

高功率脉冲抽运 Er-Yb 共掺光纤放大器的理论研究

吕晓英^{1,2} 韩 群^{1,2} 刘铁根^{1,2}

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072
² 光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要 基于速率方程理论对低重复频率高功率脉冲抽运 Er-Yb 共掺光纤放大器(EYDFA)进行了理论研究。通过采用有限差分法对理论模型的求解,系统分析了在放大自发辐射(ASE)受限情况下,抽运脉冲峰值功率、抽运脉宽、信号时延对放大器性能的影响。结果表明,在将 ASE 控制在合理范围的情况下,抽运脉冲存在一个最佳的抽运脉冲宽度,信号脉冲相对抽运脉冲的时延对输出峰值功率和脉冲能量有非常重要的影响。而且对给定的增益介质,抽运脉冲峰值功率也并非越高越好,而是存在一个最佳值。该研究结果对高功率脉冲抽运 Er-Yb 共掺光纤放大器的实验研究具有指导意义。

关键词 激光器; 钕镱共掺光纤; 有限差分法; 光纤放大器; 脉冲抽运

中图分类号 TN241 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0602003

Theoretical Investigation of High-Power Pulse-Pumped Er-Yb Codoped Fiber Amplifiers

Lü Xiaoying^{1,2} Han Qun^{1,2} Liu Tiegeng^{1,2}

(¹ School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Key Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract Low-repetition rate high-power pulse-pumped Er-Yb codoped fiber amplifiers (EYDFAs) are theoretically investigated. By numerically solving the rate-equations of EYDFAs with finite difference method, in the case of limited amplified spontaneous emission (ASE), the impact of the peak-power and pulse-width of pump pulse and time-delay between signal and pump pulse on the performance of the amplifier are systematically analyzed. The results show that the pulse width of pump pulse and the time delay between the signal and pump pulses have significant impact on the performance of EYDFA. They can be optimized by controlling the power of the ASE in a reasonable range. For a given gain medium, a low peak power long pump pulse is generally better than a high peak power short pulse, and there is an optimum value. These results are of great importance in high-power pulse-pumped Er-Yb codoped fiber amplifiers.

Key words lasers; Er-Yb codoped fiber; finite difference method; fiber amplifier; pulse pump

OCIS codes 060.2320; 060.2410

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、使用及维护费用低等优势,主要用于输出 1.5 μm 波段激光,该波段的激

光具有相对较好的“人眼安全”特性,以及较低的光纤传输损耗和较低的大气传输损耗等优点。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价值^[1-2]。由于这些

收稿日期: 2013-11-13; 收到修改稿日期: 2013-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61107035)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16100)

作者简介: 吕晓英(1989—),女,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: xiaoying@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(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

领域通常需要高功率的脉冲激光,因此人们对高功率脉冲 Er-Yb 共掺光纤放大器的研究兴趣正在不断升温。

放大的自发辐射(ASE)是所有激光器和放大器不可避免的副产物。它会消耗激活介质上能级的粒子数,从而降低激光器或放大器的效率^[3]。特别是在脉冲光纤放大器中,ASE 是影响放大器性能的一个关键因素^[4-8]。由于脉冲间 ASE 的积累,一方面会导致放大器效率的降低,另一方面还会由于自激振荡或自脉动的产生造成放大器工作不稳定甚至损坏。对于连续抽运的放大器影响尤甚。所以在类似测风雷达等需要低重复频率、高峰值功率脉冲的应用场合,光纤放大器只能采用脉冲抽运方式工作^[9-10]。在 EYDFA 这类间接抽运的增益介质中,由于抽运能量首先被 Yb 离子吸收,然后再通过交叉弛豫将能量转移给 Er 离子,在脉冲抽运情况下信号脉冲相对抽运脉冲需要有一定的时延才能达到最佳放大效果。信号脉冲相对抽运脉冲的时延量越大,期间 ASE 也会积累的越多,对信号脉冲输出的峰值功率和能量有着重要的影响。采用大模场面积的增益光纤可以增加光纤中储能,并且只要抽运功率足够高,ASE 自饱和是不可避免的。因此,对高功率脉冲光纤放大器中抽运脉冲宽度以及信号脉冲相对抽运脉冲时延的优化,对高性能脉冲抽运放大器的设计和实验研究有着重要意义。

