

# 掺镱光纤激光器自漂白波长探究\*

陶蒙蒙<sup>1)†</sup> 王亚民<sup>1)</sup> 王科<sup>1)</sup> 谌鸿伟<sup>1)</sup> 邵冲云<sup>2)</sup> 李乔木<sup>1)</sup> 叶景峰<sup>1)</sup>

1) (西北核技术研究所, 激光与物质相互作用全国重点实验室, 西安 710024)

2) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2025年7月29日收到; 2025年8月25日收到修改稿)

辐射环境下, 增益光纤的辐致损耗会引起激光器输出性能的退化. 光漂白是降低辐射影响, 恢复激光器输出特性的一种有效方法. 本文对掺镱光纤激光器的辐照和光漂白特性开展了实验研究和模拟仿真. 在伽马辐照实验中, 激光器输出功率出现了明显的下降; 在漂白实验中, 观察到了激光器的性能恢复, 即自漂白现象. 为了摸清产生漂白效应的具体激光波长, 使用 915, 976, 1070 和 1550 nm 等不同波长激光测试了掺镱光纤内部辐致损耗的漂白特性, 明确了 1  $\mu\text{m}$  波段激光信号是引起掺镱光纤激光器性能恢复的主要因素, 而 915, 976 和 1550 nm 波段信号则无法实现对掺镱光纤的有效漂白. 测量了不同泵浦功率下掺镱光纤的漂白曲线, 并通过拟合得到了 1070 nm 光漂白下, 掺镱光纤辐致损耗的演化参数. 在此基础上, 计算给出了在辐照和光漂白条件下, 掺镱光纤内部辐致损耗的演化曲线; 结合激光器的辐射物理模型, 仿真给出了掺镱光纤激光器的功率演化曲线; 相关计算和仿真结果与实验测量数据变化趋势一致. 相关工作可为光纤激光器在辐射和漂白条件下性能演化预估提供技术支撑.

**关键词:** 辐致损耗, 掺镱光纤激光器, 光漂白**PACS:** 42.88.+h, 61.80.-x, 61.80.Ed, 61.82.-d, 78.70.-g**DOI:** 10.7498/aps.74.20251017**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251017

## 1 引言

光纤激光器在辐射环境中应用时, 辐射与光纤的相互作用会导致光纤内大量色心的产生, 从而使光纤传输损耗增大<sup>[1-3]</sup>, 进而影响激光器的输出性能. 在光纤激光器系统中, 掺杂光纤是对辐射最为敏感的部件<sup>[4-6]</sup>, 其辐致损耗远大于普通传输光纤, 在 100 Gy 伽马辐射剂量下, 掺杂光纤的辐致损耗可达数 dB/m, 进而会导致激光器振荡阈值升高、转换效率下降、运行寿命缩短、模式不稳定阈值降低等后果, 极大地影响激光器的安全稳定运行<sup>[7-12]</sup>.

为了降低辐射对掺杂光纤的影响, 恢复光纤特性, 研究人员提出了一系列针对辐照后掺杂光纤的后处理方法, 包括热漂白、气氛漂白、光漂白等<sup>[6,13-15]</sup>.

通过热效应降低光纤内部传输损耗的方法称为热漂白. 2009年, Fox等<sup>[16]</sup>对伽马射线辐照后掺镱光纤的热漂白现象进行了报道. 实验发现, 在 300  $^{\circ}\text{C}$  温度下漂白 8 h 后, 掺镱光纤在 1000—1700 nm 光谱范围内透过率增加了约 15%, 且不同波长处恢复也各不相同. 2019年, Mady等<sup>[17]</sup>系统地研究了 X 射线辐照后掺镱光纤预制棒的热漂白现象. 结果表明, 对于掺镱石英预制棒, 随着加热温度的升高, 辐致损耗逐渐降低, 辐致损耗的漂白

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62105268) 和激光与物质相互作用国家重点实验室基金 (批准号: SKLLIM2305, SKLLIM2207, SKLLIM2208) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: taomengmeng@nint.ac.cn

主要发生在 125—350 °C 之间, 漂白峰值温度在 225 °C 附近. 共掺 Al 离子后, 热漂白情况变得十分复杂, 在 200 °C 附近甚至出现了负漂白现象, 即辐致损耗不仅没有降低, 反而出现了增强. 可见, 通过热效应实现辐致损耗漂白的机理十分复杂, 加热并不一定有助于辐照后光纤的性能恢复.

通过载气降低光纤内部传输损耗的方法称为气氛漂白. 2018 年, 邢颖滨等<sup>[18,19]</sup>研究了载氢和载氩对伽马射线辐照后掺铥光纤吸收光谱的影响, 并通过搭建掺铥光纤激光器验证了掺杂光纤的性能恢复特性. 实验结果表明: 对辐照后的掺铥光纤进行载氩处理, 可以实现对光纤内部色心的有效漂白, 降低光纤在 600—800 nm 波段的吸收损耗; 激光器输出性能也几乎得到完全恢复; 载氢处理则只能在一定程度上恢复激光器性能. 对比分析表明, 载氩更有利于实现对辐照后掺铥光纤的性能恢复.

通过光泵浦降低光纤内部传输损耗的方法称为光漂白. 事实上, 光漂白方法已广泛用于掺铥光纤光子暗化效应的抑制, 目前已报道的漂白波长覆盖从紫外到近红外的多个波段<sup>[20-26]</sup>. 类似地, 研究人员也相继发现了不同波长激光信号对光纤辐致损耗的漂白作用<sup>[27-35]</sup>. 早在 1981 年, Friebele 和 Gingerich<sup>[27]</sup>就观察到了普通传输光纤中的光漂白现象. 研究表明, 使用 0.85 μm 的半导体激光器泵浦伽马射线辐照后的传输光纤, 可以观察到光纤的辐致损耗随着时间推移逐渐下降, 且泵浦功率越高, 辐致损耗下降速度越快. 2008 年, Zotov 等<sup>[28]</sup>报道了掺铥光纤中的光漂白现象. 实验对比了 980 和 1480 nm 两种波长对掺铥光纤中辐致色心的漂白效果. 结果发现: 980 nm 漂白下, 掺铥光纤内部辐致损耗下降, 激光器输出功率迅速恢复; 而 1480 nm 漂白下, 激光器输出功率没有出现明显变化. 类似地, 2015 年, 李进延等<sup>[29,30]</sup>也观察到了 793 nm 光漂白下掺铥光纤激光器的功率恢复现象, 并通过实验测量验证了漂白后光纤辐致损耗的降低. 2023 年, Wang 等<sup>[31]</sup>使用 5 W 532 nm 激光对辐照后的掺铥光纤进行光漂白; 经 2 h 漂白, 光纤辐致损耗恢复了 45.2%, 激光器模式不稳定阈值提高了 227 W. 2025 年, 陈金宝研究组<sup>[32]</sup>利用 450 nm 激光对辐照后的掺铥光纤激光器进行光漂白, 实现了近乎 100% 的功率恢复. 近年来, 该研究组还报道了 976 nm 泵浦下掺铥光纤激光器的自漂白现象<sup>[33,34]</sup>. 在 0.5 Gy/s 高剂量率下, 经 150 Gy

