

doi: 10.3788/gzxb20154410.1006005

环境温度对光纤光栅使用寿命的影响

许亨艺, 雷小华, 张伟, 陈伟民, 齐翊, 李竞飞, 刘显明

(重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:为研究环境温度对光纤光栅使用寿命的影响,从光纤光栅的成栅机理出发,分析了光纤光栅折射率调制度的形成及热致衰减的物理机理;并以热致衰减机理为基础、以峰值反射率为主要指标,建立了温度对光纤光栅使用寿命的影响模型,得到了光纤光栅峰值反射率随温度及时间的变化关系.物理实验与数值仿真验证了理论模型的合理性,即:在仅考虑温度影响因素的情况下,光纤光栅在常规应用温度条件下可长期正常工作.

关键词:光通信; 光纤布喇格光栅; 使用寿命; 环境温度; 折射率调制度; 峰值反射率; 衰减

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)10-1006005-5

Influence of the Environmental Temperature on the Service Life of Fiber Bragg Gratings

XU Heng-yi, LEI Xiao-hua, ZHANG Wei, CHEN Wei-min, QI Yi, LI Jing-fei, LIU Xian-ming
(Key Lab of Optoelectronic Technology & Systems Ministry of Education, College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on the formation and attenuation mechanisms of Fiber Bragg Gratings (FBGs), a model describing its attenuation law was established to study the effect of environmental temperature on its service life. This model discusses physical mechanisms of formation and change of the refractive index modulation, gives the relation of peak reflectivity between temperature and time. By experiment and numerical simulation, the rationality of theoretical model is verified. It is concluded that FBGs can work reliably for a long time under conventional conditions without consideration effects of other environment impacts except the temperature.

Key words: Optical communication; Fiber Bragg Gratings (FBGs); Service lifetime; Environment temperature; Refractive index modulation; Peak reflectivity; Decay

OCIS Codes: 060.3735; 060.3738; 120.6780; 120.6810

0 引言

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG, 简称光纤光栅)具有体积小、结构简单、抗电磁干扰、易复用等优点,在光通信领域和传感领域得到了广泛应用^[1~6].在光纤光栅的诸多应用中,常要求其具有长期稳定性,如:大型土木结构的设计使用寿命一般为几十甚至上百年,作为长期监测土木结构健康状态核心器件的光纤光栅就必须具有长期的稳定性和耐久性.但由于应用环境的复杂性,在长期温度、应力、振动、弯曲

等交叉作用下,光纤光栅可能产生疲劳,导致其中心波长、反射率等光谱参数随时间的变化而变化,严重影响测量结果,因此光纤光栅的实际使用寿命已成为用户非常关心的一个指标.为了全面掌握光纤光栅的使用寿命,需要先分别研究其在各个环境因素单独作用下的寿命特性,其中温度对光纤光栅使用寿命的影响备受关注^[7~13].

研究者就温度对光纤光栅使用寿命的影响开展了许多研究:提出了色心模型^[8]、捕获能模型^[9]及电偶极子对模型^[8]等用于解释光纤光栅热致衰减机理;提出

基金项目:国家高技术研究发展计划基金(No. 2013AA03A118)资助

第一作者:许亨艺(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术. Email: xhy_cqu@126.com

导师(通讯作者):陈伟民(1955-),男,教授,博士,主要研究方向为光电技术、光纤传感. Email: wmchen0802@126.com

收稿日期:2015-06-09;录用日期:2015-08-17

<http://www.photon.ac.cn>

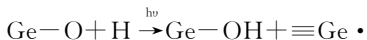
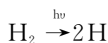
了 Power-Law 模型^[9]、老化曲线 (Aging curve) 模型^[9]、对数模型^[10]、Riant-Poumellec 模型^[11] 等用于揭示温度作用下光纤光栅的寿命特征. 其中, Power-Law 模型以及在其基础上基于捕获能模型提出的老化曲线 (Aging curve) 模型在温度对光纤光栅使用寿命的影响研究中应用最为广泛. 在实际应用中, 通过对光纤光栅高温加热退火^[7]、用特殊掺杂光纤制作耐高温光纤光栅^[12] 等方法提高了光纤光栅的使用寿命, 其中高温加热退火是常用的提高商用光纤光栅使用寿命的方法.

