

再生光纤布拉格光栅的研究进展

薛渊泽^{1,2}, 王学锋^{1,2}, 罗明明^{1,2}, 唐才杰^{1,2}, 蓝天^{1,2}¹北京航天控制仪器研究所, 北京 100854;²北京光纤传感系统工程技术研究中心, 北京 100094

摘要 再生光纤布拉格光栅是通过对普通光纤布拉格光栅进行高温退火处理得到的一种耐高温光纤光栅, 因其在高温下具有光栅光谱不衰退的特性, 光纤光栅传感应用于高温环境成为可能。由于再生光纤光栅具有制作简单、成本低廉、传感性能良好等优势, 国内外学者对再生光纤光栅的性能及其传感应用进行了大量的研究。从再生光纤光栅的形成机理、制作方法、特殊类型光栅再生以及光纤光栅机械强度保护 4 个方面对现阶段再生光纤光栅的研究进行总结、分析, 并根据已经进行的研究内容对其高温传感应用进行了展望。

关键词 光纤光学; 再生光纤布拉格光栅; 退火; 高温传感

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020007

Review of Regenerated Fiber Bragg Grating

Xue Yuanze^{1,2}, Wang Xuefeng^{1,2}, Luo Mingming^{1,2}, Tang Caijie^{1,2}, Lan Tian^{1,2}¹Beijing Aerospace Control Device Institute, Beijing 100854, China;²Beijing Engineering Research Center of Optical Fiber Sensing System, Beijing 100094, China

Abstract Regenerated fiber Bragg grating (RFBG) is prepared from an ordinary fiber Bragg grating (FBG) through a high temperature annealing process, which has a high temperature resistant. The RFBG can work under a high temperature environment since the grating degeneration does not exist in RFBG. RFBG has attracted much attention due to its easy fabrication process, low cost, and excellent sensing performance. We review the development of RFBG from formation mechanism, fabrication, regeneration of specific FBG, and mechanical strength protection and forecast the high temperature sensing applications of RFBG.

Key words fiber optics; regenerated fiber Bragg grating; annealing; high temperature sensing

OCIS codes 060.2310; 060.3735; 060.3738

1 引言

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性, 通过特殊工艺在光纤纤芯形成周期性折射率调制的一种光纤无源器件, 它能够对特定的波长发生反射, 在纤芯内形成一个窄带的滤波器^[1]。光纤光栅传感器不仅具有重量轻、体积小、抗电磁干扰、本质安全等普通光纤传感器均具有的优势, 同时光纤光栅基于波长解调的特性^[2], 不受光源功率及耦合损耗影响, 具有良好的抗干扰特性。目前, 光纤光栅已被广泛应用于电力监测^[3]、结构监测^[4]、石油化工^[5]、医疗诊断和

国防等领域^[6]。

普通的光纤布拉格光栅是通过紫外激光曝光技术制成的 I 型光纤光栅, 这类光纤光栅一般只能应用于常温环境, 不能在高温环境中使用, 因为随着温度升高, 其折射率的周期性调制会逐渐消失, 这种现象被称为光纤光栅的热衰退效应^[7]。

为了实现光纤光栅传感器在航空航天、石油电力、化工冶炼等高温领域中的应用, 国内外研究人员开展了对高温光纤光栅的研究, 其中再生光纤光栅 (RFBG) 作为高温光纤光栅的一种类型以其制作简单、成本低廉、光谱特性良好等优势, 受到研究人员

收稿日期: 2017-08-07; **收到修改稿日期:** 2017-08-28

作者简介: 薛渊泽(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: yuanze_xue@126.com

导师简介: 王学锋(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电技术方面的研究。

E-mail: xuefeng_wang@sina.cn(通信联系人)

的广泛关注。

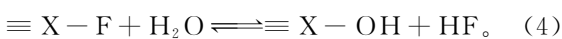
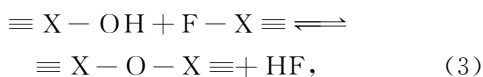
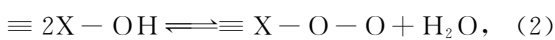
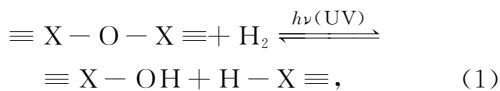
再生光纤光栅是一种对 I 型光纤光栅进行特定退火处理得到的耐高温光纤光栅,在退火过程中,光栅反射峰会先消失而后再再生出一个新的反射峰,而这个再生反射峰可在高温下不衰退,因此被称为再生光纤光栅。再生光纤光栅具有与 I 型光纤光栅相似的光谱形状,通常能够承受 1000 °C 以上的高温。本文将从再生光纤光栅的形成机理、制作方法、特殊类型光栅再生以及机械强度保护 4 个方面对国内外报道的再生光纤光栅的研究做简要总结与分析。

2 再生光纤光栅的形成机理研究进展

再生光纤光栅是通过高温退火处理得到的一种特殊的耐高温光纤光栅,从它出现开始,研究人员就对其形成机理进行了研究,但一直没有统一的结论。目前,主要的 2 种形成机理为化学物质的周期性扩散和光纤内部应力松弛形成了折射率调制。

2.1 化学物质周期性扩散机理的研究进展

2002 年,瑞典科学家 Fokine^[8]首次报道了一种通过高温热处理得到的耐高温光纤光栅,取名为化学组分光纤光栅(CCG)。实验所用光纤为氟锆共掺光纤,通过对刻写在其上的 I 型 FBG 进行 1000 °C 退火,得到一个反射率约为 25% 的 FBG。Fokine 认为,这种高温光纤光栅的形成机理是光纤中氟元素与羟基发生化学反应形成的氟化氢在高温下从被曝光的纤芯向外扩散形成了周期性的折射率分布。这种化学反应的方式可以用以下化学反应方程式表示:



