

掺稀土光纤的光子暗化研究进展

尤洁 于海龙 王小林* 周朴 许晓军

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 掺稀土光纤是光纤激光器的基础,而掺杂光纤的光子暗化是影响激光输出功率稳定性的重要因素。综述了光子暗化的产生机理、光子暗化对光纤激光器的影响及其抑制方法,旨在为相关研究提供参考。

关键词 激光器;光子暗化;掺稀土光纤;光纤激光器;损耗;光子漂白

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.010003

Advance in Study on Photodarkening of Rare-Earth Doped Fibers

You Jie Yu Hailong Wang Xiaolin Zhou Pu Xu Xiaojun

*College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract Rare-earth doped fibers are the foundation of fiber lasers while the photodarkening of doped fibers is a significant factor which is harmful to the stability of laser output power. In this paper, we review the mechanics of photodarkening, and the influence of photodarkening on the fiber lasers, as well as all kinds of methods which can mitigate the photodarkening effects in the doped fiber, with the aim of providing useful information for the related research.

Key words lasers; photodarkening; rare-earth doped fiber; fiber lasers; loss; photobleaching

OCIS codes 140.3510; 140.3615; 140.3460

1 引言

光纤激光器以其高效率、高稳定性、高光束质量、易于向高功率扩展等优点,在工业加工、先进制造、国防等领域有着广泛的应用前景。目前,国际上IPG公司的单模光纤激光最高功率已经达到10 kW量级,而多模光纤激光输出功率则达到了50 kW^[1]。在光纤激光器中,掺杂光纤作为产生激光的增益介质,其性能可以说是光纤激光器功率提升最为重要的限制因素。在实际工程应用中,不仅要求激光器具有较高的输出功率,而且要求激光器保持良好的稳定性及较长的使用寿命。在大功率光纤激光器中,掺杂光纤的光子暗化(PD)是影响光纤激光器寿命和稳定性的重要因素。

掺杂光纤的光子暗化是指在掺杂光纤激光器或放大器中,由于温度、光照等因素,导致掺杂光纤某些特性退化,从而影响激光器输出功率和效率稳定性的现象。为了实现稳定的激光功率输出,需要采取各种措施抑制掺杂光纤的光子暗化。目前,国际上有30余家单位对光子暗化及其抑制方法进行了深入研究。但是,国内见诸公开报道的研究光子暗化的文献非常有限^[2-8]。

本文首先综述光子暗化的产生机理,然后分析光子暗化对光纤激光器的影响,最后介绍了光子暗化的各种抑制方法。

收稿日期: 2013-09-11; 收到修改稿日期: 2013-10-22; 网络出版日期: 2013-12-29

基金项目: 国防科学技术大学校科研计划(JC12-07-03)

作者简介: 尤洁(1991—),女,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: youjie1991070@163.com

导师简介: 许晓军(1963—),男,研究员,主要从事高功率光纤激光器的方面的研究。E-mail: xu_xiaojun@126.com

*通信联系人。E-mail: chinawxllin@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网www.opticsjournal.net

2 光子暗化的产生机理

目前公开报道的产生光子暗化的主要方式包括光辐照诱导光子暗化^[9-13]、射线诱导光子暗化^[14-15]、温度诱导光子暗化^[16-19]、模式诱导光子暗化^[18]以及掺杂元素影响光子暗化^[20-21]等。

2.1 光照诱导光子暗化

在光纤激光器中,光辐照是导致光子暗化的重要因素之一。在光辐照中,关于光子暗化产生的具体机理有多种假设:色心模型^[22-25]、缺陷中心模型^[9, 26]、散射模型^[9]、能级跃迁模型^[20, 27]、结构转换模型^[28]等。但是关于光照诱导光子暗化的机理是否唯一,目前还在实验研究当中。光照诱导光子暗化的主要方式包括紫外光^[9-10, 12, 29]、蓝紫光^[11, 21]、近红外光^[27, 30-32]诱导等。

2.1.1 紫外光诱导

由紫外光诱导产生的光子暗化,是光纤生成内部缺陷^[9-10]、发生散射^[9, 12]的结果。相对于其他掺杂光纤,掺镱光纤表现出更深的光子暗化程度,可能是由于Yb³⁺周围的缺陷数目增加,或者是从Yb³⁺转移到周围缺陷点的能量增强^[21]。1994年,澳大利亚悉尼大学的Lauzon等^[12]发现10 ns脉冲光(240 nm)能诱导掺镱光纤产生光子暗化。1997年,该大学的Canning等^[9]观察到193 nm紫外光照射后掺铈硅酸盐光纤和掺镱硅酸盐光纤均出现光子暗化。

2.1.2 蓝紫光诱导

由蓝紫光诱导石英玻璃基质形成的色心,常常被认为是光纤中光子暗化产生的原因^[32]。另外,氧缺陷(ODC)的形成^[29]和能级跃迁^[11]也被认为是导致光子暗化产生的因素。2009年,英国南安普顿大学的Basu等^[29]用488 nm连续光照射掺铈铝硅酸盐光纤,发现其输出功率随着时间逐渐降低,结果表明该掺杂光纤经蓝紫光辐照后产生了光子暗化。同年,该大学的Cheng等^[11]用类似的方法发现掺钐铈硅酸盐光纤激光器产生光子暗化,如图1所示,光子暗化导致的损耗最终趋于稳定。

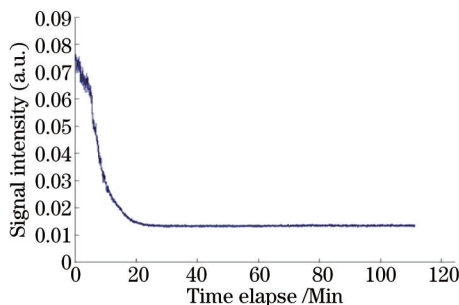


图1 488 nm光诱导掺钐铈硅酸盐光纤产生的光子暗化

Fig.1 PD of the Sm³⁺-doped germanosilicate fiber induced by 488 nm light

2.1.3 近红外光诱导

由于近红外抽运光辐照,掺杂光纤可能会发生某些元素能级跃迁^[20]、掺杂粒子数反转^[30]以及光致结构变化^[27],这些现象也被认为是光子暗化的原因。1993年,美国AT&T贝尔实验室的Broer等^[20]研究了掺铈铝硅酸盐光纤在1064 nm(近谐振)锁模激光辐照下的光子暗化,得出中等强度近红外辐射能诱导稀土掺杂光纤发生光致电离的结论。2006年,芬兰赫尔辛基技术大学的Koponen等^[27]用974nm半导体激光通过纤芯抽运诱导掺铈光纤产生光子暗化,同时还发现掺杂光纤的实验样品在633 nm与1040~1070 nm处光子暗化导致损耗的关系,即前者是后者的71倍,如图2所示。2007年,法国Bordeaux大学I Manek-Hönniger等^[13]发现大模场(LMA)掺铈光纤在45 W的980 nm抽运光照射下,辐照时间越长,其光子暗化程度越深。2010年,日本电子通信大学的Inoue等^[33]用975 nm近红外光诱导掺铈共掺光纤和掺铝共掺光纤产生光子暗化,但前者的光子暗化程度比后者的要深。2013年,英国斯旺西大学的Piccoli等^[34]利用976 nm抽运光引起掺铈光纤光子暗化,并研究了光子暗化与上能级粒子寿命的关系,实验发现光子暗化导致上能级粒子寿命减小。

