

# 多层光纤布拉格光栅的理论实验研究

郑晶晶<sup>1,2</sup> 闻映红<sup>2</sup> 祁春慧<sup>1</sup> 裴 丽<sup>1</sup> 魏 淮<sup>1</sup> 宁提纲<sup>1</sup> 简水生<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)  
(<sup>2</sup> 北京交通大学电磁兼容实验室, 北京 100044)

**摘要** 从理论和实验两方面研究了在非周期性多层光纤上写入布拉格光栅的光学特性。从耦合模理论出发, 讨论了光纤具有多于一个光敏层的情况。在实验室自制的两类多层光纤上写入光栅的实验也表明, 该类光栅具备有一般光栅的普遍光学特性, 说明在使用多层光纤作为关键部分构建器件时, 需要的各类光栅部件能够通过直接在该类光纤上写入光栅实现。紫外光在氢载掺铒多层光纤上写入光栅的实验说明分层的异种元素掺杂将导致芯区应力增加, 从而辅助提高光纤的光敏性。

**关键词** 光栅; 光纤布拉格光栅; 多层光纤; 掺铒光纤

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1006002

## Theoretical and Experimental Investigation of Fiber Bragg Gratings Written in Multilayer Single Mode Fibers

Zheng Jingjing<sup>1,2</sup> Wen Yinghong<sup>2</sup> Qi Chunhui<sup>1</sup> Pei Li<sup>1</sup> Wei Huai<sup>1</sup>  
Ning Tigang<sup>1</sup> Jian Shuisheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of the Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)  
(<sup>2</sup> Electromagnetic Compatibility Laboratory, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** The optical properties of gratings written in nonperiodical multilayer fibers are investigated both theoretically and experimentally. The coupled-mode theory for gratings is extended to be applicable to the fibers with more than one photosensitive layers. The experimental results of fiber Bragg gratings written in laboratory-fabricated ordinary and Er<sup>3+</sup> doped multilayer single mode fibers confirm that such gratings possess the common characteristics of the gratings written in ordinary one-layer-core fibers, which indicates that in a device using multilayer fiber as its critical part, gratings written in the multilayer fibers are able to fulfill the requests for grating parts. The experimental results also suggest that the inter-layer stress in core area may be a major cause of photosensitive compensation for hydrogen-loaded Er<sup>3+</sup> doped multilayer fiber.

**Key words** gratings; fiber Bragg gratings; multilayer fibers; Er<sup>3+</sup> doped fiber

**OCIS codes** 060.2340; 060.2410; 050.2770

## 1 引 言

多层光纤的折射率结构非常灵活, 通过不同应用目的的结构设计, 这类光纤在色散补偿<sup>[1,2]</sup>、色散平坦<sup>[3]</sup>、降低光纤弯曲损耗<sup>[4,5]</sup>以及增大光纤模场面

积<sup>[6]</sup>等各方面都有出色的应用。其中带有稀土掺杂的多层光纤能够同时提供大模场面积和增益特性, 是未来大功率光纤激光器采用增益光纤的一个良好解决方案。

**收稿日期**: 2012-04-12; **收到修改稿日期**: 2012-05-15

**基金项目**: 国家 973 计划 (2010CB328206)、国家自然科学基金 (60837002, 61177069)、教育部博士点基金 (20090009110003) 和中央高校基本科研业务费 (2011JBM211, 2011YJS219) 资助课题。

**作者简介**: 郑晶晶 (1982—), 女, 博士后, 主要从事特种光纤及其器件方面的研究。E-mail: jjzheng.c@gmail.com

**导师简介**: 闻映红 (1970—), 女, 博士, 教授, 主要从事电磁兼容方面的研究。E-mail: yhw@bjtu.edu.cn

光纤布拉格光栅(FBG)是一种重要的全光纤型器件<sup>[7~14]</sup>。FBG 以其波长选择性好、插损小、与光纤兼容特性好等特性,已经成为高性能光纤激光器所用谐振腔反射镜和窄带滤波器的重要器件<sup>[15,16]</sup>。FBG 与稀土掺杂光纤熔接构成的分布布拉格反射(DBR)光纤激光器以及在稀土掺杂光纤上直接写入 FBG 构成的分布反馈(DFB)光纤激光器,都能提供稳定的单纵模运行,并具备线宽窄、结构紧凑等优点。二者比较而言,DFB 光纤激光器的光栅和稀土掺杂光纤之间没有熔接点,腔内损耗更小,因而能够进一步提高效率、降低阈值、增强稳定性<sup>[17,18]</sup>。FBG 在峰值附近的高色散特性,也使它成为光纤通信色散补偿的重要构成部分<sup>[19,20]</sup>。如果 FBG 能够与多层光纤相结合,就可能发挥二者的共同优势,提高器件性能。因此,研究多层光纤对光栅特性的影

