

文章编号: 0258-7025(2004)01-0077-04

光纤光栅级联时延特性的研究

宁提纲, 傅永军, 谭中伟, 刘 艳, 裴 丽, 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 理论分析了啁啾光栅级联应用于波分复用(WDM)系统中的时延特性,时延纹波随光栅级联个数的增多而增大,随级联光栅的相邻光栅波长间隔增大而减少。分析采用 8 阶高斯适当切趾可以减少光栅间相互影响。对理论分析进行了实验验证。

关键词 光电子学;光栅级联;时延纹波;光栅切趾;光通信

中图分类号 TN 929.11;TN 253 **文献标识码** A

Study on Delay Characteristics of Cascaded Chirped FBGs

NING Ti-gang, FU Yong-jun, TAN Zhong-wei, LIU Yan, PEI Li, JIAN Shui-sheng

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

Abstract Delay characteristics of cascaded chirped fiber Bragg gratings (CFBGs) have been theoretically analyzed. Delay ripple increases while the number of cascaded CFBGs increases, and also increases as the wavelength interval between neighbor CFBGs decreases. A way to mitigate the effect, namely using 8-order Gaussian apodization when CFBGs are written is found.

Key words optoelectronics; cascaded CFBG; delay ripple; Gaussian apodization; optical communication

1 引 言

随着社会的信息化,用户对通信容量的需求日益增加,预计将来在全业务服务中每一用户的容量需求可能超过 100 Mb/s。在需求日益增长的推动下,作为现代长途干线通信主体——光纤通信一直朝着更高速率、更大容量、更长无电中继距离的方向发展。单信道速率不断提升,从 2.5 Gb/s 提升到 10 Gb/s,正向 40 Gb/s 甚至 160 Gb/s 方向发展,波分复用(WDM)和密集波分复用(DWDM)也日趋成熟并商用化。光纤色散对光纤通信系统升级扩容的阻碍显得日益突出。

近年来,对光纤色散补偿的各种方案进行了广泛的研究。比较有发展前途的方法是:1)色散补偿光纤(DCF):通过设计光纤结构与折射率分布,使光纤在 1.55 μm 窗口具有较大的负色散系数与负色

散斜率。DCF 补偿技术是一种较成熟的技术,目前在全世界的高速通信系统中得到了广泛的应用。但 DCF 有效面积小,有强非线性,损耗大,WDM 系统中只能完全补偿一路,残留色散大,并且色散补偿量不可调^[1]。2)啁啾光栅补偿(CFBG):啁啾光栅具有较高的品质因子,低的插入损耗,非线性小,可以补偿高阶色散,可以滤除掺铒光纤放大器(EDFA)的自发辐射噪声(ASE),WDM 中色散均衡简单,易于实现动态色散补偿等优点^[2]。DCF 的缺点使其在 DWDM 和 10 Gb/s 以上系统应用受到限制^[2]。CFBG 是一种更有前途的方法。

利用 CFBG 色散补偿时,时延纹波(delay ripple)是 CFBG 色散补偿性能的主要限制因素,光栅滤波器也有同样的问题^[3],因此研究时延纹波具有重要的实际意义。使 CFBG 适用于 WDM 系统色散补偿,采用的方法有光栅级联^[2]或写入超长宽带

收稿日期:2002-09-02;收到修改稿日期:2002-11-11

基金项目:国家“863”项目(2001AA120201)、北京交通大学论文攀登基金资助课题。

作者简介:宁提纲(1968.10—),男,湖南隆回人,博士研究生,主要从事高速光纤通信网及其关键器件的研究,特别是光纤光栅的写入及数据通信系统中的应用研究。E-mail:ntigang@163.com

CFBG^[4],但超长宽带 CFBG 存在短波长损耗,反射率不一致且写入极其困难。光栅级联可以很好地解决这个问题。但光栅级联需要采取适当的措施减少时延纹波。本文对光栅级联进行了理论和实验研究。

