

# 掺镱光纤激光器光子暗化现象的研究进展

刘超平 廖 雷 李进延

华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要** 高功率掺镱光纤激光器长时间工作会产生光子暗化现象, 导致激光器输出功率降低, 因此研究掺镱光纤光子暗化现象对促进掺镱光纤激光器的进一步发展具有重要意义。从产生机理、产生的影响以及抑制方法三方面, 详细介绍了掺镱光纤光子暗化现象的研究进展, 为光子暗化现象的深入研究提供参考。

**关键词** 激光器; 掺镱光纤; 光子暗化; 漂白

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.070002

## Research Progress on Photodarkening of Yb-Doped Fiber Lasers

Liu Chaoping Liao Lei Li Jinyan

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** The long-time running of a high power Yb-doped fiber laser will cause photodarkening, which reduces the output power of laser. Thus, the research on photodarkening in Yb-doped fiber is of great significance to the development of Yb-doped fiber laser. The latest progress of photodarkening in Yb-doped fiber is detailedly introduced in three aspects including mechanism, impact and suppression method, which provides reference for the further study of the photodarkening.

**Key words** lasers; Yb-doped fiber; photodarkening; bleach

**OCIS codes** 140.3615; 140.3425; 140.3510

## 1 引言

掺镱光纤激光器以其稳定性高、光束质量好、斜率效率高等显著优势, 受到了广泛关注, 得到飞速发展<sup>[1-2]</sup>, 成为激光器产业中的主导力量, 并已在工业、医疗、军事等领域获得重要应用。近年来, 掺镱光纤激光器输出功率已达到万瓦量级<sup>[3]</sup>, 然而随着高功率激光器运行时间的增加, 掺镱光纤激光器会出现由于光纤损耗增大而导致的输出功率减小的现象, 从而即光子暗化现象从而导致激光阈值增加<sup>[4]</sup>, 系统稳定性降低, 工作寿命变短, 限制了掺镱光纤激光器的进一步发展。因此, 掺镱光纤光子暗化现象的研究对掺镱光纤激光器的发展具有重要意义。

近年来国外研究人员报道了大量关于光子暗化现象的研究, 而国内的研究相对较少, 仅中国科学院安徽光学精密机械研究所、华中科技大学、国防科学技术大学等单位曾有过相关报道<sup>[4-7]</sup>。本文首面介绍了掺镱光纤光子暗化现象的产生机理, 介绍了光子暗化现象对掺镱光纤激光器产生的影响, 并着重介绍了掺镱光纤光子暗化现象的抑制方法, 为掺镱光纤激光器实现低光子暗化工作提供了有效途径。

**收稿日期:** 2016-01-24; **收到修改稿日期:** 2016-02-17; **网络出版日期:** 2016-06-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(61378070)

**作者简介:** 刘超平(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事掺镱光纤激光器方面的研究。E-mail: lcp1212@126.com

**导师简介:** 李进延(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事特种光纤及其应用方面的研究。

E-mail: ljy@hust.edu.cn(通信联系人)

## 2 光子暗化现象的研究进展

### 2.1 光子暗化现象的产生机理

1997年,英国南安普顿大学 Paschotta 等<sup>[8]</sup>在抽运掺镱光纤(YDF)时,发现当抽运波长接近 976 nm 时,其荧光输出和光纤中的剩余抽运光急剧下降,当抽运波长为 976 nm 时,并没有观测到激光输出。经过研究发现,这是由于一部分镱离子的激发态寿命发生猝灭,导致抽运光不饱和吸收,从而影响了激光器的性能,推测认为该猝灭由光纤中某些杂质或缺陷引起,这是首次在 YDF 中发现光子暗化现象。近年来,掺镱光纤激光器光子暗化现象已经成为了国际上的一个研究热点,虽然人们普遍认为由于色心引起了光子暗化现象,但是对色心的产生机理仍没有一致的看法,目前主要有三种观点:氧缺陷中心(ODCs)、电荷转移吸收带(CT)和  $Tm^{3+}$  的影响。

#### 2.1.1 氧缺陷中心

在掺镱光纤中能引起光子暗化现象的缺陷主要有镱离子对氧空位缺陷(Yb-Yb ODC)、镱铝氧空位缺陷(Yb-Al ODC)、非桥氧空位中心(NBOHC)、铝氧空位中心(Al-OHC)、二类氧空位缺陷(ODCII)等。2007年,Yoo 等<sup>[9]</sup>发现掺镱光纤在 220 nm 附近有一个吸收峰,认为是和 Yb 相关的,Yb 离子很容易捕获 Al 四面体周围的氧空穴,但 Yb 离子过多时,氧空穴不足,会导致形成 Yb-Al 或 Yb-Yb 等的错位化学键。由于锗硅酸盐玻璃中 Ge-Ge 和 Ge-Si 化学键是由氧缺陷导致的,此处也认为是由于氧缺陷。当 488 nm 光辐照时,ODCs 的吸收峰值在 220 nm,可以产生双光子吸收,进而释放出自由电子,并被 Yb、Al 吸收,形成色心,导致了光子暗化现象。2008年,Dragic 等<sup>[10]</sup>采用 532 nm 激光激发掺 Yb 光纤,观察 NBOHC 的发射光谱,发现高掺 Ge 和掺 P 都会使 NBOHC 的辐射光谱红移,高掺 Al 使 NBOHC 的辐射光谱与纯硅时相同。NBOHC 可能会引起上转换过程,从而产生光子暗化现象。2009年,Arai 等<sup>[11]</sup>通过电子自旋共振测试,得出伽马射线辐照以及 976 nm 光抽运 Yb/Al 光纤都能产生 Al-OHC。随后他又考虑透射率测量的结果,得出在 Yb/Al 共掺玻璃中,共掺 Al 虽能阻止 Yb 聚集,从而抑制光暗化,但是掺 Al 会产生 Al-OHC,而光暗化引起的附加损耗主要是 Al-OHC 吸收引起的。2012年 Dragic 等<sup>[12]</sup>采用波长 248 nm 的光子激发掺 Yb 光纤,图 1 为实验得到的掺 Yb 光纤的荧光谱。其中 ODCII 有两种结构,一种结构荧光峰值 288 nm (能量  $E=4.3$  eV),另一种荧光峰值 444 nm ( $E=2.8$  eV)。在  $Yb^{3+}$  的吸收峰值 976 nm 也观察到荧光峰值,说明 ODCII 和  $Yb^{3+}$  之间存在能量转换。

