

有源光纤中稀土离子激光上能级寿命测量的研究*

刘恒¹⁾²⁾ 张钧翔¹⁾²⁾ 付士杰³⁾ 盛泉^{1)2)†} 史伟^{1)2)‡} 姚建铨¹⁾²⁾

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

2) (天津大学, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

3) (亚利桑那大学光学科学学院, 亚利桑那 85721)

(2019年4月26日收到; 2019年7月25日收到修改稿)

提出了一种基于脉冲光纤激光放大器能量特性测量有源光纤中稀土离子上能级寿命的方法. 根据光纤激光器速率方程, 能够确定有源光纤中反转粒子数储能随抽运功率和时间的变化关系; 实验测量不同种子光脉冲重复频率下放大器输出单脉冲能量的变化, 可以反映出反转粒子数随时间的变化情况, 进而根据理论模型得到激活离子的激光上能级寿命. 实验搭建了 $1.06\ \mu\text{m}$ 掺镱 (Yb^{3+}) 光纤激光放大系统对该测量方法理论模型的合理性进行了验证, 对几种常见商用掺 Yb^{3+} 有源光纤激光上能级寿命分别进行了多次测量和数据处理, 测量结果以及变化趋势与其他相关报道中的结果相符.

关键词: 上能级寿命, 有源光纤, 光纤激光器, 光纤放大器

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.50.Nn, 42.81.Cn

DOI: 10.7498/aps.68.20190616

1 引言

以掺杂稀土离子的有源光纤作为增益介质的光纤激光器在可维护性、环境适应性以及热管理等方面相比传统固体激光器具有明显的优势, 在工业、国防和科研领域具有重要而广泛的应用^[1-5]. 作为光纤激光器的核心器件, 有源光纤的特性在很大程度上决定了激光器系统整体性能的优劣. 有源光纤中掺杂离子的激光上能级寿命影响着激光器/放大器的反转粒子数分布、抽运效率和输出脉冲能量等, 准确测量有源光纤激光上能级寿命一方面能够为光纤激光器设计提供重要的参考依据, 另一方面也对有源光纤中出现的浓度猝灭和光致暗化等现象的研究具有推动作用^[6,7]. 近年来相关领域的研究人员发展出多种测量激光玻璃或晶体中稀土

离子上能级寿命的方法, 包括激光诱导荧光法、线宽测量法、延迟符合法、相移法等^[8-10], 这些方法大多要求待测样品为块状介质, 而对于已完成拉制的有源光纤中掺杂离子激光上能级寿命的测量报道很少. 目前对于有源光纤, 通常是用激光诱导荧光法测量掺杂离子激光上能级寿命, 或者认为其上能级寿命等同于光纤预制玻璃中的值^[11,12]. 前者的测试结果极易受重吸收效应和自发辐射效应的影响, 而后者则忽视了光纤拉制过程中温度和应力变化以及杂质引入对掺杂离子寿命的改变, 准确性均受到一定限制.

鉴于上述情况, 本文提出了一种基于脉冲光纤放大器输出能量特性直接测量有源光纤中稀土离子能级寿命的方法. 从光纤激光器的速率方程出发, 得到有源光纤中反转粒子数随泵浦功率和时间的变化关系. 当有源光纤中的储能, 也即反转粒子

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017 YFF0104603) 和高等学校学科创新引智计划 (批准号: B17031) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shengquan@tju.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: shiwei@tju.edu.cn

数被脉冲种子光所充分提取时, 放大器所输出的单脉冲能量即反映了有源光纤中积累的反转粒子数. 通过测量种子光的脉冲重复频率 (泵浦积累时间的倒数) 和输出脉冲能量之间的变化关系, 带回速率方程模型就能够得到有源光纤中掺杂稀土离子的上能级寿命. 基于上述理论模型实验搭建了脉冲光纤振荡功率放大器 (master oscillator power amplifier, MOPA) 系统, 并对几种常用的商用双包层掺 Yb³⁺ 石英光纤进行了测量, 测量结果表明这些有源光纤中 Yb³⁺ 的寿命介于 0.6 ms 到 0.9 ms, 并随掺杂浓度增加而减小, 该测量结果与文献 [6,13,14] 中报道的结果相符, 验证了该方法的合理性.

