

# 掺镱光纤光致暗化性能的物理诊断方法

陈进湛<sup>1,2</sup>, 夏汉定<sup>1\*</sup>, 陆荣国<sup>2</sup>, 周晓燕<sup>1</sup>, 石兆华<sup>1</sup>, 张颖娟<sup>1</sup>, 吴之清<sup>1</sup>, 叶鑫<sup>1</sup>, 黄进<sup>1</sup>, 吴卫东<sup>1</sup>, 李波<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 610054

**摘要** 光致暗化效应是高功率掺镱光纤激光器稳定性、可靠性及寿命的重要影响因素。对掺镱光纤光致暗化性能进行精确表征和物理诊断是理解光致暗化产生机理及建立光致暗化消除技术的前提和基础。介绍了表征掺镱光纤光致暗化性能的主要物理参量, 综述了掺镱光纤光致暗化性能的物理诊断方法, 分析了不同方法的优缺点及适用范围, 阐述了影响光致暗化性能的关键因素, 并对未来掺镱光纤光致暗化性能物理诊断研究方向进行了展望。

**关键词** 激光器; 掺镱光纤; 光致暗化性能; 表征参量; 物理诊断方法

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.100002

## Physical Methods for Diagnosing Photodarkening Performance of Yb-Doped Fibers

Chen Jinzhan<sup>1,2</sup>, Xia Handing<sup>1\*</sup>, Lu Rongguo<sup>2</sup>, Zhou Xiaoyan<sup>1</sup>, Shi Zhaohua<sup>1</sup>,  
Zhang Yingjuan<sup>1</sup>, Wu Zhiqing<sup>1</sup>, Ye Xin<sup>1</sup>, Huang Jin<sup>1</sup>, Wu Weidong<sup>1</sup>, Li Bo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang,  
Sichuan 621900, China;

<sup>2</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,  
Chengdu, Sichuan 610054, China

**Abstract** The photodarkening effect is a crucial factor that influences the stability, reliability, and lifetime of the high-power Yb-doped fiber lasers. The accurate physical characterization and diagnosis of the photodarkening performance of the Yb-doped fibers are the premise and basis for understanding the photodarkening mechanisms and for establishing the photodarkening elimination technologies. This study introduces the main physical parameters of the photodarkening performance. Further, the physical diagnosis methods used to assess the photodarkening performance are also reviewed. Additionally, the advantages, disadvantages, and application scopes of these methods are analyzed. The major factors influencing the photodarkening performance are subsequently discussed. Finally, the research development trend of the physical diagnosis methods is briefly discussed with respect to the photodarkening performance of the Yb-doped fibers.

**Key words** lasers; Yb-doped fiber; photodarkening performance; characterization parameters; physical diagnosis methods

**OCIS codes** 140.3615; 140.3425; 140.3510

## 1 引言

高功率光纤激光器和放大器在技术发展和性能提升方面取得了显著进步, 在激光加工、医疗及国防

等领域有广泛应用<sup>[1-3]</sup>。与其他掺杂光纤激光器相比, 掺镱(Yb)光纤激光器不存在激发态吸收、浓度淬灭和多声子跃迁等过程, 凭借其输出功率高、光束质量好和量子转换效率高等优势, 已成为当前国际

收稿日期: 2018-10-19; 修回日期: 2018-12-02; 录用日期: 2018-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(51602296, 61705204, 61705206)、中国工程物理研究院激光聚变研究中心青年人才基金(LFRC-CZ030)

\* E-mail: hdxia2008@sina.com

上高功率激光研究领域的热点之一<sup>[4-5]</sup>。目前,制约高功率掺镱光纤(YDF)激光器发展的一个重要因素是光致暗化(PD)效应<sup>[6]</sup>。PD效应是指光纤激光器在长时间工作过程中出现的输出功率下降、激光阈值增加和性能不稳定等现象<sup>[7]</sup>;其在掺镱光纤中主要表现为:导致纤芯  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂区域在可见光(VIS)波段损耗增加,并延伸到近红外(NIR)区域,使掺镱光纤激光系统输出功率显著降低<sup>[7-8]</sup>。PD效应限制了掺镱光纤激光器输出功率的进一步提高,严重影响了激光器的稳定性、效率及寿命<sup>[9-10]</sup>。因此,深入研究掺镱光纤的PD产生机理及物理诊断方法,探索降低甚至消除PD效应的有效方法,以期实现高功率掺镱光纤激光器的长期稳定工作,一直是国内外研究人员关注的热点方向。

有关PD效应改善的研究已有诸多报道<sup>[9,11-21]</sup>。PD效应抑制方法主要有:1) 光纤设计。合理设计光纤结构,如将包层结构设计成D或P形<sup>[11]</sup>;改进制备工艺,溶胶凝胶(Sol-Gel)法比改进化学汽相沉积(MCVD)法更能抑制PD效应<sup>[9]</sup>;优化光纤材料组分,通过掺杂  $\text{Al}^{[12]}$ 、 $\text{P}^{[13]}$ 、 $\text{Er}^{[14]}$ 、 $\text{Ce}^{[15]}$  等离子,可提高掺镱光纤抗PD的能力。2) 预处理。载  $\text{H}_2$  处理<sup>[16]</sup>和载  $\text{O}_2$  处理<sup>[17]</sup>,前者比后者抑制效果更好。3) 漂白。光漂白(PB),目前能进行PB的抽运光主要有355<sup>[18]</sup>,543<sup>[19]</sup>,793 nm<sup>[20]</sup>等,其中仅355 nm波长的抽运光能完全漂白PD效应,其他波长的抽运光仅可部分漂白;热漂白<sup>[21]</sup>,可完全消除PD损耗,但不同掺镱光纤完全漂白温度不同,且会改变光纤性能。

近年来,国内外学者提出了多种方法对掺镱光纤PD性能进行物理诊断分析。随着研究的不断深入,急需对现有掺镱光纤PD性能物理诊断方法进行梳理总结,综述各种PD性能物理诊断方法的优缺点,为进一步开发抑制PD技术、开展PD性能研究以及统一PD性能物理诊断方法的规范标准提供有益参考。本文对掺镱光纤PD性能物理诊断方法进行了系统梳理,将掺镱光纤PD性能物理诊断方法归纳为两类,分别为基于分布式光纤传感技术的PD直接诊断法和基于抽运激发  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数高反转率技术的PD间接诊断法,并综合分析了不同方法的优缺点及适用范围,为相关研究人员选择合适的物理诊断方法精确表征掺镱光纤PD性能提供参考。

## 2 掺镱光纤PD性能表征参量

1997年,英国南安普顿大学的Paschotta等<sup>[22]</sup>

首次在掺镱石英光纤中发现了PD现象,但当时未对此展开深入研究,也未提出表征不饱和吸收程度大小的方法。直到2005年,芬兰赫尔辛基技术大学的Koponen等<sup>[23-24]</sup>提出了快速表征和诊断PD性能的方法。目前,表征掺镱光纤PD性能的参量主要有:PD致功率衰减、PD损耗谱、特征波长PD损耗和PD速率。

### 2.1 PD致功率衰减

PD效应的关键特征和最重要的影响是随时间逐渐产生损耗。随着PD诱导损耗的逐渐增加,掺镱光纤系统输出功率和斜率效率逐渐降低。因此,可通过长时间监测系统输出功率或根据不同PD状态下斜率效率随时间的变化规律,实现对PD效应的有效分析。通过此方式,可研究PD效应导致掺镱光纤系统输出功率随时间衰减的特性,判定其对系统输出功率、斜率效率和寿命等的影响程度<sup>[18]</sup>。

### 2.2 PD损耗谱

PD效应诱导掺镱光纤产生新的背景损耗,其表现为随时间增长的宽带吸收谱,以紫外光(UV)-VIS波段为中心,并延伸到NIR区域<sup>[1]</sup>。通过测试PD损耗谱,可观测PD现象发展的过程,并研究其基本特性,这有利于理解和分析PD效应对掺镱光纤性能及系统的影响。特别是抽运前后UV和NIR区域的PD损耗谱,常被用于PD效应产生机理的研究<sup>[25]</sup>。