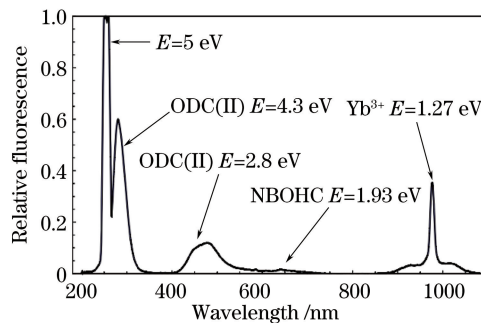


图 1 掺 Yb 光纤荧光谱

Fig. 1 Fluorescence spectrum recorded for Yb-doped fibers

#### 2.1.2 电荷转移吸收带

2007年,Engholm 等<sup>[13]</sup>采用紫外光(UV)激发 Yb/Al 玻璃,观察到可见光(VIS)波段的发光谱,以及  $Yb^{3+}$  在红外光(IR)波段的发光谱,认为 VIS 波段的发光谱是由于  $Yb^{2+}$  的 5d-4f 发射,图 2(b)为这一过程的构型图,而 IR 波段的发光认为是由于 CT 过程,图 2(a)为  $Yb^{3+}$  CT 过程的构型坐标图。 $Yb^{3+}$  被激发到 CT 带形成  $Yb^{2+}$  和与 Yb 离子绑定的空穴,然后通过非辐射弛豫过程达到一个平衡态  $R'$  态,能级  $^2F_{5/2}$  跃迁到能级  $^2F_{7/2}$  可发射 1  $\mu m$  荧光。如果激发到 CT 带后能再进一步激发到更高的 CT 带,就会形成自由空穴,导致色心的形成,在 VIS 和近红外(NIR)波段引入附加损耗。2008年,Engholm 等<sup>[14]</sup>观察到铝硅酸盐玻璃在 230 nm 附近有一个与色心产生有关的 CT 吸收带,UV 光照射 Yb/Al 预制棒激发到 CT 吸收带产生色心,

而 915 nm 抽运掺 Yb 光纤激光器时能够产生与之相同的色心。因此,认为在高功率掺 Yb 光纤激光器中,CT 吸收带引起了光子暗化现象。针对 Yoo 等<sup>[9]</sup>提出的光子暗化现象是由 ODCs 在 230 nm 附近的双光子吸收引起的这一假设,Engholm<sup>[15]</sup>认为由于稀土离子具有相似的化学性质,那么 Nd/Er 掺杂光纤也应该存在由 ODCs 引起的 230 nm 吸收带,但实验中均未观测到,因此这个吸收带和 ODCs 没有关系,而是电荷转移吸收带。Yoo<sup>[16]</sup>又提出激发电子到 CT 吸收带时,会产生 1  $\mu\text{m}$  左右的发光,即  $\text{Yb}^{2+}$  与空穴的再结合重新形成了  $\text{Yb}^{3+}$ ,因此该过程是  $\text{Yb}^{2+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ ,即漂白光暗化过程。2013 年,Rydberg 等<sup>[17]</sup>实验验证了采用 210 nm 光辐射 Yb/Al 预制棒和采用 NIR 光抽运 Yb/Al 光纤都能通过 CT 过程产生  $\text{Yb}^{2+}$ ,证明了 Yb 的价态不稳定性对产生光子暗化现象具有非常重要的作用。

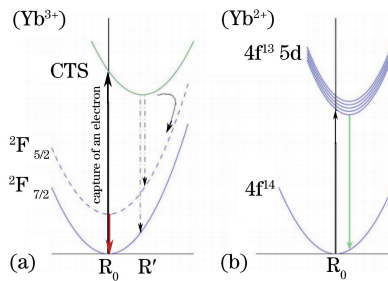


图 2 (a)  $\text{Yb}^{3+}$  CT 过程的构型坐标图; (b)  $\text{Yb}^{2+}$  构型坐标图

Fig. 2 (a)  $\text{Yb}^{3+}$  configurational coordinate diagram of CT procedure; (b) configurational coordinate diagram for  $\text{Yb}^{2+}$

