

光栅子结构对光纤光栅特性的影响*

瞿荣辉 丁浩 赵浩 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 用传输矩阵法对具有不同参数的 $\lambda/4$ 移相结构、多节 $\lambda/4$ 移相结构、有效折射率调制结构、耦合系数调制结构和“缝合”误差结构等五种光栅子结构进行了数值模拟计算。模拟结果解释了作者研制的均匀光纤光栅、相移光纤光栅的传输谱, 也验证了其他研究小组发表的实验结果。通过对各种结构的系统研究, 提出了一些新的利用光纤光栅的设想。

关键词 光纤光栅, 光栅结构, 耦合系数。

1 引 言

近几年来, 随着紫外光写栅技术的迅速发展, 光纤光栅的制作已日趋成熟, 应用不断增加。在光源方面: 光纤光栅外腔能使普通的多模激光器单模运转^[1, 2], 啁啾光纤光栅能使锁模激光器大范围自动锁模^[3]。在光信号传输方面: 光纤光栅已被用来做光信号分插复用器^[4], 这种复用器是波分多路光通信系统中关键器件之一。啁啾光纤光栅可用于对光纤传输线路的色散进行补偿^[5], 最近又有用非啁啾光纤光栅进行色散补偿的报道^[6]。光纤光栅还被广泛用来做各种用途的光滤波器和光均衡器。

在以上应用中, 单纯的均匀光栅往往不能满足要求, 而需要在光栅中引入一些子结构。如对光栅的耦合系数进行调制、对光栅进行空间采样等等。除了人为引入的子结构以外, 有时还会无意或不可避免地在光栅中引入一些子结构。这方面的一个例子是用分段拼接的方法来制作长光栅时, 由于机械平移的精度往往稍差, 因此在联接处便不可避免地引入一个随机相移而引入的“缝合”误差。在其光谱中便会出现被称之为“缝合”误差的旁瓣。

光栅的子结构, 无论是人为或无意引入的子结构, 都对光纤光栅的特性有很大的影响, 因此有必要对其进行一个系统的研究。本文将对五种光栅子结构等进行分析, 其结果将有助于对光纤光栅光谱特性的理解, 也有助于设计和优化光栅结构使其达到预期的性能。

2 分析模型

为了研究光栅的空间子结构, 将光栅分成相同长度的 N 段, 如图 1 所示。每一段中光栅的参数为常量, 但相邻段中这些参数可以不同。 N 可根据需要取大或取小。

* 本项目得到国家自然科学基金(69577020)、上海市应用物理中心基金的资助。

收稿日期: 1997-08-07

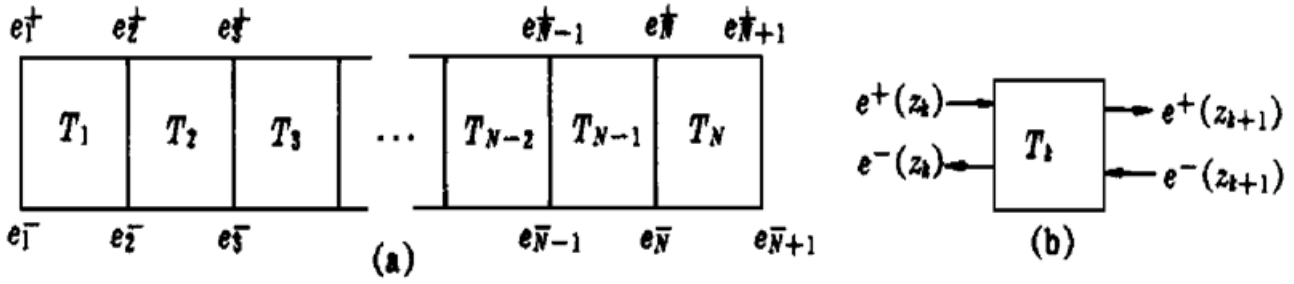


Fig. 1 Multi-section grating structure model. (a) Section alignment; (b) Definition of the transfer matrix for a general uniform grating section

