

紫外写入移相光纤光栅*

瞿荣辉 丁浩 赵浩 陈高庭 方祖捷

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 从耦合模理论出发分析了光致折变移相光纤光栅的基本特性,报道了采用紫外辐照制备移相光纤光栅的实验结果。

关键词 移相光纤光栅,遮挡法成栅,四分之一波长相移

光纤光栅在光通信和传感系统中的应用前景已越来越被人们所认识。近年来,随着光纤光栅制作技术的迅速提高,大量的光纤光栅已开始在各种光纤系统中得到应用。普通的均匀光纤光栅具有阻带滤波作用,即对布喇格波长有反射作用。反射率的峰值随光栅长度和耦合系数的增加而增加,阻带宽度随光栅长度增加而变窄,随耦合系数增加而加宽。这种阻带型光纤光栅与其他光纤元件相组合,可制成各种功能的光纤器件^[1,2]。光栅的周期可以有变化,这就构成了啁啾光栅。啁啾光纤光栅具有很宽的阻带线宽,按放置方向的不同,可以用作正色散或负色散元件,在光脉冲压缩和色散管理方面应用广泛^[3]。

在实际使用中,通常需要具有传输型特性的光滤波器。有几种可行的方案来实现这种滤波器:1) 平衡迈克尔逊干涉仪与阻带型光纤光栅相结合^[4];2) 用两个布喇格波长错开的阻带型滤波器相串联;3) 在均匀光栅中间或啁啾光栅的某一特定位置上引入一个四分之一波长的相移^[5]。本文报道对相移光纤光栅的基本分析和制备移相光纤光栅的初步实验结果。

1 分 析

光纤光栅(FBG)的特性同分布反馈(DFB)激光器和分布布拉格反射(DBR)激光器相似,除了无源同有源的差别之外,具有共同的基本性质,其传输特性符合周期性波导的耦合模理论。众所周知,波导中引入 $\lambda/4$ 相移可以把 DFB 激光器的激射模从阻带两侧移到阻带中部,从而消除两纵模之间的竞争,提高单模成品率。在光纤光栅中部引入一定的相移,也会产生类似的作用。对于均匀光纤光栅,可以采用耦合模方程来讨论。假设在光纤光栅中部某一点,光波场的相位发生一个突变。在这样的边界条件下可以求出二个方向上传输的光波场幅度,从而导出光纤光栅反射率和透射率的表达式。光波场幅度的反射率为

$$r = \frac{-\kappa^* \{ [s \cos(sL_2) - i\delta \sin(sL_2)] \cdot \sin(sL_1) + \rho \cdot [s \cos(sL_1) + i\delta \sin(sL_1)] \cdot \sin(sL_2) \}}{[s \cos(sL_1) - i\delta \sin(sL_1)] \cdot [(s \cos(sL_2) - i\delta \sin(sL_2)) + \rho | \kappa |^2 \sin(sL_1) \cdot \sin(sL_2)]} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(69577020)和上海市应用物理中心的资助项目。

收稿日期: 1997-12-25; 收到修改稿日期: 1998-02-24

式中, κ 为耦合系数, δ 为距离 Bragg 波矢的偏离量, $s = \sqrt{\delta^2 - |\kappa|^2}$, L_1, L_2 为二段 FBG 的长度, $\rho = \exp(i\theta)$, θ 为相移量。当 $\delta < \kappa$ 时, s 为虚数, 式中的三角函数改写为相应的双曲函数。验算表明, 当 L_1, L_2 或 θ 取为零时上面反射率的公式都回到单段均匀 FBG 的情况。在实际可行的情况下, 相移由一小段无光栅的光纤产生, 相移量 θ 可表示为 $\theta = \frac{2n\pi}{\lambda}$, 相移量同波长有关。但是计算表明在 Bragg λ_b 波长附近, θ 可以考虑为一个常数 $\theta_b = \frac{2n\pi}{\lambda_b}$, 传输谱几乎没有变化, 仅在两边旁瓣上有不同的子结构。图 1 为不同参数下根据式(1) 计算的传输谱。其传输谱的基本特征是 $\lambda/4$ 相移光栅在阻带的正中布喇格波长上有一个带宽很窄的传输峰; 如果 $\lambda/4$ 相移不在光纤光栅的正中间, 峰值透过率将随相移位置偏离光栅正中位置的距离而下降; 如果相移在光栅的正中间, 但相移量偏离 $\lambda/4$, 阻带中的传输峰将会偏离布喇格波长。此计算结果与采用传输矩阵法进行计算分析^[6]得到的传输谱特性完全一致。