### 2.3 特征波长PD损耗

PD诱导的吸收峰在UV-VIS波段,且VIS与NIR信号光的PD损耗呈线性关系<sup>[23]</sup>,因此多采用VIS区域PD损耗或光纤透过率对掺镱光纤PD性能进行标定。采用与时间相关的拉伸指数函数可实现对测试获得的PD损耗或光纤透过率随时间变化规律的有效拟合。通过拟合获得相关特征参数,可实现对PD效应的有效分析。拉伸指数函数<sup>[1]</sup>表示为

$$\alpha(t) = \alpha_{\text{eq}} \{1 - \exp[-(t/\tau)^\beta]\}, \quad (1)$$

式中: $t$ 为时间; $\alpha(t)$ 为 $t$ 时刻PD诱导的损耗; $\alpha_{\text{eq}}$ 为稳态下的PD损耗; $\beta$ 为拉伸参数( $0 \leq \beta \leq 1$ ); $\tau$ 为每次测量PD损耗的时间常量; $T(t) = 1 - \alpha(t)$ 为 $t$ 时刻光纤的透过率。拉伸指数函数通常采用最小二乘法完成曲线拟合。

### 2.4 PD速率

通常用时间常数的倒数 $\tau^{-1}$ (也称为PD速率)描述PD损耗产生的快慢。实验研究发现,PD速率与 $\text{Yb}^{3+}$ 粒子数反转率( $R$ )遵循某种幂律关系。表明掺

镜光纤中的 PD 效应是多步、多光子的吸收过程<sup>[1]</sup>。  
Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率与 PD 速率的关系表示为<sup>[26]</sup>

$$R^n \propto \tau^{-1} \Rightarrow n \lg R \propto \lg \tau^{-1}, \quad (2)$$

式中:  $n$  为线性拟合的斜率, 也称为指数因子或离子依赖因子, 表示参与该过程 Yb<sup>3+</sup> 的数量。已有众多学者报道了不同程度的 Yb<sup>3+</sup> 依赖性,  $n$  取值范围为 2~7<sup>[27-29]</sup>, 这种差异可归因为拟合程序<sup>[29]</sup>、温度<sup>[30]</sup>和测试条件<sup>[29]</sup>等的不同。

### 3 掺镱光纤 PD 性能物理诊断方法

掺镱光纤 PD 效应产生的快慢和强度与 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率成正比, 根据掺镱光纤中 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率的高低, 掺镱光纤 PD 性能物理诊断方法主要分为两大类, 分别为基于分布式光纤传感技术的 PD 直接诊断法和基于抽运激发 Yb<sup>3+</sup> 粒子数高反转率技术的光致暗化间接诊断法。

#### 3.1 基于分布式光纤传感技术的 PD 直接诊断法

直接诊断法是早期测量掺镱光纤 PD 性能最常用的方法, 通过搭建高功率光纤激光器并监测其直接输出激光功率随时间的衰减情况, 判定掺镱光纤的 PD 性能。

2011 年, 英国南安普顿大学的 Zervas 等<sup>[31]</sup> 采用分布式光纤传感技术测试了铝硅酸盐掺镱光纤

(长度为  $L$ ) 放大器的 PD 性能, 实验测量原理如图 1 (a)、(b) 所示。由图 1(c) 可见, 放大器连续工作 2000 h, 输出功率下降约 20% 后稳定。使用光时域反射仪(OTDR)测量了脉冲光纤放大器在出光之前以及工作 200 h 和 344 h 之后的纵向背景损耗, 从图 1(d) 可见, 区域(I)对应于放大器的输入端, PD 损耗变化不明显; 区域(II) PD 损耗较大, 从 200 h 的 0.2 dB/m 增至 344 h 的 0.3 dB/m, PD 损耗增加的平均速率为 0.0007 dB/(m·h); 区域(III) PD 损耗较小, 仅从 200 h 的 0.11 dB/m 增至 344 h 的 0.15 dB/m, PD 损耗增加平均速率为 0.0003 dB/(m·h)。上述结果表明, 局部损耗和损耗增加的速率取决于 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率, 也表明 PD 诱导的损耗沿光纤长度分布不均匀, 损耗增加的速率也不同; 其中任意位置处(即距离掺镱光纤信号注入端不同  $z$  位置处) OTDR 相对损耗  $I(z)$  与 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率  $R(z)$  关系如下式所示。此外, 通过计算沿放大器长度的平均 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率可知, Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率沿光纤长度先增大后减小, 即 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率沿光纤长度分布不均匀, 结果如图 1(e) 所示。

$$I(z) \propto - \int_0^L R^2(z) dz. \quad (3)$$

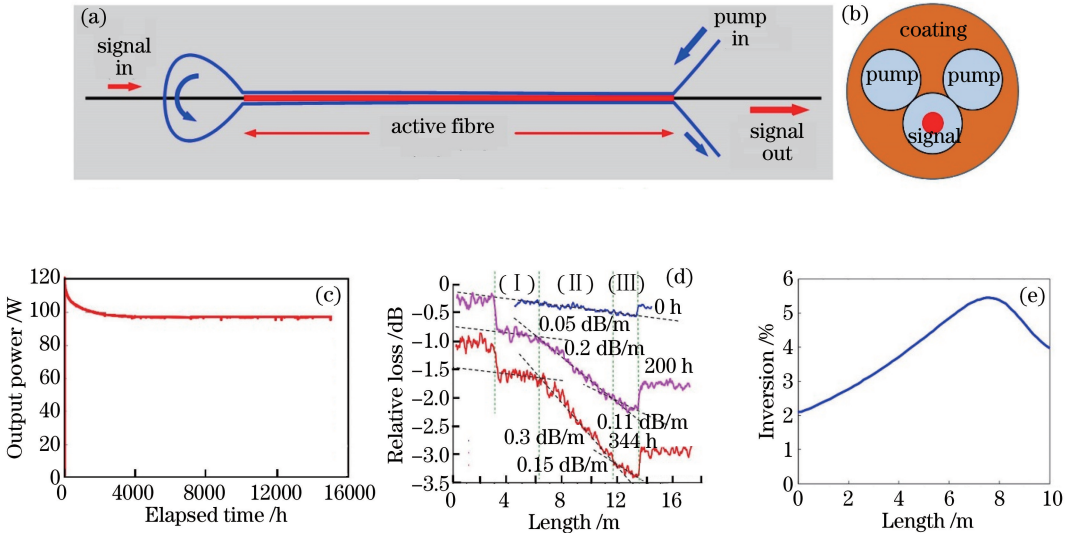


图 1 分布式光纤传感技术测试 PD 的原理及结果<sup>[31]</sup>。(a) 脉冲光纤放大器原理图; (b) 三纤 GTWave 横截面; (c) 输出功率随时间的变化; (d) 脉冲操作下反抽运光纤放大器 PD 诱导的 OTDR 损耗测量; (e) 时间平均 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率

Fig. 1 Principle and results of PD testing method based on distributed optical fiber sensing technique<sup>[31]</sup>. (a) Principle diagram of pulsed fiber amplifier; (b) cross section of three-fiber GTWave; (c) output power versus time; (d) PD-induced OTDR loss measurement for counter-pumped fiber amplifier with pulsed operation; (e) time-averaged Yb<sup>3+</sup> population inversion

直接诊断法操作简单,可直观表示 PD 效应对掺镱光纤系统及性能的影响,适合对掺镱光纤性能进行最终评定。但通常测试时间较长,在连续(CW)激光器中测试时间需要上千小时,即使对于  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率较高的脉冲放大器也需持续数百小时;且很难保证测试过程中设备、器件和环境等因素保持不变,极大地影响了测试精度。直接诊断法难以快速、准确地诊断不同 PD 性能的掺镱光纤,因此不适用于 PD 效应的基础研究分析<sup>[32]</sup>。