响,对于多层光纤的功能扩展和光纤器件集成,都具有重要的意义。

本文针对这一问题展开了理论和实验研究。在理论分析和模拟的基础上,讨论了多层光纤的特性。并以实验室自制的分层清晰的两类多层光纤为基础,进行了光栅在氢载光纤上的紫外光写入,并对其进行了相关的测试和分析。

## 2 多层光纤光栅的数学建模和理论分析

所讨论的多层光纤为径向非周期性的一般多层光纤,不带有附加的严格结构条件,即不包括径向带有严格周期性的布拉格光纤,以及其他光子带隙结构的多层光纤。图 1 给出了多层光纤的一个典型结构,该光纤的分层在横截面上表现为同心圆环,在折射率上表现为层内均匀的分层阶跃形态。

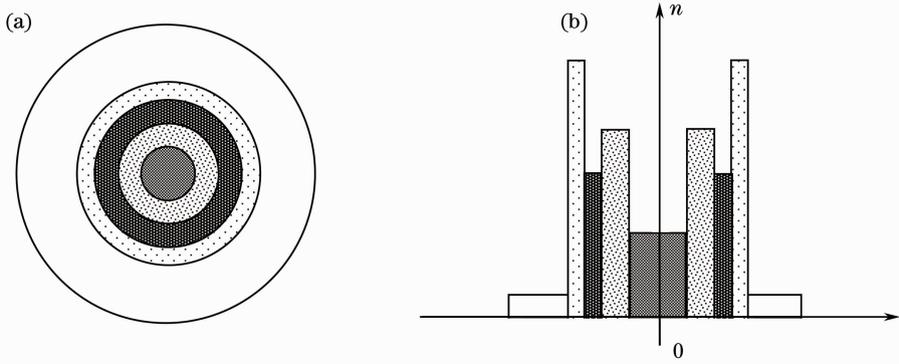


图 1 多层光纤结构示意图。(a)横截面的同心圆环结构;(b)径向的分层阶跃折射率分布

Fig. 1 Structure of multilayer fiber. (a) Concentric rings structure on the cross section; (b) radial distribution of multilayered step index

该光纤纵向均匀、横向非均匀,属于圆对称光波导,可用多层光纤的光波导理论<sup>[21,22]</sup>。在圆柱坐标系下,这类波导支持的模式可以被描述为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix}(x, y, z, t) = \begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{h} \end{pmatrix} r \exp(jm\varphi) \times \exp(j\beta z) \exp(-j\omega t), \quad (1)$$

式中  $\omega$  为该模式单频振荡的角频率,  $\beta$  为该模式的传输常数。

通常情况下光纤不同层间折射率的差异并不显

著,弱导近似可用,求解光场只需要在所有的 6 个分量中求解其中一个独立分量。取横向的一个场分量  $e_y(r, \varphi)$ , 在极坐标系下,每个折射率均匀分布的层内,  $e_y$  满足该层上的贝塞尔方程:

$$\frac{d^2 e_y}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{de_y}{dr} + \left( k_0^2 n_i^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) e_y = 0, \quad (2)$$

式中  $m$  是贝塞尔方程的阶数,  $n_i$  是第  $i$  层的折射率,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  是波长  $\lambda$  的光在真空中的波数。求解(2)式可以得到  $LP_{ml}$  模式横向场分布的表达式如下:

$$e_y(r, \varphi) = \begin{cases} [a_i J_m(u_i r) + b_i N_m(u_i r)] \exp(jm\varphi), & k_0 n_i > \beta_{ml} \\ [a_i I_m(w_i r) + b_i K_m(w_i r)] \exp(jm\varphi), & k_0 n_i < \beta_{ml} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $J, N, I, K$  分别是第一、第二类贝塞尔函数以及第一、第二类变形的贝塞尔函数,  $m$  表示对应的阶数。 $\beta_{ml}$  是满足(2)式  $m$  阶贝塞尔方程的第  $l$  个解,也