高温加热退火处理后的光纤光栅, 其使用寿命确实有明显改善, 但关于改善之后的使用寿命问题却鲜见报道, 因此有必要进一步对这个问题加以研究. 本文研究了环境温度对光纤光栅使用寿命的影响.

1 光纤光栅热致衰减机理分析

光纤光栅的制作是基于光纤的光敏性, 即掺杂光纤受到紫外光照射引起纤芯折射率的周期性调制; 而光纤光栅的性能衰减则是由于外界环境 (如热、应力等) 作用下使此折射率周期性分布退化. 二者虽然不是精确的可逆过程, 但具有一定的相似性, 故可从光纤光栅的成栅机理角度出发分析其热致衰减机理.

在光纤光栅的制作过程中, 需要将 Ge 离子以 GeO₂ 的形式掺入光纤中, 因此在光纤中主要存在 Ge-O 键和 Ge-O-Si 键两种形式^[13]. 当载氢处理后的掺锗光纤受到紫外光照射时, Ge-O 键和 Ge-O-Si 键发生断裂, 与 H₂ 发生如式 (1) 的光化学反应^[15], 并形成 GeE' 缺陷.



紫外辐照掺锗光纤产生 GeE' 缺陷的同时, 一个自由电子从断裂的键位中释放出来, 被激发至导带, 并在断键的位置处留下一个带正电的空穴. 电子和空穴形成电偶极子对, 在其周围空间形成静态极化电场, 从而导致光纤纤芯产生局部折射率变化^[8], 如图 1. 释放出

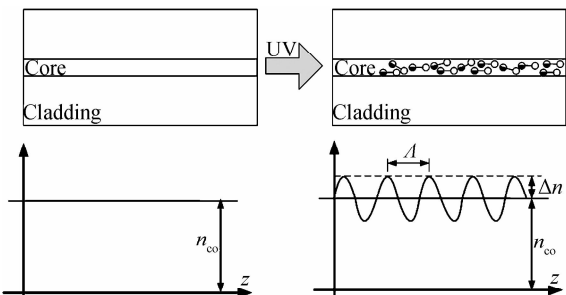


图 1 光纤光栅纤芯折射率调制度形成示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the refractive index modulation formation in fiber core

的自由电子立刻被 GeE' 缺陷周围的连续能量势阱捕获^[9], 如图 2 所示.

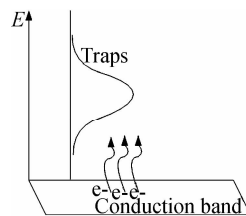


图 2 连续势阱捕获电子示意图

Fig. 2 Electrons are trapped in a continuous distribution of traps

当光纤光栅受到温度 T 作用时, 位于连续能量势阱中能量小于界定能 E_d 的电子会在热的作用下逃逸到初始位置与空穴复合^[15], 使得电偶极子对减少, 从而导致光纤光栅的折射率调制度降低, 进而使得其反射率等光谱参数发生变化, 直至最终擦除. 该过程, 即光纤光栅热致衰减过程如图 3 所示.

