

文章编号: 0258-7025(2003)05-0424-03

光纤光栅偏振模色散的研究

宁提纲, 傅永军, 刘艳, 谭中伟, 裴丽, 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 分析了光纤光栅(FBG)偏振模色散(PMD)产生的原因;写入光栅用的光敏光纤对紫外光吸收是不均匀的,呈指数型吸收。建立了光栅偏振模色散的模型,利用建立的模型计算了不同折射率调制的偏振模色散,计算的结果与用偏振模色散分析仪测得的结果符合得很好。理论和实验说明了光栅色散对偏振模色散的影响:光纤光栅的色散增大,光栅的偏振模色散也增大。

关键词 物理光学;光纤光栅;偏振模色散;光栅双折射;紫外写入光栅

中图分类号 O 436.3 **文献标识码** A

Theoretic and Experimental Study on PMD of Fiber Bragg Grating

NING Ti-gang, FU Yong-jun, LIU Yan, TAN Zhong-wei, PEI Li, JIAN Shui-sheng

(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The polarization mode dispersion (PMD) of fiber Bragg gratings (FBG) is detailedly studied. Theoretic analysis and experimental measurement are carried out on FBG. Birefringence of UV-written gratings mainly comes from the asymmetrical absorption of photosensitive fiber, or exponential absorption. Considering the influence of UV-induced fiber birefringence, gratings chromatic dispersion on the PMD of FBG, the model of FBG's PMD is founded. Numerical calculation is coincident with the experimental measurement. The dispersion of FBG can effect PMD.

Key words physics optics; fiber Bragg grating; PMD; grating birefringence; UV-written grating

1 引言

在普通单模光纤中实际传输的基模($LP_{0,1}$)是由两个相互正交的偏振分量组成的(HE_{11}^+ 和 HE_{11}^-),这两个模式相互独立地在光纤中传输。当光纤材料有双折射时, HE_{11}^+ 和 HE_{11}^- 的传输速率不同,从而产生群时延差——偏振模色散(PMD)。PMD对传输系统的危害表现为:在数字系统中造成脉冲失真变形,使误码率增高,限制系统的传输带宽;在模拟通信系统中产生高阶畸变效应和偏振依赖损耗,导致非线性效应^[1,2]。在短距离低速率传输时,PMD的影响并不显著。随着波分复用(WDM)和掺铒光纤放大器(EDFA)的使用,PMD已日益成为长距离、大容量高速传输系统的限制因素。

光纤光栅在光通信系统中广泛应用于上/下话路(OADM),EDFA增益平坦,复用/解复用(MUX/DeMUX),色散补偿等等^[3]。高速长距离传输系统中的PMD对系统的影响日益突出,光纤光栅在这些系统中的应用,引入的PMD对系统性能的影响必须考虑;另一方面,光纤光栅的PMD特性又可以加以利用,来实现光纤链路的PMD补偿^[4]。本文对光纤光栅的写入曝光机制进行了深入分析:侧写入法使光纤的对称性被破坏,形成快慢轴,传输基模的两个相互正交的偏振分量发生走离,产生PMD。同时我们对光纤光栅的偏振模色散进行了理论分析,建立了清晰的物理模型,在模型的基础上进行了数值分析,并在实验中得到了验证。

收稿日期:2002-03-15;收到修改稿日期:2002-04-30

基金项目:国家“863”项目、国家自然科学基金(编号:2001AA120204)和北方交通大学论文攀登基金资助项目。

作者简介:宁提纲(1968.10—),男,湖南省隆回人,在读博士生,主要从事高速光纤通信网及其关键器件的研究,特别是光纤光栅的写入及其在光通信系统中的应用研究。E-mail:ntigang@163.com

2 模型的建立

为建立研究光栅 PMD 的光栅折射率剖面, 首先假定光栅写入纤芯折射率变化与吸收的紫外光 (UV) 成比例。Hill 发现光纤的光敏性用的是光纤内干涉法, 写入不会造成某侧面折射率变化大于另一侧面的情况, 但写入的波长由入射光波长决定, 而且写入的光栅调制弱, 限制了它的应用; 侧面曝光法解决了前面的难点^[5], 但侧面曝光法写入光纤光栅使得纤芯的折射率变化不对称, 向 UV 侧的曝光量大于背 UV 光侧的曝光量。在纤芯内任一点的曝光量写为^[5,6]

$$p(r, \theta) = p_0 \exp\{-\alpha[\sqrt{r_{co}^2 - r^2 \sin^2(\theta)} - r \cos(\theta)]\} \times \cos\left[\frac{\pi}{\Lambda_{pm}} z + \phi(z)\right] \quad (1)$$

