

双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤放大器 ASE 的动态特性

占生宝, 朱蕊频, 马志强, 石磊, 赵尚弘

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:基于速率方程的离散算法,对连续和脉冲泵浦下的双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤放大器 ASE 动态特性进行了研究,对 ASE 随时间呈现不同变化的原因进行了分析。结果表明:连续光泵浦下,双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤放大器 ASE 达到稳态的时间和输出功率的大小依赖于泵浦功率,ASE 输出功率的增加与 Er^{3+} 上能级粒子数的减少相对应;脉冲光泵浦下,光纤长度对正向 ASE 输出功率的饱和存在显著的影响,但不影响反向 ASE 输出功率的饱和。

关键词: $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺;双包层光纤放大器;泵浦;自发辐射;反转粒子数

中图分类号: TN241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)02-0073-05

随着波分复用(WDM)技术的快速发展,双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤放大器已成为光通信最理想的放大器^[1]。然而信号在放大的同时, Er^{3+} 、 Yb^{3+} 的自发辐射也得到放大^[2-3],这不可避免地要降低信噪比。因此,必须采取措施抑制 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 放大的自发辐射(ASE)。研究双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤放大器 ASE,是抑制 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 放大的自发辐射的前提。

基于速率方程的双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤放大器稳态时 ASE 特性已进行了研究,显示了稳态时 ASE 特征^[4],但对于 ASE 的动态特性,则未见报道。为全面了解 ASE 的特征,有必要对 ASE 的动态特性进行研究。本文通过对光纤长度离散,实现了对双包层 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 共掺光纤放大器 ASE 动态特性研究。得到了 ASE 输出功率与反转粒子数随时间的动态关系。

1 理论模型

基于在泵浦光作用下 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 能级间所发生的粒子数变化,可得到如下粒子数随时间变化的速率方程^[5]:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + \frac{N_2}{\tau_{21}} - W_{31}N_1 + C_{up}N_2^2 - C_{14}N_1N_4 + C_{up}N_3^2 - C_{cr}N_1N_6 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 + \frac{N_2}{\tau_{21}} + A_{32}N_3 - 2C_{up}N_2^2 + 2C_{14}N_1N_4 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = W_{13}N_1 - A_{32}N_3 + A_{43}N_4 - 2C_{up}N_3^2 + C_{cr}N_1N_6 \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_6}{\partial t} = W_{56}N_5 - \frac{N_6}{\tau_{65}} - W_{65}N_6 - C_{cr}N_1N_6 \quad (4)$$

$$N_{Er} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (5)$$

$$N_{Yb} = N_5 + N_6 \quad (6)$$

式中, N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 分别表示 Er^{3+} 的 $^4I_{15/2}$ 、 $^4I_{13/2}$ 、 $^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{9/2}$ 能级上的粒子数密度, N_5 、 N_6 分别表示 Yb^{3+} 的

收稿日期:2005-06-22

基金项目:总装创新基金资助项目(WXYE_714)

作者简介:占生宝(1967-),男,安徽太湖人,博士生,主要从事光通信研究。

${}^2F_{5/2}$ 和 ${}^2F_{7/2}$ 能级上的粒子数密度; τ_{21} 和 τ_{65} 表示 ${}^4I_{13/2}$ 和 ${}^2F_{5/2}$ 能级自发辐射的寿命, A_{32} 和 A_{43} 是 Er^{3+} 非辐射的弛豫率, C_{wp} 、 C_{14} 和 C_{σ} 分别是 Er^{3+} 上转换和交叉弛豫系数。由于 Yb^{3+} 上能级粒子数相对较少,因此可忽略 Yb^{3+} 上能级的自发辐射^[5]。于是信号受激吸收和辐射、泵浦受激吸收和辐射的几率 W_j 可表示为^[6]

$$W_{12} = \frac{\Gamma_s \sigma_{12}(v_s)}{h\nu_s A_{\text{core}}} P_s(z, v_s) + \Gamma_s \sum_j^M \sigma_{12}(v_j) \frac{P_{\text{ASE}}^+(z, v_j) + P_{\text{ASE}}^-(z, v_j)}{h\nu_j A_{\text{core}}} \quad (7)$$

$$W_{21} = \frac{\Gamma_s \sigma_{21}(v_s)}{h\nu_s A_{\text{core}}} P_s(z, v_s) + \Gamma_s \sum_j^M \sigma_{21}(v_j) \frac{P_{\text{ASE}}^+(z, v_j) + P_{\text{ASE}}^-(z, v_j)}{h\nu_j A_{\text{core}}} \quad (8)$$

$$W_{13} = \frac{\Gamma_p \sigma_{13}(v_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z, v_p) \quad (9)$$

$$W_{56} = \frac{\Gamma_p \sigma_{56}(v_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z, v_p) \quad (10)$$

$$W_{65} = \frac{\Gamma_p \sigma_{65}(v_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z, v_p) \quad (11)$$

