

文章编号 : 0253-2239(2002)09-1076-05

# 一种改善长周期光纤光栅热稳定性的方法<sup>\*</sup>

高 侃 蔡海文 陈高庭 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要: 在载氢光纤上利用振幅掩模板来制作长周期光纤光栅, 由于氢气的引入导致光纤光栅的热稳定性变差, 这给制作符合要求的光纤光栅造成很大的困难。从理论和实验两个方面指出了在长周期光纤光栅的制作过程中若适当地降低长周期光纤光栅的含氢量, 并灵活地运用均匀紫外曝光技术, 能够明显地提高长周期光纤光栅的热稳定性。

关键词: 长周期光纤光栅; 热稳定性; 均匀紫外曝光  
中图分类号: TN253 文献标识码: A

## 1 引 言

长周期光纤光栅(LPGF)是一种基于纤芯基模和同向传输的包层模之间耦合的光栅, 它的光栅周期一般为几十到几百个微米。它与普通布拉格(Bragg)光栅相比具有背向反射率低, 带宽宽, 对温度、应力、折射率变化的响应灵敏度高和易于批量制作等优点, 可以被运用于掺铒光纤放大器的增益平坦、放大器自发辐射噪声的抑制以及测量中的光纤传感<sup>[1, 2]</sup>。

制作长周期光纤光栅的方法有许多种<sup>[3]</sup>, 利用振幅掩模板制作长周期光纤光栅由于制作方便、成本低, 是一种较常见的方法。在光纤上用紫外光写入光栅要求光纤具有一定的光敏性, 由于光敏光纤比较昂贵, 而普通的光纤经过载氢处理后也会具有很好的光敏性, 所以人们通常采用后者。但是在载氢光纤上所制成的光纤光栅的热稳定性比较差, 主要表现在退火前和退火后由于光纤折射率的减小导致的长周期光纤光栅透射谱的较大变化。由于在制作光栅时需要对光栅的生长进行实时的监测, 对谐振峰的波长、损耗以及带宽进行精确的控制, 较差的热稳定性给制作符合要求的光纤光栅带来了一定的困难。为了提高光纤光栅的热稳定性, 很多方法被提了出来<sup>[4-6]</sup>。其中人们发现光纤光栅的热稳定性与光栅写入时的条件有很大的关系。写入紫外光的脉冲个数越多、能量越大, 光纤光栅的热稳定

性也就越好, 相反, 如果一个光纤光栅所接受的紫外光辐照时间越短, 它也就越容易发生退化<sup>[4]</sup>。但是如果单纯地增加紫外曝光量, 会引起折变量的大幅度增加, 导致长周期光纤光栅耦合特性的改变, 得不到想要的谱型。鉴于这些, 本文提出了适当地降低载氢光纤含氢量来增加曝光量的方法。基于这一想法, 本文在实验中对比了在不同含氢量的光纤上制作成的长周期光纤光栅的热稳定性, 结果发现由含氢量较低的光纤制作成的光纤光栅由于所受到的辐照时间较长而具有较好的热稳定性。同时还发现在长周期光纤光栅的制作过程中引入均匀紫外曝光技术, 也会明显地改善光纤光栅的热稳定性。

## 2 基本理论

长周期光纤光栅把纤芯中传输的基模(LP<sub>01</sub>模)的能量耦合到正向传输的包层模(HE<sub>1m</sub>模)中, 其谐振波长由下式决定<sup>[1]</sup>:

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}^p) \Lambda, \quad (1)$$

式中  $n_{\text{core}}$  为纤芯中基模的有效折射率,  $n_{\text{clad}}^p$  为  $p$  阶包层模的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅的周期。随着曝光时间的增加, 纤芯平均折射率  $n_{\text{mean}}$  的改变会引起纤芯基模有效折射率  $n_{\text{core}}$  和包层模的有效折射率  $n_{\text{clad}}$  的改变。这样根据(1)式可以知道, 在光栅的制作过程中谐振峰的波长  $\lambda_{\text{res}}$  是不断变化的。对于基模和低阶包层模的谐振波长来讲, 它是一个不断增加的过程。