### 2.1.3 $\text{Tm}^{3+}$ 的影响

2010 年,Peretti<sup>[18]</sup>用 980 nm 的激光器抽运掺 Yb 光纤和 Yb/Tm 共掺光纤,得到 UV-VIS 范围的荧光光谱(如图 3 所示,黑线:Yb 光纤,红线:Yb/Tm 光纤),可以看出两个荧光光谱峰值具有很好的重合性,且几乎所有吸收带都可归因于  $\text{Tm}^{3+}$  的存在。通过分析  $\text{Tm}^{3+}$  的能级结构(如图 4 所示),得出当以  $\text{Tm}^{3+}$  为中心,半径 5 nm 的球状范围内,有 50~100 个  $\text{Yb}^{3+}$  离子时,可有 4~5 个  $\text{Yb}^{3+}$  进行能量传递, $\text{Tm}^{3+}$  吸收这些能量,从基态跃迁到高能态,可发出 UV-VIS,二氧化硅基质可吸收这些荧光,形成色心,产生光子暗化现象。2011 年,Jetschke 等<sup>[19]</sup>制备了一系列光纤,Yb、Al、P 掺杂浓度相同, $\text{Tm}$  浓度变化范围为  $0.04 \sim 550 \cdot 10^{-6}$  mol。采用 976 nm 光纤激光器进行纤芯抽运,通过对比不同掺 Tm 光纤附加损耗的大小,发现当  $\text{Tm}^{3+}$  浓度很小时,并没有使附加损耗显著增大,进而提出掺镱光纤产生光暗化有两种途径:一种和 Tm 没有关系,当光纤中只有原材料中的 Tm 杂质时,认为 Yb/Al 光纤产生光子暗化现象是由于光纤的内在特性;另一种和 Tm 有关。2013 年,Jetschke<sup>[20]</sup>又制备了一系列 Yb/P/Tm 光纤,Yb、P 浓度基本不变, $\text{Tm}$  浓度变化范围为  $(0.01 \sim 680) \cdot 10^{-6}$  mol。他发现在  $\text{Tm}$  浓度很低的光纤中也观察到了附加损耗,且随着  $\text{Tm}$  浓度的增加,附加损耗逐渐增加,但当  $\text{Tm}$  浓度过高时,附加损耗反而随  $\text{Tm}$  浓度增加而减小。目前,关于  $\text{Tm}^{3+}$  对光子暗化现象产生的影响还没有全面的理解,需要更加深入的研究。

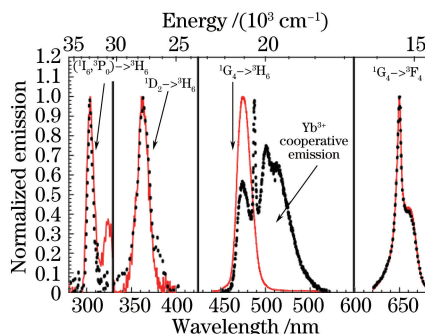


图 3 UV-VIS 波段荧光光谱

Fig. 3 UV-VIS fluorescence spectrum

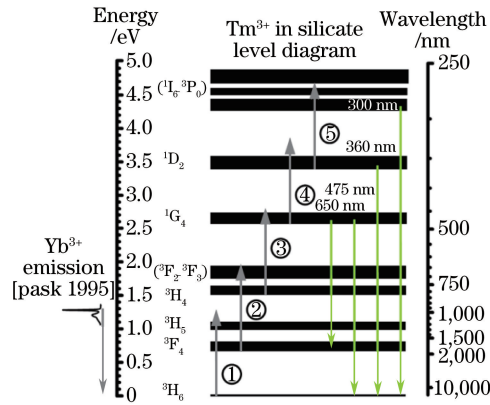


图 4 Yb/Tm 光纤转换过程示意图

Fig. 4 Schematic of conversion processes in Yb/Tm doped fiber

## 2.2 光暗化现象对掺镜光纤激光器的影响

### 2.2.1 输出功率降低

2010年, Jelger等<sup>[21]</sup>在980 nm激光器系统中以Yb/Al光纤为增益介质, 采用Yb原子数分数为0.22%的Yb/Al光纤的激光器在2 h内功率降低为初始的90%, 而采用Yb原子数分数为0.44%的Yb/Al光纤的激光器输出功率在开始1 h内降低到初始功率的40%以下。

### 2.2.2 不稳定性阈值减小

2015年, Otto等<sup>[22]</sup>发现如果只考虑量子亏损对模式不稳定性的影响, 模拟结果应该是种子光波长越短, 模式不稳定性阈值越高, 而这与实验结果不符。当考虑量子亏损与光子暗化共同作用效果时, 模拟结果与实验结果符合得很好, 证实了光子暗化现象是光纤中第二个热源。光子暗化现象很弱时, 就能使光纤中热负载加倍, 模式不稳定性阈值减小, 即当光纤中光子暗化现象有轻微的降低时, 就可很大程度上提高模式不稳定性阈值。

### 2.2.3 Yb 荧光寿命减小

2014年, Piccoli等<sup>[23]</sup>研究了光暗化现象对Yb荧光寿命的影响, 发现光暗化引起的平衡态时的附加损耗与Yb荧光寿命的减小量具有线性关系。同年, Li等<sup>[24]</sup>测试了暗化与没有暗化的掺Yb光纤的荧光功率衰减谱, 得到暗化后的光纤荧光寿命减小了12%, 而荧光寿命和激光效率线性相关, 即激光性能降低了12%。

### 2.2.4 抽运功率损失

2014年, Li等<sup>[24]</sup>采用977 nm激光二极管(LD)抽运YDF时, 发现在抽运波长977 nm处, 抽运功率减小的值大于光暗化现象产生的附加损耗值, 即光暗化现象不仅产生了附加损耗, 也影响抽运效率。在YDF放大器中, 实验和模拟相结合得出光暗化除了引起损耗外, 还引起15%~30%的抽运功率损失。