2004 年,Fokine^[9]又报道了在载氢标准通信光纤上制作的再生光纤光栅,由于普通标准通信光纤不含氟,当时被认为是氧元素调制的 CCG。之后又有学者^[10]在载氢掺铒光纤上用类似的方法得到再生光栅,称之为类 CCG。

2007 年,Zhang 等^[11]将光纤光栅进行载氢处理后,同样通过 1100 °C 高温退火的方式得到了再生光纤光栅,并认为这是由于光纤中的羟基与载氢产生的氢气通过反应形成了水分子,水分子浓度的周期

性分布导致再生光纤光栅中纤芯折射率周期性分布。

2.2 光纤内部应力松弛机理的研究进展

2008 年,悉尼大学 Bandyopadhyay 等^[12-13]用 193 nm 激光器在载氢的硼-锗共掺的光敏光纤上刻写光栅,并通过 900 °C 高温退火的方法制得了再生光纤光栅。基于实验结果,Canning 等提出“光纤光栅的再生可能发生在光纤包层区域内或在纤芯-包层的界面”的假设,即光栅再生过程与光纤中的化学组分的扩散过程无关,但可能与光纤纤芯的玻璃软化温度有关。

2009 年,Linder 等^[14]在无载氢的高掺锗光纤上用 248 nm 脉冲激光制作出 23.5 dB 的 I 型光栅,并在 700 °C 高温中退火,获得了再生光纤光栅,实验证明载氢并不是光栅再生的必要条件,所以光纤中掺杂物质与氢气进行的化学反应及扩散并不是光栅再生的主要原因。

2012 年,悉尼大学 Cook 等^[15]为了证明载氢对光栅再生的不必要性,将光纤载入氦气代替载氢,同样得到了再生光纤光栅。同年,Cook 等^[16]还通过红外飞秒激光脉冲在 SMF-28 标准单模光纤和 Sumitomo 纯石英光纤上刻写了 I 型光纤光栅,并在 1000 °C 退火后实现了光栅再生,再生反射率分别为 8% 和 2.7%。由于 Sumitomo 纯石英光纤纤芯无掺杂,由此可说明纤芯中掺杂物质化学反应形成的物质扩散并不是光栅再生的主要原因,光栅再生是高温下光纤局部的应力松弛产生的周期性变化所致。

应力松弛理论认为,再生光栅形成的根本原因是光纤局部的应力松弛差异形成的折射率调制。高温热处理使种子光栅的纤芯和包层界面上较高的内应力发生松弛,在曝光区域和未曝光区域形成应力差异,导致周期性的应力变化,并可能引起玻璃结构变形,从而产生周期性的折射率变化,形成再生光栅。再生光栅和初始光栅之间的差异是由于石英玻璃过渡到一个非晶相导致的结构上的变化,该变化可能发生在纤芯和包层的交界处^[17]。

目前,更多的研究者认为再生光纤光栅的形成是由于光纤内部应力变化,但对于是否发生在纤芯和包层界面存在异议。2013 年 Yang 等^[18]通过化学腐蚀法将种子光纤光栅包层去除,同样得到了再生光栅,证明了光纤外包层并不是光栅再生的必要条件。再生光纤光栅的形成是一个复杂的过程,关于其机理目前仍存在较多的争议,化学物质扩散和应力松弛理论是光纤光栅再生机理的典型代表,这

2种理论本质上均认为是高温处理使光纤内部产生了一种更加稳定的分布状态,从而使光纤的周期性分布不易改变。

然而,以上研究大多是依据光栅退火再生后得到的光谱现象提出的一些假设,并没有针对再生光纤光栅内部成栅机制设计实验并进行验证。目前,作者所在课题组针对这一问题正在进行研究,认为一种折射率重新分布可引起再生光栅中心波长偏移,即在退火过程中掺杂光纤横截面的折射率分布产生变化,引起光纤波导结构及其模式有效折射率改变,最终导致新生成光栅中心波长发生改变。实验验证过程中,拟通过比较退火前后光纤横截面折射率分布的差异,同时对对比经过退火或不经退火的光纤在同一条件下写制布拉格光栅中心波长的差异,结合对光纤波导内模式的仿真分析,对其再生机理进行研究。

3 再生光纤光栅的制作方法研究进展

虽然再生光纤光栅的形成机理目前仍在探索中,但并不影响科研人员对再生光纤光栅制作技术的研究。再生光纤光栅是在I型种子光纤光栅的基

础上通过退火制作的,然而最终制作的再生光纤光栅的光谱差异较大,尤其是光栅光谱强度的差异。因此,对再生光纤光栅的制作工艺研究是十分必要的。研究表明^[19],光纤的掺杂、数值孔径、是否载氢、光栅刻写时的激光能量、光栅长度,以及再生时的退火温度、退火时间、退火程序等均会影响最终再生光纤光栅的光谱强度和其他光谱性能。

对再生光栅的光谱形成起直接作用的是光栅再生过程中的退火处理,2008年,Bandyopadhyay等^[12]在硼锗共掺光纤上制作再生光纤光栅时,采用了等时退火和等温退火2种方式,然而标准等时退火过程中,光栅在900℃时光谱消失,直到1100℃均未出现再生光谱;而采用等温退火处理后,光栅光谱同样在900℃消失,但在10min后光栅出现新的反射峰,光栅在900℃时的光谱变化过程如图1所示。该实验说明,再生光栅的形成与退火方式有关,但不能说明等时退火一定得不到再生光栅,在后续的研究中,仍有其他研究人员通过等时退火得到了再生光纤光栅,Alqarni等^[20]在对低能量飞秒激光脉冲刻写的光纤光栅进行退火再生研究时,用等时退火和等温退火得到了反射率基本一致的再生光纤光栅。