同时, 在谐振波长处峰的强度  $S$  可以通过解同向传输耦合模方程得出, 它满足下面关系式<sup>[7]</sup>:

\* 上海市科委科学技术发展基金资助课题。

E-mail: gaokanwuxi@yahoo.com.cn

收稿日期 2001-10-11; 收到修改稿日期 2001-11-08

$$S = \sin^2(\kappa L), \quad (2)$$

式中  $L$  为光栅的长度,  $\kappa$  为基模和包层模的耦合系数, 它由下式描述:

$$\kappa = C\pi\delta n_{\text{mod}}/I\lambda_{\text{max}}, \quad (3)$$

$\delta n_{\text{mod}}$  为纤芯折射率调制深度,  $I$  为基模与包层模的重叠因子,  $C$  为一个系数, 对于折射率分布为矩形的光栅来说,  $C = 4\sin(\pi d/\Lambda)\pi$ , 式中  $d$  为一个光栅周期中透光部分的长度。

从上述的公式中可以看出, 长周期光纤光栅的谐振波长主要由纤芯平均折射率  $n_{\text{mean}}$  来决定, 而谐振峰的强度主要是由折射率调制深度  $\delta n_{\text{mod}}$  来决定的, 在其它条件不变的情况下, 纤芯折射率的变化将引起长周期光纤光栅耦合特性的改变。

载氢技术作为一种光纤增敏技术是由贝尔实验室在 1993 年提出的<sup>[8]</sup>, 它可以使普通光纤的光敏性提高 1 ~ 2 个量级。载氢光纤中氢气摩尔分数的饱和值  $H$  与温度  $T$  和压力  $P$  有关<sup>[9]</sup>:

$$H = 6.9 \times 10^{-11} \exp(7.8 \times 10^2/T)P, \quad (4)$$

式中  $T$  为热力学温度值,  $P$  的量纲为 Pa,  $H$  为无量纲值。而氢气在光纤中扩散的时间又取决于光纤的半径  $r_d$  ( $\mu\text{m}$ ) 和  $T$  的高低, 对于一段裸光纤来讲, 扩散时间满足下面的关系式:

$$t_{\text{diff}} = 4.4 \times 10^{-6} \exp(5.2 \times 10^3/T)r_d^2, \quad (5)$$

$t_{\text{diff}}$  量纲为 s, 其中当  $t = t_{\text{diff}}$  时, 光纤中氢气的浓度达到其饱和值  $H$  的 63%。

另外, 由于存在游离的氢气, 光纤在 1245 nm 处存在着一个比较明显的吸收峰。光纤中氢气的摩尔分数  $[H_2]$  可以简单地通过测量每米光纤上这个吸收峰的大小  $\alpha_{1245}$  来确定,  $\alpha_{1245}$  的量纲采用 dB, 它们满足以下的关系:

$$[H_2] = 3.3 \times 10^{-3} \alpha_{1245}. \quad (6)$$

### 3 光纤光栅的热稳定性

根据色心模型的解释, 高压载氢光纤在紫外光的照射下,  $H_2$  和纤芯中的 Ge-O-Si 缺陷发生反应, 缺氧锗缺陷中心中的电子被电离出来, 接着又被附近的具有完整 Ge-O 键四面体结构的 Ge 原子所俘获, 产生了 G(1) 和 G(2) 色心, 同时伴随有 Ge-OH 和 Si-OH 等物质, 这些都引起了纤芯折射率的变化。但是这些被俘获的电子有一部分处于靠近导带的低能量势阱中, 通过热激发这些电子就会返回导带, 并重新构成缺氧锗缺陷中心, 从而导致纤芯折