2 理论模型

2.1 上能级粒子数及光纤储能理论分析

常用的 915 nm/976 nm 抽运下的 1.06 μm 掺 Yb³⁺ 光纤激光系统以及 980 nm 抽运下的 1.5 μm 掺 铒 (Er³⁺) 光纤系统均可简化为二能级激光系统进行处理, 在均匀加宽机制占主导的情况下, 端面抽运双包层光纤激光器速率方程可表示为 [15–18]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N_2(z, t)}{\partial t} \\ &= \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a N_1(z, t) - \sigma_e N_2(z, t)] \\ & \times [P_p^+(z, t) + P_p^-(z, t)] - \frac{N_2(z, t)}{\tau} \\ & + \frac{\Gamma}{hcA} \sum_{i=1}^n \lambda_i [\sigma_a(\lambda_i) N_1(z, t) - \sigma_e(\lambda_i) N_2(z, t)] \\ & \times [P^+(z, t, \lambda_i) + P^-(z, t, \lambda_i)], \end{aligned} \quad (1)$$

$$N = N_1(z, t) + N_2(z, t), \quad (2)$$

式中 $N_1(z, t)$, $N_2(z, t)$ 分别为基态能级和激发态能级粒子数密度; $P_p^+(z, t)$, $P_p^-(z, t)$ 分别为前向和后向抽运功率; 等号右边第三项为自发辐射过程的作用, $P_p^+(z, t, \lambda_i)$, $P_p^-(z, t, \lambda_i)$ 分别为波长 λ_i 处前向和后向传输的自发辐射光功率, 式中其他参数的物理意义见表 1.

在信号光能够充分提取反转粒子数的条件下, 速率方程中自发辐射过程的作用可以忽略 [18], 考虑只存在前向抽运并且抽运功率不随时间变化, 将 (2) 式代入 (1) 式整理得

表 1 公式中各参数的物理意义及参考值
Table 1. The physical meaning and their reference value in the theoretical model.

符号/单位	物理意义	参考值
λ_p/nm	抽运光波长	976
σ_a/m^2	抽运光受激吸收截面	2.6×10^{-26}
σ_e/m^2	抽运光受激发射截面	2.6×10^{-26}
Γ_p	抽运光重叠因子	0.0024
N/m^{-3}	有源光纤掺杂粒子密度	6×10^{25}
$h/\text{J}\cdot\text{s}$	普朗克常量	6.62×10^{-34}
$c/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	真空中光速	3×10^8
τ/ms	上能级寿命	0.8
A/m^2	纤芯横截面积	7×10^{-11}

$$\begin{aligned} & \frac{\Gamma_p \lambda_p \sigma_a N P_p(z)}{hcA} \\ &= \frac{\partial N_2(z, t)}{\partial t} \\ & + \left[\frac{\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z)}{hcA} + \frac{1}{\tau} \right] N_2(z, t), \end{aligned} \quad (3)$$

计算可得

$$\begin{aligned} N_2(z, t) &= - \frac{\Gamma_p \lambda_p \sigma_a N P_p(z) \tau}{\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z) \tau + hcA} \\ & \times \exp \left[- \left(\frac{\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z)}{hcA} + \frac{1}{\tau} \right) t \right] \\ & + \frac{\Gamma_p \lambda_p \sigma_a N P_p(z) \tau}{\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z) \tau + hcA}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $P_p(z)$ 是抽运光在位置 Z 处的功率, 其值与初始抽运强度以及光纤吸收和损耗有关. 由 (4) 式可以直观的看出, 激光上能级粒子数密度 $N_2(z, t)$ 随时间的变化趋势与 $\exp[-(\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z) / hcA + 1/\tau)t]$ 有关, 其时间变化率随 t 的增长而逐渐减小, 其值逐渐趋近于 $\Gamma_p \lambda_p \sigma_a N P_p(z) \tau / [\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z) \tau + hcA]$. 以常用的掺 Yb³⁺ 光纤激光器为例, 取表 1 中数值进行计算, 不同抽运功率下上能级粒子数 N_2 随时间 t 变化如图 1(a) 所示.

有源光纤中储存的能量与上能级粒子数的关系式为 [3,16,19]:

$$E = \frac{hcA}{\lambda_p} \int_0^L N_2(z, t) dz, \quad (5)$$

式中 L 为有源光纤长度, 将 (4) 式代入上式得:

