

文章编号: 0253-2239(2003)04-0434-04

布拉格光纤光栅热稳定性研究

周长尊¹ 陈 阳² Peter Kung¹

(¹ Braggphotonics 公司, 加拿大蒙特利尔 H9R 3S3)
(² 西安邮电学院, 西安 710061)

摘要: 分析了布拉格光纤光栅纤芯折射率和光栅反射率随温度和时间变化的规律,应用有关模型提出了加速衰变的概念,并由此建立了相关退火工艺。利用衰变曲线可预测光栅在给定时间和温度下的特性。理论和实验结果相吻合。

关键词: 光通信技术; 布拉格光纤光栅; 热稳定性; 衰变; 退火;

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)是一种给光网络带来深刻变革的光学元件。越来越多地被应用于各种光通信系统中,比如作为掺铒光纤放大器中的波长锁定和增益平坦滤波器,用于上/下路复用器(ADD/DROP)和波分复用器,光栅-薄膜混合解决方案可以降低纯薄膜元件的成本,进行光栅的拉伸可以制作调谐滤波器和激光器,及作为传感器应用等等。

作为关键器件,其光学特性的长期热稳定性也引起了人们广泛的关注。电信领域的 Telcordia 标准规定了专门的实验方法和标准,用以保证所测试的系统和元器件有足够长的工作时间(比如 25 年)。然而近年来,数字通信业务量呈指数规律增长,新技术的不断涌现使得基于原有技术的通信系统在 3~5 年内就有可能显得过时。如果我们完全按照 Telcordia 标准的要求,对系统进行 2000 h 到 5000 h 的测试,就会陷入两难的境地:要么很难及时地把新技术投入使用,因为要用相当长的时间把整个质量测试都做完;要么采用更加前瞻的、承担一定风险的作法,即采用最新的技术进行小批量生产,向用户提供高性价比的解决方案。事实上已经看到一些小公司用这种前瞻的方法得到了一些市场份额。这就要求对光栅的特性变化规律有一定了解和预测。

研究表明,光栅的折射率和反射特性是随时间变化的,变化的速度与环境参量有关,其中最重要的是温度。衰变有一些规律可寻,有各种各样的理论

模型,也有争论^[1~4]及解决办法。比如用紫外光再照射光栅,通过牺牲折射率的调制深度来换取稳定^[5]。本文试图从批量生产的实用角度出发,探讨如何用加速方法使光纤布拉格尽快达到热稳定并对其特性进行预测。

2 光纤布拉格光栅的衰变过程

光纤布拉格光栅由很多个相互平行的反射平面组成。光纤布拉格光栅的反射平面是由紫外线照射技术写入光纤的纤芯的,这种制作方法在石英光纤的纤芯造成周期性的折射率分布(Δn)。被调制的纤芯区域好象是很多很小的相互平行的并与光纤轴线垂直的“圆盘”。

目前最常用的实现这种折射率调制的方法是将一块相位模版放在光纤侧面,掩模版上刻有很多精细的狭缝。紫外激光照射在相位模版上,通过相位模版的光由于衍射会产生干涉条纹,使光纤纤芯产生折射率调制,正是这种折射率的变化产生了使光栅具有反射特性。形成布拉格光栅的过程与纤芯中石英被掺杂后形成的亚稳化学键有关。折射率的变化可以看成是由缺陷形成的。但这种缺陷存在不稳定性。在一定温度下,粒子有可能跳出势垒。造成光栅的衰变-折射率下降,从而导致反射率降低。

对光纤布拉格光栅分析和实验的结果表明光栅形成之后其反射率立刻开始缓慢下降,下降的速度与环境温度有关,如图 1 所示。下降速度刚开始极快,然后变慢,但总不为零。我们无法让衰变停止,只能尽量减小其影响。在一定的近似条件下,可以将光栅的反射率 R 看成是温度 T 和时间 t 的函数:

E-mail: chenyang68@yahoo.com

收稿日期:2002-01-18; 收到修改稿日期:2002-05-10

$$R = f(T, t), \quad (1)$$

用不同的温度和不同的加热时间进行老化实验,就可得到(1)式表示的函数。作出衰退曲线,就能外推光栅反射率在任意时间和温度下(比如,85 °C, 25 a后)的稳定特性。