就是光纤  $LP_{ml}$  模式的传输常数,  $u_i^2 = k_0^2 n_i^2 - \beta_{ml}^2$ ,  $w_i^2 = \beta_{ml}^2 - k_0^2 n_i^2$ ,  $a_i, b_i$  是给定模式下第  $i$  层表达式中的系数。写入均匀光栅后,光纤的径向折射率分布

表现出周期性的变化,折射率可表示为

$$n_g(i) = \begin{cases} n_{dc}(i) + n_{ac}(i) \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right), & r_i > r > r_{i-1}, i \leq i_{co} \\ n_{cl}, & r \geq r_{ico} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $i_{co}$  为芯区的总层数,  $r_i$  为第  $i$  层的半径,  $\Lambda$  为光栅的周期,  $n_{dc}(i)$  和  $n_{ac}(i)$  分别为芯区第  $i$  层的平均折射率和折射率变化量,这两个量在每一层内均为常数。根据光纤的耦合模理论<sup>[23,24]</sup>,把光栅的影响看成光纤这一正规光波导基础上的微扰,其中传输的光场可以描述为

$$E_y(r, \varphi, z) = \sum_p [A_p(z) \exp(j\beta_p z) + B_p(z) \exp(-j\beta_p z)] e_{yp}(r, \varphi), \quad (5)$$

式中  $p$  为模式的标号,  $A_p(z)$ 、 $B_p(z)$  分别表示第  $p$  个模式沿  $z$  轴正向和负向传输的慢变振幅,  $e_{yp}$  满足(2)式,是光纤光栅(3)式对应的正规光波导支持的模式,标号  $p$  不同的  $e_{yp}$  相互正交。光场  $E_y$  满足  $n_g$  上的亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 E_y + k_0^2 n_{g2} E_y = 0. \quad (6)$$

把(4)式代入(5)式,忽略慢变振幅的高阶微分项,  $A(z)$ 、 $B(z)$  满足如下的关系:

$$\frac{dA_q}{dz} \exp(j\beta_q z) - \frac{dB_q}{dz} \exp(-j\beta_q z) = j \sum_p K_{pq} \{ A_p [\exp(j\theta_{p1} z) + \exp(j\theta_{p2} z)] + B_p [\exp(-j\theta_{p1} z) + \exp(-j\theta_{p2} z)] \}, \quad (7)$$

式中  $q$  为模式标号,用于与求和的模式标号  $p$  相区分。 $\theta_{p1} = \beta_p + 2\pi/\Lambda$ ,  $\theta_{p2} = \beta_p - 2\pi/\Lambda$ ,第  $p$  个模式和第  $q$  个模式之间的耦合系数  $K_{pq}$  满足

$$K_{pq} = \frac{k_0}{2} \sum_i n_{ac}(i) \iint_{s(i)} e_{yp} e_{yq}^* r dr d\varphi, \quad (8)$$

式中  $s(i)$  是第  $i$  层的区域。通常 FBG 主要表现出正向基模与反向模式间的耦合,利用同步近似,它们之间的耦合关系可以进一步简化为

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dz} &= j\sigma R + jkS, \\ \frac{dS}{dz} &= -j\sigma R - jk^* S, \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $\sigma = \frac{1}{2}(\beta_p + \beta_i) - \pi/\Lambda$ ,  $k = K_{pi}$ ,  $R = A_i \exp(j\sigma z)$ ,  $S = B_p \exp(-j\sigma z)$ , 下标  $f$  表示基模。对于最为关心的正反向基模之间的耦合,(8)式中的参量可以进一步简化为:  $\sigma = \beta_i - \pi/\Lambda$ ,  $k = k^* = \frac{1}{2}k_0 \sum_i n_{ac}(i) \iint_{s(i)} |e_{yf}|^2 r dr d\varphi$ ,  $R = A_i \exp(j\sigma z)$ ,  $S = B_i \exp(-j\sigma z)$ 。