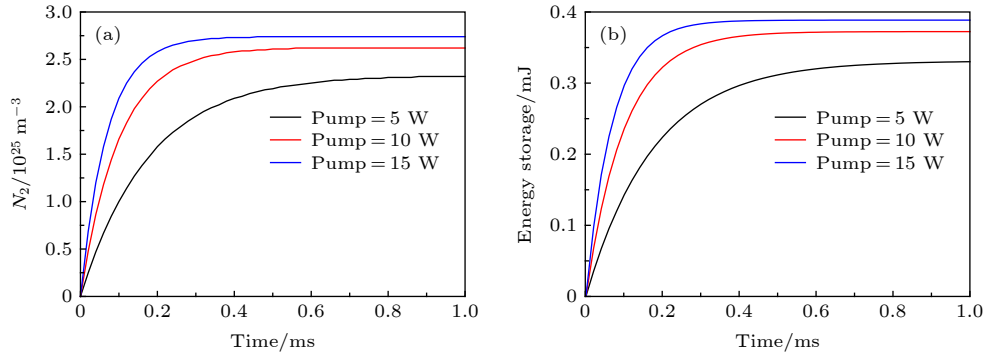


图 1 不同抽运功率下 (a) 激光上能级粒子数密度, (b) 有源光纤储能随时间 t 的变化关系

Fig. 1. (a) Upper laser level population density and (b) energy storage as functions of time under different pump power.

$$E = -\frac{hcA}{\lambda_p} \int_0^L \frac{\Gamma_p \lambda_p \sigma_a N P_p(z) \tau}{\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z) \tau + hcA} \times \exp \left[-\left(\frac{\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z)}{hcA} + \frac{1}{\tau} \right) t \right] dz + \frac{hcA}{\lambda_p} \int_0^L \frac{\Gamma_p \lambda_p \sigma_a N P_p(z) \tau}{\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z) \tau + hcA} dz, \quad (6)$$

有源纤长度 L 取 1 m, 其他各参数取表 1 数值. 根据上式可以得到不同抽运功率下有源光纤中存储的能量 E 与时间 t 的关系如图 1(b) 所示.

从图 1 中可知, 有源光纤储能与上能级粒子数密度均随时间 t 增加, 最后趋于饱和, 抽运光功率越大, 达到饱和经历的时间越短, 且最终上能级粒子数密度及储能越大. 实际过程中考虑到自发辐射会消耗一部分反转粒子数 (储能), 因此实际的上能级粒子数及光纤储能最大值会略小于该理论值, 但各物理量之间的相互关系以及变化趋势应保持不变.

2.2 能级寿命测量理论模型

在脉冲种子光的放大过程中, 有源光纤中存储

的能量被注入的脉冲种子光所提取. 如种子光较弱, 不足以实现对有源光纤储能的充分提取, 储能会随时间 t 的增长波动上升, 最终在 (6) 式右边第二项决定的饱和值附近波动; 如种子光功率较强, 当种子光经过有源光纤、对其中的储能充分提取后, 有源光纤在抽运光作用下重新开始储能, 过程如图 2(a) 所示. 图 2(b) 给出了模拟的在种子光充分提取有源光纤储能的条件输出脉冲强度与种子光脉冲重复频率 (pulse repetition rate, PRR) 之间的关系.

种子光 PRR 较低时, 下一个脉冲种子光到来前上能级粒子数有足够的时间得到补充, 此时种子光的增益较高、输出脉冲强度较大; 随着种子光 PRR 的增加, 在两个相邻的种子光脉冲间隔内有源光纤中的储能没有得到充分积累, 此时种子光的增益较低, 输出脉冲强度减小. 由种子光 PRR 决定的激光储能过程周期影响着种子光的增益 (强度), 因此, 在保证种子光能充分提取有源光纤储能的前提下, 不同 PRR 种子光放大过程的增益特性

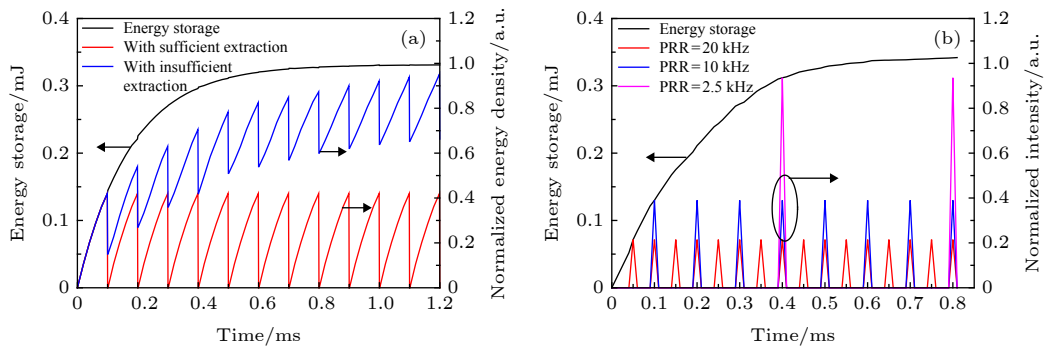


图 2 抽运功率 5 W 时有源纤储能及 (a) 不同提取效率下归一化储能密度随时间的变化 (PRR = 10 kHz), (b) 放大级输出脉冲强度与种子光重复频率之间的关系

Fig. 2. Energy storage with 5 W launched pump power and (a) normalized energy density with different extraction efficiency as a function of time (PRR = 10 kHz), (b) the relationship between output pulse intensity and seed PRR.

