

高功率脉冲 Er-Yb 共掺光纤放大器中放大自发辐射的抑制方法

何 洋¹ 韩 群¹ 宁继平¹ 盛朝霞² 任 坤¹

(¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

²天津职业技术师范大学理学院, 天津 300222

摘要 为了研究放大的自发辐射(ASE)对高功率脉冲 Er-Yb 共掺光纤放大器(EYDFA)的影响,采用数值模拟对 EYDFA 中不同参数信号的放大进行了研究。结果表明,Yb 波段(1.0~1.1 μm)ASE 是制约放大器输出功率提升的主要因素。因此,有效地抑制 Yb 波段 ASE 将有助于放大器性能的提高。通过进一步研究发现,在放大器的抽运端引入一个 Yb 波段的辅助信号能有效地抑制 Yb 波段 ASE,从而提高抽运转换效率,提升放大器的输出功率。

关键词 激光光学;光纤放大器;有限差分法;铒镱共掺;Yb 波段辅助信号

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.1002004

Suppressing Amplified Spontaneous Emission in High-Power Pulsed Er-Yb Codoped Fiber Amplifiers

He Yang¹ Han Qun¹ Ning Jiping¹ Sheng Zhaoxia² Ren Kun¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Information Science & Technology of Ministry of Education, College of Precision Instrument & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²School of Science, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China

Abstract In order to investigate the impact of the amplified spontaneous emission (ASE) on the performance of high-power pulsed Er-Yb codoped fiber amplifiers (EYDFAs), several EYDFAs with different input signal parameters are studied numerically. The results show that the Yb-band (1.0~1.1 μm) ASE is the main factor that limits the efficiency of a high-power pumped EYDFA. Therefore, suppressing the Yb-band ASE can effectively help to improve the performance of the amplifiers. It is found that adding an Yb-band signal at the pump end can help to reduce the Yb-band ASE effectively. Simultaneously, this method can also enhance the power conversion efficiency and improve the output power of the amplifiers.

Key words laser optics; fiber amplifier; finite difference method; Er-Yb codoped; Yb-band aided signal

OCIS codes 060.3510; 060.2320; 230.2285

1 引 言

高功率 Er-Yb 共掺光纤放大器(EYDFA)具有光束质量好、效率高、散热好、使用及维护费用低,且其输出的 1.5 μm 波段的激光具有较好的“人眼安全”特性,较低的大气传输损耗等优势,因此,高功率

EYDFA 在激光雷达、空间通信、材料加工、医疗以及科研等领域有着重要的应用前景^[1~5]。

大量的研究表明,在连续光放大时,Yb 波段(1.0~1.1 μm)的放大自发辐射(ASE)是限制高功率 EYDFA 输出功率提高的主要因素^[6~8]。在对

收稿日期: 2012-06-05; 收到修改稿日期: 2012-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61107035,11104200)资助课题。

作者简介: 何 洋(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器和放大器等方面的研究。

E-mail: heyang3g@tju.edu.cn

导师简介: 韩 群(1977—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感、光纤激光器和放大器等方面的研究。

E-mail: hanqun@tju.edu.cn

连续 EYDFA 的理论研究中发现,与抽运光反向的 Yb 波段 ASE(Yb-ASE)会严重制约放大器的性能,如果在抽运端引入一个合适波长的 Yb 波段信号,该信号的受激放大可以很好地抑制 Yb-ASE,从而提高抽运转换效率和输出功率^[9,10]。Kuhn 等^[11-14]对该方法进行了实验研究,验证了理论结果的正确性。

在前期研究的基础上,本文通过数值模拟对高功率抽运脉冲 EYDFA 中的 ASE 及 Yb 波段辅助信号引入对 ASE 的影响进行了研究。

2 理论模型

Er-Yb 共掺系统的能级结构如图 1 所示。抽运光子首先被 Yb³⁺ 吸收,使其从²F_{7/2}激发到²F_{5/2}。然后,处于激发态的 Yb³⁺将能量传递给周围的 Er³⁺,使其从⁴I_{15/2}激发到⁴I_{11/2}能级。由于⁴I_{11/2}能级的寿命很短,Er³⁺迅速无辐射跃迁至亚稳态⁴I_{13/2},信号光通过⁴I_{13/2}能级和⁴I_{15/2}能级之间的受激辐射跃迁被放大。在掺杂浓度较高的情况下,⁴I_{13/2}能级上的 Er³⁺还会发生合作上转换,即其中一个 Er³⁺被激发到更高的⁴I_{9/2}能级,另一个 Er³⁺回到基态。由于⁴I_{9/2}能级的寿命极短($\tau_{43} \approx 0$),该能级上的 Er³⁺会通过无辐射跃迁弛豫到⁴I_{11/2}能级,因此假定⁴I_{9/2}能级为空。上述跃迁过程可以用速率方程表示为^[15,16]