累积辐射剂量, 激光器输出功率从 150 W 下降至 105 W, 下降了 30%; 关闭辐射源后, 保持激光器处于运行状态, 激光器出现自漂白现象, 输出功率恢复至 145 W. 降低辐射剂量率至 0.001 Gy/s, 在 1.9 Gy 辐射总剂量内, 千瓦级掺铥光纤激光器输出功率没有出现明显下降, 功率起伏也在 2% 以内. 表明, 在振荡运行状态下, 激光器自漂白效应可以有效抑制辐照导致的功率下降. 但是, 在 976 nm 泵浦下, 激光器谐振腔内同时存在 976 nm 泵浦光信号和 1 μm 波段的激光信号, 该实验并未明确产生漂白效应的具体波长.

本文利用百瓦级掺铥光纤激光器开展了辐照和光漂白实验研究, 观察到了掺铥光纤激光器的自漂白现象; 同时利用 915, 976, 1070 和 1550 nm 等波长激光信号对掺铥光纤进行了漂白测试. 实验结果表明, 915, 976 和 1550 nm 波段泵浦无法实现对掺铥光纤辐致损耗的有效漂白, 1 μm 波段的激光信号才是引起掺铥光纤激光器漂白的主要因素.

## 2 掺铥光纤激光器的光漂白

首先对百瓦级掺铥光纤激光器开展了辐照和光漂白实验. 激光器使用 976 nm LD 作为泵浦源, 采用前向泵浦方式, 光路结构如图 1 所示; 谐振腔由高反光纤光栅 (HR FBG) 和部分反射光纤光栅 (PR FBG) 构成; 泵浦光通过泵浦合束器 (PC) 进入谐振腔; 激光器增益光纤为自研的 20 μm/400 μm 掺铥光纤, 掺杂成分包含 Yb, Al, Ge, P 等元素, 具体光纤信息如表 1 所列; 实验中, 掺铥光纤置于 <sup>60</sup>Co 稳态伽马辐射源的辐照区域. 伽马辐照下, 纤芯内会产生大量的铝氧空穴色心和磷氧空穴色心; 由于磷氧空穴色心吸收峰主要位于可见光波段, 而铝氧空穴色心的吸收峰所处波长更长, 因此光纤中近红外波段的传输损耗主要由铝氧空穴色心导致<sup>[6,15,35-37]</sup>.

表 1 实验所用掺铥光纤信息  
Table 1. Parameters of the exploited YDF.

参数	数值	参数	数值
尺寸/μm	20/400	Yb离子浓度/(10 <sup>25</sup> m <sup>-3</sup> )	4.95
纤芯数值孔径	0.06	Al离子浓度/(10 <sup>26</sup> m <sup>-3</sup> )	5.82
976 nm处吸收系数/(dB·m <sup>-1</sup> )	1.31	P离子浓度/(10 <sup>26</sup> m <sup>-3</sup> )	6.16

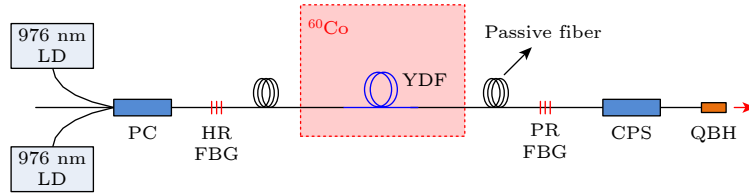


图1 掺镱光纤激光器辐照、光漂白实验光路结构图(LD, 半导体激光器; PC, 泵浦合束器; HR FBG, 高反光纤光栅; PR FBG, 部分反射光纤光栅; YDF, 掺镱光纤; CPS, 泵浦剥除器; QBH, 防反射输出接头)

Fig. 1. Setup for the irradiation and photo-bleaching experiments of Yb-doped fiber lasers (LD, laser diode; PC, pump combiner; HR FBG, highly-reflective fiber Bragg grating; PR FBG, partially-reflective fiber Bragg grating; YDF, Yb-doped fiber; CPS, cladding pump stripper; QBH, quasi-Brewster head).

为了保护各无源器件, 掺镱光纤内的激光信号通过 2 段长约 30 m 的传输光纤 (passive fiber) 引入、引出辐照区域; 剩余泵浦光通过泵浦剥除器 (CPS) 进行滤除, 激光信号通过防反射接头 (QBH) 输出. 辐照实验中, 辐射剂量率设置为 0.01 Gy/s, 使用功率计实时记录激光器输出功率信息; 辐照总剂量达到 100 Gy 后, 辐照结束, 保持激光器处于开机状态, 利用 976 nm 泵浦光和 1070 nm 信号光同时对激光器进行光漂白, 记录漂白过程中激光器的输出功率变化.

辐照和漂白过程中激光器输出功率的时域演化情况如图 2(a) 所示. 由图 2(a) 可以看出, 辐照过程中, 激光器输出功率不断下降, 由最初的 129 W 下降至 100 Gy 累积辐射剂量下的 81 W, 功率下降幅度达 37.2%. 漂白过程中, 激光器输出功率又迅速回升, 并逐渐趋于稳定. 漂白约 2 h 后, 输出功率恢复至 111 W, 恢复比率达 37.0%.