射率改变量的减小。另外, 由于载过氢的光纤中存在游离的氢分子, 纤芯的折射率将会有所增加。在光纤光栅制作完毕之后, 光纤中的未经反应的氢分子会逐渐逃逸出光纤, 导致光纤折射率的减小, 从而引起谐振峰波长的改变。为了保证光纤光栅在实际应用时折射率的稳定, 在光纤光栅制作完成后一般采用高温退火的方式去去除掉光纤中残留  $H_2$  分子和那些处于亚稳态的缺陷, 但这样导致了光纤折射率的大幅度减小, 引起长周期光纤光栅透射谱的较大变化。根据 Kannan 的解释<sup>[10]</sup>, 增加写入紫外光的能量及延长曝光的时间能使光栅区的温度达到几百摄氏度, 在这种温度下, 那些处于低能量势阱中的电子就会逐渐被激发回导带中, 这相当于一个退火的过程。同时紫外曝光又使这些被热激发回来的电子重新构成色心。这两种过程使得绝大部分电子聚集到高能势阱中, 达到一种相对稳定的状态, 而低能量势阱中的电子将大大减少, 这样也就提高了光纤光栅的热稳定性。

通常掺锗石英光纤的紫外折变量可以用一个指数函数来表示<sup>[11]</sup>:

$$\Delta n = \Delta n_c \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) \right], \quad (7)$$

式中  $\Delta n_c$  为折变量的饱和值,  $E_0$  取决于光纤的光敏性大小,  $\Delta n$  取决于累积的紫外辐照量  $E$ 。从(7)式可以看出在折变量保持不变的条件下, 为了在长周期光纤光栅的制作过程中增加紫外曝光的时间, 很好地提高光纤光栅的热稳定性, 适当地降低光纤的光敏性是一种可行的方法。

另外(见图 1)由于光栅区曝光部分 B 参加反应的氢分子要比被遮挡部分 A 参加反应的氢分子多, 在光栅制作完毕后 B 区中残留的氢分子要比 A 区中的少, 所以当经历退火后 A 区由于氢分子逃逸导致折射率的减小量要比 B 区大, 这就导致纤芯折射率调制深度的增加, 引起谐振峰的损耗的较大变化。为了解决这个问题, 作者应用了均匀紫外曝光技术。

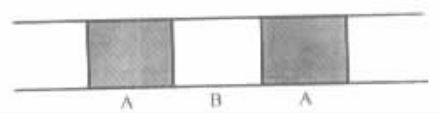


Fig. 1 The core of LPG

### 4 均匀紫外曝光技术

均匀紫外曝光就是在制作光纤光栅的时候去除

掉振幅掩模板,让紫外光均匀地照射到光栅区上一段时间。在利用掩模板制作光栅之后引入均匀紫外曝光技术,使整个光栅区都接收紫外曝光,让整个光栅区残留下来氢分子都有机会参与反应。由于 A 区残留氢气的浓度比 B 区大,在同时接受紫外曝光的时候, A 区所参与反应的氢分子要比 B 区多,这样可减小 A 区和 B 区在退火前的氢气浓度差,在一定程度上减少了退火前后折射率调制深度的变化。

但是对光栅进行均匀紫外曝光同时会改变光纤光栅的耦合特性。图 2 为实验中测得的长周期光纤光栅第四个谐振峰在均匀紫外曝光过程中的变化情况。图 2(a) 中谐振峰的波长随脉冲的增加而增加,而损耗则相反。这是由于均匀紫外曝光能同时使 A 区和 B 区的折射率有很大的提高,引起谐振波长的增加。但是由于 A 区的氢气浓度比 B 区大,所以它的光敏性也比 B 区要好。当同时接受紫外光幅照的时候, A 区的折射率增长速度要比 B 区快。这样也就导致了光栅折射率调制深度的减小,谐振峰的损耗也就相应地发生变化。图 2(b) 为均匀紫外曝光前后光纤光栅的透射谱,通过它我们可以更直观地看到均匀紫外曝光对长周期光纤光栅耦合特性的影响。