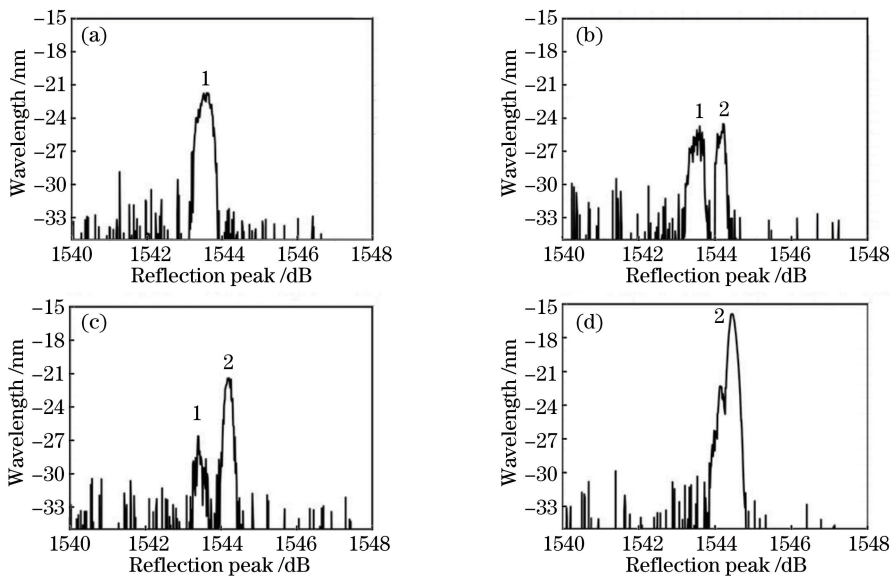


图1 900℃下光栅光谱演变过程

Fig. 1 Evolution of regenerated grating at 900 °C

相对于退火方式,退火温度对光栅的再生强度有着更明显的影响。加拿大Celikin等^[21]对再生温度和再生光栅光谱强度之间的关系进行了研究。实验采用193nm紫外激光对载氢的光敏光纤进行I型光栅的刻写,通过对种子光纤光栅进行700~1000℃不同温度下等温退火实验,得出结论:退火

温度越低,再生光纤光栅反射率越高,在700℃等温退火情况下,光栅最终反射率达到初始光栅反射强度的85.2%,而1000℃下仅为10.1%。

虽然较低温度的退火可以得到高反射率的再生光纤光栅,但需要更长的退火时间,在700℃下再生时间需要450h,而1000℃下仅需1.3h。针对光栅

再生热处理温度和时间之间的关系,北京航空航天大学王巧妮等^[22]建立了光栅再生过程中处理温度-再生时间模型

$$t_i = A \exp(-T_p/B) + C, \quad (5)$$

式中 T_p 为处理温度, B 为再生系数, A 、 C 为模型系数, t_i 为再生完成时间。显然 T_p 越小, t_i 越大, 两者呈指数增长关系。

在最近的研究中,聂铭等^[23]提出一种提高再生光纤光栅反射率的退火方式,即当擦除温度和再生温度不同时,再生光纤光栅获得了更高的再生反射率。实验数据表明,光纤光栅在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 下擦除,并在 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 下再生,使得普通通信单模光纤上得到的再生光纤光栅反射率达到 43.95% ,而将光纤光栅直接在 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 下退火再生得到的再生光纤光栅反射率仅为 24.54% ,可见适当增加擦除温度和再生温度之间的差异可有效提高再生光纤光栅的反射率。

光纤中掺杂离子的浓度也影响最终的再生光栅反射率, Bandyopadhyay 等^[19]通过对 SMF-28 光纤及其他几种掺锗浓度不同的光敏光纤进行再生光纤光栅制作时发现,在掺锗浓度最低的 SMF-28 光纤中得到了再生强度最高的再生光纤光栅,在其他条件相同时,锗浓度越高,再生光纤光栅的反射率越低,而光纤中其他的掺杂如氟和硼等,对光栅的再生率几乎无影响。这也说明光纤中掺杂特殊物质同样

可以实现光栅再生,如研究人员在掺硼、氟、铟、镓等^[8,12-13,24]光纤中均制作了再生光纤光栅。

光栅长度越长,再生光栅反射率就会越高,因为退火影响光纤的折射率调制。但若光栅足够长,在折射率调制较小时同样能够获得高的反射率。2009年, Canning 等^[25]在锗硅光纤上制作了 5 cm 长的光纤光栅,光栅再生后,反射率达 99% ,但光栅太长,导致其出现啁啾现象。

光纤载氢虽然不是光纤光栅再生的决定性因素,但载氢仍对光栅再生有着很重要的作用。光纤载氢后得到的再生光纤光栅具有更高的耐温性,并且能够获得强度更大的初始光栅,同时可能对光纤中的内应力产生一定影响,这些均会影响到最终再生光纤光栅的性能^[17]。

此外,比利时 Bueno 等^[26]还研究了一种快速实现光纤光栅再生的方法,即将种子光纤光栅进行恒温退火,通过这种方法仅用 31 s 就获得了再生光纤光栅。然而,根据实验结果,这种再生方法仅在高掺锗和硼锗共掺这种光敏光纤中产生,而在普通通信光纤中未出现,且退火温度相对较低,均在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 附近,温度太高将导致光栅彻底消失而不出现再生。这种快速再生方法并不适用于所有的光纤光栅,这可能与再生光纤光栅的形成机理有关。图 2 为恒温下光栅快速再生的反射率变化。

