

文章编号: 1001-3806(2015)06-0815-05

OPCI 系统不同掺杂截面 EYDFA 增益瞬态的比较

占生宝¹, 闻 军¹, 吴 磊¹, 丁 健²

(1. 安庆师范学院 物理与电气工程学院, 安庆 246133; 2. 滁州学院 电子与电气工程学院, 滁州 239000)

摘要: 为了研究分组与线路集成系统中突发模式大功率 Er/Yb 共掺光纤放大器 (EYDFA) 的瞬态性能, 在函数极限的基础上采用迭代算法, 建立了基于非线性方程速率方程的、不同掺杂截面 EYDFA 增益瞬态的比较模型, 分析比较了有/无反馈条件下, 不同掺杂截面的光分组 (OPS) 和光线路交换 (OCS) 输出信号的增益瞬态。结果表明, 无反馈条件下, 纤芯直径为 $4.6\mu\text{m}$ 的 EYDFA, 其 OPS 和 OCS 输出信号功率漂移小于纤芯直径为 $3.6\mu\text{m}$ 的 EYDFA, 功率漂移的改善约为 12%; 带反馈条件下, 增大掺杂光纤直径, 弛豫振荡导致的 EYDFA 增益抖动随之减小。故增大掺杂光纤直径, 能有效抑制 EYDFA 反馈环路的弛豫振荡。

关键词: 光通信; 增益瞬态; 迭代算法; Er/Yb 共掺双包层光纤; 光纤放大器

中图分类号: TN253 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.018

Gain transient performance of Er/Yb co-doped fiber amplifiers in optical packet and circuit integrated network

ZHAN Shengbao¹, WEN Jun¹, WU Lei¹, DING Jian²

(1. College of Physics and Electrical Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246133, China; 2. School of Electronic and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: In order to investigate gain transient performance of burst-mode high-power Er/Yb co-doped fiber amplifier (EYDFA) in optical packet and circuit integrated network, comparison mode of gain transient performance of EYDFA with different doping area was proposed by adopting iterative algorithm of nonlinear rate-equations based on function limit. Gain transient performance of optical packet switching and optical circuit switching output signals with/without optical feedback, are analyzed and compared in detail. The results show that the maximum improvements of gain excursion for EYDFAs without optical feedback are about 12% when the core diameter of double-clad fiber changes from $3.6\mu\text{m}$ to $4.6\mu\text{m}$. The gain fluctuation of EYDFAs with optical feedback caused by relaxation oscillation decreases with the increase of core diameter. The analysis suggests that relaxation oscillation of EYDFA feedback loop will be suppressed by enlarging active core diameter of doped fiber.

Key words: optics communication; gain transient; iterative algorithm; Er/Yb co-doped double-clad fiber; fiber amplifier

引 言

为应对全球每年超过 50% 的业务增长需求^[1-2], 一种融合光分组 (optical packet switching, OPS) 与光线路交换 (optical circuit switching, OCS) 于同一网络基础的光分组与线路节点 (optical packet and circuit integration, OPCI) 系统正成为当前的研究热点^[3-5]。OPCI 节点系统将依据用户需求, 被设计成同时支持 OPS 和 OCS 业务, 并在二者之间执行波长资源的动态分配。由此可见, 该 OPCI 系统, 其放大器的作用不仅是补偿

信号传输、更重要的是弥补信号处理所引起的能量损耗。因此, 高增益、快速响应是该节点系统的必然要求。众所周知, 掺铒光纤放大器 (Er³⁺-doped fiber amplifier, EDFA) 是当前最流行的光纤放大器, 但该型放大器由于存在浓度猝灭缺陷^[6], 导致高增益信号需经过多级多通放大^[7], 由此带来生产成本的增加。为克服该问题, 大功率、双包层铒钇共掺光纤放大器 (Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double-clad fiber amplifier, EYDFA) 有望成为 OPCI 系统的理想放大器。