## 2.3 光子暗化现象的抑制方法

### 2.3.1 热漂白

2006年, Jasapara等<sup>[25]</sup>通过加热光暗化后的光纤, 发现当温度达到500 °C时, VIS波段的吸收恢复到初始状态, 但是Yb<sup>3+</sup>的吸收带宽却随着温度的增加而变化, 温度降到室温后, 整个光谱完全恢复到暗化前的状态, 即500 °C的高温对光暗化完全漂白。2009年, 英国南安普顿大学Basu等<sup>[26]</sup>把光暗化后的光纤从室温加热到120 °C, 保持30 min, 观察到附加损耗比在室温下增大了, 即加热到120 °C可加速附加损耗的产生。同年, Leich等<sup>[27]</sup>对暗化后的光纤进行加热处理, 发现随着温度的增加, 短波长处的附加损耗逐渐减小, 但是长波长处的附加损耗反而增加, 其中633 nm波长处的附加损耗先增加, 温度达到470 K后才开始减小, 温度到达770 K时, 光暗化现象被完全漂白。赫尔辛基理工大学的Söderlund等<sup>[28]</sup>加热光暗化后的光纤时, 发现600 nm处, 在325 °C以前, 光纤吸收系数逐渐增大, 650 °C时光纤恢复到暗化前的状态。

### 2.3.2 载 H<sub>2</sub>、载 O<sub>2</sub>



2007年, Yoo等<sup>[9]</sup>把掺Yb光纤放入高压氧气室26天, 保持 $161.6 \times 10^5$  Pa,  $50^\circ\text{C}$ , 然后用488 nm的光辐射载 $\text{O}_2$ 处理后的光纤200 min, 观察到在633 nm处的附加损耗由非载 $\text{O}_2$ 处理时的3.3 dB/m减小为2.1 dB/m, 得到了显著降低。他认为这是由于载 $\text{O}_2$ 处理减少了与Yb相关的ODC数量, 进而有效抑制了色心形成, 降低了光子暗化现象。

2006年, Jasapara等<sup>[25]</sup>在 $750^\circ\text{C}$ 下, 对原始的掺Yb光纤通入14 h的 $\text{H}_2$ , 然后在常温下测试其吸收谱, 发现除了背景损耗有所增加, 在短波长处损耗也有所增加。然后又用915 nm LD抽运载 $\text{H}_2$ 后的光纤20 min, 再测试其吸收谱, 发现和抽运之前基本没有差异, 即光暗化现象得到了有效抑制。2008年, Engholm等<sup>[29]</sup>在室温下进行载 $\text{H}_2$ 处理, 当用UV光照射载 $\text{H}_2$ 后的光纤时, 在VIS-IR波段附加损耗显著减小, 但是在UV波段附加损耗却很大, 这是由于载 $\text{H}_2$ 可减少与空穴相关的色心, 抑制了VIS-IR波段的附加损耗, 但是却增加了与电子相关的色心, 使UV波段的附加损耗增大。

### 2.3.3 共掺离子

在掺Yb光纤中也可通过共掺其他离子降低光子暗化效应, 主要有Al、P、Ce、Er、碱土元素等离子。

共掺Al离子对光子暗化现象的抑制作用并不是特别明显。共掺P离子虽能有效抑制光子暗化现象, 但会使数值孔径增加, 纤芯背景损耗增大<sup>[30]</sup>, 降低Yb的吸收和发射截面<sup>[31]</sup>, 而且由于P的蒸发作用, 会在折射率剖面上产生中心凹陷。2008年, Jetschke等<sup>[32]</sup>研究了Al对掺Yb光纤光子暗化现象的影响, 通过化学气相沉积法(MCVD)溶液掺杂技术, 制备了5根光纤, Yb和P浓度分别保持粒子数分数为0.45%和0.5%不变, Al的掺杂浓度逐渐增加, 然后分别测试了5根光纤的光子暗化现象, 得出随着Al掺杂浓度的增加, 光子暗化引起的附加损耗逐渐减小。通过拉伸指数函数拟合, 发现平衡态的附加损耗与Al掺杂浓度之间存在线性关系, 随着Al浓度的增加, 附加损耗线性减小。他们还系统研究了P对掺Yb光纤光子暗化现象的影响, Yb和Al的掺杂浓度分别保持粒子数分数为0.45%和4.5%不变, P的浓度逐渐增加, 制备了一系列光纤, 然后分别测试它们的光子暗化现象。发现随着P的掺杂浓度的增加, 附加损耗逐渐减小, 且当Al和P的浓度比例1:1时, 附加损耗基本被完全抑制, 而且还保持了低的纤芯背景损耗, 低数值孔径, 激光输出功率超过100 W时的斜率效率可达72%。