2 理论分析与实验

在 WDM 系统中,对多个信道补偿需多个啁啾光栅的级联,由于写入的光栅不可能是理想的带通或带阻,有边瓣存在,边瓣的反射率会影响其他级联光栅的带内平坦性,边瓣的时延会使其他级联光栅的时延纹波变大,引起被补偿信号波形劣化,使系统的功率代价增大^[5,6]。边瓣的色散称为光栅带外色散,本文主要研究啁啾光栅在级联情况下,带外色散影响以及减少带外色散影响的方法。

在光栅中耦合系数的一般表达式为

$$K(z) = \frac{\Delta n(z)}{n_{\text{eff}}} = \sigma(z) + 2k(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda_g} z + \phi(z) \right] \quad (1)$$

其中光栅反射的中心频率为 $\omega_B, \omega_B = 2\pi c/\lambda_B = 2\pi c/2n_{\text{eff}}\Lambda_g, \Lambda_g$ 为光栅的周期, n_{eff} 为有效折射率, c 为真空中光速。定义一个参数 $k_0, k_0 \equiv \pi/\Lambda_g, \sigma(z)$ 是周期平均的耦合系数,即“直流”耦合系数, $k(z)$ 是光栅幅度耦合系数,即“交流”耦合系数, $\sigma(z)$ 和 $k(z)$ 沿光纤的变化可以描述光栅的切趾。本地有效波矢可以写为

$$k_{\text{eff}}(z) = k_0 \sqrt{[\sigma_{\text{eff}}(z) + \delta]^2 - k^2(z)} \quad (2)$$

其中失谐量 $\delta \equiv (\omega - \omega_B)/\omega_B, \sigma_{\text{eff}}$ 为考虑光栅啁啾后,有效“直流”耦合系数, $\sigma_{\text{eff}}(z) = \sigma(z) - \left(\frac{1}{2}k_0\right) \left[\frac{d\phi(z)}{dz}\right]$, 光波透过光栅传输时,发生的相位

变化可以表示为

$$\psi_{\text{eff}} = \int k_{\text{eff}}(z) dz = k_0 \int \sqrt{[\sigma_{\text{eff}}(z) + \delta]^2 - k^2(z)} dz \quad (3)$$

(3)式中积分区间为整个光栅。在本节中感兴趣的是光栅边瓣的色散,光栅的边瓣时延可以由(3)式求出,时延为

$$\tau = \frac{d\psi_{\text{eff}}}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\psi_{\text{eff}}}{d\lambda} \quad (4)$$

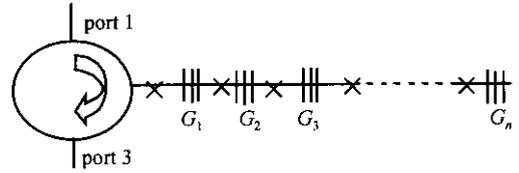


图 1 光栅级联示意图

Fig. 1 Schematic configuration of cascaded FBG

图 1 给出了光栅级联的示意图,利用这个示意图可以直观地分析一下光栅级联间的相互影响。 \times 表示光栅接续点,对应 G_1 中心波长的光不需经过其他光栅就被反射回去了,后面接的光栅对它没有影响;对应 G_2 至 G_n 反射波长的光都要经过一个或更多个光栅,从图 2 中可以看出,在光栅的阻带外存在色散,因此其他光栅边瓣的色散对其产生影响,这相当于对后面的光栅的时延增加了一个噪声,会使光栅时延纹波增大。从图 2 中可以看出,离光栅阻带越远,色散值越小,因此光栅级联阻带外色散与光栅间的阻带间隔有关,阻带间隔大,阻带外色散影响小,反之,则越严重,关于这一点后面要详细分析。图 2 的参数如下:0.99 倍高斯切趾,折射率调制 2×10^{-4} ,光栅长度 100 mm,光栅啁啾量 0.68 nm。

