

doi:10.3788/gzxb20144312.1206001

任意波形脉冲泵浦下掺铒光纤的自发辐射

刘岚岚, 杨伟, 吴重庆, 王甫

(北京交通大学 理学院发光与光信息技术教育部重点实验室 光信息科学与技术研究所, 北京 100044)

摘 要:为了突破以往研究的波形局限,探究任意波形脉冲泵浦下掺铒光纤的自发辐射特性,从速率方程组出发,采用分时段计算的方法得到各能级粒子数及自发辐射平均功率的表达式.仿真和实验表明,泵浦光毛刺对自发辐射光的影响较小,具有类似“高频滤波”的特性;泵浦功率较大时自发辐射光的波形与泵浦波形接近,该研究结果可以用于光纤激光器的全光调制.理论分析与实验结果相符合,证明了理论的可靠性.

关键词:掺铒光纤放大器;掺铒光纤;脉冲泵浦;自发辐射;全光调制

中图分类号:O436; TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)12-1206001-7

Active Spontaneous Emission of EDF Pumped by Arbitrary Waveform Pulse

LIU Lan-lan, YANG Wei, WU Chong-qing, WANG Fu

(Key Lab of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to study the active spontaneous emission of erbium-doped fiber pumped by arbitrary waveform pulse with breaking the limitation of pump waveform before. By dividing the time into tiny periods, the expressions for level population and the average power of active spontaneous emission were obtained with rate equations. Simulations and experiments show that pump glitches have less effect on the active spontaneous emission just like having a “high frequency filter”; the waveforms of the pump light and active spontaneous emission light are alike when the pump power is large relatively, this research can be used to all-optical modulation for the optical fiber laser. The results are consistent with the theoretical analysis, which show the analysis is reliable.

Key words: Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA); Erbium-Doped Fiber (EDF); Pulse pumping; Active Spontaneous Emission (ASE); All-optical modulation

OCIS Codes: 060.2320; 060.2410; 140.3500

0 引言

掺铒光纤(Erbium-Doped Fiber, EDF)中的自发辐射(Active Spontaneous Emission, ASE)噪音是影响掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)工作性能的重要因素^[1];同时作为掺铒光纤激光器(Erbium-Doped Fiber Laser, EDFL)的起振源,也对其工作特性产生影响^[2-5].文献[6-12]对连续光泵浦下EDFA的自发辐射进行了研究,然而对于脉冲泵浦下EDFA的自发辐射特性研究则很少.在EDFA

中,脉冲泵浦比连续泵浦具有能耗低的优点.另一方面,脉冲泵浦还可以用于光纤激光器的锁模^[13-17],利用大功率脉冲激光器进行泵浦可用于大功率的锁模EDFL激光器,获得高功率锁模输出.可见,脉冲泵浦下的EDFA的自发辐射特性具有重要的研究价值.

1990年崔国琪、董孝义等^[18]从理论上定性分析了连续泵浦与脉冲泵浦两种泵浦方式下的掺铒光纤的阈值功率的对应关系,但没有进行实验.1994年K Y KO等对由1480 nm泵浦源泵浦的EDFA的瞬态特性进行了研究^[19],对脉冲失真、粒子数反转的瞬态变化、泵

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61275075, 11274037)和北京市自然科学基金(No. 4132035)资助

第一作者:刘岚岚(1970-),女,副教授,主要研究方向为全光网络,光通信,光信息处理,模式识别,光计算等. Email: llliu@bjtu.edu.cn

导师(通讯作者):吴重庆(1944-),男,教授,主要研究方向为光纤通信,光纤传感,全光网络,全光信息处理,量子光通信等. Email: cqwu@bjtu.edu.cn

收稿日期:2014-04-22; **录用日期:**2014-06-20

<http://www.photon.ac.cn>

浦功率、前后向 ASE 噪音功率等都进行了研究. 为设计快速响应的有源光纤开关, 1996 年刘宇等研究了预激光调 Q 选模 YAG 倍频激光脉冲泵浦掺铒光纤的荧光特性^[20]. 2007 年, 为了研究包头检测, 姜楠设计了采用脉冲泵浦光测量 EDFA 增益时间的方法^[21], 实验验证了 EDFA 的参量对增益恢复时间的影响. 2011 年李伟南对 EDFA 在脉冲泵浦光作用下, 连续信号光的噪音特性、增益特性和增益谱特性进行了研究^[22]. 2012 年, 王甫研究了小信号脉冲泵浦下掺铒光纤的自发辐射的特性^[23]. 之后, 他又进一步研究了单脉冲和多脉冲泵浦下 EDF 的自发辐射特性, 并涉及到了存在偏置时脉冲泵浦下的 EDF 自发辐射状况^[24]. 然其理论模型是建立在“小信号脉冲泵浦”的条件下的, 对于泵浦光功率较大的情况并未进行讨论, 更未说明泵浦波形存在畸变时的自发辐射状况.

本文针对任意泵浦波形情况下 EDF 的自发辐射理论模型进行了深入研究, 得到 EDF 自发辐射功率的表达式. 将一个任意泵浦波形看作一系列等时长的均匀脉冲的累加, 仿真计算了任意泵浦波形下的自发辐射噪音的波形. 建立的数学模型不仅能够适用于“小脉冲信号”, 同时也能适用于其他功率范围下泵浦脉冲存在畸变的情况. 最后, 搭建了实验系统, 实验结果表明, 采用该模型进行仿真计算的结果和实验结果吻合较好.