在Yb/Al光纤中共掺Ce离子能有效抑制光子暗化现象, 且不改变共掺Al材料的物理和光学特性, 但是共掺Ce会使数值孔径增加。Engholm等<sup>[33-34]</sup>测试了Yb/Al和Yb/Ce/Al光纤的光暗化引起的附加损耗, 得出共掺Ce离子不仅降低了光暗化速率, 而且减小了饱和附加损耗, 且没有影响Yb的吸收截面和激发态寿命, 对掺Yb光纤激光器斜率效率也基本没有影响。他们认为这是由于在Yb/Ce/Al光纤中存在氧化还原电子对 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ , 可捕获与色心形成相关的电子和空穴, 进而有效抑制了光子暗化。2010年Jelger等<sup>[21]</sup>在980 nm激光器系统中分别以Yb/Al和Yb/Ce/Al光纤为增益介质, 对比长时间输出功率的变化, 在5 h内采用Yb掺杂为0.22% (原子数分数)的Yb/Ce/Al光纤为增益介质的激光器输出功率并没有发现明显的降低, 而采用Yb掺杂为0.22% (原子数分数)的Yb/Al光纤的激光器在2 h内功率降低为初始的90%, 采用Yb掺杂为0.44% (原子数分数)的Yb/Al光纤的激光器输出功率在开始1 h内更是降低到初始功率的40%以下, 说明掺杂Ce离子能有效抑制980 nm光纤激光器的光子暗化现象, 有利于激光器长时间稳定工作。2016年, 华中科技大学Zhao等<sup>[35]</sup>通过对比Yb/Al和Yb/Ce/Al光纤的光子暗化现象, 发现掺杂Ce离子可以抑制50%的光暗化产生的附加损耗。他们还研究了793 nm对光暗化后的光纤进行光漂白时Ce离子的影响, 发现810 nm处暗化11.2 dB/m时, 采用相同功率的793 nm LD漂白180 min后, Yb/Ce/Al光纤漂白了37.5%, 而Yb/Al光纤只漂白了22%, 即Ce离子不仅可以抑制光暗化现象的产生, 还可以提高光漂白的效率。

在Yb/Al光纤中共掺Er离子也能降低光子暗化现象引起的附加损耗。2007年Morasse等<sup>[36]</sup>在掺Yb光纤中共掺Er离子, 显著减小了光暗化引起的附加损耗, 他们认为这是由于在Yb/Er光纤中, Yb离子簇与Er离子进行能量传递, 减少了辐射的UV光, 从而抑制了光子暗化效应。2011年Jetschke等<sup>[19]</sup>分别测试了Yb/Al和Yb/Al/Er光纤的光暗化附加损耗, 实验发现Yb/Al/Er光纤的附加损耗明显减小, 并且它在VIS波段的荧光强度比较弱, 说明掺杂Er离子能降低光子暗化效应是由于 $\text{Yb}^{3+}$ 和 $\text{Er}^{3+}$ 之间的能量传递减小了 $\text{Yb}^{3+}$ 的粒子数反转率, 但 $\text{Er}^{3+}$ 并没有有效的上转换和激发态吸收, 高能态的电子多以非辐射跃迁到基态, 从

而不能辐射 UV 光。

在 Yb/Al 光纤中共掺碱土金属元素可作为 Yb<sup>3+</sup> 的稳定剂。石英玻璃中硅离子显(4+)价态,因此局部总电荷显(9+)的 Al<sup>3+</sup> - Yb<sup>3+</sup> - Yb<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup> - Yb<sup>3+</sup> - Yb<sup>3+</sup> 价态为非稳定价态,存在 Yb<sup>3+</sup> 通过电荷转移形成 Yb<sup>2+</sup>,形成总电荷(8+)的 Al<sup>3+</sup> - Yb<sup>2+</sup> - Yb<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup> - Yb<sup>2+</sup> - Yb<sup>3+</sup>。而通过 Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Sr<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup> 等碱土金属离子共掺可实现局部总电荷显多重(4+)稳定价态的离子引入,提升 Yb<sup>3+</sup> 的稳定性,避免电荷转移发生,形成总电荷为(8+)的 Mg<sup>2+</sup> - Yb<sup>3+</sup> - Yb<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup> - Yb<sup>3+</sup> - Ca<sup>2+</sup>、Sr<sup>2+</sup> - Yb<sup>3+</sup> - Yb<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup> - Yb<sup>3+</sup> - Ba<sup>2+</sup> 等。2013 年 Fujimoto 等<sup>[37]</sup>测试了掺 Yb 光纤和 Yb/Ca 光纤在 635 nm 处的透射率,观察到 Ca<sup>2+</sup> 对光暗化有抑制作用。2015 年他们研究组又系统测试了掺 Yb 光纤、Yb/Mg 光纤、Yb/Ca 光纤、Yb/Sr 光纤、Yb/Ba 光纤等在 635 nm 处透射率,发现 Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Sr<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup> 对光暗化效应均有抑制作用,只是 Mg<sup>2+</sup> 的效果最好,始终能保持 94.3% 的透射率<sup>[38]</sup>。

