

文章编号: 1001-3806(2004)01-0061-04

偏振控制法紫外写入 Bragg 光纤光栅的特性分析

饶明辉, 何振江, 杨冠玲, 艾锦云
(华南师范大学 物理系, 广州 510631)

摘要: 结合目前常用光纤布喇格光栅制作方法, 详述了一种更加灵活、简单而又有效的制作光纤布喇格光栅的方法, 即偏振控制法。该方法是基于: 在紫外光 s 和 p 偏振方向诱导而成的两个折射率调制剖面之间形成一个 π 相移, 通过改变两个偏振方向上光强比例, 就能够控制调制量和诱导相移。它的优点是写入的光栅具有多相移和不均匀切趾剖面的特点, 其应用前景广泛。

关键词: 偏振; 相移; 变迹; 光纤布喇格光栅

中图分类号: TN253 文献标识码: A

The advance of polarization control method to ultraviolet-written Bragg gratings

RAO Ming-hui, HE Zhen-jiang, YANG Guan-ling, AI Jin-yun
(Department of Physics, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract A flexible and simple method for UV writing of Bragg gratings and polarization control method, is presented. The method is based on a phase shift between the refractive index modulation profiles induced by s and p polarization of UV light. The modulation strength is able to be controlled and phase shifts are induced by changing the ratio of UV intensity in the two polarizations. Characteristics of spectrum of two written gratings are analysed, in good agreement with theoretical predictions.

Key words: polarization; phase shift; apodization; fiber Bragg grating

引 言

随着光纤光栅技术迅猛发展, 其制作方法也在不断地创新, 该技术将对光纤通信领域产生深远的影响。利用光纤的光敏性可用紫外光在光纤纤芯中写入光纤布喇格光栅, 其具有别的元件不可比拟的优越性, 如它与光纤通信所用的光纤相兼容, 小的插入、吸收、散射损耗, 以及好的光谱特性和可靠性。人们对其在光纤技术领域内的应用进行深入探讨, 并取得满意的结果, 例如, 已广泛应用于光纤滤波器、光纤传感器、光纤激光器及光通信系统中色散补偿等方面。因此, 光纤布喇格光栅将是下一代高速光纤通信系统中不可缺少的关键器件之一。

目前, 光纤布喇格光栅的制作方法层出不穷, 随着对光纤布喇格光栅性能的要求越来越高, 其性能

的优劣无疑就取决于写入方法的好坏。例如, HILL^[1]光栅采用内写入法, 利用菲涅耳反射使得反射光与入射光在适当条件下干涉, 在纤芯内部形成驻波, 由于光致折射效应, 在沿光纤长度的波节、波腹处通过曝光可以诱导出周期性的折射率变化形成光栅, 该方法对装置的稳定性要求高且折射率变化小、波长不易改变; 美国 UTRC 的 MELTZ 等研究人员在 1989 年首次用紫外光全息法制成高反射率的布喇格光栅, 它是在选择适当的波长后, 使纤芯在两束干涉光的诱导下发生折射率永久性变化而形成的, 这种光栅的稳定性较好, 但它对光源的相干性和光路的稳定性要求较高; ASKIN^[2]和 ARCHAMBAULT^[3]利用单脉冲法制作的光栅虽然可以免除外界的干扰, 但反射率较低; 逐点写入法是用来制作长周期光栅, 光纤由计算机微动机构步进, 进行逐点曝光形成光栅, 它的缺点是重复性较差。

为了满足现代的密集型波分复用系统 (DWDM) 的需要, 即在 1550nm 波长处, 对信道间隔为 50GHz 的信号进行有效的波分复用/解复用, 则布喇格光纤光栅要具有强的旁瓣抑制作用和满足通

