

利用光纤环形镜提高级联长周期光栅干涉谱消光比的理论和实验分析*

陈少华^{1,2} 赵启大¹ 刘丽辉¹ 郭澎¹ 姚莹¹ 闫宇¹ 张东生¹ 董孝义¹

(1 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

(2 北京石油大学数理系, 北京 102249)

摘要 对级联长周期光栅干涉谱的特性进行了理论模拟, 得到了输出端加入光纤环形镜, 可以将其干涉谱消光比提高为原来两倍的结论. 实验结果与理论相符. 加入光纤环形镜的确为提高级联长周期光栅干涉谱消光比的一种简单有效的方法.

关键词 级联; 长周期光纤光栅; 消光比; 光纤环形镜

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

自从 E. Dianov 等人首次利用长周期光纤光栅 (Long Period Grating) 对制作出光纤 Mach-Zehnder 干涉仪以来^[1], 级联长周期光栅以其优良的特性正逐步引起人们的重视. 理论方面, Y. Liu^[2] 和 B. Lee^[3] 等人利用传输矩阵的方法, 得到了级联 LPG 光谱的解析解; 实验方面, 与单个 LPG 相比, 级联 LPG 具有多个干涉峰, 且每个干涉峰具有很窄的带宽即占空比, 和较高的消光比, 上述特性使这种器件适于制作成密集波分复用 (DWDM) 光纤滤波器^[4], 和性能优良的温度^[5], 弯曲, 折射率和负载传感器^[6]. 但一般实验上很难制作出中心波长, 带宽和深度完全相同的长周期光栅, 而这种 LPG 级联时干涉谱的消光比将很小, 其滤波和传感器件的性能较差. 因此有必要提出一种简单有效的方法来改善级联 LPG 的消光比特性. 本文对输出端加入光纤环形镜前后级联长周期光栅的干涉谱特性进行了数值模拟和实验分析, 发现加入光纤环形镜, 级联 LPG 的干涉谱消光比会增加为原来的两倍, 同时其占空比性能不受任何影响.

1 理论模拟

1.1 级联 LPG 的工作机理

为简便起见, 本文只讨论级联个数 $N=2$ 时的传输特性, 同时假设所有 LPG 为完全相同的光栅. 图 1 定性的表明了光束在级联 LPG 中传输的物理

机制: 经第一个 LPG 后, 入射的纤芯模部分耦合到包层中成为包层模, 它和未被耦合的纤芯模一起, 分别沿包层和纤芯向前传输, 在第二个 LPG 处, 包层模被重新耦合成纤芯模, 与未被耦合的纤芯模发生相干作用, 干涉条纹即为级联 LPG 的透射谱. 可以看出, 若将 LPG 视为耦合器, 则级联 LPG 的工作原理与 MZ 干涉仪极为类似.

无损耗长周期光栅中传输的纤芯模 (LP_{01} 模) 和包层模 (LP_{0m} 模) 振幅 $a_{01}^o(z)$ 和 $a_m^c(z)$ 满足耦合模方程^[7,8]

$$\frac{da_{01}^o}{dz} = j[\delta_m a_{01}^o + \kappa_m a_m^c] \quad (a)$$

$$\frac{da_m^c}{dz} = j[-\delta_m a_m^c + \kappa_m a_{01}^o] \quad (b)$$

式中, κ_m 为两种模式之间的耦合系数, 若 β_{01}^o, β_m^c 为相应的传播常数, Λ 为光栅周期, 则 $\delta_m = (1/2)(\beta_{01}^o - \beta_m^c - 2\pi/\Lambda)$ 为距离 LPG 损耗率波长的失谐量.

考虑边界条件 $a_{01}^o(0) = 1, a_m^c(0) = 0$, 由方程 (1) 求得经 LPG 后, LP_{01} 和 LP_{0m} 模的振幅分别为^[3,7]

$$\begin{bmatrix} a_{01}^o(d) \\ a_m^c(d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & r \\ r & t^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, t 和 r 分别为 LP_{01} 和 LP_{0m} 模的透射系数

$$\begin{aligned} t &= \cos(s_m d) + j \frac{\delta_m}{s_m} \sin(s_m d) \\ r &= j \frac{\kappa_m}{s_m} \sin(s_m d) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $s_m = \sqrt{\kappa_m^2 + \delta_m^2}$, $|t|^2$ 和 $|r|^2$ 分别为相应模式的透射率.