1 理论分析

1.1 Er³⁺ 能级系统自发辐射机理

忽略能级细节, 掺铒光纤中 Er³⁺ 是三能级结构, 其自发辐射工作机理如图 1^[25]. 主要跃迁过程为:

- 1) 基态粒子吸收 980 nm 泵浦光的光子能量, 从基态⁴I_{15/2}跃迁到激发态⁴I_{11/2};
- 2) 激发态⁴I_{11/2}的粒子不稳定, 会很快弛豫到亚稳态⁴I_{13/2}, 对应无辐射跃迁;
- 3) 亚稳态能级⁴I_{13/2}的粒子自发跃迁到基态⁴I_{15/2}, 辐射出波长为 1 550 nm 的光.

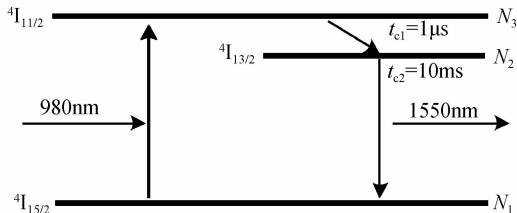


图 1 铒离子自发辐射原理

Fig. 1 The operating principle of ASE in erbium

设⁴I_{15/2}, ⁴I_{13/2}, ⁴I_{11/2}能级的粒子数分别为 N_1, N_2, N_3 , 粒子总数为

$$N_0 = N_1 + N_2 + N_3 \quad (1)$$

三能级的粒子速率方程为

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -(R_{13} + R_{12})N_1 + (R_{21} + A_{21})N_2 + R_{31}N_3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = R_{12}N_2 - (R_{21} + A_{21})N_2 + A_{32}N_3 \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = R_{13}N_1 - (R_{31} + A_{32} + A_{31})N_3 \quad (4)$$

式中 $R_{13} = \frac{\sigma_{ap}\Gamma_{ap}P_p(t)}{h\nu_{13}A_{eff}}$, $A_{32} = \frac{1}{\tau_{c_1}}$, $A_{21} = \frac{1}{\tau_{c_2}}$. Γ_{ap} 为模式限制因子, σ_{ap} 是光纤的有效吸收面积, h 为普朗克常量, ν_{13} 是泵浦光频率, A_{eff} 是光纤截面积, τ_{c_1}, τ_{c_2} 分别为粒子在激发态和亚稳态的寿命. 现在只考虑无信号光情况下 980 nm 光泵浦时的自发辐射, 忽略掉泵浦光的激发态吸收 (Excited State Absorption, ESA) 以及非辐射跃迁, 省去方程中的 R_{12}, R_{31}, R_{21} ; 同时由于激发态的粒子寿命极短 (1 μ s), 大部分粒子很快就会弛豫到亚稳态, 可以近似认为没有激发态粒子直接自发跃迁到基态, A_{31} 可忽略. 令 $B = \frac{\sigma_{ap}\Gamma_{ap}}{h\nu_{13}A_{eff}}$, 则泵浦系数可表示成

$R_{13} = BP_p(t)$, 简化后的粒子数速率方程组为

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -BP_p(t)N_1 + N_2/\tau_{c_1} \quad (5)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -N_2/\tau_{c_2} + N_3/\tau_{c_2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = BP_p(t)N_1 - N_3/\tau_{c_2} \quad (7)$$

1.2 解速率方程组

将式(1)、(5)代入式(6)得到一元二阶变系数非齐次微分方程

$$\frac{\partial^2 N_1}{\partial t^2} + \left(BP_p(t) + \frac{1}{\tau_{c_1}} + \frac{1}{\tau_{c_2}} \right) \frac{\partial N_1}{\partial t} + \left(B \frac{\partial P_p(t)}{\partial t} + B \frac{P_p(t)}{\tau_{c_1}} + B \frac{P_p(t)}{\tau_{c_2}} + \frac{1}{\tau_{c_1}\tau_{c_2}} \right) N_1 = \frac{N_0}{\tau_{c_1}\tau_{c_2}} \quad (8)$$

为了求解变系数微分方程(8), 本文构造了一对函数 $u(t)$ 和 $v(t)$, 使它满足方程组^[26]

$$u(t) + v(t) = BP_p(t) + \frac{1}{\tau_{c_1}} + \frac{1}{\tau_{c_2}} \quad (9)$$

$$v'(t) + v(t)u(t) = B \frac{\partial P_p(t)}{\partial t} +$$

$$BP_p(t) \left(\frac{1}{\tau_{c_1}} + \frac{1}{\tau_{c_2}} \right) + \frac{1}{\tau_{c_1}\tau_{c_2}} \quad (10)$$

不难证明, 式(10)的通解(形式解)可用函数 $u(t)$ 和 $v(t)$ 表示为

$$N_1(t) = c_1 e^{-\int v(t) dt} \int e^{\int [v(t)-u(t)] dt} dt + c_2 e^{-\int v(t) dt} + \frac{N_0}{\tau_{c_1}\tau_{c_2}} e^{-\int v(t) dt} \int \left(\int e^{u(t) dt} dt \right) \cdot e^{\int [v(t)-u(t)] dt} dt \quad (11)$$

并由式(5)可得

$$N_2(t) = \tau_{c_1} c_1 \left\{ e^{-\int u(t) dt} + [BP_p(t) - v(t)] e^{-\int v(t) dt} \cdot \int e^{\int [v(t)-u(t)] dt} dt \right\} + \tau_{c_1} c_2 [BP_p(t) - v(t)] e^{-\int v(t) dt} + \frac{N_0}{\tau_{c_1}} e^{-\int v(t) dt} \left(\int e^{u(t) dt} dt \right) + \frac{N_0}{\tau_{c_1}} [BP_p(t) - v(t)] \cdot e^{-\int v(t) dt} \int e^{\int [v(t)-u(t)] dt} \left(\int e^{u(t) dt} dt \right) dt \quad (12)$$

这样就求二元方程组的问题. 一般来说, 方程组(9,10)没有封闭形式的解, 只有某些特殊情况有解, 其中当 $\partial R_{13}(t)/\partial t=0$ 时可解.

