

文章编号: 0253-2239(2004)02-179-4

三角形大带宽反射光谱光纤光栅的设计和制备*

黄 锐 陈 刚 董作人 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 反射谱具有三角形形状的光纤光栅在光纤传感等领域中具有重要的应用前景。利用遗传算法设计出了产生三角形光谱分布的光纤光栅的耦合系数沿光纤的分布。计算表明, 三角形光谱光纤光栅是可以实现的, 其反射带宽可以通过光栅的啾啾量进行调节, 常周期的三角光栅反射带宽小, 变周期的三角光栅反射带宽大, 其带宽同其啾啾量大致相等。实验中, 采用光束扫描法制备了反射底宽为 0.77 nm 三角形光谱的光纤光栅。

关键词: 导波与光纤数学; 三角形光谱; 光纤光栅; 遗传算法; 反射带宽

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Synthesis and Fabrication of Fiber Bragg Gratings with Triangular and Broad-Bandwidth Reflection Spectrum

Huang Rui Chen Gang Dong Zuoren Fang Zujie

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

(Received 12 November 2002; revised 21 February 2003)

Abstract: The fiber Bragg gratings with triangular spectrum will have important applications in fiber sensing areas. The coupling coefficient distribution along the length is acquired for triangular spectrum fiber Bragg gratings by using genetic algorithms synthesizing. The simulation results show that the triangular fiber Bragg gratings can be realized; the reflection bandwidth can be adjusted by chirping of the grating; uniform fiber Bragg gratings have small reflection bandwidth, while the gratings with chirped period have larger reflection bandwidth, which is similar to the chirp. A triangular fiber Bragg grating with 0.77 nm base width of reflection spectrum is fabricated experimentally by using a scanning method.

Key words: guided wave and fiber optics; triangular spectrum fiber Bragg gratings (TFBG); genetic algorithms; reflection bandwidth

1 引 言

光纤光栅作为一种成熟的全光纤器件, 由于其本身具有的体积小, 插入损耗低, 易于与其它光纤器件集成等特点, 在光纤通信和光纤传感领域中有着非常重要的应用。在密集波分复用光纤传输系统中, 光纤光栅可以用作波分复用/解复用器^[1]、色散补偿器^[2]和脉冲整形器^[3]等。在这些应用中都要求光纤光栅的光谱是矩形反射光谱。在光纤传感领域

中, 基于光纤光栅的传感器在测量外界温度、应变等参量时具有高灵敏度, 不受电磁干扰等特点^[4]。光纤光栅传感器的基本原理是利用光纤光栅光谱, 尤其是其峰值位置随温度和应力变化的特性。作为传感头的光纤光栅应具有窄的光谱, 以便于精确地读出光纤光栅中心波长的位置。为了读出传感光纤光栅的峰值波长位置, 要求简易、廉价的光谱测量方法, 以取代通常在实验室使用的昂贵的光谱仪。人们希望获得一种具有大带宽、反射率随波长线性分布的光纤光栅。当它与传感头的窄带光纤光栅组合时, 传感光栅的峰值波长位置就可以转化为信号的幅度。因此具有三角形光谱的光纤光栅将会在光纤传感领域中得到重要的应用。

* 国家自然科学基金(69637050)、863-307 主题资助课题。

E-mail: rhuangeas@mail.sion.ac.cn

收稿日期: 2002-11-12; 收到修改稿日期: 2003-02-21

光纤光栅的光谱形状由其耦合系数分布,即折射率调制分布形式决定。从要求的光纤光栅光谱形状求解出其耦合系数分布形式,称之为光纤光栅的逆工程。光纤光栅逆工程的主要方法有:傅里叶变换法^[5],解耦合 Gel'fand-Levitan-Marchenko (GLM) 方程法^[6]、差分层析法^[7]和遗传算法^[8,9]。相对于傅里叶变换法、解耦合 GLM 方程法、差分层析法而言,遗传算法具有物理思想简单明了,算法效率高,适合于各种复杂结构光纤光栅逆工程运算等特点。本文采用遗传算法计算出了具有三角形,大反射带宽光谱的光纤光栅的耦合系数分布形式,并根据逆工程设计在实验中制作出了所要求特性的光纤光栅。

