

掺镱光纤光子暗化及 638 nm 激光器漂白的 实验研究

于海龙 王小林* 肖虎 周朴 陈金宝

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 光子暗化是影响光纤激光器及放大器稳定性和寿命的重要因素。通过实验观察了光纤激光器输出功率的时间演化特性,发现暗化的光纤具有自我恢复的现象,其恢复的程度具有时间依赖的特性。通过设计一种可行的光子暗化测试方法,测试了国产光纤的光子暗化特性。利用 638 nm 半导体激光器对已暗化的光纤进行漂白,结果表明 638 nm 激光可以有效漂白光子暗化引起的额外损耗,并对其机理给出了一种合理的解释。

关键词 光纤激光器; 掺镱光纤; 光子暗化; 光子漂白

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s102008

Experimental Study of Photodarkening and Photobleaching with 638 nm Laser Diode in Ytterbium Doped Fibers

Yu Hailong Wang Xiaolin Xiao Hu Zhou Pu Chen Jinbao

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Photodarkening (PD) is recognized as an important factor that affects the reliability and lifetime of many fiber lasers and amplifiers. Temporal characteristics of the fiber laser and a self-recovery phenomenon with time dependence in darkened fibers are observed. A feasible method to measure PD is designed and several domestic fibers are tested. A 638 nm laser diode (LD) is utilized to bleach the darkened fiber. Experimental result indicates that the excess loss caused by PD can be considerably mitigated by 638 nm irradiation and one reasonable explanation is demonstrated.

Key words fiber lasers; ytterbium doped fibers; photodarkening; photobleaching

OCIS codes 140.3510; 140.3615; 140.3460

1 引言

掺镱光纤激光器和放大器具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好和热管理方便等优势,在材料加工、先进制造、生物医疗等领域都得到了广泛应用^[1-3]。特别随着双包层掺杂光纤及高亮度激光二极管(LD)包层抽运技术的发展,光纤激光功率以惊人的速度提高。目前,国际上 IPG 公司已实现单根单模光纤激光器 10 kW 量级的功率输出^[1]。在某

些特殊的应用中,为克服光纤中非线性效应的不利影响,进一步提升功率输出,往往通过提高光纤的掺杂浓度来缩短光纤长度,进而提高非线性效应的阈值。然而,掺杂浓度高的光纤更易于发生光子暗化^[4],影响激光器的稳定性和寿命。

目前,国际上已有 30 余家相关机构开展了光子暗化(PD)的研究,欧洲的 LIFT 组织成员系统开展了光子暗化标准测试系统,并对其机理及抑制做了相关

收稿日期: 2013-07-30; 收到修改稿日期: 2013-09-01

基金项目: 国防科技大学科研计划项目(JC12-07-03)

作者简介: 于海龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: topgun1988@163.com

导师简介: 陈金宝(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。

E-mail: kdchenjinbao@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: Chinawxllin@163.com

研究^[5]。但是在国内,公开报道的光子暗化研究并不多见^[6-8],因此有必要开展这方面的研究。

本文研究了光纤激光器长期工作的功率输出特性。测试了掺镱光纤样品的光子暗化,并研究了其时间演化特性。利用 638 nm LD 实现了对已暗化双包层掺镱光纤的漂白,实验表明 638 nm 激光可以一定程度上漂白光子暗化引起的额外损耗,是一种抑制光子暗化的有效手段。

2 光纤激光器的光子暗化

实验中所搭建的光纤激光器结构如图 1 所示,单模 974 nm LD 用作光纤激光器的抽运源,其最大平均输出功率为 480 mW,两个 980/1060 nm 波分复用器 WDM1、WDM2 的 1060 nm 端口分别用于

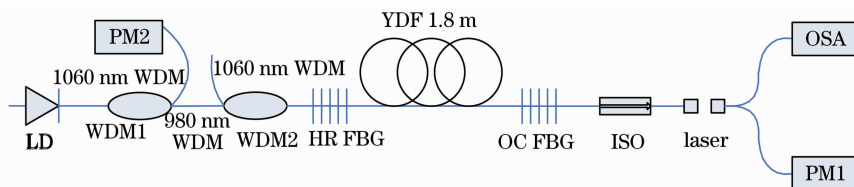


图 1 光纤激光器光子暗化测试实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for measuring PD in fiber lasers