设波导中的光场 E 可分解成正向传输和反向传输两部分, 分别以 e^+ 和 e^- 表示, 则:

$$E(z, t) = e^+(z) + e^-(z) \\ = A^+(z) \exp(j\omega t - j\beta z) + A^-(z) \exp(j\omega t + j\beta z) \quad (1)$$

式中 ω 为光波角频率, $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 为对应的传播常数, n_{eff} 为波导的有效折射率。图 1(b) 所示的传输矩阵中的各元素可表达为^[7]:

$$T_{11}^k = \exp[-j\beta_B(z_{k+1} - z_k)] \left\{ \frac{-jB \sinh[S(z_{k+1} - z_k)]}{S} + \cosh[S(z_{k+1} - z_k)] \right\} \quad (2)$$

$$T_{12}^k = \kappa^* \frac{\exp[-j\beta_B(z_{k+1} + z_k)]}{S} \sinh[S(z_{k+1} - z_k)] \quad (3)$$

$$T_{21}^k = \kappa^* \frac{\exp[(j\beta_B)(z_{k+1} + z_k)]}{S} \sinh[S(z_{k+1} - z_k)] \quad (4)$$

$$T_{22}^k = \exp[-j\beta_B(z_{k+1} - z_k)] \left\{ \frac{jB \sinh[S(z_{k+1} - z_k)]}{S} + \cosh[S(z_{k+1} - z_k)] \right\} \quad (5)$$

式中 $\beta_B = 2\pi/\Lambda$, $B = \Delta\beta - j\alpha$, $S = \sqrt{|\kappa|^2 - B^2}$, Λ 为光栅的周期, κ 为光栅的耦合效率, α 表示波导损耗。整个光栅的传输矩阵可用各个单元矩阵的乘积来表示:

$$[T] = \prod_{k=N}^1 [T_k] \quad (6)$$

由此可得光纤光栅的反射谱和传输谱, 分别为:

$$R = |e^-(z_1)/e^+(z_1)|^2 = |T_{21}/T_{22}|^2 \quad (7)$$

$$T = \left| \frac{e^+(z_{N+1})}{e^+(z_1)} \right|^2 = \frac{|T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21}|^2}{|T_{22}|^2} = \frac{1}{|T_{22}|^2} \quad (8)$$

相应的相位为:

$$\mathcal{R} = \arg[e^-(z_1)/e^+(z_1)] = \arg(T_{21}/T_{22}) \quad (9)$$

$$\mathcal{T} = \arg[e^+(z_{N+1})/e^+(z_1)] = \arg(1/T_{22}) \quad (10)$$

由此可通过下面的表达式计算相应的时延

$$t_{\text{delay}} = \Delta\mathcal{R}_{\text{eff}}/\Delta\beta c \quad (11)$$

其中 c 为真空中的光速。

3 数值模拟结果与分析

3.1 $\lambda/4$ 相移结构

众所周知, 在一段光栅正中间引入一个 $\lambda/4$ 的相移, 其传输谱在阻带的正中布拉格波长上有一个带宽很窄的传输峰, 如图 2(a) 所示。计算中光栅总长度取 5 mm, 光栅耦合常数取

650 m^{-1} 。图 2(b) 给出了 $\lambda/4$ 相移不在光栅正中间情况下光纤光栅的传输谱, 其结果是布拉格波长上的传输率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 $\lambda/4$, 结果会造成阻带中的传输峰偏离布拉格波长, 如文献[8]所述。图 2(c) 是计算结果, 图 2(d) 是作者用遮挡法制得的相移光纤光栅的实测传输光谱。由以上的分析可以看出, 这属于相移位置偏离正中、相移量接近 $\lambda/4$ 的情况。

