顶点 T_2 , 以下依次类推。为了保证利用振幅版不同高度写入光栅时的长度保持一致,取样振幅版条纹区域的形状设计为矩形, N 为与条纹区域上边沿有交点的最后一级斜线($N = \text{abs}[(L - dT_1/2)/T_1]$), 当 $n < N$ 时,其余 n 级斜线的确定方法皆同于此, $n > N$ 时斜线的确定方法将在后面说明。

$$\begin{aligned} T_{s_{n-1}} &= O_s B - O_s A = T_2 + H_s/\tan(A_n) \\ &\quad - H_s/\tan(A_{n-1}) = T_2 + \Delta T \cdot H_s/H, \\ T_{s_n} &= O_s C - O_s B = T_2 + H_s/\tan(A_{n+1}) \\ &\quad - H_s/\tan(A_n) = T_2 + \Delta T \cdot H_s/H. \end{aligned} \quad (6)$$

因此 $T_{s_{n-1}} = T_{s_n}$ 。

以上证明过程中 n 及 H_s 取值的任意性决定了以此方法设计出的条纹在任意高度水平线上分割出的各线段长度相等,所以由此分割线段长度决定的取样振幅版的取样周期在任意高度水平线上是均匀的,可以实现对紫外光的周期性遮挡。

当斜线的级次超过 N 时,邻近两级斜线下顶点的横向间距仍为 T_2 , 其延长线与上边沿延长线交点之间的横向间距仍为 T_1 , 所以各斜线之间的关系与级次小于 N 时相同。但由于斜线与条纹区域的右侧边相交,因此其上顶点的位置需由该斜线与条纹区域右侧边的交点坐标(如图 2 中的 U 和 S 点)来确定。

利用相关的几何分析方法并综合以上分析可以获得各条纹边沿的坐标如下(把各级斜线上下顶点分别向中心平移 dT_1 和 dT_2 距离就可以获得条纹的内边沿,因为 $dT_1/T_1 = dT_2/T_2$ 构成内边沿的各斜线之间与构成外边沿的斜线之间也具有相同的关系,因此各高度所对应的取样占空比也是相等的),

当 $n < N$ 时, 条纹外边沿的上、下顶点坐标分别为

$$[x_n, H][x'_n, O],$$

其中

$$x_n = dT_1/2 + (n-1) \cdot T_1,$$

$$x'_n = dT_2/2 + (n-1) \cdot T_2,$$

条纹内边沿上、下顶点的坐标分别为

$$[x_n - dT_1, H][x'_n - dT_2, O].$$

当 $n \geq N$ 时, 条纹外边沿上、下顶点的坐标分别为

$$[L, h_n][x'_n, O],$$

条纹内边沿上、下顶点的坐标分别为

$$[L - T_n \cdot dT_1/T_1, h_n][x'_n - dT_2, O].$$

根据实际需求以及光栅制作系统的特点, 确定出振幅版中条纹的最大、最小取样周期 T_1, T_2 以及取样占空比后, 就可以根据以上顶点坐标公式计算出条纹边沿的顶点坐标, 进而制作出如图 1 所示的取样周期渐变而占空比不变的取样振幅版。

该取样振幅版任意高度对应的取样周期可以通过任意相邻的两级斜线来确定, 例如以第一、二级斜线来确定高度为 H_s 位置的取样周期为

$$T = H_s / \tan(A_2) + T_2 - H_s / \tan(A_1). \quad (7)$$

从以上分析可以看出, 这种振幅版中条纹区域的不同高度对应着不同的条纹周期, 因此在制作不同光栅时利用这种振幅版的不同高度进行曝光就可以获得不同的取样周期, 进而方便地制作出具有多种波长间隔的取样光纤光栅, 为取样光纤光栅的制作带来极大的灵活性。

但该振幅版的设计方案中条纹从中心向两侧的逐渐倾斜(理想情况下, 条纹方向应垂直于光纤轴向)是否会影响光栅质量是一个值得考虑的问题, 我们认为这种影响是比较小的, 理由如下: 首先, 利用这种振幅版制作出的光栅不存在闪耀问题, 因为闪耀光栅的主要特点是折射率栅格与光纤轴向不垂直, 而此法中相位掩模版的条纹仍与光纤轴向垂直, 振幅版的条纹倾斜只导致了光纤上的每个曝光区域的形状由通常的矩形变为近似平行四边形, 可以等效地认为是每个曝光区域两侧的光强弱于中心部分, 对取样光栅反射峰包络形状略有影响, 而对单个光栅反射峰的影响很小; 其次, 为了提高激光能量的利用率, 多数光栅写入系统都会对光源光斑在垂直于光纤的方向上进行压缩, 此方向上的光斑宽度越小, 利用这种振幅版获得的曝光包络将越接近理想矩形, 条纹倾斜的影响也越小。例如在我们的光栅写