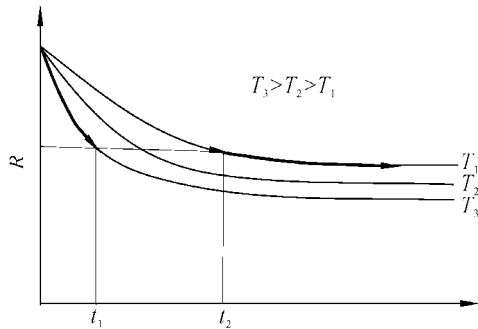


Fig. 1 Reflectivity variation of FBGs with temperature

因为反射特性是由折射率的分布决定的,所以光纤布拉格光栅反射特性的变化可以从对光栅纤芯折射率调制的分析得到更深刻的理解。影响光栅温度稳定性的关键因素是折射率的大小。我们采用的是载氢光纤的 Riant-Poumellec 模型^[2]。按照这个模型,光纤布拉格光栅的折射率变化(衰变过程)遵循以下规律:

$$\Delta n / \Delta n_0 = A k_B T \ln(k_0 t) + B, \quad (2)$$

式中 Δn 为在温度 T 下放置了时间长度 t 后的残余折射率变化。 Δn_0 为经紫外光照射而使光栅形成之后的折射率变化初始值; A 、 B 和 k_0 为常量; k_B 为玻尔兹曼常量; T 为绝对温度。

在实验中,可以通过测量反射率来计算折射率的变化^[1]:

$$\Delta n = \lambda_B \frac{\operatorname{artanh}(\sqrt{R})}{\pi L}, \quad (3)$$

式中 L 为光栅长度, λ_B 为中心波长, R 为反射率, artanh 为反双曲正切函数。

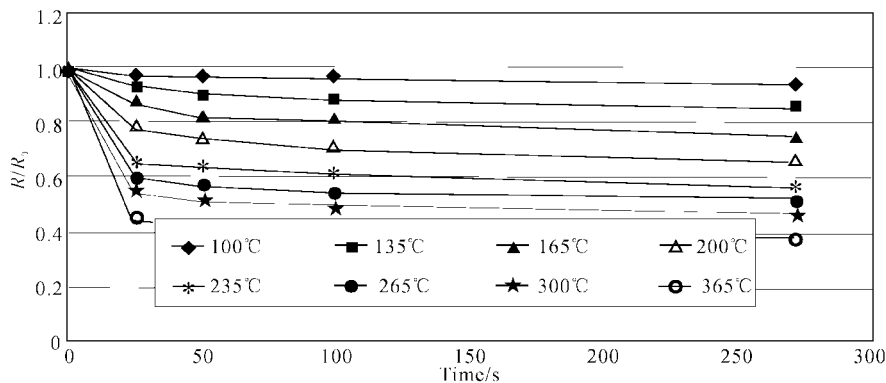


Fig. 3 Aging results of 980 nm FBG

3 光纤布拉格光栅的衰变实验

采用 Corning 公司的 HI980 光纤,渗氢过程是在 60 °C 和 11.7 MPa 下加压 96 h,然后用波长为 248 nm 的准分子紫外脉冲激光器 (3 mJ/pulse, 50 Hz) 写入光栅。最后光栅通过 7036 N/cm² 的拉伸测试。整个装置如图 2 所示。

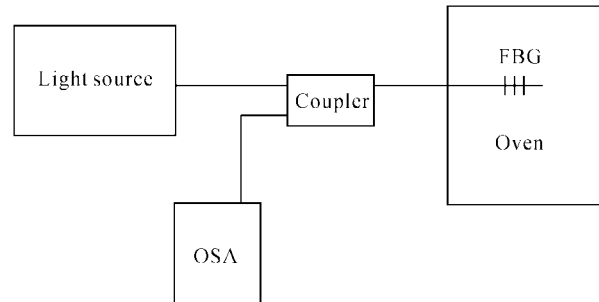


Fig. 2 Experimental setup on FBG decaying

在 100 °C, 135 °C, 165 °C, 200 °C, 235 °C, 265 °C, 300 °C 和 365 °C 8 种温度下进行了实验。对每种温度,保持时间分别为 25 s, 50 s, 100 s 和 270 s。为保证结果有重复性,每种环境下都测试了 4 个样品光栅。加热设备采用了小型可编程恒温炉,用 Newport 运动控制器控制光栅在炉中的位置。反射率用 Ando6317B 光谱仪测量,其分辨率为 0.01 nm。

图 3 是实验结果。可看出,随着时间的增长,反射率下降,且在退火开始时的下降速度高于退火接近尾声时的速度。将数据代入(2)式和(3)式计算的结果如图 4 所示,与(2)式吻合得很好。如果将 $k_B T \ln(k_0 t)$ 看成一个衰变因子,得到以下结果:

$$\Delta n / \Delta n_0 = 1.548 - 0.535 k_B T \ln(k_0 t), \quad (4)$$

式中 $k_0 = 1.86 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$, k_B 为玻尔兹曼常量 ($8.625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$), T 为热力学温度,单位为 K; 时间 t 的单位为秒。计算时首先要确定 k_0 ,然后通过衰变结果可以算出 A 和 B 。

