

光纤光栅应用于梳状滤波器和光分插复用器(OADM)的研究^①

朱丹丹^② 王中军 陶李欣 李莎胡林

(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

摘要 研究了光纤光栅在梳状滤波器和光分插复用器(OADM)中的应用特性。基于传输矩阵法对 Sinc 取样光栅反射谱进行分析,分析了取样光栅长度、折射率调制深度和取样周期等光栅参数对 Sinc 取样光栅反射谱的影响规律。根据各参数对 Sinc 取样光栅反射谱的影响规律构造了 4 种反射率高、反射峰间隔均匀及谱宽稳定的 Sinc 取样光栅梳状滤波器,为梳状滤波器的设计与制作提供了新思路、新技术。用 OptiSystem 软件对光纤 Bragg 光栅型光分插复用器进行了仿真研究。研究表明,经过光纤光栅光分插复用器后,下载和除了下载的光谱峰值基本为 -4dBm,下载的功率也基本是均衡的。

关键词 Sinc 取样光栅,梳状滤波器,传输矩阵法,光纤 Bragg 光栅,光分插复用器(OADM)

0 引言

取样光栅(sampled grating)是一种新型的光纤光栅,具有反射率高、反射峰均匀、反射峰间隔稳定的优点,它在光电子以及光纤通信领域有着许多重要的用途,已经引起了广泛的研究兴趣^[1-3]。1998 年提出的 sinc 取样函数克服了矩形取样函数的弱点,因而可以获得具有良好通道均匀性的取样光纤光栅^[4,5]。光学梳状滤波器(comb filter)是具有多个间隔相同且性能相同的反射式或透射式的光信号通路的元件。它有谱宽较窄、反射峰间隔稳定、反射率高以及反射峰均匀的优点,且具有与偏振无关、易全光集成、低损耗和易耦合等特点。由于具有这些特殊的光谱特性,梳状滤波器目前已成为光通信和光电子领域的重要元器件。密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)技术研究的发展方向是通过减小信道间隔来达到增加信道数的目的,而信道间隔的减小使对复用器/解复用器性能的要求更加严格,从而导致了复用器/解复用器工艺难度加大,而利用梳状滤波器就能解决提高通

信容量和压缩信道间隔的难题。光分插复用器(optical add-drop multiplexer, OADM)由于是全光器件构成,可透明传输各种接入方式的数据,在光域上实现信息流的选路、交换、传输和故障恢复等功能,一方面能提高网络信号上下载的灵活性,另一方面也增加了整个网络的可控性和生存性,在光通信系统中有着举足轻重的地位。随着全光通信网的迅速发展,OADM 作为波分复用系统光网络的关键器件之一,一直是国内外广泛关注的焦点。其中基于光纤光栅的 OADM 因其插入损耗低、结构简单和与偏振无关等特点,在未来的光传送网中将会有广阔的应用前景^[6,7]。上述分析促成和推动了这项研究。本文重点研究了光纤光栅在梳状滤波器和光分插复用器(OADM)中的应用特性,在此基础上给出了 Sinc 取样光栅型梳状滤波器的设计,以及用 OptiSystem 软件仿真研究光纤光栅型 OADM 的结果。

1 Sinc 取样光栅理论

Sinc 函数取样光栅的反射谱为矩形函数,所以

^① 河北省自然科学基金(F2014203157)和河北省博士后基金(B2014003012)资助项目。

^② 女,1978 年生,博士,副教授;研究方向:光电检测,光纤通信及光学传感器的研究;联系人,E-mail: zhudandan1896@126.com
(收稿日期:2014-10-11)

可以用 Sinc 函数对均匀型光纤光栅的折射率分布函数 $\Delta n(x)$ 进行取样调制,使其反射谱中的各个反射峰值的反射率变化均匀,与此同时也消除了取样光栅反射谱的旁瓣,并能够选择光谱的信道数目。

Sinc 取样光栅的取样函数如下:

$$S(z) = \frac{\sin\left(N_c \cdot \frac{L}{p} \cdot \pi \cdot (z + \frac{p}{2L})\right)}{N_c \sin\left(\frac{L}{p} \cdot \pi \cdot (z + \frac{p}{2L})\right)}, 0 \leq z \leq L \quad (1)$$

式中, L 为光栅总长度, p 为取样周期, N_c 为信道的数目。从式(1)可以看出,Sinc 取样函数中存在着符号的变化,这可以通过在相邻的折射率包络间插入 π 相移来实现。由此可见,Sinc 取样函数并不是真正意义上的振幅取样光栅。