为此, 采用丢阿梅尔时域方法求解方程组(9,10), 即将一个周期分解为多个微小时段(时长为 δt), 而在每个微小时段中 $R_{13}(t)$ 视为常量. 设输入泵浦光为周期性的脉冲光, 波形函数为

$$P_p(t) = \begin{cases} p_0 + p(t) & 0 \leq t \leq T \\ p_0 & T < t \leq t_c \end{cases}, P_p(t+t_c) = P_p(t) \quad (13)$$

式中 T 为脉宽, t_c 为脉冲周期, p_0 是直流光功率. 将脉冲信号的一个周期看成由一系列不同时刻的 $\{P_m(m\delta t)\}$, $m=0,1,2,3,\dots$ 组成的离散序列, 这个序列也可以表示成为一个矢量, 亦即

$$\mathbf{P}_p = [P_0(0), P_1(\delta t), P_2(2\delta t), P_3(3\delta t), \dots]^T \quad (14)$$

在第 m 个小的时段 $m\delta t \leq t \leq (m+1)\delta t$, ($m=0,1,2,3,\dots$) 中, 可认为 $B\partial \mathbf{P}_p(t)/\partial t \approx 0$, 于是解方程组(9)与(10)可得

$$u(t) = \frac{BP_p(m\delta t)}{2} + \frac{\tau_{c_1} + \tau_{c_2}}{2\tau_{c_1}\tau_{c_2}} + \sqrt{\Delta} \quad (15)$$

$$v(t) = \frac{BP_p(m\delta t)}{2} + \frac{\tau_{c_1} + \tau_{c_2}}{2\tau_{c_1}\tau_{c_2}} - \sqrt{\Delta} \quad (16)$$

$$\text{式中 } \Delta = \left(\frac{BP_p(m\delta t)}{2} - \frac{\tau_{c_1} + \tau_{c_2}}{2\tau_{c_1}\tau_{c_2}} \right)^2 - \frac{1}{\tau_{c_1}\tau_{c_2}}$$

于是, 得到 N_1 和 N_2 的时间序列对应的矢量

$$\mathbf{N}_1 = [N_{10}(0), N_{11}(\delta t), N_{12}(2\delta t), N_{13}(3\delta t), \dots]^T \quad (17)$$

$$\mathbf{N}_2 = [N_{20}(0), N_{21}(\delta t), N_{22}(2\delta t), N_{23}(3\delta t), \dots]^T \quad (18)$$

$$N_{1m}(m\delta t) = C_{1m} e^{-v(m\delta t) \cdot (m\delta t)} + C_{2m} e^{-u(m\delta t) \cdot (m\delta t)} + \frac{N_0}{1 + BP_m(m\delta t)(\tau_{c_1} + \tau_{c_2})} \quad (19)$$

$$N_{2m}(m\delta t) = \tau_{c_2} C_{1m} [-v(m\delta t) + BP_m(m\delta t)] \cdot e^{-v(m\delta t) \cdot (m\delta t)} + \tau_{c_2} C_{2m} [-u(m\delta t) + BP_m(m\delta t)] \cdot e^{-u(m\delta t) \cdot (m\delta t)} + \frac{\tau_{c_2} BP_m(m\delta t) N_0}{1 + BP_m(m\delta t)(\tau_{c_1} + \tau_{c_2})} \quad (20)$$

根据边界条件有

$$C_{1m} = B(P_m - p_0) \{1 + [BP_m - u(m\delta t)] \cdot (\tau_{c_1} + \tau_{c_2})\} N_0 / Q_m \quad (21)$$

$$C_{2m} = B(p_0 - P_m) \{1 + [BP_m - v(m\delta t)] \cdot (\tau_{c_1} + \tau_{c_2})\} N_0 / Q_m \quad (22)$$

$$Q_m = v(m\delta t) [1 + BP_m(\tau_{c_1} + \tau_{c_2})] [1 + Bp_0(\tau_{c_1} + \tau_{c_2})] - u(m\delta t) [1 + BP_m(\tau_{c_1} + \tau_{c_2})] \cdot [1 + Bp_0(\tau_{c_1} + \tau_{c_2})] \quad (23)$$

在得到各能级粒子数的表达式后, 根据平均功率、平均光子数与各态粒子数的关系式

$$p_{\text{ASE}}(t) = h\nu(\sigma_{\text{sp}}\Gamma_{\text{sp}}c/n_p)[N_2(t) - N_1(t)]\langle n(t) \rangle + h\nu(\sigma_{\text{sp}}\Gamma_{\text{sp}}c/n_p)N_2(t) \quad (24)$$

其中平均光子数

$$\langle n(t) \rangle = (\sigma_{\text{sp}}\Gamma_{\text{sp}}c/n_p) e^{x(t)} \int_0^t N_2(t') e^{-x(t')} dt'$$

$$x(t) = (\sigma_{\text{sp}}\Gamma_{\text{sp}}c/n_p) \int_0^t [N_2(t') - N_1(t')] dt'$$

可知其对应的矢量为

$$\mathbf{p}_{\text{ASE}} = h\nu(\sigma_{\text{sp}}\Gamma_{\text{sp}}c/n_p) [(\mathbf{N}_2 - \mathbf{N}_1) \cdot \langle \mathbf{n} \rangle + N_2] \quad (25)$$

其中 $\langle \mathbf{n} \rangle = (\sigma_{\text{sp}}\Gamma_{\text{sp}}c/n_p) e^x \cdot \sum \mathbf{N}_2 \cdot e^{-x} \delta t$,

$$\mathbf{x} = (\sigma_{\text{sp}}\Gamma_{\text{sp}}c/n_p) \sum (\mathbf{N}_2 - \mathbf{N}_1) \delta t$$

利用上述公式, 可得到自发辐射的数值解.