式中, σ_{21} 、 σ_{12} 、 σ_{56} 和 σ_{65} 分别为信号和泵浦光的辐射和吸收截面; h 为普朗克常数, ν_p 、 ν_s 分别为泵浦和信号光频率; $P_{\text{ASE}}^+(z, v_j)$ 、 $P_{\text{ASE}}^-(z, v_j)$ 分别表示依赖于频率的正向和反向自发辐射功率; Γ_p 和 Γ_s 分别为泵浦和信号光的填充因子, Γ_p 近似等于纤芯面积与内包层面积之比^[7],对于 Γ_s ,可由 $\Gamma_s(v) = 1 - \exp\{-2[b/\omega(v)]^2\}$ 算出,其中 $\omega(v) = a(A_1 + A_2/V^{1.5} + A_3/V^6)$, b 为掺杂区域半径, a 为纤芯半径, $V = 2\pi a N_A/\lambda$, N_A 是数值孔径。当 $b/a = 1$ 时, A_1 、 A_2 、 A_3 的值分别为 $A_1 = 0.616$ 、 $A_2 = 1.660$ 、 $A_3 = 0.987$ ^[8]。

正向泵浦时,泵浦、信号和放大的自发辐射功率沿光纤长度变化的输运方程由下式给出^[6]:

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_{13}(v_p) N_1(z) + \sigma_{56}(v_p) N_5(z) - \sigma_{65}(v_p) N_6(z)] P_p(z) - \alpha_p P_p(z) \quad (12)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \Gamma_s [\sigma_{21}(v_s) N_2(z) - \sigma_{12}(v_s) N_1(z)] P_s(z) - \alpha_s P_s(z) \quad (13)$$

$$\frac{dP_{\text{ASE}}^{\pm}(z)}{dz} = \pm \{ \Gamma_s [\sigma_{21}(v_j) N_2(z) - \sigma_{12}(v_j) N_1(z)] - \alpha_s \} P_{\text{ASE}}^{\pm}(z) P_0(v_j) \Gamma_s \sigma_{21}(v_j) N_2(z) \quad (14)$$

式中, $P_0(v)$ 是自发辐射的贡献,其中 $P_0(v) = 2hc^2/\lambda^3$,边界条件为^[7]

$$\left. \begin{aligned} P_p(0) &= P_p^{\text{in}} \\ P_s(0) &= P_s^{\text{in}} \\ P_{\text{ASE}}^{\pm}(z=0, \lambda_j) &= P_{\text{ASE}}^{\pm}(z=L, \lambda_j) = 0 \quad (j = 1486 \sim 1586) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

对于以上方程,由于平方项的出现,不可能有解析解,因此,计算时采用离散算法。这就是:把光纤看成是若干段很短光纤长度(如0.1 m)的叠加($L = \sum_n \Delta z$),并认为某一时刻在如此短的光纤长度(Δz)内各点的粒子数、功率处处相等。这样,粒子数对时间和传输功率对光纤长度的速率方程可变形如以下形式:

$$N^i(t + \Delta T) = N^i(t) + \frac{dN^i(t)}{dt} \Delta T \quad (16)$$

$$P_p^{f,i+1}(z) = P_p^{f,i}(z) - \Gamma_s [\sigma_{13}(v_p) N_1^i(t) + \sigma_{56}(v_p) N_5^i(t) - \sigma_{65}(v_p) N_6^i(t)] N_6^i(t) P_p^{f,i}(z) \Delta z - \alpha_p P_p^{f,i}(z) \Delta z \quad (17)$$

$$P_v^{f,i+1}(z) = P_v^{f,i}(z) + \{ \Gamma_s [\sigma_{21}(v) N_2^i(t) - \sigma_{12}(v) N_1^i(t)] P_v^{f,i}(z) + p_o(v) \sigma_{21}(v) N_2^i(t) \} \Delta z - \alpha_s P_v^{f,i}(z) \Delta z \quad (18)$$

$$P_v^{b,i+1}(z) = P_v^{b,i+1}(z) + \{ \Gamma_s [\sigma_{21}(v) N_2^i(t) - \sigma_{12}(v) N_1^i(t)] P_v^{b,i+1}(z) + p_o(v) \sigma_{21}(v) N_2^i(t) \} \Delta z - \alpha_s P_v^{b,i+1}(z) \Delta z \quad (19)$$

式中, $N^i(t)$ 、 $N^i(t + \Delta T)$ 分别表示第 i 段光纤 t 时刻和 $t + \Delta T$ 时刻的粒子数密度; $P_p^{f,i}(z)$ 、 $P_p^{f,i+1}(z)$ 分别表示正向第 i 和 $i + 1$ 段光纤上泵浦功率的分布; $P_v^{f,i}(z)$ 、 $P_v^{f,i+1}(z)$ 分别表示正向第 i 和 $i + 1$ 段光纤上某一频率信号功率的分布; $P_v^{b,i}(z)$ 、 $P_v^{b,i+1}(z)$ 分别表示反向第 i 和 $i + 1$ 段光纤上某一频率信号功率的分布。