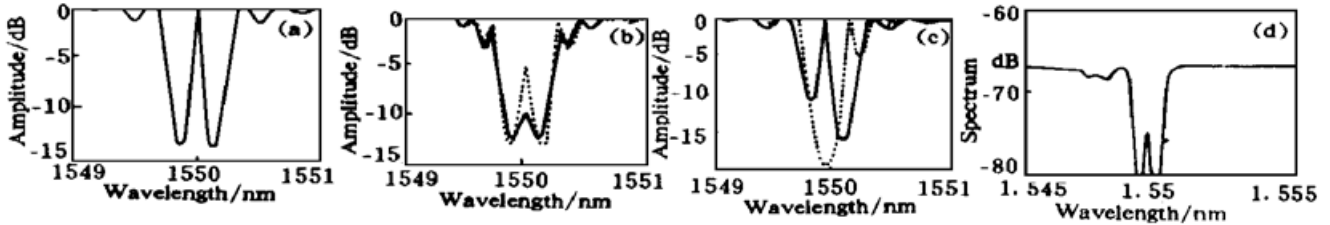


Fig. 2 Transmission spectra of fiber gratings with phase shift. (a) $\lambda/4$ shift at center; (b) $\lambda/4$ shift at a different position other than the center; (c) Different phase shift at center; (d) A measured result

3.2 多段 $\lambda/4$ 相移结构

图 3 是计算得到的多段 $\lambda/4$ 相移光纤光栅的传输光谱。光栅参数与上节相同。细线所示的光谱是将光栅区等分成六段, 在每相邻两段的交接处引入一个 $\lambda/4$ 的相移。粗线所示的光谱, 则是将光栅等分成十二段。一个有趣的结果是这种结构光纤光栅的传输和反射谱中有两个等强度的峰, 两峰之间的距离由每一小段的长度 l 决定, 符合模间距的经典公式

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_{\text{eff}}l} \quad (12)$$

与光栅的总长度无关。利用这种结构的反射特性做成的光纤光栅外腔, 有可能实现半导体激光器的双波长激射, 波长间隔可通过选用合适的 l 加以控制。稳定间隔的双波长激光器在光信息存储和光学干涉方面有广泛的用途。

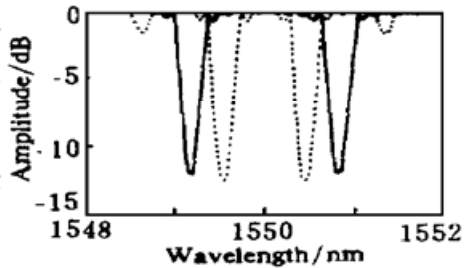


Fig. 3 Transmission spectra of fiber gratings with multiple $\lambda/4$ phase shifts

3.3 有效折射率调制结构

在未达到饱和的情况下, 光纤的光折变量随紫外光辐照剂量的增加而增加, 其有效折射率也随之增加。而光栅布拉格波长 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, 如果辐照光束的均匀性不好, 光纤的辐照剂量是 z 的函数, 即是对有效折射率进行调制, 就会引入一定程度的啁啾量。一般光束并不是很理想的平面波, 而是高斯型分布, 这样两边相应部分的同周期光栅形成法布里-珀罗腔, 使得在光栅主反射峰向长波长方向移动的同时短波长方向出现透射峰, 如图 4(a) 和图 4(b) 分别

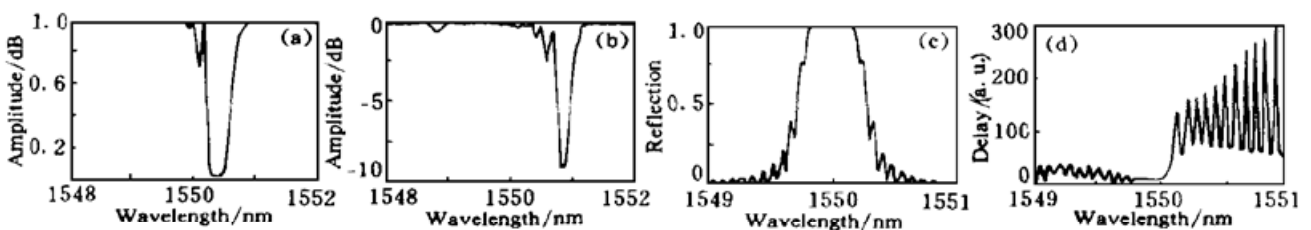


Fig. 4 (a) Transmission spectra of Gaussian function radiation beam tapped uniform grating. (b) Experimental result. (c), (d) Reflection spectrum and time delay of linear modified uniform Bragg grating