从上述多层光纤光栅的分析推导过程可以得出,影响光栅特性最主要的因素仍然来自于光栅周期、调制深度以及光纤支持的模式。非周期性多层光纤的折射率在截面上的同心圆环分布呈现出圆对称的特征,对这类光纤来说,多层结构对于在其上写入光栅的影响主要体现在两个方面:光纤支持的模式和光栅的耦合系数。前者通过传输常数影响光栅

反射中心所在的位置,模式的分布形式和光纤的光敏层位置则共同对光栅的耦合系数  $k$  造成影响。

以图 2(a)所示的多层光纤为例,该光纤在 C 波段具有良好的单模特性,图 2(b)给出了 1550 nm 波长下该光纤的基模场分布。与普通单模光纤的类高斯型基模分布不同,该光纤的基模场分布最大值不在模式的中心,而是位于最内侧高折层所在的圆环附近。根据前述理论分析对该光纤进行模拟计算得到的 FBG 正反向基模耦合特性如图 3 所示。当光敏层  $i_{ph}$  分别位于光纤芯区的第 2、4、6 层(分别对应最内侧、中间及最外侧高折层)时,光栅反射谱的变化主要表现为峰值深度的降低和带宽的减小,这是由于基模在上述各层的填充因子逐渐下降,因而导致  $k$  值的降低。计算用到的其他参数包括:  $\Lambda = 537.5 \text{ nm}$ ,  $n_{ac}(i) = 1 \times 10^{-4}$ 。

无论是理论模型还是模拟计算的结果,多层光纤上写入的 FBG 都表现出了与普通光纤明显的相似性。从理论模型来看,它们最明显的区别来自于光纤的分层光敏和模场分布特性。通过有针对性的结构设计和调整 FBG 写入参数,多层光纤的 FBG 有能力提供与普通光纤完全一致的光栅特性。除此以外,由于多层光纤的结构非常灵活,还可以通过结构设计指定光敏层的位置和掺杂浓度,以更好地满足使用中的特殊要求。

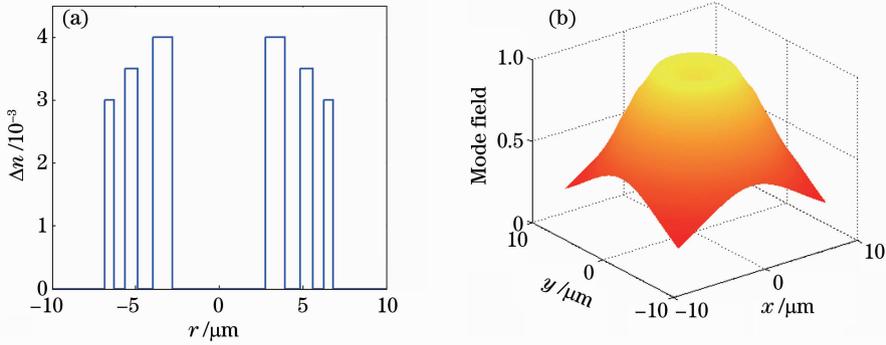


图 2 单模多层光纤的(a)折射率结构和(b)基模场分布

Fig. 2 (a) Index distribution of a multilayer single mode fiber and (b) field distribution of its fundamental mode

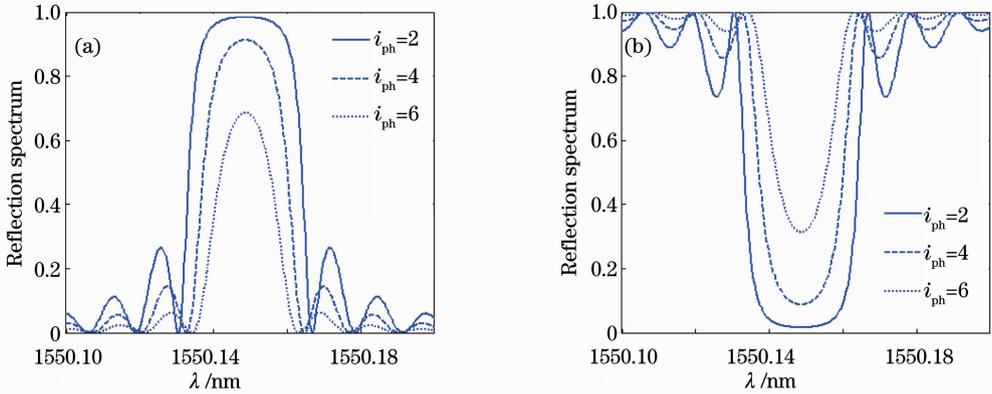


图 3 不同光敏层位置下正反向基模耦合的光栅(a)反射谱和(b)透射谱

Fig. 3 (a) Reflection and (b) transmission spectra of gratings in different single layers making the fundamental modes coupling between opposite directions