入系统中(采用 Tuilaser 公司 Bragg Star 200 KrF 准分子激光器), 光斑在光纤处垂直于光纤轴向上的宽度只有 0.4 mm 左右, 比光纤外径略宽一些, 在这种系统中条纹的倾斜对光栅性能的影响很小。再次, 通过对取样振幅版条纹区域长度和宽度的调整可以减小条纹的最大倾角, 从而进一步降低条纹倾斜的影响。因为若保持条纹区高度和取样周期可变幅度(即条纹区域上下边沿处的最大周期与最小周期的差值)不变, 条纹的最大倾角将随着光栅长度(决定着取样版条纹区的总长度)的减小而减小, 若保持条纹区长度和取样周期可变幅度不变, 最大条纹倾角随着条纹区高度的增大而减小。

4. 利用新型取样振幅版制作取样光纤光栅

根据上述设计方法, 我们利用线切割工艺制作了取样周期渐变的振幅版, 材料是 3 mm 厚的钢板, 其条纹区域长 60 mm 高 8 mm, $T_1 = 1.40$ mm, $T_2 =$

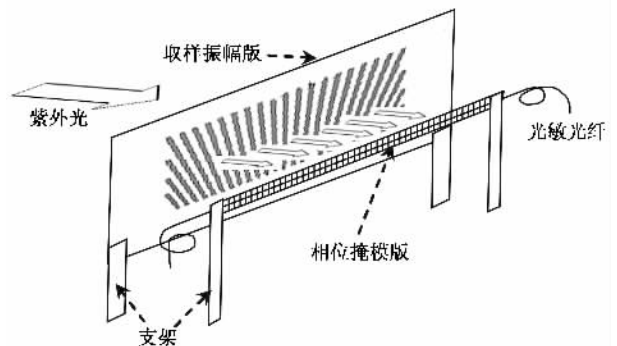


图 3 利用新型取样振幅版制作光栅的装置示意图

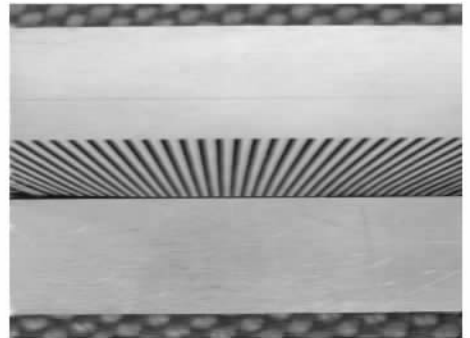


图 4 取样振幅版实物照片

0.81 mm, 占空比为 33%。利用这种取样振幅版制作光栅的装置示意图如图 3 所示, 振幅版实物照片如

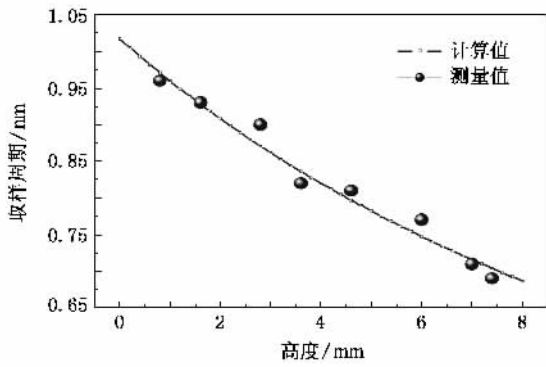


图 5 取样振幅版不同高度对应取样周期的理论计算值与实验结果的对比

图 4 所示,将取样振幅版竖立放于高度可微调的支架上,使取样振幅版中心条纹取样周期渐变的方向垂直于光纤轴向,通过调节支架高度,令紫外光从振幅版的不同高度入射,则可以制作出具有不同反射峰波长间隔的取样光纤光栅.振幅版不同高度对应取样周期的理论计算值与根据实测光栅反射峰波长间隔反推出的取样周期的对比示于图 5 中,可以看出实验结果与理论计算结果非常相符.三个具有不同波长间隔的取样光纤光栅的反射谱如图 6 所示(目前只试制了一块这种振幅版,根据实验结果可以预见,通过进一步降低占空比,并且增加振幅版的长度,能够制作出反射峰值均衡度更好的取样光栅).