辐照前、辐照后和漂白后, 测量并对比激光器输出功率随泵浦功率的变化情况, 结果如图 2(b) 所示. 图 2(b) 中方块、圆点和三角形分别代表辐照前 (0 Gy)、辐照后 (100 Gy) 和漂白后 (Bleached) 的激光器输出功率数据. 对不同状态下激光器的输出功率数据进行拟合表明, 辐照前, 激光器斜率效率可达 78.3%; 经 100 Gy 伽马辐照后, 斜率效率下降至仅约 49.4%; 漂白后, 激光器斜率效率可恢复至 67.0%. 另外, 利用文献 [38] 中的光纤激光器辐射物理热模型对百瓦级掺镱光纤激光器内部的热载情况进行了仿真计算. 结果表明, 在 100 Gy 辐射剂量时, 在水冷条件下, 掺镱光纤内部最高温升不大于 10 K; 辐照结束后, 现场使用手持式热像仪观察掺镱光纤热分布情况, 也未发现明显的温升现象, 最高温度点仅约 32 °C. 因此, 可以排除热效应对光纤内部辐致损耗的漂白作用 [16,17]. 上述实验结

果与分析可见, 光漂白可以显著地改善辐照后光纤激光器的输出功率和斜率效率, 提升其输出性能.

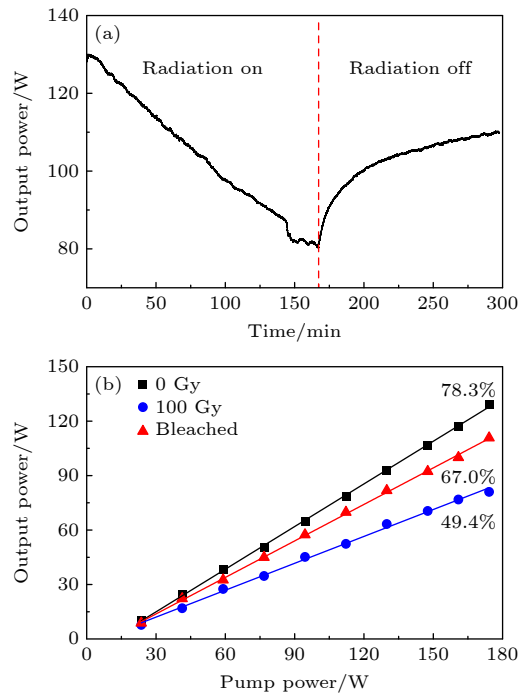


图2 辐照、漂白前后激光器输出功率特性 (a) 功率演化; (b) 输出功率随泵浦功率变化

Fig. 2. Output characteristics of Yb-doped fiber lasers before and after radiation and photo-bleaching: (a) Output power evolution; (b) output power vs. pump power.

### 3 掺镱光纤的光漂白

漂白后激光器输出性能产生恢复的主要原因是在光漂白下, 增益光纤内部辐致损耗降低. 但是, 在漂白过程中, 增益光纤内同时存在 976 nm 泵浦光和 1070 nm 信号光两种激光信号, 无法明确两种激光的漂白效果差异. 为了解决这一问题, 测试了 915, 976, 1070 和 1550 nm 等多个不同波长激光对掺镱光纤内部辐致损耗的漂白特性. 具体测试

方法是, 在辐照后的掺镱光纤中通入特定波长的信号光, 实时记录输出端信号光功率, 从而实现对掺镱光纤内部辐致损耗变化情况的测量; 同时结合光频域反射技术 (OFDR), 通过记录掺镱光纤不同位置处携带光纤传输损耗信息的后向散射信号, 还可实现对掺镱光纤内部辐致损耗分布的测量 [39].

### 3.1 1550 nm

首先, 避开掺镱光纤的吸收和发射波段, 对 1550 nm 处的漂白特性进行了测试. 使用一台单模掺镱光纤激光器 (EDFL), 传输通过约 4.5 m 辐照过的双包层掺镱光纤, 通过监测输入和输出端激光功率变化, 来测量掺镱光纤内部辐致损耗的漂白特性. 若光纤产生了漂白, 则输出端 1550 nm 信号光功率会逐渐增加. 分别使用 55 mW 和 120 mW 两种不同功率的激光信号进行实验, 漂白时长约 40 min, 功率监测结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 在整个光漂白过程中, 1550 nm 激光功率信号都没有发生明显的变化, 表明掺镱光纤内部辐致损耗没有降低.

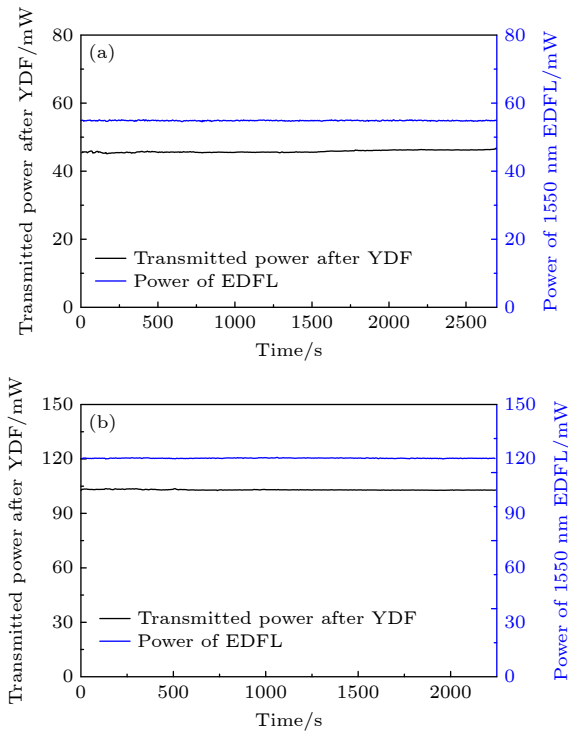


图 3 1550 nm 漂白下激光功率监测结果 (a) 55 mW; (b) 120 mW  
Fig. 3. Recorded power information under 1550 nm bleaching: (a) 55 mW; (b) 120 mW.

图 4 给出了漂白前后使用 OFDR 测量得到的掺镱光纤内部后向散射信号强度分布. 通过对比可

以发现, 1550 nm 光漂白并未改变掺镱光纤内部辐致损耗的分布. 结合图 3 中的功率监测结果, 相关数据表明 1550 nm 激光对掺镱光纤内部的辐致损耗没有漂白效果.

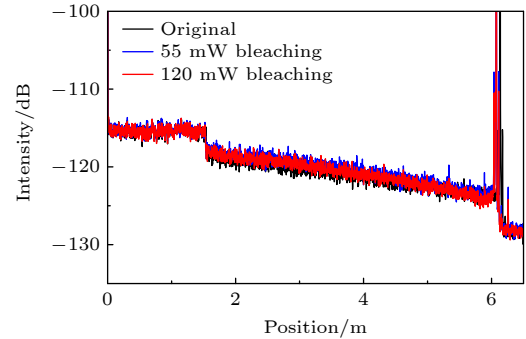


图 4 1550 nm 漂白前后掺镱光纤的后向散射信号  
Fig. 4. Backward scattering signal of Yb-doped fiber before and after 1550 nm bleaching.