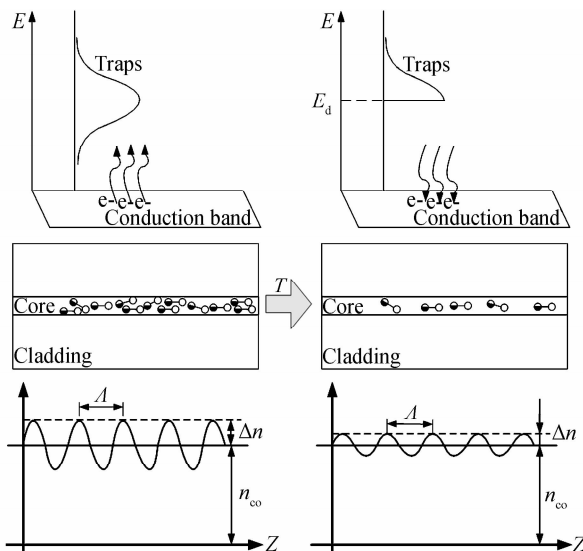


图 3 光纤光栅热致衰减示意图

Fig. 3 Schematic diagram of FBG thermal decay

2 温度对光纤光栅使用寿命的影响模型

为定量分析温度对光纤光栅使用寿命的影响, 在温度 T 下, 设电子从能量势阱深度为 E 的势阱中释放的热释放率 v(E) 为

$$v(E) = v_0 \exp(-E/k_B T) \quad (2)$$

式中 v₀ 为光纤光栅制作完成后电子的初始热释放速率, 其值为 1.9 × 10¹⁵^[9]; k_B 是波尔兹曼常数; T 是温度, 单位开尔文.

假设光纤光栅制作完成后, 电子在能量为 E 的势阱中初始有效占据数为 f₀(E), 则时间为 t 时, 电子在能量为 E 的势阱中的有效占据数量 f(E, t) 为

$$f(E, t) = f_0(E) \exp[-v(E)t] \quad (3)$$

假设光纤光栅在温度 T 下, 经历时间 t 之后, 界定

能 $E_d = k_B T \ln(\nu_0 t)^{[9]}$, 由第 1 节可知: 能量势阱中总能量小于 E_d 的电子被释放, 大于 E_d 的电子仍旧填满连续能量势阱. 再假设能量势阱的态密度分布函数为 $g(E)$, 光纤光栅制作完成后电子在能量势阱中的初始分布为 $\tilde{g}(E)$, 则连续能量势阱中电子的剩余数量 $N(T, t)$ 为

$$N(T, t) = \int_{E_j}^{\infty} g(E) f(E, t) dE \cong \int_{E_j}^{\infty} \tilde{g}(E) dE \quad (4)$$

光纤光栅中剩余电偶极子对的数量等于连续势阱中剩余电子的数量, 假设一个电偶极子对对光纤折射率的调制值为 Δn_{dip} , 则其剩余折射率调制度为

$$\Delta n(T, t) = N(T, t) \Delta n_{\text{dip}} \quad (5)$$

设光纤光栅制作完成后其初始电偶极子对的数量为 N_0 , 定义电偶极子对数量的残余率为 η , 则有

$$\eta = \frac{N(T, t)}{N_0} = \frac{\Delta n(T, t) / \Delta n_{\text{dip}}}{\Delta n_0 / \Delta n_{\text{dip}}} = \frac{\Delta n(T, t)}{\Delta n_0} \quad (6)$$

由光纤光栅各光谱参数的表达式可知, 其峰值反射率受折射率调制度的影响最为明显, 故根据光纤光栅峰值反射率的表达式 $R_{\text{max}} = \tanh^2(\frac{\pi}{\lambda} \Delta n L)^{[16]}$, 得 η 的计算式为

$$\eta = \frac{\Delta n(T, t)}{\Delta n_0} \approx \frac{\operatorname{arctanh} \sqrt{R_{\text{max}}(T, t)}}{\operatorname{arctanh} \sqrt{R_{\text{max}0}}} \quad (7)$$

式中 $R_{\text{max}0}$ 、 Δn_0 分别为光纤光栅制作出厂后的初始峰值反射率和折射率调制度; $R_{\text{max}}(T, t)$ 、 $\Delta n(T, t)$ 分别为光纤光栅在温度 T 下作用时间 t 后的峰值反射率和折射率调制度.