### 3.2 基于抽运激发 $\text{Yb}^{3+}$ 粒子数高反转率技术的 PD 间接诊断法

针对直接诊断法测试时间长、环境稳定性难以保证等问题,研究人员提出了基于抽运激发  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数高反转率技术的 PD 间接诊断法,通过强抽运使光纤中  $\text{Yb}^{3+}$  处于粒子数高反转状态,从而加速掺镱光纤 PD 过程,极大缩短测试时间。根据光纤抽运方式不同,基于抽运激发  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数高反转率技术的 PD 间接诊断法主要分为纤芯抽运诱导和包层抽运诱导 PD 间接诊断法。

#### 3.2.1 纤芯抽运诱导 PD

2005 年, Koponen 等<sup>[23]</sup> 提出了一种快速表征和诊断 PD 性能的方法。该方法采用 974 nm 激光二极管(LD)纤芯抽运掺镱光纤诱导 PD 和 633 nm HeNe 激光器作为探测光,测量装置如图 2(a)所示。使用白光光源(WLS)和光谱分析仪(OSA)测量掺镱光纤的透射谱,然后使用 974 nm LD 抽运光纤 30 min 使其暗化后再次测量透射谱,通过对比光纤暗化前后的透射谱,计算不同波长处 PD 诱导的附加损耗,结果如图 2(b)所示;通过测量大量不同的  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂二氧化硅光纤发现,633 nm 和 1040~1070 nm 处 PD 诱导的损耗呈线性关系,即前者约为后者的 70 倍,结果如图 2(c)所示。这表明 PD 损耗谱的形状对于 974 nm 处抽运的各种  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂石英光纤是相似的,从而可以在 VIS 波段以高灵敏度测量和基准 PD,然后估计掺镱光纤在 NIR 区域的性能。2006 年, Koponen 等<sup>[33]</sup> 采用相同的方法对 22 种不同  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂的铝硅酸盐光纤组合物进行了统计研究,获得了更精确的值,即 633 nm 处 PD 诱导的损耗是 1040~1070 nm 处的 70.9 倍。

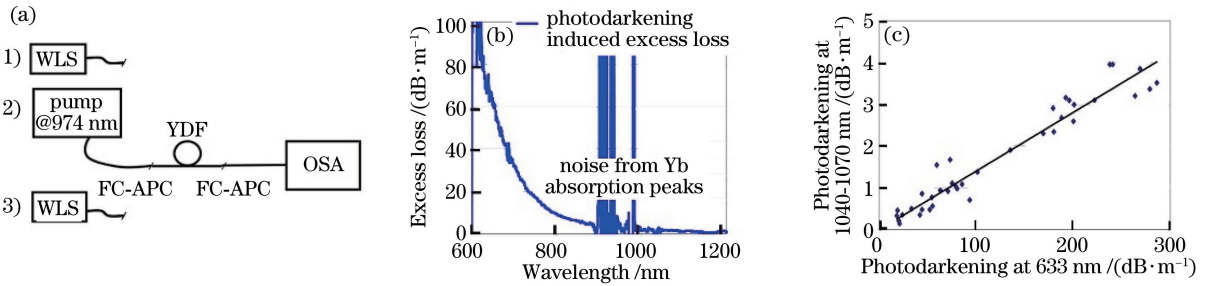


图 2 纤芯抽运诱导 PD 间接诊断法实验装置及测量结果<sup>[23]</sup>。(a) PD 表征的测量方法;(b) PD 诱导的损耗谱;(c) 633 nm 与信号波长 1040~1070 nm 处附加损耗的关系

Fig. 2 Experimental setup and measurement results of indirect PD diagnosis induced by fiber core pump<sup>[23]</sup>.

(a) Measurement methods for PD characterization; (b) PD-induced loss spectrum; (c) relationship between excess losses at 633 nm and at signal wavelength of 1040-1070 nm

2010 年,英国南安普顿大学的 Yoo 等<sup>[34]</sup> 采用纤芯抽运诱导 PD 间接诊断法在 977 nm 处抽运  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂的铝硅酸盐光纤,并同时在 977 nm 抽运光和 633 nm 探测光下监测 PD 的损耗,发现 PD 在高温下加速,且稳态 PD 损耗与温度成反比。2011 年,意大利都灵理工大学的 Olivero 等<sup>[35]</sup> 对来自同一制造商和类型的掺镱光纤进行了 8 次测试,通过测量其透过率发现,透过率的衰减可重复测量,而每次测量的初始值略有差异,这可能是由于光纤每次熔接略有不同,导致了耦合抽运功率不同。2014 年,新加坡制造技术研究院的 Li 等<sup>[36]</sup> 通过同时测量掺镱光纤在 977 nm 抽运光和 633 nm 探测光的

透过率发现,在抽运波长 977 nm 处,抽运功率减小的值大于 PD 诱导的附加损耗值,即 PD 不仅产生了附加损耗,还导致了抽运功率损失。

在纤芯抽运诱导 PD 间接诊断法中,决定掺镱光纤中  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率的关键参数是抽运波长<sup>[28]</sup>。其优点及适用范围如下:1) 测试所用掺镱光纤长度较短,减少了非线性效应的产生<sup>[37]</sup>,且降低了相关成本;2) 测试所用掺镱光纤纤芯尺寸较小(约  $10 \mu\text{m}$ <sup>[26]</sup>),有效地避免了放大自发辐射(ASE)、 $\text{Yb}^{3+}$  激射和重吸收效应,也确保了沿光纤纵向均匀分布的抽运强度和  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率<sup>[38]</sup>;3) 易在掺镱光纤中实现饱和、均匀的  $\text{Yb}^{3+}$

粒子数反转率,加速 PD 过程并减少测试时间; 4) 由于抽运波长易稳定,因此在饱和  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转状态下工作时,该方法受抽运功率和光纤长度的影响较小<sup>[28]</sup>; 5) 可在较低抽运功率(数百毫瓦范围)水平下实现较高的  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率,对安全基础设施的要求较小<sup>[35]</sup>; 6) 可重复性好,适用于 PD 效应的标准测试研究<sup>[28]</sup>。

纤芯抽运诱导 PD 间接诊断法的缺点如下:

1) 随着纤芯尺寸的增加 ( $> 14 \mu\text{m}$ <sup>[26]</sup> 或  $> 20 \mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>),采用该方法难以实现饱和的  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率,因此不太适用于大尺寸纤芯直径掺镱光纤的研究; 2) 由于测试所用掺镱光纤纤芯尺寸较小,难以确保抽运功率有效地耦合进纤芯中,导致抽运光的吸收效率低。

### 3.2.2 包层抽运诱导 PD

针对上述纤芯抽运诱导 PD 间接诊断法存在的技术难题,为了在更大纤芯尺寸掺镱光纤中实现饱和、均匀的  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率,研究人员采用了包层抽运诱导 PD 间接诊断法。

2007 年,德国光子技术研究所的 Jestchke 等<sup>[27]</sup>采用包层抽运诱导 PD 间接诊断法研究了抽运功率对掺镱光纤 PD 效应的影响,测试装置如图 3

(a)所示,其中 SCF 为单包层光纤,MMF 为多模光纤,DM 为二向色镜,DVM 为数字电压表。使用相同抽运功率 3.7 W 的 915 nm LD 抽运暗化前后的掺镱光纤,通过测量随时间变化的纤芯附加损耗可知,纤芯附加损耗的稳态值约为 530 dB/m,证明存在稳态 PD 损耗,同时也说明,有限的  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率不会导致掺镱光纤 PD 损耗无限增加,结果如图 3(b)所示。使用不同抽运功率的 915 nm LD 抽运掺镱光纤,同时使用 633 nm 探测光测量其透过率,当其几乎达到稳定传输后,再施加 13.2 W 的抽运功率使光纤强烈暗化,光纤的透过率急剧下降且均低于 0.02。因此,在测量过程中可以低估实际的纤芯附加损耗,结果如图 3(c)所示。图 3(d)、(e)显示了纤芯附加损耗随抽运功率和时间的变化情况,由图 3(d)可知,突然增强抽运功率会导致纤芯附加损耗激增;由图 3(e)可知,当抽运功率逐步降低时,纤芯附加损耗也逐步降低。这表明在任意时刻关闭抽运功率,可实现该状态下 PD 损耗的“冻结”,且可通过类似的 PD 损耗变化过程重复 PD 与 PB 的循环。