### 2.3.4 光漂白

2007 年,Manek-Höninger 等<sup>[39]</sup>用 976 nm LD 抽运大模场掺 Yb 光纤激光器,产生光子暗化现象,然后用 355 nm 的光抽运暗化后的光纤,一段时间后,掺 Yb 光纤激光器的激光特性完全恢复,且可以重复进行这种暗化与漂白的过程。同年,Guzman Chavez 等<sup>[40]</sup>采用 543 nm 的光照射暗化后的光纤 1 h,VIS 波段的附加损耗减小,但是 Yb<sup>3+</sup> 的吸收峰值吸收系数增加,认为这是由于漂白的过程中产生了 Yb<sup>2+</sup> → Yb<sup>3+</sup> 的转化过程。2012 年,Gebavi 等<sup>[41]</sup>采用 633 nm 辐射掺 Yb 光纤,得出漂白程度与 Yb 掺杂浓度、漂白功率、初始光暗化程度均有关系。2013 年,Gebavi<sup>[42]</sup>研究 633 nm 光辐射对 1070 nm 掺 Yb 光纤激光器的影响,从激光性能方面验证了 633 nm 的漂白作用,光暗化可使 1070 nm 掺 Yb 激光器斜率效率降低,阈值增加,采用 633 nm 光辐射可使斜率效率增大,阈值减小,但是不能恢复到初始状态。同年,Piccoli 等<sup>[43]</sup>研究了 405 nm 光辐射对 1070 nm 掺 Yb 光纤激光器的影响,发现 405 nm 光辐射可部分漂白光子暗化现象,认为不能完全漂白的原因为激发态 Yb<sup>3+</sup> 吸收 405 nm 光,或者是基态 Yb<sup>3+</sup> 吸收 405 nm 光引起光暗化。2014 年,Piccoli 等<sup>[44]</sup>采用 550 nm 光对高掺杂 Yb/Al 光纤进行漂白,当 976 nm 和 550 nm 同时抽运 Yb/Al 光纤时,输出功率始终保持初始功率的 90% 以上。2015 年,Gebavi 等<sup>[45]</sup>研究了光暗化和光漂白对 1030 nm 掺 Yb 光纤激光器的影响,与 1070 nm 激光器相比,光暗化效应对 1030 nm 激光器影响比较小,采用 633 nm 光辐射可基本漂白到初始状态,这是由于 1030 nm 激光器所需反转粒子数较低,只产生低能量缺陷,可被 633 nm 的光漂白,而 1070 nm 激光器会产生高能量缺陷,633 nm 光辐射只能漂白其中一部分,需要更高能量的光子进一步漂白。2015 年,Zhao 等<sup>[46]</sup>发现用 915 nm 抽运掺 Yb 光纤产生的光子暗化现象可以用 793 nm 的光进行漂白,793 nm 的 LD 功率为 5 W,抽运时间为 1600 h 时,在 810 nm 处可漂白 68% 的光暗化引起的附加损耗。同时用 915 nm 和 793 nm LD 抽运与只用 915 nm LD 抽运相比,能抑制 80% 的光暗化引起的附加损耗。

### 2.3.5 其他漂白方法

2007 年,Jetschke 等<sup>[47]</sup>采用 915 nm 抽运源抽运掺 Yb 光纤,功率从 1.0 W 逐渐增加到 13.2 W,把掺 Yb 光纤暗化到一定程度,然后把抽运功率从 13.2 W 逐渐减小到 0.6 W,观察到附加损耗逐渐减小,即光暗化被部分漂白,由此认为暗化引起的附加损耗的平衡态依赖于 Yb 的反转粒子数。2013 年,Chen 等<sup>[48]</sup>用 915 nm 光抽运 Ce/Yb 光纤,暗化到一定程度,关闭抽运源 1 h 后,发现 633 nm 处的附加损耗减小了 1.5 dB/m,即 Ce/Yb 光纤产生了自漂白现象。

## 3 结 论

光子暗化现象是限制高功率掺镱光纤激光器发展的重要因素,明确光子暗化现象的发生机理以及对掺镱光纤激光器的影响,寻找抑制光子暗化现象的方法,对掺镱光纤激光器长时间稳定工作具有非常重要的意义。详细介绍了多种抑制掺镱光纤光子暗化现象的方法,大致可以分为两类:1) 从材料本身出发,在掺镱光纤中共掺 Al、P、Er、Ce、碱土金属等离子,制备具有抗光子暗化作用的掺镱光纤。这种方法可以有效减小光子暗化现象,但是共掺离子会影响光纤的背景损耗、数值孔径、折射率、吸收和发射截面以及光纤韧性等,而且需要改善光纤制备工艺,加大了光纤的制备难度,但是若光纤制备工艺比较成熟,能合理共掺离子,使掺镱

光纤各项性能基本不受影响,用这种掺镱光纤制备的光纤激光器能非常有效的抑制光子暗化现象。2)从光纤使用出发,利用能够缓解光子暗化现象的实验方法,主要有载  $H_2$ 、载  $O_2$ 、热漂白、光漂白等。载  $H_2$ 、载  $O_2$  处理只能部分漂白光子暗化现象,且操作复杂,不适用于实际掺镱光纤激光器系统。热漂白虽然可以完全漂白光子暗化,但是不同光纤完全漂白的温度不同,且操作起来比较麻烦,不适用于实际掺镱光纤激光器系统。光漂白是适合实际掺镱光纤激光器系统的一种非常有效地抑制光子暗化的方法,目前报道的能进行光漂白的波长主要有 355、405、543、550、633、793 nm 等,其中 355 nm 波长的激光能完全漂白光子暗化现象,其他波长的激光虽然只可部分漂白光子暗化现象,但也能促进激光器系统更长时间稳定工作,但是这种方法增加了一个激光光源,增加了系统成本。如果采用共掺离子的掺镱光纤制备光纤激光器,再结合光漂白进一步抑制光子暗化现象,相信则会有更加好的效果。

采用 MCVD 结合液相掺杂技术制备光纤时,在配制溶液和缩棒的过程中,若处理不好可能会导致光子暗化现象的产生。在配制溶液时要合理选择各掺杂离子浓度以及各掺杂离子的比例。缩棒时要在氧气氛围下进行,确保 Yb 处于(+3)价态,氮气和氧气的比例也要合适,而且要保持一定的气压,否则会影响纤芯中离子掺杂的均匀性,使折射率剖面出现冒尖或者凹陷,影响光纤性能。此外,还要掺杂纯度高的 Yb,因为 Yb 纯度不高的话,其中的 Tm 杂质可能会导致光子暗化现象。