作者简介: 饶明辉(1977-), 男, 硕士研究生, 研究方向为光电技术及系统。

E-mail: raomingwang@sina.com

收稿日期: 2003-05-21; 收到修改稿日期: 2003-09-10

信带宽的要求,均匀周期光栅已暴露许多不足,而各类非均匀周期光栅得到迅速发展,其中相移布喇格光栅就是其中一种。如果在制作光栅时,事先引入一定的位相,可制成相移光栅,这样器件的损耗和信道的间隔会进一步地减小。通常制作相移光栅采用抖动法^[4]。由于该方法对光纤和相位掩模的相对位置方面要求特别准确,且对振动的干扰又敏感,为了获得更好的相移布喇格光栅, JENSEN 等人^[5]利用紫外偏振进行写入。本文中介绍了这种简单、灵活而又稳定的紫外偏振写入法以及对其写入的光栅的光谱特性进行分析,它的优点是其它方法无法比拟的。

1 偏振控制法原理

在理想的情况下,布喇格光栅具有矩形滤波功能,即平坦的阻带和通带内反射可忽略。由傅里叶变换分析可知,具有矩形滤波功能的光栅切趾剖面一定与 sinc 函数相似^[6],这种 sinc 型的调制剖面在光栅写入时需要几个相移。而一般的相位掩模板法不具备这样的特性,相位掩模板是一个衍射元件,由计算机控制经刻蚀而成,入射的紫外光经过掩模形成衍射,衍射光侧面照射光纤,是因光敏效应可在掩模后的不同位置形成不同周期的光栅所致。当紫外光通过相位板时产生干涉,从而在光纤圆柱面形成干涉场,将光栅写入。用该方法制作的光纤光栅,其周期受掩模周期和光纤折射率的控制,与入射光的波长无关,适合于批量生产,缺点是原则上每一个波长需要一块掩模板。为了满足现代光通信的需要,紫外写入具有相移布喇格光栅中,常用来介绍相移的方法主要是抖动法,在这里介绍偏振控制方法,其能够形成具有很好的相移调制剖面,与抖动的方法相比,该方法灵活且对振动不敏感。

在研究光纤光栅理论工具和数值计算方法中,耦合模理论能够明确描述模场的光学特性因而被广泛采用,光纤布喇格光栅的光学特性主要表现在正反向基模间的耦合,这是由于纤芯的折射率周期性的变化引起的。在写入布喇格光栅时如何引入相移,如图 1 所示^[5],该装置由 5 部分组成:波长为 248nm 的紫外光源、偏振器、偏振光束分光器、相位掩模以及要写入的光纤,其中偏振器安装在由计算机控制的旋转台上。沿着光纤和相位掩模板方向,同时移动偏振光分光器和紫外光束,在曝光期间光纤和相位掩模位置不变。紫外光经过分光器后在 s 和 p 偏振方向传播矢量之间形成一个 θ 角,在纤芯,

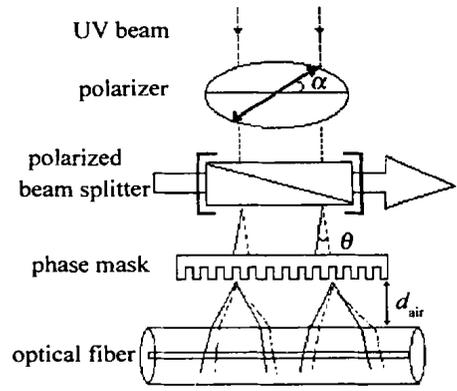


Fig. 1 Schematic representation of the polarization control method

这两个方向的光束会诱导形成两个具有微小位移的调制剖面。在该两个剖面间的相移取决于发散角 θ 、纤芯与掩模板间光程以及折射率调制的周期。通过调节光纤到掩模板间的距离 d , 可随意选择相移。从几何方面考虑,由于 θ 角比较小,知道 d 的大小, d 的大小可由方程 (1)^[5] 得到,然后通过调整在两个偏振方向上的紫外光强比例,就能够获得离散的正相移:

$$\frac{4\theta(nd + r)}{n} = \Lambda \quad (1)$$

式中, r 是光纤半径, n 是光纤包层在波长为 248nm 处的折射率, Λ 是相位掩模周期。紫外光在 s 和 p 方向上的光能量分布为:

$$H_s = H \cos^2 \alpha, \quad H_p = H \sin^2 \alpha \quad (2)$$

式中, H 是总的光能量。因而在布喇格光栅中,折射率调制变化量 $\Delta n(z)$ 由下式求出:

$$\Delta n(z) = \eta H \left[1 + \cos(2\alpha) \cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda_B} + \varphi_0 \right) \right] \quad (3)$$

z 是光纤上的位置; φ_0 是常量, Λ_B 是光栅周期, η 是光纤的光敏性参数,通常它是 H 的函数,跟具体的光纤有关^[7]。(3) 式中 ηH 是光栅周期内空间平均折射率的变化,第 2 项是余弦调制,调制度为 $\eta H \times \cos(2\alpha)$ 。