本文以速率方程理论为基础,采用有限差分法首次对高功率脉冲抽运 EYDFA 进行了研究。详细分析了在给定的信号脉冲峰值功率、信号脉冲宽度、信号脉冲的重复频率、光纤长度、纤芯面积和掺杂数密度等参数下,不同抽运脉冲的峰值功率、抽运脉冲的宽度以及抽运脉冲和信号脉冲的时延关系对信号脉冲输出功率和单脉冲能量的影响。将 ASE 控制在合理的范围内,进而优化出与不同峰值功率的抽运脉冲相应的最佳抽运脉冲宽度和最佳时延,以

及最佳抽运脉冲峰值功率,使给定信号脉冲被放大后能够得到最高的峰值功率和单脉冲能量,达到较好地提高高功率脉冲抽运 EYDFA 效率的作用。

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 Yb 离子吸收,将其从基态的²F_{7/2}能级激发到²F_{5/2}能级,然后通过交叉弛豫,将能量传递给其附近的 Er 离子,将 Er 离子从基态⁴I_{15/2}激发到⁴I_{11/2}。由于⁴I_{11/2}能级的寿命很短(0.1~10 μs),Er 离子迅速弛豫到亚稳态⁴I_{13/2}。1.5 μm 波段的信号通过⁴I_{13/2}和⁴I_{15/2}之间的受激辐射跃迁得到放大。在亚稳态能级⁴I_{13/2}上可能会发生合作上的转换,该过程中能级⁴I_{13/2}上两个相邻的 Er 离子发生相互作用,其中一个 Er 离子得到能量被激发到更高的⁴I_{9/2}能级,而另一个 Er 离子失去能量回落到基态。但由于⁴I_{9/2}能级的寿命极短(约 1 ns),激发上来的离子会极快地弛豫到上能级⁴I_{11/2},而且高质量的增益光纤中上转换几率通常极低,因此即使在高功率抽运情况下该能级也可以认为是空的($n_4 = 0$)。根据抽运波长的不同,Er 离子存在一定的几率直接吸收抽运光子实现从⁴I_{15/2}到⁴I_{11/2}的跃迁。ASE 会同时发生在 Yb 离子的²F_{5/2}→²F_{7/2}和 Er 离子的⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2}能级之间。上述跃迁过程可以用速率方程表示为

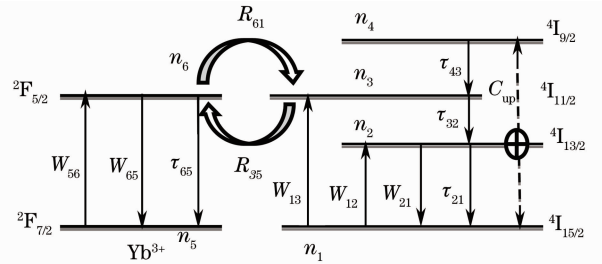


图 1 Er-Yb 共掺系统能级图

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

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

式中 t 为时间, n_i 和 τ_{ij} 分别为能级 i 与 j 之间的集居数密度和自发辐射寿命, R_{ij} 为能级 i 和 j 之间的交叉弛

豫系数, N_{Er} 和 N_{Yb} 分别为光纤中的 Er 离子和 Yb 离子掺杂浓度, C_{up} 为能级⁴ $I_{13/2}$ 上的合作转换系数, W_{ij} 代表从能级 i 到 j 的受激辐射系数, 可用下式表示:

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

式中上标“±”表示光的传播方向, 下标 ij 取 12, 21, lm 取 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, 式中 λ_s, λ_p 分别为信号和抽运波长, z 为沿光纤轴向的坐标, $P_s, P_p, P_{\text{Er},k}$ 和 $P_{\text{Yb},k}$ 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。在此模型中, ASE 的光谱被分成宽为 $\Delta\lambda$ 的若干个信道, λ_k 为第 k 个信道的波长值。 $c_{ij}(\lambda)$ 为能级 i 与 j 之间对 λ 的吸收或者发射系数, 可表示为