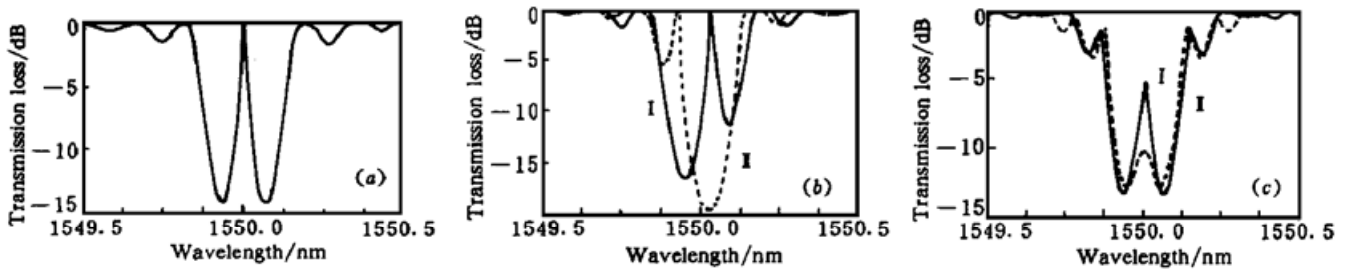


图 1 移相光纤光栅的传输谱

(a) 光栅区中点处相移量为 $\lambda/4$; (b) 光栅区中点处相移量为 $\lambda/5, 3\lambda/5$; (c) 光栅区 I: $7/10$, II: $1/5$ 处相移量为 $\lambda/4$

Fig. 1 Transmission spectra of phase-shifted fiber gratings

(a) $\lambda/4$ shift at the center; (b) phase shift of $\lambda/5, 3\lambda/5$ at the center; (c) $\lambda/4$ shift at different positions other than the center, I: $0.7L$, II: $0.2L$

为了简明地说明移相光纤光栅的基本特性, 这里着重讨论实用上感兴趣的四分之一波长相移的情况, $\theta = \lambda/4$, 并考虑相移点位于光纤光栅的中点的情况, 即 $L_1 = L_2 = l$ 。在这样的条件下, 可导出光强的反射率为

$$R = \frac{4|\kappa|^2 \delta^2 \sin^4(sl)}{(\delta^2 - \kappa^2)^2 + 4|\kappa|^2 \delta^2 \sin^4(sl)} \tag{2}$$

由式(2) 可以导出透射峰和阻带的半极大宽度 δ_h , 它满足如下方程

$$\delta^2 + 2\delta\kappa \sinh^2(sl) - \kappa^2 = 0 \quad (\delta \leq \kappa) \tag{3a}$$

$$\delta^2 - 2\delta\kappa \sin^2(sl) - \kappa^2 = 0 \quad (\delta \geq \kappa) \tag{3b}$$

在式(3a) 中, 当 δ 很小时, 有 $s \approx \kappa$ 。可近似解出

$$\delta_h \approx \kappa \left[\sqrt{\sinh^4(\kappa l) + 1} - \sinh^2(\kappa l) \right] \approx \kappa/2 \sinh^2(\kappa l) \tag{4}$$

求(4) 式的二次导数, 可得

$$\frac{\partial^2 R}{\partial \delta^2} = \frac{8 \sinh^4(\kappa l)}{\kappa^2} \tag{5}$$

可见透射峰线宽随耦合系数 κ 和光栅区长度 l 的增加而减小。由式(3b) 解出的 δ_h 代表阻带的宽度。传输谱底部两边的极值位置 δ_b 可由(2) 式求导得出, 它满足方程

$$\frac{\text{tg}(sl)}{sl} = \frac{2\delta^2}{\delta^2 + \kappa^2} \tag{6}$$

图 2 为根据式(3a) 和(3b) 作数值计算得到的透射峰和阻带的半极大线宽耦合系数(κ) 的变化关系, 以光栅的半长度(l) 为参量。其中 I : $l = 2 \times 10^{-3}$ m, I I : $l = 3 \times 10^{-3}$ m, I I I : $l = 5 \times 10^{-3}$ m, I V : $l = 7 \times 10^{-3}$ m, V : $l = 1 \times 10^{-2}$ m。