假设电子从连续能量势阱中的逃逸情况, 即电偶极子对数量的残余率随温度及时间的变化情况符合 Power-Law 模型规律^[9], 即

$$\eta = \frac{1}{1 + A(t/t_1)^a} \quad (8)$$

假设光纤光栅的蜕化速率为 T_0 , 电子在连续能量势阱中初始分布概率最大处的能量 $\Delta E = -k_B T_0 \ln(A_0)$, 且假设 $A = A_0 \exp(aT)$, $\alpha = T/T_0$, $\tau_0 = 1 \text{min} \cdot \exp(-aT_0)$, $\nu_0 \tau_0 = 1$, 则电偶极子对数量的残余率与温度及时间的关系为

$$\eta = \frac{1}{1 + \exp(\frac{k_B T \ln(\nu_0 t) - \Delta E}{k_B T_0})} \quad (9)$$

根据式(7)和式(9), 可得光纤光栅峰值反射率与温度及时间的关系为

$$R_{\text{max}}(T, t) = \tan \left[\frac{1}{1 + \exp(\frac{k_B T \ln(\nu_0 t) - \Delta E}{k_B T_0})} \operatorname{arctanh} \sqrt{R_{\text{max}0}} \right] \quad (10)$$

若已知式(10)中与光纤类别及光纤光栅制作条件有关的 ΔE 和 T_0 的值, 即可分析光纤光栅峰值反射率

在任意温度下随时间的变化情况, 评估在温度单因素作用条件下光纤光栅的使用寿命.

3 实验研究

3.1 实验

文献[9]根据光纤光栅的结构特点, 提出了光纤光栅在常温下的寿命长达上百年的猜测. 要验证这个猜测, 需要实际对光纤光栅进行常温下的寿命试验, 但难以在有限的时间内得到验证. 为此, 参照电子元器件寿命预测的加速老化试验方法, 对光纤光栅采用高温加速老化的方法来研究其使用寿命, 验证式(10)并据此掌握其常温下的使用寿命状况.

对 12 只光纤光栅(光纤类型: Corning SMF-28e; 载氢参数: 70℃, 10 MPa 下载氢 30h; 写入波长: 248 nm; 退火参数: 120℃ 下退火 72 h; 中心波长: 1545 nm; 反射率: 93%) 分别在 250℃、350℃、450℃ 和 550℃ 四种温度下进行热加速衰减实验, 实验系统如图 4 所示. 实验采用管式炉(Lenton LTF 1200)对光纤光栅进行加热; 采用光谱仪(AQ6313B, 光谱分辨率为 0.01 nm)测量光纤光栅的透射光谱, 并据此计算且记录其峰值反射率.

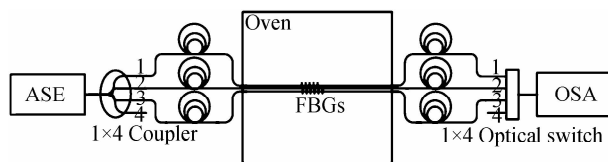


图 4 光纤光栅热加速衰减实验原理

Fig. 4 Principle diagram of FBG thermal acceleration attenuation experiments

在实验开始前, 先测试光纤光栅的原始光谱; 开启管式炉, 达到预设温度之后, 保温 9~12 h, 保温过程中, 采用先密集后稀疏的方式进行光谱测试.

3.2 实验结果分析

如图 5 所示, 各离散数据点代表实验所得 9 支光纤光栅分别在 350℃、450℃ 和 550℃ 下峰值反射率随时间的衰减情况. 将这些实验数据根据式(10)进行拟合, 得到适用于该批次光纤光栅的 ΔE 值和 T_0 值, 分别为 $\Delta E = 3.142 \text{eV}$ 、 $T_0 = 7400 \text{K}$.