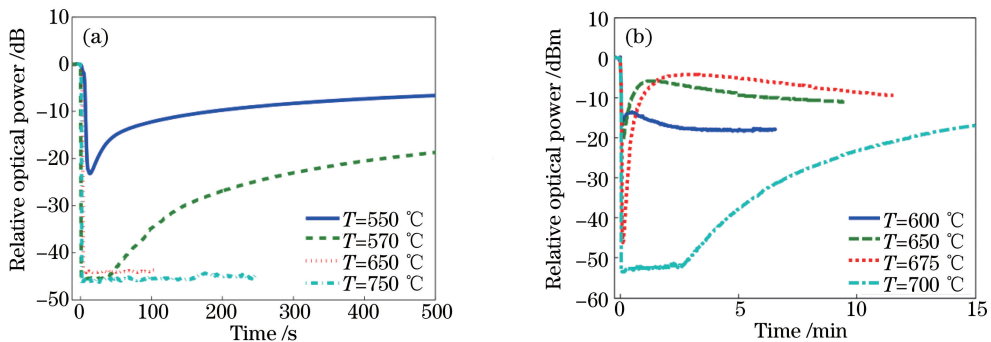


图 2 恒温下光纤光栅快速再生反射率变化。(a)高掺锗光纤光栅;(b)硼锗共掺光纤光栅

Fig. 2 Grating reflectivity evolutions of FBGs for rapid regeneration written in (a) hydrogenated highly Ge-doped fibers and (b) hydrogenated photosensitive Ge/B-doped fibers annealed at constant temperatures

北京交通大学 Wang 等^[27]研究了应力对光纤光栅再生的影响。结果表明,施加应力导致最终再生光纤光栅的波长增加,且施加的应力与光栅波长增加比率基本成正比,在 9 g 物体重力的牵引下,波长增加量达到 48 nm ,并且这种变化具有不可逆性。这项研究结果表明,可以通过采用施加应力的方法在普通种子光纤光栅上制作周期变化的特殊类型再生光纤光栅,如啁啾布拉格光纤光栅等。利用上述

原理,悉尼大学 Gao 等^[28]利用再生光栅技术和黏弹性调谐技术,使用特定的温度分布来定制再生光栅的周期分布,并将 1 个均匀的光纤光栅永久地调谐为 1 个宽带的再生啁啾光纤光栅,带宽可达 9.8 nm ,工作温度达 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 。

西北大学 Yang 等^[29]在一种新型光敏光纤上制作了耐高温达 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 的再生光纤光栅,这种新型的光敏光纤为 Er-YZCAPS(其中 ZrO_2 质量分数为

9.0%， Al_2O_3 质量分数为 2.0%， Y_2O_3 质量分数为 1.75%， P_2O_5 质量分数为 0.15%，该光纤采用改进的化学气相沉积法制作，光栅刻写采用的激光器为 244 nm 氩离子激光器，制作再生光栅的退火温度为 1200 °C。最终再生光纤光栅的测试温度为 25~1400 °C，其中 1000 °C 以下温度灵敏度约为 14 pm/°C，1000 °C 以上温度灵敏度约为 15.3 pm/°C。这种掺杂类型的再生光纤光栅的制作工艺进一步提高了再生光纤光栅的工作温度。

再生光纤光栅的制作是通过普通光纤光栅进行高温退火实现的，退火的温度和步骤对再生光纤光栅的最终反射率非常关键，因此在对光纤光栅进行再生研究时，退火方式应该是主要研究的内容，同时退火再生前所使用的初始光纤光栅的反射率及其他光谱参数直接决定再生光纤光栅的光谱性能，即再生光纤光栅的光谱形状对初始光纤光栅存在一定的“继承”关系。根据以上的研究结果，要想得到光谱强度高、边模抑制比高、光谱带宽窄的再生光纤光栅，首先需要光谱性能优良的初始光纤光栅，其次退火时应尽量降低再生温度并提高再生时间，且光栅长度不宜太短。

4 特殊类型光纤光栅的再生研究进展

普通单模光纤中刻写的光栅可实现对温度或应变的测量，是目前比较成熟的一类光纤光栅传感器。然而，其他特殊类型光纤光栅在光纤传感领域中也起着重要作用，如少模光纤光栅、倾斜光纤光栅、保偏光纤光栅等，特殊类型光纤光栅的再生方法与普通光纤光栅的再生方法基本一致，它作为光纤光栅再生技术的应用和拓展，成为研究人员对再生光纤光栅研究的热点之一。

马来西亚大学光子研究中心 Lai 等^[30]首次在两模(2G)光纤和四模(4G)光纤中制作了再生光纤光栅。实验采用的刻写光源为 KrF 准分子激光器，分别在单模、2G 和 4G 这 3 种模式的光纤上刻写了光纤布拉格光栅，这 3 种光栅的退火温度分别为 950, 920, 900 °C。然而 2G、4G 少模光纤光栅在退火再生后，仅观察到一阶模式，其余高阶模式由于强度太弱而无法观察到。少模光纤光栅可实现多参数的同时测量，如何提高少模再生光纤光栅的光谱强度有待进一步的研究。

保偏光纤中由于具有 2 个相互正交的模式，在它上面刻写的光栅可实现双参数的同时测量。德国慕尼黑应用科技大学 Polz 等^[31]采用波长为 248 nm

的准分子激光器在载氢的熊猫型偏振保持光纤上刻写了 I 型光纤光栅，并通过阶梯式等时退火方式，对 2 支熊猫型光纤光栅 G1 和 G2 在 1000 °C 温度下进行退火，最终 2 支再生光纤光栅的折射率调制 $\Delta n_{\text{AC,eff}}$ 保持在 1.7×10^{-5} 和 2.4×10^{-5} 。光纤光栅退火过程中折射率调制的变化如图 3 所示。在退火过程中，光纤中的双折射与温度呈非线性关系，且具有滞后效应，这是因为光纤中有热应力的存在。偏振保持型光纤光栅可实现对温度和应力的同时测量，文献[31]中给出的测量温度最高为 500 °C，原因是当温度大于 500 °C 时，光纤由于黏弹效应无法测量应力。