考虑到长周期光纤光栅的光栅方程^[9~11]

$$\beta_{01}^o - \beta_m^c = 2\pi/\Lambda \quad (4)$$

可知长周期光纤光栅中传输的纤芯模和包层模的相位延迟不同, 故式 (2) 化为

*天津市自然科学基金重点项目 (013800511)、教育部博士点基金 (20020055036)、光电信息技术科学教育部重点实验室资助项目 (2003-21)
Tel: 010-81454361 Email: sh_h_chen@yahoo.com.cn
收稿日期: 2003-11-17

$$\begin{pmatrix} a_{01}^{oo}(d) \\ a_m^{cl}(d) \end{pmatrix} = e^{j(\beta_{01}^{co} + \beta_m^{cl})d} \begin{pmatrix} e^{j\frac{K}{2}d} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{K}{2}d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & r \\ r & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, $K = \frac{2\pi}{\Lambda}$ 为光栅常数, d 为光栅长度.

经如图 1 所示的两级 LPG 传输的光束, 其 LP_{01}

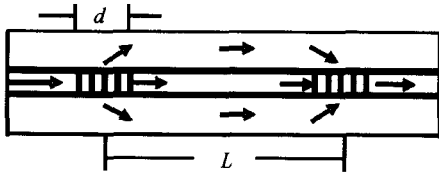


图 1 级联长周期光纤光栅的传光原理示意图
Fig. 1 The schematic diagram of the beam transmitting through the cascaded LPGs

和 LP_{0m} 模的振幅分别为

$$\begin{pmatrix} a_{01}^{oo}(2d+L) \\ a_m^{cl}(2d+L) \end{pmatrix} = e^{j(\beta_{01}^{co} + \beta_m^{cl})d} \begin{pmatrix} e^{j\frac{K}{2}d} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{K}{2}d} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t & r \\ r & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\beta_{01}^L} & 0 \\ 0 & e^{j\beta_m^L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\frac{K}{2}d} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{K}{2}d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & r \\ r & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中 L 为光栅间光纤的长度. 方程(4)中 $|a_{01}^{oo}(2d+L)|^2$ 即为级联 LPG 的透射谱函数.

图 2 为单个和级联 LPG 的透射谱曲线, 它们分别对应图中的虚线和实线. 其中, 光栅的有关参数为: 栅格周期 $\Lambda = 750 \mu\text{m}$, 强度为 $\kappa_m d = \pi/4$, 长度 $d = 3.75 \text{ cm}$, 间距 $L = 6 d$. 可以看出, 级联 LPG 的干涉谱由若干受单个 LPG 透射谱曲线调制的周期性正弦函数组成. 干涉峰的个数仅与光栅间距 L 和光栅长度 d 的比值有关; 峰值波长 $\lambda_0 = (n_{01}^{co} - n_m^{cl})\Lambda$ 处, 消光比为最大值 0; 与 λ_0 间隔越大, 消光比越小. 忽略计算误差, λ_0 两侧的干涉峰关于 λ_0 将呈完全对称分布.

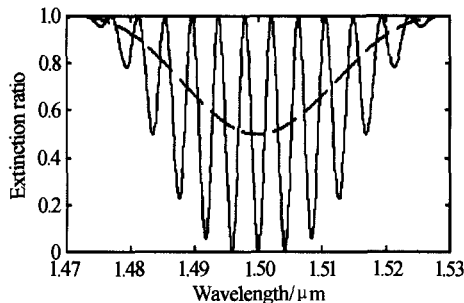


图 2 级联 LPG 和单个 LPG 的透射谱曲线对比图
Fig. 2 The transmission curves of a beam through the cascaded LPGs and a single one

1.2 提高级联 LPG 消光比的有效方法

图 2 中级联 LPG 干涉峰消光比的性能非常优越, 其最大值接近于理想值 0, 但上述情况必须满足以下条件: 两 LPG 的强度 $\kappa_m d$ 均为 $\pi/4$; 中心波长、

带宽和深度完全相同. 由于写入条件的限制, 一般很难精确控制光栅的强度和写出两个完全相同的光栅. 这时, 级联 LPG 干涉谱的消光比将大大减小, 进而影响级联 LPG 的滤波和传感器性能. 为此我们提出了在输出端加入光纤环形镜提高级联 LPG 消光比的方法, 实验装置如图 3.

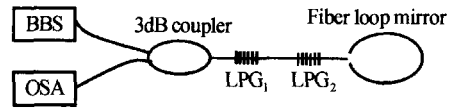


图 3 实验装置原理示意图
Fig. 3 The schematic diagram of the experimental device
图中, 环形镜为利用 3 dB 耦合器制成的光纤全反镜.