### 3.2 915 nm/976 nm

915 nm 和 976 nm 处于掺镱光纤的吸收波段, 通常作为掺镱光纤激光器的泵浦光使用. 由于掺镱光纤对这两个波段的激光会产生较大的吸收, 并且通过实验已经验证了 1550 nm 激光没有漂白效果, 因此, 测试中使用 1550 nm 激光作为信号光开展测试, 测量光路结构如图 5 所示. 915 nm/976 nm 泵浦光通过泵浦合束器 (PC) 对辐照后的掺镱光纤 (YDF) 进行光漂白; 1550 nm 信号光经掺镱光纤传输后进入功率计 (PM) 进行功率监测. 20% 的 915 nm/976 nm 泵浦光通过一个 4:1 耦合器 (OC) 引出, 用于泵浦光的功率监测. 需要说明的是, 所使用的 915 nm/976 nm LD 为多模输出, 泵浦光在掺镱光纤的包层中传输; 而 1550 nm 信号光为单模输出, 在掺镱光纤的纤芯中传输. 因此, 在掺镱光纤输出端熔接了一个泵浦剥除器 (CPS) 对包层中的剩余泵浦光进行滤除. 若光纤产生了漂白, 则输出端 1550 nm 信号光功率会逐渐增加.

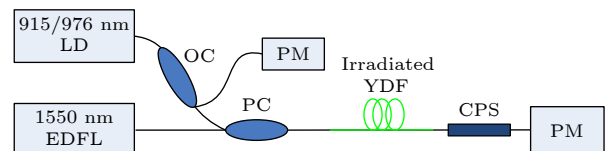


图 5 915 nm/976 nm 漂白特性测试光路结构图 (EDFL, 掺镱光纤激光器; OC, 耦合器; PM, 功率计)

Fig. 5. Schematic diagram for 915 nm/976 nm bleaching tests (EDFL, Er-doped fiber laser; OC, output coupler; PM, power-meter).

915 nm/976 nm LD 漂白下的典型功率测量结果如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 在 915 nm/976 nm 泵浦下, 输出端测量的信号光功率没有发生明显的变化, 表明掺镱光纤内部辐致损耗没有降低. 需要注意的是, 图 6 给出的 915 nm/976 nm LD 功率为耦合器监测端功率, 实际漂白功率为监测端功率的 4 倍, 即 4 W.

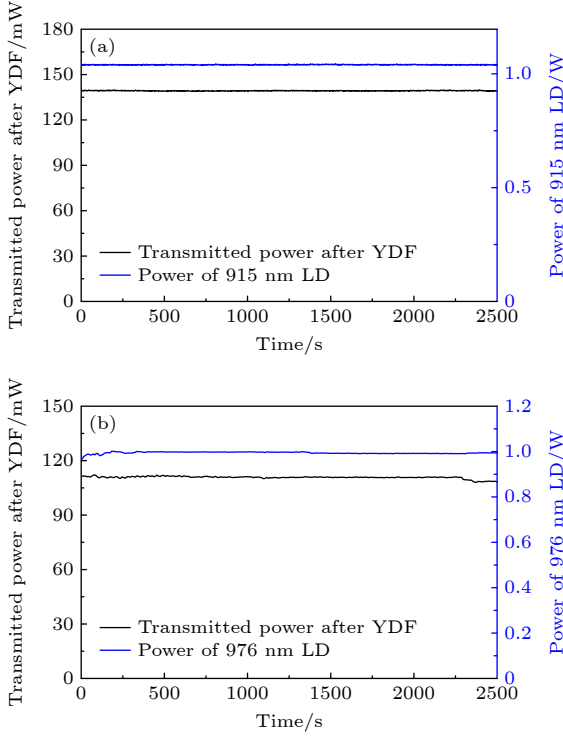


图 6 915 nm/976 nm 激光漂白下功率测量结果 (a) 915 nm; (b) 976 nm  
Fig. 6. Recorded power information under 915 nm/976 nm bleaching: (a) 915 nm; (b) 976 nm.

漂白前后的掺镱光纤后向散射信号如图 7 所示. 通过对比可以发现, 915 nm/976 nm 光漂白并未改变掺镱光纤内部辐致损耗的分布. 结合图 6 中

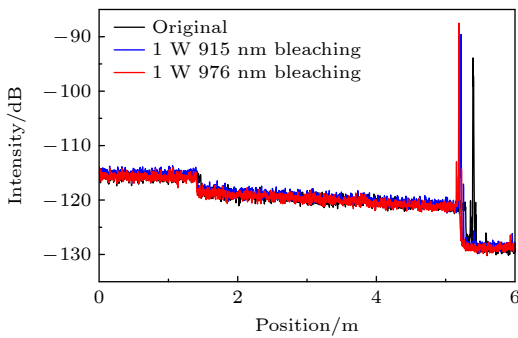


图 7 915 nm/976 nm 漂白前后掺镱光纤的后向散射信号  
Fig. 7. Backward scattering signal of Yb-doped fiber before and after 915 nm/976 nm bleaching.

的功率监测结果, 相关数据表明 915 nm/976 nm 激光对掺镱光纤辐致损耗没有漂白的效果.

### 3.3 1070 nm

与 1550 nm 漂白测试类似, 将掺镱光纤激光器 (YDFL) 的 1070 nm 输出信号直接传输通过一段辐照过的掺镱光纤, 通过监测输入和输出端信号光功率变化, 来测量 1070 nm 激光对掺镱光纤内部辐致损耗的漂白特性. 若光纤产生了漂白, 则输出端 1070 nm 信号光功率会逐渐增加. 功率测量结果如图 8 所示. 由图 8 可见, 在 500 mW 1070 nm 激光泵浦下, 信号光功率随时间出现了明显的提升, 表明 1070 nm 可对掺镱光纤中的辐致损耗产生漂白效果.