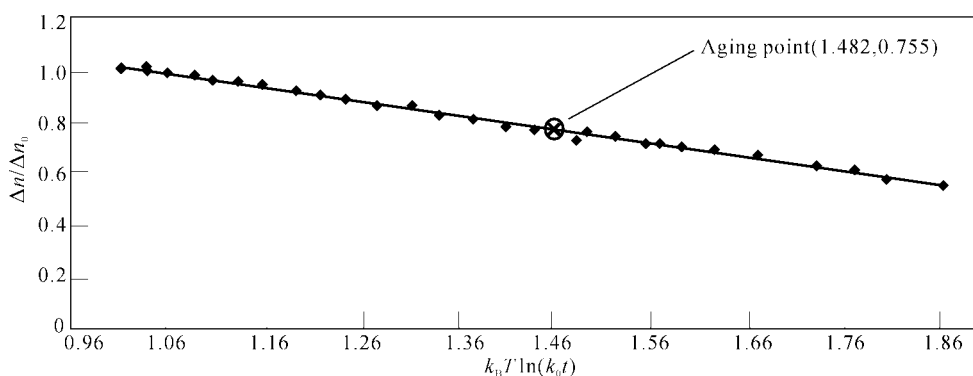


Fig. 4 Normalized reflective index changes with “factor of time and temperature”

从(2)式和图 1 可以看出,光栅折射率在高温短时间和低温长时间下可以降低到同样的值,即温度和时间具有同等的效应。例如反射率从 R_0 降到 R ,在 T_1 温度下需要 t_2 时间,而在 T_3 温度下只要 t_1 时间(图 1)。显然我们希望用最短的时间测出光栅反射率衰变曲线,然而可以采用在一定的温度下把光栅退火一段时间来老化,将衰变的速度降到极低。

4 反射率变化趋势的预测和退火工艺的设计

根据(4)式可以预测在任何温度和时间下光栅的衰变行为。而且还可以根据这个基本曲线根据用户的需要设计退火工艺。比如,用户要求在 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 下经过 25 a, $\Delta n/\Delta n_0$ 的相对变化率低于 3.5%。那么首先将温度 $T=85+273$ 代入(4)式绘出衰变曲线。然后,根据在 25 a 内归一化折射率变化($\Delta n/\Delta n_0$)的相对变化率小于 3.5%这一条件,从曲线上找到相应的“退火点”。令 $\Delta n/\Delta n_0$ 等于“老化点”,就很容易建立温度和时间关系。这个关系给出了光栅特性衰变到“老化点”过程中所有温度和时间的可能组合。

应根据不同的产品和工艺流程选择不同的退火

时间来加速老化。确定退火工艺的步骤为:选择一个合适的温度,不要太高也不要太低;选择一个适当长短的退火时间。如果退火时间太短,就需要急剧的加热和冷却,这对一个生产工艺过程是不合适的。我们选择的退火时间是 40 s。根据(3)式,在 $265\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下经过 40 s 后, $\Delta n/\Delta n_0$ 将达到 0.755。我们给出一个数量级的概念, $265\text{ }^\circ\text{C}$ 下的 40 s 等效于 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 下的 105200 h, $155\text{ }^\circ\text{C}$ 下的 41 h 或 $225\text{ }^\circ\text{C}$ 下的 0.14 h。

由于我们更关心光栅的反射率。图 5 画出了归一化反射率的变化曲线。同样,如果想知道在温度 T 下持续了时间 t 后光栅的反射率,就先算出衰变因子 $k_B T \ln(k_0 t)$,再在图 5 中找到对应的 R/R_0 。图 5 中还可看出,我们的老化工艺会使反射率稳定在 $R/R_0=0.579$ 。

(4)式决定了光栅形成后的整个衰变过程,包括老化试验前后和用户使用期。需要指出的是 $k_B T \ln(k_0 t)$ 是一个半经验的公式因子。在时间 $t=0$ 时并不收敛,所以也不适合时间极短的情况。那么多短的时间可以认为是“极短”呢? 这要看温度的高低。比如在 $225\text{ }^\circ\text{C}$,即使 $t=0.1\text{ s}$ 也是很有意义的计算结果。在 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 下的时间会很长,因为反射率在这个温度下变化很慢。

