

小信号脉冲抽运时掺铒光纤自发辐射的研究

王 甫 吴重庆 刘岚岚

(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 自发辐射(ASE)是掺铒光纤放大器(EDFA)的重要噪声源,对于由 EDFA 构成的光纤激光器有重要影响。理论与实践证明,它与抽运方式紧密相关,所以研究脉冲抽运时掺铒光纤(EDF)的自发辐射有重要的学术价值。同时,脉冲抽运对于 EDFA 锁模激光器的研究也有一定意义。从理论和实验两方面研究了小信号脉冲抽运时,抽运脉冲宽度和幅度对于 EDF 的自发辐射特性的影响,得到了小信号抽运时输出 ASE 噪声平均值的近似解析解。研究发现,小信号脉冲抽运时输出信号的幅度与抽运脉冲的宽度成正比。这个新现象可用于脉冲宽度的全光检测。

关键词 光通信;掺铒光纤;掺铒光纤放大器;脉冲抽运;自发辐射;全光脉宽测量

中图分类号 O436; TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0706002

Active Spontaneous Emission in Erbium-Doped Fiber with Small Pulse Pump

Wang Fu Wu Chongqing Liu Lanlan

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

Abstract The active spontaneous emission (ASE) is the important noise source for erbium-doped fiber amplifier (EDFA), affecting fiber laser based on the EDFA seriously. The theory and practice show that the ASE is closely related with pump methods, so the study on the ASE of erbium-doped fiber (EDF) under the condition of the pulse pumping has important scientific significance. What's more, pulse pumping makes some sense to the mode-locked laser based on EDFA. The effects of pump pulse with different widths and amplitudes on the ASE are investigated by the theoretical and experimental methods. An approximate analytical solution of output ASE noise average is derived when pump signal is small. The results show that the output amplitude of ASE is proportional to the input width of pump pulse when the pump pulse is small. The new phenomena can be used for the all-optical measurement of a pulse width.

Key words optical communications; erbium-doped fiber; erbium-doped fiber amplifier; pulse pumping; amplified spontaneous emission; all-optical measurement of pulse width

OCIS codes 060.2320; 060.2410; 140.3500

1 引 言

掺铒光纤(EDF)的自发辐射(ASE)是影响掺铒光纤放大器(EDFA)的重要噪声源。同时,当用 EDFA 组成光纤激光器时,EDFA 的自发辐射有重要作用。

理论与实践已证明,自发辐射与输入信号功率、抽运光功率和抽运方式紧密相关^[1~3]。在连续光抽

运条件下的自发辐射特性,许多文献已经有过详细的论述^[4~9]。对于脉冲形式的信号光在 EDFA 中的特性也已做了大量研究。Shin 等^[10]研究了当信号脉冲经过 EDFA 时,脉冲的展宽和压缩现象与信号脉冲光的宽度、抽运能量以及背景光与信号脉冲光的功率比值有关;Lepeshkin 等^[11]针对不同功率的连续光抽运时,低速和超高速信号脉冲在 EDF 中

收稿日期: 2012-02-04; **收到修改稿日期**: 2012-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61077048, 60907027)和北京市自然科学基金(4112042)资助课题。

作者简介: 王 甫(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤器件性能方面的研究。E-mail: 10121925@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944—),男,教授,主要从事光纤通信、光纤传感、全光网络、全光信息处理和量子光通信等方面的研究。E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn(通信联系人,光学学会会员号: S0404200675)

的传输特性进行了研究。但是,以上研究都是在连续光抽运条件下得出的,而当采用脉冲抽运时掺铒光纤特性的研究却少有报道。

另一方面,EDFA 光纤激光器的起振是源于光纤的自发辐射噪声的,因此自发辐射噪声特性对于这类激光器的性能有很大影响^[12~14]。锁模技术可以充分利用抽运源的功率以及获得高功率的激光输出,而改善锁模激光器性能的常规途径是改善其结构^[15~20],但还存在另外一个途径,就是采用脉冲抽运。脉冲抽运可将大功率的脉冲激光器用于锁模光纤激光器,以便获得高功率锁模输出。这就需要研究在脉冲抽运条件下 EDF 的自发辐射特性。针对脉冲抽运情况下掺铒光纤的特性,崔国琪等^[4]曾经从理论上定性地研究了其阈值功率与连续抽运光情况下阈值功率的对应关系,但没有进行详细的分析和实验。为了研究包头检测,姜楠等^[21]设计了采用脉冲抽运光测量 EDFA 增益时间的方法,实验验证了 EDFA 的参数对增益恢复时间的影响。EDFA 的码型效应、图样效应等瞬态特性,将影响光通信的质量,所以李伟南^[22]对于由抽运光引起的掺铒光纤放大器的瞬态特性进行了研究。为设计快速响应的有源光纤开关,刘宇等^[23]研究了预激光调 Q 选模 YAG 倍频激光脉冲抽运 EDF 的荧光特性。Ko 等^[24]从理论和实验上,对基于 1480 nm 抽运光的 EDFA 瞬态特性响应进行了研究,并验证了影响增益饱和和响应以及增益恢复时间的因素。而关于对脉冲抽运情况下 EDF 的自发辐射特性研究尚未见到相关文献报道。