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

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。在高功率 EYDFA 中, 通常采用大芯径双包层 EYDF 作为增益光纤, 因此增益光纤都是多模光纤, 且基模场获得的增益最大。但是在主振荡功率放大 (MOPA) 结构中, EYDFA 输出的光束质量主要取决于信号源输出的光束质量, 因此如果信号光很好地耦合进增益光纤的基

模场, 则信号光的光束质量在大芯径 EYDF 中会得到很好的保持^[11]。此外, 通过弯曲光纤可以增大增益光纤中高阶模的损耗, 所以在这些技术的应用下, 信号光能够很好地保证在 EYDF 中以基模传输^[12]。所以信号光的模场分布可以用高斯近似来表示, 它与纤芯的重叠因子 Γ_λ 可以表示为^[13]

$$\Gamma_\lambda = 1 - \exp(-2a^2/\omega^2), \quad (4)$$

式中 a 为纤芯半径, ω 为增益光纤中的基模模场半径, 表达为

$$\omega = a \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \right),$$

V 为纤芯的归一化频率:

$$V = 2\pi a R_{\text{NA-core}}/\lambda,$$

式中 $R_{\text{NA-core}}$ 为纤芯数值孔径。由于抽运光在内包层中传输, 它与纤芯的交叠因子应该再乘以 $A_{\text{core}}/A_{\text{clad}}$, A_{clad} 为内包层面积。

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

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

式中 v_g 为光纤中的群速度, α_k 是波长为 λ_k 的光波在光纤中的损耗系数, m_p 与 m_s 分别为纤芯中 Yb 波段和 Er 波段 ASE 的等效模式数, 因为其值对结果影响不大^[11], 在本文中取 $m_p=4$ 和 $m_s=2$ 。 $\Delta\lambda=1$ nm 为波长的取样分辨率, Yb 波段与 Er 波段的波长范围分别为 1000~1100 nm 和 1500~1600 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

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

式中 L 为 EYDF 的长度, $P_{p,0}(t)$ 和 $P_{s,0}(t)$ 分别为 t 时刻, 输入端的抽运光和信号光功率。(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^[14] 进行求解。

3 数值模拟与讨论

采用有限差分法对上述理论模型进行数值求解,在此基础上研究了抽运脉冲峰值功率、抽运脉冲宽度、抽运脉冲与信号脉冲之间的时延对低重复频率高功率 Er-Yb 共掺光纤放大器放大性能的影响。与此同时,为了有效地降低脉冲之间的 ASE 并使信号被放大后能够得到最高的峰值功率和单脉冲能量,对于不同峰值功率的抽运脉冲,将其相应的抽运脉冲宽度及信号脉冲与抽运脉冲之间的时延分别进行了优化。对不同抽运脉冲参数的 EYDFA 进行数值模拟,模拟中相关参数设置如下:信号波长为 1550 nm,峰值功率为 100 W,脉冲宽度(脉冲的半峰全宽)为 200 ns 的高斯脉冲,重复频率为 100 Hz。抽运脉冲是波长为 976 nm 的矩形波,重复频率为 100 Hz。抽运方式为前向包层抽运(与输入信号光同向称为前向,反之为后向,ASE 的方向定义类似)。光纤为 CoreActive 公司生产的 DCF-EY-28/250 双包层 Er-Yb 共掺光纤,纤芯直径为 27.6 μm 、内包层直径为 245 μm ,其主要参数如表 1 所示。模拟所用的光纤长度为 1 m。

表 1 模拟所用光纤参数

Table 1 Parameters of fiber for simulations

Parameters	Value
α_p /(dB/km)	70
α_s /(dB/km)	20
N_{Er}/m^{-3}	4.1386×10^{25}
N_{Yb}/m^{-3}	3.3056×10^{26}
$R_{36}, R_{61}/(\text{m}^3/\text{s})$	2.372×10^{-22}
$C_{up}/(\text{m}^3/\text{s})$	3.0×10^{-24}
τ_{21}/s	1.0×10^{-2}
τ_{32}/s	1.0×10^{-9}
τ_{65}/s	1.5×10^{-3}
$R_{NA-core}$	0.21