以上对有关紫外光、蓝紫光、近红外光诱导掺杂光纤产生光子暗化的文献进行了梳理,现对光子暗化的产生机理进行简单分析。色心模型:当外界激光照射时,掺杂光纤对特殊波段的光有强烈的吸收,同时激发电子,这些被激发的自由电子迅速被色心俘获,形成新的色心,导致激光器光子暗化的产生,最后,这些新的

色心会再次俘获新的电子而使得光子暗化趋于稳定。缺陷中心模型:掺杂光纤内部存在缺陷中心(如缺氧中心),光照将导致掺杂光纤对特定波段的光有强烈的吸收,同时激发电子,这些被激发的自由电子迅速被色心俘获,形成新缺陷,导致激光器光子暗化的产生,最后,这些新的缺陷会再次俘获新的电子而使得光子暗化趋于稳定,缺陷中心与色心存在相关性。散射模型:光辐照将导致掺杂光纤内部发生散射(如瑞利散射),发生能量转移,进而导致光子暗化的产生。能级跃迁模型:光辐照将导致光纤内部不同能级上的掺杂粒子发生跃迁,于是反转粒子数发生变化,因而诱导产生光子暗化。结构转化模型:光辐照将导致光纤内部结构发生变化,由结构改变导致的光子暗化一般会与光纤内部的结构缺陷、永久性损伤同时存在,如光电离。然而,迄今为止,对于光子暗化的产生机理仍没有形成一致的结论。

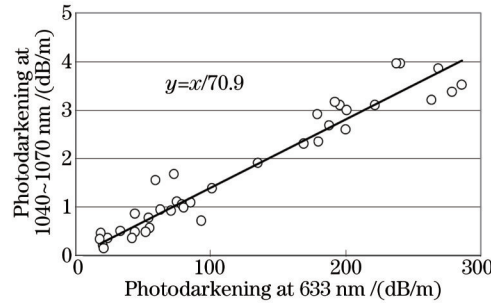


图2 两种情况下光子暗化的关系曲线

Fig.2 Correlation between the photodarkening in two cases

2.2 射线诱导光子暗化

高能粒子射线和 γ 射线可以诱导光纤形成色心(或吸收中心)^[22-23,25],进而引发光子暗化,对光纤的性能产生很多不利影响^[22-23,25,35-36]。然而,射线诱导的光子暗化与抽运诱导的光暗化存在差异:虽然泵浦诱导也是通过产生色心降低性能,但其载体的激励机制是激光器/放大器抽运光,而不是高能粒子^[20,37-38]。目前常见的射线诱导光子暗化的方式有 γ 射线辐照^[15]和X射线辐照^[14]。

2009年,日本光电实验室的Arai等^[15]分别研究了抽运光与 γ 射线照射铝镱共掺光纤纤芯后所产生缺陷的差异。通过电子自旋共振(ESR)测量分析,发现两者都对铝氧空穴中心(Al-OHC)缺陷的产生起主导作用(表1),进而得出结论:铝镱共掺光纤中的暗化损耗主要由铝氧空穴中心产生缺陷导致。2010年,Fox等^[14]用 γ 射线诱导非抽运掺铒、掺镱、铒镱共掺光纤产生光子暗化。

表1 Al/Yb共掺光纤中色心的ESR数量分析

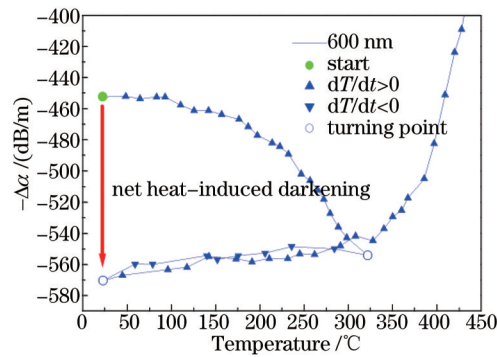
Table 1 Quantitative analysis of color centers in Al/Yb co-doped fiber by ESR

Sample	Spin density /g ⁻¹				
	Si-E'	Si(H)-E'	Al-E'	Al-OHC	NBOHC
Original fiber	2.0×10 ¹⁴	2.9×10 ¹³	-	-	-
Photodarkened fiber	1.9×10 ¹⁴	2.8×10 ¹³	-	1.4×10 ¹⁴	-
γ -ray irradiated fiber	4.5×10 ¹⁴	3.2×10 ¹³	-	1.5×10 ¹⁴	small degree

2009年,日本技术研究所高级光子技术研究中心前沿材料实验室的Xiong等^[39]用X射线照射通过改进化学汽相沉积法(MCVD)制作的掺镱纳米粒子的石英玻璃,发现了明显的光子暗化,其暗化程度与辐照时间及纳米粒子成分密切相关。

2.3 温度诱导光子暗化

除光辐照能诱导掺杂光纤产生光子暗化,温度变化也能引发光子暗化。2009年,芬兰赫尔辛基技术大学的Söderlund等^[17]利用微型炉和K型热电偶对纯净的和暗化的大模场掺镱光纤进行热循环实验,发现在100~325℃之间,光纤热诱导吸收系数变化 $\Delta\alpha$ 增加,表明存在额外的损耗机制与温度相关。由图3可知,吸收系数在100℃开始增大,并继续随温度呈指数增大,直到325℃。当光纤冷却至室温后,吸收系数约为570 dB/m,此值接近热诱导光子暗化的最大变化量(占损耗总额的20%)。因此,实验结果表明,存在热诱导光子暗化机制,且热诱导过程是在样品吸收系数开始恢复前实现的,然而恢复后吸收损耗仍然存在,主要原因可能是由损耗导致的永久色心和与温度相关的吸收光谱展宽。

图3 热循环下吸收系数 $\Delta\alpha$ 温度特性曲线Fig.3 Absorption coefficient change $\Delta\alpha$ during thermal cycling.

