

高温光纤光栅的研究进展

杨樟成 徐汉锋 董新永

(中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要 为了满足航空航天、导弹制导、冶炼等一些高温领域的传感测量需求,国内外学者对高温光纤光栅进行了大量的研究工作。对已报道的主要的高温光纤光栅进行了综述,按照光栅结构、特点和所用光纤的不同,将其分为Ⅱ型光纤光栅、ⅡA型光纤光栅、化学组分光纤光栅、掺杂特殊离子的光纤光栅、结构变化型长周期光纤光栅等,逐类进行了说明并对它们的制作方法、高温特性、优缺点等进行了介绍和简评,并对其发展前景和应用进行了展望。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 光纤光栅; 高温测量

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.050003

Research Development of High-Temperature Resistant Fiber Gratings

Yang Zhangcheng Xu Hanfeng Dong Xinyong

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract High-temperature resistant fiber gratings have attracted lots of research interest in recent years due to their potential applications in several industrial and military areas such as aerospace, missile and smelting. Their research development is introduced by classifying them into five types, including type-Ⅱ gratings, type-ⅡA gratings, chemical composition gratings (CCGs), special ion-doped fiber gratings and structural modification-induced long period fiber gratings. The fabrication methods, high temperature performances, and merits and drawbacks are reviewed. Their future developments and applications are discussed.

Key words fiber optics; fiber sensors; fiber gratings; high-temperature measurement

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 060.3738

1 引言

光纤光栅是利用石英光纤的紫外光敏性,用特殊工艺使光纤纤芯的折射率发生周期性的调制而形成的,它能够对波长满足布拉格条件的入射光产生反射。光纤光栅具有插入损耗低、波长选择性好、不受电磁干扰、灵敏度高、重量轻、体积小、耐腐蚀等优点,在光通信和光纤传感系统中具有很好的应用。

1978年, Hill等^[1]使用488 nm氩离子激光器作为光源,利用驻波干涉法成功制作了第一根光纤布拉格光栅(FBG);1989年, Meltz等^[2]提出了光纤横向曝光成栅技术,大大提高了光栅的制备效率;1993年, Hill等^[3]提出了相位掩模板法横向写入技术,极大地降低了对光纤光栅制备系统的技术要求;同年, Lemaire等^[4]提出了光纤载氢技术,可以大幅度地提高光纤对紫外激光照射的光敏性,使普通单模光纤的纤芯折射率变化幅度提高了两个数量级,极大地提高了光纤光栅的制备效率,降低了成本。

一般情况下,光纤纤芯在刻写光栅的过程中发生折射率的正调制,即折射率变大,表现为中心反射波长在写入过程中缓慢地向长波方向移动。这类光栅为普通光栅,适用面最广,被称为I型光纤光栅。然而,I型光纤光栅的折射率调制并不稳定,在高温环境下会逐渐退化,如写制在普通硼-锆共掺光纤中的I型光纤光栅只适用于200℃以下的工作环境^[5],当温度高于200℃时,其反射率随温度的上升而下降,在350℃的高温环境下退火几小时光栅就可以完全被擦除。因此,I型光纤光栅仅适用于常温环境,不能用于高温测量。

收稿日期: 2011-11-14; 收到修改稿日期: 2011-12-15; 网络出版日期: 2012-03-22

基金项目: 国家973计划(2010CB327804)、国家自然科学基金(60807021)和浙江省自然科学基金(R1080087)资助课题。

作者简介: 杨樟成(1987-),男,硕士研究生,主要从事光纤传感和光纤光栅等方面的研究。

E-mail: yang_z_c@hotmail.com

导师简介: 董新永(1975-),男,博士,研究员,主要从事光纤传感、光纤光栅和光纤通信等方面的研究。

E-mail: xydong@cjlu.edu.cn(通信联系人)

为了满足航空航天、导弹制导、冶炼等一些高温领域的传感测量需求,国内外研究人员在高温光纤光栅的研制方面开展了大量工作^[6~10],开发了多种具有不同高温稳定性的光纤光栅。本文对已报道的主要的高温光纤光栅研究工作进行综述,按照光栅结构、特点和所用光纤的不同,将其分为Ⅱ型光纤光栅、ⅡA型光纤光栅、化学组分光纤光栅(CCG)、掺杂特殊离子的光纤光栅、结构变化型长周期光纤光栅等,逐类进行了说明并对它们的制作方法、高温特性、优缺点等进行了介绍和简评。