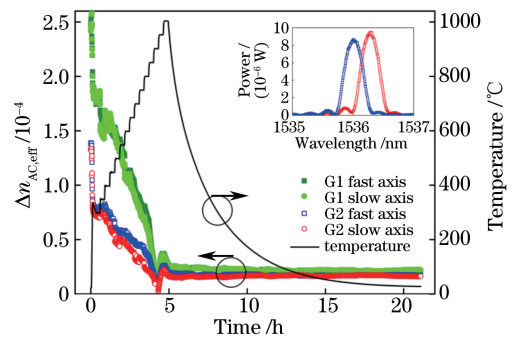


图 3 2 支光纤光栅再生实验折射率调制的演变过程 (插图为 G2 快轴和慢轴上的功率谱图)

Fig. 3 Evolution of reflectivity regulation of both gratings G1 and G2 during the regeneration experiment (The inset shows the separated spectra of the fast axis and slow axis of G2)

美国匹兹堡大学 Chen 等^[32]在空心微结构光纤上制作了再生光纤光栅，并用于压力和温度的同时测量。实验选取外径 220 μm、内径 90 μm 的双孔光纤，使用 KrF 准分子激光器结合相位掩模板的方式刻写反射率为 97.5% 的种子光纤，然后在 800 °C 高温下进行退火，得到了再生光栅，但其反射率仅为 0.23%，低于普通单模光纤中制作的再生光栅。

法国 Cotillard 等^[33]对倾斜光纤布拉格光栅进行了再生研究。实验采用 244 nm 氩离子激光器和 Lloyd 镜通过干涉法在 SMF-28 普通通信单模光纤中刻写了倾斜角度分别为 0°、4°、8° 的光纤光栅，通过 900 °C 高温退火实现了倾斜光纤光栅的再生。

西北大学 Qiao 等^[34]制作了再生啁啾光纤光栅，通过对刻写在普通单模光纤上的啁啾光纤光栅进行 800 °C 退火，得到了耐高温 1000 °C 的啁啾光纤光栅。再生啁啾光纤光栅保持了原始种子啁啾光纤光栅的光谱形状，3 dB 带宽也基本相同，再生啁啾光纤光栅可用于高温情况下的光纤激光器和光纤传感。

加拿大卡尔顿大学 Alqarni 等^[20]对高阶光纤光栅的再生进行了研究。采用红外飞秒激光光源在载氢 SMF-28 光纤上刻写一阶和三阶 2 种类型的光栅,并同时进行 1000 °C 退火实验,实验结果表明:一

阶光纤光栅发生再生,且再生强度为 39%,而三阶光栅光谱在 1000 °C 并未消失,且在 24% 的反射率时保持稳定。图 4 为一阶和三阶光栅在等温和等时退火下光纤光栅的光谱反射率变化情况。

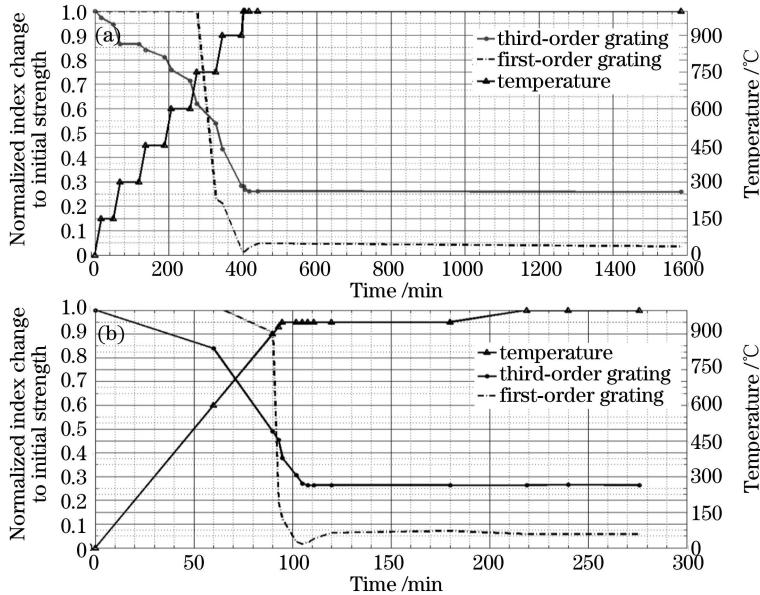


图 4 一阶和三阶光栅退火处理时折射率变化情况。(a)等时退火;(b)等温退火

Fig. 4 Evolutions of first-order and third-order gratings' normalized indexes during (a) isochronal and (b) isothermal annealing

以上研究表明,光纤光栅的退火再生是一个普遍的现象,并不局限于普通单模光纤布拉格光栅,在少模光纤、保偏光纤、空心光纤刻写的光栅以及倾斜光纤光栅、高阶光纤光栅均实现了高温退火再生的现象,这些特殊类型光纤光栅的再生研究对于特殊用途的高温光纤光栅传感器件研究具有重要意义。

5 再生光纤光栅机械强度保护的研究进展

从实用性方面考虑,再生光纤光栅经过高温退火处理后,有机涂覆层无法存在,光纤变得脆弱易断,要将再生光纤光栅应用于高温测量中,须对其进行机械强度的保护,目前的机械强度保护主要包括高温涂覆保护和封装保护 2 种方式。