2007 年,法国波尔多大学的 Manek-Hönniger 等<sup>[18]</sup>研究了  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂双包层二氧化硅大模场面积

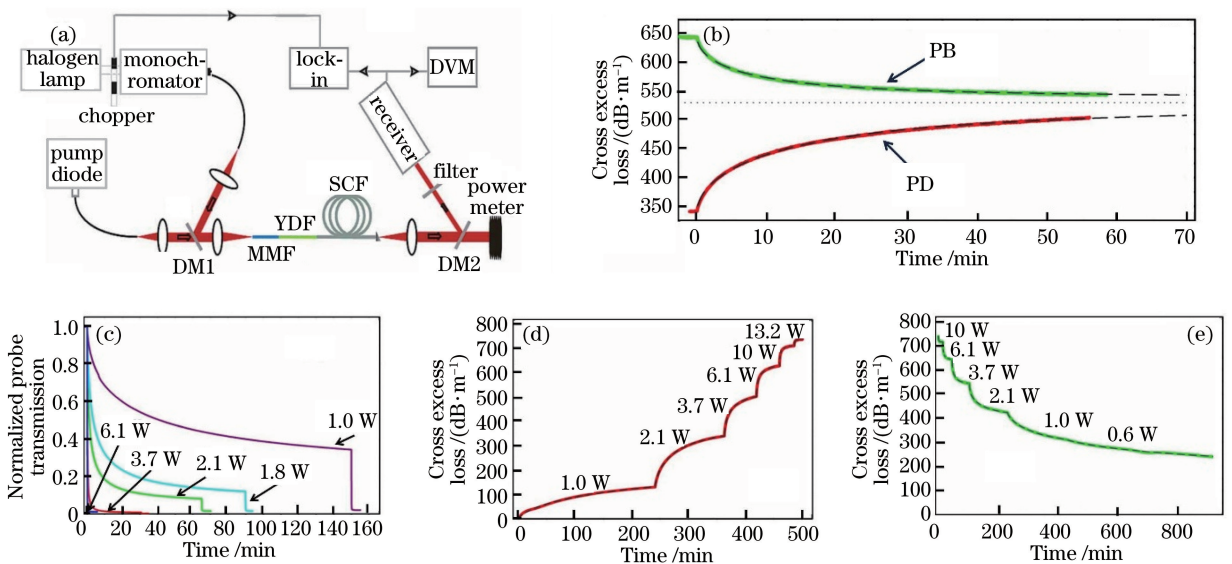


图 3 包层抽运诱导 PD 间接诊断法实验装置及测量结果<sup>[27]</sup>。(a)包层抽运方式光暗化测试装置;(b)用较高的抽运功率暗化后在相同抽运功率下光纤样品的 PD 和 PB;(c)不同初始抽运功率下测量光纤样品 ( $L = 5 \text{ cm}$ ) 的透过率; (d)(e)光纤样品 ( $L = 1 \text{ cm}$ ) 纤芯附加损耗随时间的变化

Fig. 3 Experimental setup and measurement results of indirect PD diagnosis induced by cladding pump<sup>[27]</sup>. (a) Test facility of photodarkening by cladding pump; (b) PD and PB of fiber sample under same pump power after darkening with high pump power; (c) transmission measured at fiber sample ( $L = 5 \text{ cm}$ ) with different initial pump powers; (d)(e) core excess loss of fiber sample ( $L = 1 \text{ cm}$ ) versus time

(LMA) 光纤 PD 效应的时 间特性, 通过测量不同 PD 状态下光纤的吸收谱发现, 随着暗化时间的增加, VIS 波段的吸收急剧增加, 并延伸到 NIR 区域。该课题组认为, 吸收谱的变化可能是色心形成的标志。2008 年, 芬兰赫尔辛基技术大学的 Söderlund 等<sup>[39]</sup> 对比研究了两种类似的 LMA 掺镱光纤 PD 性能。通过测量不同波长处的 PD 损耗谱发现, 较高的 Yb<sup>3+</sup> 吸收具有减少应用长度的优势; 通过测量 700 nm 处 PD 诱导的附加损耗发现, PD 损耗在长时间后达到稳态, 其中大部分损耗在最初的几个小时内累积。

上述包层抽运诱导 PD 间接诊断法采用的几乎都是空间耦合结构方案, 存在耦合效率低、重复性差、结构稳定性差和难以温控等缺点。为了确保系统的稳定运行, 器件之间的连接方式最好是光纤熔接<sup>[4]</sup>, 这种全纤化结构具有耦合效率高、重复性好和稳定性高等优点。2007 年, Koponen 等<sup>[26]</sup> 测量掺镱光纤 PD 速率发现, PD 速率仅由 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率或处于激发态 Yb<sup>3+</sup> 粒子数密度  $N(Yb^{3+})$  决定, 并非取决于 Yb<sup>3+</sup> 质量分数或抽运功率, 且与  $[N(Yb^{3+})]^7$  成正比。2009 年, 芬兰阿尔托大学的 Ponsoda 等<sup>[40]</sup> 提出了 LMA 掺镱光纤 PD 和热漂白的组合测量, 通过热处理的方法将暗化的光纤恢复到初始状态, 实现了在相同样品光纤上进行多次测量的目的。在进行 PD 速率与热漂白循环测量的过

程中, PD 性能 的表征参量会发生变化, 这表明重复测量可能会影响测量条件。

国内采用基于抽运激发 Yb<sup>3+</sup> 粒子数高反转率技术的 PD 间接诊断法研究掺镱光纤 PD 效应起步较晚。2014 年, 华中科技大学的李海清等<sup>[41]</sup> 采用多模 915 nm LD 抽运源对具有相同 Yb<sup>3+</sup> 质量分数的双包层(DC)掺镱光纤和抗 PD 光纤进行包层抽运, 通过测量 633 nm 和 702 nm 波长处的纤芯附加损耗发现, 抗 PD 光纤的性能显著提升。2015 年, 华中科技大学的 Zhao 等<sup>[20]</sup> 研究了 793 nm 抽运光漂白的效果, 实验测量装置如图 4(a) 所示(其中 SMF 为单模光纤), 当交替使用 915 nm LD 或 793 nm LD 抽运 DC 掺镱光纤时, PD 损耗随之增加或减少, 结果如图 4(b) 所示, 这表明 793 nm 抽运光可重复漂白 PD 损耗。此外, 还研究了漂白速率与抽运功率的关系, 首先使用 915 nm LD 抽运掺镱光纤, 再分别使用 3, 5, 7, 8, 9 W 的 793 nm LD 抽运暗化后的光纤, 从图 4(c) 可以看到, 使用更高的抽运功率可加速 PB 进程, 并在更短时间内达到稳态。通过测量 810 nm 处漂白损耗和 793 nm LD 抽运功率的关系可知, 抽运功率低于 7 W 时, 抽运功率与漂白损耗呈线性关系, 而使用更高的抽运功率时漂白损耗不再线性增加, 结果如图 4(d) 所示, 即 793 nm 抽运光不能完全漂白暗化的光纤。

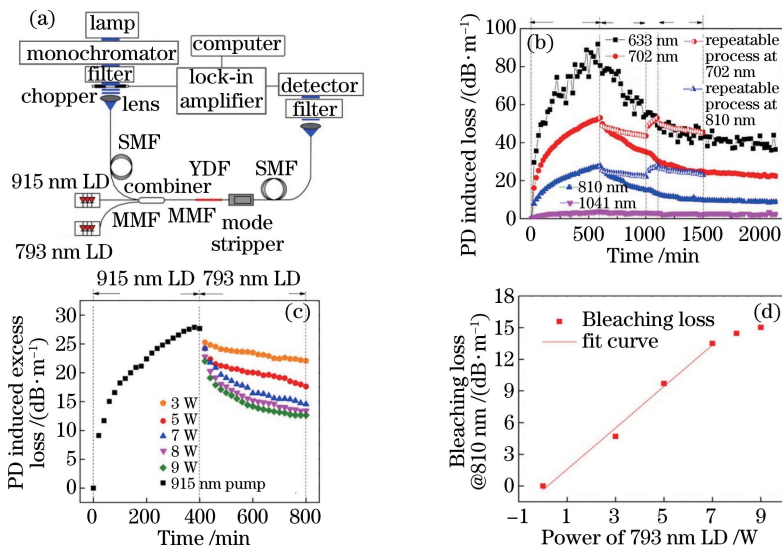


图 4 793 nm 抽运下光漂白实验装置及测量结果<sup>[20]</sup>。(a) 实验装置示意图; (b) 915 nm 抽运下的 PD 和 793 nm 抽运下的 PB 随时间的变化; (c) PD 和不同功率 793 nm 抽运下的 PB 随时间的变化; (d) 793 nm LD 抽运功率与漂白损耗的关系