2 高温光纤光栅的制备与特性

2.1 Ⅱ型光纤光栅

Ⅱ型光纤光栅的制备需要能量密度较高的激光,制备过程中存在着激光的非线性吸收效应,从而导致光纤中的玻璃晶格结构的熔融,产生较大(10^{-3} 以上)的折射率调制,因此Ⅱ型光纤光栅具备优越的高温稳定性,能够在800℃的高温环境下正常工作^[11]。通过显微镜观察Ⅱ型光纤光栅,可以清晰地看到光纤因玻璃熔融而产生的结构变化。图1和图2分别是准分子激光器^[12]和飞秒激光器^[13]刻写的Ⅱ型光纤光栅的结构图。因为光纤纤芯发生了物理破坏,所以Ⅱ型光纤光栅的折射率调制大于Ⅰ型光纤光栅的折射率调制。

目前用于刻写Ⅱ型光纤光栅的激光器主要有大功率的准分子激光器和飞秒激光器。利用前者制备Ⅱ型光纤光栅的方法主要是相干写入法和相位掩模板写入法,而利用后者刻写光栅的方法可归为相位掩模板写入法和逐点写入法。表1列出了刻写Ⅱ型光纤光栅的几种典型方法。

采用相干写入法时,入射激光经分光镜分为两束,经全反射后相交于光纤上,产生干涉场,形成正弦分布明暗相间的干涉条纹。光纤经过一定时间的照射,在纤芯内部引起和干涉条纹相同分布的折射率变化,从而在光纤上写入正弦分布的光栅。Archambault等^[11]采用能量为40 mJ(约889 mJ/cm²)、波长为248 nm的准分子激光脉冲,在数值孔径为0.25的掺锗(物质的量分数15%)光纤中以干涉法制作出了Ⅱ型光纤光栅,其反射谱与透射

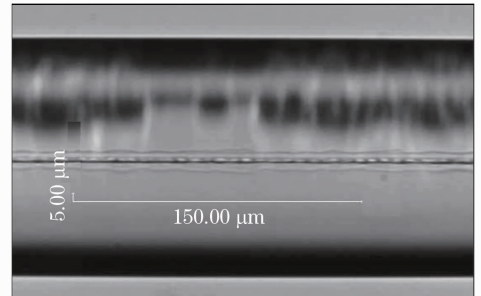


图1 准分子激光器单脉冲刻写的Ⅱ型光纤光栅的折射率调制影像

Fig. 1 Photographic image of photoinduced index modulation of single-excimer-pulse writing of type II gratings

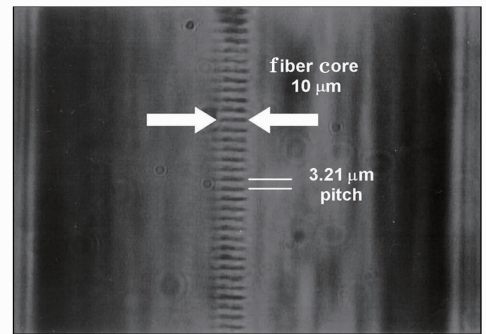


图2 飞秒激光器刻写的Ⅱ型光纤光栅的折射率调制影像

Fig. 2 Photographic image of photoinduced index modulation of 800 nm femtosecond laser writing of type II gratings

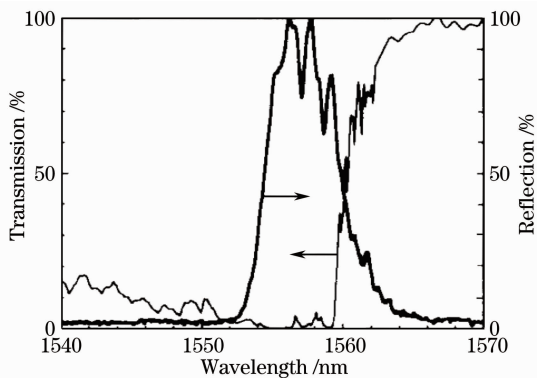


图3 Ⅱ型光纤光栅的典型透射谱与反射谱

Fig. 3 Reflection and transmission spectra of typical type II gratings

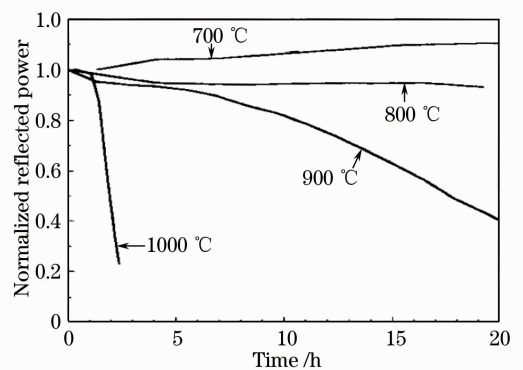


图4 Ⅱ型光纤光栅的高温稳定性测量结果

Fig. 4 High-temperature stability measurement results of type II gratings

谱如图 3 所示。显然, II 型光纤光栅的反射带宽(7.5 nm)远大于 I 型光纤光栅的带宽,而且短于布拉格波长的光被耦合进包层而产生损耗,大于布拉格波长的光仍可在纤芯中传输。该方法制作的 II 型光纤光栅在 800 °C 的高温环境下放置 24 h 后,反射率无明显降低;在 900 °C 的高温环境下放置 24 h 后,反射率则出现较大幅度的降低;在 1000 °C 的高温环境下放置 4 h 光栅就会被完全擦除,其高温特性曲线如图 4 所示。