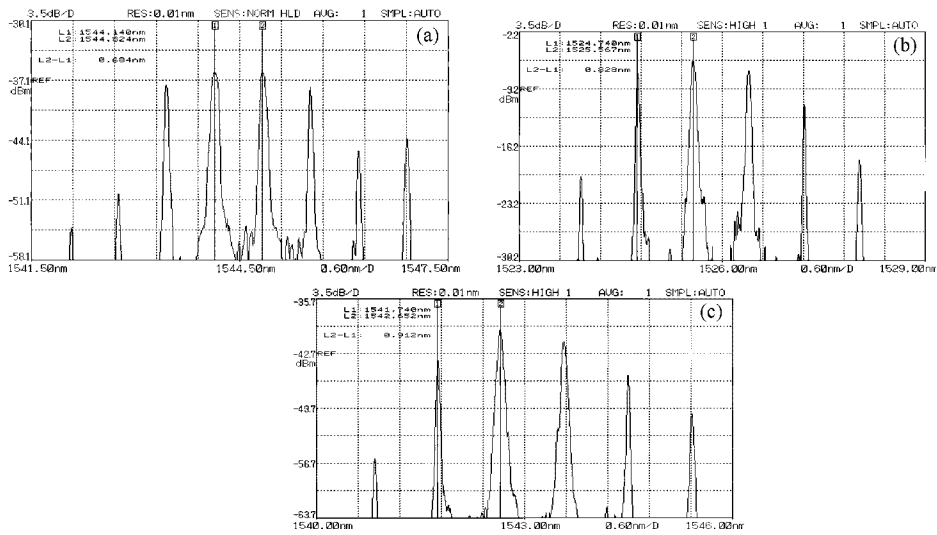


图 6 利用新型振幅版不同位置制作出的反射峰波长间隔不同的取样光栅波长间隔 (a) 0.68 nm (b) 0.82 nm (c) 0.91 nm

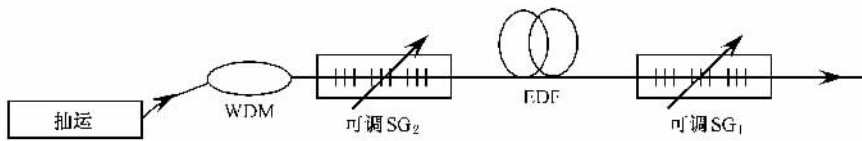


图 7 可选波长光纤激光器的结构示意图(WDM 为合波器,SG 为取样光栅,EDF 为掺铒光纤)

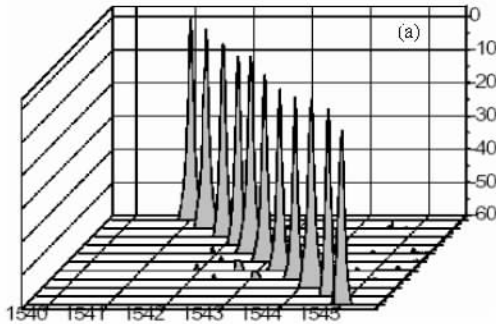
5. 取样光纤光栅梳状滤波器在可选波长激光器中的应用

借鉴了具有游标尺式波长调谐机理的半导体分布布拉格反射式(DBR)激光器的结构^[12,14],我们利用制作出的取样光纤光栅梳状滤波器实现了可选波长光纤激光器.



激光器的结构如图 7 所示,其中的有源介质为 7 m 掺铒光纤(FiberCore 公司).激光器的前后反射镜为两个取样光栅,其中前镜光栅 SG₂ 的反射谱如图 6(a)所示,后镜光栅的反射峰波长间隔为 0.4 nm.利用三角形悬臂梁对两光栅进行波长的无啁啾调谐^[15,16],使激光器以波长从小到大的顺序分别输出激光,获得激光器的输出光谱特性如图 8(a)所示,其中三个波长激光的对比图如图 8(b)所示.

从激光器的光谱特性可以看出,尽管取样光纤光栅的反射谱平坦度不够好,但采用这种调谐机理后,可选波长激光器所获得的各波长激光功率的平坦度比较好,证明了这种选频机理的一个优点是对



作为反射腔镜的光栅梳状滤波器的反射率均衡度的要求不高,所有波长输出激光的边模抑制比都大于 50 dB,波长符合 ITU-T 标准,波长间隔为 0.4 nm,光谱仪测得激光输出的 1 dB 带宽约为 0.02 nm.

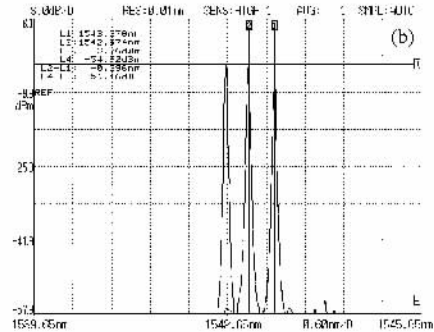


图 8 (a)可选波长光纤激光器的波长可选输出光谱特性;(b)其中三个波长激光的特性

6. 结 论

提出了一种新颖的取样振幅版的设计方法,有利于提高取样光纤光栅制作的灵活性,并降低成本.利用制作出的取样光纤光栅制作了具有游标尺式波长调谐机理的可选波长激光器,获得了很好的激光输出.