5.1 再生光纤光栅的耐高温涂覆研究进展

普通光纤表面的涂层通常为有机材料,大部分有机材料无法承受高于 300 °C 的温度,再生光纤光栅表面的涂覆材料须要具有耐高温的性能。目前光纤的耐高温涂层材料主要包括金属材料 and 无机非金属材料。其中,金属材料包括铜、金、镍、钛、钼等高熔点材料;无机非金属材料主要包括碳及其化合物。

早在 1989 年,国外就有研究人员对光纤进行金属镀膜的研究^[35],金属材料通常通过电镀、化学镀、

磁控溅射、化学气相沉积和物理气相沉积等方式涂覆于光纤表面。华东理工大学 Tu 等^[36]通过磁控溅射和电镀的方式对退火得到的再生光纤光栅进行 Ti-Ag-Ni 金属镀膜,光纤镀膜后表面光滑,如图 5 所示。文中给出的最高测试温度为 600 °C,实际上,光纤金属涂覆能否承受足够高的温度,取决于金属涂覆与光纤的结合程度^[37],光纤在退火后变得非常易碎,这给金属涂覆的操作造成了一定的困难。

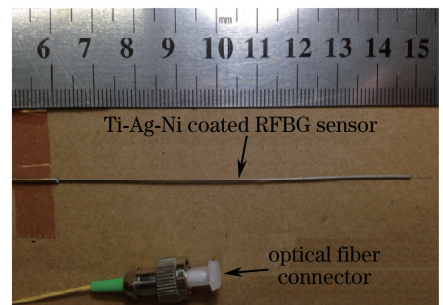


图 5 Ti-Ag-Ni 金属镀膜的再生光纤布拉格光栅传感器照片
Fig. 5 Photograph of Ti-Ag-Ni coated RFBG sensor

北京航空航天大学 Wang 等^[38]用 800 nm 红外飞秒激光在镀金光纤上刻写了光纤布拉格光栅并对其进行了再生研究,金涂覆光纤光栅经过 19 h 800 °C 的高温退火后,再生光纤光栅强度达到饱和,约为初始光栅的 5%,并且经过高温退火后光纤的

金涂覆层并未受到破坏。

一般通过化学气相沉积法产生非金属无机化合物,并用碳层快速堆积来实现充分密封效应^[39]。Alberto等^[40]在再生光纤光栅表面通过热丝化学气相沉积法(HFCVD)涂覆了金刚石材料,它具有耐800℃高温的温度性能。

对再生光纤光栅进行耐高温材料的涂覆是解决高温下光纤光栅脆弱易断的有效方式,但如何提高高温下涂层与光纤表面的结合强度和光纤光栅的机械强度,目前仍是一个技术难题,这有待研究人员做后续的探索。

目前,作者所在课题组对再生光纤光栅的高温涂覆也进行了一些研究。研究表明,金涂覆材料是较为理想的一种耐高温涂覆材料,由于金材料具有较好的延展性,所以对光纤进行金涂覆既保证了光纤的柔韧性,也加强了退火后光纤的机械强度。同时金涂覆的厚度对光纤光栅的响应率以及灵敏度有较大的影响,针对光纤光栅传感器传感性能的需求,拟通过对镀金光纤光栅进行机械强度仿真和热传递仿真分析,选取合适的镀金层厚度并进行实验验证。

5.2 再生光纤光栅的封装保护研究进展

对再生光纤光栅进行机械保护的另一种简单的方式就是对其进行封装处理,目前应用最多的封装方式为高温管式封装。

美国航天中心 Adamovsky等^[41]报道了关于再生光纤光栅长期高温测试的信息,并给出1种再生光纤光栅的封装方式——高温陶瓷管式封装,封装后的传感器如图6所示。封装采用1个直径较小的高温陶瓷管,将裸光纤光栅穿入其中,使光栅置于顶端,并用1个直径稍大的陶瓷管套于小直径陶瓷管

外面,使2个管长度差等于光栅长度,陶瓷管另一端采用光纤FC/APC连接器进行连接固定。



图6 陶瓷管式封装再生光纤光栅传感器照片

Fig. 6 Photograph of ceramic tube packaged RFBG sensor

西班牙 Barrera等^[42]利用陶瓷管和镍合金管对再生光纤光栅进行了封装。首先使用内径稍大于光纤直径的陶瓷管使光纤保持竖直,然后在陶瓷管外套上镍合金管进行保护,光纤光栅位于陶瓷管的顶端,陶瓷管和金属管的另一端使用高温陶瓷胶进行粘接。其中陶瓷管内外直径分别为0.13/1.20 mm,金属管内外直径分别为1.3/1.5 mm,传感器照片如图7所示。

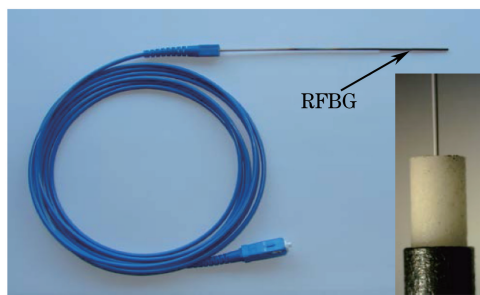


图7 陶瓷管和金属管封装再生光纤光栅传感器照片

Fig. 7 Photograph of ceramic and metal tube packaged RFBG sensor

巴西 Dreyer等^[43]使用钢管对再生光纤光栅进行封装保护,钢管内外直径分别为1.70/3.18 mm,并将该再生光纤光栅传感器应用于水力发电机轴承的温度梯度监测。传感器的装配如图8所示。