$$\begin{cases} \frac{\partial n_2}{\partial t} = -\frac{n_2}{\tau_{21}} + \frac{n_3}{\tau_{32}} + W_{12}n_1 - W_{21}n_2 - 2C_{up}N_{Er}n_2^2, \\ \frac{\partial n_3}{\partial t} = -\frac{n_3}{\tau_{32}} + W_{13}n_1 + R_{61}N_{Yb}n_6n_1 - R_{35}N_{Yb}n_3n_5 + C_{up}N_{Er}n_2^2, \\ \frac{\partial n_6}{\partial t} = -\frac{n_6}{\tau_{65}} + W_{56}n_5 - W_{65}n_6 - R_{61}N_{Er}n_6n_1 + R_{35}N_{Er}n_3n_5, \\ n_1 = 1 - n_2 - n_3, \\ n_5 = 1 - n_6, \end{cases} \quad (1)$$

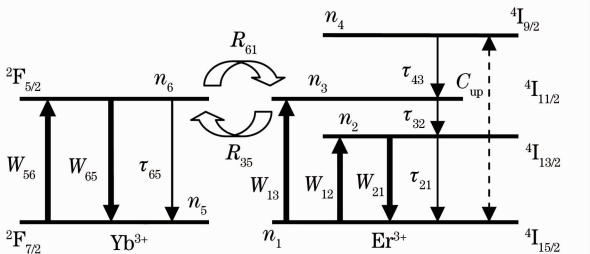


图 1 Er-Yb 共掺系统能级图

Fig. 1 Energy-level diagram of Er-Yb codoped system

式中 t 代表时间, n_i 表示能级 i 上的集居数密度比, τ_{ij} 表示能级 i 到能级 j 的自发辐射寿命, C_{up} 为上转换系数, R_{ij} 为能级 i 与 j 之间的交叉弛豫系数, N_{Er} 和 N_{Yb} 分别为纤芯中 Er³⁺ 和 Yb³⁺ 的掺杂浓度, W_{ij} 表示能级 i 与 j 之间的受激跃迁速率, 可表示为

$$\begin{aligned} W_{ij} &= \sum_s \frac{c_{ij}(\lambda_s)[P_s^+(z,t) + P_s^-(z,t)]\lambda_s}{A_{core}hcN_{Er}} + \\ &\quad \sum_k \frac{c_{ij}(\lambda_k)[P_{Er,k}^+(z,t) + P_{Er,k}^-(z,t)]\lambda_k}{A_{core}hcN_{Er}}, \\ W_{lm} &= \sum_p \frac{c_{lm}(\lambda_p)[P_p^+(z,t) + P_p^-(z,t)]\lambda_p}{A_{core}hcN_{Yb}} + \\ &\quad \sum_k \frac{c_{lm}(\lambda_k)[P_{Yb,k}^+(z,t) + P_{Yb,k}^-(z,t)]\lambda_k}{A_{core}hcN_{Yb}}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, 上标“±”表示光的传播方向, 下标 $ij = 12, 21, lm = 13, 56, 65$, A_{core} 表示纤芯面积, h 为普朗克常数, c 为真空中的光速, $P_s, P_p, P_{Er,k}$ 和 $P_{Yb,k}$ 分别表示信号功率、抽运功率、 λ_k 处的 Er 波段和 Yb 波段的 ASE 功率。 $c_{ij}(\lambda_i)$ 为能级 i 与 j 之间对 λ_i 的吸收或发射系数, 可表示为

$$\begin{aligned} c_{ij}(\lambda) &= \Gamma_\lambda \sigma_{ij}(\lambda) N_{Er}, \\ c_{lm}(\lambda) &= \Gamma_\lambda \sigma_{lm}(\lambda) N_{Yb}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\sigma_{ij}(\lambda)$ 为能级 i 与 j 之间对 λ 的吸收或发射截面, Γ_λ 为光波模式与掺杂区域的交叠因子, 可表示为

$$\begin{cases} \Gamma_\lambda = 1 - \exp\left(-\frac{2a^2}{\omega^2}\right), \\ \omega = a\left(0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6}\right), \\ V = 2\pi a NA_{core}/\lambda, \end{cases} \quad (4)$$