2.4 模式诱导光子暗化

大量实验证明,粒子数反转是影响光子暗化的关键参数,例如,当掺镱光纤处在高粒子数反转状态时,其光子暗化的速率大大加快^[27]。同时,作为导致光子暗化空间变化的因素之一,反转粒子数的空间变化与光纤模式密切相关。2009年,Söderlund等^[18]开展了成分(exp.#1)、抽运模式(exp.#2)、激光模式(exp.#3)光子暗化实验。图4显示了不同实验中光子暗化导致的额外损耗变化,而其相应的受激反转粒子数分布如图5所示。经分析可知,成分诱导对光子暗化横向分布的贡献微不足道,光子暗化横向分布主要归因于模式的影响。

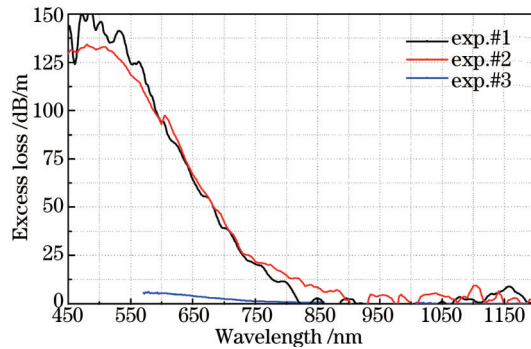


图4 不同实验中光子暗化引起的额外损耗光谱

Fig.4 Photodarkening-induced excess loss spectra measured in different experiments

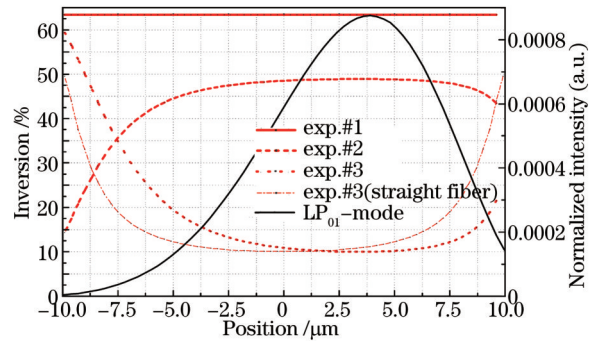


图5 不同实验中受激反转粒子数的分布图

Fig.5 Stimulated inversion profiles for different experimental configurations

2.5 掺杂元素影响光子暗化

近年来越来越多的科研机构都依据实验结果提出光子暗化与光纤成分有密切的关系^[20-21]。2010年,法国Lyon大学的Peretti等^[40]在掺镱光纤中加入 Tm^{3+} ,从光谱上观察到色心缺陷的产生,图6显示了 Tm/Yb 共掺光纤和掺镱光纤中光子暗化导致的光致吸收(PIA)的差异。2013年,德国光子技术研究所的Jetschke等^[41]研究了 Tm 杂质对 Yb/P 共掺光纤光子暗化的影响,无 Tm 杂质时, Yb/P 共掺光纤无明显光子暗化现象,有 Tm 杂质时,光子暗化现象明显。

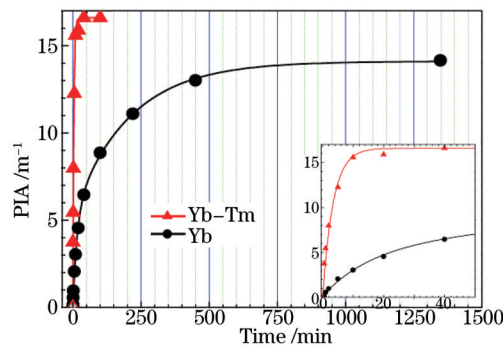


图6 440 nm处光诱导吸收的时间特性曲线

Fig.6 Photo-induced absorption as function of time at 440 nm

3 光子暗化导致的现象与问题

由于外界环境或者内部结构、成分发生变化,掺杂光纤中出现光子暗化,并导致其部分特性退化,从而影响掺杂光纤激光器和放大器输出功率和效率稳定性。光子暗化在掺杂光纤中导致的现象和问题主要有特殊波长吸收光谱变化^[10]、激光功率降低^[42-43]、温度变化^[32]、折射率变化^[9,44]等。

3.1 光子暗化导致吸收光谱变化

2007年,澳大利亚悉尼大学 Groothoff等^[10]利用 193 nm 紫外光刻写 Ge 光纤和非 Ge 光纤光栅,发现紫外光导致的短波衰减延伸到近红外波段,因而影响 1 μm 激光的输出性能。2009年,Xiong等^[39]证明在相同的 Al³⁺掺杂水平下,Yb/Al掺杂纳米基质的近红外光谱吸收取决于 Yb³⁺浓度。图7显示了在 X射线辐照下不同 Al/Yb 共掺光纤的吸收光谱,发现暗化带(250 nm, 300 nm 和 420 nm)与纳米基质的化学组分密切相关。2011年,英国 Swansea 大学的 Taccheo等^[45]用类似的方法证明掺镱光纤的暗化损耗与受激 Yb³⁺浓度平方成正比,并且其损耗曲线存在自相似性。

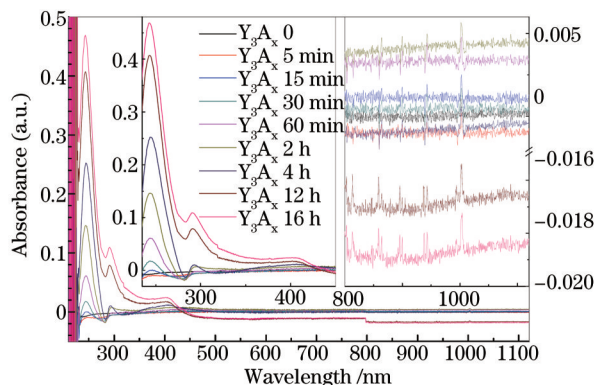


图7 X射线照射下 Yb/Al 共掺石英的吸收光谱

Fig.7 Absorption changes of the Yb and Al codoped silica with X-ray irradiation time

3.2 光子暗化导致功率降低

目前,国内外诸多实验都报道了光子暗化引发激光功率下降的问题。2007年,中国科学院安徽光学精密机械研究所的朱宗玖等^[2]采用光纤激光器和放大器结构方案,发现光子暗化导致高掺镱光纤的功率转换效率随抽运时间增加而单调下降,但最终该趋势变缓,直至基本稳定。同年,法国 Bordeaux 大学的 Manek-Hönninger等^[38]研究了大模场掺镱石英光纤中的光子暗化,发现光子暗化使该光纤的输出功率下降,并且暗化时间越长,功率下降越显著。图8显示了新光纤以及暗化 16、64、155 min 的光纤的输出功率,可知光子暗化对激光器输出功率的影响随着暗化时间的增加而加深。