2 仿真与实验

实验系统如图 2. 可进行脉冲调制的激光器 (Tunable laser) 发出激光, 中心波长为 975.18 nm; 激光经过光隔离器 (Isolator) 和用作滤波器的布喇格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 注入掺铒光纤 EDF 中, 长度 6 m; 波分复用器 (Wave Division Multiplex, WDM) 将输出的自发辐射光和剩余的泵浦光分开, 1550 nm 的自发辐射光直接进入光示波器 (Optical oscilloscope) 的光接口, 980 nm 的剩余光经探测器 (Detector) 变为电信号进入光示波器的电接口.

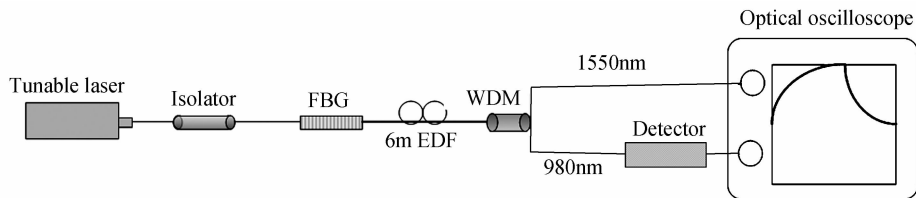


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the experimental system

2.1 矩形脉冲泵浦

实验中采用的掺铒光纤的参量中 $\tau_{c_1} = 1 \mu\text{s}$, $\tau_{c_2} = 10 \text{ ms}$, 掺铒光纤的纤芯铒离子掺杂浓度为 $5.4 \times 10^{24} / \text{m}^3$, 有效纤芯直径为 $2.32 \mu\text{m}$, 可得 $A_{\text{eff}} = \pi d^2 / 4 = 4.23 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $N_0 = 1.37 \times 10^{14}$. 同时模式限制因子 $\Gamma_{\text{sp}} = 0.8$, 掺铒光纤有效吸收面积为 $\sigma_{\text{sp}} = 5.63 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $n_p = 1.54$ 是光纤的折射率.

首先考虑泵浦光为偏置光 $p_0 = 0$ 的矩形脉冲. 图 3 为泵浦脉冲幅值为 $p_1 = 10 \text{ mW}$ 时不同脉宽下 N_1 变化图. 图 4 为泵浦脉宽为 $300 \mu\text{s}$ 时不同幅值下 N_1 的变化图. 图 4 与文献[24]中的结果是一致的. 在脉冲泵浦期间, N_1 的减少随着泵浦脉宽和幅值的增大而加剧; 泵

浦结束后逐渐恢复到初始状态.

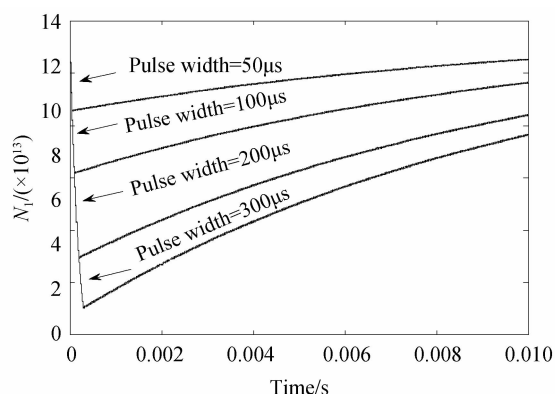


图 3 不同泵浦脉宽下基态粒子数的变化

Fig. 3 Variety for the ground state particle number under different pulse width pumping

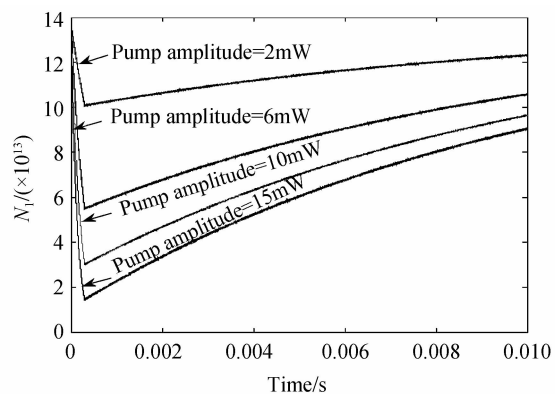


图 4 不同泵浦幅值下基态粒子数的变化

Fig. 4 Variety for the ground state particle number under different pulse amplitude pumping

图 5 为泵浦幅值为 10 mW 时,不同脉宽下 N_2 的变化图;图 6 为泵浦脉宽为 300 μs 时,不同泵浦幅值下 N_2 的变化图. N_2 随着泵浦脉宽以及幅值的增大而增加,泵浦结束后又迅速下降.