也可以反映有源光纤储能随时间的变化关系.

当有源光纤储能降到饱和值的 $(1 - 1/e)$ 倍时, 由 (6) 式可知

$$\exp \left[- \left(\frac{\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z)}{hcA} + \frac{1}{\tau} \right) t \right] = \frac{1}{e},$$

化简该式可得

$$\frac{1}{t} = \frac{\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e) P_p(z)}{hcA} + \frac{1}{\tau}. \quad (7)$$

令 $K = \frac{\Gamma_p \lambda_p (\sigma_a + \sigma_e)}{hcA}$, 理论上对于给定的有源光纤 K 应该为确定的值, (7) 式可写成如下形式:

$$\frac{1}{t} = K P_p(z) + \frac{1}{\tau}, \quad (8)$$

可知 $1/t$ 和 $P_p(z)$ 呈线性关系, 如能实现对光纤储能过程的实验测量, 理论上根据测量数据及有源光纤自身参数就可以得到有源光纤中掺杂稀土离子的上能级寿命 τ . 由于实验上难以实现对光纤储能过程的直接测量, 具体测量时, 我们利用不同 PRR 种子光放大过程的能量特性来反映有源光纤储能的变化. 由前面分析可知, 在脉冲种子光的放大过程中, 因为有源纤的储能时间等于种子光的脉冲间隔 (或种子光 PRR 值的倒数), 所以 (8) 式中的 $1/t$ 可用种子光 PRR 值代替. 通过实验可以测量有源纤放大后输出脉冲能量下降到 PRR 较低时 (< 1 kHz) 输出脉冲能量的 $(1 - 1/e)$ 倍时的 PRR 值, 以常用的掺镱脉冲光纤激光放大器为例, 图 3 给出了在抽运功率 3 W 时激光器输出单脉冲能量随种子光 PRR 变化的关系曲线.

当种子光 PRR 较低 (< 1 kHz) 时, 脉冲能量随种子光 PRR 变化不明显, 其平均值约为 $125 \mu\text{J}$; 而随着种子光 PRR 的继续增大, 其输出能量由于储能时间的变短而发生明显下降, 当输出单脉冲能量下降 $(1 - 1/e)$ 倍到 $79 \mu\text{J}$ 时, 对应的种子光 PRR 为 3 kHz, 该值即为 (8) 式中时间项的倒数 $1/t$, 理论上代回 (8) 式即可得到激活离子的上能级寿命. 但实际测量中, K 不仅与有源光纤自身参数有关, 熔接点损耗、种子光脉冲能量大小、有源光纤长度等的影响也会在 K 值上体现, 导致 K 不能准确计算. 为克服这一问题, 我们在改变抽运功率后重复上述实验操作, 可以获得一系列单脉冲能量下降到 $(1 - 1/e)$ 倍时的 PRR 值; 对测量数据进行线性拟合得到抽运功率 $P_p(z)$ 和该 PRR 值的关系, 拟合线在 PRR 坐标轴上截距的意义为 $P_p(z) = 0$,

此时式 (7) 变为 $1/t = 1/\tau$, 即拟合线在 PRR 坐标轴上截距的倒数为该有源光纤中稀土离子上能级寿命. 通过取拟合线在 PRR 坐标轴上的截距, 克服了 K 值改变导致的测量困难; 另外, 对不同抽运功率下的数据进行线性拟合本身也体现了多次测量取平均的过程.

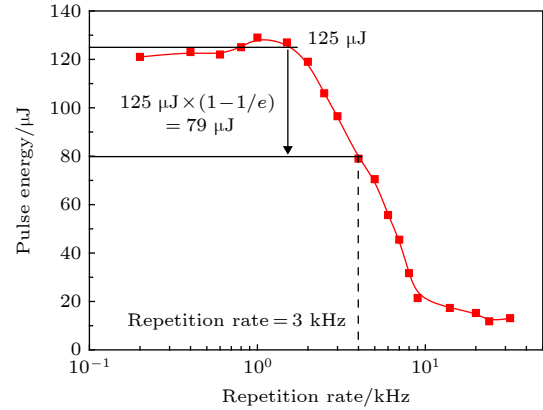


图 3 输出脉冲能量与种子光重复频率关系曲线 (抽运功率 3 W)

Fig. 3. Output pulse energy as a function of PPR (3 W launched pump power).