根据耦合模理论可得^[8],耦合系数为:

$$K = \pi \Delta n(z) / \lambda_B \quad (4)$$

式中, $\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda_B$ 为布喇格波长, n_{eff} 为有效折射率, Λ_B 为光栅周期, $\Delta n(z)$ 为折射率调制变化量。当 $\Delta \beta = \beta_+ - \beta_- - 2\pi / \Lambda_B = 0$ (β_+ , β_- 分别为入射波和反射波的传播常数) 时,光栅的最大反射率为:

$$R_{\text{max}} = \tanh^2(\pi \Delta n L / \lambda_B) \quad (5)$$

主峰的带宽为:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_B} = s \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{\text{eff}}} \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \right)^2} \quad (6)$$

式中, N 为光栅面个数, 对于反射率接近 100% 的强光栅, $s = 1$, 而对于弱光栅, $s = 0.5$, 如果引用近似带宽, 通过简单的计算, (6) 式简化为:

$$\Delta \lambda = 2 \Delta n \Lambda_B \quad (7)$$

由(4)式, (5)式, (7)式可知, 若要获得性能好的布喇格光栅, 必须改变光栅参数(光栅长度, 折射率变化量, 引入切趾包络函数), 其中折射率调制变化量 $\Delta n(z)$ 是关键之一。

由(3)式可知, 如果只有一个偏振方向时, 就很容易得到最大的调制幅度; 在两个偏振的情况下, 如果偏振器的偏振角为 45° 且在两个方向上的紫外光强相等时, 具有最小值为 0; 当 $\alpha = 0^\circ$ 或 $\alpha = 90^\circ$ 时, 最大的幅度就取决于折射率调制剖面的相位。当偏振器的偏振角经过 45° 时, 可得到相位移动。在这里扫描速度决定了平均折射率的变化, 在曝光期间, 扫描速度应保持不变。如图 2 所示, 图 2a 表明: 在引入 sinc 函数包络切趾面的光栅写入时, 两个偏振方向上归一化光能量的变化以及归一化折射率调制幅度情况; 图 2b 表明其相应的偏振器的偏振角 α 。在实验中, 光源为 248 窄线 KrF 的激光器, 分光器是一个发散角为 14° 的棱镜, 光纤的直径为 $125\mu\text{m}$ 。如果想获得高性能的光栅, 则必须仔细调整光纤到掩模板的距离。

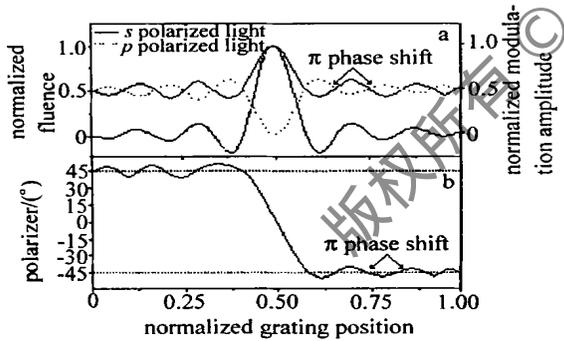


Fig. 2 a—normalized fluence profiles for s and p polarizations b—corresponding polarizer angle α