其中 p_0 为引入的紫外光在纤芯的影响因子, r_{co} 为纤芯的直径, r 为坐标原点到任一点 (ρ, θ) 的距离。如图 1, 式中余弦项仅描述在 z 轴方向上相位掩模折射率调制特性, Λ_{pm} 为掩模板的周期, α 为纤芯的紫外光吸收因子。纤芯对紫外光的吸收为线性的: $g(F_0) = CF_0$, C 为常数。那么, 光栅的折射率调制 δn 可以用紫外光在纤芯的分布表示出来: $\delta n = CF_0$ 。紫外光在纤芯的分布是不均匀的, 因此折射率调制在截面上也是不对称的。在(1)式中, 不考虑掩模板的影响时, 引入的折射率不均匀性

$$\Delta n(r, \theta) = \langle \delta n \rangle - \delta n \quad (2)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 为求折射率调制在横截面的平均值, 要分析

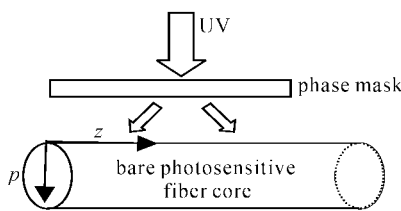


图 1 光栅写入示意图

Fig. 1 Schematic of writing fiber grating

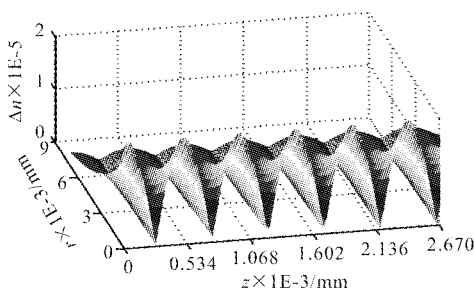


图 2 光栅纤芯截面折射率调制差值图

Fig. 2 Index modulation difference along cross section

在 z 轴上的双折射时, 只要把(2)式两侧同乘以(1)式的余弦项即可。利用(2), (1)式, r 的取值范围为 $[0, r_{co}]$, θ 的取值范围为 $[0, 2\pi]$, 绘出纤芯双折射如图 2, 这种不对称引入的就是 PMD。为了清晰, 图 2 只绘了 z 轴上几个周期的图像, 紫外光波长取 248 nm, α 取 120 dB/mm, C 取值 $1.25E-4$, 掩模板周期 1068 nm。

3 数值计算与实验

紫外光在普通单模光纤写入光栅时引入的折射率的不均匀性, 是光栅偏振模色散产生的主要原因。设这种不均匀性引入的折射率差为 Δn (即双折射), 紫外光引入的这种不均匀性与写入光栅用的光纤种类和曝光条件, 以及光纤的历史有非常密切的关系, 对于目前采用侧写入法对刚氢载完就写入光栅的光纤引入的有效双折射与折射率调制的关系经验公式为: $\Delta n_{eff} = 8 \times 10^{-4} \langle \delta n \rangle$ 。光在光栅中传输时, HE_{11} 和 HE_{11} 的传播常数不相等, 即 $\beta_x \neq \beta_y$, 两个本征模之间有相位差, 光栅偏振模色散的时延差为

$$\Delta \tau_g = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda} \times \Delta \lambda = D_g \times \Delta \lambda \quad (3)$$

其中 D_g 为光栅的色散, $\Delta \lambda$ 为双折射引入的波长偏移, 即 $\Delta \lambda = \Delta n \times \Lambda_{pm}$, (3) 式可以写为

$$\Delta \tau_g = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda} \times \Delta \lambda = D_g \times \Delta n \times \Lambda_{pm} \quad (4)$$

利用耦合模理论可以计算光栅的色散, 再利用(4)式结合前面光栅折射率调制的不均匀性, 就可以计算出光栅的偏振模色散。

偏振模色散的测量方法很多, 本文利用准确性最高的琼斯矩阵法 (Jones Matrix Eigenanalysis: JME): 琼斯矩阵能对偏振模色散进行完全的测量, 且最小值可以测量的偏振模色散达到飞秒量级, 琼斯矩阵测量的原理如图 3。实际测量偏振模色散用的是惠普 HP8509B 偏振模色散分析仪, 光栅实际色散测量用的分析仪是 EG&G CD400。图 4 是用偏振分析仪测 3 次的统计图, 统计平均值即 PMD 为 0.6014 ps。被测光栅的参数: 中心波长 1545.934 nm, 3 dB 带宽 0.650 nm, 透过率 3.5 dB, 即光栅的反射率为 55.3%; 光栅的折射率调制为 5×10^{-4} , 写入光栅用掩模板周期 (Λ_{pm}) 为 1069.45 nm, 光栅的色散值为 1412.4 ps/nm。利用(3)式可以计算出光栅的偏振模色散为 0.6042 ps, 计算结果与用 HP8509B 偏振分析仪测得的值符合得很好。