实验首先测量了激光器的输出功率和光谱特性。在 421 mW 974 nm 光抽运下,输出 1062.3 nm 激光 89.46 mW,激光器的效率为 21.2%。激光器的输出光谱如图 2 所示,可以看到抽运光被充分吸收,激光器放大自发辐射(ASE)很小。

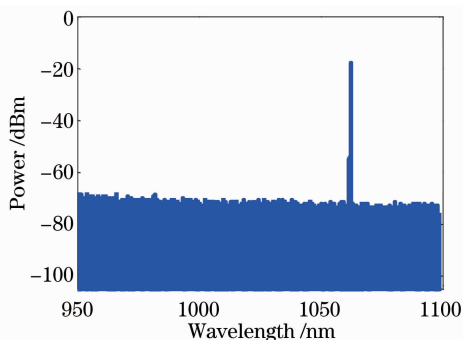


图 2 光纤激光器的输出光谱

Fig. 2 Output spectra of the fiber laser

实验通过测量在 421 mW 抽运功率下激光器的输出功率特性来研究掺镱光纤的光子暗化。激光器振荡稳定后其输出功率随时间的演化如图 3(a)所示。除图中标注的时间段外,输出功率随时间单调下降。前 450 min,激光器输出功率下降 4%,下降

监测抽运源稳定性和激光器回光,高反射光纤布拉格光栅(HR FBG)和输出耦合光纤布拉格光栅(OC FBG)构成激光谐振腔,HR FBG 和 OC FBG 的反射率分别为 90%和 10%,掺镱光纤为美国 Nufern 公司商售的 SM-YDF-HI 单包层光纤,纤芯与包层直径分别为 6 μm 和 125 μm,数值孔径为 0.12,其在 975 nm 处的标称吸收系数为 250 dB/m,实验中使用光纤长度为 1.8 m,该光纤实验之前未受任何抽运照射,隔离器(ISO)用以防止激光回光,实验采用一台光谱分析仪(OSA: YOKOGAWA AQ6370C)和两台光功率计(PM1: Thorlabs PM100A, PM2: Thorlabs PM100)分别来测量激光器输出光谱和光功率。

速度较快之后,下降速度趋于缓慢,1200 min 后输出功率基本稳定,1650 min 内功率下降约 5%。在 130~170 min 内(即图中标注时间段),激光器输出功率没有下降,这是因为实验人员外出,空调、风机等设备关闭,工作环境的变化导致抽运功率突然升高,致使激光器输出功率没有下降,环境条件恢复后,其功率变化仍在原来趋势上。需要特别指出的是,在其他时间段内,WDM1 抽运监测端功率保持稳定。

上述实验结束 6 h 后,重启光纤激光器,再次测试其输出功率随时间的演化,实验结果如图 3(b)所示。实验发现,激光器振荡稳定后功率较上次暗化稳定值(约 85 mW)有一定反弹,之后又缓慢下降至 85 mW。此时,关闭激光器,5 min 后重启,激光振荡稳定后功率没有反弹,这种现象与文献[9]发现的自身退火过程(self-annealing process)相似。

以上实验表明,在 974 nm 抽运光的照射下,掺杂光纤内部产生了光子暗化效应,导致光纤激光器输出激光功率随时间下降,重启激光器后其输出功率反弹的现象说明光纤内部具有某种自我恢复的机制,其恢复程度具有时间依赖的特性。

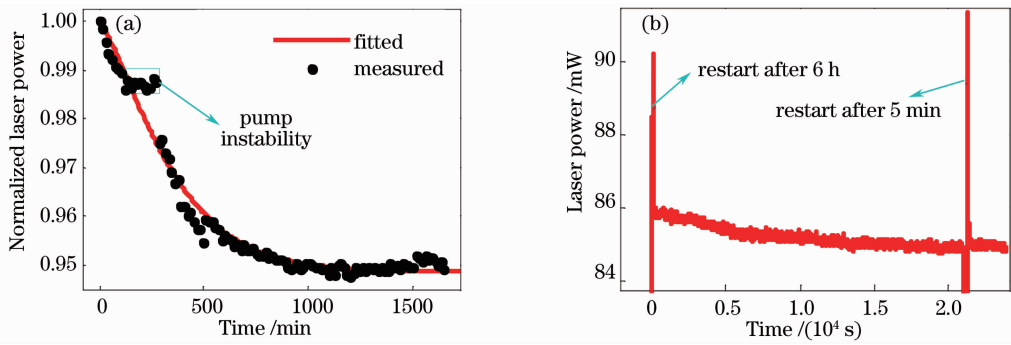


图3 (a) 归一化的光纤激光器输出功率随时间的演化;(b) 间隔 6 h、5 min 重启光纤激光器后的激光功率
Fig. 3 (a) Temporal evolution of normalized fiber laser output power; (b) laser power after restarting the fiber laser with 6 h or 5 min interval