### 3 多层光纤光栅的实验写入和测试

利用实验室自制的两类多层结构单模光纤,进行了氢载后的光栅写入实验,以实际测试光栅特性。实验所用的光纤在  $1.40 \times 10^7$  Pa 的压力下进行了 3 周的室温氢载以增强光纤的光敏性<sup>[25~28]</sup>。两类光纤光栅的实验条件相同,其中关键写入条件包括:系统所用紫外写入光源为德国 Lambda Physik 公司生产的 ComPex205KrF 准分子激光器,波长为 248 nm。激光器的输出能量足以保证光纤中各光敏层皆发生变化。实验所用相位掩模板周期为 1075 nm(光栅周期为 537.5 nm)。写入的光栅长度为 60 mm。

#### 3.1 普通多层光纤上写入光栅的实验

这里的“普通”用于与稀土掺杂的多层光纤相区分,意为折射率的上升仅由 Ge 的掺入造成。石英基中掺入 Ge 被认为是导致光纤紫外光敏性以及氢载增敏的主要原因<sup>[29,30]</sup>。图 4(a)给出了实验室自制的普通多层光纤径向折射率分布,该结果由 York 公司的 P104 预制棒分析仪测量得到。该预制棒外

径为 14 mm,为了更清楚地显示结构细节,图中只给出了芯区附近  $-1.5 \sim 1.5$  mm 范围内的折射率分布,从该结果可以看到实验室自制的多层光纤具有清晰的分层边界。该预制棒被拉制成包层直径为 125  $\mu$ m 的光纤,在 Photon Kinetics 公司的 2210 光纤分析系统上,采用传输功率法测量得到的截止波长为 1505 nm。图 4(b)是显微镜下该光纤端面的照片,该照片使用白炽灯的宽带可见光作为光源,图片的明暗主要表现折射率结构,不表现该光纤在通信波段下的基模场分布。

氢载后,采用相位掩膜法在该光纤上紫外写入 FBG 的反射谱和透射谱(图 5)。从写入过程和结果来看,氢载后光纤具有优良的光敏性。该光栅峰值位于 1555.488 nm,透射深度为 22.5 dB,反射峰为 3 dB,带宽为 0.098 nm,主峰形状良好,光栅的各项性能均能符合光纤器件用 FBG 的要求。与普通的单层芯单模光纤相比,该光纤主峰左侧的小谐振峰稍明显,这是由于该光纤基模模场直径稍大于普

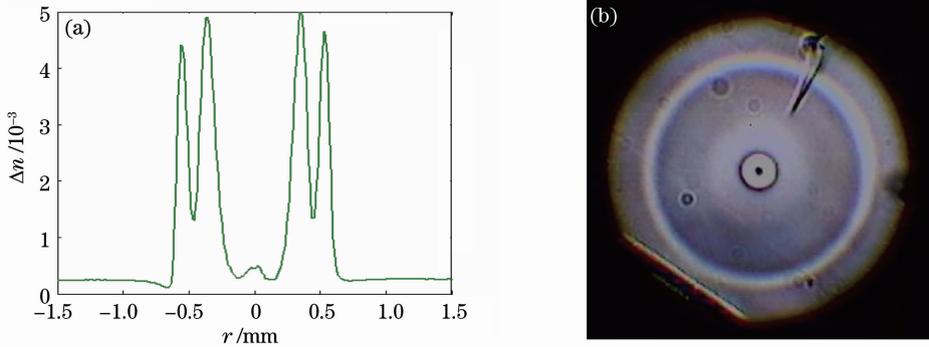


图 4 实验室自制普通多层光纤的(a)预制棒折射率测试结果及(b)端面显微照片

Fig. 4 (a) Preform test result and (b) cross-section microphotograph for laboratory-fabricated ordinary multilayer fiber