2 数值分析

以加拿大国家光学研究所(INO)生产的 EY801 型双包层 Er³⁺/Yb³⁺共掺光纤作为增益介质进行数值模拟。该光纤纤芯为圆形,直径和数值孔径分别为 4.6 μm 和 0.18 μm;内包层为正六边形,两平行边间的距离为 200 μm。为求解出 ASE 输出功率,可将 Er³⁺增益带宽在频谱上从 1 486 nm 到 1 586 nm,间隔 1 nm 分成 101 个频率点;对于 Yb³⁺的 ASE 功率,由于 Yb³⁺上能级粒子数相对较少,可将其忽略^[8]。模拟时假设泵浦方式为正向泵浦,以 P_{ASE}⁺和 P_{ASE}⁻代表正向和反向输出的 ASE 功率。模拟时光纤长度设为 15 m,Δz 设为 0.1 m,对应的传输时间(ΔT)为 0.05 ns(硅酸盐的折射率设为 1.5)。模拟时的其它参数取值见表 1^[6,9]。

表 1 模拟时的有关参数

Para.	Values	Para.	Values	Para.	Values
[Er ³⁺]	4.8 × 10 ²⁵ /m ³	C _{cr} /(m ³ s ⁻¹)	2.0 × 10 ⁻²²	σ _{Yba} (λ _p)/m ²	2.5 × 10 ⁻²⁵
[Yb ³⁺]	5.0 × 10 ²⁶ /m ³	C ₁₄ /(m ³ s ⁻¹)	4.81 × 10 ⁻²⁴	σ _{Ybc} (λ _p)/m ²	5.0 × 10 ⁻²⁵
λ _p /nm	980	C _{up} /(m ³ s ⁻¹)	4.81 × 10 ⁻²⁴	σ _{Era} (λ _p)/m ²	2.0 × 10 ⁻²⁵
λ _s /nm	1 550	α _p /m ⁻¹	3.5 × 10 ⁻³	σ _{Era} (λ _s)/m ²	2.75 × 10 ⁻²⁵
τ _{Y12} /s	1.5 × 10 ⁻³	α _s /m ⁻¹	3.5 × 10 ⁻³	σ _{Erc} (λ _s)/m ²	3.395 × 10 ⁻²⁵
τ _{Er2} /s	11 × 10 ⁻³	n	1.50	λ _j /nm	1 486 ~ 1 586

2.1 连续光泵浦下的 ASE 动态

根据表 1 的参数,可得到泵浦功率 0.5 W 时 P_{ASE}⁺和 P_{ASE}⁻随时间的变化如图 1 所示。

从图 1 可以清楚地看出:放大器从开始泵浦到 3.3 ms 内,P_{ASE}⁺和 P_{ASE}⁻值都很小,且随时间的增加变化不明显;对于 P_{ASE}⁻,从 3.3 ms 开始迅速增大,到 5.6 ms 时达到最大值(0.038 W),从 5.6 ms 开始又单调减小,到 8.7ms 时达到稳态,稳态时的功率值为 0.037 W;而对于 P_{ASE}⁺,小于 4.3 ms 时,变化不明显,从 4.3 ms 开始单调增加,到 8.7 ms 时达到最大,这个最大值为 0.017 W,此时 P_{ASE}⁺处于稳态。从图 1 还可以发现:P_{ASE}⁻随时间出现了峰值结构,而 P_{ASE}⁺则不出现峰值结构。

不同的泵浦功率对 ASE 输出功率的大小和达到稳态的时间有较大的影响,为说明这个问题,图 2 给出了泵浦功率 1 W 时 P_{ASE}⁺和 P_{ASE}⁻随时间的变化。从图 2 可以看出:泵浦功率 1 W 时,P_{ASE}⁻在 1.6 ms 开始迅速增大,至 2.2 ms 时达到最大值(0.137 W),从 2.2 ms 开始又单调减小,到 3.5 ms 时达到稳态,稳态时的功率值为 0.121 W;而对于 P_{ASE}⁺,在 2.2 ms 时开始增大,到 3.5 ms 时达到稳态,达到稳态时的功率为 0.08 W。比较图 1 和图 2 可以发现:泵浦功率越大,ASE 输出功率到达稳态的时间越早,且输出的 ASE 功率值越大;同时,对于 P_{ASE}⁻,峰值结构也更陡峭。