式中 a 为纤芯半径, NA_{core} 为纤芯的数值孔径。

对于脉冲 EYDFA, 各光谱成分功率变化的功率传输方程可表示为

$$\begin{aligned} \pm \frac{\partial P_p^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_p^\pm}{\partial t} &= (n_6 c_{65,p} - n_5 c_{56,p} - \\ &\quad n_1 c_{13,p} - \alpha_p) P_p^\pm, \\ \pm \frac{\partial P_s^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_s^\pm}{\partial t} &= (n_2 c_{21,s} - n_1 c_{12,s} - \alpha_s) P_s^\pm, \\ \pm \frac{\partial P_{Yb,k}^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_{Yb,k}^\pm}{\partial t} &= (n_6 c_{65,k} - n_5 c_{56,k} - \\ &\quad n_1 c_{13,k} - \alpha_k) P_{Yb,k}^\pm + \frac{2hc^2}{\lambda_k^3} m_p n_6 c_{65} \Delta\lambda, \\ \pm \frac{\partial P_{Er,k}^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_{Er,k}^\pm}{\partial t} &= (n_2 c_{21,k} - n_1 c_{12,k} - \\ &\quad \alpha_k) P_{Er,k}^\pm + \frac{2hc^2}{\lambda_k^3} m_s n_2 c_{21} \Delta\lambda, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 v_g 为光纤中的群速度, $\alpha_p, \alpha_s, \alpha_k$ 分别表示抽运

波、信号波、波长为 λ_k 的光波在光纤中的损耗系数, m_p 与 m_s 分别代表纤芯中 Yb 波段和 Er 波段 ASE 的模式数, 在实验中 $m_p=4, m_s=2$ 。 h 和 c 分别代表普朗克常数和真空中的光速, $\Delta\lambda$ 代表波长的取样分辨率。 实验中, Yb 波段与 Er 波段的波长范围分别为 1000~1100 nm 和 1500~1600 nm, $\Delta\lambda$ 为 1 nm。

要求解(5)式还必须辅以适当的边界条件, 在端面反射、瑞利散射等影响可忽略的情况下, 边界条件可以写为

$$\begin{aligned} P_p^+(0, t) &= P_{p,0}^+(t), & P_p^-(L, t) &= P_{p,L}^-(t), \\ P_s^+(0, t) &= P_{s,0}^+(t), & P_s^-(L, t) &= P_{s,L}^-(t), \\ P_{Yb,k}^+(0, t) &= P_{Yb,k}^-(L, t) = 0, \\ P_{Er,k}^+(0, t) &= P_{Er,k}^-(L, t) = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 L 为增益光纤的长度, $P_{p,0}(t)$ 和 $P_{s,0}(t)$ 分别为 t 时刻输入端的抽运和信号功率。 在数学上, (1)~(6)式是一个大型偏微分方程组的初边值问题, 可以采用有限差分法^[17]进行求解, 初值由信号功率等于脉冲信号平均功率的连续 EYDFA 的模拟结果提供。 上述模型的有效性已在文献[18]中进行了验证。

3 数值模拟与讨论

为了对高功率抽运脉冲 EYDFA 中 ASE 的影响进行分析。 实验对不同脉冲信号参数的 EYDFA 进行了数值模拟。 模拟中相关参数设置如下: 信号为波长 1550 nm 的高斯脉冲, 抽运光波长为 975 nm、功率为 100 W, 抽运方式为前向包层抽运(与输入信号光同向即为前向, 反之为后向)。 光纤为 CorActive 公司生产的双包层 Er-Yb 共掺光纤, 纤芯直径为 30 μm 、内包层直径为 350 μm , 其主要参数如表 1 所示^[9]。 模拟所用光纤长度均为最佳光纤长度 L_{opt} , 其定义为当脉冲输出进入稳定状态后, 信号光功率的放大速率($\Delta P_s / \Delta L$)刚好小于 0 时的