针对 EDFA 的增益瞬态, 参考文献[8]中提出了一种增大掺铒光纤 (Er-doped fiber, EDF) 纤芯截面的辅助抑制方法。借鉴该方法, 作者对 OPCI 系统中, 不同掺杂纤芯截面的大功率、双包层 EYDFA 增益瞬态及抑制效果进行比较, 结果表明, 随着掺杂纤芯面积的增大, EYDFA 的增益瞬态、反馈引起的弛豫振荡能够

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目 (1308085MF92)

作者简介: 占生宝 (1967-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事光纤激光技术方面的研究。

E-mail: zhanshb@aliyun.com

收稿日期: 2014-12-28; 收到修改稿日期: 2014-01-05

得到有效抑制。

1 理论模型

1.1 增益瞬态模型

参考文献[9]中对抽运光作用下的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺晶系进行了详细研究,结果表明,当抽运光作用于 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺晶系时, Yb^{3+} 首先受激,然后将能量扩散至 Er^{3+} ,导致 Er^{3+} 受激跃迁。整个抽运过程, Yb^{3+} 仅为敏化中介。由此,参考文献[10]中推导的 EDFA 瞬态响应公式可运用于 EYDFA,该公式为:

$$G'(0) = \frac{G(\infty) - G(0)}{\tau} \left[1 + \sum_{j=0}^j \frac{P_{\text{out}}(\lambda_j)}{P_{\text{is}}(\lambda_j)} \right] \quad (1)$$

$$P_{\text{is}}(\lambda_j) = \frac{h\nu S}{[\sigma_a(\lambda_j) + \sigma_e(\lambda_j)] \Gamma \tau} \quad (2)$$

式中, $G(0), G(\infty)$ 分别为 EYDFA 瞬态前、后的稳态增益; $G'(0)$ 为增益漂移的初始斜率; τ 为 Er^{3+} 上能级固有粒子寿命; P_{out} 为波长信道的输出功率, P_{is} 为波长信道的固有饱和功率; λ_j 为多路信号的第 j 路信号波长; S 为纤芯面积, σ_a, σ_e 分别为 Er^{3+} 吸收和辐射面积; Γ 为 Er^{3+} 与光模场之间的填充因子; h 为普朗克常数, ν 为光频率。

(2)式表明:当 σ_a, σ_e, ν 等参量确定时, EYDFA 信道固有饱和功率 P_{is} 为常数,如此情况下,由(1)式可知,放大器增益瞬态可看作是各信道输出功率的函数,由此,当所有信道输出功率相同时,不同 EYDFA 增益瞬态的比较是可行的。

1.2 增益瞬态比较模型

由第 1.1 节可知,要实现不同截面 EYDFA 的增益瞬态比较,必须首先求解出 EYDFA 的多信道输出功率,并使其相等。然而,由于非线性项的存在, EYDFA 速率方程无解析解。为此,参考文献[11]中采用了简化的速率方程,该简化由于忽略众多物理过程,计算结果可能会出现偏差,针对该情况,参考文献[12]中提出了一种 EYDFA 的迭代算法,其理论依据是:

$$\lim_{\Delta T \rightarrow 0} N_{i+1}(t + \Delta T) = N_i(t) + \Delta T dN_i(t)/dt \quad (3)$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} P_{i+1}(z + \Delta z) = P_i(z) + \Delta z dP_i(z)/dz \quad (4)$$

式中, N_{i+1}, N_i 分别表示以时刻 t 为参考点,经 ΔT 时间的前、后时刻粒子数;而 P_{i+1}, P_i 则表示以光纤某一位位置 z 为参考点,截取长度为 Δz 的第 $i+1$ 和 i 点上所传输的信号功率;由此定义,可得到 $\Delta T, \Delta z$ 的关系为: $\Delta T = \Delta z/c$,其中, c 为介质中传输的光速。