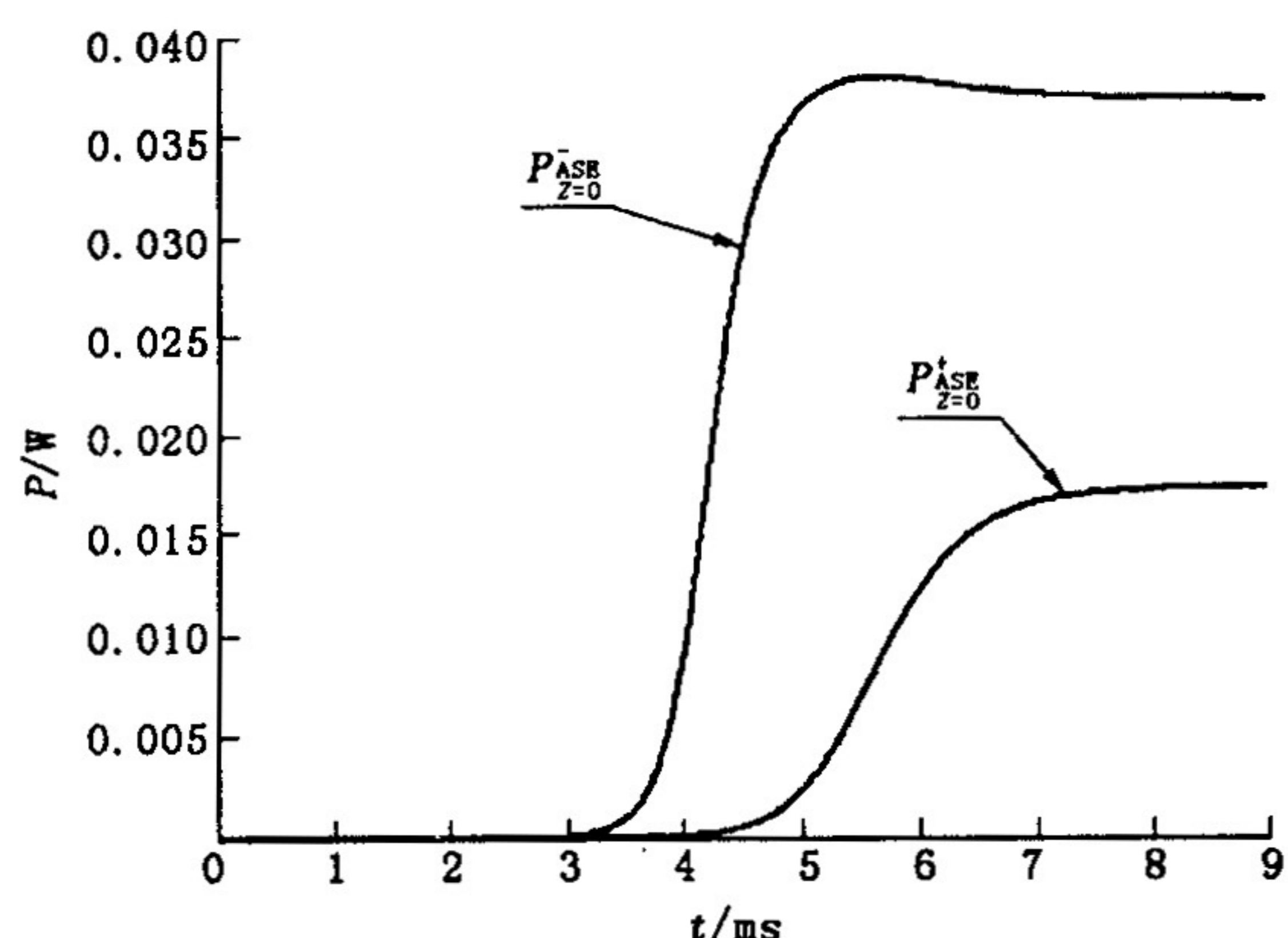


图 1 泵浦功率 0.5 W 时,ASE 输出功率随时间变化图

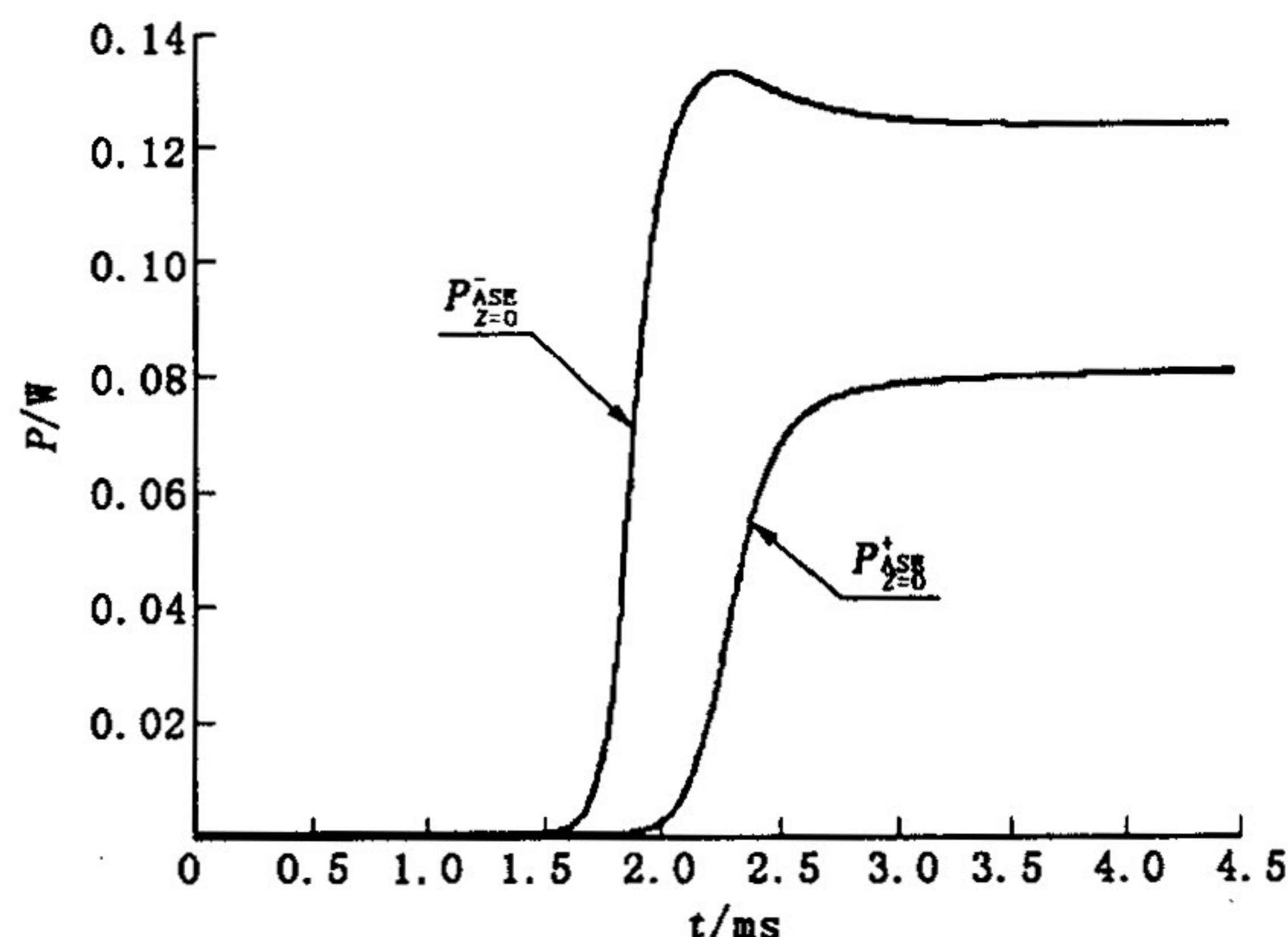


图 2 泵浦功率 1 W 时,ASE 输出功率随时间变化图

2.2 上能级反转粒子数随时间的变化

P_{ASE}^+ 和 P_{ASE}^- 随时间呈现不同的变化,其原因可从光纤不同位置反转粒子数随时间的不同变化得到说明。图3是泵浦功率0.5 W时放大器输入和输出端 Er^{3+} 上能级粒子数随时间的变化。

从图3可以看出:光纤不同位置反转粒子数随时间的变化是不相同的。在泵浦输入端,反转粒子数随时间在3.7 ms时达到峰值,然后开始下降,对应的 P_{ASE}^+ 由较小迅速增大;到5.6 ms时,反转粒子数下降至较小值,这时 P_{ASE}^- 达到峰值。而在信号输出端,反转粒子数随时间在4.7 ms处增加的速度减缓,这时对应的 P_{ASE}^+ 开始迅速增大。反转粒子数随时间的不同变化说明:ASE输出功率的增加是以消耗上能级粒子数为代价。正是由于泵浦输入端和信号输出端反转粒子数随时间所发生的不同变化,才导致了 P_{ASE}^+ 和 P_{ASE}^- 随时间呈现不同的变化特点,这就是 P_{ASE}^+ 和 P_{ASE}^- 随时间呈现不同变化的原因。

2.3 脉冲泵浦下 ASE 的动态

除连续泵浦外,还存在脉冲泵浦,下面分析脉冲泵浦下的 ASE 特性。假设一周期为1.5 ms、峰值为1 W的矩形脉冲分别泵浦光纤长度为10 m和15 m的双包层 Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺光纤放大器,可得到 P_{ASE}^+ 和 P_{ASE}^- 随时间变化的曲线如图4和图5所示。