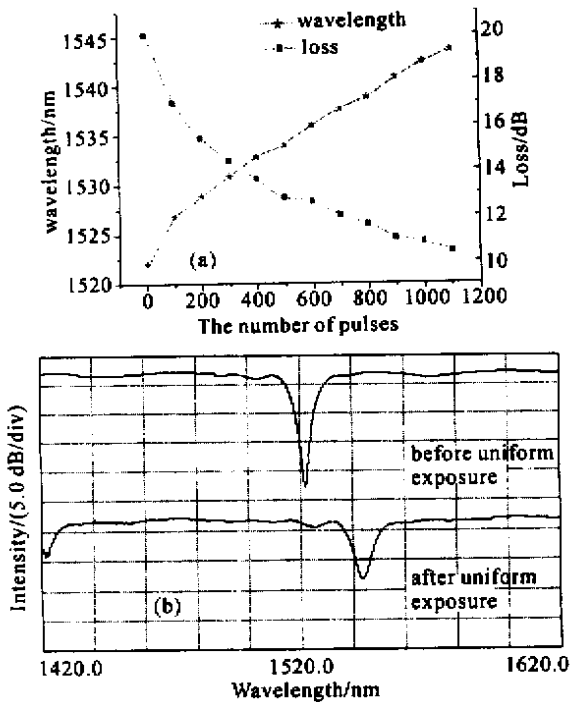


Fig. 2 (a) The variety of the wavelength and transmission loss of the fourth resonance peak under different number of pulses during even exposure; (b) The different transmission spectrums before and after even exposure

基于均匀紫外曝光的上述特点,如何在实验中合理地运用这项技术,使得在既保证长周期光纤光

栅的耦合要求的同时,又很好地改善其热稳定性,这就显得比较重要。在实验中先将谐振峰的波长通过掩模板辐照至离要求波长一定距离的短波长  $\lambda_x$  处,然后进行均匀紫外曝光。在保证波长的同时也保证损耗的大小。但这里  $\lambda_x$  的确定由于和许多因素有关,所以比较困难,这需要通过多次的实验摸索才能总结出一定的规律。

## 5 实验及分析

实验采用的光纤为长 1.8 m 的康宁(Corning)普通通信光纤,制作光栅前先将其放入  $1.01325 \times 10^7$  Pa,  $30^\circ\text{C}$  的氢气中载氢以提高其光敏性。根据(4)式和(5)式可以得到在上述条件下的  $t_{\text{diff}}$  为 7.5 天( $r_d$  取  $62.5 \mu\text{m}$ ),而氢气摩尔分数的饱和值  $H$  为  $9.6 \times 10^{-3}$ ,采用的载氢时间为 5 天。实验用的激光器为波长 193 nm 的准分子激光器,单个脉冲的能量为  $80 \text{ mJ/cm}^2$ ,重复频率为 5 Hz,铜制振幅掩模板的周期为  $450 \mu\text{m}$ ,制作的时候用宽带光源和光谱仪对光纤光栅的变化作实时监控。制成的长度为 4 cm 的光纤光栅在  $150^\circ\text{C}$  的高温下退火 24 h 以提高它们的稳定性。

实验测得刚载完氢的光纤在 1245 nm 处的损耗为 0.96 dB/m,由(6)式计算得到它的含氢量为  $3.2 \times 10^{-3}$ 。由于把载完氢的光纤放置在空气中,光纤中的氢气会因浓度的差别而向空气中扩散,这样就引起了光纤纤芯中  $[\text{H}_2]$  的降低,导致光纤光敏性的降低。把在空气中放置了 2 天的载氢光纤称为甲光纤,而将放置了 7 天的载氢光纤称为乙光纤。实验测得甲光纤在 1245 nm 处的损耗为 0.62 dB/m,计算得它的含氢量为  $2.0 \times 10^{-3}$ 。乙光纤由于在空气中放置的时间比较长,所以它含氢量比较低,实验通过光谱仪没法准确地测出它在 1245 nm 处的损耗值,相应地它的光敏性也比较差。

实验在甲、乙光纤上分别制作光栅,并且在乙光纤光栅的制作过程中引用了均匀紫外曝光技术。图 3 是制作过程中甲、乙光纤光栅第四个谐振峰波长、损耗随脉冲个数增长而变化的情况。图 3(a) 为甲光纤光栅,图 3(b) 为乙光纤光栅,图 3(b) 中 12000 个脉冲以前是加上掩模板照射时变化的情况,而 12000 个脉冲以后是均匀紫外曝光时的变化情况。从图 3 中可以看出乙光纤光栅的增长速度要比甲慢了很多。