假设 EYDFA 为前向抽运,在设置起始时刻上能级 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 数量为 0 的情况下,运用(3)式和(4)式对两种不同截面 EYDFA 速率方程^[12]进行迭代,得到

相同输出功率的算法流程如图 1 所示。

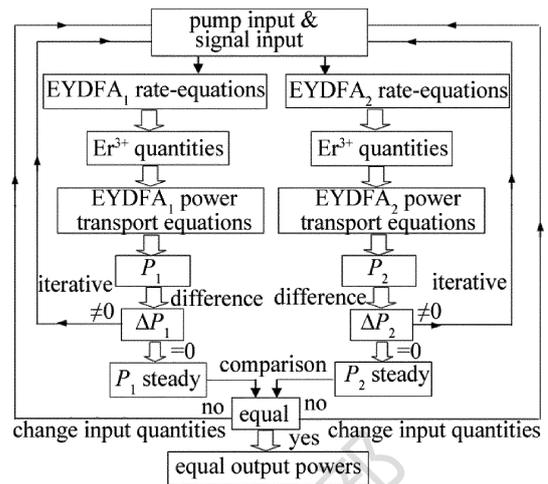


Fig. 1 Algorithm flows of EYDFA output powers

图中,下标 1,2 用以区分 EYDFA₁ 和 EYDFA₂, P 表示输出信号功率; ΔP 为本次与上一次输出功率之差。

在获得不同 EYDFA 抽运和输入信号功率的前提下,运用图 1 所示流程,可进行两种不同 EYDFA 的增益瞬态比较;而对于全光增益钳制方案^[13],运用(3)式和(4)式,可得到增益钳制比较流程,如图 2 所示。

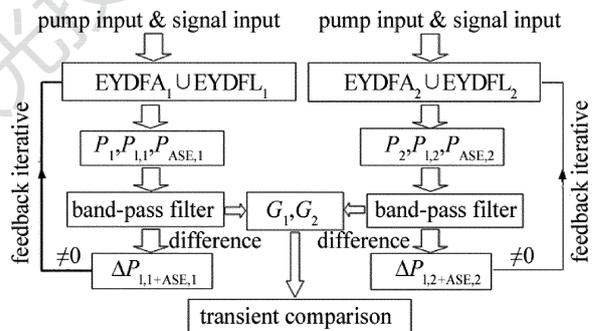


Fig. 2 Comparison flows of gain transient

图中, EYDFL (Er/Yb co-doped fiber laser) 为与 EYDFA 对应的环形腔光纤激光器; P_1, P_{ASE} 分别为产生的激光功率、放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 光功率; $\Delta P_{1+\text{ASE}}$ 为本次与上一次激光、自发辐射光输出功率之差; G 为 EYDFA 的信号增益。

1.3 相关参量

分析中使用的两种光纤分别为 Nufem 公司和加拿大国家光学研究所生产的双包层 EYDF 光纤(其对应的放大器分别设为 EYDFA₁ 和 EYDFA₂), 两种光纤的相关参量为:纤芯圆形,直径和数值孔径分别为 $3.6\mu\text{m}, 4.6\mu\text{m}, 0.18, 0.18$;内包层分别为圆形、正六边形,直径和数值孔径分别为 $250\mu\text{m}, 200\mu\text{m}, 0.45, 0.35$ 。模拟时,两种光纤的掺杂浓度设为相同,光纤长度分别设为 15m 和 11m, Δz 设为 0.1m。其它参量的值见表 1^[12-14]。表中, $[]$ 表示离子浓度; λ 为抽运波

长和 3 路信号波长; τ 为上能级固有粒子寿命; α 为背景损耗; σ 为 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 的吸收和辐射截面积; C_{cr} 为速率方程中从 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 的能量传递系数; C_{up} 表示 ${}^4\text{I}_{13/2}$