研究表明,在高双折射光纤上制作 II 型光纤光栅所需的激光能量密度较低。Hill^[14]等利用能量密度为 60 mJ/cm² 的倍频染料激光脉冲,在高双折射光纤上成功制作了 II 型光纤光栅。与文献[11]相比,激光能量密度降低了一个数量级,这是由于高双折射光纤内部存在着应力,在紫外激光照射下发生了应力释放效应。

逐点写入法利用精密机构控制光纤的运动位移,每隔一个周期曝光一次。Martinez 等^[15]采用功率密度约为 10¹⁴ W/cm² 的飞秒激光脉冲在 SMF-28 光纤上以逐点写入法制得了 II 型光纤光栅,并发现这类光栅能够在 1000 °C 的高温环境下正常工作。但是,逐点写入法的缺点是需要复杂的光学聚焦系统和精确的位移移动技术,而且写入效率低,不能用于批量生产。

相位掩模板写入法则利用激光垂直照射相位掩模板所产生的衍射条纹来对光纤进行曝光。Mihailov 等^[16]采用功率密度为 2.9×10¹² W/cm² 的飞秒激光器及相应的相位掩模板在标准 SMF-28 光纤上制作出了折射率调制达 1.9×10⁻³ 的 II 型光纤光栅,该方法刻写的 II 型光纤光栅能够承受 1050 °C 的高温。在同等实验条件下,将 SMF-28 光纤载氢之后,飞秒激光器刻写 II 型光纤光栅所需的功率密度是在无载氢光纤上的 1/3^[17]。为了进一步增强 II 型光纤光栅的高温特性,Grobnic 等^[18]用飞秒激光器在多模水晶蓝宝石光纤上制作了 II 型光纤光栅,能够在 1500 °C 的高温环境下正常工作而反射率无明显衰减,其温度灵敏度随着温度的上升而升高,在 1200 °C 附近的温度灵敏度为 25 pm/°C。

表 1 II 型光纤光栅的典型制作方法

Table 1 Typical fabrication methods of type II gratings

Laser used	Power/energy intensity	Fiber used	Inscribing method	Highest temperature / °C
Excimer laser ^[11]	~889 mJ/cm ²	Germania-doped (15%) core	Interferometric	800
Frequency-doubled dye laser (240 nm) ^[14]	60 mJ/cm ²	High-birefringence bow-tie fiber	Interferometric	/
Femtosecond laser ^[15]	10 ¹⁴ W/cm ²	SMF-28 fiber	Point-by-point	1000
Femtosecond laser ^[16]	2.9×10 ¹² W/cm ²	SMF-28 fiber	Phase mask	1050
Femtosecond laser ^[18]	/	Multimode crystalline sapphire fiber	Phase mask	1500

II 型光纤光栅的高温性能远比 I 型光纤光栅优越,能够在 800 °C 的高温环境下长期工作,并且制备效率高。然而,II 型光纤光栅也存在着一些不足,如制作 II 型光纤光栅需要高功率激光器,增加了制作成本。另外,II 型光纤光栅具有反射谱带宽大和透射谱短波损耗大等缺陷,影响了其温度测量精度和波分复用能力。

2.2 II A 型光纤光栅

II A 型光纤光栅是指利用光纤对紫外(UV)激光的双光子吸收效应产生折射率负调制的光纤光栅。这类光栅具有良好的高温稳定性,能够承受 500 °C~700 °C 的高温,因此成为了研究热点^[19~23]。

Dong 等^[20]采用 ArF 激光器(波长为 193 nm,重复频率 20 Hz,能量密度 0.31 J/cm²)快速地在硼锆共掺光纤上写入折射率负调制(约 -3.0×10⁻⁴)的 II A 型光纤光栅。在激光的照射下,光纤光栅的折射率先增加

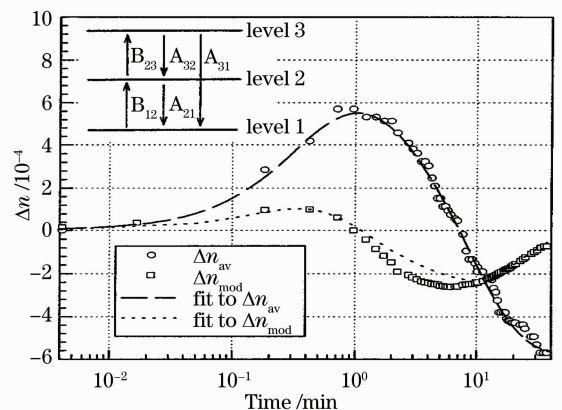


图 5 II A 型光纤光栅制备过程中折射率调制与平均折射率随紫外激光照射时间的变化曲线

Fig. 5 Growth of index modulation and average index variation of II A type fiber grating under UV laser irradiation