3 光纤样品的光子暗化

为了进一步研究掺杂光纤的光子暗化特性,用 638 nm 激光作为探针光来探测光子暗化所引起的额外损耗。选择 638 nm 激光作为探针光,是因为光子暗化在该波长的额外损耗约是在 1.1 μm 波段的 70 倍,且二者具有线性相关性^[3]。这样即使光子暗化在 1.1 μm 波段引起的损耗很低,也可以通过 638 nm 光功率的变化测试出来。

一般而言,双包层掺杂光纤样品在测试实验中产生光子暗化的方式主要有两种:1) 通过纤芯抽运诱导产生,2) 通过包层抽运诱导产生。两种方式各有利弊,纤芯抽运可以用较小的抽运功率(百毫瓦量级)获得较高的功率密度,长期测试不需要特殊的安全措施,目前国际上所实现的长达 450 h 的测试即采用这种方式^[10]。然而,相关研究表明,光子暗化程度与光纤纤芯中粒子数的反转水平有关,包层抽运可以获得均匀的粒子数反转,使测试结果更具有可重复性和可比性^[11]。另外,包层抽运更接近光纤激光器或放大器的实际工作条件,测试结果对光纤激光器或放大器的设计更具有参考价值。

综合以上考虑,测试实验装置如图 4 所示,与连续波激光器相比,该实验方案没有激光发射,可以使

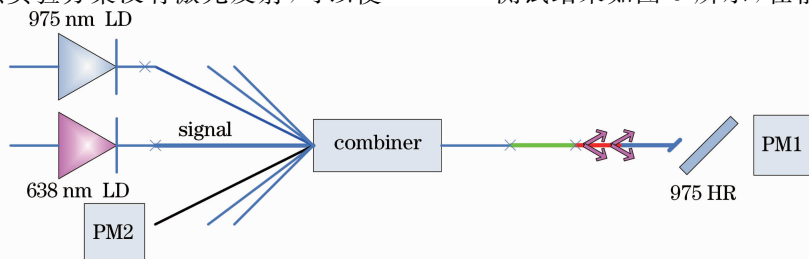


图 4 光纤样品光子暗化测试实验装置图

Fig. 4 Experimental setup used to measure PD in the sample fiber

掺镱光纤内部保持较高的粒子数反转,这样光子暗化程度更深、速率更快^[11]。实验中共约 7.73 W 975 nm 抽运光经 $(6+1) \times 1$ 合束器抽运臂注入掺镱光纤样品中,该合束器输出光纤与信号臂光纤相同,其纤芯与内包层直径分别为 15 μm 和 130 μm ,抽运臂光纤纤芯与包层直径分别为 105 μm 和 125 μm 。为保持纵向粒子数反转均匀,样品长度一般不超过 20 cm^[11],本实验中样品长度为 10 cm,光纤为中国电子科技集团第二十三研究所(简称:中电二十三所)的 YbL15 双包层掺镱光纤,其纤芯与内包层直径分别为 15 μm 和 130 μm ,其在 975 nm 处的吸收系数为 8.2 dB/m。利用光纤耦合的 638 nm LD(尾纤纤芯为 4 μm ,数值孔径为 0.14)作为探针光通过合束器信号臂注入光纤纤芯,注入功率约为 350 μW ,在该功率水平下,没有发现光子漂白现象。为消除包层中 638 nm 和 975 nm 激光对测试的影响,在样品末端传能光纤处做抽运倾泻。为避免纤芯中未被吸收的抽运光对测试的影响,在输出端放置 975 nm 高反镜(反射率大于 99%),滤除可能残余的抽运光。实验中用功率计测量通过纤芯的 638 nm 光功率,为避免外界杂散光对测试的影响,采用合理的措施对外界杂散光进行隔离。

