

文章编号 : 0258-7025(2002)10-0911-04

氢载长周期光纤光栅退火的分析和模拟

童 治, 魏 淮, 王目光, 王 智, 谢增华, 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

提要 以三层阶跃折射率波导结构和耦合模理论为基础, 考虑到氢分子引起的折射率变化, 针对氢载长周期光栅提出了一个简单的模型对长周期光栅的退火进行了分析和模拟, 所得到的结果与实验符合得很好。

关键词 长周期光纤光栅, 氢载, 退火, 耦合模

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

Analysis and Simulation on Annealing of Long-period Fiber Grating in Hydrogen-loaded Fiber

TONG Zhi, WEI Huai, WANG Mu-guang, WANG Zhi, XIE Zeng-hua, JIAN Shui-sheng

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

Abstract Considered the refractive index changes caused by hydrogen molecular, this paper developed a simple model based on three-layer step index waveguide and coupled-mode theory to analyze and simulate the annealing of long-period fiber grating inscribed in hydrogen-loaded fiber. The results agree well with the experiments.

Key words long-period fiber grating, Hydrogen-loaded, annealing, coupled-mode

1 引 言

近年来, 紫外写入光纤光栅由于其优良的性能和广泛的用途受到了普遍的关注和研究。为制作高性能光纤光栅, 人们采用了多种措施以提高光纤的紫外光敏性能。其中常温高压氢载增敏技术以其低廉的成本, 简易的制备和大幅度的提高光纤光敏性而获得了广泛的应用^[1]。其基本原理是普通光纤在高压氢气中放置一段时间后, 氢分子逐渐扩散到光纤的包层和纤芯中; 当特定波长的紫外光(一般是 248 nm 或 193 nm)照射氢载光纤时, 纤芯被照部分中的氢分子即与锗发生反应形成 Ge-OH 和 Ge-H 键, 从而使该部分的折射率发生永久性的增加。通过氢载处理的普通光纤的纤芯折射率变化幅度可从 10^{-5} 提高到 10^{-2} 。但由于写入后光栅中残存的氢分子的扩散运动以及反应后存在不稳定的 Ge-OH 键, 会造成光栅光学特性的不稳定, 因此为便于应用

必须用高温退火的方法提高光纤光栅的稳定性。与刚写入后相比较, 退火后的光栅性质, 如谐振峰位置和耦合深度发生了一定的变化, 特别是对于长周期光纤光栅这种变化尤其显著^[2]。

本文以三层阶跃折射率波导结构为基础, 用弱导近似和耦合模理论分析和模拟了由于退火造成的光纤波导结构变化所引起的谐振波长及峰值损耗的改变。并通过与实验结果比较验证了这一模型的正确性。

2 理论模型

首先不考虑氢载和退火对光栅特性的改变, 针对特定的长周期光栅建立模型, 以模拟其模式耦合和频谱特性。考虑到长周期光纤光栅制作时需要剥去涂覆层, 形成裸光纤后再进行紫外写入, 因此普通氢载长周期光栅可以看作以空气为外包层的三层阶

收稿日期 2001-09-10; 收到修改稿日期 2001-12-03

基金项目 国家“八六三”计划资助项目(资助号 863-317-02-04-99)

作者简介 童治(1977—)男, 江苏高邮人, 北方交通大学光波技术研究所博士生, 主要从事光通信、光器件方面的研究。

E-mail: tongzhi11@263.net

跃折射率波导结构(如图1),这种波导结构可传输多个模式。根据文献[3]的结论,在非闪耀的长周期光纤光栅结构中,只有阶次为1的前向混合模式($HE_{1\nu}$ 或 $EH_{1\nu}$)能与基模发生耦合,而低阶的 $EH_{1\nu}$ 模由于在纤芯中功率分布很小,不能形成有效的能量耦合,因此在大多数情况下,只考虑基模与 $HE_{1\nu}$ 模(相当于 $LP_{0\nu}$ 模)发生耦合的情况。

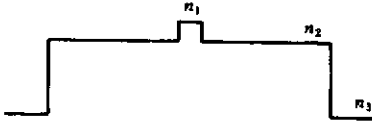


图1 三层阶跃折射率波导结构剖面
Fig.1 Three-layer step index waveguide

根据文献[4]的结论,尽管三层阶跃波导结构不满足弱导条件,但对于远离截止的模式其模场分布形式与弱导光纤的分布一致,并且光场的纵向分量远远小于横向分量,因此可以采用标量线偏振近似法求解各模式的传播常数和场分布,相比文献[3]采用严格的矢量法求解,标量近似简洁明了,便于数值求解,并且可以得到足够的精度,也可以用于更复杂的波导结构,如B/Ge光纤的分析。