实验分别对甲光栅和乙光栅照射了 1400 和 12500 个脉冲后得到了相应的透射谱以及它们经过

高温退火后的透射谱,如图4所示,图4(a)为甲光栅,图4(b)为乙光栅。从图4可以看到乙光纤光栅具有更好的热稳定性,它的透射谱变化很小(波长往

短波方向漂移了6 nm,损耗几乎没变),而甲光纤光栅则有了很大的变化(波长往短波方向漂移了41.6 nm,损耗变小了10.8 dB)。

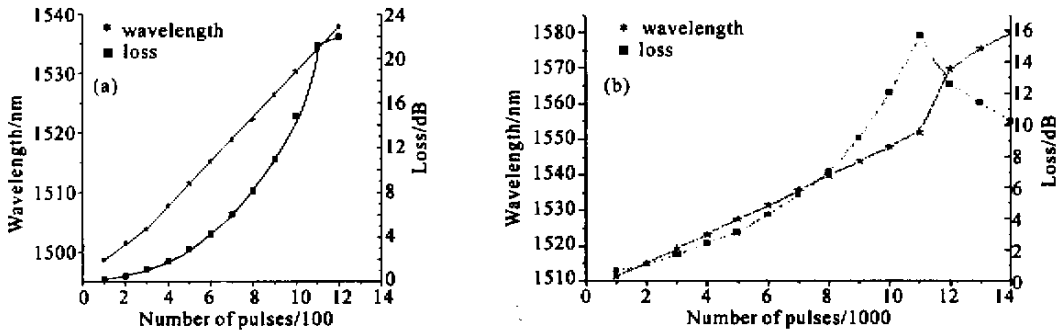


Fig.3 The variety of the wavelength and transmission loss of the fourth resonance peak under different number of pulses during the period of grating-making for both LPFGs

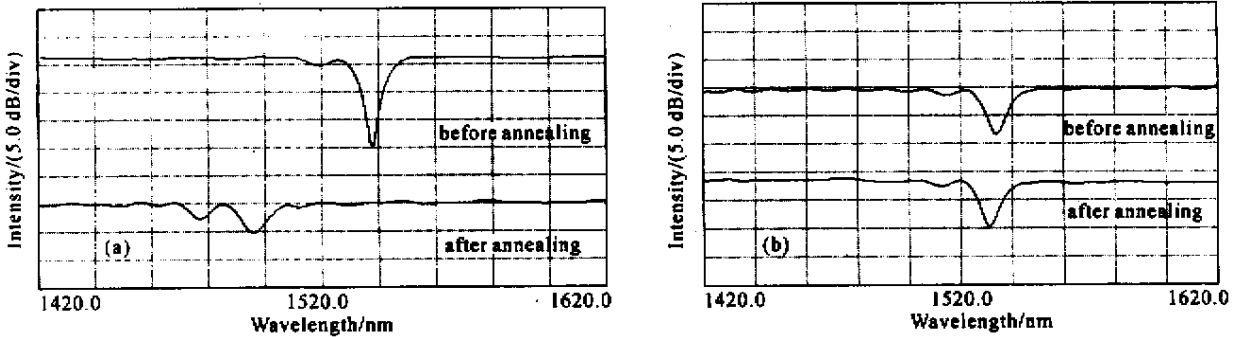


Fig.4 Transmission spectrums of both LPFGs before and after annealing

由于乙光纤的光敏性比较差,所以要达到同样的折射率改变量,它需要的辐照脉冲数要远远大于甲光纤。根据 Kannan 的解释<sup>[10]</sup>,光纤光栅所受到的紫外光辐照时间越长,能量越多,它的热稳定性也就越好。这与我们的实验结果是完全吻合的。另外,对于乙光纤来讲,纤芯中的含氢量很小,而由于受辐照的时间很长,纤芯中大部分的氢气都参与了反应,所以纤芯中残留的氢气就变得很少了,这同样也提高了光纤光栅的热稳定性。