($\Delta n > 0$) 然后逐渐减小,直至产生折射率负调制($\Delta n < 0$),折射率变化曲线如图 5 所示。

因为波长为 193 nm 的激光要比波长为 244 nm 或 248 nm 的激光能量高,所以采用波长为 193 nm 的激光器更容易制备出 II A 型光纤光栅^[19]。Dong 等^[20]研究发现,在刻写 II A 型光纤光栅的过程中,激光能量密度越高,则能量累积速度越快,即刻写光栅所需的时间越短,但是折射率负调制的最大值与激光脉冲的能量密度无关。Groothoff 等^[21]采用非稳腔准分子激光器来减少脉冲能量的波动,刻写出的 II A 型光纤光栅具有更优越的高温稳定性,能承受 700 °C 的高温。II A 型光纤光栅的温度特性曲线如图 6 所示^[21],中心波长随温度的上升而变大,在小于 700 °C 的温度范围内,光栅的反射率和透射率基本无变化,当温度超过 700 °C 时,反射率逐渐下降,透射率逐渐上升。

Riant 等^[22]研究发现,II A 型光纤光栅一般在高掺锗、小纤芯且光纤内部存在较高应力的光纤中更容易实现,但是无法在载氢之后的光纤中写入。这表明光纤载氢改变了光纤的化学或物理特性。

总之,就高温稳定性而言,II A 型光纤光栅的表现介于 I 型和 II 型光纤光栅之间,能够承受 500 °C ~ 700 °C 的高温。制作 II A 型光纤光栅对激光器的要求低,而制作周期较长(数分钟至几小时,与激光能量密度、重复频率有关)。

2.3 化学组分光纤光栅(CCG)

化学组分光纤光栅中纤芯折射率的调制是由纤芯中化学组分的周期性分布引起的,其制作过程中包括光栅的退化和再生过程,因此也被称为再生光纤光栅。这类光栅具有优越的高温稳定性,能够在 1000 °C 的高温环境下正常工作。

化学组分光纤光栅的制作过程一般包括光纤载氢、紫外刻写、氢的扩散过程和高温退火处理等步骤。光栅的退化和再生发生在高温退火阶段。

Fokine^[23]采用 244 nm 的氩离子激光器在载氢的掺氟光纤上刻写初始光栅,然后以 20 °C/min 的升温速度从室温加热到 1000 °C 将初始光栅进行退火处理。初始光栅的反射率会随着温度的上升而下降,在 950 °C 附近完全被擦除,在被擦除之后又重新长出一个反射率约为 25% 的再生光纤光栅,测得其折射率调