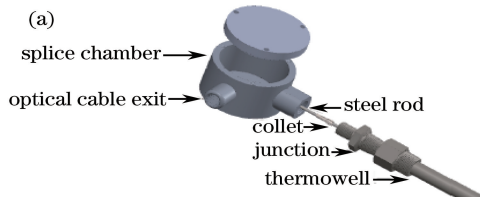


图8 钢管封装再生光纤光栅传感器。(a)机械模型;(b)传感器照片

Fig. 8 Steel tube packaged RFBG. (a) Mechanistic model; (b) photograph of sensor

再生光纤光栅的耐高温封装大多采用耐高温管式封装来实现,这种方式可以对再生光纤光栅起到机械保护作用,但结构相对简单,只能用于特定的一些测量环境,同时传感器的精度和可靠性均较差。

对再生光纤光栅进行封装保护是将再生光纤光栅应用于高温传感系统中必要的研究内容,对再生

光纤光栅进行金属涂覆或封装保护等时,除了须考虑提高其机械强度外,还须研究如何提高封装后光纤光栅高温传感器的测量精度和响应速率等问题。

6 结束语

再生光纤光栅的出现,使光纤光栅传感器应用

于高温环境成为了可能。本文从再生光纤光栅的形成机理、制作方法、特殊类型光栅的再生以及机械强度保护等方面出发,介绍了有关再生光纤光栅的研究成果。

再生光纤光栅的形成机理是光纤光栅实现再生的研究基础,目前再生光纤光栅形成机理虽然无统一解释,但大致可分为2种观点,即化学物质周期性扩散机理和光纤内部应力松弛机理。它们均认为高温处理使光纤内部产生了一种更加稳定的分布状态。再生光纤光栅的制作方法主要是对普通I型光纤光栅进行特定形式的高温退火处理,但再生光纤光栅的最终反射率普遍较低,影响再生光纤光栅反射率的因素包括退火再生前初始光纤光栅的参数以及再生退火过程中退火温度、退火步骤和退火的时间。特殊类型光纤光栅的再生是光栅再生方法的进一步推广应用,它使得具有其他功能的特殊光纤光栅也能够应用于高温环境。为了解决光纤光栅退火后变得脆弱易断的问题,研究人员从高温涂覆和封装保护2个方面对再生光纤光栅进行了机械强度保护的研究。

总之,光纤光栅的再生是解决光纤光栅应用于高温传感领域的一种有效方法,然而如何实现再生光纤光栅的工程化应用仍有待研究人员从再生光纤光栅的实用性出发,进一步提高其可靠性和长期稳定性。随着再生光纤光栅的不断发展,它将在航空航天、石油电力、化工冶炼等高温领域中获得良好的应用。

参 考 文 献

- [1] Liao Y B, Li M. Fiber optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 205-214.
廖延彪, 黎敏. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 205-214.
- [2] Wang Q N, Yang Y H. Adaptive peak detection algorithm for fiber Bragg grating spectrum based on image processing[J]. Navigation and Control, 2016, 15(1): 70-75.
王巧妮, 杨远洪. 自适应的光纤布拉格光栅图像寻峰算法[J]. 导航与控制, 2016, 15(1): 70-75.
- [3] Zhang X H, Wang L T, Fang N. Study on power frequency electric-field measurements based on fiber Bragg grating sensing technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 020603.
张旭辉, 王陆唐, 方捻. 基于光纤光栅传感技术的工频电场测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 020603.
- [4] Jiang S D, Zhang F X, Li S J, *et al.* Application of FBG strain sensing system in ship structure monitoring [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(2): 268-270.
姜劲栋, 张发祥, 李淑娟, 等. 光纤光栅应变传感系统在船舶结构监测中的应用[J]. 半导体光电, 2017, 38(2): 268-270.
- [5] Zhu P H. Application of the optical fiber and grating fire automatic detection system in petrochemical enterprise [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2006(6): 21-22.
褚佩华. 光纤光栅火灾自动探测系统在石油化工企业中的应用[J]. 石油化工自动化, 2006(6): 21-22.
- [6] Luo B B, Wu S X, Wang L L, *et al.* Newcastle disease virus immunosensor based on 81° tilted fiber grating [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1106001.
罗彬彬, 吴胜昔, 王玲玲, 等. 基于81°倾斜光纤光栅的新城疫病毒免疫传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1106001.
- [7] Li C, Zhang Y M, Zhao Y G, *et al.* Fiber grating: Principles, techniques, and sensing applications[M]. Beijing: Science Press, 2005: 15-16.
李川, 张以谟, 赵永贵, 等. 光纤光栅: 原理、技术与传感应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 15-16.
- [8] Fokine M. Thermal stability of chemical composition gratings in fluorine-germanium-doped silica fibers [J]. Optics Letters, 2002, 27(12): 1016-1018.
- [9] Fokine M. Thermal stability of oxygen-modulated chemical-composition gratings in standard telecommunication fiber [J]. Optics Letters, 2004, 29(11): 1185-1187.
- [10] Trpkovski S, Kitcher D J, Baxter G W, *et al.* High-temperature-resistant chemical composition Bragg gratings in Er³⁺-doped optical fiber [J]. Optics Letters, 2005, 30(6): 607-609.
- [11] Zhang B, Kahrizi M. High-temperature resistance fiber Bragg grating temperature sensor fabrication [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(4): 586-591.
- [12] Bandyopadhyay S, Canning J, Stevenson M, *et al.* Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm [J]. Optics Letters, 2008, 33(16): 1917-1919.
- [13] Canning J, Stevenson M, Bandyopadhyay S, *et al.* Extreme silica optical fiber grating [J]. Sensors, 2008, 8(10): 6448-6452.
- [14] Lindner E, Chojetzki C, Brückner S, *et al.* Thermal