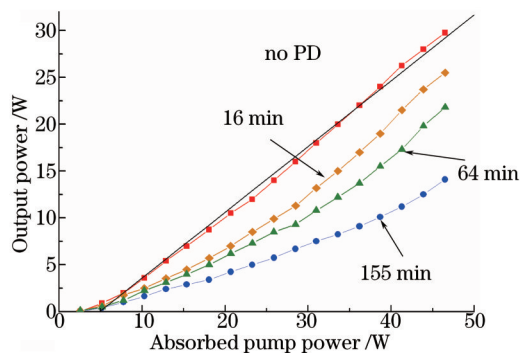
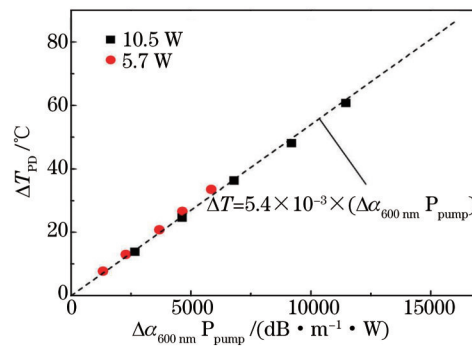


图8 不同光子暗化状态下光纤激光器的输出特性

Fig.8 Output characteristics of the fiber laser for different states of photodarkening.

3.3 光子暗化导致温升

光子暗化导致激光功率降低,损耗掉的能量最终必然转换为光纤内部的热,导致光纤温度上升。2010年,芬兰 Aalto 大学的 Ponsoda等^[32]利用 915 nm 光对掺杂光纤进行包层抽运,并用红外热像仪测量光纤温度,发现光纤温度变化与光子暗化存在线性相关性,如图9所示。

图9 光子暗化导致的温升与 $\Delta\alpha_{600\text{ nm}} P_{\text{pump}}$ 的关系曲线Fig.9 Photodarkening-induced temperature rise versus $\Delta\alpha_{600\text{ nm}} P_{\text{pump}}$

3.4 光子暗化导致折射率变化

事实上,光子暗化导致的温度上升还会在一定程度上影响掺杂光纤的折射率。早在1997年,澳大利亚光子合作研究中心的Zhang等^[46]就对193 nm抽运光辐照后光纤中的折射率变化展开了研究。2010年,芬兰Aalto大学的Ye等^[44]利用模式干涉法研究了掺镱光纤中暗化导致的折射率变化,发现光子暗化会导致折射率增加,且两者线性相关,如图10所示。

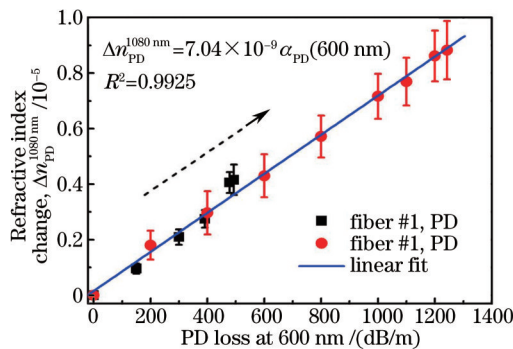


图10 折射率变化与暗化损耗的关系曲线

Fig.10 Correlation between refractive index change and PD loss.

4 光子暗化的抑制方法

为了实现稳定的激光功率输出,满足工程应用的客观要求,需要采取各种措施有效抑制掺杂光纤的光子暗化。国际上诸多单位对光子暗化的抑制方法进行了深入研究,而国内这方面的研究尚不多见。目前,光子暗化的各种抑制方法主要有光纤设计^[10-11,14,47-48]、温度退火^[10,16]、特殊波长光辐照^[21]等几种。

4.1 光纤设计抑制光子暗化

根据掺杂光纤中光子暗化产生的机理和实现方式,光纤设计抑制光子暗化主要包括光纤材料设计^[8,14,17,49]、光纤结构设计^[43,47]、涂覆设计^[48]等方式。

4.1.1 光纤材料设计

光纤材料设计常用的方法包括改变某掺杂离子的浓度^[30]、类型^[13]及加入特定元素^[50]等。改变掺杂光纤中某些离子的浓度可以显著抑制光子暗化。2005年,日本Fujikura有限公司的Kitabayashi等^[30]根据实验结果得出结论:高铝掺镱光纤比低铝掺镱光纤具有更强的抗光子暗化能力。2008年,德国光电子技术研究所的Jetschke等^[51]通过实验发现改变石英光纤中P和Al的浓度比例,能够改变光子暗化的速率,当P和Al的浓度相同时,对光子暗化的抑制效果最好,如图11所示。2011年,俄罗斯科学院光纤光学研究中心的Likhachev等^[52]重新调整光纤中 Al_2O_3 、 P_2O_5 和 Yb_2O_3 的配比,发现特制光纤与普通光纤相比,其光子暗化得到了非常好的抑制。同年,英国Swansea大学的Gebavi等^[49]用类似的方法证明了适当降低 Yb^{3+} 浓度可以有效抑制光子暗化。

选用某些特定类型基质的掺杂光纤可以在很大程度上抑制光子暗化。2008年,Sahu等^[13]验证了磷酸盐

光纤能有效地抑制由 488 nm 蓝紫光照射产生的光子暗化。2010 年, Fox 等^[14]从实验现象中发现 Er/Yb 共掺光纤具有非常强的抗光子暗化特性。2012 年, Yu^[53]在实验上证明了掺钐铝硅酸盐光纤具有比掺钐锗硅酸盐光纤更强的抗光子暗化能力。

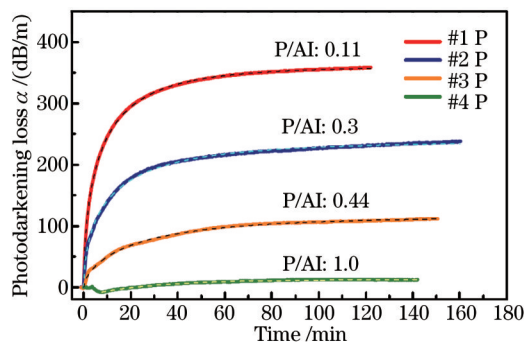


图 11 不同情况下暗化损耗的时间特性曲线

Fig.11 Temporal development of the photodarkening loss of different fibers

另外,在掺杂光纤中加入某些特定元素也是降低光纤光子暗化程度的一种非常有效的方式。2009 年,瑞典皇家科学院的 Engholm 等^[50]通过在掺镱光纤中加入铈(Ce)来提高光纤的抗光子暗化能力,并证明光纤中 Ce 离子的浓度越高,光子暗化导致的额外损耗越小,如图 12 所示。2010 年,英国南安普顿大学的 Yoo 等^[54]通过在掺杂光纤中加入三氧化二钇(Y_2O_3)纳米晶体抑制光子暗化,并且测量发现与铝硅酸盐光纤相比,改良光纤的抗光子暗化能力提高了 20 倍以上。2011 年, Jetschke 等^[55]验证了在 Al/Yb 共掺石英光纤中加入适量的 Er^{3+} 也能有效地降低光子暗化程度。在光纤中载氢也是一种较好的光子暗化抑制方式。光纤载氢后,氢离子使得缺陷变得不活跃,从而减缓了光子暗化。2007 年, Groothoff 等^[10]验证了 193 nm 紫外光照射载氢光纤时,光子暗化得到有效的抑制。