为高斯型调制的模拟和实验结果,这对本文制作高性能均匀周期光栅是不利的,应该尽量避免。在长距离光纤通信网路中需要进行色散补偿,长线度、小啁啾量的啁啾光纤光栅可以很好的满足这一要求。如果在用普通均匀周期相位版制作均匀光栅的同时和后期对写入光束的强度进行适当的线性调制,就可以获得这种类型的啁啾光栅。如图 4(c)和图 4(d)分别是对光束进行线性调制的反射谱和色散曲线,光栅长度为 2 cm,啁啾量为 0.4 nm。这种方法比用啁啾型相位版来制作光栅更经济,更方便、对啁啾量的控制更容易获得。

3.4 耦合系数调制结构

均匀光栅结构虽然有明显的波长选择作用,但其旁瓣作用往往过大(如图 5(a)所示),不能满足通信系统对它的要求,对耦合系数进行适当的调制可以有效地抑制旁瓣的高度。在本节计算中所用参数:光栅总长度 0.5 mm,光栅耦合系数 $\kappa = 500 \text{ m}^{-1}$,子区个数 $N = 150$ 。

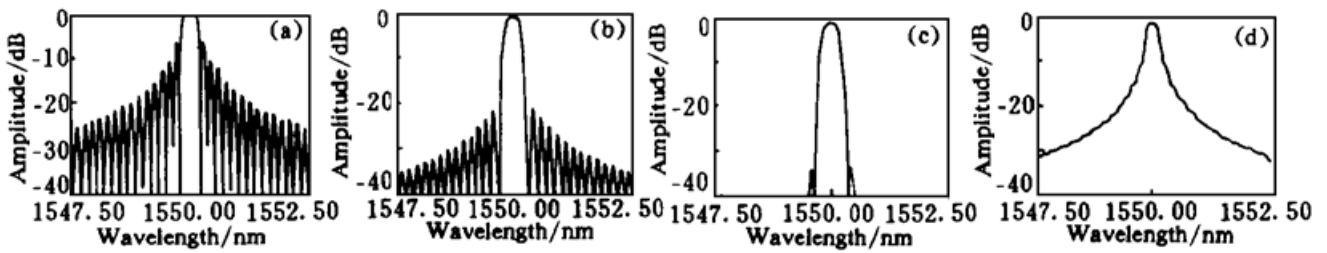


Fig. 5 Reflection spectra of fiber gratings with (a) Uniform coupling coefficient; (b) Rise cosine function tapped coupling coefficient with $b = 2$; (c) Rise cosine function tapped coupling coefficient with $b = 1$; (d) Linearly tapped coupling coefficient

图 5(b)和图 5(c)是用升余弦函数

$$\kappa_k = \frac{\cos [2\pi(m - N/2 - 1/2)/N] + b}{1 + b}, m = 1 \cdots N \quad (13)$$

对耦合系数进行调制的结果,参数 b 分别为 2 和 1。在极限 $b = 1$ 情况下,旁瓣可以被抑制在 -30 dB 以下。从实验的角度看,线性调制比升余弦函数调制要容易的多。图 5(d)是线性调制结构的反射光谱,光栅耦合系数 $\kappa = 500m/N$, $m = 1 \cdots N$ 。在线性调制的情况下,反射光谱中没有任何旁瓣,距布拉格波长 0.4 nm 处的抑制率优于 15 dB, 0.8 nm 处的抑制率优于 25 dB。未来波分多路(WDM)系统中光信号的间隔将是 0.8 nm 的整数倍,信道之间的串话因子应该小于 -20 dB ,所以耦合系数线性调制的光纤光栅将能基本满足这一要求。