- regenerated of fiber Bragg grating in photosensitive fibers [J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12523-12531.
- [15] Cook K, Shao L Y, Canning J. Regeneration and helium: regenerating Bragg gratings in helium-loaded germanosilicate optical fibre [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(12): 1733-1742.
- [16] Cook K, Smelser C, Canning J, *et al.* Regenerated femtosecond fibre Bragg gratings [C]. *Third Asia Pacific Optical Sensors Conference*, 2012, 8351: 835111.
- [17] Wang T. Research on fabrication and property of high temperature of high temperature regenerated grating [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013: 40-41.
王涛. 高温再生光纤光栅的制作与性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013: 40-41.
- [18] Yang H Z, Chong W Y, Cheong Y K, *et al.* Thermal regeneration in etched-core fiber Bragg grating [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(7): 2581-2585.
- [19] Bandyopadhyay S, Canning J, Biswas P, *et al.* A study of regenerated gratings produced in germanosilicate fibers by high temperature annealing [J]. *Optical Express*, 2011, 19(2): 1198-1206.
- [20] Alqarni S A, Bernier M, Smelser C W. Annealing of high-temperature stable hydrogen loaded fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(9): 939-942.
- [21] Celikin M, Barba D, Bastola B, *et al.* Development of regenerated fiber Bragg grating sensors with long-term stability [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21897-21909.
- [22] Wang Q N, Yang Y H, He J, *et al.* Study of fiber Bragg grating regeneration process and regeneration model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0306001.
王巧妮, 杨远洪, 何俊, 等. 光纤布拉格光栅再生过程及模型研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0306001.
- [23] Nie M, Zhang D S, Wu M Q, *et al.* Growth law of high temperature resistance regenerated fiber grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050601.
聂铭, 张东生, 吴孟琦, 等. 耐高温再生光纤光栅的生长规律 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050601.
- [24] Gunawardena D S, Mat-Sharif K A, Lai M H, *et al.* Thermal activation of regenerated grating in hydrogenated gallosilicate fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(6): 1659-1664.
- [25] Canning J, Fenton J, Stevenson M. Ultra-strong regenerated gratings [C]. *14th Optoelectronics and Communications Conference*, 2009: 710-711.
- [26] Bueno A, Kinet D, Mégret P, *et al.* Fast thermal regeneration of fiber Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4178-4181.
- [27] Wang T, Shao L Y, Canning J, *et al.* Regeneration of fiber Bragg gratings under strain [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(10): 2080-2085.
- [28] Gao S R, Canning J, Cook K. Ultra-high temperature chirped fiber Bragg gratings produced by gradient stretching of viscoelastic silica [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5397-5400.
- [29] Yang H Z, Qiao X G, Das S, *et al.* Thermal regenerated grating operation at temperatures up to 1400 °C using new class of multimaterial glass-based photosensitive fiber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6438-6441.
- [30] Lai M H, Gunawardena D S, Lim K S, *et al.* Thermal activation of regenerated fiber Bragg grating in few mode fibers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2016(28): 7-10.
- [31] Polz L, Hopf B, Jarsen A, *et al.* Regenerated Bragg gratings in Panda fibers for simultaneous temperature and force measurements at high temperatures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(19): 4550-4556.
- [32] Chen T, Chen R Z, Jewart C, *et al.* Regenerated gratings in air-hole microstructured fibers for high-temperature pressure sensing [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3542-3544.
- [33] Cotillard R, Laffont G, Ferdinand P. Regeneration of tilted fiber Bragg gratings [C]. *SPIE*, 2014, 9157: 91572S.
- [34] Qiao X G, Wang Y P, Yang H Z, *et al.* Ultrahigh-temperature chirped fiber Bragg grating through thermal activation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(12): 1305-1308.
- [35] Bnbel G M, Krause J T, Bickta B J, *et al.* Mechanical reliability of metallized optical fiber for hermetic terminations [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(10): 1488-1493.
- [36] Tu Y, Qi Y H, Tu T S. Fabrication and thermal characteristics of Ti-Ag-Ni coated regenerated grating sensors for high-temperature sensing [C]. *SPIE*, 2013, 8693: 869309.
- [37] Zhu Y H, Wen J H, Kang J J, *et al.* Fiber grating,

- metallization and sensing technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 73-74.
- 朱月红, 文继华, 亢俊健, 等. 光纤光栅、金属化及传感技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 73-74.
- [38] Wang Q, Yang Y, He J, *et al.* Femtosecond laser inscribed Bragg gratings in gold-coated fiber for space application [C]. International Conference on Optical Fibre Sensors, 2015, 9634: 963460.
- [39] Yin Y Z. Research on heat resistance coating of optical fiber Bragg grating sensors [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 7-10.
- 殷燕子. 耐温光纤布拉格光栅传感器涂层的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 7-10.
- [40] Alberto N J, Kalinowski H J, Neto V F, *et al.* Regeneration of FBGs during the HFCVD diamond-fiber coating process [C]. Second International Conference on Applications of Optics and Photonics, 2014, 9286: 928643.
- [41] Adamovsky G, Mackey J R, Floyd B M, *et al.* Development and performance verification of fiber optic temperature sensors in high temperature engine environments [C]. AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014, 3922: 1-12.
- [42] Barrera D, Finazzi V, Villatoro J, *et al.* Packaged optical sensors based on regenerated fiber Bragg gratings for high temperature applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 107-112.
- [43] Silva E V D, Dreyer U J, Sousa K D M, *et al.* Temperature sensor for hydro generator bearings using thermally regenerated fiber Bragg gratings [C]. The Ninth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2015, 978: 35-40.