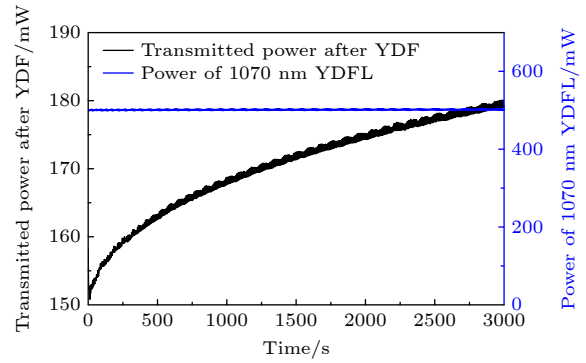


图 8 500 mW 1070 nm 激光漂白下掺镱光纤输出端功率测量结果  
Fig. 8. Recorded power information under 1070 nm bleaching power of 500 mW.

OFDR 测得的漂白前后掺镱光纤后向散射信号如图 9 所示. 通过对比可以发现, 在 1070 nm 光漂白下, 掺镱光纤内部辐致损耗分布发生了显著的改变, 进一步验证了 1070 nm 激光的漂白效果.

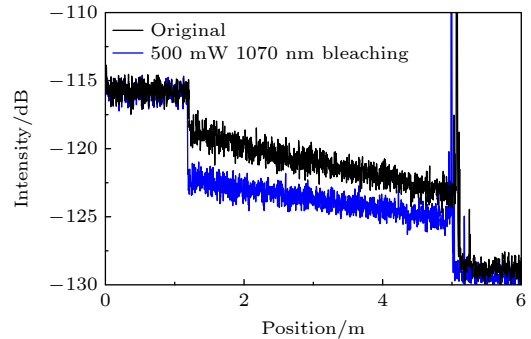


图 9 1070 nm 激光漂白前后掺镱光纤后向散射信号测量结果  
Fig. 9. Backward scattering signal of Yb-doped fiber before and after 1070 nm bleaching.

通过调节 1070 nm 激光功率, 对辐照后的掺镱光纤进行 8.5 h 长时间漂白, 获得了不同漂白功率下掺镱光纤内部辐致损耗的演化曲线, 如图 10 所示. 图 10(a) 给出了漂白过程中掺镱光纤输出端的信号光功率变化情况; 图 10(b) 则给出了计算得到的掺镱光纤辐致损耗的变化情况. 由图 10 可见, 在 1070 nm 光漂白初期, 掺镱光纤输出端信号光功率呈指数式迅速提升, 并逐渐趋于稳定; 对应地, 掺镱光纤内部辐致损耗也呈指数式迅速降低, 并最终趋于稳定. 漂白功率越高, 掺镱光纤内部辐致损耗下降速率越快, 达到平衡态时的辐致损耗也越低. 该实验现象与文献 [40,41] 中光子暗化漂白现象类似.

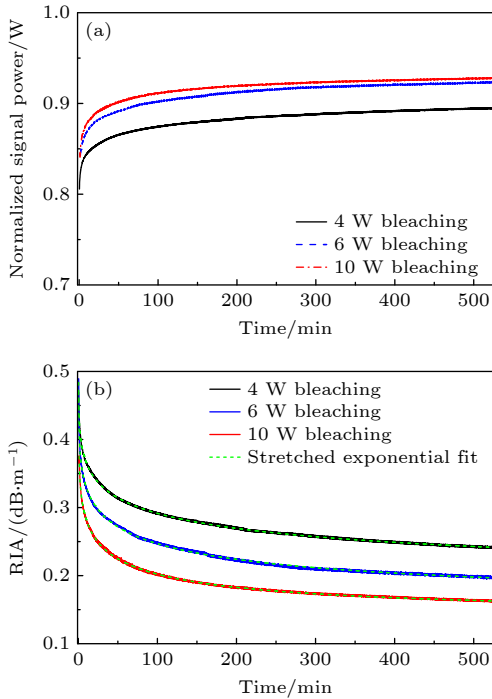


图 10 1070 nm 激光漂白下掺镱光纤内部辐致损耗演化 (a) 输出端功率; (b) 辐致损耗  
Fig. 10. Radiation induced attenuation parameters of Yb-doped fiber under 1070 nm bleaching: (a) Recorded signal power; (b) radiation induced attenuation.

掺杂光纤内部光子暗化漂白的时域演化趋势可以用展宽指数函数来表示, 即在  $t$  时刻, 掺杂光纤内由光子暗化引起的传输损耗  $\alpha(t)$  为 [40,41]

$$\alpha(t) = (\alpha_0 - \alpha_{\text{eq}}) \exp \left[ -\left( \frac{t - t_0}{\tau} \right)^\beta \right] + \alpha_{\text{eq}}, \quad (1)$$

其中,  $\alpha_0$  为初始损耗,  $\alpha_{\text{eq}}$  为达到稳态时的损耗,  $t_0$  为漂白起始时间,  $\tau$  为辐致损耗演化的时间常数,  $\beta$  为展宽系数.  $\alpha_{\text{eq}}$  和  $\tau$  与漂白功率相关, 而  $\beta$

则主要由光纤材料决定. 通过上述拟合参数就可以表征光子暗化引起的传输损耗的演化特性.

考虑到光致光子暗化与辐致损耗产生色心的机制相同 [42,43], 因此这里也使用展宽的指数函数对辐致损耗的漂白演化进行拟合. 拟合结果如图 10(b) 中虚线所示. 由图 10(b) 可见, 在 1070 nm 光漂白下, 掺镱光纤内部辐致损耗的演化符合展宽指数函数规律. 拟合得到的不同漂白功率下时间常数  $\tau$  和稳态辐致损耗  $\alpha_{\text{eq}}$  如图 11 所示. 从图 11(a) 可以看出, 随着漂白功率的提升, 时间常数  $\tau$  近似呈指数式缩减, 在 2 W 漂白功率下, 辐致损耗下降的时间常数约为 260 min, 而在 8 W 漂白功率以上, 时间常数稳定在约 20 min. 由图 11(b) 可见, 随着漂白功率的提升, 稳态辐致损耗  $\alpha_{\text{eq}}$  则近似呈线性下降, 下降速率约为  $-7 \times 10^{-3} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ . 通过相关拟合参数即可实现对 2 至 10 W 漂白功率范围内, 掺镱光纤内部辐致损耗演化过程的仿真计算.