和 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级之间的均匀上转换系数; C_{14} 分别表示从 Er^{3+} 的 ${}^4\text{I}_{15/2}$ 和 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级到 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级的交叉弛豫系数; n 为折射率。

Table 1 Relevant calculation parameters

parameter	values	parameter	values	parameter	values
$[\text{Er}^{3+}]$	$4.8 \times 10^{25}/\text{m}^3$	$\tau_{\text{Er},2}/\text{s}$	11×10^{-3}	$\sigma_{\text{Er},a}(\lambda_p)/\text{m}^2$	2.0×10^{-25}
$[\text{Yb}^{3+}]$	$5.0 \times 10^{26}/\text{m}^3$	$C_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2.96×10^{-22}	$\sigma_{\text{Er},a}(\lambda_{s,1})/\text{m}^2$	2.75×10^{-25}
λ_p/nm	980	$C_{\text{up}}, C_{14}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	4.464×10^{-24}	$\sigma_{\text{Er},e}(\lambda_{s,1})/\text{m}^2$	3.395×10^{-25}
$\lambda_{s,1}/\text{nm}$	1550	$\alpha_s, \alpha_p/\text{m}$	3.45×10^{-3}	$\sigma_{\text{Er},a}(\lambda_{s,2})/\text{m}^2$	2.110×10^{-25}
$\lambda_{s,2}/\text{nm}$	1558	$\sigma_{\text{Yb},a}(\lambda_p)/\text{m}^2$	2.5×10^{-25}	$\sigma_{\text{Er},e}(\lambda_{s,2})/\text{m}^2$	2.780×10^{-25}
$\lambda_{s,3}/\text{nm}$	1560	$\sigma_{\text{Yb},e}(\lambda_p)/\text{m}^2$	5.0×10^{-25}	$\sigma_{\text{Er},a}(\lambda_{s,3})/\text{m}^2$	1.970×10^{-25}
$\tau_{\text{Yb},2}/\text{s}$	1.5×10^{-3}	n	1.5	$\sigma_{\text{Er},e}(\lambda_{s,3})/\text{m}^2$	2.630×10^{-25}

2 理论分析

为简便,分析时以一路 1550nm 信号代替多路 OPS 信号,而以一路 1558nm 信号代替多路 OCS 信号。依据表 1 中所给参量,按图 1 中所示流程,可计算出:对于 EYDFA₁,其抽运、OPS 和 OCS 输入信号功率分别为 1.445W, 0.3085mW, 0.2553mW;而对于 EYDFA₂,其抽运、OPS 和 OCS 输入信号功率分别为 1W, 0.2149mW, 0.1453mW 时,两个放大器输出的 OPS 和 OCS 信号功率均相等。

2.1 不同掺杂纤芯截面输出增益的比较

在进行增益瞬态比较之前,首先说明不同掺杂截面对放大器输出增益的影响。假设放大器的相关参量与 EYDFA₂ 完全相同,仅改变掺杂纤芯面积,可得到光纤长度最优条件下、抽运功率为 1W 时,1550nm 小信号输出信号增益随纤芯半径的变化,如图 3 所示,其中 ΔG 为增益波动。从图 3 可知,随着纤芯半径的增加, EYDFA 的输出信号增益逐渐增大,其原因可从 (2) 式、模场填充因子公式^[15] 得到解释:当纤芯半径增大时,放大器的饱和功率减小,由此导致输出信号增益的增加。从图 3 还可以看出,当纤芯半径在 1.2 μm ~ 1.8 μm 范围内变化时,输出信号增益变化范围较大,而当纤芯半径大于 1.8 μm 时,输出信号的增益变化范围较小。出现该情况的原因是:当纤芯半径较小时,其一,最佳输出信号增益的光纤长度较长,导致增益的衰