3.1 抽运脉冲峰值功率对 ASE 的影响

在其他参数一定的情况下,抽运脉冲的峰值功率越高、增益介质的储能越快,从而有利于信号脉冲能量和峰值功率的提高,但是也有利于 ASE 的积累和自激振荡的产生。为了研究 ASE 的增长规律,通过对几种不同峰值功率的抽运脉冲进行模拟,研究了无信号输入时(或者信号时延过大时)高功率 EYDFA 中 ASE 的变化情况。模拟得到的不同抽运峰值功率下,Yb 波段和 Er 波段 ASE 的功率随抽运时间的变化分别如图 2 和图 3 所示。由图 2 可以看出,对不同抽运脉冲峰值功率,前、后向 Yb-ASE 的变化遵循相似的规律,当抽运时间超过某一个值时开始建立并迅速增长,最终趋于饱和。抽运峰值功率越高 ASE 出现的越早、增长越快、饱和功率越高,并且后向 ASE 要远远大于前向 ASE。如图 3 所示,Er-ASE 随抽运时间的演化规律与 Yb-ASE 相似,但其能达到的最高功率要更低。所以对高功率 EYDFA,ASE 的限制主要来自于 Yb 波段的 ASE,特别是后向 Yb-ASE。需要说明的是,上述模拟是在假定没有任何反馈的理想情况下进行的,实际放大器如果有端面反射或瑞利散射,ASE 功率达到一定值后就会出现自激振荡,并且放大器输入端都有隔离器,隔离器的耐受功率有限,不容许 ASE 达到那么高的功率。但上述模拟的意义在于,对于给定的隔离器,可以根据它的耐受功率限制和后向 Yb-ASE 的功率演化,确定出不同峰值功率情况下的隔离器不被破坏所容许的抽运脉宽的上限。

以目前较为常见的光纤耦合 5 W 隔离器为例,为保证隔离器不被破坏,后向 Yb-ASE 输出的最大功率值不能超过 5 W。根据图 2 中的模拟结果(图中横线与后向 Yb-ASE 的交点)可以确定出不同抽运脉冲峰值功率下的最佳抽运脉宽。从模拟结果可以看出,当抽运脉冲峰值功率低到一定程度时,如图

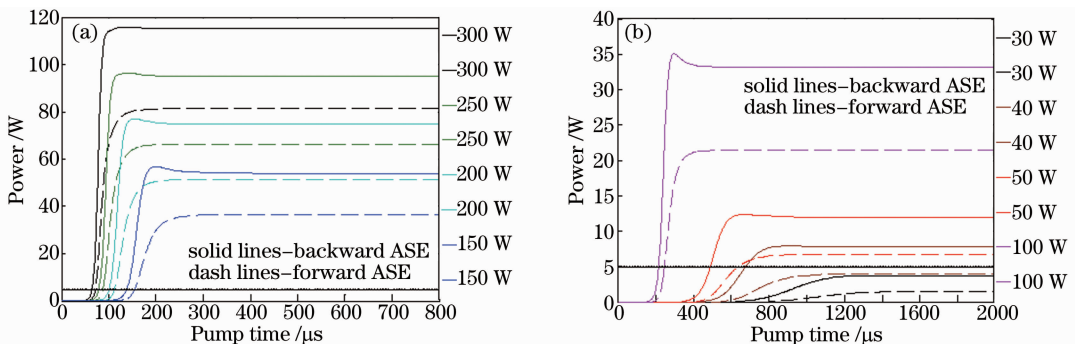


图 2 Yb-ASE 输出功率随时间的演化情况

Fig. 2 Yb-ASE output power versus time

中 30 W 时后向 Yb-ASE 始终不会超过 5 W。理论上抽运时间越长,输入放大器的能量越高,放大器的增益会越大。但是由于 ASE 的存在,当 ASE 功率