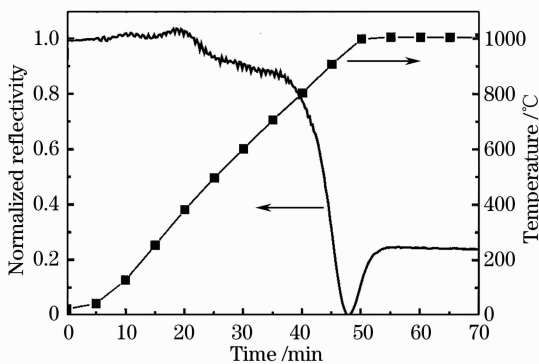


图 7 化学组分光纤光栅在高温退火处理过程中光栅的退化和再生

Fig. 7 Decay and growth of grating reflectivity during annealing process for CCG

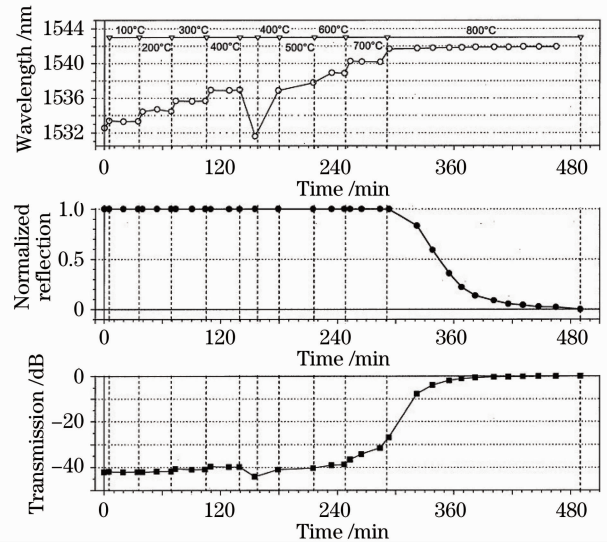


图 6 II A 型光纤光栅的退火曲线

Fig. 6 Annealing response curve for the type II A grating

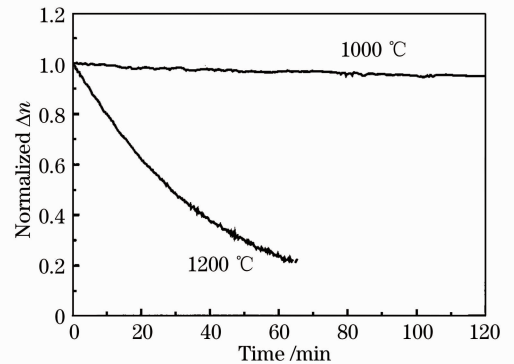


图 8 化学组分光纤光栅在 1000 °C 和 1200 °C 下折射率调制的归一化衰退曲线

Fig. 8 Normalized decay behavior of refractive-index modulation of CCG during continued heating at 1000 °C and 1200 °C

制幅度约为 5.6×10^{-5} 。初始光栅的退化和化学组分光纤光栅的再生过程如图 7 所示。将制作完成的化学组分光纤光栅依次在 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温环境下进行高温试验,在 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温环境下放置 120 min 之后,反射率几乎无变化,紧接着放置在 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温环境下 60 min 之后,折射率调制降为原来的 20%。化学组分光纤光栅的高温试验过程如图 8 所示。

研究还发现,在图 7 所述的退火过程中,将 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的退火时间延长至 24 min,最后制得的 CCG 折射率调制幅度增大至 4.6×10^{-4} ,提高了一个数量级,而且初始光栅的反射率越高,则最后制得的化学组分光纤光栅反射率也越高^[24]。在载氢普通通信光纤(不掺氟)上制成的氧周期性分布的化学组分光纤光栅具有更优越的高温稳定性,在 $1230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下放置 7.5 h 之后反射率仍能超过 50%^[25],其折射率的周期性调制被认为是水分子的周期性分布引起的^[26]。

最近几年,研究人员在掺铒^[27]及硼锆共掺^[28~30]的光纤中制作了化学组分光纤光栅,并证明了化学组分光纤光栅能够在 $1295\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温环境下正常工作^[28]。掺杂光纤中硼锆含量越高,制作出的化学组分光纤光栅的反射率也越高,而擦除温度越低,热稳定性越差^[29]。在高温退火处理时,光纤中游离态的氢能提高化学组分光纤光栅的反射率,但同时也会导致光栅反射率在高温环境下的不稳定^[30]。为了提高化学组分光纤光栅的反射率,Canning 等^[31]在小纤芯、高数值孔径的光纤中制得了高反射率的化学组分光纤光栅。

化学组分光纤光栅具有 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的高温稳定性,其温度灵敏度在低温区是 $9.0\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,在 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近是 $17.5\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。制作化学组分光纤光栅对激光器和光纤的要求较低,因而制作成本低。然而,化学组分光纤光栅同样存在着一些不足,如反射率低、退火时间长、退火之后光纤非常脆弱等。

2.4 掺杂特殊离子的光纤光栅

在掺杂某些特殊离子[如锡(Sn^{4+})、锑(Sb^{3+})、铟(In^{3+})、铋(Bi^{3+})等]的光纤上刻写的光栅也能承受较高的温度。

Dong 等^[32]研究发现,采用能量密度约 $0.25\text{ J}/\text{cm}^2$ 的 KrF 准分子激光,以相干写入法在掺 Sn^{4+} 光纤上刻写的光栅能够承受 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温。将制作完成的光栅进行高温特性的测试,依次在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温环境下退火 24 h,退火之后的反射率仍有 8%左右,比掺锆及硼锆共掺的光纤上刻写的光栅具有更优越的高温稳定性,光栅的退化曲线如图 9 所示。

Shen 等^[33]采用 248 nm 的 KrF 激光照射掺 Sb^{3+} 光纤,刻写的光栅比掺 Sn^{4+} 光纤上刻写的光栅具有更优越的高温稳定性。研究发现,在激光脉冲能量相同的情况下,脉冲重复频率越高以及光纤中光敏性掺杂组分的阳离子尺寸越大,则写入的光栅的高温稳定性就越好(Sn^{4+} 和 Sb^{3+} 的尺寸分别是 71 pm 和 76 pm)。他们还分别在掺铟(In^{3+})^[34]、掺铋(Bi^{3+})^[35] 光纤中写入光栅,在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温下退火 24 h 之后的光栅反射率均能超过 20%,具体的制作方法如表 2 所示。

表 2 掺杂特殊离子的光纤光栅的制作方法

Table 2 Inscribing methods of special ion-doped fiber gratings

Doping element	Cation size /pm	Component content	Repetition rate /Hz	Refractive index modulation / 10^{-4}	Reflectivity after annealing at $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 24 h /%
Sb^{3+} [33]	76	Sb_2O_3 , 5×10^{-3}	300	2.7	18
In^{3+} [34]	80	In_2O_3 , 2×10^{-3}	300	3.2	21
In^{3+} [34]	80	In_2O_3 , 2×10^{-3}	200	2.4	11
Bi^{3+} [35]	104	Bi_2O_3 , 5×10^{-3}	200	2.9	20