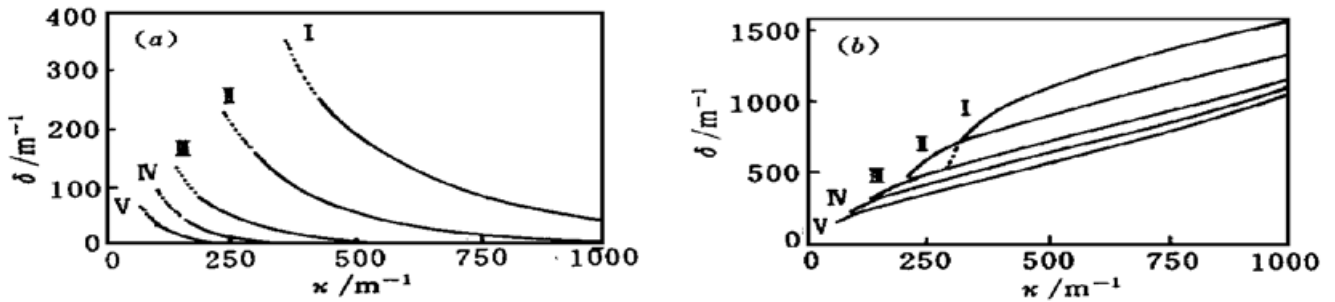


图 2 通带宽度 (a) 及阻带宽度 (b) 随耦合系数 κ 和光栅区长度 l 的变化关系

Fig. 2 The spectral width of the transmission peak (a) and of the stopband (b) versus κ and l

2 实 验

制作相移光栅又有好几种方法。采用预先做好的带相移的相位板来进行紫外辐照, 是简单而且重复性较好的方法。但是, 缺乏灵活性。对于不同的布喇格波长必须使用不同的相位板。另外一种方法是采用两次曝光法, 第一次曝光在光纤上制作均匀光栅, 第二次曝光在光栅中间形成相移区^[5], 这种方法较繁琐。

我们在经过高压载氢敏化后的普通的单模通信光纤上, 用一次成栅的方法即在紫外光经相位板透射干涉成栅的同时直接叠加另外一块掩模板制备得到了移相光纤光栅。实验中所用的相位板由加拿大 QPS 公司制造, 周期为 1057 nm, 零阶衍射小于 5%。实验所用的紫外激光源, 是本所量子光学开放实验室的中心波长为 193 nm 的准分子激光器。

图 3 (a) 是一次成栅的移相光纤光栅的传输特性。由于移相的作用, 在均匀光栅所具有的阻带中出现了一个透过率为 4 dB 的局部通带。为了获得较宽的反射底宽, 在实验中略微弯曲了光纤, 从而引入了一定量的啁啾。图 3 (b) 是采用传输矩阵法模拟计算的结果。计算所用的参数为: 光栅长度为 5 mm, 与实验相符, 光栅耦合系数为 1000 m^{-1} 。考虑到实验中弯曲了光纤, 计算中加入了 2.5×10^{-3} 的啁啾量。光纤的弯曲, 同时又增加了导模与辐射模的耦合, 导致小于布喇格波长的一定范围内损耗增加。因此计算中在该波长范围线性地加入 60 m^{-1} 到 120 m^{-1} 的损耗因子。可以看到, 模拟计算与实验结果十分接近。

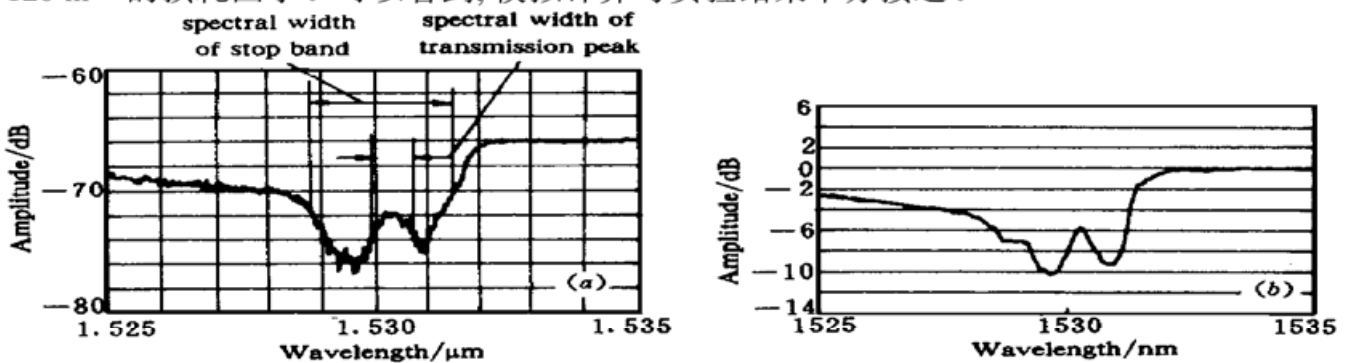


图 3 移相光纤光栅的实验结果 (a) 和理论模拟 (b)