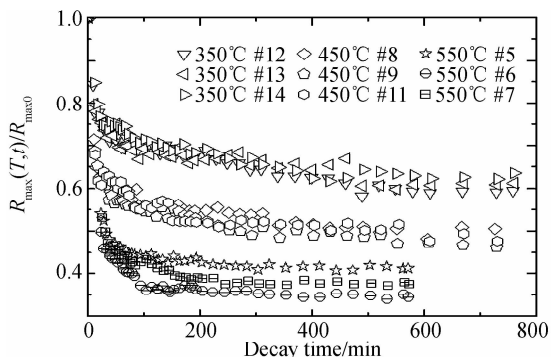


图 5 光纤光栅峰值反射率在不同温度下随时间的衰减
Fig. 5 Decay of FBG peak reflectivity with time under various temperatures

为验证 ΔE 、 T_0 的合理性,将 ΔE 、 T_0 的值带入式(10),并固定温度 T 为 250°C ,得到光纤光栅峰值反射率在 250°C 下随时间 t 的衰减情况,如图 6 中曲线所示.图 6 中各离散数据点代表在 250°C 下实验所得 3 支光纤光栅峰值反射率随时间的衰减情况,对比图中各数据点和曲线可知:在达到预设温度之后,由于存在测量误差以及光纤光栅个体之间的差异,使得 250°C 下 3 支光纤光栅的衰减略有差异,但可以看出理论仿真依然能够良好地反应出光纤光栅的峰值反射率随时间的实际变化情况.由此验证了利用该理论通过高温加速实验预测低温长期衰变规律的合理性.

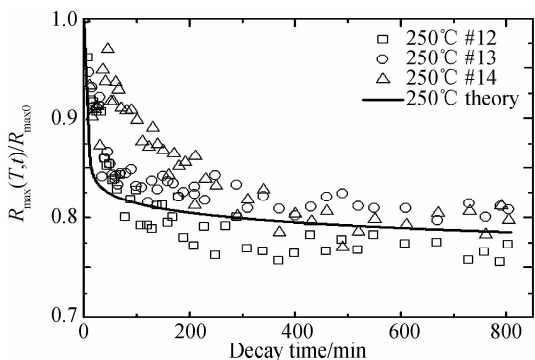


图 6 光纤光栅峰值反射率在 250°C 下随时间的衰减
Fig. 6 Decay of FBG peak reflectivity with time under 250°C

3.3 仿真分析

将实验获得的 ΔE 值和 T_0 值带入式(10),并选取温度为 25°C 、 50°C 、 75°C 、 100°C 、 125°C ,得到该批次光纤光栅峰值反射率在这些工作温度下随时间的相对变化情况,如图 7 所示.其中出厂 3 个月、25 年、50 年、100 年后光纤光栅峰值反射率的相对变化值如表 1.

表 1 光纤光栅峰值反射率的相对变化值

Table 1 Relative change of FBG peak reflectivity

Time $T/^\circ\text{C}$	Time			
	3 months	25 years	50 years	100 years
25	-0.2606	-2.003	-2.289	-2.583
50	-1.739	-3.192	-4.272	-4.64
75	-3.431	-6.113	-6.558	-7.015
100	-5.357	-8.635	-9.179	-9.738
125	-7.543	-11.5	-12.16	-12.84

分析图 7 和表 1 可知,在各温度下,光纤光栅峰值反射率均以先快后慢的速度下降,且温度越高,下降速度越快.其中在低于退火温度(120°C)的 25°C 、 50°C 、 75°C 和 100°C 下,100 年以后光纤光栅峰值反射率的衰减度均小于 10%;而在高于退火温度(120°C)的 125°C 下,经过 4.833 年,光纤光栅峰值反射率便衰减 10%.结果表明,光纤光栅在低于高温加热退火温度的常规应用温度下使用时,其使用寿命可长达上百年.