3 实验结果与讨论

为验证上述有源光纤中稀土离子能级寿命测量理论模型的合理性, 以掺镱有源光纤中 Yb^{3+} 的能级寿命测量为例, 我们设计了如图 4 所示的实验系统.

系统由种子源 (Seed laser)、预放大级 (Pre-amplifier) 和功率放大级 (Power amplifier) 三部分组成, 待测有源光纤用做功率放大级的增益光纤. Agilent 81160 A 型任意波形发生器 (AWG) 控制种子源激光器 (中心波长 1064.3 nm, 峰值功率 3 mW) 产生 PRR 和脉宽可调的种子光. 为保证种子光能够充分提取待测有源光纤中存储的能量, 首先由预放大级对种子光进行预放大. 预放大级熔接的包层光剥离器 (CLS) 用于滤除多余的抽运光, CLS 后熔接中心波长 1064 nm、带宽 3 nm 的带通滤波器 (BPF) 用于滤除 ASE 光, BPF 后熔接隔离器 (ISO) 防止功率放大级产生的后向光损坏前级器件. 预放大后的种子光和中心波长为 976 nm 的抽运光由 $(2 + 1) \times 1$ 合束器 (Combiner) 耦合到待测光纤中, 待测光纤后通过 CLS 滤除多余抽运光, 并在输出端切 8° 角以减少端面反射, 最终输出

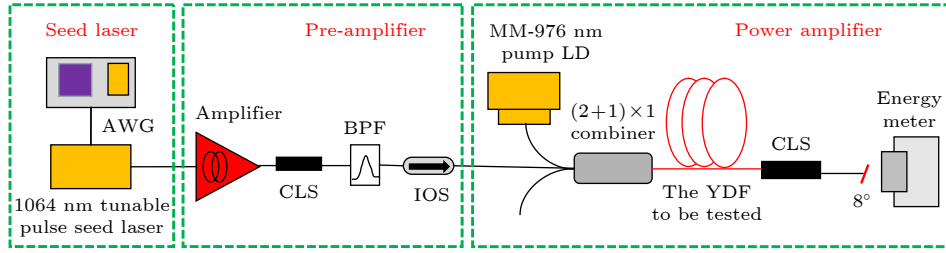


图 4 基于掺镱光纤激光放大器的激光上能级寿命测量实验装置

Fig. 4. Experimental setup of the Ytterbium-doped amplifier in the upper-laser-level lifetime measurement.

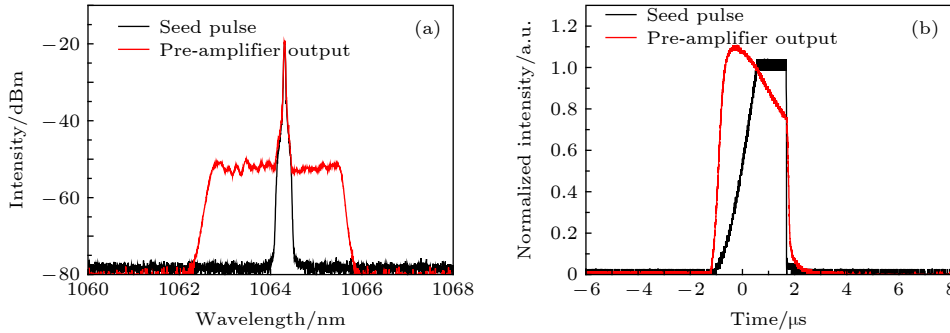


图 5 种子光 PRR 为 1 kHz、脉宽为 2.25 μ s 时 (a) 预放大前后光谱, (b) 预放大前后脉冲形状

Fig. 5. (a) Optical spectra and (b) pulse waveform of the seed pulse and pre-amplifier output (seed PRR of 1 kHz and pulse duration of 2.25 μ s).