图 3 中加入光纤环形镜后, 级联 LPG 的 LP_{01} 和 LP_{0m} 模的振幅分别为

$$\begin{pmatrix} a_{01}^{oo}(4d+2L) \\ a_m^{cl}(4d+2L) \end{pmatrix} = e^{j(\beta_{01}^{co} + \beta_m^{cl})d} \begin{pmatrix} e^{j\frac{K}{2}d} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{K}{2}d} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e^{j\beta_{01}^L} & 0 \\ 0 & e^{j\beta_m^L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\frac{K}{2}d} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{K}{2}d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & r \\ r & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{01}^{oo}(2d+L) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式(7)中 $|a_{01}^{oo}(4d+2L)|^2$ 即为级联 LPG 的透射谱函数.

考虑两个 LPG 的损耗峰波长, 带宽和深度并非完全相同的情况. 输出端未加和加入光纤环形镜时, 由式(6)和式(7), 求得两 LPG 级联的干涉谱曲线如图 4 的实线和虚线所示. 图中, 所选 LPG 的参数为: $\Lambda_1 = 765 \mu\text{m}$, $\kappa_{m1} d_1 = \pi/6$, $d_1 = 50\Lambda_1$, $\lambda_{10} = 1.53 \mu\text{m}$; $\Lambda_2 = 764 \mu\text{m}$, $\kappa_{m2} d_2 = \pi/8$, $d_2 = 50\Lambda_2$, $\lambda_{20} = 1.528 \mu\text{m}$; $L = 6d_2$. 可以看出, 两 LPG 的强度均不等于 $\pi/4$, 中心波长、带宽和深度略有偏离时, 级联 LPG 干涉谱线的消光比将大大减小. 而在输出端加入光纤环形镜, 可以将其提高为原来的两倍, 进而更利于优化其滤波和传感特性.

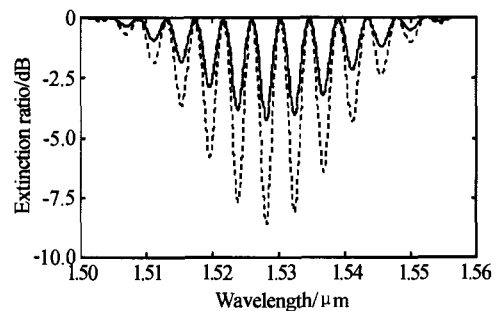


图 4 加入光纤环境前后, 级联 LPG 的透射谱曲线
Fig. 4 The transmission curves of the cascaded LPGs with and without a fiber loop mirror

上述现象可以这样理解: 输出端加入环形镜, 级联 LPG 的透射谱将被反射, 经历与第一次传输相同

的过程,故此时的透射率为原透射率的平方.显然这种规律适合于具有任何形状干涉谱的级联 LPG,与单个 LPG 的损耗峰特性无关.

按上述分析,若增加级联 LPG 的个数,亦可以增加干涉峰的消光比,但考虑到 LPG 的价格一般比较昂贵,且实验上很难制作相同的 LPG,同时,因 LPG 对温度,弯曲,应变等外界干扰非常敏感,个数越多,整套装置的稳定性将越难控制,所以应尽量减少参与级联的 LPG 的个数.而本文提出的加入简单器件光纤环形镜的方法,在不增加系统成本的同时,既有效的提高了系统的消光比,又保证了整个系统的稳定性.

2 实验结果与分析

利用 Advance 公司生产的 Q8383 型,最小波长分辨率为 0.1 nm 的光谱分析仪测量参与级联的两 LPG 的中心波长和深度分别为 1529.6 nm, 1530.0 nm; 14 dB, 13 dB. 光栅间光纤为中国信息产业部第 46 所提供的单模 G652 光纤,取其长度为 59 cm. 采用图 3 所示的实验装置,测量级联 LPG 的透射率曲线.