2 光纤光栅的设计

遗传算法是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的全局性随机化搜索算法,适用于在大范围,对搜索空间不甚了解的搜索空间中搜索最优解^[10]。遗传算法首先需要随机地产生问题的一组可能解,这些可能解称为个体,个体的集合称为群体。个体生存能力(即同预定目标符合的程度)用适应度函数衡量。再利用同自然界选择和遗传变异相类似的各种遗传算子来模拟“进化过程”,搜寻生存能力最强的个体。在求解问题中,“进化”结束时,生存能力最强的个体就是问题的最优解。与生物进化相对应,遗传算法包括编码/解码、选择、交叉、变异四个基本步骤。

采用遗传算法和传输矩阵法计算光栅光谱,对

于常周期光栅和变周期光栅,我们在逆工程设计中获得了具有三角形反射光谱光纤光栅的耦合系数分布。在计算中,以光栅光谱同目标光谱之差的绝对值的负数作为适应度函数,以光栅的每一小段的折射率调制作为决策变量,采用浮点数编码方式求解光栅耦合系数的分布形式^[9]。

光纤光栅的耦合系数 $K(z)$ 可表示为

$$K(z) = \frac{i\pi}{\lambda} \delta n_{\text{eff}}(z), \quad (1)$$

其中 $\delta n_{\text{eff}}(z)$ 是轴向有效折射率的调制幅度, λ 是光栅反射波长。在逆工程设计中,以耦合系数为主要设计参量。获得了耦合系数的分布函数,就可以知道所需要的有效折射率调制幅度的分布。从而根据紫外光致折射率调制度的工艺参量,制备所需要反射光谱的光纤光栅。逆工程设计的另外一个参量是光栅反射波长 λ , 也就是设计变周期光纤光栅。

设计的常周期三角形光谱光纤光栅长度是 40 mm, 计算结果如图 1 所示。反射谱纵坐标为线性尺度。可见具有三角形光谱形状, 二边反射率对波长的线性良好。光栅的反射带宽(底宽)为 0.18 nm。由于光栅是常周期, 因而光栅的反射带宽不大。为了增大三角光栅的反射带宽, 我们在逆工程设计中对光栅引入线性啁啾。设计的光纤光栅的长度取为 85 mm, 计算结果得到的光栅啁啾系数为 0.0098 nm/mm。设计结果如图 2 所示。可以看到反射谱底宽为 0.8 nm。

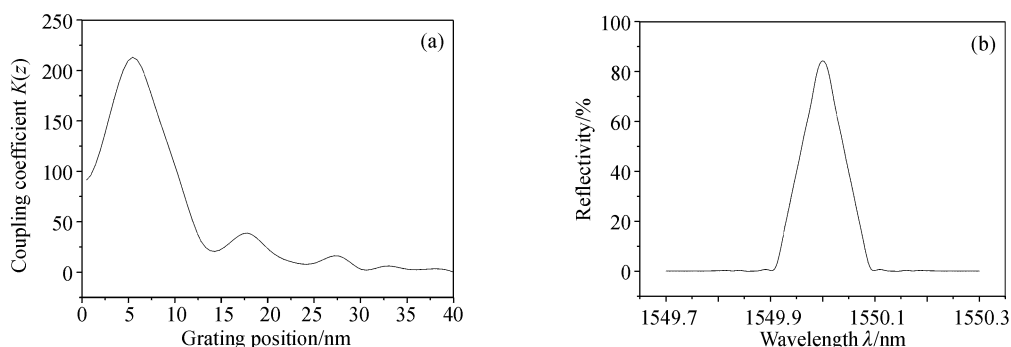


Fig. 1 The simulated uniform TFBG. (a) The coupling coefficient profile, (b) the reflection spectrum of TFBG