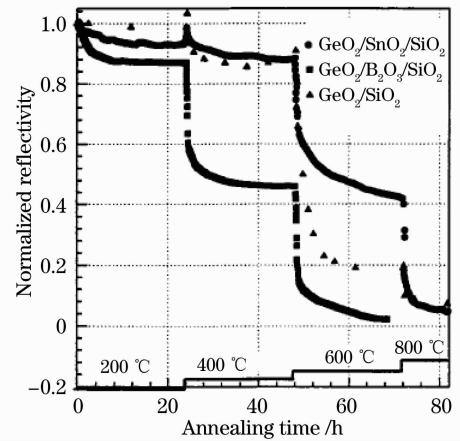


图 9 掺 Sn^{4+} 、掺 Ge^{4+} 及 Ge^{4+} 、 B^{3+} 共掺光纤上刻写的光栅的高温退化曲线

Fig. 9 Decay curves for the gratings in Sn^{3+} -doped, Ge^{4+} -doped and Ge^{4+} , B^{3+} co-doped fiber

Shen 等^[33]提出了阳离子跳跃模型来解释掺杂特殊离子的光纤光栅的高温特性。其原理如下:在激光照射掺杂特殊离子的光纤的过程中,光纤中的阳离子从原来的位置发生跳跃被玻璃晶格中的空位俘获,并陷于连续分布的能量阱中,从而实现了光纤的折射率调制。在退火过程中,随着退火温度的上升,当阳离子获得的能量可以克服相应的能量壁垒时,阳离子就会被缓慢释放,直至恢复到原来的位置,对应的折射率变化也就消失。

脉冲重复频率越高的激光在刻写过程中引起的光纤局部升温也会越高,从而会产生更多的缺陷中心,同时阳离子也会被激发到能量更深的空位上去。因此,同样在脉冲能量 12 mJ 的情况下,以 300 Hz 脉冲重复频率刻写的光纤光栅的高温稳定性要明显优于以 200 Hz 和 100 Hz 的脉冲重复频率刻写的同种光纤光栅。在高温退火的过程中,尺寸大的阳离子要获得较大的能量才能克服能量壁垒得以扩散,因此,在掺大尺寸阳离子的光纤中刻写的光栅比在掺小尺寸阳离子的光纤中刻写的光栅具有更好的高温稳定性。

总之,掺杂特殊离子的光栅具有良好的高温稳定性,能够承受 800 °C 以上的高温,对激光器的要求低,制作过程简单方便。然而,制作这类光栅需要对光纤进行特殊的掺杂,并且这类光栅在高温环境下的反射率较低。

2.5 结构变化型长周期光纤光栅

1996 年,AT&T 贝尔实验室的 Vengsarkar 等^[36]采用紫外光通过振幅掩模板照射载氢的硅锗光纤,首次制成了长周期光纤光栅(LPFG)。LPFG 可实现同向传输的基模和高层模之间的耦合,无反向反射,属于透射型带阻滤波器,所以 LPFG 常常也被称为透射光栅。LPFG 的谐振波长公式为

$$\lambda = \Lambda \Delta_{\text{neff}}, \quad (1)$$

满足相位匹配条件的特定波长由纤芯耦合进包层,在向前传输的过程中很快被衰减掉。因此,在透射谱上只有一个损耗峰,而其他不满足相位匹配条件的波长则基本无损耗地在光纤纤芯中传输,从而具有波长选择性损耗的特性。

LPFG 的写入方法很多,主要包括紫外光写入法、电弧放电法、离子束入射法、CO₂ 激光写入法、腐蚀刻槽法、机械微弯变形法等。上述刻写方法各有优缺点,CO₂ 激光写入法与电弧放电法的成栅机理本质是一致的,都是通过局部周期性加热使光纤结构和/或折射率发生周期性调制从而写入 LPFG^[33],所以采用这两种方法制作的 LPFG 都具有高温稳定性。

Davis 等^[37,38]采用 CO₂ 激光脉冲在 SMF-28 光纤上刻写 LPFG,该方法刻写的 LPFG 能在 1200 °C 的高温环境下正常工作,其高温稳定性远高于紫外光刻写的 LPFG。利用三束聚焦的高频 CO₂ 激光脉冲对称写入长周期光纤光栅^[39],具有写入系统结构简单,易于控制和调节等优点。该方法能够制作出插入损耗小、带宽窄的 LPFG,同时能消除 CO₂ 激光单侧写入法引起的折射率改变不均匀的问题,保证 LPFG 具有相对一致的弯曲特性,减小了其偏振相关损耗。