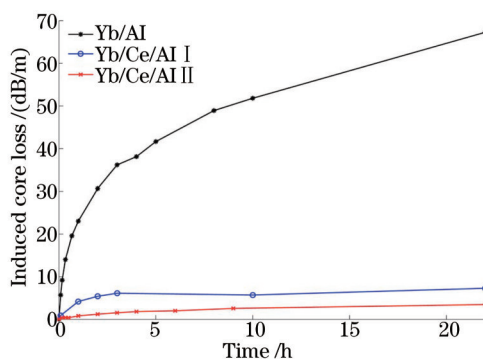


图 12 600 nm 处不同光纤纤芯损耗的时间特性曲线

Fig.12 Time-dependent induced core loss measured at 600 nm for different fibers

4.1.2 光纤结构设计

目前,为降低光子暗化程度,光纤结构设计中主要是选择具有特殊形状的光纤^[47]。2012 年, Paul 等^[47]通过改进化学汽相沉积法和溶液掺杂技术成功拉制了以 Yb_2O_3 掺杂富钇铝硅酸盐纳米颗粒为基质,纤芯直径为 30~35 μm 的 D 型和 P 型光纤。实验结果如图 13 所示,该光纤不仅能够保证激光的高效率传输(976 nm 抽运时为 80%),而且具有非常强的抗光子暗化能力。

4.1.3 涂覆设计

优化设计光纤涂覆层,能在很大程度上增强光纤抗光子暗化能力。该方式不仅能减少吸收或散射带来的损耗,也能避免某些元素被激活,进而腐蚀其他元素。2002 年,日本龙谷大学的 Saito 等^[48]验证了用碳氟聚合物和黑漆作卤化银光纤的涂覆层可以抑制光子暗化。图 14 给出紫外光照射前及照射后 70 h 的透射率光谱,两者的差异在实验误差范围内,这表明具有特制涂覆层的光纤几乎不产生光子暗化。

4.2 温度退火抑制光子暗化

对光纤采取温度退火,能有效抑制光子暗化,且在一定的温度范围内,温度越高、退火时间越长,消除光子

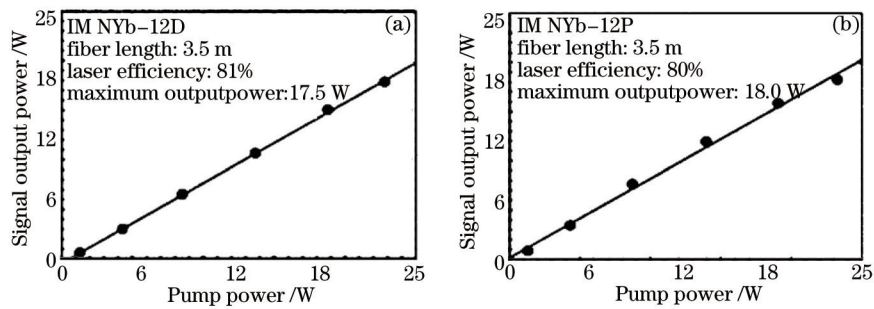


图 13 (a) D型和(b) P型光纤的输出功率与抽运功率的关系曲线

Fig.13 Output power against absorbed pump power of (a) D-shaped and (b) P-shaped fibers

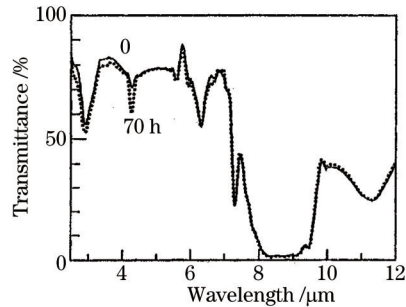


图 14 紫外光照射前及照射后 70 h 光纤的透射率光谱

Fig.14 Transmission spectra before and after 70 h exposure to ultraviolet light

暗化的效果越好。2007年,Groothoff等^[10]验证了高温退火能够漂白了由193 nm紫外光诱导产生的光子暗化。图15显示了不同温度退火情况下掺杂光纤的光谱损耗情况。2009年,Soderlund等^[56]通过实验获得20/400 μm掺镱光纤的温度漂白特性:温度越高,对光子暗化的漂白速率越快,漂白效果越明显。2010年,Ye等^[44]通过实验现象观察到温度退火虽然能够在一定程度上消除光子暗化导致的折射率变化,但最终折射率不会完全复原。

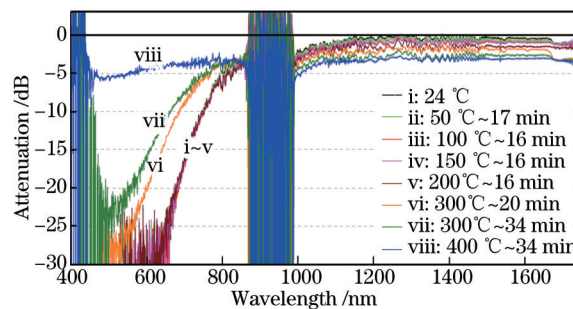


图 15 高温退火光纤的暗化光谱图

Fig.15 Evolution of photodarkening by annealing fiber

4.3 光辐照方式抑制光子暗化

综合国内外有关利用光辐照方式实现抑制光子暗化的方法,可将其分为如下4类:紫外光漂白^[38]、蓝紫光漂白^[33]、红光漂白^[57]以及抽运光自漂白^[31]。

4.3.1 紫外光漂白

2007年,Manek-Hönniger等^[38]用355 nm紫外光实现了对暗化光纤的漂白。光子漂白后,光纤的吸收光谱和光纤激光器的输出特性恢复到暗化前的正常水平,如图16所示。