为了进一步增大反射带宽,必须采用大啁啾的光纤光栅。图 3(a)是逆工程设计的例子。设计的光栅长度为 85 mm, 计算结果得到的光栅啁啾系数为 0.127 nm/mm。从图 3(b)可见该光栅的反射谱底宽达到 10 nm。计算得到的光谱曲线出现一些振荡,这是由于用传输矩阵法计算大啁啾系数光栅时,在分段计算中存在较大相位差的缘故。

从上面的计算结果可以得出以下结论:

- 1) 对应于三角形光谱光纤光栅的折射率调制幅度和分布形式,在实际工艺参量范围之内,是可以实现的。
- 2) 对于常周期光栅,三角光栅的反射带宽较小。
- 3) 对于变周期光栅,三角光栅的反射带宽由其啁啾系数和光栅长度决定,其带宽和其啁啾量大致相等。

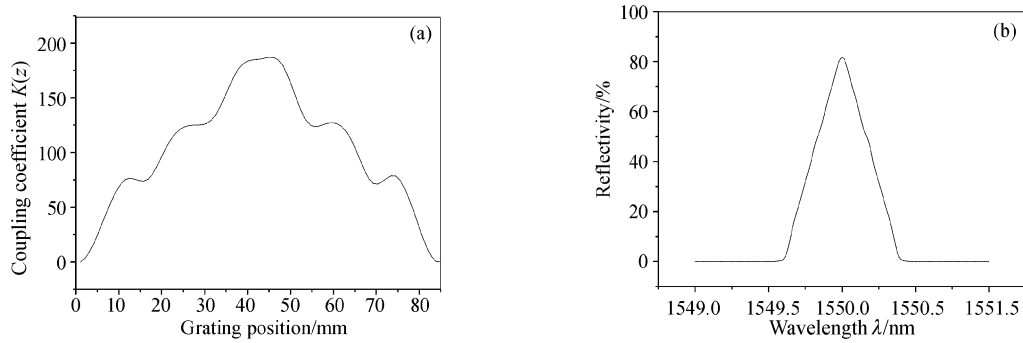


Fig. 2 The simulated TFBRG with bandwidth 0.8 nm. (a) The coupling coefficient profile; (b) the reflection spectrum of the TFBRG

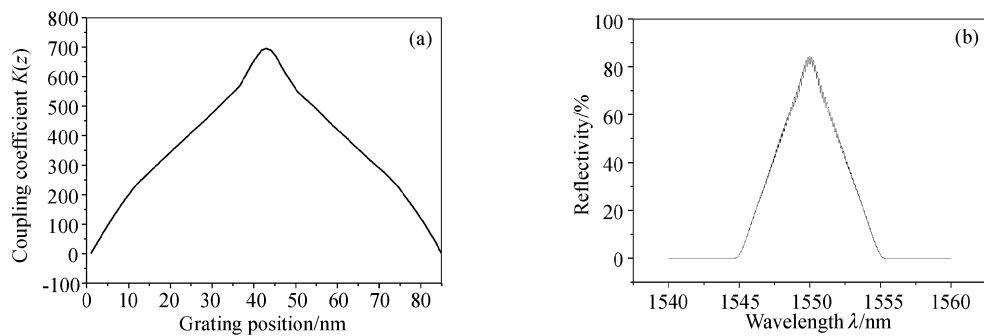


Fig. 3 The simulated TFBRG with bandwidth 10 nm. (a) The coupling coefficient profile, (b) the reflection spectrum of TFBRG

3 三角光栅的制作和试验结果

根据(1)式,要制作出所设计的三角形光谱的光纤光栅,就需要制备的 $\delta n_{\text{eff}}(z)$ 与光栅轴向位置的关系满足上面所计算出的耦合系数分布。在光栅折射率调制幅度改变量与紫外激光曝光量成线性变化的范围内^[11,12],就需要在光纤的轴向控制紫外激光曝光量的变化。为此,在实验中我们采用扫描法^[13]来制作光栅,所用实验装置如图 4 所示。