Fig. 4 Experimental setup and measurement results of PB under 793 nm pump<sup>[20]</sup>. (a) Schematic of experimental setup; (b) PD at 915 nm pump and PB at 793 nm pump versus time; (c) PD and PB under different 793 nm pump powers versus time; (d) bleaching loss versus 793 nm LD pump power

在包层抽运诱导 PD 间接诊断法中,抽运波长、抽运功率和掺镱光纤长度等关键参数都对  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率有显著影响<sup>[28]</sup>。其优点及适用范围如下:1) 可通过改变抽运波长和耦合的抽运功率来控制 and 调节  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率,且与纤芯直径无关<sup>[23]</sup>,因此可用于证明 PD 速率和  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率或处于激发态  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数密度的关系<sup>[28]</sup>;2) 相对于纤芯抽运诱导 PD 间接诊断法,该方法稳定,更易实现<sup>[35]</sup>,且可确保均匀的  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率;3) 更适用于掺镱 DC 光纤和 LMA 光纤 PD 效应的深入研究,已用于研究光或热扰动对 PD 机理的影响<sup>[21,29-30]</sup>。

包层抽运诱导 PD 间接诊断法的缺点包括:1) 对于掺镱 DC 光纤,由于内包层的直径较大,该方法需较高抽运功率以在纤芯中获得饱和的  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率<sup>[35]</sup>;2) 包层抽运方式是通过内包层将抽运光耦合进纤芯中,由于纤芯的吸收系数较小(2~8 dB/m<sup>[35]</sup>),需较长的光纤以获得较高的抽运功率,且容易产生 ASE,增加相关成本。

## 4 掺镱光纤 PD 的关键影响因素

掺镱光纤 PD 效应与多种因素有关,产生过程比较复杂。虽然目前掺镱光纤 PD 性能物理诊断方法还未实现标准化,但研究人员对其影响因素展开了深入研究,其中关键影响因素包括: $\text{Yb}^{3+}$  质量分数、共掺离子、抽运波长及功率和温度等。

### 4.1 $\text{Yb}^{3+}$ 质量分数对 PD 的影响

为提高掺镱光纤激光器的输出功率,必须提高掺镱光纤  $\text{Yb}^{3+}$  质量分数,但会出现  $\text{Yb}^{3+}$  团簇现象,这极大地诱导了掺镱光纤 PD 效应的产生。2007 年,Jetschke 等<sup>[27]</sup>指出了掺镱光纤 PD 现象的产生与  $\text{Yb}^{3+}$  团簇现象的出现存在密切关联。2011 年,Gebavi 等<sup>[42]</sup>认为,掺镱光纤中  $\text{Yb}^{3+}$  质量分数越高, $\text{Yb}^{3+}$  团簇现象出现的可能性越大,离子间能量的传递效率越高,越容易产生 PD 现象。同年,Taccheo 等<sup>[43]</sup>通过实验证明了掺镱光纤稳态 PD 损耗  $\alpha_{\text{eq}}$  与  $\text{Yb}^{3+}$  质量分数的平方成正比,结果如图 5 所示,这与文献<sup>[44]</sup>中的线性结果存在差异。由于该图可理解为  $\alpha_{\text{eq}}$  与  $N(\text{Yb}^{3+})$  的关系,该课题组把这种差异归因为  $\text{Yb}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  距离的影响。

### 4.2 共掺离子对 PD 的影响

研究发现,在掺镱光纤中共掺其他离子可降低 PD 效应,目前报道的主要有  $\text{Al}^{[12]}$ 、 $\text{P}^{[13]}$ 、 $\text{Er}^{[14]}$ 、 $\text{Tm}^{[45]}$ 、 $\text{Ce}^{[15]}$  等离子。2005 年,日本 Fujikura 有限

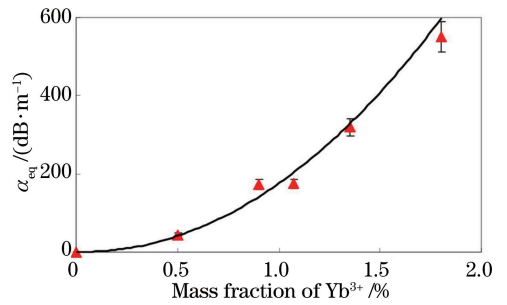


图 5 稳态 PD 损耗与  $\text{Yb}^{3+}$  质量分数的关系<sup>[43]</sup>

(实黑线为平方拟合,指数因子为 2.08)

Fig. 5 Steady PD loss versus mass fraction of  $\text{Yb}^{3+}$  <sup>[43]</sup> (solid black line indicating square fitting with exponent of 2.08)

公司的 Kitabayashi 等<sup>[12]</sup>通过实验发现,掺镱光纤中掺杂高质量分数的 Al 离子可有效降低 PD 效应。2008 年,Jetschke 等<sup>[13]</sup>发现,改变掺镱光纤中 P 和 Al 的质量分数比例可改变 PD 损耗;且当 Al 和 P 的质量分数比例为 1 : 1 时,PD 损耗最低。2010 年,Fox 等<sup>[14]</sup>实验研究发现,Er/Yb 共掺光纤具有非常强的抗 PD 特性。2013 年,Jetschke 等<sup>[45]</sup>研究 Tm 杂质对 Yb/P 共掺光纤 PD 现象的影响发现,无 Tm 杂质时,Yb/P 共掺光纤无明显 PD 现象;有 Tm 杂质时,PD 现象明显。2016 年,Zhao 等<sup>[15]</sup>研究了铈(Ce)离子对 Yb/Al 共掺光纤 PD 和 PB 过程的影响,从图 6(a)可以看到:Yb/Al/Ce 共掺光纤在 702 nm 处 PD 诱导的附加损耗比 Yb/Al 共掺光纤低,抽运 400 min 后,Yb/Al/Ce 共掺光纤的 PD 损耗几乎达到稳态,而 Yb/Al 共掺光纤仍在增加。因此认为,Ce 共掺可以提高掺镱光纤抗 PD 能力。从图 6(b)可以看到,与 Yb/Al 共掺光纤相比,在 Yb/Al/Ce 共掺光纤中,更多 PD 损耗在同一时间内被漂白,抽运 180 min 后,Yb/Al 共掺光纤的 PD 损耗几乎达到稳态,而 Yb/Al/Ce 共掺光纤仍明显漂白,因此认为,Ce 共掺可以提高掺镱光纤 PB 效率。此外,在进行附加损耗谱测试实验时观察到了自漂白现象:停止抽运 16 h 后,Yb/Al/Ce 共掺光纤表现出的附加损耗降低,相对于停止抽运时 PD 诱导的附加损耗,整体恢复约 10%;而相同条件下,Yb/Al 共掺光纤的附加损耗略有增加,结果如图 6(c)所示。2017 年,Leich 等<sup>[46]</sup>验证了 Ce/Yb 共掺是一种预防 PD 现象的有效方法,但可能不会显著降低有源光纤的热负荷。

### 4.3 抽运波长及功率对 PD 的影响

$\text{Yb}^{3+}$  对不同波长的吸收系数不同, $\text{Yb}^{3+}$  受激反转率存在差别,PD 强度也不同<sup>[47]</sup>;不同抽运功率