的脉冲光由 OPHIR PE10-C 型脉冲能量计进行探测。

实验中将种子光 PRR 和脉宽分别设置为 1 kHz 和 2.25 μ s 时, 对种子源输出光谱及脉冲形状和经预放大级放大后的光谱及脉冲形状进行了监测, 如图 5(a) 和图 5(b) 所示. 由于脉冲光放大过程中前沿增益大于后沿, 为提高放大后单脉冲能量和系统稳定性, 种子光脉冲前沿设置为 1.5 μ s, 经预放大后获得了信噪比 30 dB 单脉冲能量 11 μ J 的脉冲光输出. 利用该系统分别对 1 m 长 Liekki 公司的 LMA-YDF-12/125 光纤 (包层吸收系数为 11 dB/m @976 nm)、Nufern 公司的 PLMA-YDF-10/125-M 光纤 (包层吸收系数为 4.95 dB/m @976 nm) 和 SM-YDF-5/130 光纤 (包层吸收系数为 1.65 dB/m @976 nm)、以及纤芯/包层直径为 6/125 μ m 的掺 Yb³⁺ 双包层光纤 (包层吸收系数为 0.8 dB/m @976 nm) 进行了测量. 测量结果如图 6 所示.

可以看出, 拟合直线在 PRR 轴 (纵轴) 上的截距分别为 1.58, 1.53, 1.30, 1.18 kHz, 对应的倒数 0.63, 0.65, 0.77, 0.85 ms 分别为四种有源光纤中 Yb³⁺ 的上能级寿命. 测量结果与文献 [6,13,14] 中

提到的光纤中 Yb³⁺ 能级寿命值符合.

根据双包层有源光纤掺杂粒子数密度计算公式

$$N = \frac{A_{\text{clad}}}{A_{\text{core}}} \cdot \frac{\alpha_p}{10 \lg e \cdot \sigma_{\text{ap}}}, \quad (9)$$

可求得被测光纤掺杂粒子数密度, 式中 A_{clad} 是包层面积、 A_{core} 是纤芯面积、 α_p 是光纤对 976 nm 抽运光的吸收系数、 σ_{ap} 是 Yb³⁺ 对 976 nm 抽运光的受激吸收截面. 由 (9) 式可计算得, LMA-YDF-12/125 掺杂粒子数密度为 $1.06 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$, SM-YDF-5/130 掺杂粒子数密度为 $9.88 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$, PLMA-YDF-10/125-M 掺杂粒子数密度为 $6.85 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$, YDF-6/125 掺杂粒子数密度为 $3.08 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$. 结合前面对 Yb³⁺ 寿命的测量结果可以看出, Yb³⁺ 粒子数密度越大测得的寿命越小, 这与激光玻璃或晶体中 Yb³⁺ 寿命随掺杂粒子数密度的变化趋势是一致的.

上述四种有源光纤中 Yb³⁺ 的上能级寿命是在种子光脉冲能量 11 μ J 的条件下测得的, 根据有源光纤中稀土离子能级寿命测量理论模型可知, 在保证种子光充分提取有源光纤储能条件下, 测量结果不应随种子光能量变化而改变. 为检验这一推

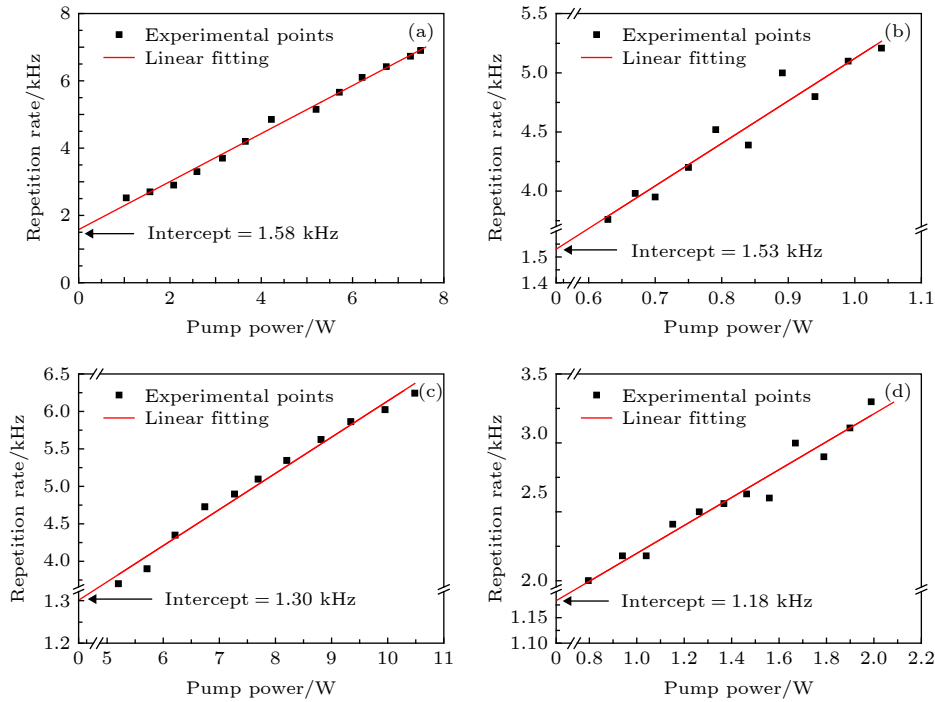


图 6 激光上能级寿命测量结果 (a) LMA-YDF-12/125 光纤; (b) SM-YDF-5/130 光纤; (c) PLMA-YDF-10/125-M 光纤; (d) YDF-6/125 光纤