啁啾光纤光栅是一种理想的色散器件,其色散的正负性可以简单地通过掉换接入方向来实现。由于利用反射谱的色散效应,所以实际使用时还需插入光纤方向耦合器或光纤环型器。前者会引入不必要的损耗,而后者则价格偏贵。如果对均匀光纤光栅的耦合系数进行线

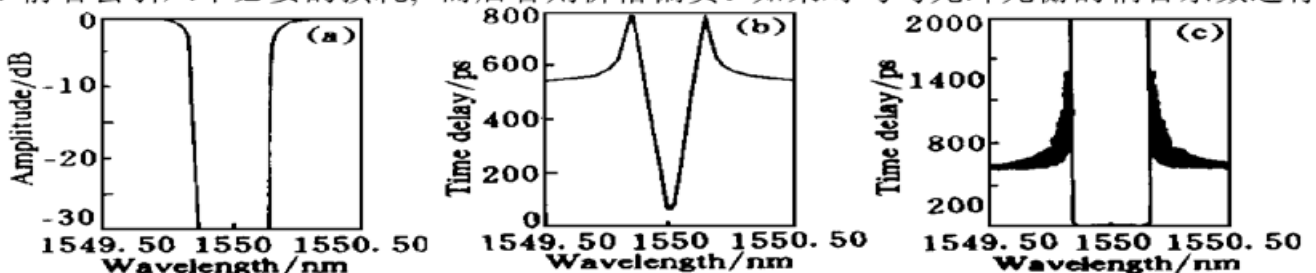


Fig. 6 Transmission delay characteristic of a linearly tapped coupling coefficient fiber grating. (a) Transmission spectrum; (b) Transmission delay time; (c) Transmission delay time of an untapped fiber grating for comparison

性调制, 选取一定的光栅长度和合适的光栅强度, 可以制成传输型的光纤色散器件, 其色散正负性可以通过选择合适的布拉格波长来实现^[6]。图 6 给出了这种用途光纤光栅特性的一个计算结果, 计算所用的光栅长度为 11 cm, 光栅耦合系数为 600 m^{-1} 。为了便于比较, 同样参数但未加调制的光纤光栅的传输延迟曲线在图 6(c) 中给出。对应于高传输率的波长区域, 时延有剧烈的振动。因此如果不进行调制, 均匀耦合系数的光纤光栅本身是不能用来作传输型色散器的。

3.5 “缝合”误差

图 7(a) 是数值模拟的结果, 计算中光栅总长度取 5 mm, 光栅耦合常数取 650 m^{-1} 。为了引入“缝合”误差, 整个光栅区由 50 个子区连接而成, 在每两个相邻的子区中间引入一个随机的相移量。在图 7 的例子中, 随机相移量的幅值不超过 $\pm \lambda/7$ 。为了方便比较, 不含“缝合”误差的光纤光栅的传输光谱画在图 7(b) 中。

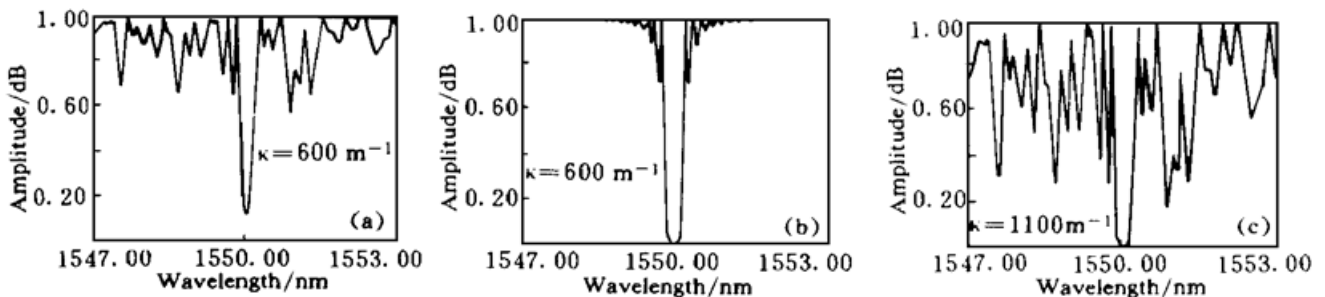


Fig. 7 Effect of stitching error on the transmission spectrum of fiber gratings. (a) Spectrum of a FBG with stitching error; (b) Spectrum of a FBG without stitching error; (c) Spectrum of a FBG with stitching error and strong coupling coefficient