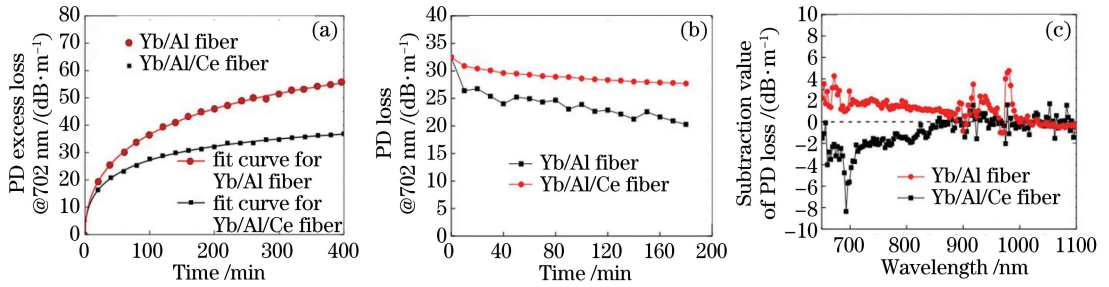


图6 铈离子掺杂对 Yb/Al 共掺光纤 PD 和 PB 过程的影响<sup>[15]</sup>。(a) 702 nm 处 PD 诱导的附加损耗随时间的变化；

(b) 702 nm 处 793 nm LD 抽运下的 PB 随时间变化；(c) 抽运 16 h 后 PD 诱导的附加损耗值随波长的变化

Fig. 6 Effect of Ce-doping on PD and PB processes of Yb/Al co-doped fibers<sup>[15]</sup>. (a) PD-induced excess loss measured at 702 nm versus time; (b) PB at 702 nm under 793 nm LD pump versus time; (c) PD-induced excess loss value after 16 hours of pumping versus time

下, Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率不同<sup>[28]</sup>, PD 强度也不同。因此,为了可靠地确定掺镱光纤中的 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率,必须明确抽运波长和耦合的抽运功率。

目前报道的能进行 PB 的抽运光波长主要有 355<sup>[18]</sup>, 405<sup>[48]</sup>, 543<sup>[19]</sup>, 550<sup>[49]</sup>, 633<sup>[50]</sup>, 793 nm<sup>[20]</sup> 等,其中 355 nm 波长的抽运光能完全漂白 PD 现象,其他波长的抽运光只可部分漂白 PD 现象。2007 年,Manek-Hönniger 等<sup>[18]</sup>采用 976 nm LD 抽运 Yb<sup>3+</sup> 掺杂的石英 LMA 光纤使其暗化后,再对其施加 355 nm 抽运光,发现暗化光纤的吸收谱可恢复到初始状态;此外,通过测量使用相同光纤的 CW 激光器的输出特性发现,其完全恢复到原来的水平,即 355 nm UV 实现了对暗化光纤的完全漂白,因此可认为,PD 和 PB 是可逆过程。2007 年,Chávez 等<sup>[19]</sup>报道了 543 nm 抽运光辐照对 977 nm 诱导 Yb<sup>3+</sup> 掺杂二氧化硅光纤暗化的影响,发现 405 nm 抽运光可部分漂白 PD 现象,且认为 PD 和 PB 的转换发生了 Yb<sup>3+</sup> ↔ Yb<sup>2+</sup> 过程。2014 年, Piccoli 等<sup>[48]</sup>研究 405 nm 抽运光辐照对掺镱光纤激光器产生 PD 的影响时,发现了 405 nm 抽运光辐照导致的显著漂白效果,但没有完全恢复,该课题组认为受激离子对 405 nm 抽运光的强吸收可能是漂白性能的限制因素。2015 年,Zhao 等<sup>[20]</sup>发现 793 nm 波长抽运光可部分漂白由 915 nm LD 抽运掺镱光纤诱导的 PD 损耗,结果如图 4(b)、(c)、(d)所示,而同时采用 915 nm 和 793 nm LD 抽运,漂白效果更好。

一般而言,抽运功率越高, Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率越高, PD 强度也越深。2005 年, Koponen 等<sup>[23]</sup>首次测量了 PD 速率,发现 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率与 PD 速率成正比;而恒定 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转状态下, PD

与抽运功率无关。同年, Kitabayashi 等<sup>[12]</sup>首次发现, PD 诱导的附加损耗与 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率呈二次方关系。由此认为, PD 过程涉及两个抽运 Yb<sup>3+</sup>。2006 年, Koponen 等<sup>[33]</sup>发现,当掺镱光纤处于较高 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转状态时,其 PD 速率将大大加快。2007 年,该课题组通过测量不同 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转状态下的 PD 速率,发现 PD 速率的主要控制参数是 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率<sup>[26]</sup>。同年, Jestchke 等<sup>[27]</sup>采用 915 nm LD 对暗化的掺镱光纤进行包层抽运的过程中,首次观察到抽运功率本身对 PD 损耗的部分漂白。2009 年,该课题组测量了不同 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转状态下掺镱光纤的 PD 损耗,发现具有较高 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率( $R=0.67$ )的 PD 损耗在 25 min 内达到稳态,具有较低粒子数反转率的 PD 损耗则需要更长的时间<sup>[44]</sup>,结果如图 7(a)所示。还发现较低 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率的 PD 损耗曲线可通过最小二乘法调整比例,以与较高粒子数反转率的 PD 损耗曲线重合,进而由  $\alpha_2(t) = (\alpha_{eq2}/\alpha_{eq1}) \alpha_1[(\tau_1/\tau_2)t]$  确定比例因子  $\tau_1/\tau_2$  和  $\alpha_{eq2}/\alpha_{eq1}$ ,再由  $\alpha_{eq}(R=0.67) = \alpha_{eq2}$  和  $\tau_2$  确定特征 PD( $R=0.31$ )的时间常数  $\tau_1$  和稳态损耗  $\alpha_{eq1}$ ,结果如图 7(b)所示;证明了不同 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率 PD 损耗曲线的自相似性。此外,还研究了 PD 速率  $\tau^{-1}$  和稳态 PD 损耗  $\alpha_{eq}$  与 Yb<sup>3+</sup> 粒子数反转率  $R$  的关系,从图 7(c)和 (d)中可知,通过  $R$  易获得  $\tau^{-1}$  和  $\alpha_{eq}$ ,进而实现对 PD 性能的快速分析。

#### 4.4 温度对 PD 的影响

温度在 PD 过程中扮演着重要角色,不仅温度的改变会影响 PD, PD 也同样会导致温度的改变。2009 年, Leich 等<sup>[51-52]</sup>发现在一定温度范围内,通过加热掺镱光纤可加速 PD,也可使已暗化的光纤暗化



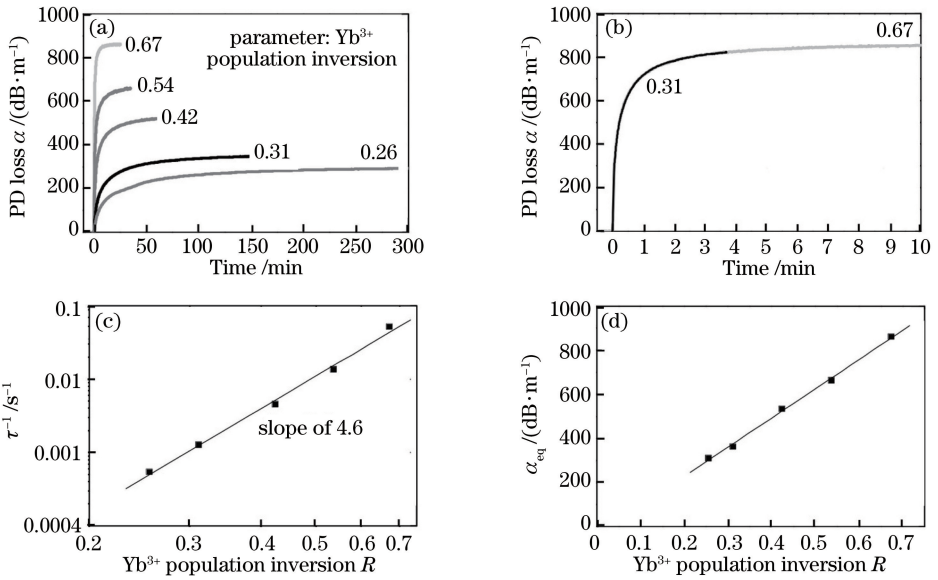


图 7  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率对掺镱光纤 PD 性能的影响<sup>[44]</sup>。(a)具有不同  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率的光纤样品中测量的 PD 损耗曲线；(b) PD 损耗曲线的自相似性；(c)  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率与 PD 速率的关系；(d)  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率与稳态 PD 损耗的关系