关于光子暗化已经做了一些工作,研究了光子暗化现象对 Yb 离子荧光谱的影响,不同波长暗化程度之间的关系等基础工作<sup>[5]</sup>;还研究了共掺 Ce 离子对光子暗化以及光漂白的影响<sup>[6,35]</sup>,以及掺 Ce 光纤自漂白的现象<sup>[48]</sup>;同时还发现 793 nm 对掺镱光纤具有漂白作用<sup>[46]</sup>。但是,想要彻底解决光子暗化现象对掺镱光纤激光器的影响就必须清楚其产生机理,而关于光子暗化现象的具体产生机理至今没有一致的看法,众多研究人员通过分析实验结果提出了氧缺陷、电荷转移吸收带和  $Tm^{3+}$  的影响这三种理论解释,其都有合理性,但也有某些矛盾的地方。光子暗化现象的产生机理比较复杂,可能是某几种机制共同作用的结果,需要更加深入的研究,以便找出更加方便有效地抑制光子暗化现象的方法,促进掺镱光纤激光器的进一步发展。

## 参 考 文 献

- 1 Sun Ruoyu, Jin Dongchen, Cao Yi, *et al.*. Hundred-watt-level 1030 nm ytterbium-doped picosecond all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1002004.  
孙若愚, 金东臣, 曹 镱, 等. 百瓦级 1030 nm 皮秒脉冲掺镱全光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002004.
- 2 Wang Xiaolin, Tao Rumao, Zhang Hanwei, *et al.*. 1 kilowatt single-end pumped all-fiber laser oscillator with good beam quality and high stability[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105001.  
王小林, 陶汝茂, 张汉伟, 等. 1 kW 单端抽运、高光束质量、高稳定性全光纤激光振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105001.
- 3 Hecht J. Fiber lasers ramp up the power[J]. Lasr Focus World, 2009, 45(12): 53-57.
- 4 Zhu Zongjiu, Xu Lixin, Mao Qinghe, *et al.*. Photodarkening in ytterbium-doped fiber 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.
- 5 Chen G, Xie L, Wang Y B, *et al.*. Photodarkening-induced absorption and fluorescence changes in Yb fibers[J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(10): 104208.
- 6 Li Haiqing, Chen Gui, Wang Yibo, *et al.*. Study on the photo-darkening in fiber [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(4): 26-30.  
李海清, 陈 瑰, 王一礴, 等. 光纤中光子暗化效应研究[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(4): 26-30.
- 7 You Jie, Yu Hailong, Wang Xiaolin, *et al.*. Advance in study on photodarkening of rare-earth doped fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010003.  
尤 洁, 于海龙, 王小林, 等. 掺稀土光纤的光子暗化研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010003.
- 8 Paschotta R, Nilsson J, Barber P R, *et al.*. Lifetime quenching in Yb-doped fibres[J]. Optics Communications, 1997, 136(5-6): 375-378.
- 9 Yoo S, Basu C, Boyland A J, *et al.*. Photodarkening in Yb-doped aluminosilicate fibers induced by 488 nm irradiation [J]. Opt Lett, 2007, 32(12): 1626-1628.