图 7 为泵浦幅值为 10 mW 时不同脉宽下的 N_3 变化图,图 8 为泵浦脉宽为 300 μs 时,不同泵浦幅值下的 N_3 变化图.

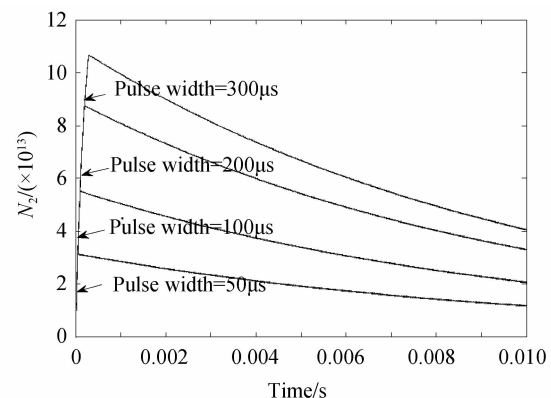


图 5 不同泵浦脉宽下亚稳态粒子数的变化

Fig. 5 Variety for the metastable state particle number under different pulse width pumping

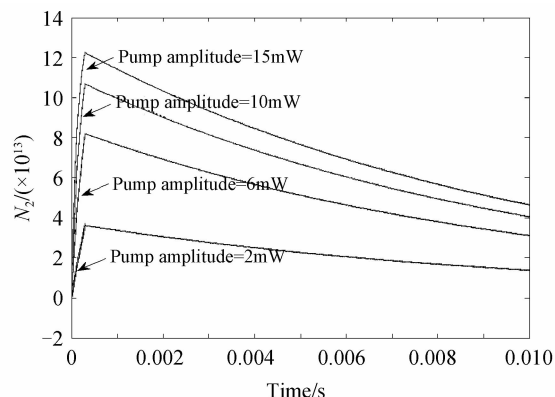


图 6 不同泵浦幅值下亚稳态粒子数的变化

Fig. 6 Variety for the metastable state particle number under different pulse amplitude pumping

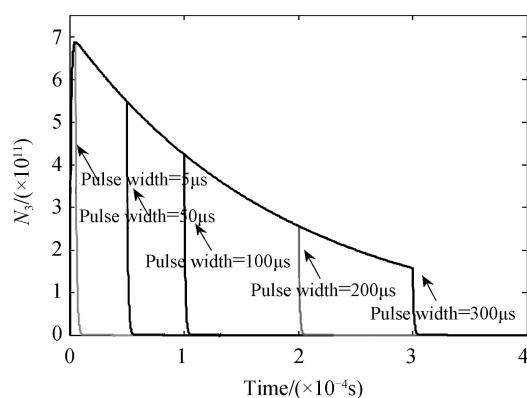


图 7 不同泵浦脉宽下激发态粒子数的变化

Fig. 7 Variety for the excited-state particle number under different pulse width pumping

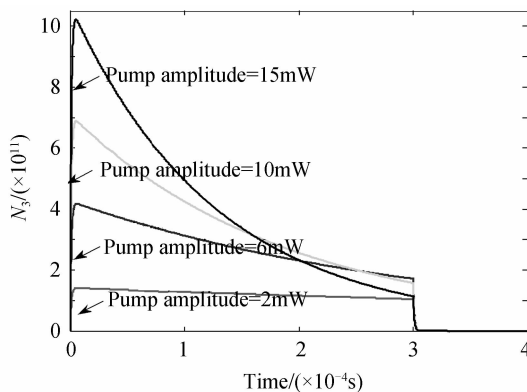


图 8 不同泵浦幅值下激发态粒子数的变化

Fig. 8 Variety for the excited-state particle number under different pulse amplitude pumping

存在泵浦时, N_3 快速上升,到达一定值(和泵浦幅值相关)后开始迅速衰减,泵浦结束后,极速减至 0 时刻状态.

图 9 为泵浦幅值为 10 mW 时不同脉宽下自发辐射平均功率 p_{ASE} 变化图;图 10 为泵浦脉宽为 300 μs 时不同幅值下的 p_{ASE} 变化图;图 11 为文献[24]中的自发辐射实验结果图.

通过以上对比,可知该理论模型的仿真结果与文

献[24]中的基态、亚稳态、自发辐射随时间变化的仿真结果相吻合,亦与其实验结果相吻合.

同时本文发现,仿真结果与文献[24]略有不同.分析原因是因为文献[24]中以“小信号脉冲下,基态粒子近似不变”为前提;而在本文中不再对泵浦光的幅值加以限制,抽运时基态粒子明显减少,从而激发态粒子数也相应出现减少的现象.图8中泵浦幅值较小时(2 mW),其激发态粒子的变化与文献中的结果吻合较