Fig. 7 Effect of  $\text{Yb}^{3+}$  inversion on PD performances of Yb-doped fiber<sup>[44]</sup>. (a) PD loss curves measured at fiber samples with different  $\text{Yb}^{3+}$  population inversions; (b) self-similarity of PD loss curves; (c) PD rate versus  $\text{Yb}^{3+}$  population inversion; (d) steady PD loss versus  $\text{Yb}^{3+}$  population inversion

强度下降。同年，Söderlund 等<sup>[53]</sup>发现加热掺镱光纤展宽了 PD 的吸收峰，因此在改变温度的情况下表征 PD 性能需考虑这一点。2010 年，Ponsoda 等<sup>[54]</sup>发现 PD 会导致掺镱光纤温度的升高，且光纤温度变化与 PD 呈线性关系，并认为温度的升高是由于 PD 导致抽运功率损失引起的。2011 年，Leich 等<sup>[55]</sup>对比研究了掺镱光纤在 77~773 K 温区内 7 个不同温度下的 PD 现象，发现较低温度 (77 K 和

296 K)下 PD 损耗的变化遵循拉伸指数函数；而较高温度 (373~773 K)下的 PD 损耗先达到最大值，再逐渐减小直至饱和，这是由于所有前驱体和色心都转变为非吸收中间状态，再部分或全部转化为前驱体，结果如图 8(a)所示；PD 速率随温度增加几乎呈指数加速，而最大 PD 损耗显著降低，结果如图 8(b)所示，这表明热效应增强了载流子迁移率，增加了不同前驱体与缺陷之间相互作用的概率。

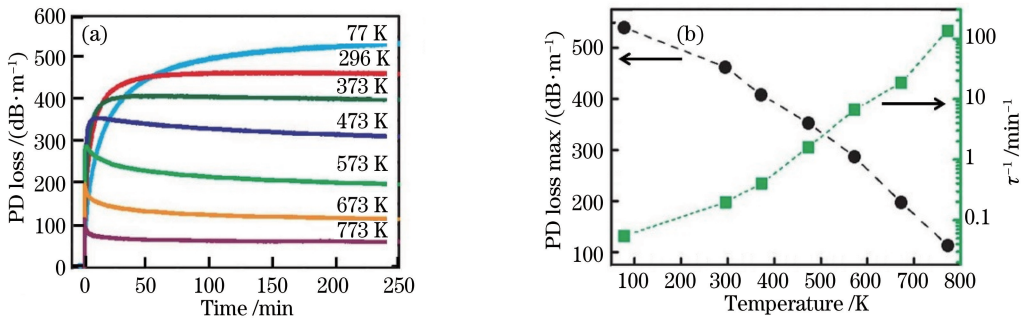


图 8 温度对掺镱光纤 PD 性能的影响<sup>[55]</sup>。(a)抽运期间不同温度下 PD 损耗随时间变化；(b)最大 PD 损耗和 PD 速率与温度的关系

Fig. 8 Effect of temperature on PD performances of Yb-doped fiber<sup>[55]</sup>. (a) PD losses under different temperatures during pump versus time; (b) maximum PD loss and PD rate versus temperature

## 5 结束语

高功率掺镱光纤激光器在长时间工作过程中会产生 PD 效应,严重影响了输出功率的长期稳定性,PD 效应已经成为限制掺镱光纤激光器输出功率及稳定性进一步提升的重要因素。综述了国内外掺镱光纤 PD 性能物理诊断方法的研究现状,将掺镱光纤 PD 性能物理诊断方法主要分为两大类:1) 基于分布式光纤传感技术的 PD 直接诊断法,由于  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率较低,直接诊断法的测试时间较长,不利于 PD 性能的快速诊断;2) 基于抽运激发  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数高反转率技术的 PD 间接诊断法,其中,纤芯抽运诱导 PD 间接诊断法只适用于较小纤芯尺寸的掺镱光纤,包层抽运诱导 PD 间接诊断法虽然克服了纤芯抽运诱导 PD 间接诊断法的限制,但需要较高功率的抽运光诱导 PD,才能实现均匀、饱和的  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率。因此在实际应用中,应根据掺镱光纤类型及实验条件选择合适的 PD 性能物理诊断方法。

考虑到物理诊断方法在 PD 性能研究方面的关键作用,未来的研究方向可能会聚焦在以下几点:1) 建立直接诊断法和间接诊断法的关联关系。PD 直接诊断法测试时间长,难以实现对 PD 性能的快速和准确诊断,但操作简单、现象直观;间接诊断法可实现对 PD 性能的快速诊断。但是,仅采用间接诊断法对掺镱光纤 PD 性能进行最终评定的方案是有待商榷的。因此,在未来工作中应深入研究直接诊断法和间接诊断法的关联关系,采用高效的间接诊断法实现对掺镱光纤 PD 性能的精确诊断和分析,提升 PD 性能研究工作的效率和质量。2) 统一 PD 性能物理诊断方法的规范标准。掺镱光纤 PD 性能的物理诊断实验中,抽运功率、抽运波长、激光辐照时间和光纤长度等实验因素的不同对 PD 性能物理参量的测试结果有较大影响<sup>[12]</sup>,例如 2.4 节(2)式中 PD 速率与  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数反转率的关系,采用不同方法在不同实验条件下测得指数因子  $n$  不同(2~7)<sup>[27-29]</sup>,且没有达成共识。因此,建立物理诊断方法的实验标准规范,提出物理诊断系统的重复性和稳定性的指标规范,对未来掺镱光纤 PD 性能的研究具有重要意义。3) 建立 PD 性能大数据库。目前已报道的掺镱光纤样品数量有限,相应地可重复、可比较和可推算的 PD 性能实验结果较少,不足以支撑抗暗化掺镱光纤材料组分及掺杂浓度设计的大数据分析。因此,有必要建立掺镱光纤 PD 性能

的大数据库,为未来基于大数据的人工智能学习,找出具有抗暗化性能的特征参量,预测候选高性能抗暗化掺镱光纤的材料组分提供有力支撑。

## 参 考 文 献

- [1] Ye C G, Petit L, Koponen J J, *et al.* Short-term and long-term stability in ytterbium-doped high-power fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 188-199.
- [2] Zheng Y, Li P, Zhu Z D, *et al.* Progress in high-power narrow-linewidth fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 080002. 郑也, 李磐, 朱占达, 等. 高功率窄线宽光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 080002.
- [3] Wang Y B, Li J Y. Status and development tendency of high power ytterbium doped fibers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201009. 王一礴, 李进延. 高功率掺镱光纤的现状与发展趋势[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201009.
- [4] Li P X, Zhang Y. Review of 980 nm Yb-doped fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070004. 李平雪, 张月. 980 nm 掺镱光纤激光器综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070004.
- [5] Chen Y S, Liao L, Li J Y. Research progress on mode instability mechanism and suppression methods for fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 080001. 陈益沙, 廖雷, 李进延. 光纤激光器模式不稳定机理及抑制方法研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 080001.
- [6] You J, Yu H L, Wang X L, *et al.* Advance in study on photo-darkening 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.
- [7] Ponsoda J J M I. Analysis of photodarkening effects in ytterbium-doped laser fibers [D]. Espoo: Aalto University, 2013: 27-28.
- [8] Liu C P. Investigations of photo-darkening suppression methods in ytterbium-doped fibers [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017: 5-6. 刘超平. 掺镱光纤光子暗化抑制方法研究[D]. 武