对于 Sinc 取样光栅用逐段均匀的方法把它分成若干段,然后把每一小段看成是均匀光栅,对于每一段建立一个 2×2 的传输矩阵。接着把各段传输矩阵相乘,就可以得到描述整个非均匀光纤光栅的传输矩阵。即

$$M \leq 2n_{\text{eff}}l/\lambda_B \quad (2)$$

每一段都可以看成是一段均匀光纤光栅,它的传输矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} \frac{e^{iqa} - r^2 e^{-iqa}}{1 - r^2} & \frac{r(e^{-iqa} - e^{iqa})}{1 - r^2} \\ \frac{r(e^{iqa} - e^{-iqa})}{1 - r^2} & \frac{e^{-iqa} - r^2 e^{iqa}}{1 - r^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $q = \pm i[k^2 - (\Delta\beta)^2]^{\frac{1}{2}}$, $r = (q - \Delta\beta)/k$, $k = \pi \overline{\Delta n}/\lambda_B$ 是光栅的耦合系数, $\Delta\beta = \beta - \pi/\Lambda + 2\pi \overline{\Delta n}/\lambda_B$, $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 为光栅的传播常数, λ 为入射光波波长, λ_B 为 Bragg 中心反射波长。

在 Sinc 取样光栅中它的一个周期中有 3 个 π 相移的点。在矩阵计算时, π 相移的影响用传输矩阵表示为

$$N = \begin{bmatrix} e^{-i\pi} & 0 \\ 0 & e^{i\pi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

以 $N = 4$ 的 Sinc 取样光栅为例如将一个周期的光纤光栅分为 K 份,再加上产生 π 相移的 3 个点,一共需要 $K + 3$ 个传输矩阵。将这 $K + 3$ 个传输矩阵相乘,就可以得到这一个周期的光纤光栅总的传

输矩阵在每一段中传输的矩阵,用下式表示:

$$F = F_{K+3} \cdot F_{K+2} F_{K+1} \cdots F_2 F_1 \quad (5)$$

假设整个长度的光纤光栅共有 N 个周期的长度,那么整个光纤光栅的传输矩阵可以表示为

$$S = F^N \quad (6)$$

因此,对于经过 N 个周期后,即整个光纤光栅后的传输模式复振幅,下述关系式成立:

$$\begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

即:

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = S^{-1} \begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} \quad (8)$$

在没有其它入射光的情况下,反向传输模式 B_0 仅为前向传输模式 A_0 的反射光,而由边界条件可以知道, $Z = L$ 上时, $B_N = 0$, 所以取样光栅反射率函数可写为

$$R = |r^2| = |A_0/B_0|^2 \quad (9)$$

与矩形取样光栅相比,Sinc 取样光栅反射谱的各个峰值的功率要均衡得多。调制率最大值之间的间隔 p 的变化同样影响 Sinc 取样光栅的各个峰值之间的间隔,且仍满足方程式 $\Delta\lambda = \lambda_B^2/(2n_{\text{eff}}p)$ 随着 p 的增加反射率减小。随着取样光栅周期数 N 的增大,Sinc 取样光栅的反射率在减小,但其对峰值之间的间隔没有影响。Sinc 的各个反射峰之间的间隔是严格一致的。

2 Sinc 取样光栅梳状滤波器设计

通过调节各参数观察各参数对 Sinc 取样光栅反射谱的影响,Optigrating 仿真界面如图 1 和图 2 所示。在图 1 界面上设置取样光栅的取样函数为 Sinc 取样,Average 为 uniform,Period 设置为 no chirp,Apodizatic 设置为 uniform,折射率调制量为仿真分析时 δn_{eff} 的值,Length 为曝光区的长度。非曝光区长度设置界面如图 2 所示。曝光区长度与非曝光区长度之和为取样周期 p 。曝光区长度与取样周期 p 的比值为采样率 T 。