“缝合”误差的结果是使光纤光栅的传输光谱中出现了许多旁瓣, 主瓣的强度锐减。在本例中, 主瓣削减了 10 dB 之多。为了获得相同的主瓣强度, 就必须增加紫外光照时间, 以提高光栅的耦合系数。此时由“缝合”误差造成的旁瓣也会相应地提高, 使波长选择性严重下降, 如图 7(c) 所示。当随机相移量达到 $\pm \lambda/2$ 的极限时, 光纤光栅的传输光谱变得杂乱无章, 没有任何选频特性。所以在用分段连接的方法制作长光栅时, 移动拼接的机械精度直接影响了光栅的质量。

结 论 本文用传输矩阵法对不同参数下的 $\lambda/4$ 移相结构、多节 $\lambda/4$ 移相结构、有效折射率调制结构、耦合系数调制结构和“缝合”误差结构等五种光栅子结构进行了数值模拟计算, 模拟结果可以解释作者研制的均匀光纤光栅、相移光纤光栅的传输谱, 也可验证其他研究小组发表的实验结果, 说明方法和结果是正确的。通过对各种结构的系统研究, 提出了一些新的利用光纤光栅的设想。本文所采用的分析方法和结果, 虽然是针对光纤光栅的, 但对其他的介质波导光栅同样适用。

参 考 文 献

- [1] 陈新之, 丁 浩, 顾晓华等, $1.52 \mu\text{m}$, 60 kHz 线宽光纤布喇格反射镜外腔半导体激光器. 中国激光, 1991, **18**(1): 816~ 818
- [2] 张位在, 丁 浩, 赵 浩等, 单模光纤相位光栅外腔主动锁模半导体激光器. 光学学报, 1996, **16**(12)

: 1681~ 1683

- [3] Hao Ding, Shenping Li, Zujie Fang *et al.*, Wavelength switching of semiconductor laser pulses by self-seeding from a chirped fiber Bragg grating. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **8**(7) : 901~ 903
- [4] F. Bilodeau, K. O. Hill, An all fiber dense-wavelength-division multiplexer/demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4) : 388~ 390
- [5] R. I. Laming, W. H. Loh, M. J. Cole *et al.*, Fiber gratings for dispersion compensation. *Proc. OFC'97*, 1997, paper ThA3
- [6] B. Eggleton, T. Stephens, P. A. Krug *et al.*, Dispersion compensation over 100 km at 10 Gbit/s using a fiber grating in transmission. *Proc. OFC'96*, 1996, paper PD5-2
- [7] H. Ding, Influence of shifted phase value on the output spectra of DFB lasers with phase shifter. *Chinese J. Lasers (B)*, 1992, **1**(6) : 503~ 508
- [8] G. P. Agrawal, Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexer. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(7) : 839~ 841

Effects of Grating Substructures on the Spectral Characteristics of Fiber Bragg Gratings

Qu Ronghui Ding Hao Zhao Hao Fang Zujie

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

(Received 7 August 1997)

Abstract Five types of grating substructure including quarter wavelength shift, multiple quarter wavelength shift, tapped effective refractive index, tapped coupling coefficient and "stitching" are numerically analyzed using the transfer matrix method. The numerical results agree well with the author's experimental results and other published results. By a systematic investigation of five substructures with different parameters, some new applications of fiber Bragg gratings are proposed.

Key words fiber Bragg grating, grating structure, coupling coefficient.