Fig. 3 Transmission spectrum of the phase shifted fiber grating

(a) Measured spectrum showing a local passband in the stopband; (b) Calculated spectrum

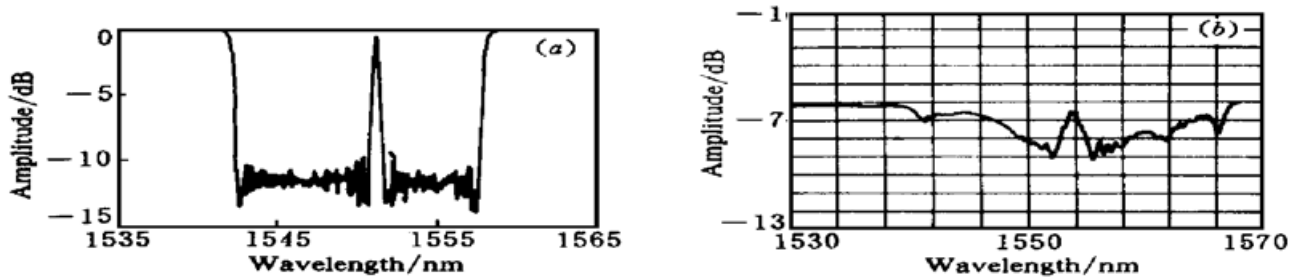


图 4 基于啁啾光栅的宽阻带移相光栅的 (a) 理论的传输谱和 (b) 典型的实验结果
 Fig. 4 (a) Calculated transmission spectrum of a phase-shifted pitch chirped fiber Bragg grating;
 (b) A typical experimental result

由以上的初步实验结果和分析可知,为了获得高质量的传输型滤波器,有必要进一步增大啁啾量。由于弯曲光纤会引入辐射损耗,故应采用啁啾光栅相位板或改变折射率的办法来引入。图 4 (a) 是按上述思想设计的一个啁啾相移传输型光纤光栅滤波器的传输光谱,所用的参数为光栅长度为 2 cm,光栅耦合系数为 1000 m^{-1} ,啁啾量为 20 nm/cm 。图 4 (b) 为制作啁啾相移光栅的初步结果,实验用啁啾相位板长为 2 cm,啁啾量为 10 nm/cm 。因为刻写光栅时紫外光源的能量较小,累计辐照剂量不够大,所以光栅较弱。进一步的实验结果将另文报道。

参 考 文 献

- 1 R. J. Campbell, R. Kashyap. The properties and applications of photosensitive germanosilicate fiber. *Inter. J. Optoelectronics*, 1994, **9**(1): 33~ 57
- 2 G. P. Agrawal, S. Radic. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexer. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8): 995~ 997
- 3 F. Ouellette. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10): 847~ 849
- 4 F. Bilodeau, K. O. Hill, B. Malo *et al.*. High return-loss narrowband all-fiber bandpass Bragg transmission filter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1): 80~ 82
- 5 L. Zhang, K. Sugden, J. A. R. Williams *et al.*. Postfabrication exposure of gap-type bandpass filters in broadly chirped fiber gratings. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(18): 1927~ 1929
- 6 Qu Ronghui, Ding Hao, Zhao Hao *et al.*. Effects of grating substructures on the spectral characteristics of fiber Bragg gratings. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(5): 567~ 572 (in Chinese)

Photo-imprinted Phase-shifted Fiber Bragg Gratings

Qu Ronghui Ding Hao Zhao Hao Chen Gaoting Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Characteristics of phase-shifted fiber Bragg gratings are analyzed by coupled mode theory. A transmission type fiber filter has been made experimentally using photo-imprinting.

Key words phase shifted fiber Bragg grating, beam shielding technique, $\pi/4$ phase shift