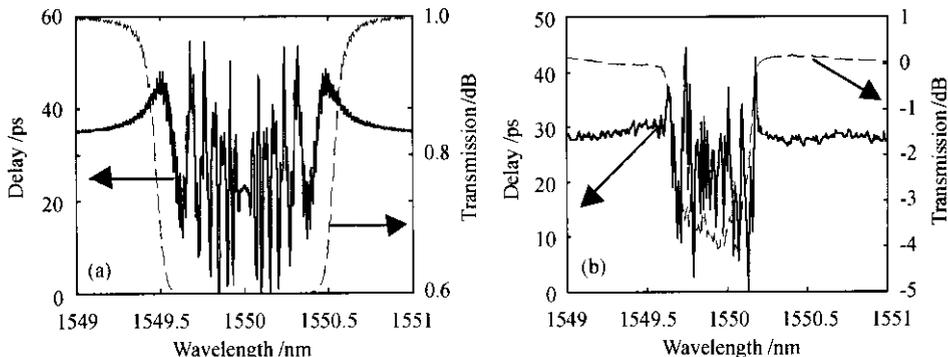


图 2 啁啾光栅的透射谱时延

(a) 理论计算值;(b) 实验测量值

Fig. 2 Transmitted delay of CFBG

(a) theory; (b) measurement

光栅级联的影响主要是因为光栅的带外色散, 图 3 给出了间隔 0.8 nm 的 8 个光栅级联在一起的情况, 波长从短到长为 $G_1 \sim G_8$, 从图 3 明显地可以看出光栅间的相互影响。光栅计算的参数如下: 长度 100 mm, 折射率调制 2×10^{-4} , 切趾函数为 $F(z) = \exp[-2 \times (z - L_g/2)/(0.9 \times L_g)^4]$, 光栅啁啾 0.4 nm。图 3 实线为时延, 虚线为反射谱。图 3 中 G_8 (级联的最后一路) 在不与其他光栅级联时, 时延纹波为 25.3 ps, 在前面级联 7 个光栅后, 纹波变为 156.4 ps, 这还没有考虑写入的因素, 如光纤轴向的不均匀, 写入的紫外光不稳定等, 若考虑了, 纹波将

的结果, 光栅级联进入了“死胡同”。其实, 采用折射率调制适当的切趾函数就可以解决这个问题, 关于切趾减少时延纹波在许多文献都有报道^[7], 如图 4, 光栅采用了 8 阶高斯切趾 ($F(z) = \exp[-2 \times (z - L_g/2)/(0.7 \times L_g)^8]$), 其他参数同图 3, 光栅的时延与级联光栅的多少没多大关系, 级联前后纹波一样大 (8.06 ps)。按图 4 方法写入的光栅级联在 WDM/DWDM 系统中完全可以实用。图 5 是用色散分析仪 CD400 测得的结果, 实线为时延, 虚线为反射谱。

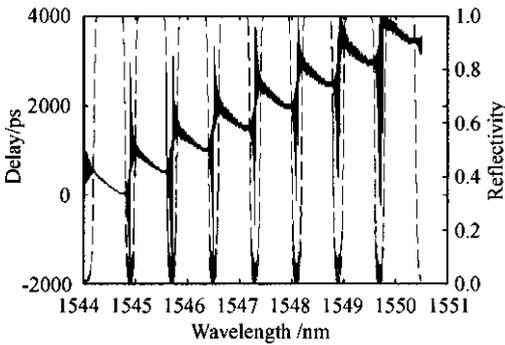


图 3 8 个 4 阶高斯切趾光栅级联时的时延 (参数见正文)