设波导中存在 $\{0, e_y, e_z, h_x, 0, h_z\}$ 的线偏振模式,利用边界连续条件写出三层波导的特征方程^[5],并且只考虑零阶情况,可以得到 $LP_{0\nu}$ 诸模式的传播常数 $\beta_{0\nu}$,进一步可以获得波导中的场分布。根据耦合模方程^[6]可知长周期光纤光栅基模输出归一化功率(即透谱)的表达式为

$$T = \cos^2(\sqrt{k_{01-0\nu}^2 + \delta^2}L) + 1 \times \left(1 + \frac{k_{01-0\nu}^2}{\delta^2}\right)^{-1} \sin^2(\sqrt{k_{01-0\nu}^2 + \delta^2}L) \quad (1)$$

式中 L 为光栅长度, δ 为相位失配度,不考虑包层的折射率改变和光栅的啁啾有

$$\delta = \frac{1}{2}(\beta_{01} + \Delta\beta_{01} - \beta_{0\nu}) - \frac{\pi}{\Lambda} \quad (\nu = 2, 3, 4, \dots) \quad (2)$$

式中 $\Delta\beta_{01}$ 表示由于紫外光致折变导致的基模传播常数的增加, Λ 为长周期光栅的周期。当 $\delta = 0$ 时可确定光栅谐振峰的位置

$$\lambda_{\max} = (n_{\text{eff}}^{01} + \Delta n^{01} - n_{\text{eff}}^{0\nu})\Lambda \quad (\nu = 2, 3, 4, \dots) \quad (3)$$

n_{eff}^{01} 和 $n_{\text{eff}}^{0\nu}$ 表示基模和第 ν 个包层模的有效折射率,因此求出各模式的传播常数后就可以确定谐振峰的位置。

$k_{01-0\nu}$ 为基模和包层模间的互耦合系数,用线偏振模形式表示为

$$k_{01-0\nu} = \frac{\omega\epsilon_0 n_1 \Delta n \iint_{\text{core}} \vec{e}_{y01} \cdot \vec{e}_{y0\nu} r dr d\varphi}{2} \quad (4)$$

式中 ω 为光频, ϵ_0 为真空介电常数, Δn 为折射率平均变化幅度, \vec{e}_{y01} 和 $\vec{e}_{y0\nu}$ 分别为基模和包层模的横向电场分布,它们满足功率归一化条件

$$P = \frac{1}{2} RE \iint_{\infty} (\vec{e}_y \times \vec{h}_x^*) r dr d\varphi = 1 \text{ W} \quad (5)$$

通过标量法及式(5)求出场分布后就可以按式(4)求出耦合系数,至此对于一个给定的长周期光栅,其特性就可以确定了。

下面考虑由于氢载及退火对光栅折射率也即对上述三层波导结构的影响。光纤的氢载使纤芯和包层的折射率增加,由于氢分子在高压作用下均匀扩散到纤芯和包层中,可以认为两区域折射率的增加是相等的,定义为 Δn_H ,另外由于写入时纤芯中一部分氢由于发生反应而消耗,此时纤芯中由于氢分子减少而导致的折射率下降为 Δn_{HR1} ,而纤芯由于紫外写入导致的折射率增加为 Δn_B ;由于紫外写入过程中会产生高温,导致包层中的氢也向外扩散,从而使包层折射率下降,记为 Δn_{HR2} 。而退火对于折射率变化的贡献有两方面:一方面可以清除残留在光纤中的未反应的氢分子,这会导致纤芯和包层折射率回复为未氢载前的值;另一方面,退火可以破坏光栅写入后纤芯中的一些不稳定的Ge-OH和Ge-H键,使纤芯的折射率降低,并且退火的温度不同折射率降低的幅度也不同,温度越高折射率降低越多^[7]。定义这种折射率变化为 Δn_{CA} 。现在假设未氢载和写入时光纤纤芯和包层的折射率分别为 n_1, n_2 ,则根据上面的讨论可以得到经过氢载,写入后纤芯和包层的折射率分别为

$$n_{1W} = n_1 + \Delta n_H + \Delta n_B - \Delta n_{HR1}$$

和

$$n_{2W} = n_2 + \Delta n_H - \Delta n_{HR2} \quad (6)$$

但此时光纤中各部分的氢分子浓度也不同,并且是在动态变化的,主要是由包层扩散到纤芯,因此会出现文献[8]所观察到的现象,为简便起见这里只考虑平均折射率变化。经过退火后的纤芯和包层折射率的表达式为