Humbert 等^[40,41]采用电弧放电写入法分别在单模光纤和微结构光纤(MF)上刻写 LPFG。电弧写入法制作过程简便,不需昂贵的激光器,同样制得了高温稳定性良好的 LPFG。由微结构光纤和普通单模光纤制作的 LPFG 的温度灵敏度如图 10 所示,在 300 °C ~ 900 °C 的温度范围内,前者的温度灵敏度是后者的 1/6。因为微结构光纤纤芯和包层的材料都是纯硅,纤芯和包层的有效折射率差随温度的变化小,所以在这类光纤上刻写的 LPFG 的温度灵敏度较低。

基于上述几种刻写方法制得的 LPFG 具有很好的高温稳定性,能够承受 1000 °C 的高温,并且 LPFG 对温度的灵敏度较高。然而,LPFG 同样存在着一些不足。由于 LPFG 对弯曲和环境折射率敏感,所以当 LPFG 用于温度传感时需屏蔽这些因素的影响。另外,LPFG 的光谱带宽大,影响了其波分复用能力。

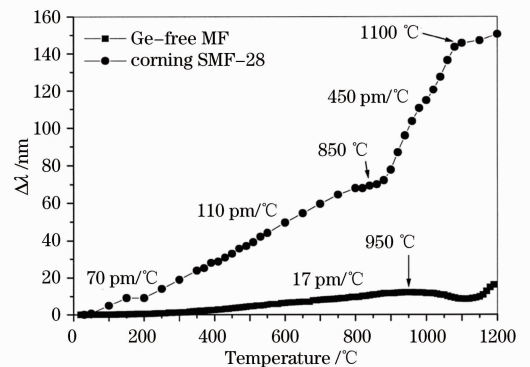


图 10 在微结构光纤和单模光纤上刻写的 LPFG 的温度灵敏度的比较

Fig. 10 Thermal behaviors at a resonance wavelength for LPFGs written in a MF and a Corning SMF-28 fiber

3 结束语

对已报道的主要的高温光纤光栅进行了综述,详细介绍了Ⅱ型光纤光栅、ⅡA型光纤光栅、化学组分光纤光栅、掺杂特殊离子的光纤光栅、结构变化型长周期光纤光栅等的制作方法及高温特性,并对各类高温光纤光栅的优缺点进行了评述。研究表明:这些类型的高温光纤光栅具有优良的耐高温特性,在航空航天、导弹制导、冶炼等一些高温领域具有良好的应用前景。随着相关技术的不断发展和成熟,高温光纤光栅必将获得更广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*, Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J], *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~649
- 2 G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 823~825
- 3 K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau *et al.*, Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(10): 1035~1037
- 4 P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi *et al.*, High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(13): 1191~1193
- 5 S. R. Baker, H. N. Rourke, V. Baker *et al.*, Thermal decay of fiber Bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1470~1477
- 6 Qiao Xueguang, Li Ting, Wang Hongliang *et al.*, Response characteristics of high temperature resistant fiber Bragg grating [J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(2): 209~211
乔学光, 李 婷, 王宏亮 等. 耐高温光纤 Bragg 光栅的响应特性研究[J]. *应用光学*, 2007, **28**(2): 209~211
- 7 Zhan Yage, Xiang Shiqing, Hong He *et al.*, Study on high temperature optic fiber grating sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1235~1238
詹亚歌, 向世清, 何 红 等. 光纤光栅高温传感器的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1235~1238
- 8 Jiang Chao, Hu Zhaowei, Jia Xuemin. Research progress of high-temperature fiber sensors [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008, **27**(10): 1~4
江 超, 胡兆炜, 贾学珉. 高温光纤温度传感器的研究进展[J]. *传感器与微系统*, 2008, **27**(10): 1~4
- 9 Liu Qinpeng, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*, Research of high temperature sensing for fiber Bragg grating [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(2): 147~149
刘钦朋, 乔学光, 贾振安 等. 光纤 Bragg 光栅高温传感技术研究[J]. *光电子 • 激光*, 2007, **18**(2): 147~149
- 10 Yu Dakuan, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*, A novel packaged fiber Bragg grating temperature sensor with high temperature-resistance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 232~234
禹大宽, 乔学光, 贾振安 等. 一种新颖封装的耐高温光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2): 232~234
- 11 J. L. Archambault, L. Reekie, P. St. J. Russell. 100% reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibres by single excimer laser pulses[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(5): 453~455
- 12 H. Bartelt, K. Schuster, S. Unger *et al.*, Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(17): 3417~3424
- 13 S. J. Mihailov, C. W. Smelser, P. Lu *et al.*, Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(12): 995~997
- 14 P. C. Hill, G. R. Atkins, J. Canning *et al.*, Writing and visualization of low-threshold type II Bragg gratings in stressed optical fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(33): 7689~7694
- 15 A. Martinez, I. Y. Khrushchev, I. Bennion. Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(4): 224~225
- 16 S. J. Mihailov, C. W. Smelser, D. Grobnic *et al.*, Bragg gratings written in all-SiO₂ and Ge-doped core fibers with 800-nm femtosecond radiation and a phase mask[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 94~100
- 17 C. W. Smelser, S. J. Mihailov, D. Grobnic. Hydrogen loading for fiber grating writing with a femtosecond laser and a phase mask[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(18): 2127~2129
- 18 D. Grobnic, S. J. Mihailov, C. W. Smelser *et al.*, Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(11): 2505~2507