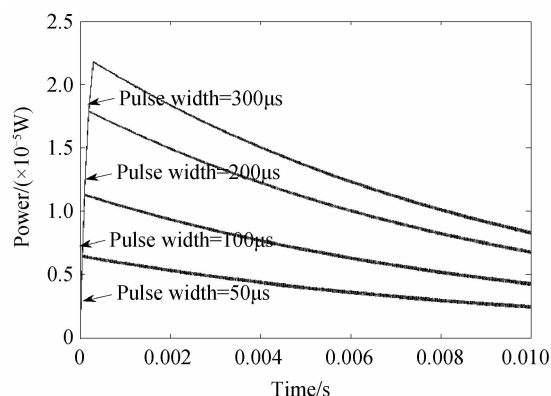


图9 不同泵浦脉宽下自发辐射功率的变化

Fig. 9 Variety for the ASE power under different pulse width pumping

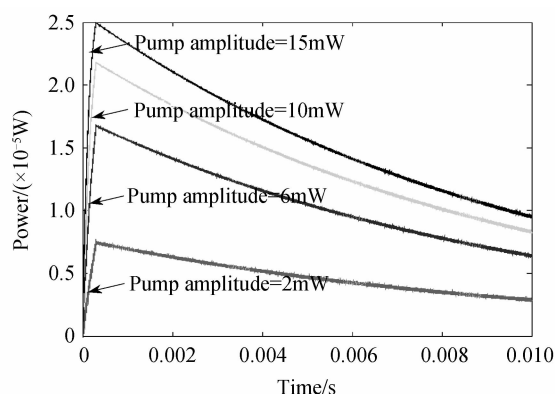
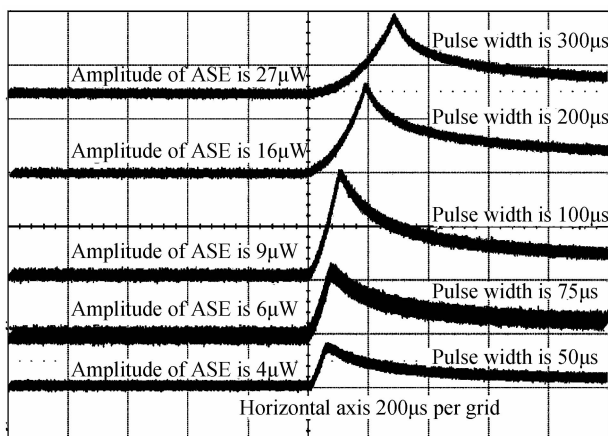
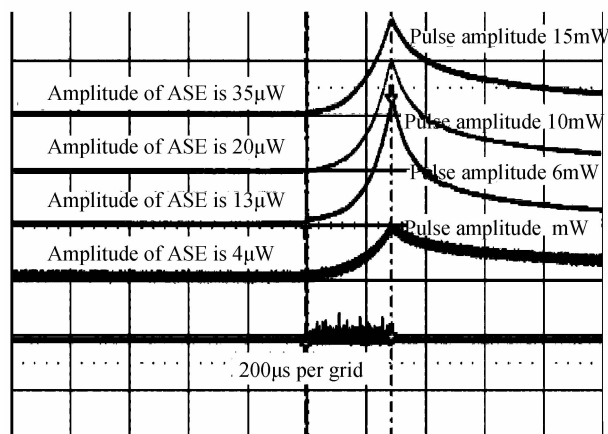


图10 不同泵浦幅值下自发辐射功率的变化

Fig. 10 Variety for the ASE power under different pulse amplitude pumping



(a) The pulse width is 50μs、100μs、200μs、300μs



(b) The pulse amplitude is 2mW、6mW、10mW、15mW

图11 文献[24]中自发辐射波形

好,但随着泵浦功率的增加,激发态粒子数不能再视为常量.

2.2 关于其他波形的讨论

当泵浦光不是理想的方波时,文献[24]已经无能为力.本文在实验室中采用一台输出波形随脉宽变化而变化的泵浦源.取其中两种具有代表性、且在实际中可能用到的简单波形进行仿真和实验.两个波形都有严重的毛刺,而前一个基本上不是矩形脉冲了.

实验采用泵浦波形如图12、图13所示.

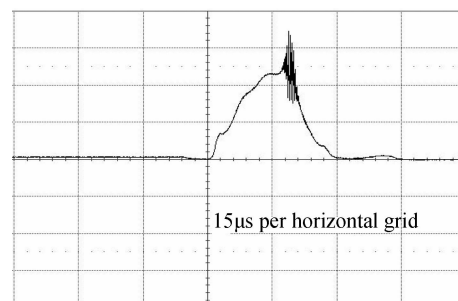


图12 形如三角波的泵浦光波形(偏置 5 mW,脉宽 30 μs)

Fig. 12 The triangle-like-waveform of the pump light (bias 5 mW, pulse width 30 μs)

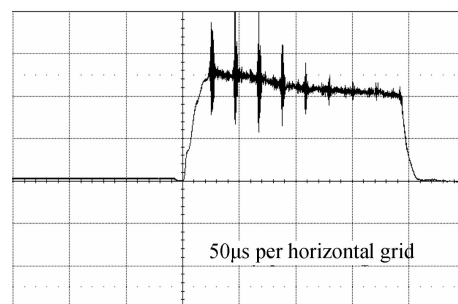


图13 有严重毛刺的泵浦光波形(偏置 4 mW,脉宽 200 μs)

Fig. 13 The waveform of the pump light with serious glitch (bias 4 mW, pulse width 200 μs)

将图12和图13的数据代入到本文中自发辐射的仿真计算程序中,得到的ASE的仿真输出分别为图14

和图 15.