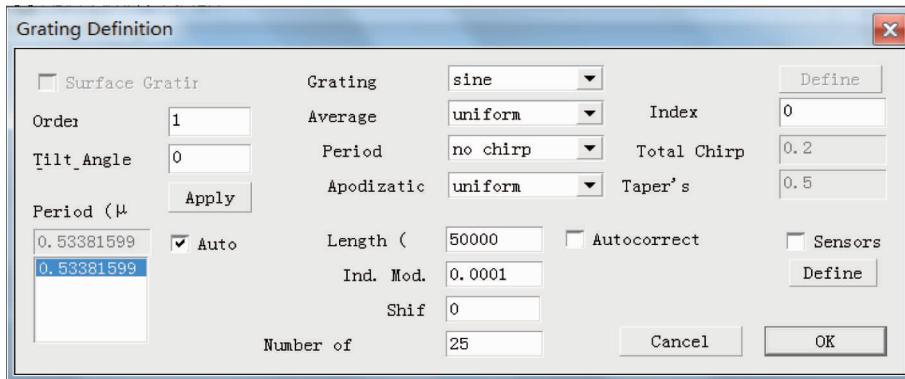


图 1 曝光区设置界面

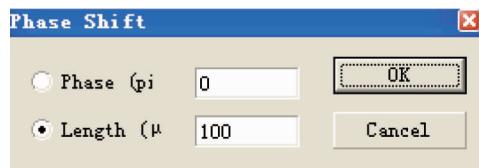
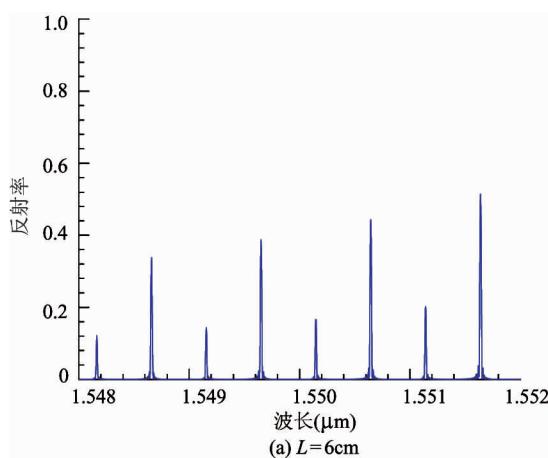
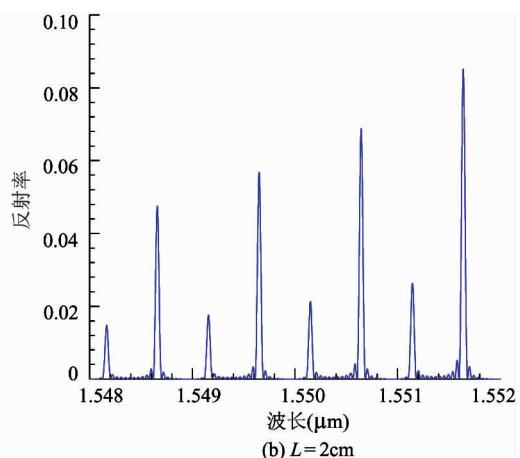


图 2 非曝光区长度设置界面

首先分析取样光栅长度 L 对 Sinc 取样光栅反射谱的影响。在图 3 中, 取样光栅参数为: 折射率调制量 $\delta n_{\text{eff}} = 0.0005$, 采样率 $T = 0.5$, 取样周期

$p = 1660 \mu\text{m}$ 。从图 3 可以看出, 随着 Sinc 取样光栅总长度 L 的减小, 反射谱中反射峰的反射率减小, 反射峰的均匀性降低; 反射峰的宽度随之增加; 反射谱的旁瓣干扰减少; 反射谱的反射峰的间隔不发生变化。

分析取样周期 p 对 Sinc 取样光栅反射谱的影响, 得出如下规律: 随着取样周期 p 的减小, 反射谱的反射率减少; 反射谱的信道间隔逐渐增大, 即取样周期 p 与信道间隔 $\Delta\lambda$ 成反比。

(a) $L=6\text{cm}$ (b) $L=2\text{cm}$ 图 3 光栅长度 L 对 Sinc 取样光栅反射谱的影响

折射率调制量对 Sinc 取样光栅反射谱影响规律如下: 随着 Sinc 取样光栅折射率调制量 δn_{eff} 的减小, 取样光栅的反射率减小, 反射谱的带宽逐渐变小, 光谱的旁瓣干扰也随之减少。根据各参数对 Sinc 取样光栅反射谱的影响调试得到的梳状滤波器如图 4 所示。 L 为 Sinc 取样光栅长度, δn_{eff} 为折射率调制量。 p 为 Sinc 取样光栅周期。