$$n_{1A} = n_1 + \Delta n_B - \Delta n_{CA} \text{ 以及 } n_{2A} = n_2 \quad (7)$$

只要根据(6)(7)式求出纤芯和包层的折射率值,再利用上面的三层波导模型,即可对氢载长周期光纤光栅的退火前后频谱特性进行模拟。以上就是我们

所建立的模型。

3 数值模拟结果及实验

根据模型,采用典型参数对长周期光栅的退火进行了模拟。取未氢载时的光纤参数为 $n_1 = 1.4585$, $n_2 = 1.45$, $n_3 = 1$, 纤芯半径 $2.625 \mu\text{m}$, 包层半径 $62.5 \mu\text{m}$, 紫外光致折射率调制为 $\Delta n_B = 7 \times 10^{-4}$, 光栅周期 $\Lambda = 400 \mu\text{m}$ 。根据文献 [7] 中的实验数据,取 $\Delta n_H = 10 \times 10^{-4}$ 。同时根据文献 [9] 的实验数据,在 250°C 退火后,纤芯的紫外光致折射率平均增量相比退火前下降 33%, 另外取 $\Delta n_{HR1} = 3 \times 10^{-4}$, $\Delta n_{HR2} = 3 \times 10^{-4}$ 。至此,可以确定所有的关键数据。

图 2 计算了 LP_{05} 谐振峰在退火前后的变化,可见退火后其谐振波长向短波长移动了 50 nm,而峰值损耗却增大了 7 个多 dB,这是与短周期光纤光栅的退火情况完全不同的。造成这种现象的原因主要是由于在退火前后其纤芯和包层折射率差的变化。退火后纤芯和包层折射率差变小导致谐振波长向短波长移动,而峰值损耗的增加是由于退火后耦合系数 k 加大造成的,由(1)式可知当 $kL \leq \pi/2$ 时退火后峰值损耗加大,而 $kL > \pi/2$ 时退火后峰值损耗变小。周期光纤光栅退火特性表明了其对于波导结构微小变化的敏感性,而这是由于长周期光栅的模式耦合是由基模向前向包层模式耦合决定的。在计算中发现,由氢分子导致的折射率变化 Δn_{HR1} 和 Δn_{HR2} 对退火的影响很大,很小的变化就能导致退火后谐振峰的剧烈变化,波长变化范围可以从 20 nm 到 80 nm。

图 3 计算了从 LP_{02} 到 LP_{06} 5 个谐振峰的退火情况,由图可见,各个谐振峰的退火情况不同,初始峰

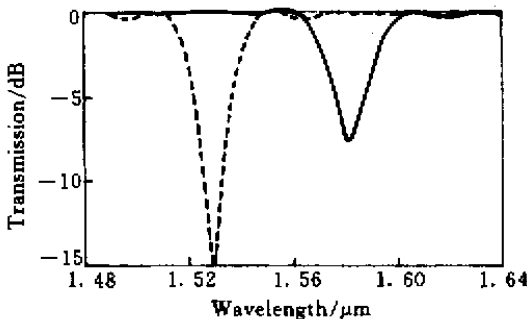


图 2 计算所得的长周期光纤光栅在退火前(实线)和退火后(虚线)的透射谱形状

Fig.2 Calculated transmission spectra of a LPG before (solid line) and after annealing (dashed line)

值损耗越大的谐振峰退火后变化越大,说明初始写入强度越大,则退火后峰值损耗的变化越大,也即耦合系数 k 的变化越大。

我们进行了长周期光栅的氢载、写入和退火实验。将康宁 SMF-28 光纤在 100 atm 下氢载 10 天后,用幅度掩模板配合 Lambda Physik 公司的准分子激光器写入长周期光纤光栅,并使用高精度温控装置在 250°C 下退火 5 h 后用光谱仪进行观察。写入实验设置和退火测量如图 4 5,掩模板周期 $400 \mu\text{m}$,写入光栅长度 35 mm,准分子激光器单脉冲能量密度

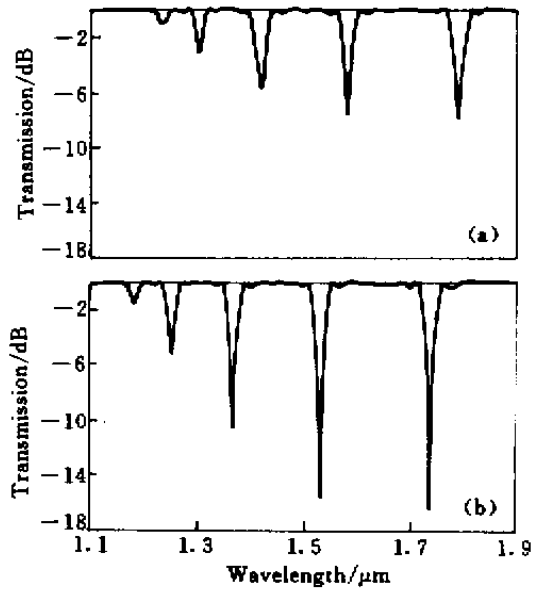


图 3 计算所得的长周期光栅从 LP_{02} 到 LP_{06} 的 5 个谐振峰在退火前(a)和退火后(b)的情况

Fig.3 Calculated LPG's five resonance peaks from LP_{02} to LP_{06} before (a) and after annealing (b)