2 写入光栅的光学特性

作为滤波的布喇格光栅, 其反射谱中旁瓣的影响对滤波是非常不利的, 它会产生附加的噪声, 因而要对旁瓣加以抑制, 在这里引入了两种光学切趾, 即 sinc 函数切趾、高斯切趾, 光纤光栅的光学切趾指的是: 在光栅中, 光感折射率调制的振幅是沿光栅长度有一个钟形函数的形状变化。在实验中写出了两种类型的光栅: 高斯光栅和 sinc 光栅, 写入时, 激发光束能流密度为 $30\text{mJ}/\text{cm}^2$; 高斯光栅表明偏振控制法在一维扫描情况下能够写入具有变迹曲线的光栅;

sinc 光栅说明了该方法能够写入几种相移的光栅。sinc 光栅的变迹曲线如图 2a 所示。为了避免由 sinc 光栅有限长度引起的问题, 在光栅中又采用了高斯变迹, 目的是为了减少反射峰值的旁瓣影响, 对于弱光栅, 旁瓣抑制到 27dB; 对于强光栅, 抑制到更小一些。图 3 和图 4 展示的是具有一个相移的光栅光谱实测与模拟图。图 3a 和图 3b 表明了上述特点的 23mm 长的 sinc 光栅的透射及反射光谱特性。这谱线图说明了该种光栅除了抑制旁瓣作用外, 它的测量和模拟结果基本一致。图 4a 和图 4b 分别是写入的高斯光栅的透射谱和反射谱。

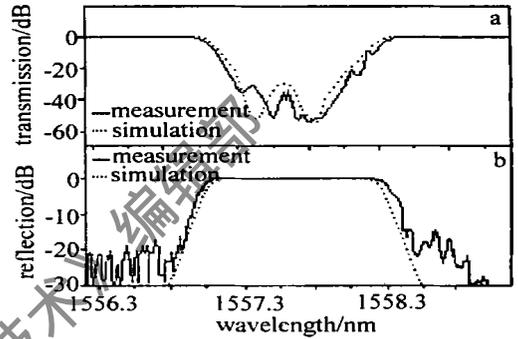


Fig. 3 a—transmission spectra for sinc grating b—reflection spectra for sinc grating

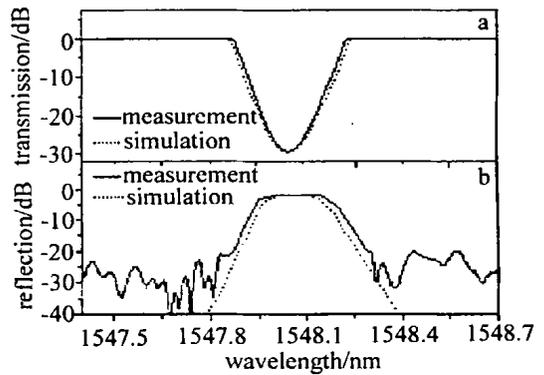


Fig. 4 a—transmission spectra for Gaussian grating b—reflection spectra for Gaussian grating

从图中可以看出, 模拟和测量的光谱在阻带内吻合得相当好。在反射峰值的波长位置, 实测的反射谱线比模拟的要高。导致这种现象的原因, 一种可能是由于 s 偏振和 p 偏振方向的调制曲线没有完全抵消而形成的弱光栅; 另一种可能是跟光纤光敏性有关的偏振影响, 导致在纤心中心也没有完全抵消。为了减少前种因数的影响, 可以使用较小发散角的偏振光束分光器; 后者可以把偏振器的偏振角 α 作一个小的偏移和倾斜, 这样可以达到比较好的效果。

在光纤和波导中, 偏振控制法是刻入布喇格光栅的有效方法。把其与抖动法和二维扫描法进行比

较发现^[9],后面两种方法在光栅中不能诱导相位移动。相比之下,偏振控制法能够写入具有非均匀变迹剖面的光栅,同时在一维扫描中具有相移,所以得到该方法比二维扫描法更好。抖动法适合写入几个相移的高级布喇格光栅,它主要的缺点是需要干涉仪控制纤维与相位掩模间的相对位置,所以其对振动较敏感且很难实现大刻度的产品。而偏振控制法能够写入具有几个相移的高级光栅且对上述问题不太敏感。但必须仔细地调整纤维到相位掩模间的距离和偏振器的位置,因而,一旦调整后,对于紫外写入几个相位移动的高级布喇格光栅而言,偏振控制法就是一种既灵活又稳定的方法。