图 4 中的这 4 组 sinc 取样光栅滤波器的带宽及带通间隔均匀, 并且滤波器的反射率高且接近于 1, 而且在图中可以清楚的看出滤波器的干扰也十分的少。这种梳状滤波器可应用于波分复用/解复用系统中, 同时输出或解复用多个不同波长的信号, 以及可用于分插复用器中, 具有良好的传导性能, 对光纤通信的发展有着巨大的意义和影响。

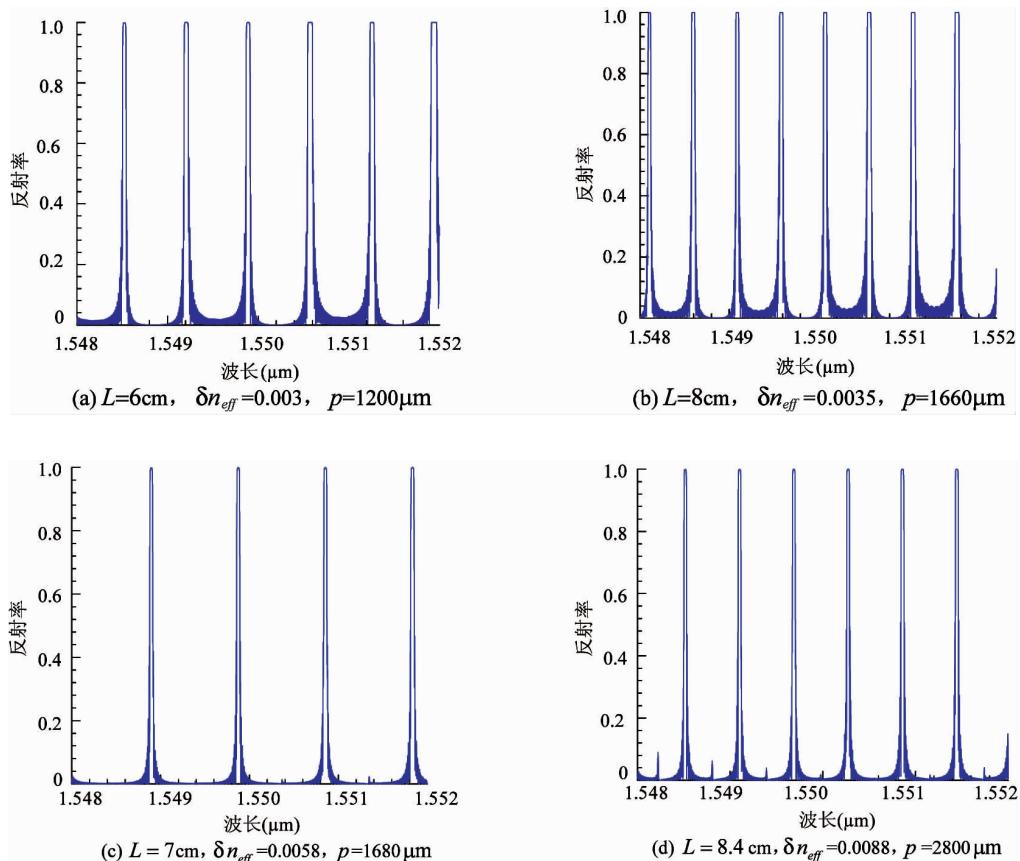


图 4 Sinc 取样光栅梳状滤波器

3 光纤光栅在光分插复用器中的应用特性研究

仿真波分复用(WDM)系统如图 5 所示。整个

系统由光发射机、光纤光栅、环形器等组成,光发射机功率为 0dBm,产生的信号源的频率以 200GHz 为间隔,分别为 192.8THz、193.0THz、193.2THz、193.4THz、193.6THz、193.8THz、194.0THz、194.2THz,