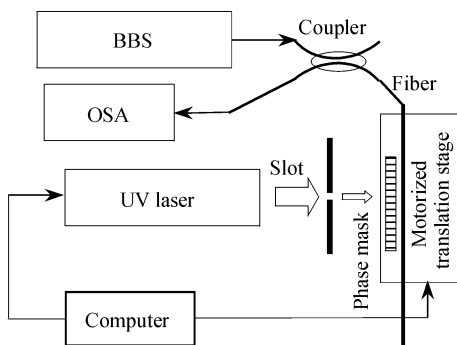


Fig. 4 Experimental configuration. BBS: broadband source; OSA: optical spectrum analyzer

紫外光源采用193nm准分子激光器,激光器的输出功率密度为每一脉冲 80 mJ/cm^2 。紫外激光通

过狭缝后照射在啁啾相位模版和经过载氢处理的 Corning SMF-28 标准单模光纤上。实验中狭缝的宽度取为3 mm。光纤紧贴相位模版并固定在步进电机平台上。由计算机发出的控制信号通过脉冲整形电路后分别控制准分子激光器和步进电机平台。实验中计算机先输出给准分子激光器一定数量的脉冲,控制准分子激光器触发相应的激光脉冲数,然后计算机给准分子激光器一个信号停止触发激光,同时给步进电机控制信号让步进电机移动一段距离。实验中步进电机每次移动 $100 \mu\text{m}$,步进电机移动精度 $1 \mu\text{m}$,步进电机移动停止后,计算机再给准分子激光器控制信号触发相应的脉冲激光数。这样通过控制程序预先编写好激光器每次需要触发的脉冲数,就可以得到所需要的折射率调制幅度分布形式。

采用上述方法,用不同啁啾系数的相位模版,编制不同的控制程序,可以制作出具有不同带宽三角形光谱的光栅。实验中啁啾相位模版的啁啾系数为 0.009 nm/mm ,长度是100 mm,步进电机移动的总长度为85 mm。根据图 2 设计的耦合系数分布要求所制作的光栅反射谱如图 5(a)所示。可以看到反射率的光谱函数具有较好的线性,光谱底宽为 0.77 nm ,最大反射率是 50%。作为比较,采用同一啁啾相位模版、在相同区域通过透镜组扩束的紫外光束,制作了普通啁啾光纤光栅,其反射谱如图 5

(b)所示。显然,采用逆工程设计的方法,获得了良

好的效果。

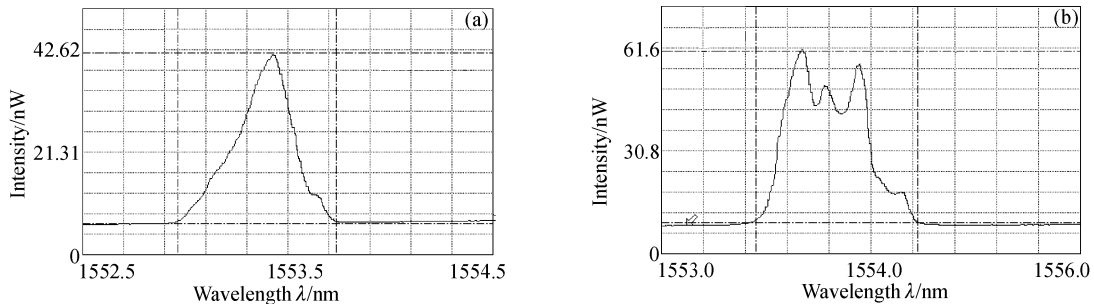


Fig. 5 (a) the reflection spectrum of the fabricated TFBG, (b) the reflection spectrum of the fabricated common chirp FBG