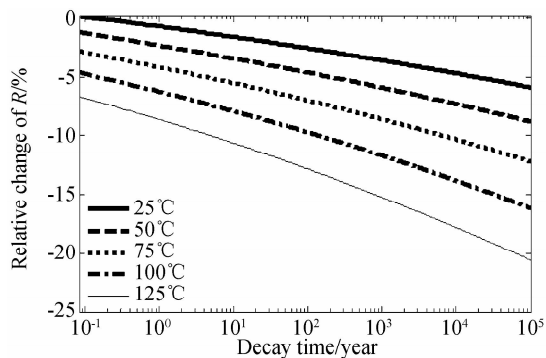


图 7 光纤光栅峰值反射率在 25°C 、 50°C 、 75°C 、 100°C 、 125°C 下随时间的相对变化

Fig. 7 Relative change of FBG peak reflectivity under 25°C , 50°C , 75°C , 100°C , and 125°C

4 结论

针对用户关心的经高温加热退火处理后光纤光栅的实际使用寿命问题,建立了温度影响光纤光栅使用寿命的理论模型.文中阐述了该模型的物理机理,并进行了理论推导和实验验证.结果表明:温度作用将导致光纤光栅的光谱性能以先快后慢的速度衰退,且温度越高,衰退速度越快;对于经高温加热退火处理后的光纤光栅,在小于退火温度的常规应用温度下,仅考虑温度因素,其使用寿命基本不受影响,可满足长期正常工作的需求.但由于实际应用中环境的复杂性,光纤光栅的使用寿命还受应力、振动、弯曲等其他因素的影响,应综合考虑这些因素对光纤光栅光谱性能的影响机理,更全面地评估光纤光栅的实际使用寿命.

参考文献

- [1] OSUCH T, GASIOR P, MARKOWSKI K, et al. Development of fiber Bragg gratings technology and their complex structures for sensing, telecommunications and microwave photonics applications[J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 2014, **62**(4): 627-633.
- [2] KINET D, MEGRET P, GOOSSEN K W, et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions range [J]. *Sensors*, 2014, **14**: 7394-7419.
- [3] DONG Jiang-li, CHIANG K S. Mode-locked fiber laser with transverse-mode selection based on a two-mode FBG [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(17): 1766-1769.
- [4] WU Hui-juan, LI Shan-shan, LU Xiang-lin, et al. A novel method for simultaneous intrusion detection and fire alarm in a single FBG-based fence monitoring system configuration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1671-1676.
吴慧娟, 李姗姗, 卢祥林, 等. 一种新型光纤光栅围栏防火防入侵同步预警系统 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1671-1676.
- [5] SONG Y W, HAVSTAD S A, STARODUBOV D, et al. 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG [J]. *Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(11), 1167-1169.

- [6] FILOGRANO M L, GUILLÉN P C, RODRÍGUEZ-BARRIOS A, *et al.* Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(1): 85-92.
- [7] KANNAN S, GUO J Z Y, LEMAIRE P J. Thermal stability analysis of UV-induced fiber Bragg Gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1478-1483.
- [8] HAND D P, RUSSELL P S T J. Photoinduced refractive-index changes in germanesilicate fibers[J]. *Optics Letters*, 1990, **15**(2): 102-104.
- [9] ERDOGAN T, MIZRAHI V, LEMAIRE P J, *et al.* Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, **76**(1): 73-80.
- [10] STEPHEN R B, HOWARD N R, VERNON B, *et al.* Thermal decay of fiber Bragg gratings written in Boron and Germanium codoped silica fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1470-1477.
- [11] RIAANT I, POUHELLEC B. Thermal decay of gratings written in hydrogen-loaded germane silicate fibres [J]. *Electronics Letters*, 1998, **34**(16): 1603-1604.
- [12] SHEN Yong-hang, HE Jing-lei, QIU Yan-qing. Thermal decay characteristics of strong fiber Bragg gratings showing high-temperature sustainability[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, **24**(3): 430-438.
- [13] DOUAY M, XIE W X, TAUNAY T, *et al.* Densification involved in the UV-based photosensitivity of silica glasses and optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1329-1342.
- [14] 刘立, 光纤布喇格光栅传感器的性能退化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012, 18-32.
- [15] ZHANG Peng, DING Pin-yi, LIU Li. Investigation on thermal-induced decay of fiber Bragg grating [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, **36**(5): 997-1003.
- [16] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 43-51.