测试结果如图 5 所示,在前 10 min 内,纤芯中

的 638 nm 光功率快速下降约 8%，之后下降速度趋缓，约 40 min 后趋于稳定，整个过程中 638 nm 光功率下降约 12%。将归一化的探针光功率用延伸型指数函数拟合^[9]：

$$T(t) = A \exp[-(t/\tau)^\beta] + 1 - A, \quad (1)$$

式中 $T(t)$ 为归一化的探针光功率， t 为时间， τ 为光子暗化的时间常数，其倒数为光子暗化速率， β 为延伸参数 ($0 \leq \beta \leq 1$)， $(1-A)$ 为稳定状态时的归一化

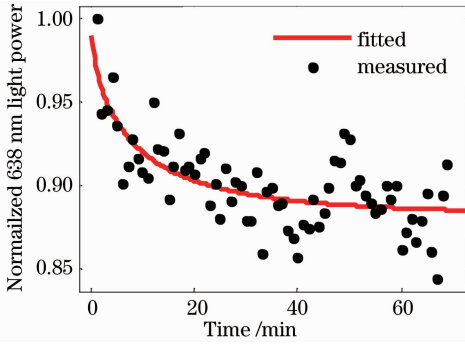


图 5 归一化的 638 nm 光功率随时间的演化

Fig. 5 Temporal evolution of normalized power at 638 nm

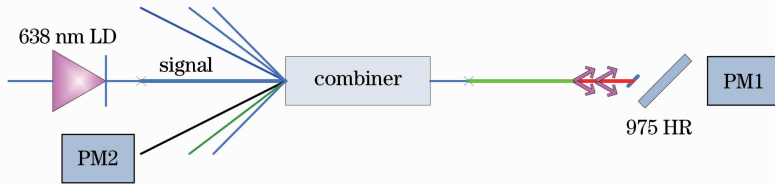


图 6 638 nm 激光漂白实验设置

Fig. 6 Experimental setup used to bleach darkened sample fiber with 638 nm irradiation

实验结果如图 7 所示，638 nm 光功率呈现阶段性上升的趋势。开始时光纤样品对 638 nm 激光有短暂吸收，随后功率快速上升，上升到一定值后，光纤样品再次对 638 nm 激光进行吸收，功率再次快速上升，多次重复，且每次对 638 nm 激光的吸收时间逐渐加长，漂白后功率恢复到暗化前的 91% 后，

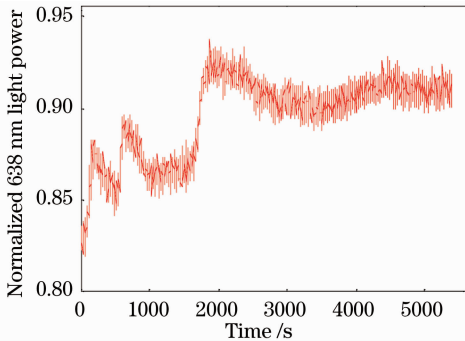


图 7 归一化的 638 nm 光功率随时间的演化

Fig. 7 Temporal evolution of normalized power at 638 nm

探针光功率，相应的拟合参数为 $A = 0.117, \tau = 7.995 \text{ min}, \beta = 0.618$ 。

实验结果表明，该方法可以有效测试掺杂光纤样品的光子暗化，在 7.73 W 975 nm 抽运光的照射下，光纤纤芯内产生了光子暗化效应，导致通过纤芯的 638 nm 光功率下降，归一化的 638 nm 光功率随时间的演化符合延伸型指数函数的规律。

4 638 nm 激光漂白

为研究光子暗化的抑制方法，尝试提高 638 nm LD 功率对已暗化的光纤进行漂白，观察到明显的光子漂白现象。漂白实验装置与图 4 基本一致，如图 6 所示。掺杂光纤更换为 7 cm 中电二十三所研制的 Yb113-30/130 双包层掺镱光纤，其纤芯与内包层直径分别为 30 μm 和 130 μm ，在 975 nm 处的吸收系数为 34 dB/m，该光纤已经由 7.73 W、975 nm 抽运光照射暗化，光子暗化达到稳定状态时，探针光功率下降约 17%。漂白时，638 nm 激光经合束器后功率提高至 43.6 mW，利用合束器抽运臂反射的少量光监测 638 nm LD 的稳定性。