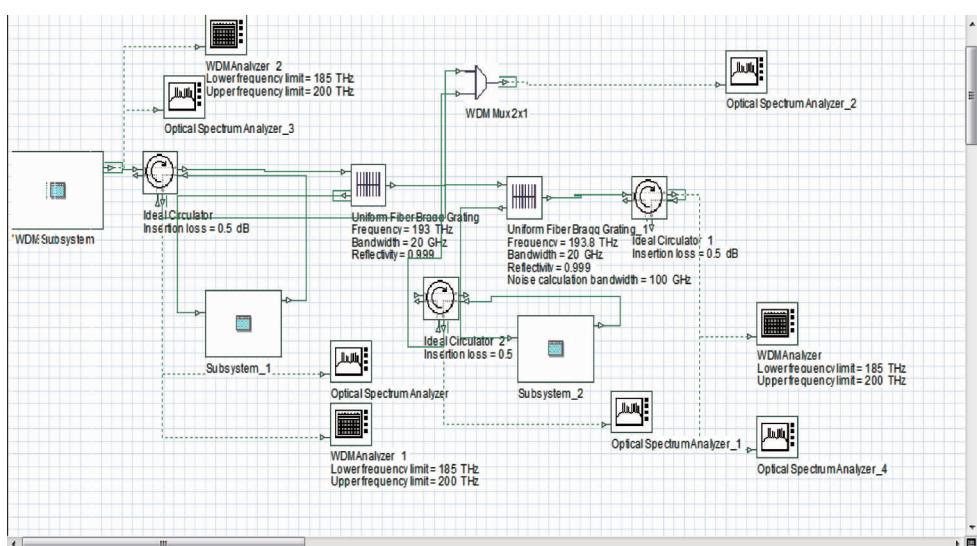


图 5 仿真波分复用(WDM)系统

对应的波长分别为 1554.9nm、1553.3nm、1551.7nm、1550.1nm、1548.5nm、1546.9nm、1545.3nm、1543.7nm。各路信道传输速率均为标准的 10Gbps。

图 5 中, 波分复用器(WDM)光源输出系统由 8 个激光源组成, 发送的信号光由一个八端口耦合器合波, 将它产生的 WDM 信号输入到第一个环形器中。入射光碰到光栅, 与光栅中心波长一致的信号光被反射重新进入环形器从第三端口下载, 与一个激光信号汇合, 经过一个二端头复用器整合到一起, 其它光信号则透过光栅。

图 6 为 WDM 系统光源的光谱, 图 7 的两个图依次表示了波长为 1554.9nm、1553.3nm、1551.7nm、1550.1nm、1548.5nm、1546.9nm、1545.3nm、1543.7nm 经过分插复用器后, 上传下载的不同结果。

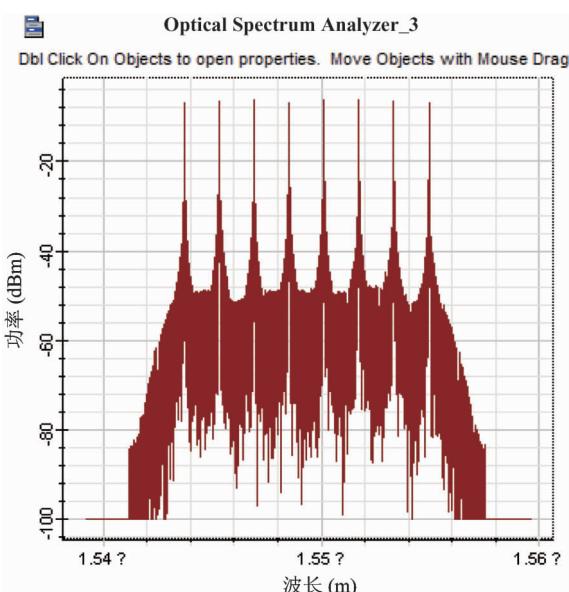
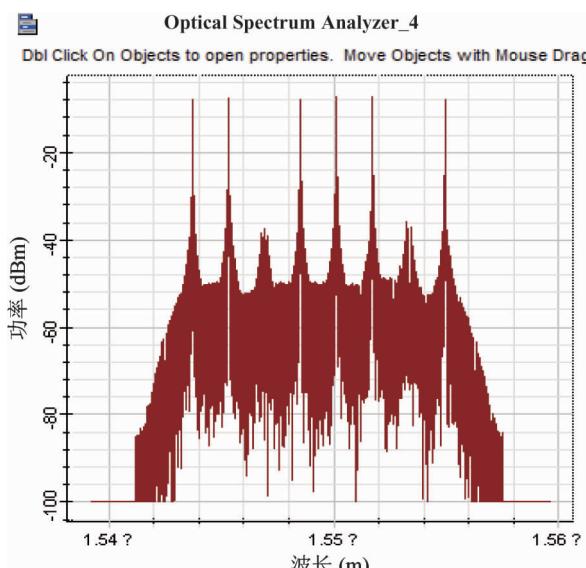
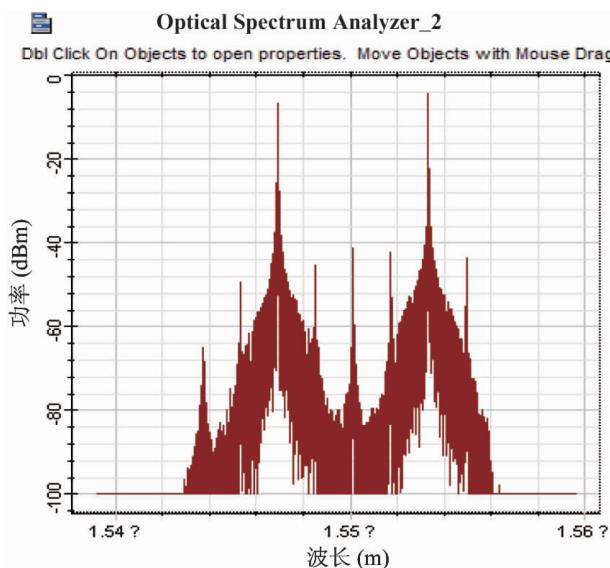