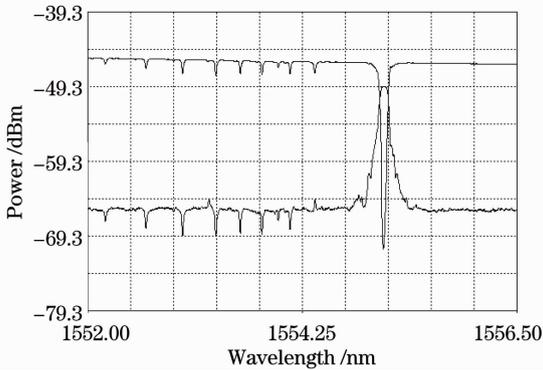


图 5 实验室自制普通多层光纤上写入光栅的透射谱(上方曲线)和反射谱(下方曲线)

Fig. 5 Reflection (lower curve) and transmission (upper curve) spectra of the grating written in laboratory-fabricated ordinary multilayer fiber

通光纤,因而基模与包层模的耦合系数稍高造成的。

### 3.2 掺铒多层光纤上写入光栅的实验

对实验室自制的掺铒多层光纤进行氢载后,在同样条件下进行了光栅写入的实验,也得到了类似的结果。实验所用的掺铒多层光纤如图 6 所示,该光纤在两个高折层进行了不同功能的掺杂:内侧高折层为掺 Ge 层,用于在氢载后提供足够的光敏性;

外侧高折层为掺 Er 层,利用掺入的稀土离子  $Er^{3+}$  提供光纤的增益特性,为了得到更好的掺杂特性,该光纤中采用了  $Bi^{3+}-Ga^{3+}-Al^{3+}$  共掺的  $Er^{3+}$  掺杂技术。该光纤中心层为低折层以扩大光纤的模场直径;两高折层之间也设计了一个低折层,该层既有利于扩大模场面积,又相对隔离了两种各不同的掺杂元素。在改进的化学气相沉积(MCVD)法结合溶液掺杂技术这一较为成熟的稀土掺杂光纤预制棒制作方法下,由于稀土掺杂相关元素在制作过程中的严重扩散,此类光纤两高折层之间的低折层制作难度很大。本课题组经过大量的理论分析和实验摸索,掌握了该类结构的制作方法,从图中可以看到,芯区的分层边界非常清晰。该光纤预制棒外径为 13.5 mm,拉制光纤包层外径为  $120 \mu m$ ,实测截止波长为 1196 nm,1550 nm 模场直径达到 18.0 nm,很好地实现了设计要求。

氢载后在该光纤上采用相位掩膜法紫外写入 FBG 的反射谱和传输谱如图 7 所示。从写入过程和结果来看,氢载后的掺铒多层光纤也具有优良的光敏性。该光栅峰值位于 1554.467 nm,透射深度为 20.3 dB,反射峰为 3 dB,带宽为 0.067 nm,主峰

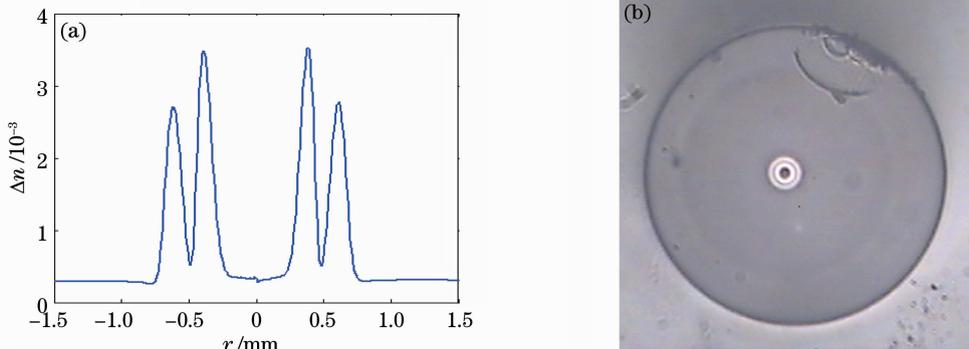


图 6 实验室自制掺铒多层光纤的(a)预制棒折射率测试结果及(b)端面显微照片

Fig. 6 (a) Preform test result and (b) cross-section microphotograph for laboratory-fabricated  $Er^{3+}$  doped multilayer fiber