最终达到稳定状态。功率监测表明，整个过程 638 nm LD 保持功率稳定。

目前，对于光子暗化及光子漂白的机理尚不完全明确，各种假说、理论仍在研究讨论中^[12-14]。Chávez 等^[14]提出 Yb^{3+} 与 Yb^{2+} 相互转换的过程是光子暗化及漂白的成因。Rydberg 等^[15]在实验上观察到光纤在发生光子暗化后 Yb^{3+} 浓度降低， Yb^{2+} 浓度升高，为文献^[14]提出的解释提供了证据。Chávez 等^[14]认为在光漂白过程中 Yb^{2+} 从周围 Yb^{3+} - Yb^{3+} 对俘获一个空穴，在漂白激光的帮助下变为 Yb^{3+} ，从而达到漂白效果。从图 7 可以看出，这个过程中可能伴随着对漂白激光的吸收，这也解释了为什么 638 nm 光功率呈现阶段性的上升，开始时吸收少量 638 nm 激光，即可起到明显的漂白效果，而暗化后期产生的色心则需要更高的能量^[16]。因此进一步漂白就需要吸收更多能量的 638 nm 激光，直至达到稳定状态。

5 结 论

研究了光子暗化导致光纤激光器输出功率降低的现象,发现暗化的光纤可以自我恢复,且其程度具有时间依赖的特性;设计了一种可行的全光纤光子暗化测试方法,测试了国产掺镱双包层光纤样品的光子暗化特性;利用 638 nm 激光实现了已暗化双包层掺镱光纤的光子漂白。由于光子暗化机理复杂,国际上尚无明确定论,下一步的工作重点就是在完善光子暗化测试的基础上进一步深入研究光子暗化及光子漂白的机理。

参 考 文 献

- 1 Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63–B92.
- 2 Zhou Pu. Study on Coherent Beam Combination Technology of Fiber Lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
周 朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- 3 Koponen J J, Söderlund M J, Hoffman H J, *et al.*. Measuring photodarkening from single-mode ytterbium doped silica fibers [J]. Opt Express, 2006, 14(24): 11539–11544.
- 4 Taccheo S, Taccheo S, Gebavi H, *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.
- 5 NEWSLETTERLIFT #6. Application oriented research in the area of high-brilliance fiber lasers. http://www.lift-project.eu/pdf/lift_newsletter_6.pdf. [2013–12–12].
- 6 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.
- 7 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.
- 7 Hao J, Yan P, Gong M. Effect of mode competition on photodarkening distribution of Yb-doped fiber laser [J]. Opt Commun, 2013, 287: 167–175.
- 8 CHENG Y. Research on photodarkening in rare earth doped fibers [J]. Journal of Rare Earths, 2012, 30(11): 1102–1105.
- 9 Koponen J J, Söderlund M J, Tammela S K T, *et al.*. Photodarkening in ytterbium-doped silica fibers [C]. SPIE, 2005, 5990: 59908.
- 10 Olivero M, Braglia A, Perrone G, *et al.*. Improved setup and procedure for benchmarking of photodarkening in ytterbium doped silica fibers [J]. Journal of Optics, 2012, 14(12): 125702.
- 11 Koponen J, Laurila M, Hotoleanu M. Inversion behavior in core- and cladding-pumped Yb-doped fiber photodarkening measurements [J]. Appl Opt, 2008, 47(25): 4522–4528.
- 12 Jetschke S, Schwuchow A, Unger S, *et al.*. Deactivation of Yb³⁺ ions due to photodarkening [J]. Optical Materials Express, 2013, 3(4): 452–458.
- 13 Deschamps T, Vezin H, Gonnet C, *et al.*. Evidence of AlOH⁺ responsible for the radiation-induced darkening in Yb doped fiber [J]. Opt Express, 2013, 21(7): 8382–8392.
- 14 Guzman Chávez A D, Kir'yanov A V, Barmenkov Yu 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.
- 15 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.
- 16 Gebavi H, Taccheo S, Tregoaat D, *et al.*. Photobleaching of photodarkening in ytterbium doped aluminosilicate fibers with 633 nm irradiation [J]. Optical Materials Express, 2012, 2(9): 1286–1291.

栏目编辑: 宋梅梅