除以上应用之外,如果把上述振幅版与高度可编程控制的装置配合起来使用,在光栅制作过程中

采用程控方式对振幅版与光纤之间的相对高度进行实时控制,则由于振幅版所具有的渐变取样周期,将可以制作出取样周期沿光纤轴向具有某种函数变化关系的取样光纤光栅,如轴向取样周期渐变的取样光栅.这种取样方式可以实现取样光栅等效啁啾的变化^[17,18],是一种利用均匀相位掩模版制作色散斜率补偿的取样光纤光栅的新方法.但这种特殊结构取样光纤光栅的应用由于制作方法的不成熟受到了很大限制.上述新型取样振幅版设计方案的提出很有希望推动特殊结构取样光纤光栅制作技术的发展.

- [1] Mizuochi T, Kitayama T, Shimizu K, Ito K 1998 *IEEE Journal of Lightwave Tech.* **16** 265
- [2] Hwang K, Yu S 1998 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **10** 1437
- [3] Chow J, Town G, Eggleton B, Ibsen M, Sugden K, Bennion I 1996 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **8** 179
- [4] Zhang X L, Zhang Y, Sun J Q, Liu D M, Huang D X 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2159 (in Chinese) [张新亮、张颖、孙军强、刘德明、黄德修 2003 *物理学报* **52** 2159]
- [5] Town G E, Sugden K, Williams J A R, Bennion I, Poole S B 1995 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **7** 78
- [6] Shu X W, Jiang S, Huang D X 2000 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **12** 980
- [7] Shu X W, Huang D X, Deng G H, Shi W, Jiang S 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1731 (in Chinese) [舒学文、黄德修、邓桂华、施伟、江山 2000 *物理学报* **49** 1731]
- [8] Ibsen M, Durkin M K, Cole M J, Lamming R I 1998 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **10** 842
- [9] Othonos A, Lee X, Measures R M 1994 *Electron. Lett.* **30** 1972
- [10] Cao H, Sun J Q, Zhang X L, Xiao L Y, Huang D X 2004 *Acta*

Phys. Sin. **53** 3077 (in Chinese) [曹辉、孙军强、张新亮、肖凌燕、黄德修 2004 *物理学报* **53** 3077]

- [11] Raman K 1999 *Fiber Bragg Gratings* (San Diego, CA : Academic Press)
- [12] Jayaraman V, Mathur V, Coldren L A, Dapkus P D 1993 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **5** 489
- [13] Eggleton B J, Krug P A, Poladian L, Quелlette F 1994 *Electron. Lett.* **30** 1620
- [14] Mason B, Barton J, Fish G A, Coldren L A, Denbaars S P 2000 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **12** 762
- [15] Yu Y L, Tam H, Geng S W, Suleyman M, Demokan, Liu Z G, Chung W 1999 *Jpn J. Applied Phys.* **38** L1032
- [16] Yu Y L, Liu Z G, Dong X Y, Sheng Q Q, Geng S W 1999 *Acta Opt. Sin.* **19** 873 (in Chinese) [余有龙、刘治国、董孝义、盛秋琴、耿淑伟 1999 *光学学报* **19** 873]
- [17] Feng J, Chen X F, Fan C C, Xie S Z 2002 *Optics Communications* **205** 71
- [18] Loh W H, Zhou F Q, Pan J J 1999 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **11** 1280

A novel method for fabricating sampled fiber grating amplitude mask^{*}

Liu Yan[†] Li Bin Lu Shao-Hua Xu Ou Ren Wen-Hua Wang Yan-Hua Feng Su-Chun Jian Shui-Sheng

(Key Lab of Au Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 ,China)

(Institute of Lightwave Technology , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 ,China)

(Received 25 November 2006 ; revised manuscript received 17 January 2007)

Abstract

A novel method for fabricating sampled amplitude mask is presented , the feature of which is the varying sampling period and fixed sampling duty ratio. By using such an amplitude mask , sampled fiber gratings with different wavelength spacings of reflectivity peaks can be easily fabricated. So the novel method has the advantages of reduced fabrication cost and improved versatility of sampled grating. The possible disadvantages of the method are also discussed. Wavelength selectable fiber laser with vernier wavelength tuning mechanism is also demonstrated by the sampled fiber grating.

Keywords : sampled fiber grating , comb filter , wavelength selectable fiber laser , amplitude mask

PACC : 4280S , 4280F , 4281D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.60707007).

[†] E-mail :bjtuly@163.com