减增大,因此输出信号增益较小;其二,由模场填充因子公式^[15] 可知,在相同的输出波长下,当纤芯半径较小时,填充因子 Γ 随纤芯半径变化较大,因此输出信号增益的变化较大。反之,当纤芯半径从 1.8 μm 变化值 2.3 μm 时,填充因子 Γ 随纤芯变化较小,由此输出信号增益的变化也较小,这从图 3 能得到清楚的反映,当纤芯半径从 1.8 μm 变化值 2.3 μm 时,增益变化范围仅为 0.08dB。

2.2 无反馈时增益瞬态的比较

2.2.1 OPS 信号功率瞬态的比较 假设 OPS 信号包长为 1.64 μs ,包率为 10%^[16],可得到稳态时 EYDFA₁ 和 EYDFA₂ 的 OPS 输出信号功率随时间变化见图 4。

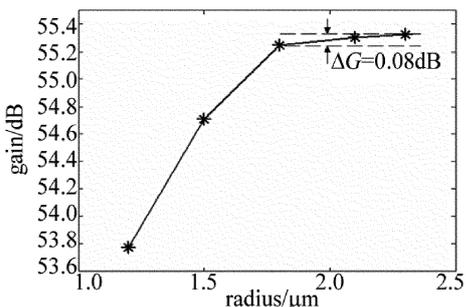


Fig. 3 Relationship between signal gain and core radius

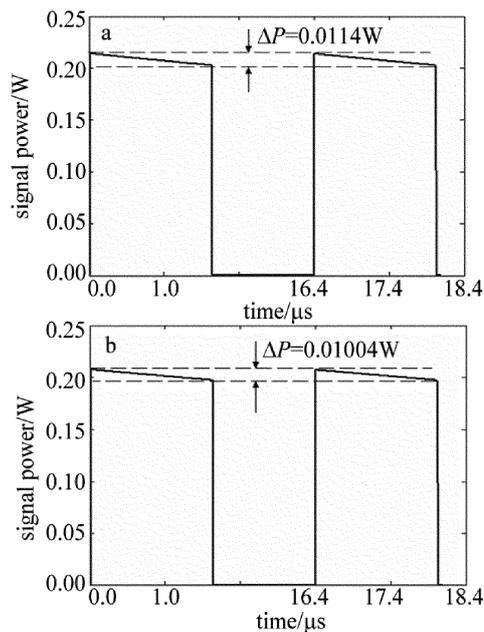


Fig. 4 a—OPS signal power changing with time in EYDFA₁ b—OPS signal changing with time in EYDFA₂

从图 4a 可以看出,对于 EYDFA₁,当 OPS 输出信号处于稳态时,其最大、最小输出功率分别为 0.2140W, 0.2026W, 功率漂移 ΔP 约为 0.0114W;而对于 EYDFA₂,由图 4b 可以看出,当 OPS 输出信号处于

稳态时,其最大、最小输出功率分别为 0.20747W, 0.19743W,功率漂移 ΔP 约为 0.01004W。依据(1)式可计算出:当掺杂纤芯直径从 3.6 μm 提高到 4.3 μm 时,功率漂移的改善约为 12%。

2.2.2 OCS 信号增益瞬态的比较 在上述 OPS 信号包长和包率不变的情况下,假设 OCS 信号为连续信号,可得到稳态时 EYDFA₁ 和 EYDFA₂ 的输出信号增益随时间的变化,如图 5 所示。

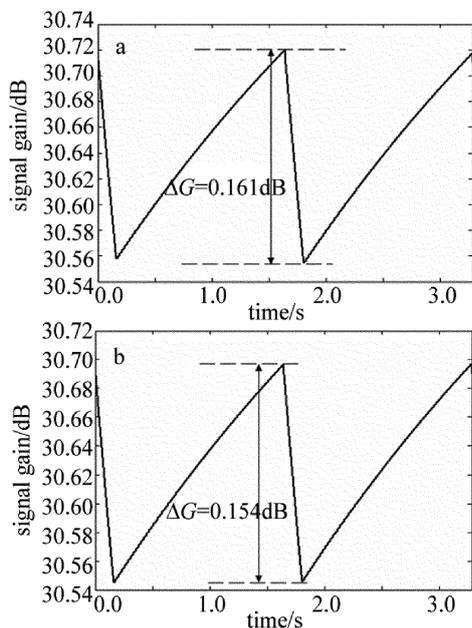


Fig. 5 a—OCS signal gain changing with time in EYDFA₁ b—OCS signal gain changing with time in EYDFA₂