需要强调的是,降低光纤的含氢量并不是说它越低越好。纤芯中氢气浓度的降低会引起光纤最大折变量  $\Delta n_c$  的降低。如果含氢量太低的话,有可能根本达不到想要的折变量。

结论 本文在实验中对比了在不同的含氢量的光纤上制作成的长周期光纤光栅的热稳定性,发现在含氢量较小的光纤上制作出的长周期光纤光栅具有更好的热稳定性。通过理论分析,作者认为降低光纤的含氢量,同时在制作过程中进行均匀紫外曝光能够很好地改善长周期光纤光栅的热稳定性。本文的

研究对于长周期光纤光栅的实际制作,及更好地理解长周期光纤光栅的耦合特性有一定的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judlins J B *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filter. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58 ~ 65
- [2] Lee B H, Liu Y, Lee S B *et al.*. Displacements of the resonant peaks of a long-period fiber gratings induced by a change of ambient refractive index. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(23): 1769 ~ 1771
- [3] Qu Ronghui, Zhao Hao, Fang Zujie. Long-period fiber grating: Imprinting technologies and applications. *Laser and Optronics Progress.* (激光与光电子学进展), 1999, (12) 8 ~ 13 (in Chinese)
- [4] Salik E, Starodubov D S, Grubsky V *et al.*. Thermally stable gratings in optical fibers without temperature annealing. *OFC '99*, 1999, Paper TH03-1: 56 ~ 58
- [5] Guan Bai'ou, Tam Hwayaw, Tao Xiaoming *et al.*. Highly stable fiber gratings written in hydrogen-loaded fiber. *Photonics Tech. Lett.*, 2000, **12**(10): 1349 ~ 1351
- [6] Wang Qinglin, Hidayat A, Niay P *et al.*. Influence of blanket postexposure on the thermal stability of the spectral characteristics of gratings written in a telecommunication fiber using light at 193 nm. *J. Lightwave Technol.*,

2000 , **18** ( 8 ) :1078 ~ 1083

- [ 7 ] Kogelnik H. Theory of dielectric waveguides. In : Tamir T ed. *Integrated Optics*. Vol.7. Berlin , Heidelberg , New York : Springer-Verlag , 1975. 71 ~ 73
- [ 8 ] Lemaire P J , Atkins R M , Mizrahi V *et al.*. High-pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibers. *Electron. Lett.* , 1993 , **29**( 13 ) :1191 ~ 1193

- [ 9 ] Stone J. Interactions of hydrogen and deuterium with silica optical fibers : A review. *J. Lightwave Technol.* , 1987 , **5** ( 5 ) :712 ~ 733
- [ 10 ] Kannan S , Guo J Z Y , Lemaire P J *et al.*. Thermal stability analysis of UV-induced fiber Bragg grating. *J. Lightwave Technol.* , 1997 , **15**( 8 ) :1478 ~ 1483
- [ 11 ] Hand D P , Russell P St J. Photoinduced refractive-index changes in germanosilicate fibers. *Opt. Lett.* , 1990 , **15** ( 2 ) :102 ~ 104

## A Novel Method of Improving the Thermal Stability of LPFG

Gao Kan Cai Haiwen Chen Gaoting Fang Zujie

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

( Received 11 October 2001 ; revised 8 November 2001 )

**Abstract :** If a long-period grating is written in the hydrogen-loaded standard SM fiber , using the amplitude mask , the thermal stability will be decreased because of the presence of H<sub>2</sub> , which makes it difficult to fabricate an ideal long-period fiber grating ( LPFG ). It is pointed out both in aspects of theory and experiment that if the solubility of H<sub>2</sub> in the hydrogen-loaded fiber is lowered and using the technique of uniform UV exposure properly , the thermal stability of LPFG could be improved greatly.

**Key words :** long-period fiber grating ; thermal stability ; uniform UV exposure