- 10 Dragic P D, Carlson C G, Croteau A. Characterization of defect luminescence in Yb doped silica fibers: part I NBOHC [J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 4688-4697.
- 11 Arai T, Ichii K, Tanigawa S, *et al.*. Defect analysis of photodarkened and gamma-ray irradiated ytterbium-doped silica glasses[C]. *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*, 2009: OWT2.
- 12 Dragic P D, Liu Y S, Galvin T C, *et al.*. Ultraviolet absorption and excitation spectroscopy of rare-earth-doped glass fibers derived from glassy and crystalline performs[C]. *SPIE*, 2012, 8237: 82370T.
- 13 Engholm M, Norin L, Åberg D. Strong UV absorption and visible luminescence in ytterbium-doped aluminosilicate glass under UV excitation[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(22): 3352-3354.
- 14 Engholm M, Norin L. Preventing photodarkening in ytterbium-doped high power fiber lasers; correlation to the UV-transparency of the core glass[J]. *Opt Express*, 2008, 16(2): 1260-1268.
- 15 Engholm M, Norin L. Comment on "Photodarkening in Yb-doped aluminosilicate fibers induced by 488 nm irradiation" [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(11): 1216.
- 16 Yoo S, Basu C, Boyland A J, *et al.*. Reply to comment on "Photodarkening in Yb-doped aluminosilicate fibers induced by 488 nm irradiation" [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(11): 1217-1218.
- 17 Rydberg S, Engholm M. Experimental evidence for the formation of divalent ytterbium in the photodarkening process of Yb-doped fiber lasers[J]. *Opt Express*, 2013, 21(6): 6681-6688.
- 18 Peretti R, Jurdyc A M, Jacquier B, *et al.*. How do traces of thulium explain photodarkening in Yb doped fibers?[J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 20455-20460.
- 19 Jetschke S, Leich M, Unger S, *et al.*. Influence of Tm- or Er-codoping on the photodarkening kinetics in Yb fibers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 14473-14478.
- 20 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.
- 21 Jelger P, Engholm M, Norin L, *et al.*. Degradation-resistant lasing at 980 nm in a Yb/Ce/Al-doped silica fiber[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(2): 338-342.
- 22 Otto H J, Modsching N, Jauregui C, *et al.*. Impact of photodarkening on the mode instability threshold [J]. *Opt Express*, 2015, 23(12): 15265-15277.
- 23 Piccoli R, Robin T, Méchin D, *et al.*. Impact of photodarkening on Yb lifetime in Al-silicate fibres and on the rate-equation system[C]. *SPIE*, 2014, 8982: 89820T.
- 24 Li N, Yoo S, Yu X, *et al.*. Pump power depreciation by photodarkening in ytterbium-doped fibers and amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(2): 115-118.
- 25 Jasapara J, Andrejco M, DiGiovanni D, *et al.*. Effect of heat and H<sub>2</sub> gas on the photo-darkening of Yb<sup>3+</sup> fibers[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2006: CTuQ5.
- 26 Basu C, Yoo S, Boyland A J, *et al.*. Influence of temperature on the post-irradiation temporal loss evolution in Yb-doped aluminosilicate fibers, photodarkened by 488 nm CW irradiation[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2009: 1.
- 27 Leich M, Röpke U, Jetschke S, *et al.*. Non-isothermal bleaching of photodarkened Ybdoped fibers [J]. *Opt Express*, 2009, 17(15): 12588-12593.
- 28 Söderlund M J, Ponsoda J J M I, Koplów J P, *et al.*. Thermal bleaching of photodarkening in ytterbium-doped fibers [C]. *SPIE*, 2010, 7580:75800B.
- 29 Engholm M, Norin L. Reduction of photodarkening in Yb/Al-doped fiber lasers[C]. *SPIE*, 2008, 6873: 68731E.
- 30 Unger S, Schwuchow A, Jetschke S, *et al.*. Optical properties of Yb-doped laser fibers in dependence on codopants and preparation conditions[C]. *SPIE*, 2008, 6890: 689016.
- 31 Melkumov M A, Bufetov I A, Kravtsov K S, *et al.*. Lasing parameters of ytterbium-doped fibres doped with P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. *Quantum Electronics*, 2004, 34(9): 843-848.
- 32 Jetschke S, Unger S, Schwuchow A, *et al.*. Efficient Yb laser fibers with low photodarkening by optimization of the core composition[J]. *Opt Express*, 2008, 16(20): 15540-15545.
- 33 Engholm M, Jelger P, Laurell F, *et al.*. Improved photodarkening resistivity in ytterbium-doped fiber lasers by cerium codoping[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(8): 1285-1287.
- 34 Engholm M, Norin L. Ytterbium-doped fibers co-doped with cerium: next generation of fibers for high power fiber lasers?



- [C]. SPIE, 2010, 7580: 758008.
- 35 Zhao N, Wang Y B, Li J M, *et al.*. Investigation of cerium influence on photo-darkening and photo-bleaching in Yb-doped fibers[J]. Applied Physics A, 2016, 122(2): 1-5.
- 36 Morasse B, Chatigny S, Gagnon Éric. Low photodarkening single cladding ytterbium fibre amplifier[C]. SPIE, 2007, 6453: 64530H.
- 37 Fujimoto Y, Sugiyama S, Murakami M, *et al.*. Suppression mechanism by Ca additive of photo-darkening effect in Yb-doped silica glass fiber[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2013: CM4I.6.
- 38 Sakaguchi Y, Fujimoto Y, Masuda M, *et al.*. Development of low photo-darkening Yb-doped silica glass fiber by co-doping of group 2 element[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2015, CJ\_P: CJ\_P\_47.
- 39 Manek-Hönninger I, Bouillet J, Guillen F, *et al.*. Photodarkening and photobleaching of an ytterbium-doped silica double-clad LMA fiber[J]. Opt Express, 2007, 15(4): 1606-1611.
- 40 Guzman C A D, Kir'yanov A V, Barmenkov Y O, *et al.*. Reversible photo-darkening and resonant photobleaching of Ytterbium-doped silica fiber at in-core 977-nm and 543-nm irradiation[J]. Laser Phys Lett, 2007, 4(10): 734-739.
- 41 Gebavi H, Taccheo S, Tregoat D, *et al.*. Photobleaching of photodarkening in ytterbium doped aluminosilicate fibers with 633 nm irradiation[J]. Opt Materials Express, 2012, 2(9): 1286-1291.
- 42 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.
- 43 Piccoli R, Gebavi H, Lablonde L, *et al.*. Evidence of photodarkening mitigation in Yb-doped fiber lasers by Low power 405 nm radiation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 26(1): 50-53.
- 44 Piccoli R, Robin T, Brand T, *et al.*. Effective photodarkening suppression in Yb-doped fiber lasers by visible light injection[J]. Opt Express, 2014, 22(7): 7638-7643.
- 45 Gebavi H, Robin T, Mechin D, *et al.*. Photodarkening and photobleaching impact on 1030 nm fiber laser emission[J]. Journal of Optics, 2015, 17(3): 035603.
- 46 Zhao N, Xing Y B, Li J M, *et al.*. 793 nm pump induced photo-bleaching of photodarkened Yb<sup>3+</sup>-doped fibers[J]. Opt Express, 2015, 23(19): 25272-25278.
- 47 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.
- 48 Chen G, Wang Y B, Xie L, *et al.*. Self-bleaching phenomenon observed in the Ce/Yb Co-doped Silica fiber [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2013: CM4I.5.