- 汉: 华中科技大学, 2017: 5-6.
- [9] Xie F H, Yu C L, Feng S Y, *et al.* Research progress on photodarkening of Yb-doped fiber [J]. *Material Sciences*, 2017, 7(6): 567-575.  
谢封侯, 于春雷, 冯素雅, 等. 掺镱光纤光暗化研究进展[J]. *材料科学*, 2017, 7(6): 567-575.
- [10] Liu C P, Liao L, Li J Y. Research progress on photo-darkening of Yb-doped fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 070002.  
刘超平, 廖雷, 李进延. 掺镱光纤激光器光子暗化现象的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(7): 070002.
- [11] Paul M C, Kir'Yanov A V, Barmenkov Y O, *et al.* Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped yttrium-alumino-silicate nano-particles based LMA optical fibers of high-power fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(13): 2062-2068.
- [12] Kilabayashi 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] // 2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 5-10, 2006, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE, 2006: 8968411.
- [13] Jetschke S, Unger S, Schwuchow A, *et al.* Efficient Yb laser fibers with low photodarkening by optimization of the core composition [J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15540-15545.
- [14] Fox B P, Simmons-Potter K, Thomes W J, *et al.* Gamma-radiation-induced photodarkening in unpumped optical fibers doped with rare-earth constituents [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, 57(3): 1618-1625.
- [15] Zhao N, Wang Y B, Li J M, *et al.* Investigation of cerium influence on photo-darkening and photobleaching in Yb-doped fibers [J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(2): 75.
- [16] 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] // 2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE, 2006: 10363283.
- [17] Yoo S, Basu C, Boyland A J, *et al.* Photodarkening in Yb-doped aluminosilicate fibers induced by 488 nm irradiation [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(12): 1626-628.
- [18] Manek-Hönninger I, Boulet J, Guillen F, *et al.* Photodarkening and photobleaching of an ytterbium-doped silica double-clad LMA fiber [J]. *Optics Letters*, 2007, 15(4): 1606-1611.
- [19] Chávez A D G, 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 Physics Letters*, 2007, 4(10): 734-739.
- [20] 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]. *Optics Letters*, 2015, 23(19): 25272-25278.
- [21] Söderlund M J, Ponsoda J J M I, Koplów J P, *et al.* Thermal bleaching of photodarkening-induced loss in ytterbium-doped fibers [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(17): 2637-2639.
- [22] Paschotta R, Nilsson J, Barber P R, *et al.* Lifetime quenching in Yb-doped fibres [J]. *Optics Communications*, 1997, 136(5/6): 375-378.
- [23] Koponen J J, Söderlund M J, Tammela S K T, *et al.* Photodarkening in ytterbium-doped silica fibers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5990: 599008.
- [24] Koponen J. Measuring photodarkening from Yb-doped fibers [D]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2008: 27-28.
- [25] Luo R F, Yu T R. Study on photo-darkening characteristics of Yb-doped fiber [J]. *Tianjin Science & Technology*, 2017, 44(12): 38-41.  
罗瑞芳, 于陶然. 掺镱光纤光子暗化特性研究 [J]. *天津科技*, 2017, 44(12): 38-41.
- [26] Koponen J, Söderlund M, Hoffman H, *et al.* Photodarkening measurements in large-mode-area fibers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6453: 64531E.
- [27] Jetschke S, Unger S, Röpke U, *et al.* Photodarkening in Yb-doped fibers: Experimental evidence of equilibrium states depending on the pump power [J]. *Optics Letters*, 2007, 15(22): 14838-14843.
- [28] Koponen J, Laurila M, Hotoleanu M. Inversion behavior in core- and cladding-pumped Yb-doped fiber photodarkening measurements [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(25): 4522-4528.
- [29] Jetschke S, Röpke U. Power-law dependence of the photodarkening rate constant on the inversion in Yb-doped fibers [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(1): 109-111.
- [30] Ponsoda J J M I, Ye C, Koplów J P, *et al.* Analysis

- of temperature dependence of photodarkening in ytterbium-doped fibers [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 111610.
- [31] Zervas M N, Ghiringhelli F, Durkin M K, *et al.* Distribution of photodarkening-induced loss in Yb-doped fiber amplifiers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7914: 79140L.
- [32] Chen G. The study of ytterbium-doped silica fiber for high power laser and amplifier system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014: 72-73.  
陈瑰. 用于高功率激光器和放大器的掺镱光纤研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 72-73.
- [33] Koponen J J, Söderlund M J, Hoffman H J, *et al.* Measuring photodarkening from single-mode ytterbium-doped silica fibers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11539-11544.
- [34] Yoo S, Boyland A J, Standish R J, *et al.* Measurement of photodarkening in Yb-doped aluminosilicate fibres at elevated temperature [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(3): 243-244.
- [35] Olivero M, Boetti N, Braglia A, *et al.* Measurement techniques for the evaluation of photodarkening in fibers for high power lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7914: 79142U.
- [36] 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.
- [37] Varona O D, Steinke M, Neumann J, *et al.* All-fiber, single-frequency, and single-mode  $\text{Er}^{3+}$ -Yb $^{3+}$  fiber amplifier at 1556 nm core-pumped at 1018 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(11): 2632-2635.
- [38] Schwuchow A, Unger S, Jetschke S, *et al.* Advanced attenuation and fluorescence measurement methods in the investigation of photodarkening and related properties of ytterbium-doped fibers [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(7): 1466-1473.
- [39] Söderlund M, Montiel J, Tammela S, *et al.* Comparison of photodarkening in Ytterbium-doped fibers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6873: 687325.
- [40] Ponsoda J J M I, Söderlund M, Koplow J, *et al.* Combined photodarkening and thermal bleaching measurement of an ytterbium-doped fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7195: 71952D.
- [41] Li H Q, Chen G, Wang Y B, *et al.* Study on the photo-darkening in fiber [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(4): 26-30.
- 李海清, 陈瑰, 王一礪, 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.
- [42] Gebavi H, Taccheo S, Milanese D, *et al.* Temporal evolution and correlation between cooperative luminescence and photodarkening in ytterbium-doped silica fibers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25078-25085.
- [43] 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]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19340-19345.
- [44] Jetschke S, Röpke U, Unger S, *et al.* Characterization of photodarkening processes in Yb doped fibers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7195: 71952B.
- [45] Jetschke S, Unger S, Schwuchow A, *et al.* Evidence of Tm impact in low-photodarkening Yb-doped fibers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(6): 7590-7598.
- [46] Leich M T, Jetschke S, Fiebrandt J, *et al.* Temperature effects in core-pumped Yb fibers and their correlation to photodarkening [C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), 25-29 June 2017, Munich, Germany. New York: IEEE, 2017: 17314673.
- [47] Wu W M, Xiao H, Xu J M, *et al.* Research progress of tandem-pumped fiber lasers [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.
- [48] 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.
- [49] Piccoli R, Robin T, Brand T, *et al.* Effective photodarkening suppression in Yb-doped fiber lasers by visible light injection [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7638-7643.
- [50] Gebavi H, Taccheo S, Lablonde L, *et al.* Mitigation of photodarkening phenomenon in fiber lasers by 633 nm light exposure [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 196-198.
- [51] Leich M, Jetschke S, Unger S, *et al.* Acceleration of photodarkening measurements in Yb-doped fibers by enhanced temperatures [C] // CLEO/Europe-EQEC

- 2009-European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference, June 14-19, 2009, Munich, Germany. New York: IEEE, 2009: 10827018.
- [52] Leich M, Röpke U, Jetschke S, *et al.* Non-isothermal bleaching of photodarkened Yb-doped fibers[J]. Optics Express, 2009, 17(15): 12588-12593.
- [53] Söderlund M J, Ponsoda J J M I, Koplou J P, *et al.* Heat-induced darkening and spectral broadening in photodarkened ytterbium-doped fiber under thermal cycling[J]. Optics Express, 2009, 17(12): 9940-9946.
- [54] Ponsoda J J M I, Söderlund M J, Koplou J P, *et al.* Photodarkening-induced increase of fiber temperature in ytterbium-doped fibers[J]. Applied Optics, 2010, 49(22): 4139-4144.
- [55] Leich M, Jetschke S, Unger S, *et al.* Temperature influence on the photodarkening kinetics in Yb-doped silica fibers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(1): 65-68.