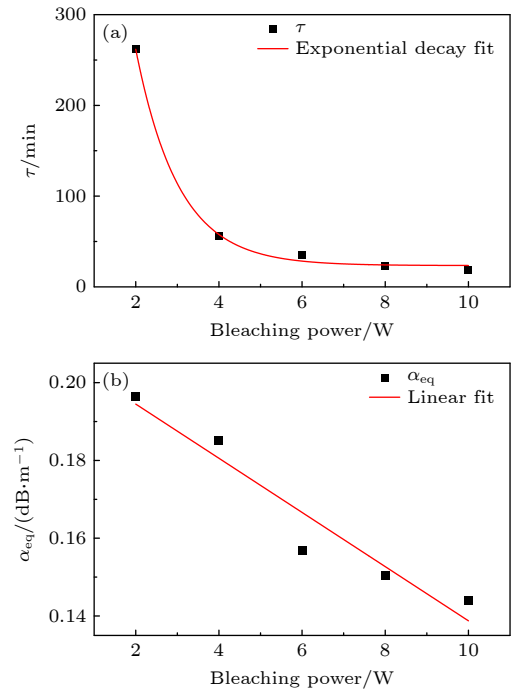


图 11 1070 nm 激光漂白下掺镱光纤内部辐致损耗演化参数 (a) 时间常数; (b) 稳态辐致损耗  
Fig. 11. Radiation induced attenuation parameters of Yb-doped fiber under 1070 nm bleaching: (a) Time constant; (b) radiation induced attenuation at equilibrium state.

#### 4 掺镱光纤激光器的光漂白特性仿真

根据 1070 nm 漂白实验数据及其拟合参数, 可计算得到不同漂白功率下掺镱光纤辐致损耗及

光纤激光器输出功率的演化情况, 结果如图 12 所示. 计算中, 辐射剂量率设定为 1 Gy/min. 图 12(a) 所示为掺镱光纤在先辐射、再漂白条件下辐致损耗的时域演化情况. 由图 12(a) 可见, 在辐射段, 增益光纤辐致损耗迅速上升; 关闭辐射源后, 在信号光漂白作用下, 增益光纤辐致损耗随时间呈指数式降低, 且漂白功率越高, 下降速度越快, 达到平衡态时的辐致损耗越低. 与图 10(b) 中辐致损耗的实验测量结果变化趋势基本一致.

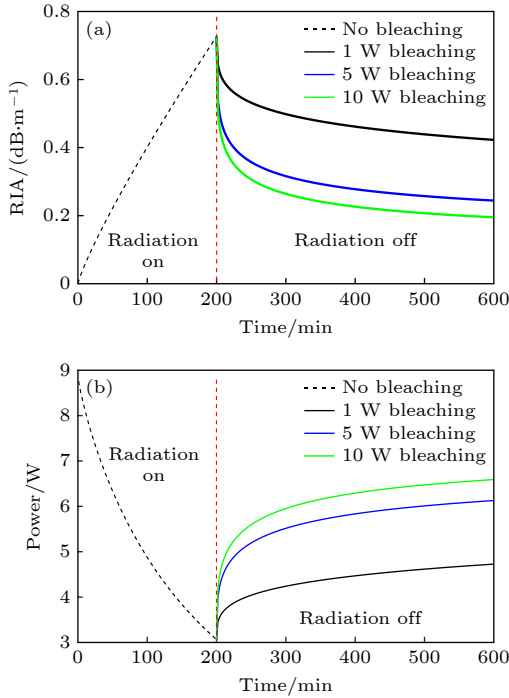


图 12 不同功率 1070 nm 激光漂白下仿真模拟结果 (a) 掺镱光纤内部辐致损耗演化; (b) 掺镱光纤激光器输出功率演化  
Fig. 12. Simulation results under 1070 nm bleaching: (a) Radiation induced attenuation inside the YDF; (b) output power evolution of the YDFL.

根据增益光纤内部辐致损耗的演化数据, 结合光纤激光器辐射物理模型<sup>[38,44,45]</sup>, 就可进一步仿真得到激光器在光漂白下的动态输出演化特性, 结果如图 12(b) 所示. 由图 12(b) 可见: 在辐射段, 随着增益光纤辐致损耗的不断累积, 激光器输出能力迅速降低; 在漂白段, 漂白初期, 激光器输出功率迅速恢复, 然后逐渐趋于平缓, 与图 2(a) 中的激光器辐照实验测量结果变化趋势基本一致.

## 5 结 论

研究了掺镱光纤和激光器的光漂白特性, 实验

明确了 1 μm 波段激光信号是引起掺镱光纤内部辐致损耗漂白的主要因素; 利用漂白拟合参数和辐射物理模型, 实现了对光漂白过程中掺镱光纤激光器功率演化的定性仿真, 模拟结果与实验测量数据变化趋势一致. 后续将综合考虑热漂白等因素, 开展激光器光漂白特性的定量仿真计算. 相关研究可为辐射环境中激光器运行状态的定性分析与评估提供技术支撑, 同时还有助于指导开展光纤激光器抗辐射优化设计工作.

## 参 考 文 献

- [1] Liu F H, Wang P, Liu W P, Xie H G, Feng G, Chen S W, Wu J J 2015 *Mod. Appl. Phys.* **6** 202 (in Chinese) [刘福华, 王平, 刘卫平, 谢红刚, 冯刚, 陈绍武, 武俊杰 2015 *现代应用物理* **6** 202]
- [2] Girard S, Alessi A, Richard N, et al. 2019 *Rev. Phys.* **4** 100032
- [3] Girard S, Kuhnhehn J, Gusarov A, Brichard B, Uffelen M V, Ouerdan Y, Boukenter A, Marcandella C 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 2015
- [4] Lezius M, Predehl K, Stöwer W, Turler A, Greiter M, Hoeschen Ch, Thirof P, Assmann W, Habs D, Prokofiev A, Ekstron C, Hansch T W, Holzwarth R 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 425
- [5] Li F F, Zhou X Y, Zhang K B, Chen J Z, Gao C, Zhang L H, Shi Z H, Xia H D, Ye X, Wu W D, Li B 2020 *High Power Laser Part. Beams* **32** 081003 (in Chinese) [李奋飞, 周晓燕, 张魁宝, 陈进湛, 高聪, 张立华, 石兆华, 夏汉定, 叶鑫, 吴卫东, 李波 2020 *强激光与粒子束* **32** 081003]
- [6] Shao C Y, Yu C L, Hu L L 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 0500014 (in Chinese) [邵冲云, 于春雷, 胡丽丽 2020 *中国激光* **47** 0500014]
- [7] Chi J J, Jiang S Q, Zhang L, Yu M, Wang J L 2018 *Laser Optoelectron. Progress* **55** 061406 (in Chinese) [池俊杰, 姜诗琦, 张琳, 于森, 王军龙 2018 *激光与光电子学进展* **55** 061406]
- [8] Zhang H W, Wang X L, Tang F, Liu W G, Liu P Y, Xu X J, Xiao Y Z, Chen J B 2020 *Laser Optoelectron. Prog.* **57** 011406 (in Chinese) [张汉伟, 王小林, 唐峰, 刘文广, 刘鹏宇, 许晓军, 肖余之, 陈金宝 2020 *激光与光电子学进展* **57** 011406]
- [9] Chen Y S, Xu H Z, Xing Y B, Liao L, Wang Y B, Zhang F F, He X L, Li H Q, Peng J G, Yang L Y, Dai N L, Li J Y 2018 *Opt. Express* **26** 20430
- [10] Wang Y, Gao C, Peng K, Ni L, Wang X, Zhan H, Li Y, Jiang L, Lin A, Wang J, Jing F 2018 *Proceedings of 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR) Hong Kong, China, July 29–August 3, 2018* pF1B. 2
- [11] Cao J Q, Zhou S D, Liu P F, Huang Z H, Wang Z F, Si L, Chen J B 2024 *Acta. Phys. Sin.* **73** 204202 (in Chinese) [曹涧秋, 周尚德, 刘鹏飞, 黄值河, 王泽锋, 司磊, 陈金宝 2024 *物理学报* **73** 204202]
- [12] Xiang G, Chen J, Wang X, Ye Y, Zhang H, Zhang J, Hua W 2024 *Opt. Lett.* **49** 6301
- [13] Girard S, Morana A, Ladaci A, Robin T, Mescia L, Bonnefois J, Boutillier M, Mekki J, Paveau A, Cadier B, Marin E, Ouerdane Y, Boukenter A 2018 *J. Opt.* **20** 093001
- [14] Wang B, Cao C, Xing Y B, Chen G, Dai N L, Li H Q, Peng J