表 1 模拟所用光纤参数

Table 1 Parameters of the fiber for simulations

Parameter	Value
$\alpha_p / (\text{dB}/\text{km})$	70
$\alpha_s / (\text{dB}/\text{km})$	20
N_{Er} / m^{-3}	2.450×10^{25}
N_{Yb} / m^{-3}	3.526×10^{26}
$R_{35}, R_{61} / (\text{m}^3/\text{s})$	2.371×10^{-22}
$C_{up} / (\text{m}^3/\text{s})$	3×10^{-24}
τ_{21} / s	1.0×10^{-2}
τ_{32} / s	1.0×10^{-9}
τ_{65} / s	1.5×10^{-3}
NA_{core}	0.174

光纤长度, 由计算得到。 计算 L_{opt} 时光纤长度的步长 $\Delta L=0.2 \text{ m}$ 。

3.1 高功率脉冲 EYDFA 中 ASE 的影响

实验中对不同参数的信号放大进行了模拟, 结果如图 2 和图 3 所示。 在图 2 中, 信号的脉宽(脉冲的半峰全宽)为 200 ns, 峰值功率为 200 W, 重复频率分别为 5、10、15、20、25、30 kHz。 可见, 在不同重复频率下后向 Yb-ASE 的输出功率都很高, 均大于 80 W, 且会随着重复频率的增长而缓慢下降。 相比之下, 前向 Yb-ASE 的影响可以忽略不计。 Er-ASE 的输出功率相对较小, 其中以后向 Er-ASE 为主, 其输出功率随重复频率的上升而下降。 这是由于高重复频率下脉冲间隔减小导致 Er-ASE 积累时间减少所造成的, 但是脉冲间隔的减少也不利于增益介质的储能, 使得输出单脉冲能量随重复频率的升高而降低。

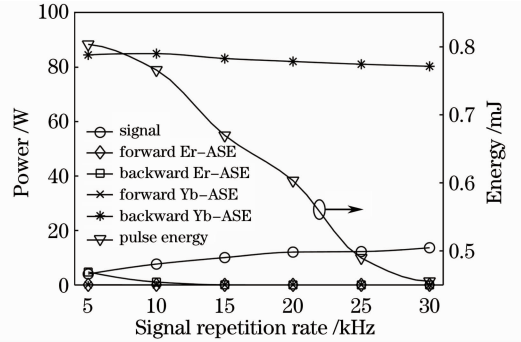


图 2 信号和 ASE 的输出功率以及信号单脉冲能量随信号重复频率的变化

Fig. 2 Output signal, ASE power and signal pulse energy versus the signal repetition rate

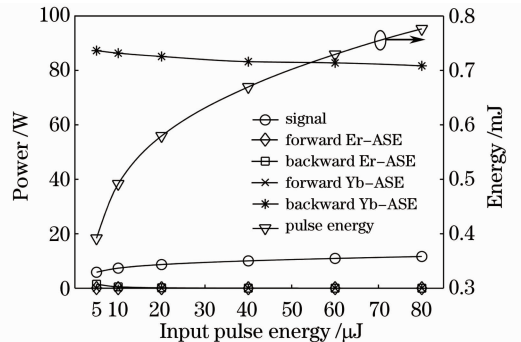


图 3 信号和 ASE 的输出功率以及信号脉冲能量随输入信号单脉冲能量的变化

Fig. 3 Output signal, ASE power and signal pulse energy versus input signal pulse energy

对信号重复频率为 15 kHz, 输入信号脉宽和峰值功率分别为 400 ns 与 100 W、200 ns 与 200 W 和 100 ns 与 400 W(单脉冲能量均为 40 μJ)的三种信

号进行模拟。在这三种情况下,EYDFA 所用的最佳光纤长度均为2.4 m。结果表明,信号光的平均输出功率约为 10.1 W,输出单脉冲能量均约为 0.63 mJ,Er-ASE 和 Yb-ASE 的平均输出功率分别约为 0.043 W 和 83.4 W。可见,放大器的性能是与脉宽和峰值功率的乘积(即信号的单脉冲能量)相关的。