图 6 WDM 光源的光谱



(a) 下载该波长后的其它光信号



(b) 下载的光信号谱

图 7 经过光分插复用器后的光谱图

4 结论

通过 OptiGrating 仿真试验对影响 Sinc 取样光栅光谱的各项性能指标进行具体分析, 根据各参数对 Sinc 取样光栅反射谱的影响规律设计了梳状滤波器。梳状滤波器具有反射率高、反射峰间隔均匀及谱宽稳定等特点。对光纤光栅在光分插复用器(OADM)中的应用特性进行了研究。设计了基于光纤光栅波分

复用系统, 经过光纤光栅光分插复用器后, 下载和除了下载的光谱峰值基本为 -4dBm , 下载的功率也基本是均衡的, 差额在 0.5dB 以内, 与最初的发送功率相比, 损耗不超过 1.1dB 。在下载端得到的信号除了需要下载的波长, 还有其它波长串扰, 邻间串扰大致为 18dBm 。

参考文献

- [1] Hou F F, Yang M. Novel flat multichannel filter based on

- fiber Bragg grating and phase shift. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124 (21):4855-4858
- [2] 孙峒丹, 王荣, 蒲涛等. 任意波长间隔的光纤光栅梳状滤波器设计与实现. *中国激光*, 2012, 39(3): 152-157
- [3] 刘晴, 黄勇林. 取样光纤 Bragg 光栅特性的数值模拟分析. *光通信研究*, 2010,6(06):39-41
- [4] 涂兴华, 刘逢清, 徐宁. 非连续线性啁啾取样布拉格光栅型多信道光纤滤波器的设计. *光学精密工程*, 2010, 18 (9): 1965-1970
- [5] 高振强. 均匀非均匀光纤光栅反射谱透射谱特性研究. *激光杂志*, 2013,34(5):51-54
- [6] 董海峰, 蔡茂国, 杨淑雯. 光分插复用器技术及其应用. *深圳大学学报(理工版)*, 2002, 19(2):34-41
- [7] 陈浩祺. 40G DWDM 系统的关键技术. *光通信技术*, 2011,35(3):22-24

Research on applying fiber grating to comb filters and optical add-drop multiplexers

Zhu Dandan, Wang Zhongjun, Tao Lixin, Li Sha, Hu Lin

(College of Electric Engineering of Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

The characteristics of fiber grating's application to comb filters and optical add-drop multiplexes (OADM) were studied. The reflective spectrum of Sinc sampled grating was analyzed by using the transfer matrix method, and the effect of Sinc sampled grating parameters on the reflective spectrum of Sinc sampled grating, including the sampled grating length, the modulation amplitude of refraction index and the sampled period, was analyzed as well. Four kinds of Sinc sampled fiber grating-based comb filters with the features of high reflectivity, even peak reflection and stable spectrum width were designed according to the influential law of the above-mentioned grating parameters, providing the useful newthinking and technique for comb filter design and fabrication. An optical add-drop multiplexer based on fiber Bragg grating was simulated and studied by using the optisystem software, and the results showed that under the use of OADM, the drop spectral peak value and other spectral peak values were -4dBm, with the balance drop power.

Key words: Sinc sampled grating, comb filter, transfer matrix method, fiber Bragg grating, optical add-drop multiplexer (OADM)