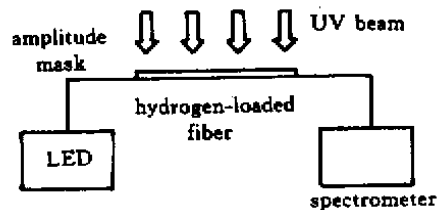


图 4 长周期光栅写入实验装置示意图

Fig.4 Diagram of LPG inscription experiments

为 $90 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 重复频率为 15 Hz。由于没有合适的宽带光源,只对 LP_{05} 的谐振峰进行了观察。实验结果如图 6,退火前后谐振波长向短波长移动 48 nm,而峰值损耗从 -7.4 dB 增加为 -14.4 dB ,可见与上述理论计算的规律符合得较好。但也有少数峰值损耗

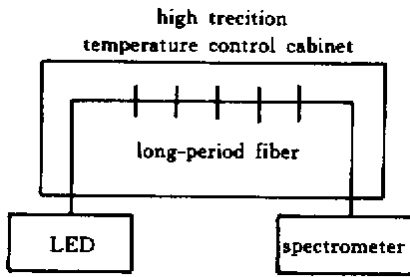


图5 光栅退火的控制和测量

Fig.5 Measurement of annealing

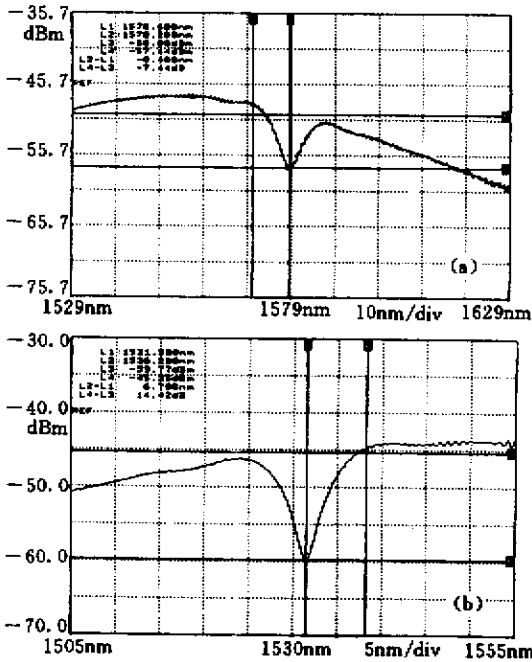


图6 测量得到的长周期光栅在退火前(a)和退火后(b)的透射谱形状

Fig.6 Measured transmission of LPG before (a) and after annealing (b)

退火后变小的情况,我们认为这是由于氢载的不均匀性和写入过程中的随机因素造成的,而且用以上的模型也能进行解释。同时实验表明,退火后的波长变化与氢载量的大小有很大关系,氢载量越大则退火后波长变化越大,这可以认为是

氢含量大时 Δn_{HR2} 变大,即氢分子从包层逸出速度加快从而使纤芯和包层折射率差变大的结果。总结实验结果,为了获得良好的一致性,必须保证光栅氢载条件、写入状态和退火状态的严格一致。

4 结 论

本文在三层阶跃折射率波导结构的基础上,提出了一个简单的模型以分析和模拟氢载长周期光纤光栅的退火情况,与实验结果符合得很好。通过计算得出长周期光纤光栅退火后谐振波长和峰值损耗都有较大变化,且与短周期光栅明显不同,并且与氢载量有很大关系。

参 考 文 献

- 1 P. J. Lemaire. Reliability of optical fibers exposed to hydrogen: prediction of long-term loss increases [J]. *Opt. Eng.*, 1991, **22**: 780 ~ 781
- 2 Chen Genxiang, Liu Chunling, Li Tangjun *et al.*. Study on long-period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(5): 624 ~ 628 (in Chinese)
- 3 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760 ~ 1773
- 4 Kong Mei, Zhou Wen, Tang Weizhong. Analysis of guided- to cladding mode coupling by long-period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(3): 369 ~ 373 (in Chinese)
- 5 Wu Chongqing. *Theory of Optical Waveguide* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000 (in Chinese)
- 6 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277 ~ 1294
- 7 H. Patrick, S. L. Gilbert. Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(5): 2940 ~ 2945
- 8 Guan Bai-ou, Tam Hwa-Yaw, Ho Siu-Lau *et al.*. Growth of long-period gratings in H_2 -loaded fiber after 193-nm UV inscription [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2000, **12**(6): 642 ~ 644
- 9 B. Malo, J. Albert, K. O. Hill *et al.*. Effective index drift from molecular hydrogen diffusion in hydrogen-loaded optical fibres and its effect on Bragg grating fabrication [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(5): 442 ~ 443