为了进一步研究 ASE 与输入信号单脉冲能量的关系,又对重复频率均为 15 kHz,输入信号单脉冲能量分别为 5、10、20、60、80 μJ 的几种情况进行了模拟,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,后向 Yb-ASE 会随着输入单脉冲能量的升高而缓慢下降,但其输出功率仍然很高,均超过 80 W,前向 Yb-ASE 功率很低。Er-ASE 与输入单脉冲能量呈反比关系,因此提高输入信号单脉冲能量有利于对 Er-ASE 的抑制,同时也可提高输出信号的单脉冲能量和功率。

综上所述,后向 Yb-ASE 是制约高功率脉冲 EYDFA 信号输出功率提升的主要因素,因此,有效地抑制后向 Yb-ASE 将有助于放大器性能的提高。仅通过提高信号重复频率和单脉冲能量虽然可以有效地抑制 Er-ASE 的产生,但是对后向 Yb-ASE 的抑制效果并不明显,因此必须采取新方法对后向 Yb-ASE 加以抑制。

3.2 Yb 波段辅助信号对 ASE 的影响

图 4 为高功率脉冲 EYDFA 对 15 kHz 重复频率、200 ns 脉宽和 200 W 峰值功率信号放大时,后向 Yb-ASE 随时间在光纤中的演化过程。由图 4 可见,在抽运端附近,由于抽运光被迅速吸收,使得 Yb^{3+} 吸收能量的速率远大于其传递给 Er^{3+} 能量的速率,因此大量的抽运光能量转化为后向 Yb-ASE,这与高功率连续 EYDFA 的情况是相似的。在连续放大情况下,理论和实验已经证明^[9~14],在抽运端

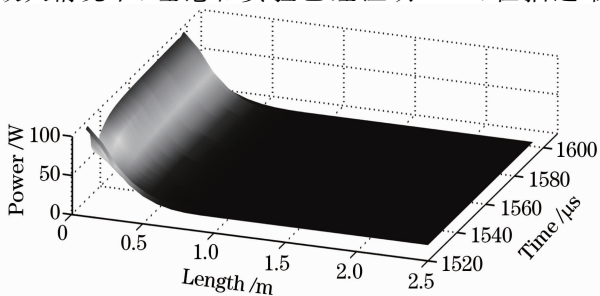


图 4 后向 Yb-ASE 功率随时间在光纤中的演化过程
Fig. 4 Power evolution of backward Yb-ASE in the fiber with time

引入一个 Yb 波段辅助信号可以有效地抑制后向 Yb-ASE,从而提高抽运转换效率,下面通过数值模拟,对该方法在脉冲 EYDFA 中对 ASE 的抑制效果进行分析。

图 5 和图 6 为加入 Yb 波段信号后高功率脉冲 EYDFA 对不同参数信号放大的模拟结果。所用 Yb 波段信号为波长 1040 nm、功率 1 W 的连续光,由抽运端注入增益光纤纤芯。由于 Yb 波段信号波长和功率对放大器性能也有较大影响,实验中这两个参数是通过连续 EYDFA 的模拟,按照文献[10]中的方法选定的,模拟中输入连续光信号功率为脉冲光信号的平均功率。图 5 和图 6 中所用信号光参数分别与图 2 和图 3 中的一致。将图 5 和图 6 与图 2 和图 3 相对照可以看出,加入 Yb 波段信号后,后向 Yb-ASE 有明显下降,同时,信号的输出功率和单脉冲能量有大幅度提升。这说明 Yb 波段信号不仅起到了抑制后向 Yb-ASE 的作用,同时还提高了抽运转换效率。同时还可以看出,后向 Yb-ASE 功率随重复频率和输入脉冲能量的增长有先上升后下降的现象。这是因为在重复频率较低(5~20 kHz)或输入单脉冲能量较低(5~40 μJ)时后向 Er-ASE 的增长也非常明显,Er-ASE 的增长使得流向 Yb-ASE 的抽运能量减少,因此 Yb-ASE 的输出功率随着 Er-ASE 的增长而减小,即随着重复频率和输入脉冲能量的增加而上升。而在重复频率较高(20~30 kHz)或输入单脉冲能量较大时(40~80 μJ),Er-ASE 的影响较小,Yb-ASE 的输出功率会随重复频率和输入单脉冲能量的增大而减小。由于引入辅助信号后 Yb-ASE 要比原来低得多,Er-ASE 会更强,因此这一现象在图 5 和图 6 中表现的更加明显。