Fig. 3 Delay of 8 cascaded CFBGs with 4-order Gaussian apodization

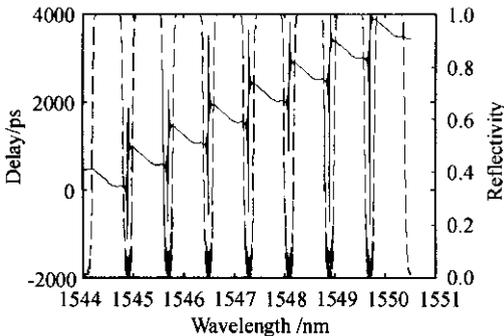


图 4 8 个 8 阶高斯切趾光栅级联时的时延 (参数见正文)

Fig. 4 Delay of 8 cascaded CFBGs with 8-order Gaussian apodization

会更大, 失去了使用价值。图 3 是把波长长的放在最后, 如果把放置的顺序反过来, 研究表明, 对放在最后的短波长影响与图 3 一样大, 说明级联时放置在后面的光栅对前面的光栅有影响, 而放置在后面的光栅对它前面的光栅影响甚微。前面讲到, 纹波大了, 会使误码率增大, 影响系统性能, 按图 3

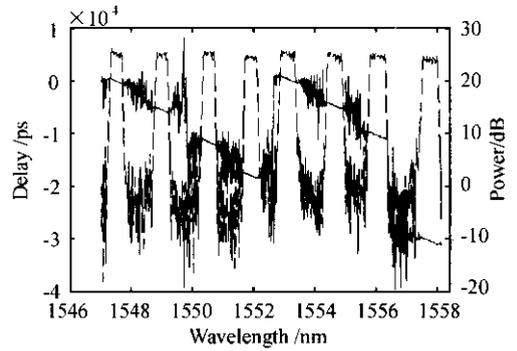


图 5 用色散分析仪测得的 8 个光栅级联的时延与光谱图

Fig. 5 Measured delays of 8 cascaded CFBGs

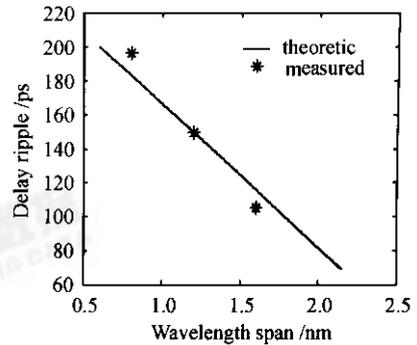


图 6 G_8 的时延纹波与在它前面 7 个光栅间隔大小的关系

Fig. 6 Delay ripples are caused by different center wavelength span

图 6 给出了 G_8 光栅时延纹波与前面 7 个光栅的波长间隔的关系, 随间隔增大, 光栅间的影响减小, 参数同图 3。图 6 实线为理论值, “*” 为色散分析仪实际测试值。图 7 给出了波长最长光栅 G_8 前依次增加光栅的结果, 添加的顺序从与 G_8 波长相差最小到最大, 相邻中心波长间隔为 1.84 nm, 其余参数同图 3。随光栅的增多, 时延纹波增大。

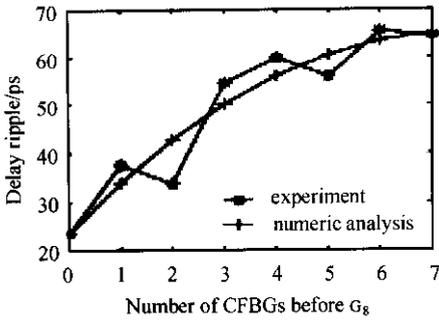


图 7 G₈ 前光栅个数与纹波最大值的关系
Fig. 7 Relation between ripple max and number of CFBGs before G₈

3 结 论

对光栅级联的带外色散进行了理论与实验研究。光栅级联时带外色散对其他光栅的时延有影响,影响随光栅波长间隔增大而减少,并与级联的个数有关。进行适当切趾,可以降低光栅间的相互影响。进行适当切趾的光栅级联完全可以应用于 WDM 系统中。