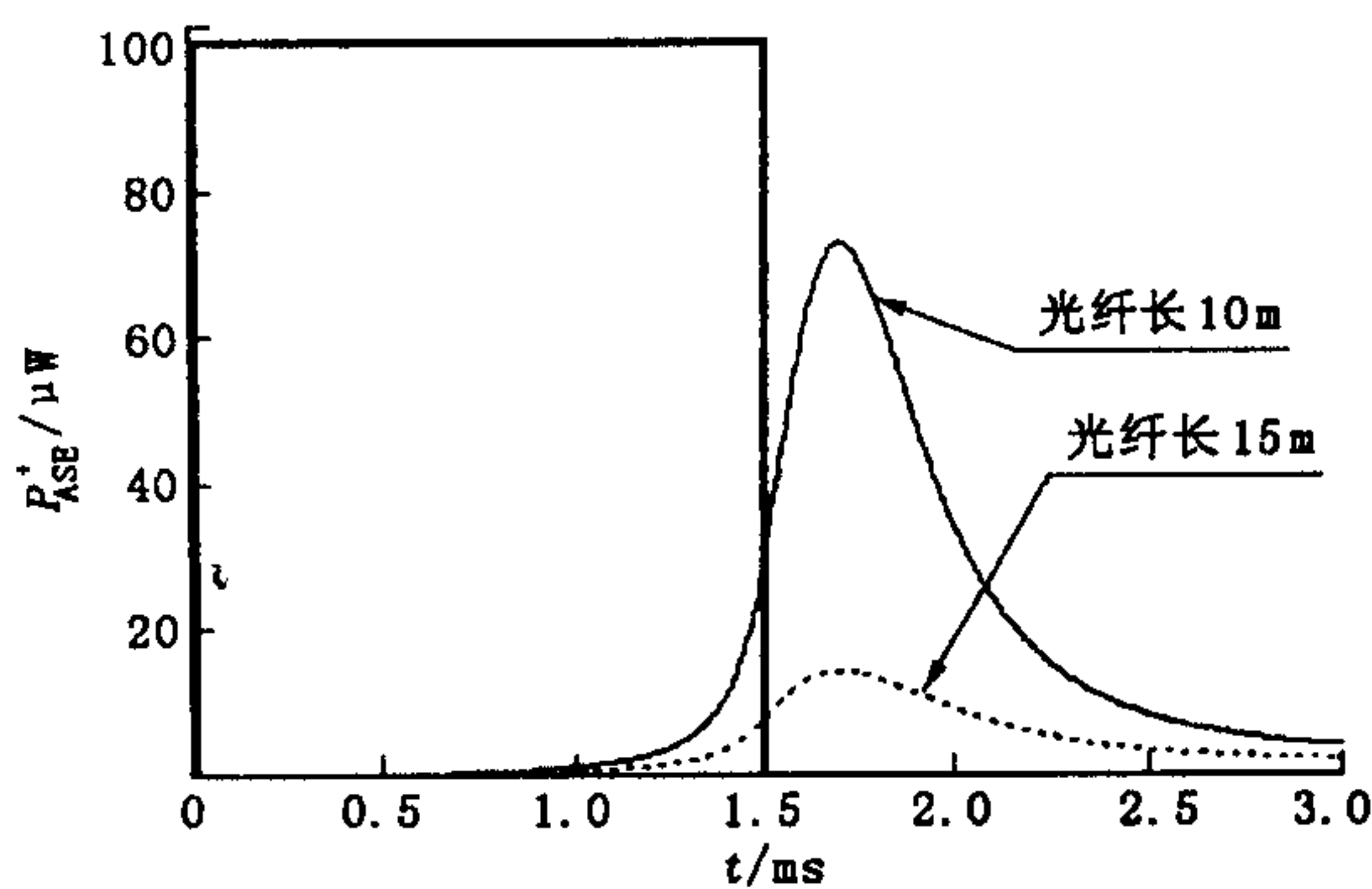


图4 不同光纤长度下 P_{ASE}^+ 随时间变化图

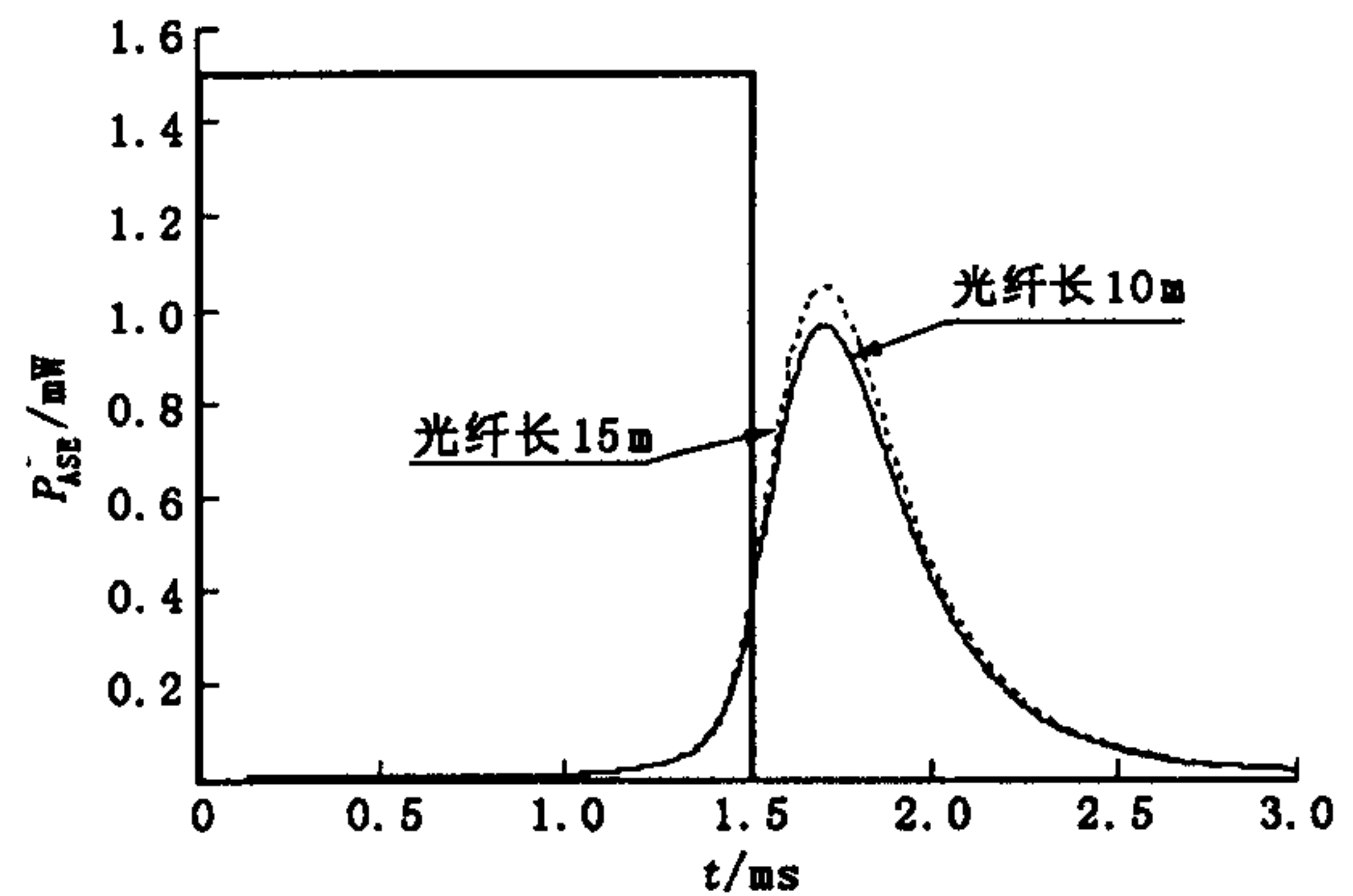


图5 不同光纤长度下 P_{ASE}^- 随时间变化图

图4分别是光纤长度10 m和15 m时 P_{ASE}^+ 随时间的变化,从图4可以看出:在不同的光纤长度下, P_{ASE}^+ 到达峰值点的时间基本相同,为1.7 ms,这个时间比脉冲泵浦的周期长0.2 ms。时间延迟说明:脉冲泵浦结束时,受激的 Yb^{3+} 还没有将获得的能量完全地转移至 Er^{3+} ,受激的 Yb^{3+} 向 Er^{3+} 的能量转移有一个时间过程。从图4还可以看出:光纤长度为10 m时,最大峰值功率为76 mW,而光纤长度为15 m时,最大峰值功率仅为16 mW,这说明在相同的泵浦条件下,光纤越短,响应到达稳态的时间越早。图5分别是光纤长度10 m和15 m时, P_{ASE}^- 随时间变化的曲线,从图5可以看出:不同光纤长度下 P_{ASE}^- 到达峰值点的时间与 P_{ASE}^+ 到达峰值点的时间相同,但输出功率的大小与 P_{ASE}^+ 正好相反,即:光纤长度越长,反向输出功率越大。这说明脉冲泵浦下,光纤长度对反向 ASE 功率的饱和没有影响。

3 结论

基于速率方程,连续和脉冲泵浦下的双包层 Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺光纤放大器 ASE 特性进行了分析,通过分析,可得出以下结论:①对连续泵浦, P_{ASE}^+ 和 P_{ASE}^- 到达稳态的时间相同;当泵浦功率发生改变时, P_{ASE}^+ 和 P_{ASE}^- 到达稳态的时间和功率的大小也随之改变;②光纤不同位置反转粒子数随时间呈现不同的变化特点:其中,泵浦输入端,稳态前反转粒子数首先上升到峰值点,然后下降至稳态。信号输出端,稳态前反转粒子数随时间单调增加;③对脉冲泵浦,光纤长度越短, P_{ASE}^+ 输出的功率越大,响应到达稳态的时间越早。

参考文献:

- [1] Alam S U, Turner P W, Grudinin A B, et al. High - Power Cladding Pumped Erbium - Ytterbium Codoped Fiber Kaser