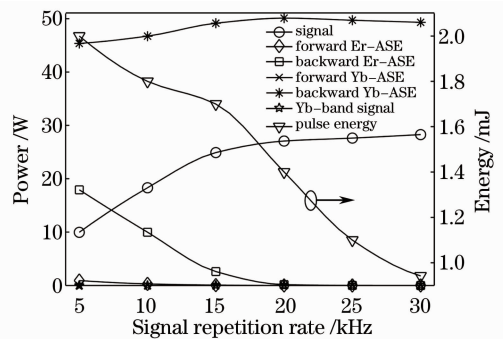


图 5 加入 Yb 波段辅助信号情况下,信号和 ASE 的输出功率以及信号单脉冲能量随信号重复率的变化
Fig. 5 Output signal, ASE power and signal pulse energy versus the signal repetition rate with the Yb-band aided signal

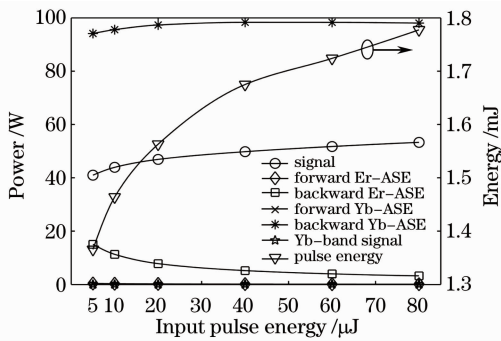


图 6 加入 Yb 波段辅助信号情况下,信号和 ASE 的输出功率以及信号单脉冲能量随输入信号单脉冲能量的变化
Fig. 6 Output signal, ASE power and signal pulse energy versus the input signal pulse energy with the Yb-band aided signal

图 7 为 EYDFA 对 15 kHz 重复频率、200 ns 脉宽和 200 W 峰值功率信号放大时, Yb 波段辅助信号随时间在光纤中的演化过程。由图 7 可见,在抽运端附近, Yb 波段信号得到迅速放大,因其受激放大也抑制了后向 Yb-ASE 的产生。在光纤中后段, Yb 波段信号逐渐被光纤吸收,在脉冲间隔内为增益介质的储能和 Er-ASE 的产生提供了能量,在脉冲内为信号的放大提供了“二次抽运”,因此,加入 Yb 波段辅助信号后,在后向 Yb-ASE 得到抑制的同时,信号的输出功率和单脉冲能量也会有大幅提高, Er-ASE 也会有所增强。光纤对 Yb 波段信号的吸收也使得放大器所需的最佳光纤长度增长,与图 4 相比,图 7 中的最佳光纤长度由原来的 2.4 m 提升至 6.6 m。

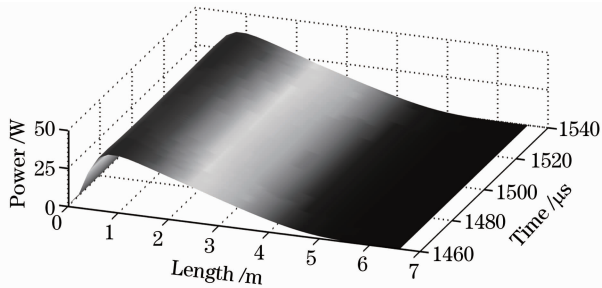


图 7 Yb 波段辅助信号功率随时间在光纤中的演化过程
Fig. 7 Power evolution of Yb-band aided signal in the fiber with time

然而,虽然具有合适功率、合适波长的 Yb 波段信号可以有效地抑制后向 Yb-ASE,但从图 5 和图 6 的结果可以看出,后向 Yb-ASE 的平均输出功率仍然很强,达到了 50 W 左右,因此还需要通过使用 Yb 波段滤波器^[7,8]等方法进一步消除 Yb-ASE 的影响。