参 考 文 献

- 1 A. H. Gnauck, J. M. Wiesenfeld, L. D. Garrett *et al.*, 16×20-Gb/s, 400-km WDM transmission over NZDSF using a slope-compensating fiber-grating module [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(4):437~439
- 2 Ning Tigang, Liu Yan, Tan Zhongwei *et al.*, 4×10 Gb/s WDM transmission over 640 km of standard fiber using cascaded chirped FBG dispersion compensation [C]. *OECC'2002 Japan*, 264~265
- 3 B. J. Eggleton, G. Lenz, N. Litchinitser *et al.*, Implications of fiber grating dispersion for WDM communication systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(10):1403~1405
- 4 James F. Brennan III, Edward Hernandez, John A. Valenti *et al.*, Dispersion and dispersion slope correction with a fiber Bragg grating over the full C-band [C]. *OFC'2001*, PD12
- 5 Morten Ibsen, Richard I. Laming. Fiber non-uniformity caused Bragg grating imperfections [C]. *OFC/IOCC'99*, Vol. 4, FA1, 2~4
- 6 S. G. Evangelides Jr., N. S. Bergano, C. R. Davidson. Intersymbol interference induced by delay ripple in fiber Bragg gratings [C]. *OFC/IOCC'99*, Vol. 4, FA2, 5~7
- 7 Pei Li, Jian Shuisheng, Xie Zenghua *et al.*, Dispersion compensation optical fiber grating with low ripple coefficient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3):336~339

裴 丽,简水生,谢增华 等. 低纹波系数色散补偿光纤光栅的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3):336~339

双端包层抽运光纤激光器实现 137 W 激光输出

采用包层抽运技术的双包层光纤激光器能够在内包层中注入高的抽运光功率,从而获得高功率的激光输出。光纤激光器具有接近量子极限的光-光转换效率;其面积-体积比很大,纤芯内高功率激光产生的热量很容易通过光纤表面散出,即使在高功率情况下也无需对光纤和谐振腔进行强制冷却;纤芯的波导限制使在高功率激光输出下也能够保证高的光束质量。这些独特特点使得高功率双包层光纤激光器成为极具前景的激光器件,在高精度激光加工、激光医学、空间技术等领域中逐渐成为主导力量。

本课题组运用高功率 LD 抽运模块,采用端面包层抽运掺 Yb³⁺ 双包层光纤,成功地获得了准直输出的 137 W 激光功率。

双包层光纤为 D 型结构,内包层数值孔径为 0.37,纤芯掺杂 Yb³⁺。所用的两个 LD 抽运源均为中心波长 980 nm 的高功率模块,其中一个 LD 通过特殊设计制作的光学耦合透镜组将抽运光经过一双色片(HT@980 nm;HR@1100 nm)注入双包层光

纤的 D 型内包层。另一 LD 抽运源通过光学耦合透镜组后注入双包层光纤激光输出端内包层,在此 LD 模块和耦合透镜组之间有一片与光路成一定倾角的双色片用来将光纤激光输出光束和抽运的 LD 光束分开。双包层光纤的两个端面均是良好的抛光面,其中一个面作为输出镜,反射率约为 3.5%。

采用上述实验装置,经国家激光器件质量监督检验中心检测,当单端 LD 正向抽运光纤激光器时,获得最大光纤激光器输出功率 62.2 W;当另一端 LD 反向抽运光纤激光器时,获得最大光纤激光器输出功率 66.3 W;当两 LD 抽运源同时在最大驱动电流下工作时,得到准直输出的激光功率 137.7 W,双端抽运光纤激光器总光-光效率达 54.3%。此高功率光纤激光器系统成功地解决了高功率端面抽运光的注入、高精度耐热耦合透镜组的设计制作和光纤端面处理等工艺和技术问题。

清华大学精密仪器系光子与电子技术研究中心,
北京 100084
闫 平, 巩马理*, 袁艳阳, 欧 攀, 崔瑞祯
收稿日期:2003-12-17