从图 5 可以看出,稳态时,OCS 信号增益从 0 时刻开始下降,至 1.64 μs 到达最小值,然后又开始增大,至 16.4 μs 达到最大值。增益信号出现抖动的原因是:在 0 μs ~ 1.64 μs 时间段,由于 OPS 信号的加入,其输出信号必然消耗放大器部分增益,由此导致 OCS 输出信号增益的降低;而在 1.64 μs ~ 16.4 μs 时间段,由于 OPS 信号的撤除,放大器仅放大 OCS 信号,因此其增益必然增加,正是由于 OPS 信号的增/撤,导致了 OCS 增益的抖动。对于 EYDFA₁,从图 5a 可以看出,增益波动 ΔG 的量值为 0.161dB;而对于 EYDFA₂,从图 5b 可以看出, $\Delta G = 0.154\text{dB}$,由(1)式可计算出:此时增益波动的改善也为 12%。

2.3 带反馈时增益瞬态的比较

参考文献[13]中给出了一种环形腔增益钳制方案,基于该方案,运用图 2 所示的比较流程,可对不同掺杂截面 EYDFA 的增益瞬态进行比较。

2.3.1 小信号增益随衰减系数的比较 基于参考文献[13]中给出的反馈结构,假设反馈信号波长为 1560nm,可得到 EYDFA₁ 和 EYDFA₂ 小信号放大时,波长为 1550nm 信号增益随反馈环衰减系数 β 变化的

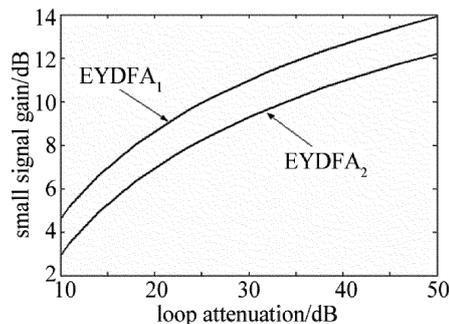


Fig. 6 Relationship between small signal gain and loop attenuation of each EYDFA

曲线,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,随衰减系数的增大,无论是对于 EYDFA₁ 和 EYDFA₂,其小信号增益都逐渐增大。小信号增益随衰减系数增大的原因是:由于反馈回路的加入,EYDF 与反馈回路之间形成环形激光器,产生出稳定的、波长为 1560nm 谐振光,该激光经衰减环路回到 EYDF 的起始端而成为谐振种子光,当环路衰减较小时,种子光较大,由其诱导的反转粒子数较多,从而导致上能级反转粒子数减小,而信号光是在该较少的反转粒子数基础上被诱导跃迁,因此,输出信号增益较小。反之,当反馈回路衰减较大时,回到 EYDF 起始端的谐振光较小,由其诱导的反转粒子数也较少,结果输出信号光增益较大。而增大掺杂纤芯面积,小信号增益较小的原因是: S (纤芯截面积) 增大,由(2)式可知,谐振光固有饱和功率增大,在同样的衰减条件下,回到 EYDF 起始端的激光功率较大,由此导致上能级反转粒子数减小,因此小信号放大时的信号增益减小。

2.3.2 OPS 信道变化时 OCS 增益波动的比较 假设反馈信号波长为 1560nm,环路的衰减系数 $\beta = 20\text{dB}$; OPS 信号包长为 25 μs ,包率为 10% [16],OCS 为连续信号。依据图 2,可得到 EYDFA₁ 和 EYDFA₂ 中 OPS 信号改变时,OCS 信道增益波动随时间的变化如图 7 所示。