- G, Li J Y 2021 *Laser Optoelectron. Prog.* **58** 1516012 (in Chinese) [王博, 曹驰, 邢颖滨, 陈瑰, 戴能利, 李海清, 彭景刚, 李进延 2021 *激光与光电子学进展* **58** 1516012]
- [15] Shao C, Yu C, Zhu Y, Zhou Q, Boulon G, Guzik M, Chen W, Hu L 2022 *J. Lumin.* **248** 118939
- [16] Fox B P, Simmons-Potter K, Moore S W, Fisher J H, Meister D C 2009 *Proc. SPIE* **7434** 74340C
- [17] Mady F, Guttilla A, Benabdesselam M, Blanc W 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 2466
- [18] Xing Y, Liu Y, Zhao N, Cao R, Wang Y, Yang Y, Peng J, Li H, Yang L, Dai N, Li J 2018 *Opt. Lett.* **43** 1075
- [19] Xing Y, Liu Y, Cao R, Liao L, Chu Y, Wang Y, Peng J, Li H, Yang L, Dai N, Li J 2018 *OSA Contin.* **1** 987
- [20] Manek-Hönniger I, Bouillet J, Cardinal T, Guillen F, Ermenoux S, Podgorski M, Doua R, Salin F 2007 *Opt. Express* **15** 1606
- [21] Chávez A, Kir'Yanov A, Barmenkov Y, Ilichev N N 2007 *Laser Phys. Lett.* **4** 734
- [22] Gebavi H, Taccheo S, Lablonde L, Cadier B, Robin T, Meehin D, Tregoat D 2013 *Opt. Lett.* **38** 196
- [23] Piccoli R, Gebavi H, Lablonde L, et al. 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 50
- [24] Piccoli R, Robin T, Brand T, Kolotzbach U, Taccheo S 2014 *Opt. Express* **22** 7638
- [25] Zhao N, Xing Y, Li J, Liao L, Wang Y, Peng J, Yang L, Dai N, Li H, Li J 2015 *Opt. Express* **23** 25272
- [26] Liu Ch P 2017 *M. S. Thesis* (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology) (in Chinese) [刘超平 2017 硕士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [27] Friebele E J, Gingerich M E 1981 *Appl. Opt.* **20** 3448
- [28] Zotov K V, Likhachev M E, Tomashuk A L, et al. 2008 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **20** 1476
- [29] Xing Y B, Huang H Q, Zhao N, Liao L, Li J Y, Dai N L 2015 *Opt. Lett.* **40** 681
- [30] Xing Y B, Zhao N, Liao L, Wang Y B, Li H Q, Peng J G, Yang L Y, Dai N L, Li J Y 2015 *Opt. Express* **23** 24236
- [31] Wang X, Sun S, Zheng Y, Yu M, Li S, Cao Y, Wang J 2023 *Appl. Sci.* **13** 6146
- [32] Xiang G B, Zhang H W, Wang X L, et al. 2025 *Photonics Res.* **13** 2362
- [33] Chen J B, Xiang G B, Wang X L, Zhang H W, Zhang J B, Hua W H 2024 *High Power Laser Part. Beams* **36** 121001 (in Chinese) [陈金宝, 相广彪, 王小林, 张汉伟, 张江彬, 华卫红 2024 *强激光与粒子束* **36** 121001]
- [34] Xiang G B, Wu J M, Zhang H W, Zhang J B, Chen H W, Wang Y M, Wang X L, Hua W H 2025 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **72** 11
- [35] Deschamps T, Vezin H, Gonnet C, Ollier N 2013 *Opt. Express* **21** 8382
- [36] Shao Ch, Ren J, Wang F, Ollier N, Xie F, Zhang X, Zhang L, Yu Ch, Hu L 2018 *J. Phys. Chem. B* **122** 2809
- [37] Zhang Y, Wang G, Zhao T, Zhang Y, Gao S, Cui X, Zhu Z, Li Z, She S, Hou C, Guo H 2025 *J. Lightwave Technol.* **43** 3899
- [38] Tao M, Chen H, Feng G, Luan K, Wang F, Huang K, Ye X 2020 *Opt. Express* **28** 10104
- [39] Wang K, Wang Y, Tao M, Cao H, Chen H, Ye J, Shen Y, Wang D 2024 *Opt. Commun.* **560** 130472
- [40] Jetschke S, Unger S, Ropke U, Kirchhof J 2007 *Opt. Express* **15** 14838
- [41] Jetschke S, Ropke U 2009 *Opt. Lett.* **34** 109
- [42] Xie F, Shao C, Wang M, Lou F, Liu M, Yu Ch, Feng S, Ye X, Hu L 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 1091
- [43] Arai T, Ichii K, Tanigawa S, Fujimaki M 2009 *Proceedings of 2009 Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series San Diego, March 22–26, 2009* p2873
- [44] Tao M, Chen H, Feng G, Wang L, Ye J, Wang Y, Ye X, Chen W 2022 *Laser Phys.* **32** 055101
- [45] Tao M, Wang Y, Wang K, Chen H, Ye J, Shen Y, Wang D, Ye X 2025 *J. Opt.* **54** 867