从图 5 可以看出:相同的啁啾相位模版采用不同的辐照方式,制作出的光栅反射谱有很大的区别。根据图 2(a)耦合系数曲线制作的光纤光栅,由于在光栅中间位置耦合系数大,因而光栅中间位置对应的反射波长的反射率就大;光栅两端的耦合系数小,对应的反射波长的反射率就小,所以整个光栅的反射光谱呈现出三角形形状。普通啁啾光栅的耦合系数在光栅的长度方向上分布是一常数,因而光栅的各反射波长的反射率基本上是一致的。

图 5(a)中光纤光栅的反射光谱同理想的三角形存在一些差别,这主要是由于制作过程中工艺参数的控制还不够满意。比如光致折射率调制量与紫外激光曝光量的关系偏离线性关系;激光脉冲能量及光束分布的稳定性等。这些因素都对三角形光谱特性的好坏有直接的关系。另外狭缝宽度越小,步进电机每次移动距离越短,所制作得到光栅的耦合系数分布形式越趋近于所设计的耦合系数分布形式,但在试验中狭缝宽度越小,步进电机每次移动距离越短,制作光栅所需的时间就越长。试验中,确定狭缝宽度和步进电机每次移动距离时需要考虑各种试验因素的影响,通过理论计算和多次试验研究来得到它们的最佳大小。

结论 本文利用遗传算法进行逆工程设计,获得了三角形光谱光纤光栅的耦合系数分布。设计表明,三角形光谱光纤光栅是可以实现的,其反射带宽可以通过光栅的啁啾量进行调节,常周期的三角光谱光纤光栅反射带宽小,变周期的三角光谱光纤光栅反射带宽大,其带宽同其啁啾量大致相等。实验上,采用紫外激光光束扫描法,按设计要求的耦合系数分布制备了三角形光谱的光栅。反射率随波长关系呈现良好的线性,反射谱底宽为 0.77 nm,验证了逆工程设计的结果。这种反射率随反射波长具有线性关系的三角形光谱光纤光栅,将在光纤传感等领域

中得到重要的应用。

参 考 文 献

- 1 Bilodeau F, Johnson D C, Theriault S *et al.*. An All-fiber dense wavelength division multiplexer/demultiplexer using photoimprinting Bragg gratings. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4):388~390
- 2 Liu Songhao, Du Weichong, Tan Huayao *et al.*. Dispersion compensation by chirped optical fiber grating in optical fiber communication system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(1):24~28 (in Chinese)
- 3 Petropoulos P, Ibsen M, Ellis A D *et al.*. Rectangular pulse generation based on pulse reshaping using a superstructured fiber Bragg grating. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(5):746~752
- 4 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 5 Winick K A, Roman J E. Design of corrugated waveguide filters by Fourier transform techniques. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(11):1918~1929
- 6 Peral E, Capmany J, Marti J. Iterative solution to the Gel'fand-Levitan-Marchenko coupled equations and application to synthesis of fiber gratings. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **32**(16):2078~2084
- 7 Feced R, Zervas M N, Muriel M A. An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(8):1105~1115
- 8 Skaar J, Risvik K M. A genetic algorithm for the inverse problem in synthesis of fiber gratings. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(10):1928~1932
- 9 Huang Rui, Zhou Yingwu, Fang Zujie. A genetic algorithm for the synthesis of fiber Bragg gratings. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), accepted (in Chinese)
- 10 Zhou Ming, Sun Shundong. *Genetic Algorithms Principle and Application* (遗传算法原理及应用). Beijing: Publishing House of National Defence Industry, 1999 (in Chinese)
- 11 Ramecourt D, Niay P, Bernage P *et al.*. Growth of strength of Bragg gratings written in H₂ loaded telecommunication fiber during CW UV post-exposure. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(4):329~321
- 12 Guan Baiou, Tam Hwa-Yaw, Tao Xiaoming *et al.*. Highly stable fiber Bragg gratings written in Hydrogen-loaded fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(10):1349~1351
- 13 Storøy H, Engan H E, Sahlgren B. Position weighting of fiber Bragg gratings for bandpass filtering. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11):784~786