趋于饱和后,继续抽运对翻转粒子数的增加贡献不大。所以对这种情况可以选择后向 Yb-ASE 达到饱和需要的时间作为最佳抽运时间。

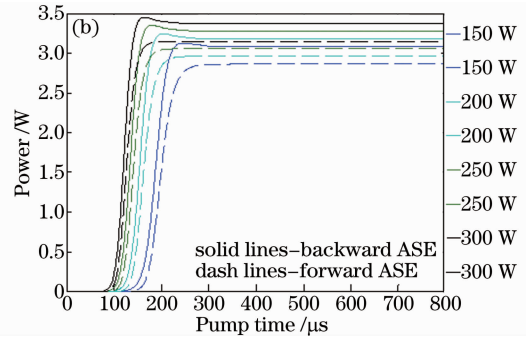
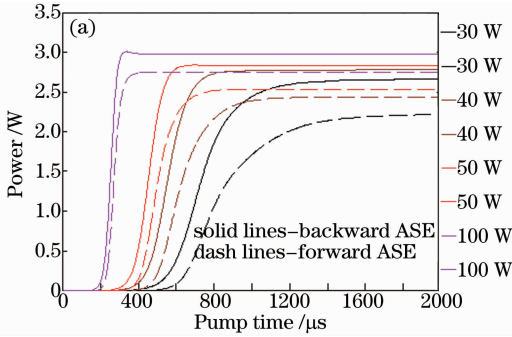


图 3 Er-ASE 输出功率随时间的演化情况

Fig. 3 Er-ASE output power versus time

3.2 抽运脉冲和信号脉冲之间的时延对 EYDFA 的影响

由于 EYDFA 本质上是一种间接抽运,能量从 Yb 离子传递到 Er 离子需要一定的时间,所以抽运结束后 Er 波段的增益达到最大值需要一定的延迟时间。为得到最大增益,信号脉冲相对抽运脉冲需要有合适的时延。抽运脉冲和信号脉冲的时延是指信号脉冲的峰值与抽运脉冲后沿之间的时间间隔 (T_d),如图 4 所示。若时延太短,信号脉冲到达时 Er 反转粒子数没有达到最大值,这一方面使信号增益较低,另一方面由于信号通过后 Yb→Er 的能量传递仍会进行,并且钇镱共掺光纤中 Yb 离子的掺杂浓度要比 Er 离子的高的多(6~10 倍),Er 波段增益仍会增加,甚至会超过有信号时的增益,导致 Er 波段的自激振荡甚至损坏系统元件。所以要得到最佳的放大效果,必须对时延进行优化。图 5(a)是在抽运脉冲波长 1550 nm 时,不同抽运脉冲峰值功率下模拟得到的放大后信号脉冲峰值功率随信号及抽运时延量的变化曲线。抽运脉宽均为按前文方法优化得到的最佳脉宽。

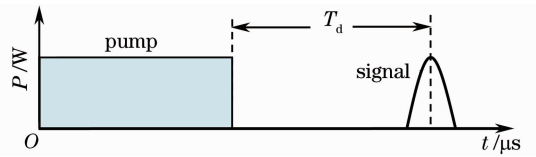


图 4 抽运脉冲和信号脉冲

Fig. 4 Pump pulse and signal pulse

从图 5(a)可以看出,在高峰值功率脉冲抽运下,时延量对放大后信号的峰值功率有明显的影响。输出信号的峰值功率先随着时延量的增加迅速增加,达到一个最大值后随着时延量的继续增加缓慢减小。抽运脉冲峰值功率越高,达到最大值需要的时延量越大。这是因为低峰值功率抽运脉冲宽度比较大,而 Yb→Er 的能量转移在抽运脉冲持续时间内也在进行,所以长抽运脉冲结束后 Er 离子达到最大反转粒子数需要的延迟时间要短一些。图 5(b)所示为不同峰值功率脉冲抽运下,放大器输出信号脉冲能量的变化,可以看出与信号峰值功率的变化规律是一致的。上述规律与文献[9]中实验观察到的规律是一致的。

另外,从图 5(a)和(b)还可以看出,不同抽运峰

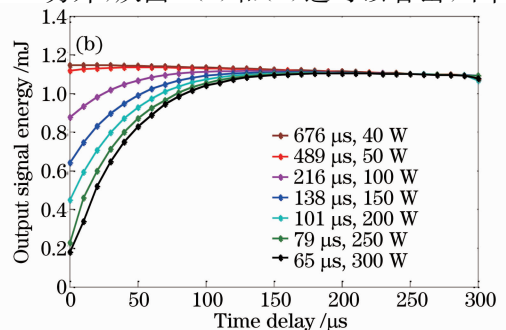
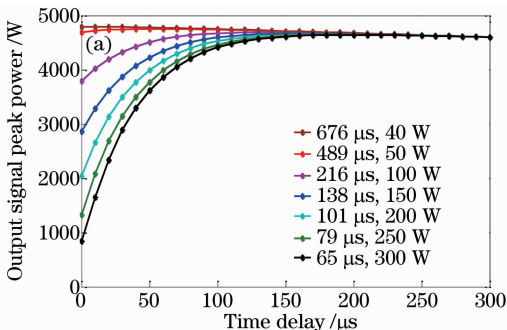