Fig. 6. Upper-laser-level lifetime measurement result of (a) LMA-YDF-12/125, (b) SM-YDF-5/130, (c) PLMA-YDF-10/125-M and (d) YDF-6/125 fibers.

论, 我们用不同能量的种子光对 Nufern 公司的 PLMA-YDF-10/125-M 光纤进行了测量, 测量结果如图 7 所示.

注入到有源光纤放大级的种子光脉冲能量为 11, 16, 25 μJ 时, 对应的测量结果在 PRR 坐标轴上的截距分别为 1.30, 1.31, 1.31 kHz. 虽然拟合直线斜率不同, 但它们在 PRR 坐标轴上的截距是一致的. 考虑到测量误差的影响, 当种子光脉冲能量

能充分提取有源光纤储能时, 可以认为种子光脉冲能量不影响测量结果. 这与实验预期相符, 进一步证明了该理论模型的合理性.

4 结 论

本文提出了一种测量有源光纤中稀土离子上能级寿命的方法: 基于速率方程理论可以得到脉冲光纤放大器中反转粒子数和有源光纤储能随泵浦功率和时间的变化关系, 而在保证种子光对储能充分提取的前提下, 有源光纤中的储能可以通过放大器的输出能量反映出来. 因此, 实验测量不同泵浦功率下光纤激光放大器输出单脉冲能量随种子光脉冲重复频率的变化关系, 即可计算得到激活离子的激光上能级寿命. 根据理论模型实验搭建了 $1.06 \mu\text{m}$ 掺 Yb^{3+} 脉冲激光放大系统对几种常用掺 Yb^{3+} 光纤的激光上能级寿命进行了测量, 测量结果与其他研究人员相关报道中的结果相符, 验证了该方法和理论模型的合理性.

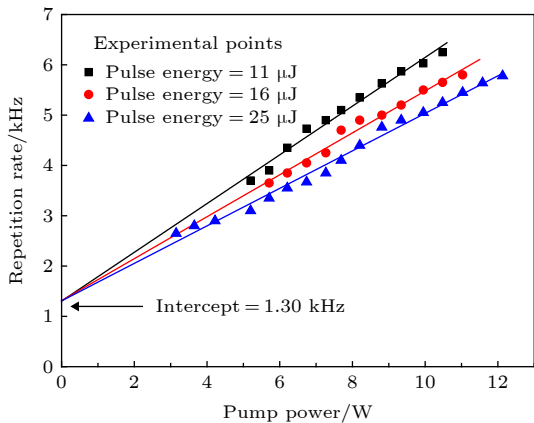


图 7 种子光脉冲能量为 11, 16, 25 μJ 时对 PLMA-YDF-10/125-M 光纤的测量结果

Fig. 7. Test results of PLMA-YDF-10/125-M at 11 μJ , 16 μJ and 25 μJ seed pulse energy.