## Investigation of self-bleaching wavelength of Yb-doped fiber lasers\*

TAO Mengmeng<sup>1)†</sup> WANG Yamin<sup>1)</sup> WANG Ke<sup>1)</sup> CHEN Hongwei<sup>1)</sup>  
 SHAO Chongyun<sup>2)</sup> LI Qiaomu<sup>1)</sup> YE Jingfeng<sup>1)</sup>

1) (State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

2) (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

( Received 29 July 2025; revised manuscript received 25 August 2025 )

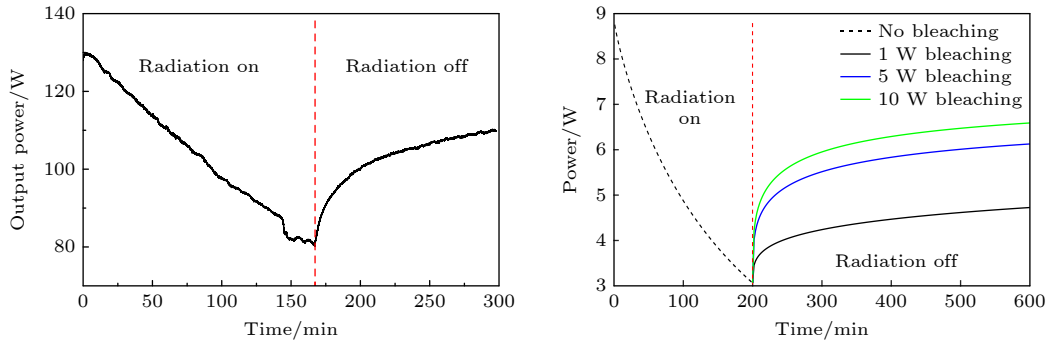
### Abstract

In radiation environments, the radiation induced attenuation (RIA) of the active optical fiber can lead to a significant decline in the performance of fiber laser system. An effective way to solve this problem is to bleach the active fiber using pumps at certain wavelengths, namely photo-bleaching. Experiments have shown that

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62105268) and the Open Fund of the State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, China (Grant Nos. SKLLIM2305, SKLLIM2207, SKLLIM2208).

† Corresponding author. E-mail: taomengmeng@nint.ac.cn

output power of irradiated Yb-doped fiber laser experiences remarkable recovery under 976-nm pump. However, under 976-nm pump, signals at both 976 nm and 1070 nm co-exist in Yb-doped fiber. Moreover, it is difficult to distinguish which wavelength is responsible for the photo-bleaching process. Herein, a one-hundred-watt level Yb-doped fiber laser is irradiated with gamma-ray radiation. In the radiation process, a significant output decline from 129 W at 0 Gy to 81 W at 100 Gy is observed. Then, self-bleaching test is conducted with 976-nm pump. After 2-h bleaching, the output power is restored to 111 W, corresponding to a recovery ratio of about 37.0%. To verify the specific wavelength responsible for the performance recovery, photo-bleaching characteristics of Yb-doped fiber lasers are investigated under different pump wavelengths including 915, 976, 1070 and 1550 nm. Experiments show that laser signal at 1  $\mu\text{m}$  waveband is the primary cause for the bleaching of Yb-doped fibers, while, the pump at 915, 976 and 1550 nm can hardly bleach the irradiated Yb-doped fiber. The RIA recovery curves of Yb-doped fibers are measured under different 1070-nm bleaching powers. And, related evolution parameters are obtained through curve fitting. With these parameters, the RIA evolution of the Yb-doped fiber and the corresponding output power evolution of the Yb-doped fiber laser in the radiation and bleaching process are simulated. Comparisons show that the numerical results are consistent with the measurements qualitatively, demonstrating the reliability of the model. This work has guiding significance for predicting the performance of fiber laser systems in radiation and bleaching environments.



**Keywords:** radiation induced attenuation, Yb-doped fiber laser, photo-bleaching

**PACS:** 42.88.+h, 61.80.-x, 61.80.Ed, 61.82.-d, 78.70.-g

**DOI:** [10.7498/aps.74.20251017](https://doi.org/10.7498/aps.74.20251017)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20251017](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20251017)



## 掺镱光纤激光器自漂白波长探究

陶蒙蒙 王亚民 王科 湛鸿伟 邵冲云 李乔木 叶景峰

### Investigation of self-bleaching wavelength of Yb-doped fiber lasers

TAO Mengmeng WANG Yamin WANG Ke CHEN Hongwei SHAO Chongyun LI Qiaomu YE Jingfeng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 214205 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251017

CSTR: 32037.14.aps.74.20251017

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251017>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

辐致损耗对单频单模掺镱光纤放大器功率提升的影响

Influence of radiation-induced attenuation on power scalability of single-frequency single-mode Yb-doped fiber amplifiers

物理学报. 2025, 74(13): 134202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250418>

辐照效应对掺镱光纤放大器模式不稳定阈值影响的理论研究

Theoretical study on radiation effect on threshold of transverse mode instability of Yb-doped fiber amplifiers

物理学报. 2024, 73(20): 204202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240816>

中子辐照对掺镱光纤材料光学特性的影响

Effects of neutron irradiation on optical characteristics of Yb-doped fiber materials

物理学报. 2021, 70(19): 190201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210083>

激光二极管直接后向泵浦的高光束质量千瓦光纤激光器

Laser diode directly backward pumped high-beam-quality 10-kW fiber laser

物理学报. 2022, 71(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221433>

辅助光对高功率掺镱光纤激光放大器受激拉曼散射效应的抑制作用

Suppression effect of auxiliary laser on stimulated Raman scattering effect of high-power Yb-doped fiber laser amplifier

物理学报. 2024, 73(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240895>

基于种子脉冲预整形的130  $\mu$ J线偏振单频12  $\mu$ m纤芯铒镱共掺光纤激光器

130  $\mu$ J linear-polarized single-frequency 12- $\mu$ m-core Er/Yb co-doped fiber amplifier based on pre-shaped seed pulse

物理学报. 2025, 74(2): 024201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241371>