未加和加入环形镜时级联 LPG 的干涉光谱图分别对应图 5 中曲线 a 和 b. 由图可见,加入环形镜,干涉峰的消光比将增加为原来的两倍.例如,对图 a 中左起第六个干涉峰,加入环形镜前后,其消光比分别为 -11.5 dB 和 -22.75 dB,图 a 中左起第十三个干涉峰,对应的消光比分别为 -3.25 dB 和 -6.25 dB. 上述结论与理论模拟结果相符,其些微差别主要由于器件和光纤连接损耗以及光谱分析仪的读数误差

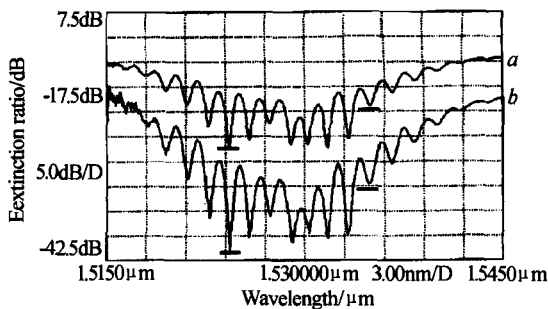


图 5 加入光纤环境前后,级联 LPG 的输出光谱图,分别由曲线 a 和 b 表示

Fig. 5 The transmission spectra of the cascaded LPGs without and with a fiber loop mirror are shown by the curves of a and b

所致.同时可以看出,干涉峰的占空比性能未受到任何影响.但接入环形镜,测量时需要加入 3 dB 耦合器,故级联 LPG 的插损将增加 6 dB.

3 结论

本文对级联长周期光栅的干涉谱的特性进行了理论模拟和实验分析,得到了输出端加上光纤环形镜,可将级联 LPG 的干涉谱消光比提高两倍的结论.同时,系统的稳定性和占空比等性能不受任何影响.总之,加入光纤环形镜确为提高级联 LPG 干涉谱消光比的一种简单有效方法.

参考文献

- 1 Dianov E M, Vasiliev S A, Kurkov A S, *et al.* In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings. *Optical Communication, ECOC '96. 22nd European Conference on*, 1996, **1**: 65~68
- 2 Liu Y, Williams J S R, Zhang L, *et al.* Phase shifted and cascaded long-period fiber gratings. *Optics Communications*, 1999, **164**(1): 27~31
- 3 Lee Byeong Ha, Kim Young-Jae, Chung Y, *et al.* Analytic solution for cascaded long-period fiber gratings. *IEICE Trans Electron*, 2001, **E84-C**(5): 621~628
- 4 Gu X J. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long period fiber gratings. *Optics Letters*, 1998, **23**(7): 509~510
- 5 Chen S, Zhao Q, Liu L, *et al.* A novel temperature sensor based on the cascaded long-period fiber gratings. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (Accepted)
- 6 Han Young-Geun, Lee Byeong Ha, Han Won-Taek, *et al.* Fibre-optic sensing applications of a pair of long-period fibre gratings. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(7): 778~781
- 7 Erdogan T. Fiber grating spectra. *Journal Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 8 廖帮全, 赵启大, 冯德军, 等. 全光纤声光调制器的耦合模理论研究. *光子学报*, 2002, **31**(10): 1213~1215
Liao B Q, Zhao Q D, Feng D J, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1213~1215
- 9 Vengsarkar A M, Lemaire P, Judkins B, *et al.* Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, San Diego, USA, paper PD4-2
- 10 王义平, 饶云江, 曾祥楷. 长周期光纤光栅弯曲特性的模式耦合理论分析. *光子学报*, 2002, **31**(10): 1205~1208
Wang Y P, Rao Y J, Zeng X K. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1205~1208
- 12 胡爱姿, 饶云江, 聂知理, 等. 腐蚀后的新型长周期光纤光栅特性研究. *光子学报*, 2004, **33**(8): 916~919
Hu A Z, Rao Y J, Nie Z L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 916~919

Theory and Experiment of Increasing the Extinction Ratio of the Cascaded Long Period Gratings Utilizing the Fiber Loop Mirror

Chen Shaohua^{1,2}, Zhao Qida¹, Liu Lihui¹, Guo Peng¹, Yao Ying¹, Yan Yu¹,
Zhang Dongsheng¹, Dong Xiaoyi¹

1 Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

2 Department of Mathematics and Physics, University of Petroleum, Beijing 102249

Received date: 2003-11-17

Abstract The interferometric spectrum of the cascaded long period gratings (LPG) has been modulated, and it is presented that the extinction ratio can be doubled when a fiber loop mirror is connected at the end of the cascaded LPGs, which has been proved by the experiment. The fiber loop mirror is indeed an effective and simple way to increase the extinction ratio.

Keywords Cascaded; Long period grating; Extinction ratio; Fiber loop mirror



Chen Shaohua was born in 1975 in Hebei Province. She received M. S. degree in the Physics Department, Hebei Normal University in 2001. Now she is a Ph. D. candidate in the Institute of Modern Optics, Nankai University. Her research interests include fiber sensors and communications.