3 结论

介绍了在光纤中紫外写入高级光栅的偏振控制方法。它是利用紫外光在 s 和 p 偏振方向光束写入两个折射率调制剖面间实现离散的 π 相移;考虑到布喇格光栅的折射率调制幅度的连续变化以及几个相移的写入,偏振器装在一个可旋转的平台上,用来

控制在两个方向上的紫外光强的比率;通过扫描速度来确定诱导有效的折射率的变化,在曝光期间,扫描速度应保持恒定。总之,使用该方法可以写入具有相移和变迹剖面特点的布喇格光栅,通过对其光谱特性进行分析,它是一种简单而又灵活的方法,具有广泛的应用前景。对从事布喇格光栅制作的研究具有一定现实指导意义。

参 考 文 献

- [1] HILL K O, A P L, 1978, 32(10): 647~ 649.
- [2] ASKINS C G. *Opt Lett*, 1992, 17(11): 833~ 835.
- [3] ARCHAMBAULT J L. *Electron Lett*, 1993, 9(17): 1577~ 1578.
- [4] COLE M J, LOH W H, LAMING R I *et al.* *Electron Lett*, 1995, 31: 1488~ 1489.
- [5] JENSEN J B, PLOUGMAN N, DEYERL H J *et al.* *Opt Lett*, 2002, 27: 1005~ 1006.
- [6] IBSEN M, DURKIN M K, COLE M J *et al.* *Electron Lett*, 1998, 34: 800~ 802.
- [7] KRISTENSEN M. *Phys Rev*, 2001, B64: 1442~ 1444.
- [8] RUSSELL P S, ARCHAMBAULT J L, REEKIE L. *Physics World*, 1993, 6(10): 41~ 46.
- [9] KASHYAP R, SWANTON A, ARMES D J. *Electron Lett*, 1996, 32: 1226~ 1228.

(上接第 60 页)

入射的光在顶层被“立即”反射而并不进入高反射膜堆的部分比偶数层镜子大,即进入膜层并经历时延的光要少些,因此,反射时延也比偶数层镜子小。由(14)式即反射率下降与权重因子的关系可知,反射率下降同样也是随着 n_H 和 n_L 的比值的增加而减小。如果选取镜子的 n_H 越大或是 n_L 越小,则反射率下降就会越小。

3 结论

利用具有弱吸收的 QW 介质镜的反射系数的递推式,引入了一个具有普适性的权重因子来定量描述镜子中各层的影响。从方便使用的角度,用介质折射率表示出了权重因子,并以此讨论了折射率对反射时延及反射率下降的影响。研究表明,对层数较多的高反镜,若高折射率介质的折射率 n_H 较小,

或低折射率 n_L 较大,则权重因子便会较大。如果想使 QW 镜子的反射时延或反射率下降小些,在给定吸收系数的情况下,可以选择奇数层反射镜,也可以选择高低折射率比值 n_H/n_L 大的膜系。

参 考 文 献

- [1] BRABEC T, KRAUSZ F. *Rev Mod Phys*, 2000, 72(2): 545~ 591.
- [2] BABIC D I, CORZINE S W. *IEEE J Q E*, 1992, 28(2): 514~ 524.
- [3] SZIPOCS R, KOHAZFKIS A, LAKO S *et al.* *Appl Phys*, 2000, B70: S51~ S57.
- [4] TIKHONRAVOVA V, BAUMEISTER P W, POPOV K V. *Appl Opt*, 1997, 36: 4382~ 4392.
- [5] TAKADA H, KAKEHATA M, TORIZUKA K. *Appl Phys*, 2000, B70: S189~ S192.
- [6] JASAPARA J, NAMPOOTHIRI A V V, RUDOLPH W *et al.* *SPIE*, 2001, 4347: 35~ 44.
- [7] WANG J, CHEN J. *J Opt Commun*, 1999, 20(1): 8~ 11.
- [8] BORN M, WOLF E. *Principles of optics*. London: Cambridge University Press, 1999. 65.