从图 7 可以看出,从 0 时刻开始,当 OPS 和 OCS 信号同时进入 EYDFA 时,OCS 信道增益出现上下波动,至 25 μs ,当 OPS 信道撤除时,该波动显著增大,且输出增益略有减小。信号增益波动的原因是:当 OPS 和 OCS 信号进入放大器时,原来由 1560nm 自发辐射经反馈形成的稳定激光振荡被破坏,激光链路将在新的反馈基础上产生新的振荡,由此导致 OPS 和 OCS 信号将在激光弛豫振荡基础上进行反转粒子数的跃迁,因此其增益也必然出现波动。而当 OPS 信号撤除时,OCS 信号增益抖动增大、且随时间增加,输出信号略有减小的原因是:在抽运功率不变的情况下,OPS 信号撤除,导致 1560nm 放大自发辐射光增强,由此反馈回到

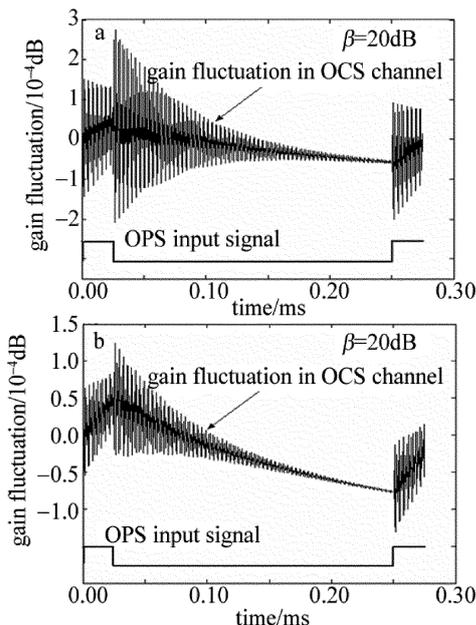


Fig. 7 Gain fluctuation of OCS channel
a—EYDFA₁ b—EYDFA₂

起始端的放大自发辐射光增大,从而导致 EYDF 上能级反转粒子跃迁增大,而 OCS 信号放大是在弛豫振荡基础上的反转粒子数的跃迁,因此增益的抖动也增大;又由于上能级反转粒子跃迁增大消耗了上能级更多的反转粒子数,因此上能级反转粒子数减小,导致 OCS 信号放大增益也减小。进一步从图 7a 可以看出,当 OPS 和 OCS 信号同时进入时,OCS 信道增益波动的最大值约为 3×10^{-4} dB,而至 $25 \mu\text{s}$,当 OPS 信号撤除时,OCS 信号增益抖动的最大值达到 4.7×10^{-4} dB;从图 7b 可以看出,当 OPS 和 OCS 信号同时进入时,OCS 信道增益波动的最大值约为 1.5×10^{-4} dB,而当 OPS 信号撤除时,OCS 信道增益抖动的最大值仅为 2.5×10^{-4} dB。该结果说明,随着掺杂纤芯面积的增加,带有反馈链路的 EYDFA 增益抖动减小,由此表明,增大掺杂纤芯面积,能有效抑制反馈环路引起的弛豫振荡。

3 结论

针对 OPCI 系统大功率、高稳定性光信号放大需求,在函数极限的基础上采用迭代算法,建立了不同掺杂截面大功率 EYDFA 增益瞬态比较的计算模型。依据该模型,详细分析了 OPCI 系统有/无增益反馈情况下,OPS 和 OCS 的增益瞬态,结果表明:(1)小信号条件下,随掺杂面积的增大,EYDFA 输出信号增益逐渐增大;(2)无反馈条件下,使用纤芯直径为 $4.6 \mu\text{m}$ 的掺杂光纤,其 OPS 和 OCS 输出信号功率、增益漂移小于纤芯直径为 $3.6 \mu\text{m}$ 的掺杂光纤,瞬态增益的改善约为 12%;(3)带反馈条件下,随着掺杂纤芯面积的增加,带有反馈链路的 EYDFA 增益抖动减小。由此表明:

增大掺杂纤芯面积,能有效抑制 EYDFA 的增益瞬态、以及因反馈环路所引起的弛豫振荡。

参 考 文 献

- [1] YI L L. The research on optical information processing technologies in optical packet switching networks[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008:1-35 (in Chinese).
- [2] SATO N, OTA K, MISHIMA N, *et al.* Less than 0.19dB transient gain excursion AGC-EDFA with digital control for 20-channel add/drop equivalent operation[C]//Optical Fiber Communication Conference 2011. Washington DC, USA: The Optical Society of America, 2011:OMH3.
- [3] FURUKAWA H, MIYAZAWA T, WADA N, *et al.* Moving the boundary between wavelength resources in optical packet and circuit integrated ring network[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 47-54.
- [4] FURUKAWA H, SHINADA S, MIYAZAWA T, *et al.* A multi-ring optical packet and circuit integrated network with optical buffering [J]. Optics Express, 2012, 20(27):28764-28771.
- [5] SHINADA S, FURUKAWA H, WADA N, *et al.* Huge capacity optical packet switching and buffering[J]. Optics Express, 2011, 19(26): 406-414.
- [6] ZHAN S B, ZHAO S H, DONG S F, *et al.* Effects of suppressing energy transfer up-conversion in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped fiber laser[J]. Laser & Infrared, 2002, 32(6): 400-402 (in Chinese).
- [7] BOUZID B. High-gain and low-noise-figure erbium-doped fiber amplifier employing dual stage quadruple pass technique[J]. Optical Review, 2010, 17(3):100-102.
- [8] AWAJI Y, FURUKAWA H, WADA N, *et al.* Mitigation of transient response of erbium-doped fiber amplifier for burst traffic of high speed optical packets[C]// Quantum Electronics and Laser Science Conference 2007. New York, USA: IEEE, 2007: JTuA133.
- [9] SHOOSHARI A, MESHKINFAM P, TOUAM T, *et al.* Ion-exchanged Er/Yb phosphate glass waveguide amplifiers and lasers[J]. Optics Engineering, 1998, 37(4): 1188-1192.
- [10] SUN Y, ZYSKIND J L, SRIVASTAVA A K, *et al.* Analytical formula for the transient response of erbium-doped fiber amplifiers[J]. Applied Optics, 1999, 38(9): 1682-1685.
- [11] ZHAN S B, ZHAO S H, DONG S F, *et al.* The analysis of steady-state behavior of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber laser[J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 345-348 (in Chinese).
- [12] ZHAN S B, ZHANG J, WANG P, *et al.* Study on influence of pump power changes for automatic gain control of EYDFA[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(10): 1123-1127 (in Chinese).
- [13] ZHAN S B, QIN Z H, ZHANG J, *et al.* Theoretical analysis of gain-clamped results for an EYDFA[J]. Laser Journal, 2013, 34(6): 20-21 (in Chinese).
- [14] HARUM S W, ABDUL-RASHID H A, MUHD-YASSIN S Z, *et al.* Dual-stage Er/Yb doped fiber amplifiers for gain and noise figure enhancements [J]. IEICE Electronics Express, 2006, 23(3): 517-521.
- [15] ZHAN S B, ZHAO S H, DONG S F, *et al.* Study of amplified spontaneous emission behavior under small signal amplification[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(8): 930-934 (in Chinese).
- [16] SHIRAIWA M, AWAJI Y, FURUKAWA H, *et al.* Performance evaluation of a burst-mode EDFA in an optical packet and circuit integrated network[J]. Optics Express, 2013, 21(26): 32589-32598.