本文研究了小信号脉冲抽运条件下的自发辐射特性,包括脉冲宽度与脉冲幅度对于自发辐射的影响。在理论上从速率方程出发,分析了 EDF 各能级载流子粒子数分布的时间变化规律;应用自发辐射平均光子数与载流子粒子数分布的关系,得出了输出噪声功率的时间变化规律和近似的解析表达式;搭建了实验系统,进行了实验验证,发现了自发辐射峰值功率与抽运脉冲宽度基本成正比的现象。

2 理论分析

众所周知,EDF 的基态粒子会吸收抽运光子而跃迁到高能级,从高能级再自发跃迁到亚稳态,处于亚稳态的粒子将在亚稳态停留一段时间,其停留时间可以达到毫秒量级。通常,忽略铒离子能级结构的细节,能级图如图 1 所示^[24,25]。

EDF 的主要跃迁过程有 3 个:

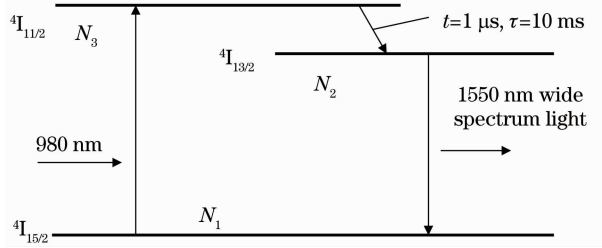


图 1 铒离子的能级结构

Fig. 1 Energy-level diagram of erbium ions

- 1) 从基态 ${}^4I_{15/2}$ 到激发态 ${}^4I_{11/2}$,对应于 980 nm 波长的受激吸收;
- 2) 从激发态 ${}^4I_{11/2}$ 到亚稳态的 ${}^4I_{13/2}$,对应于非辐射跃迁;
- 3) 从亚稳态 ${}^4I_{13/2}$ 到基态 ${}^4I_{15/2}$,对应于 1550 nm 波段波长自发辐射。

现在只考虑在无信号光输入的情况下 980 nm 抽运光的自发辐射过程。对于三能级系统,令 3 个能级 ${}^4I_{15/2}$ 、 ${}^4I_{13/2}$ 、 ${}^4I_{11/2}$ 上的载流子数目为 N_1 、 N_2 、 N_3 ,总数为 N_0 , $N_1 + N_2 + N_3 = N_0$ 。忽略抽运激发态吸收(ESA)以及非辐射跃迁,各能级粒子数随时间的变化应满足以下速率方程^[25]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -(R_{13} + R_{12})N_1 + (R_{21} + A_{21})N_2 + R_{31}N_3, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = R_{12}N_1 - (R_{21} + A_{21})N_2 + A_{32}N_3, \quad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13}N_1 - (R_{13} + A_{31} + A_{32})N_3. \quad (3)$$

对于激发态的粒子数方程(3),采用脉冲抽运时,因脉冲抽运的时间短,光能量较小,对于基态的粒子数影响不大,可认为 $N_1 \approx N_0$ 保持不变,且 EDF 能够完全吸收抽运光,并忽略 N_3 向基态的自发辐射与受激辐射。而对于亚稳态的粒子数方程(2),只考虑来自于激发态的自发跃迁和向基态的自发辐射过程。这样,EDF 各个能级的载流子速率方程简化为

$$\Delta E_{13} \frac{dN_3}{dt} = p(t) - \frac{N_3}{\tau_{c1}} \Delta E_{23}, \quad (4)$$

$$\Delta E_{12} \frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{c1}} \Delta E_{23} - \frac{1}{\tau_{c2}} N_2 \Delta E_{12}, \quad (5)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{dN_2}{dt} - \frac{dN_3}{dt}, \quad (6)$$

式中 ΔE_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 为能级差, τ_{c1} 为粒子处于激发态 ${}^4I_{11/2}$ 的寿命, τ_{c2} 为粒子处于亚稳态的寿命, $p(t)$ 为抽运光功率;由 ΔE_{ij} 为能级差其值为 $h\nu$,虽然自发辐射光大约有 30 nm 的带宽,但是相对于中

心波长 1550 nm, 这个差别并不大, 于是可认为这些能级差都是常数, 不妨设 $\Delta E_{23}/\Delta E_{13} = \eta_1$, $\Delta E_{23}/$