- 19 P. Niay, P. Bernage, S. Legoubin *et al.*. Behavior of spectral transmissions of Bragg gratings written in germania-doped fibers: writing and erasing experiments using pulsed or CW UV exposure[J]. *Opt. Commun.*, 1994, **113**(1-3): 176~192
- 20 L. Dong, W. F. Liu, L. Reekie. Negative-index gratings formed by a 193-nm excimer laser[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24): 2032~2034
- 21 N. Groothoff, J. Canning. Enhanced type II A gratings for high-temperature operation[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(20): 2360~2362
- 22 I. Riant, F. Haller. Study of the photosensitivity at 193 nm and comparison with photosensitivity at 240 nm, influence of fiber tension; type II A aging[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1464~1469
- 23 M. Fokine. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(8): 1759~1765
- 24 M. Fokine. Growth dynamics of chemical composition gratings in fluorine-doped silica optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1974~1976
- 25 M. Fokine. Thermal stability of oxygen-modulated chemical composition gratings in standard telecommunication fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11): 1185~1187
- 26 B. Zhang, M. Kahrizi. High-temperature resistance fiber Bragg grating temperature sensor fabrication[J]. *IEEE Sens. J.*, 2007, **7**(4): 586~591
- 27 S. Trpkovski, D. J. Kitcher, G. W. Baxter *et al.*. High-temperature-resistant chemical composition Bragg gratings in Er³⁺-doped optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(6): 607~609
- 28 J. Canning, M. Stevenson, S. Bandyopadhyay *et al.*. Extreme silica optical fibre gratings[J]. *Sensors*, 2008, **8**(10): 6448~6452
- 29 J. J. Zhu, A. P. Zhang, B. Zhou *et al.*. Effects of doping concentrations on the regeneration of Bragg gratings in hydrogen loaded optical fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(12): 2808~2811
- 30 Zhu Jingjing, Jiang Yurong, Xue Wei. Research on the hydrogen-load of B-Ge co-doped fiber chemical composition grating [J]. *Trans. Beijing Inst. Technol.*, 2011, **31**(1): 83~86
朱晶晶,蒋玉蓉,薛唯. 硼锗共掺光纤的 CCG 的载氢研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, **31**(1): 83~86
- 31 J. Canning, J. Fenton, M. Stevenson. Ultra-strong regenerated gratings[C]. 14th Optoelectronics and Communications Conference, 2009
- 32 L. Dong, J. L. Cruz, L. Reekie *et al.*. Enhanced photosensitivity in tin-codoped germanosilicate optical fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(9): 1048~1050
- 33 Y. H. Shen, J. L. He, T. Sun *et al.*. High-temperature sustainability of strong fiber Bragg gratings written into Sb-Ge-codoped photosensitive fiber: decay mechanisms involved during annealing[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(6): 554~556
- 34 Y. H. Shen, J. Xia, T. Sun *et al.*. Photosensitive indium-doped germano-silica fiber for strong FBGs with high temperature sustainability[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(5): 1319~1321
- 35 Y. H. Shen, J. L. He, Y. Q. Qiu *et al.*. Thermal decay characteristics of strong fiber Bragg gratings showing high-temperature sustainability[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(3): 430~438
- 36 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65
- 37 D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis *et al.*. Very-high-temperature stable CO₂-laser-induced long-period fibre gratings[J]. *Electron Lett.*, 1999, **35**(9): 740~742
- 38 D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis *et al.*. CO₂ laser-induced long-period fibre gratings: spectral characteristics, cladding modes and polarisation independence[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(14): 1416~1417
- 39 Guang Shouhua, Zheng Jianzhou, Yu Qingxu. High temperature sensing characteristics of long-period fibre gratings[J]. *J. Shenyang University of Technology*, 2008, **30**(5): 559~563
关寿华,郑建洲,于清旭. 长周期光纤光栅温度传感特性[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, **30**(5): 559~563
- 40 G. Humbert, A. Malki. Characterizations at very high temperature of electric arc-induced long-period fiber gratings[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **208**(4-6): 329~335
- 41 G. Humbert, A. Malki, S. Février *et al.*. Characterizations at high temperatures of long-period gratings written in germanium-free air-silica microstructure fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 38~40