4.3.2 蓝紫光漂白

1994年,加拿大Laval大学的Atkins等^[21]发现对于488 nm光辐射导致的掺铽(Tb)磷酸盐光纤的光子暗化,可以利用514 nm光辐射进行漂白。当514 nm激光辐照光纤两个小时左右时,光子暗化能够得到较好的漂白,如图17所示。2010年,Inoue等^[33]用407 nm蓝紫光成功实现对硅酸锆光纤(GSF)和硅酸铝光纤(ASF)的光子漂白,并且发现功率越高,漂白效果越好。此外,当抽运光和蓝紫光同时照射光纤时,ASF的光子暗化程度加深,而GSF的光子暗化得到进一步抑制。

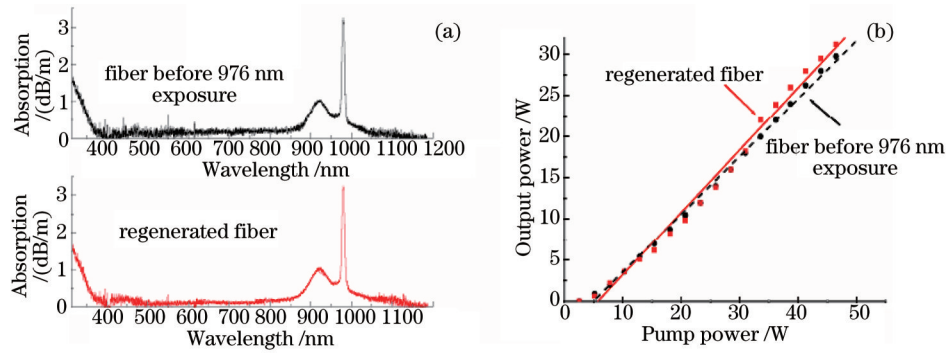


图 16 新光纤和漂白光纤的(a)吸收光谱和(b)输出特性

Fig.16 (a) Absorption spectrum and (b) output characteristics of new and photobleached fibers

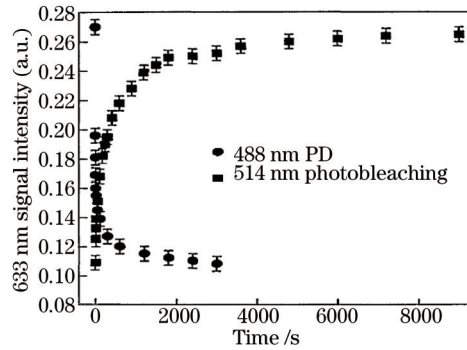


图 17 不同情况下掺铽硅酸磷光纤能见度变化

Fig.17 Change in transmission of Tb^{3+} -doped phosphosilicate fiber during PD at 488 nm light (circles) followed by exposure to photobleaching at 514 nm (squares)

4.3.3 红光漂白

1997年,美国海军研究实验室的Askins等^[26]用650 nm的单脉冲和多脉冲实现了对光纤布拉格光栅的光子漂白。2012年,英国Swansea大学的Gebavi等^[27]发现在633 nm红光的照射下,掺铽铝硅酸盐光纤的光子暗化在很大程度上得到缓解。图18表明,633 nm红光具有良好的漂白特性,能使辐照后的光纤具有相对较高的输出功率。

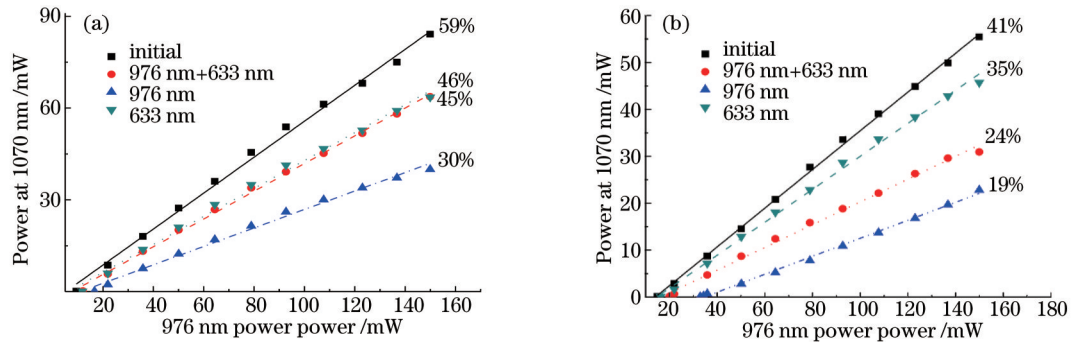


图 18 掺杂质量分数为(a) 1.1%和 (b) 1.35%的掺铽光纤的功率特性

Fig.18 Power characteristics for (a) 1.1% and (b) 1.35% Yb^{3+} doped fibers (mass fraction)

4.3.4 抽运光自漂白

2007年,Jetschke等^[58]在915 nm抽运光对暗化的掺铽光纤进行包层抽运的过程中,首次发现光纤的暗化损耗发生部分漂白(图19),并得出结论:有限的 Yb^{3+} 反转粒子数不会导致光纤中光子暗化损耗的无限增加。

5 结束语

掺稀土光纤是高功率光纤激光器和放大器的核心组成部件,光纤内部的光子暗化是影响激光功率稳定性的重要因素。近年来,国外对掺稀土光纤光子暗化的研究进一步加深,旨在选择最优的光纤设计与良好

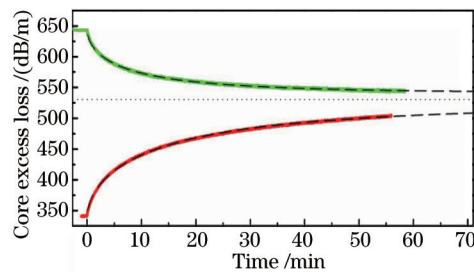


图 19 相同抽运功率下光纤的光子暗化(红)和光漂白(绿)

Fig.19 Photodarkening (red) and photobleaching (green) of fiber with the same pump power

的外界运行环境,以实现对光子暗化的抑制,这必将对提高光纤激光器输出功率、确保输出稳定性与可靠性以及解决光纤激光器中其他瓶颈问题具有重要意义。本文首先阐述了掺杂光纤光子暗化的产生方式,其次详细分析了光子暗化导致的现象和问题,最后全面总结了国内外有关抑制掺杂光纤光子暗化的各种方法。目前而言,诱导光子暗化的产生方式多种多样,但产生机理尚无明确定论;光子暗化导致的各种效应间存在一定的耦合,比较复杂;光子暗化的抑制方法也可以说层出不穷。实际上,光子暗化的相关研究并不完善,还有许多问题亟待解决,我们下一步计划从以下几个方面来深入研究光子暗化的产生机理及抑制方法。首先,进一步研究光子暗化的测试技术,以期实现可重复、可比较的定量测量,能够评价不同光纤在光子暗化方面的性能。其次,从掺杂光纤的荧光特性着手,研究光子暗化过程中光纤内部的变化,如 Yb^{2+} 的产生、色心形成等,进而揭示光子暗化的内在机理。最后,在对光子暗化机理有一定认识的基础上,从理论和实验的层面系统研究光子暗化的漂白,期望能够切实提高实际系统的稳定性。相信在不久的将来,随着对掺稀土光纤光子暗化研究的不断深入,国产掺杂光纤的制作工艺将会有很大程度的提高,使得高功率光纤激光器的性能更优、用途更广。