参考文献

[1] Fu S J, Shi W, Feng Y, Zhang L, Yang Z G, Xu S H, Zhu X

- S, Norwood R A, Peyghambarian N 2017 *J. Opt. Soc. Am. B* **34** A49
- [2] Pask H M, Carman R J, Hanna D C, Tropper A C, Mackechnie C J, Barber P R, Dawes J M 1995 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **1** 2
- [3] Sintov Y, Glick Y, Koplowitz T, Nafcha Y 2008 *Opt. Commun.* **281** 1162
- [4] Geng J H, Wu J F, Jiang S B, Yu J R 2007 *Opt. Lett.* **32** 355
- [5] Vivona M, Kim J, Zervas M N 2018 *Opt. Lett.* **43** 4097
- [6] Paschotta R, Nilsson J, Barber P R, Caplen J E, Tropper A C, Hanna D C 1997 *Opt. Commun.* **136** 375
- [7] Guo Y, Zheng X, Ming H, Zhang Q J 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1337
- [8] Jiang H M, Yang B S, Li H L, Xu H L 2013 *Chin. Opt.* **6** 5 (in Chinese) [蒋红玫, 杨博思, 李贺龙, 徐淮良 2013 *中国光学* **6** 5]
- [9] Lu T X, Lu Y Q 2009 *Principle and Application of Laser Spectroscopy* (Hefei: University of Science and Technology of China Press) pp170–193 (in Chinese) [陆同兴, 路铁群 2009 *激光光谱技术原理及应用* (合肥: 中国科学技术大学出版社) 第170—193页]
- [10] Li A H, Zheng Z R, Lü Q, Xu Z P, Xu C, Xu Y H, Liu W L 2011 *Opt. Lett.* **36** 1056
- [11] Biémont E, Quinet P, Dai Z W, Jiang Z K, Zhang Z G, Xu H L, Svanberg S 2002 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **35** 4743
- [12] Tang G W, Qian G Q, Shi Z G, Liu Y, Huang B W, He Y C, Jiang L C, Sun M, Qian Q, Yang Z M 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 362
- [13] Piccoli R, Mechin D, Robin T, Taccheo S 2013 *Opt. Lett.* **38** 4370
- [14] Newell T C, Peterson P, Gavrielides A, Sharma M P 2007 *Opt. Commun.* **273** 256
- [15] Ou P 2014 *Advanced Optical Simulation* (second edition) (Beijing: Beihang University Press) p296 (in Chinese) [欧攀 2014 *高等光学仿真(第2版)* (北京: 北京航空航天大学出版社) 第296页]
- [16] Giles C R, Desurvire E 1991 *J. Lightwave Technol.* **9** 271
- [17] Wang Y, Martinez-Rios A, Po H 2003 *Opt. Commun.* **224** 113
- [18] Hardy A, Oron R 1997 *IEEE J. Quantum Elect.* **33** 307
- [19] Huang L, Dai Z Y, Liu Y Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6992 (in Chinese) [黄琳, 代志勇, 刘永智 2009 *物理学报* **58** 6992]

Upper-laser-level lifetime measurement of rear earth dopant in active fiber*

Liu Heng¹⁾²⁾ Zhang Jun-Xiang¹⁾²⁾ Fu Shi-Jie³⁾ Sheng Quan^{1)2)†}
Shi Wei^{1)2)‡} Yao Jian-Quan¹⁾²⁾

1) (*Institute of Laser and Optoelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

2) (*Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology (Ministry of Education),
Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

3) (*College of Optical Science, University of Arizona, Arizona 85721, USA*)

(Received 26 April 2019; revised manuscript received 25 July 2019)

Abstract

The upper-laser-level lifetime (fluorescence lifetime) of the rear earth dopant in the active fiber is a key parameter which indicates the performance of the fiber, and takes an important role in designing the laser system. However, the accurate measurement of fluorescence lifetime in active fiber remains challenging, which mainly rely on the direct measurement of laser induced fluorescence lifetime of the active fiber or lifetime measurement of bulk laser glass. The former method suffers the error due to the amplified spontaneous emission and the reabsorption process, while the latter ignores the influence of high temperature and tension produced during the fiber drawing on the emission behavior of the material. Therefore, the accuracy of these measurements can become a problem. In this work, we propose a new approach to measuring the upper-laser-level lifetime of the rear earth dopant in the active fiber based on the power/energy performance of the fiber amplifier. The population inversion, i. e. the energy storage, in the active fiber of a fiber amplifier is a function of upper-laser-level lifetime. Therefore, the upper-laser-level lifetime can be derived by measuring the average power or output pulse energy of the amplifier, given that the energy storage in the active fiber is extracted adequately by a seed laser. Using the rate equations, we model the population inversion and energy storage in the active fiber each as a function of pump power and time, and the resulting relationship between the upper-laser-level lifetime and the average output power. The upper-laser-level lifetimes of several commercial Yb-doped active fibers are experimentally measured by this method through using the fibers as the gain media of the amplifier operated at 1064 nm. The convenience of experimental data processing is also discussed. The measured lifetime and evolution trend of the lifetime with dopant concentration exhibit that they are in good agreement with those from other reports and the theoretical model, which verifies the feasibility of this method.

Keywords: upper-laser-level lifetime, active fiber, fiber laser, fiber amplifier

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.50.Nn, 42.81.Cn

DOI: 10.7498/aps.68.20190616

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017 YFF0104603) and 111 Project, China (Grant No. B17031).

† Corresponding author. E-mail: shengquan@tju.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: shiwei@tju.edu.cn