图 5 (a) 输出信号的峰值功率随时延的变化情况图; (b) 输出信号的能量随时延的变化情况

Fig. 5 (a) Output signal peak power versus time delay; (b) output signal energy versus time delay

值功率情况下放大器能够得到的最大信号峰值功率和脉冲能量也是不同的,并且抽运脉冲的峰值功率并非越高越好。这是因为上述分析是在 ASE 功率受限情况下进行的,即后向最大的 ASE 功率不能超过隔离器的容许值(5 W)。而在高功率抽运 EYDFA 中,后向 ASE 又以 Yb 波段的最强,抽运峰值功率越高,抽运速率越快,抽运输入端 Yb→Er 能量转移的瓶颈效应越严重,Yb 波段后向 ASE 更易产生。受限于后向 Yb-ASE 的快速增长,抽运持续时间(即前文所述最佳抽运脉宽)受到了限制,这又使得抽运输入能量(峰值功率×最佳脉宽)受到了限制,因此抽运峰值功率越高,输出脉冲峰值功率(脉冲能量)反而降低。但是,抽运脉冲峰值功率也并非越低越好。这是因为抽运峰值功率较低时,由于脉冲持续时间较长,期间 ASE 导致的能量损失会使放大器的能量转换效率有所降低,并且如抽运峰值功率太低虽可避免 ASE 带来的限制,但放大器提供的增益也会受到限制。所以在低重复频率脉冲抽运 EYDFA 的设计过程中,应该根据隔离器耐受功率的要求,合理选择抽运峰值功率、抽运脉宽以及合适的时延,以期获得最佳的放大效果。

4 结 论

通过对脉冲抽运 EYDFA 理论模型的求解,分析了抽运脉冲峰值功率、脉宽、信号时延对放大器性能的影响。在脉冲抽运 EYDFA 的设计中,应首先根据隔离器耐受功率的限制和抽运激光器的峰值功率确定最佳的抽运脉宽,然后优化信号脉冲相对抽运脉冲的时延。当抽运功率发生调整时,抽运脉宽和信号时延也要进行相应的调整。另外,发现抽运激光器的峰值功率也并非越高越好,通过合理优化脉宽和时延,在较低的抽运峰值功率下也可得到很好的放大效果。所以在脉冲抽运 EYDFA 的设计中应根据设计要求,综合考虑能量转化效率、性价比等因素,合理选择抽运峰值功率、优化抽运脉宽和信号

时延以期得到最佳的效果。

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*, 2009, 15(2): 441–450.
- 3 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.
- 4 Y Jeong, J Sahu, D 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.
- 5 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.
- 6 A Shirakawa, H Suzuki, M Tanisho, *et al.*. Yb-ASE-free Er amplification in short-wavelength filtered Er:Yb photonic-crystal fiber[C]. *OFC/NFOEC*, 2008. 1–3.
- 7 W Yong, P Hong. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification[J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(10): 2262–2270.
- 8 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.
- 9 P Wan, J Liu, L M Yang, *et al.*. Low repetition rate high energy 1.5 μm fiber laser[J]. *Opt Express*, 2011, 19(19): 18067–18071.
- 10 C Ye, P Yan, M Gong, *et al.*. Pulsed pumped Yb-doped fiber amplifier at low repetition rate[J]. *Chin Opt Lett*, 2005, 3(5): 249–250.
- 11 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.
- 12 J P Koplow, D A V Kliner, L Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(7): 442–444.
- 13 D Marcuse. Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers[J]. *J Opt Soc Am*, 1978, 68(1): 103–109.
- 14 J C Strikwerda. Finite Difference Schemes and Partial Differential Equations[M]. Philadelphia: SIAM, 2004, 61–88.

栏目编辑:宋梅梅