参考文献

- Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- Zhu Zongjiu, Xu Lixin, Mao Qinghe, *et al.*. Photodarkening in ytterbium-doped fibers with high doping concentration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(1): 26-29.
朱宗玖, 许立新, 毛庆和, 等. 高掺杂浓度掺镱光纤的光子暗化效应[J]. *光子学报*, 2007, 36(1): 26-29.
- Yang Ling, Chen Genxiang, Liang Yi, *et al.*. Ultraviolet photosensitivity in Ge-doped fiber[J]. *Optical Communication Technology*, 1996, 20(3): 232-236.
杨玲, 陈根祥, 梁毅, 等. 掺锗光纤的紫外光敏特性[J]. *光通信技术*, 1996, 20(3): 232-236.
- He Wei, Li Jianzhi, Mei Jiachun. Experimental study on photolytic index changes in germanosilicate fiber[J]. *J Inorganic Materials*, 2005, 20(1): 201-214.
何伟, 李剑芝, 梅家纯. 掺锗石英光纤光致折射率变化的实验研究[J]. *无机材料学报*, 2005, 20(1): 201-214.
- Liu Fangxin, Zhang Chenhua, Li Zongmin, *et al.*. Research on r-ray radiolytic loss[J]. *J University of Science and Technology of China*, 1994, 24(3): 390-393.
刘方新, 张辰华, 李宗民, 等. 光纤伽马射线辐照感生损耗的研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 1994, 24(3): 390-393.
- Han Yanling, Xiao Wen, Yi Xiaosu, *et al.*. Active recovery effect of irradiation optical fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 128-131.
韩艳玲, 肖文, 伊小素, 等. 辐照光纤的主动恢复效应[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 128-131.
- Sheng Yubang, Xing Ruixian, Luan Huaixun, *et al.*. Gamma radiation effects on the optical properties of Yb-doped silicate glasses[J]. *J Inorganic Materials*, 2012, 27(8): 860-864.
盛于邦, 邢瑞先, 栾怀训, 等. 伽马辐照对掺镱硅酸盐玻璃光学性能的影响[J]. *无机材料学报*, 2012, 27(8): 860-864.
- Wu Wuming, Xiao Hu, Xu Jiangming, *et al.*. Research progress of tandem-pumped fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 091402.
吴武明, 肖虎, 许将明, 等. 光纤激光同带级联抽运的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 091402.
- J Canning, Adrian L G Carter, M G Sceats. Correlation between photodarkening and index change during 193 nm

- irradiation of germanosilicate and phosphosilicate fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(8): 1348–1356.
- 10 Nathaniel Groothoff, John Canning, Mattias Åslund, *et al.*. 193 nm photodarkening of ytterbium doped optical fibre[C]. BGPP, 2007. BTuC2.
- 11 Cheng Y, Oton C J, Boyland A J, *et al.*. Photodarkening of 488 nm-pumped Sm³⁺-doped germanosilicate fiber laser[C]. CLEO, 2009.
- 12 Lauzon J, Sceats M G, Krug P A, *et al.*. UV-induced transient photodarkening and photoluminescence in Ge-doped optical fibers[C]. OFC, 1994.
- 13 I Manek-Hönniger, J Boulet, T Cardinal, *et al.*. Photodarkening and photobleaching of an ytterbium-doped silica double-clad LMA fiber[J]. *Opt Express*, 2007, 15(4): 1606–1611.
- 14 Brian P Fox, Kelly Simmons-Potter, William J Thomes Jr, *et al.*. Gamma-radiation-induced photodarkening in unpumped optical fibers doped with rare-earth constituents[J]. *IEEE Trans Nuclear Science*, 2010, 57(3): 1618–1625.
- 15 T Arai, K Ichii, S Tanigawa, *et al.*. Defect analysis of photodarkened and gamma-ray irradiated ytterbium-doped silica glasses[C]. OFC, 2009. OWT2.
- 16 Martin Leich, Sylvia Jetschke, Sonja Unger A, *et al.*. Temperature influence on the photodarkening kinetics in Yb-doped silica fibers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(1): 65–68.
- 17 Söderlund M J, Ponsoda J J M I, Koplów J P, *et al.*. Heat-induced darkening and spectral broadening in photodarkened ytterbium-doped fiber under thermal cycling[J]. *Opt Express*, 2009, 17(12): 9940–9946.
- 18 Mikko J Söderlund, Joan J Montiel I Ponsoda, Simo K T Tammela, *et al.*. Mode-induced transverse photodarkening loss variations in large-mode-area ytterbium doped silica fibers[J]. *Opt Express*, 2008, 16(14): 10633–10640.
- 19 Leich M, Jetschke S, Unger S, *et al.*. Acceleration of photodarkening measurements in Yb-doped fibers by enhanced temperatures[C]. CLEO Europe, 2009.
- 20 M M Broer, D M Krol, D J Digiovanni. Highly nonlinear near-resonant photodarkening in a thulium-doped aluminosilicate glass fiber[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(10): 799–801.
- 21 Atkins G R, Ouellette F. Reversible photodarkening and bleaching in Tb³⁺-doped optical fibers[J]. *Opt Lett*, 1994, 19(13): 951–953.
- 22 B P Fox, Z V Schneider, K Simmons-Potter, *et al.*. Spectrally resolved transmission loss in gamma irradiated Yb-doped optical fibers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2008, 44(6): 581–586.
- 23 B Torteck, A M Van Uffelen, J P Meunier, *et al.*. Gamma radiation induced loss in erbium doped optical fibers[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2007, 353(5–7): 477–480.
- 24 Glebov L B. Linear and nonlinear photoionization of silicate glasses[J]. *Glass Sci Technol*, 2002, 75(C2): 73–90.
- 25 Williams G M, Wright B M, Mack W D, *et al.*. Projecting the performance of erbium-doped fiber devices in a space radiation environment[C]. SPIE, 1999. 3848: 271–280.
- 26 Askins C G, Putnam M A. Photodarkening and photobleaching in fiber optic Bragg gratings[J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(8): 1363–1370.
- 27 J J Koponen, M J Söderlund, S K Tammela. Measuring photodarkening from single-mode ytterbium doped silica fibers [J]. *Opt Express*, 2006, 14(24): 11539–11544.
- 28 Gebavi H, Taccheo S, Milanese D, *et al.*. Photodarkening measurements in Yb-doped silica fibers in correlation with cooperative luminescence[C]. SPIE, 2012, 8433: 843322.
- 29 C Basu, S Yoo, A J Boyland, *et al.*. Influence of temperature on the post-irradiation temporal loss evolution in Yb-doped aluminosilicate fibers, photodarkened by 488 nm CW irradiation [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(12): 1626–1628.
- 30 Kitabayashi T, Ikeda M, Nakai M, *et al.*. Population inversion factor dependence of photodarkening of Yb-doped fibers and its suppression by highly aluminum doping[C]. OFC, 2006. OThC5.
- 31 Sylvia Jetschke, Sonja Unger, Ulrich Röpke, *et al.*. Photodarkening in Yb doped fibers experimental evidence of equilibrium states depending on the pump power[J]. *Opt Express*, 2007, 15(22): 14838–14843.
- 32 Joan J Montiel I Ponsoda, Mikko J Söderlund, Jeffrey P Koplów, *et al.*. Photodarkening-induced increase of fiber temperature[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(22): 4139–4144.
- 33 Inoue N, Shirakawa A, Ueda K. Photodarkening and photobleaching of Yb-doped fibers by laser diodes[C]. CLEO, 2010. CMGG5.
- 34 Piccoli R, Mechin D, Robin T, *et al.*. Lifetime reduction due to photodarkening phenomenon in ytterbium-doped fibers