形状良好,光栅的各项性能均符合光纤器件用 FBG 的要求。图中透射谱的平坦部分没有表现出明显的  $\text{Er}^{3+}$  吸收特性,是因为显示的波长范围很窄,并且避开了波动最剧烈的 1530 nm 波段。

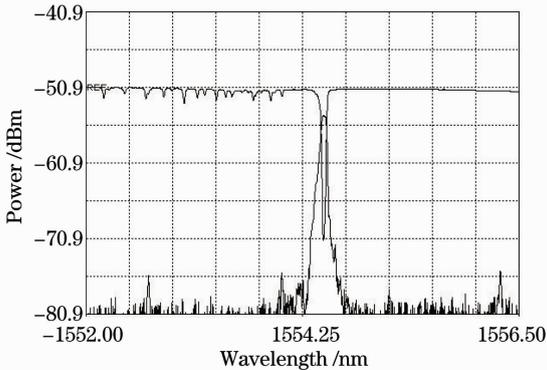


图 7 实验室自制掺铒多层光纤上写入光栅的透射谱(上方曲线)和反射谱(下方曲线)

Fig. 7 Reflection (lower curve) and transmission (upper curve) spectra of the grating written in laboratory-fabricated  $\text{Er}^{3+}$  doped multilayer fiber

值得指出的是,相比普通单层单模光纤和实验室自制的普通多层光纤,实验室自制的掺铒多层光纤掺 Ge 层折射率更低,说明在该区域的含 Ge 量低于前述两种。同时,该光纤的折射率分布使基模具有更大的模场面积,而分层掺杂的方式进一步降低了基模在掺 Ge 层的填充因子。从以上因素来看,该光纤的光敏性应该远低于前述两种光纤,然而在氢载后的光栅写入实验中,并未观察到光栅加深过程与前述两种光纤的明显区别。从写入结果来看,两类多层光纤光栅峰值透射率都处于 20 dB 水平,计算得到的反射率差值不足 1%,两类光纤的写入结果也未表现出能说明光敏性差异的明显特征。因而,掺铒多层光纤必然存在某些增强光敏性的因素,抵消前述造成该光纤光敏性劣化的因素,使光纤仍能具备足够的光敏性。针对该问题的研究仍在进行中,目前认为主要原因在于,分层掺杂及隔离层的处理方式导致了芯区层间应力的增加,而应力是已知的导致光纤光敏性的另一个重要原因<sup>[31]</sup>。

## 4 结 论

应用耦合模理论分析了非周期性多层光纤上写入 FBG 的光纤特性。可以看到,多层光纤主要从模场分布和耦合系数的角度对 FBG 产生影响,而对光栅的特性不造成根本性的变化,因此以多层光纤为基础写入光栅构成一体化器件是可行的。

以实验室自制的两类多层光纤为基础,氢载后进行了 FBG 的紫外写入,实验所用多层光纤都具有边界清晰的高低交错折射率结构。该实验验证了理论分析的结论,证实了多层光纤氢载增敏及在其上写入光栅构成器件的可行性。除此以外,掺 Ge 层的含 Ge 量及填充因子较低的掺铒多层光纤氢载后写入光栅的实验证明,该光纤在氢载后具有与普通光纤相当的光敏性。这一现象说明分层的异种元素掺杂可能导致芯区应力增加,从而辅助提高光纤光敏性。