4 结 论

对于采用前向抽运方式的高功率脉冲 EYDFA,后向 Yb-ASE 是制约放大器性能提升的主要因素。通过在抽运端引入具有合适功率、合适波长的 Yb 波段辅助信号,可以有效地抑制后向 Yb-ASE,并提高抽运的转换效率。虽然 Er-ASE 的输出会有所增长,但是通过合理地设置输入信号光的参数,也可以很好地控制 Er-ASE 的产生。上述方法和结论将有助于今后对高功率脉冲 EYDFA 的实验研究。

参 考 文 献

- 1 V. Philippov, C. Codemard, Y. Jeong *et al.*. High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2590~2592
- 2 A. Dolfi-Bouteyre, G. Canat, M. Valla *et al.*. Pulsed 1.5- μm Lidar for axial aircraft wake vortex detection based on high-brightness large-core fiber amplifier[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 441~450
- 3 Zheng Libing, Wang Jianbin, Liang Xu *et al.*. Study of polymer optical waveguide amplifier at 1.55 μm wavelength[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s105003
郑礼炳, 汪建斌, 梁旭等. 1.55 μm 波段聚合物光波导放大器的研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(s1): s105003
- 4 Zhou Huijuan, Chen Mo, Chen Wei *et al.*. Brillouin-erbium fiber laser with ultra-short ring cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702010
周会娟, 陈默, 陈伟等. 超短环形腔布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 0702010
- 5 Ma Mingxiang, Yang Huayong, Xu Pan *et al.*. Investigation on characteristics of mode hopping in ultra-narrow linewidth erbium-doped fiber ring laser under pump modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0314002
马明祥, 杨华勇, 徐攀等. 抽运调制条件下超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0314002
- 6 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. B. S. Soh *et al.*. High-power tunable single-frequency single-mode erbium; ytterbium codoped large-core fiber master-oscillator power amplifier source [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(22): 2997~2999
- 7 A. Yusim, J. Barsalou, D. Gapontsev *et al.*. 100 Watt, single-mode, CW, linearly polarized all-fiber format 1.56 μm laser with suppression of parasitic lasing effects [C]. *SPIE*, 2005, **5709**: 69~77
- 8 A. Shirakawa, H. Suzuki, M. Tanisho *et al.*. Yb-ASE-free Er amplification in short-wavelength filtered Er:Yb photonic-crystal fiber[C]. San Diego: Optical Fiber Communication Conference, 2008. OThN2
- 9 Q. Han, J. Ning, Z. Sheng. Numerical investigation of the ASE and power scaling of cladding-pumped Er-Yb codoped fiber amplifiers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(11): 1535~1541
- 10 Q. Han, Y. He, Z. Sheng *et al.*. Numerical characterization of Yb-signal-aided cladding-pumped Er:Yb-codoped fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(9): 1599~1601
- 11 V. Kuhn, P. Wessels, J. Neumann *et al.*. Stabilization and power scaling of cladding pumped Er:Yb-codoped fiber amplifier via auxiliary signal at 1064 nm[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 18304~18311
- 12 V. Kuhn, D. Kracht, J. Neumann *et al.*. Dependence of Er:Yb-

- codoped 1.5 μm amplifier on wavelength-tuned auxiliary seed signal at 1 μm wavelength [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(24): 4105~4107
- 13 G. Sobon, P. Kaczmarek, A. Antonczak *et al.*. Controlling the 1 μm spontaneous emission in Er/Yb co-doped fiber amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(20): 19104~19113
- 14 G. Sobon, P. Kaczmarek, K. M. Abramski. Erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier operating at 1550 nm with stimulated lasing at 1064 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(7): 1929~1933
- 15 M. Karásek. Optimum design of Er³⁺-Yb³⁺ codoped fibers for large-signal high-pump-power applications[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(10): 1699~1705
- 16 E. Yahel, A. Hardy. Efficiency optimization of high-power, Er³⁺-Yb³⁺-codoped fiber amplifiers for wavelength-division-multiplexing applications [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(6): 1189~1197
- 17 R. Butt. Introduction to Numerical Analysis Using Matlab[M]. Sudbury: Jones and Bartlett publishers, 2007. 542~545
- 18 G. Canat, J. C. Mollier, J. P. Bouzinac *et al.*. Dynamics of high-power erbium-ytterbium fiber amplifiers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(11): 2308~2318

栏目编辑:王晓琰