- and rate equation term[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(21): 4370–4373.
- 35 O Berné, M Caussanel, Gilard O. A model for the prediction of EDFA gain in a space radiation environment[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(10): 2227–2229.
- 36 Fox B P, Simmons–Potter K, Simmons J H, *et al.*. Radiation damage effects in doped fiber materials[C]. *SPIE*, 2008, 6873: 68731F.
- 37 D L Griscom, M E Gingerich, E J Friebele. Radiation induced defects in glasses: origin of power–law dependence of concentration on dose[J]. *Phys Rev Lett*, 1993, 71(7): 1019–1022.
- 38 Manek–Hönniger I, Bouillet J, Cardinal T, *et al.*. Photodarkening and photobleaching of an ytterbium–doped silica double–clad LMA fiber[J]. *Opt Express*, 2007, 15(4): 1606–1611.
- 39 Xiong L, Sekiya E H, Saito K. Yb–doped silica preform precursor nanoparticles and the photodarkening in them[C]. *ACP*, 2009. ThBB4.
- 40 R Peretti, A–M Jurdyc, B J Acquier, *et al.*. How do traces of thulium explain photodarkening in Yb doped fibers[J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 20455–20460.
- 41 Jetschke S, Unger S, Schwuchow A, *et al.*. Evidence of Tm impact in low–photodarkening Yb–doped fibers[J]. *Opt Express*, 2013, 21(6): 7590–7598.
- 42 Koponen J, Laurila M, Hotoleanu M. Demonstration of spatial distribution of photodarkening in Yb–doped[J]. *Electron Lett*, 2008, 44(16): 960–961.
- 43 Hotoleanu M, Koponen J, Kokki T, *et al.*. Experimental verification of spatial distribution of photodarkening in large mode area ytterbium doped fibers[C]. *CLEO*, 2008. CFS3.
- 44 Changgeng Ye, Joan J Montiel I Ponsoda, Ari Tervonen, *et al.*. Refractive index change in ytterbium–doped fibers induced by photodarkening and thermal bleaching[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(30): 5799–5805.
- 45 Taccheo S, Gebavi H, Monteville A, *et al.*. Concentration dependence and self–similarity of photodarkening losses induced in Yb–doped fibers by comparable excitation[J]. *Opt Express*, 2011, 19(20): 19340–19345.
- 46 Zhang Xiaojie, Izutsu M, Kumagai H, *et al.*. Femtosecond optical Kerr studies of photodarkening effect on nonlinear optical properties of CdSxSe1–x doped glass[J]. *Opt Commun*, 1997, 142(4–6): 273–278.
- 47 Paul M C, Yu Kir’Yanov, A V B. Yb₂O₃ doped yttrium–alumino–silicate nano–particles based LMA optical fibers for high–power fiber lasers[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(13): 2062–2068.
- 48 Mitsunori Saito, Kaoru Nakajima, M Shishido. Polymer coating on infrared silver halide fiber for photodarkening protection[J]. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(3): 441–447.
- 49 Hrvoje Gebavi, Stefano Taccheo, Daniel Milanese, *et al.*. Temporal evolution and correlation between cooperative luminescence and photodarkening in ytterbium doped silica fibers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(25): 25078–25085.
- 50 Engholm M, Jelger P, Laurell F, *et al.*. Improved photodarkening resistivity in ytterbium–doped fiber lasers by cerium codoping optical fibers[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(8): 1285–1287.
- 51 Sylvia Jetschke, Sonja Unger, Anka Schwuchow, *et al.*. Efficient Yb laser fibers with low photodarkening by optimization of the core composition[J]. *Opt Express*, 2008, 16(20): 15540–15545.
- 52 M E Likhachev, S S Aleshkina, A V Shubin, *et al.*. Large–mode–area highly Yb–doped photodarkening–free Al₂O₃–P₂O₅–SiO₂–based fiber[C]. *CLEO Europe*, 2011. CJ_P24.
- 53 Yu C. Research on photodarkening in rare earth doped fibers[J]. *J Rare Earths*, 2012, 30(11): 1102–1105.
- 54 S Yoo, M P Kalita, A J Boyland, *et al.*. Ytterbium doped nano–crystalline optical fiber for reduced photodarkening [C]. *CLEO*, 2010. JWA98.
- 55 Sylvia Jetschke, Martin Leich, Sonja Unger, *et al.*. Influence of Tm– or Er–codoping on the photodarkening kinetics in Yb fibers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 14473–14478.
- 56 Söderlund M J, Montiel Ponsoda J J, Honkanen S. Measurement of thermal binding energy of photodarkening–induced color centers in ytterbium–doped silica fibers[C]. *CLEO Europe*, 2009. CE3–3.
- 57 Gebavi H, Taccheo S, Lablonde L, *et al.*. Mitigation of photodarkening phenomenon in fiber lasers by 633 nm light exposure[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(2): 196–198.
- 58 Jetschke S, Unger S, Röpke U, *et al.*. Photodarkening in Yb doped fibers: experimental evidence of equilibrium states depending on the pump power[J]. *Opt Express*, 2007, 15(22): 14838–14843.