## 参 考 文 献

- 1 A. M. Vengsarkar, W. A. Reed. Dispersion-compensating single-mode fibers: efficient designs for first- and second-order compensation[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11): 924~926
- 2 Lars Grüner-Nielsen, Marie Wandel, Poul Kristensen *et al.*. Dispersion-compensating fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3566
- 3 Xiangqing Tian, Xiaoping Zhang. Dispersion-flattened designs of the large effective-area single-mode fibers with ring index profiles [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **230**(1-3): 105~113
- 4 Shizhuo Yin, Kun-Wook Chung, Hongyu Liu *et al.*. A new design for non-zero dispersion-shifted fiber (NZ-DSF) with a large effective area over 100  $\mu\text{m}$  and low bending and splice loss [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**(1-6): 225~232
- 5 Stig Knudsen, Torben Veng. Large effective area dispersion compensating fiber for cabled compensation of standard single mode fiber [C]. Optical Fiber Communication Conference 2000. TuGS
- 6 N. G. R. Broderick, H. L. Offerhaus, D. J. Richardson *et al.*. Large mode area fibers for high power applications [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 1999, **5**(2): 185~196
- 7 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 8 C. R. Giles. Lightwave applications of fiber Bragg gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1391~1404
- 9 K. O. Hill, G. Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 10 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 11 Xueliang Zhang, Zhou Meng, Zhengliang Hu. Sensing system with Michelson-type fiber optical interferometer based on single FBG reflector[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(11): 110601
- 12 Jiacheng Hu, Fuchang Chen, Chengtao Zhang *et al.*. Application of high-precision temperature-controlled FBG filter and light source self-calibration technique in the BOTDR sensor system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(7): 072901
- 13 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406006
- 张乐, 吴波, 叶雯等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406006
- 14 Wu Yonghong, Shao Changjiang, Qu Wenjun *et al.*. Simplified time-dependant optical-mechanical transformation equation for FBG strain sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1965~1970
- 吴永红, 邵长江, 屈文俊等. 简化的光纤光栅应变传感器光力转

- 换的时变方程[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 1965~1970
- 15 Ning Tigang, Pei Li, Hu Xudong *et al.*. Dual-wavelength of single polarized fiber laser based on common active fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1868~1871  
宁提纲, 裴丽, 胡旭东等. 单偏振双波长非保偏有源掺杂光纤激光器[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1868~1871
- 16 Feng Suchun, Xu Ou, Lu Shaohua *et al.*. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser using polarization-maintaining fiber Bragg gratings in symmetrical linear cavities [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1886~1889  
冯素春, 许鸥, 鲁韶华等. 基于保偏光纤光栅的对称腔多波长掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1886~1889
- 17 G. E. Villanueva, P. Perez-Millan, J. Palaci *et al.*. Dual-wavelength DFB erbium-doped fiber laser with tunable wavelength spacing[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(4): 254~256
- 18 Faxiang Zhang, Wentao Zhang, Fang Li *et al.*. DFB fiber laser hydrophone with band-pass response [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(22): 4320~4322
- 19 Ning Tigang, Jian Shuisheng, Pei Li *et al.*.  $4 \times 10$  Gb/s 412 km DWDM dispersion compensation using multiwavelength chirped fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 839~841  
宁提纲, 简水生, 裴丽等.  $4 \times 10$  Gb/s 412 km 密集波分复用光纤光栅色散补偿的实验 [J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 839~841
- 20 Pei Li, Jian Shuisheng, Xie Zenghua *et al.*. Dispersion compensation optical fiber grating with low ripple coefficient[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 336~339  
裴丽, 简水生, 谢增华等. 低纹波系数色散补偿光纤光栅的研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(3): 336~339
- 21 A. W. Snyder, J. D. Love. *Optical Waveguide Theory*[M]. New York: Chapman and Hall, 1983
- 22 Chongqing Wu. *Optical Waveguide Theory* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
- 23 Allan W. Snyder. Coupled-mode theory for optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(11): 1267~1277
- 24 Wei-ping Huang. Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(3): 963~983
- 25 G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 823~825
- 26 L. Dong, J. L. Archambault, E. Taylor *et al.*. Photosensitivity in tantalum-doped silica optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(9): 1747~1750
- 27 P. L. Swart, A. A. Chtcherbakov, W. L. Joubert *et al.*. Study of the pressure dependence of hydrogen diffusion in optical fiber by an interferometric technique [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **217**(1-6): 189~196
- 28 P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi *et al.*. High pressure  $H_2$  loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in  $GeO_2$  doped optical fibres[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(13): 1191~1193
- 29 Hideo Hosono, Yoshihiro Abe, Donald L. Kinser *et al.*. Nature and origin of the 5-eV band in  $SiO_2:GeO_2$  glasses[J]. *Phys. Rev. B*, 1992, **46**(18): 11445~11451
- 30 T. E. Tsai, C. G. Askins, E. J. Friebele. Photoinduced grating and intensity dependence of defect generation in Ge-doped silica optical fiber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(4): 390~392
- 31 D. L. Williams, B. J. Ainslie, J. R. Armitage *et al.*. Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibres[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1): 45

栏目编辑: 李文喆