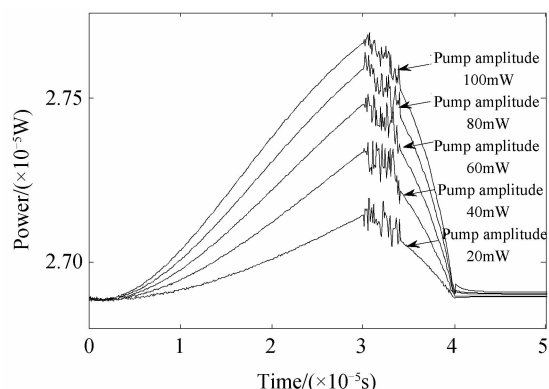


图 14 不同幅值下三角波泵浦的自发辐射波形仿真图
Fig. 14 Simulations for ASE waveform pumped by triangle waves of different amplitude

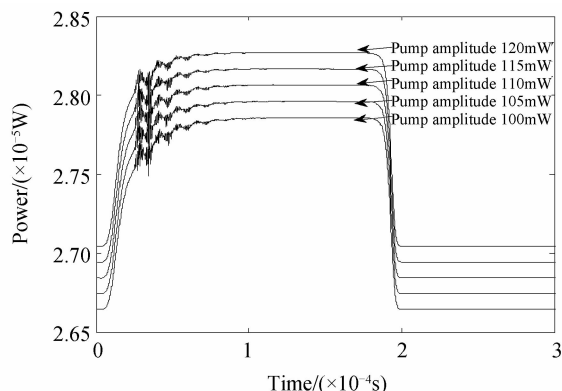


图 15 不同幅值下有严重毛刺泵浦光的自发辐射波形仿真图
Fig. 15 Simulations for ASE waveform pumped by the pump light with serious glitch of different amplitude

在两个不同波形下实验得到的结果表明,泵浦光的毛刺对 ASE 噪音的影响较小,具有近似“高频滤波”的特性;同时,随着泵浦功率的增大,ASE 的输出波形更接近泵浦光的波形.在小信号泵浦时,有明显的延迟展宽现象.通过仿真结果与实验结果对比,可以看出是较为吻合的.因此本文提出的理论模型具有一定的参考价值.

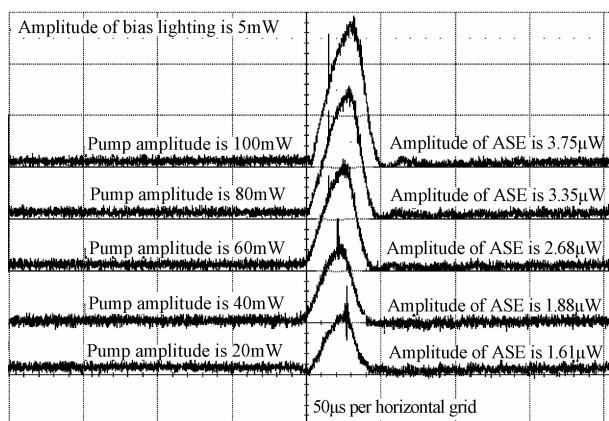


图 16 不同幅值下三角波泵浦的自发辐射实验结果
Fig. 16 The experiment results for ASE waveform pumped by triangle waves of different amplitude

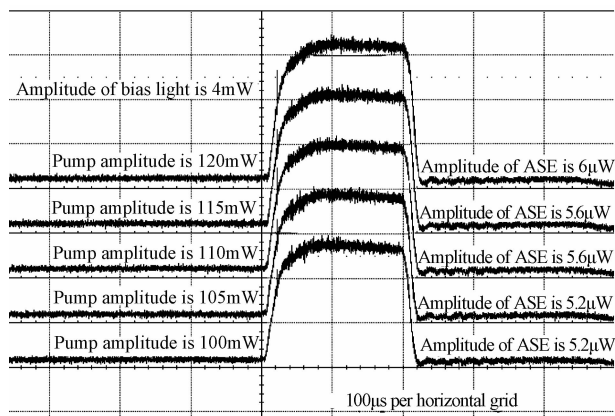


图 17 不同幅值下有严重毛刺泵浦光的自发辐射实验结果
Fig. 17 The experiment results for ASE waveform pumped by the pump light with serious glitch of different amplitude

3 结论

本文深入研究了掺铒光纤在任意波形的脉冲泵浦下的自发辐射,建立了数学模型.采用杜哈梅尔时域方法,将一个任意泵浦波形看作一系列等时长的均匀脉冲的累加,仿真计算了任意泵浦波形下的自发辐射噪音的波形.该方法既适用于“小脉冲信号”方波的泵浦情况,也适用于其他任意波形的泵浦情况.实验发现:泵浦光的毛刺对于 ASE 噪音影响较小,具有近似“高频滤波”的特性;相同泵浦波形下,随着泵浦功率的增大,ASE 噪音的波形与泵浦光的波形也更为接近,而不像小信号泵浦时那样出现明显的延迟展宽现象.实验结果与仿真计算结果吻合较好.

参考文献

- [1] GILES C R, Emmanuel desurvire modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, **9** (2): 271-283.
- [2] KUANG Fen, YE Zhi-qing. Self-seeded multi-wavelength switchable erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12):1460-1463. 匡芬, 叶志清. 自激发多波长可开关掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1460-1463.
- [3] CHOW J, TOWN G, EGGLETON B, et al. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, **8**(1): 60-62.
- [4] WU Xu, RUAN Shuang-chen, LIU Cheng-xiang, et al. Experimental investigation on superfluorescent sources based on erbium-doped photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0306005. 吴旭, 阮双琛, 刘承香, 等. 基于掺铒光子晶体光纤超荧光光源的实验研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0306005.
- [5] SONG Zhi-qiang, QI Hai-feng, GUO Jian, et al. Characteristics of self-amplified distributed feedback fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0206005. 宋志强, 祁海峰, 郭健, 等. 自放大结构分布反馈光纤激光器输出特性[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2): 0206005.
- [6] CHEN Zu-cong, RUAN Shuang-chen, GUO Chun-yu, et al. Passively mode-locked erbium doped fiber ring laser[J]. *Acta*

- Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 267-270.
- 陈祖聪, 阮双琛, 郭春雨, 等. 环形腔被动锁模掺铒光纤激光器[J]. 光子学报, 2012, **41**(3):267-270.
- [7] SHI Shu-li. Study on the gain and ASE of EDFA [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2003, **5**(S): 0500802.
- 时书丽. 对 EDFA 增益和自发辐射噪声的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2003, **5**(S):0500802.
- [8] HARUN SW, AHMAD H. Gain and noise figure improvements in double-pass S-band EDFA [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**: 935-938.
- [9] YEH Chien-Hung. Utilizations of two-stage erbium amplifier and saturable-absorber filter for tunable and stable power-equalized fiber laser [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(7): 3680-3684.
- [10] KUMAR N, SHENOY M R, PAL B P. A standard fiber-based loop mirror as a gain-flattening filter for erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(10): 2056-2058.
- [11] LIU Li-song, PENG Jian, ZHANG Chen-fang, *et al.* A novel high concentration silica erbium-doped fiber with large mode field diameter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100209.
- 刘利松, 彭健, 张晨芳, 等. 一种新型的大模场高浓度石英基掺铒光纤[J]. 光学学报, 2010, **30**(s1):s100209.
- [12] LIU Li-song, REN Wen-hua, CHEN Wei-guo, *et al.* Research on fabrication and characteristic of twin-core erbium-doped fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(8): 0805002.
- 刘利松, 任文华, 陈卫国, 等. 双芯掺铒光纤的研制及其增益均衡特性研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(8):0805002.
- [13] ROSA H G, de SOUZA E A. Erbium-doped fiber laser passively mode-locked by thin films incorporating carbon nanotubes [J]. *IEEE, LEOS Annual Meeting Conference Proceedings*, 2009, LEOS 09, 2009: 687-688.
- [14] TIAN Zhen, LIU Shan-liang, ZANG Bing-yuan, *et al.* Graphene mode-locked erbium-doped fiber pulse laser [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2011, **38**(3): 0302005.
- 田振, 刘山亮, 张丙元, 等. 石墨烯锁模掺铒光纤脉冲激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(3):0302005.
- [15] LIU Peng-zu, HONG Jing, ZHANG Bin, *et al.* 1550 nm Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2011, **38**(7): 0702017.
- 刘鹏祖, 侯静, 张斌, 等. 基于半导体可饱和吸收镜的 1550 nm 被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0702017.
- [16] REN Fang, XIANG Wang-hua, ZU Peng, *et al.* Experimental Study on Er/Yb co-doped double-clad all fiber laser [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2010, **37**(3): 622-626.
- 任芳, 向望华, 祖鹏, 等. Er/Yb 共掺双包层全光纤激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(3):622-626.
- [17] PU Li-chun, WANG Fei. Tunable multiwavelength mode-locked fiber ring laser incorporating mach-zehnder interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(S1): 77-80.
- 蒲利春, 王飞. 基于马赫-曾德尔干涉仪的可调谐多波长锁模光纤环形激光器[J]. 中国激光, 2010, **37**(S1):77-80.
- [18] CUI Guo-qi, DONG Xiao-yi, ZHANG Jian-zhong, *et al.* Characteristic analysis on erbium-doped fiber amplifications pumped with CW and pulse light sources [J]. *Laser & Infrared*, 1992, **22**(2): 26-29.
- 崔国琪, 董孝义, 张建忠, 等. 连续泵浦与脉冲泵浦掺铒光纤放大特性分析[J]. 激光与红外, 1992, **22**(2): 26-29.
- [19] KO K Y, DEMOKAN M S, TAM H Y. Transient analysis of erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, **6**(12): 1436-1438.
- [20] LIU Yu, MING Hai, WANG Sheng-bo, *et al.* Research into gain modulation characteristics of erbium-doped fiber pumped pulsed laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1996, **13**(6): 517-521.
- 刘宇, 明海, 王声波, 等. 脉冲泵浦掺铒光纤增益调制特性的研究[J]. 量子电子学, 1996, **13**(6): 517-521.
- [21] JIANG Nan, WU Chong-qing, WANG Yong-jun, *et al.* Measurement and analysis of recovery time of erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(2): 176-178.
- 姜楠, 吴重庆, 王拥军, 等. EDFA 增益恢复时间的测定及分析[J]. 半导体光电, 2007, **28**(2):176-178.
- [22] LI Wei-nan. Study on The transient response of the EDFA caused by the pump [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012, Jan.
- 李伟南. 由泵浦光引起的掺铒光纤放大器瞬态特性的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012年1月.
- [23] WANG Fu, WU Chong-qing, LIU Lan-lan. Active spontaneous emission in erbium-doped fiber with small pulse pump [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0706002.
- 王甫, 吴重庆, 刘岚岚. 小信号脉冲泵浦时掺铒光纤自发辐射的研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(7): 0706002.
- [24] WANG Fu. Study on the wavelength for 980nm optical switch and the active spontaneous emission in EDF [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. 6: 31-38.
- 王甫. 980nm 光开关以及 EDF 的自发辐射特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. 6: 31-38.
- [25] 吴重庆. 光通信导论[M]. 1 版. 北京:清华大学出版社. 2008:253-263.
- [26] LI Gao, CHANG Xiu-fang. On solution to second-order variation homogenous coefficient linear differential equations [J]. *Journal of Hebei North University (Natural Science Edition)*, 2010, **26**(6):12-13.
- 李高, 常秀芳. 关于二阶变系数线性微分方程求解法的研究[J]. 河北北方学院学报, 2010, **26**(6): 12-13.