要想得到产品在给定条件下的最终反射率,必

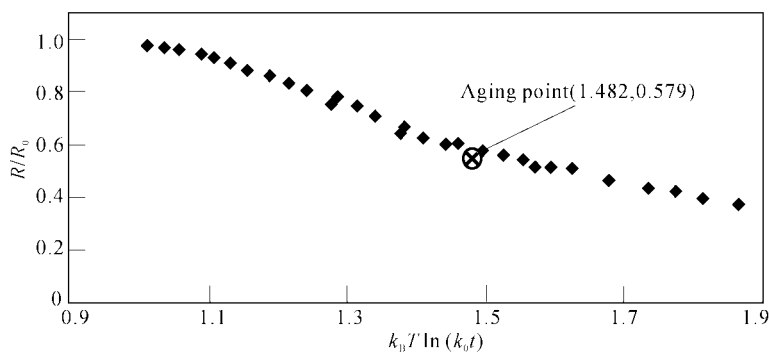


Fig. 5 Normalized reflectivity changes with “factor of time and temperature”

须考虑老化过程。例如,要计算光栅在 225 °C 下老化 10 h 之后的反射率,就要用 $0.1445 + 10 \text{ h}$ 来计算因子“ $k_B T \ln(k_0 t)$ ”。根据以上的老化公式,我们就可以描述这种光纤布拉格光栅在 155 °C 和 225 °C 下的温度稳定性。需要强调的是,对不同工艺和原料光纤,光栅的衰变曲线是不同的。所以对某种光栅的分

析和预测必须以该种光栅的实验数据为基础。

图 6 给出了刚退火之后的相对折射率变化的预测和实测值,两种结果符合的非常好。很显然,这种加速老化的方法可以用来预测光纤布拉格光栅的长期温度稳定性。

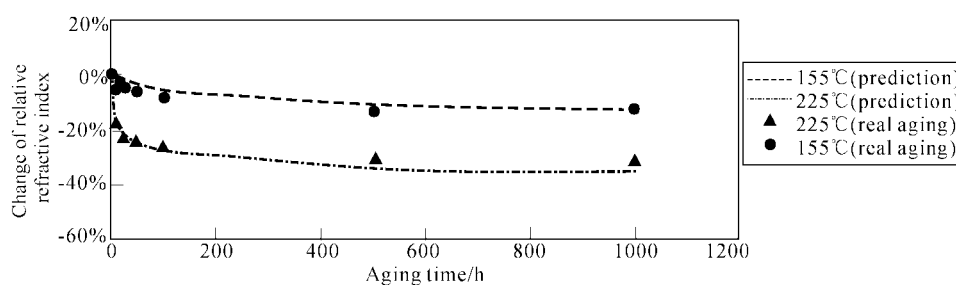


Fig. 6 Predictive and measured results of relative index changes

结论 本文分析了光纤布拉格光栅折射率和反射率随时间和温度的衰变规律,在前人工作的基础上,从增强稳定性和满足用户的要求的角度出发,提出了加速衰变的退火工艺。光纤布拉格光栅的主要衰变曲线可以通过加速老化的方法在 2 d 到 3 d 内得到,温度稳定性的质量检测就可以在几天之内完成,还可以推知其未来相应的衰变特性。作为稳定性的一个保障,基于光栅的模块和元件生产上采用这种加速老化的方法,可以更快地将产品推向市场,在城域网的下一代光网络市场上取得竞争的主导权。

参 考 文 献

1 Erdogan T, Mizrahi V, Lemaire P J *et al.*. Decay of

ultraviolet-induced fiber Bragg gratings. *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(1):73~80

2 Riant I, Poumellec B. Thermal decay of gratings written in hydrogen-loaded germanosilicate fibres. *Electron. Lett.*, 1998, Online No. 19981139 (May 29, 1998)

3 Baker S R, Rourke H N, Baker V *et al.*. Thermal decay of fiber Bragg gratings written in Boron and Germanium co-doped Silica fiber. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1470~1477

4 Kannan S, Guo J Z Y, Lemaire P J. Thermal stability analysis of UV-induced fiber Bragg gratings. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1478~1482

5 Wang Q, 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

Research on Thermal Stability of Fiber Bragg Gratings

Zhou Changzun¹ Chen Yang² Peter Kung¹

(¹ Bragg Photonics Inc., Canada, H9R 3S3
² Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061)

(Received 18 January 2002; revised 10 July 2002)

Abstract: The principle on refractive index of core and reflectivity of FBG changing with temperature and time was analyzed. With some research work on appropriate model, the concept of accelerating decay is raised, upon which a novel annealing process is established. With the data measured, the future characteristic of grating can be given under certain temperature and time. The theoretical and practical results are almost in agreement.

Key words: fiber Bragg grating; thermal stability; decay; annealing; optical communication