利用(3)式可以计算不同情况下光栅的偏振模

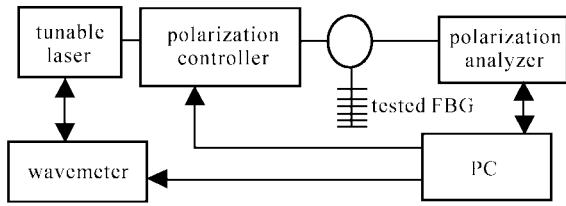


图 3 琼斯矩阵法测光栅偏振模色散示意图
Fig. 3 Apparatus used for measurement of grating PMD by JME

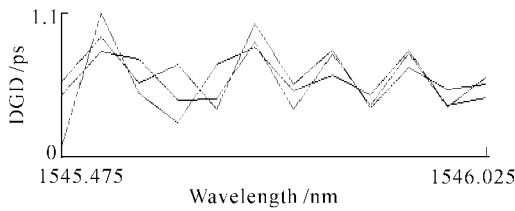


图 4 测得的光栅微分群时延与波长的关系
Fig. 4 Measured result of differential group delay versus wavelength

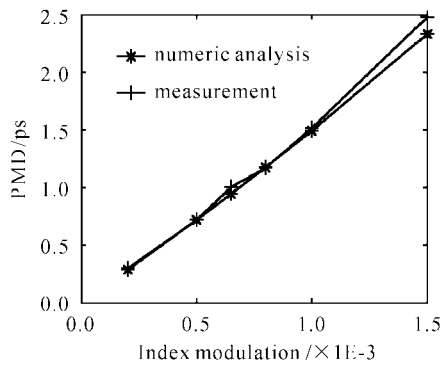


图 5 光栅的 PMD 与折射率调制的关系
Fig. 5 Measured and calculated relation between PMD of grating and index modulation

色散参数,如图 5。对掩模板周期为 1068 nm 的啁啾板(啁啾量 0.4 nm)写入的光栅,光栅色散的理论值是利用耦合模理论计算出来的^[3]。光纤参数的选择:普通的单模光纤,纤芯折射率 1.449,芯包折射率差 0.36%,调制量大小的选取是由实际测得的光栅反射率计算出来;图 5 中,测试的步长为 0.01 nm,以测量 3 次的统计平均值为准。从图 5 可以看出,由(3)式计算的结果与实验值一致性非常好。

从图 5 可以看到,随折射率调制增大偏振模色散也增大。这很好理解:随曝光量的增大,由(1)式可以看出曝光量的不均匀性也加大,偏振模色散同样增大了。同时可以看到图 5 中光栅 PMD 的增加不是线性的:因为(3)式表明,PMD 的大小与光栅色

散和光栅双折射的积成线性关系;在不同折射率调制的情况下,光栅的色散值有很小的变化,也不是保持不变的。如图 6,图中色散计算值是用耦合模理论得到的^[3],实际测量值是用 CD400 色散分析仪得到的,从图 6 看出光栅的色散量随折射率调制的增大而增大,同样看出它们之间的关系也是非线性的。

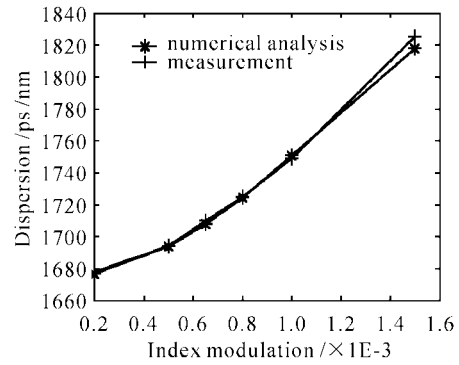


图 6 光栅色散理论、实验值与调制的关系
Fig. 6 Measured and theoretic relation between dispersion and index modulation

4 结 论

通过对光栅侧写入的分析,指出由于写入光栅用的光敏光纤对紫外光的吸收呈指数型关系,光纤对紫外光吸收的不均匀性导致写入光栅过程中引入双折射,引起偏振模色散。对光纤光栅的偏振模色散进行了理论分析,并建立了计算模型,利用建立的模型计算了不同折射率条件下光栅的偏振模色散。并用惠普偏振模色散分析仪测试了光栅的偏振模色散,计算结果与实验值一致性很好。

参 考 文 献

- 1 C. Vassallo. PMD pulse deformation [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(18):1597~1598
- 2 A. O. Dal Forno, A. Paradisi, R. Passy *et al.*. Experimental and theoretical modeling of polarization-mode dispersion in single-mode fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(3):296~298
- 3 Kenneth O. Hill, Gerald Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1263~1276
- 4 S. Lee, R. Khosravani, J. Peng *et al.*. Adjustable compensation of polarization mode dispersion using a high-birefringence nonlinearly chirped fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(10):1277~1279
- 5 Chen Genxiang. Photoinduced Bragg gratings in optical fibers [D]. A Thesis submitted for the degree of philosophy doctor, Northern Jiaotong University, 1997 (in Chinese)
- 6 V. Grubsky, A. Skorucak, D. S. Starodubov *et al.*. Fabrication of spectrally clean, long-period grating filters [C]. *OFC/IOCC'99*, FK5. 174~176