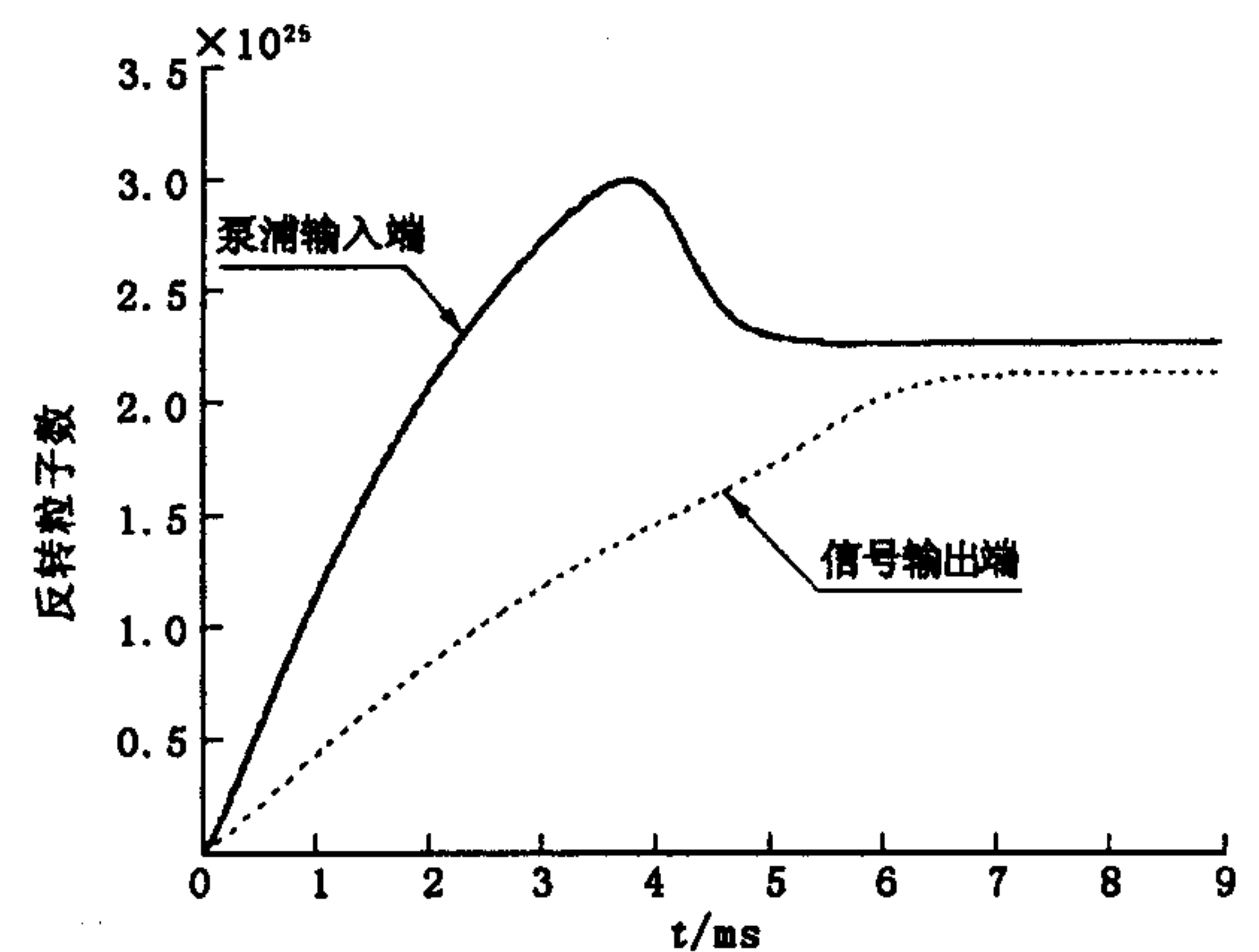


图3 反转粒子数随时间变化图

- [J]. Washington DC: OSA, 2001, 14:1-3.
- [2] Park N, Wysocki P, Pedrazzani R, et al. High-Power Er-Yb-Doped Fiber Amplifier With Multichannel Gain Flatness Within 0.2 dB over 14 nm[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8: 1148-1150.
- [3] XIA Gui-jin, ZHAO Shang-hong, DONG Shu-fu, et al. Properties of Double Cladding Er-Yb Codoped Fiber Amplifiers [J]. J Optoelectronics Laser, 2003, 14(5): 473-477.
- [4] Yahel E, Hardy A. Amplified Spontaneous Emission in High-Power, Er^{3+} - Yb^{3+} -Codoped Fiber Amplifiers for Wavelength-Division-Multiplexing Application [J]. J Opt Soc Am B, 2003, 20: 1198-1202.
- [5] Pasquale F D, Federighi M. Improved Gain Characteristics in High-Concentration $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Codoped Glass Waveguide Amplifiers [J]. IEEE J Quantum Electronics, 1994, 30(9): 2127-2131.
- [6] Karasek M. Optimum Design of Er/Yb Codoped Fiber for Large-Signal High-Pump-Power Applications [J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(10): 1769-1705.
- [7] Yahel E, Hardy A. Efficiency Optimization of High-Power Er^{3+} - Yb^{3+} -Codoped Fiber Amplifiers for Wavelength-Division Multiplexing Application [J]. J Opt Soc Am B, 2003, 20: 1189-1197.
- [8] Myslinski P, Nguyen D, Chrostowski J. Effects of Concentration on the Performance of Erbium-Doped Fiber Amplifiers [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(1): 112-120.
- [9] Tellert T, Pasquale D, Federighi M. Theoretical Analysis of the Dynamic Behavior of Highly-Efficient $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Codoped Fiber Lasers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(11): 1462-1464.
- [10] 庄茂录, 董淑福, 管桦, 等. 双色层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺放大器增益和噪声特性分析 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(6): 48-52.

(编辑: 门向生)

Dynamic Behavior of Amplified Spontaneous Emission in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-doped Double-clad Fiber Amplifiers

ZHAO Shang-hong, ZHAN Sheng-bao, MA Zhi-qiang, SHI Lei, ZHU Rui-pin

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: Based on discrete algorithm of propagation-rate equation, the ASE dynamic behavior of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-clad fiber amplifier under both continuous and pulse pumping is studied. The reason for different change of the ASE output power with time is analyzed as well. The results show that the time and output power value of ASE reaching steady state under continuous pumping depend on the pump power, and the increase of ASE output power corresponds to the decrease of the inverted population of Er^{3+} . This study also shows that the length of the fiber under pulse pumping affects significantly the saturation of the forward ASE output power, but does not affect that of the backward ASE output power.

Key words: $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped; double-clad fiber amplifier; pumping; ASE; population inversion