$\Delta E_{12} = \eta_2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2$ 可称为能量转换系数。解(4)、(5)式可得

$$N_3(t) = N_3(0) \exp\left(-\eta_1 \frac{t}{\tau_{c1}}\right) + \exp\left(-\eta_1 \frac{t}{\tau_{c1}}\right) \int_0^t \frac{p(t')}{\Delta E_{13}} \exp\left(\eta_1 \frac{t'}{\tau_{c1}}\right) dt', \quad (7)$$

$$N_2(t) = N_2(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{c2}}\right) + \frac{\eta_2}{\tau_{c1}} N_3(0) \frac{1}{1/\tau_{c2} - \eta_1/\tau_{c1}} \left[\exp\left(-\frac{\eta_1 t}{\tau_{c1}}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{c2}}\right) \right] + \frac{\eta_2}{\tau_{c1}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{c2}}\right) \int_0^t \exp\left(\frac{1}{\tau_{c2}} - \frac{\eta_1}{\tau_{c1}}\right) t' dt' \int_0^{t'} \frac{p(t'')}{\Delta E_{13}} \exp\left(\eta_1 \frac{t''}{\tau_{c1}}\right) dt'', \quad (8)$$

式中 $N_3(0)$, $N_2(0)$ 是在没有抽运光注入时, 激发态和亚稳态的初始载流子数。如果前一次抽运已经结束较长一段时间, 残余的初始载流子数目应很小, 可认为 $N_3(0) = N_2(0) \approx 0$ 。

假定输入抽运光 $p(t)$ 为矩形脉冲函数, 即

$$p(t) = \begin{cases} P_0 & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{other} \end{cases}, \quad (9)$$

代入(7)与(8)式, 整理后可得各能级对应的载流子数目为

$$N_2(t) = \begin{cases} \left(\frac{P_0}{\Delta E_{23}} \right) \frac{\eta_2 \tau_{c1}}{\eta_1} \left[\exp\left(-\frac{\eta_1 t}{\tau_{c1}}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{c2}}\right) \right] + \frac{P_0 \eta_2 \tau_{c2}}{\Delta E_{23}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{c2}}\right) \right] & 0 \leq t \leq T \\ \frac{P_0 \eta_2}{\Delta E_{23}} (\tau_{c2} + \frac{\tau_{c1}}{\eta_1}) \left[\exp\left(\frac{T}{\tau_{c2}}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau_{c2}}\right) - \frac{P_0 \eta_2 \tau_{c1}}{\Delta E_{23} \eta_1} \left[\exp\left(\frac{\eta_1 T}{\tau_{c1}}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{\eta_1 t}{\tau_{c1}}\right) & t \geq T \end{cases}, \quad (10)$$

$$N_3(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{c1}}{\Delta E_{23}} P_0 \left[1 - \exp\left(-\eta_1 \frac{t}{\tau_{c1}}\right) \right] & 0 \leq t \leq T \\ \frac{P_0 \tau_{c1}}{\Delta E_{23}} \left[\exp\left(\eta_1 \frac{T}{\tau_{c1}}\right) - 1 \right] \exp\left(-\eta_1 \frac{t}{\tau_{c1}}\right) & t \geq T \end{cases}. \quad (11)$$

对于 1550 nm 波长, 由 $\Delta E_{ij} = h\nu$ 可知 $\Delta E_{13} = 2.03 \times 10^{-19}$ J, $\Delta E_{12} = 1.3 \times 10^{-19}$ J, $\Delta E_{23} = 0.73 \times 10^{-19}$ J, $\eta_1 = 0.36$, $\eta_2 = 0.56$ 。根据文献[25,26]以及 Nufern EDFC-980-HP C-Band EDF 的参数为 $\tau_{c1} = 1 \mu\text{s}$, $\tau_{c2} = 10 \text{ ms}$, EDF 的纤芯单位体积内铒粒子数目为 $5.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, 有效纤芯直径为 $2.32 \mu\text{m}$, 可得

$$N_0 = \frac{\pi d^2}{4} l \times 5.4 \times 10^{24} = 4.56 \times 10^{14}.$$

由(10)、(11)式可见, 粒子数的分布与注入矩形脉冲的峰值功率 P_0 成正比, 故用比值 N_i/P_0 ($i=2,3$) 来描述跃迁过程更准确, 图 2 与图 3 分别为在不同的脉宽情况下激发态与亚稳态的载流子数量与抽运功率比值随时间的变化关系。

由图可见, 在抽运光存在期间 ($0 \leq t \leq T$), 随着时间的推移, 激发态与亚稳态的相对粒子数 N_3/P_0 和 N_2/P_0 呈现增加的趋势; 随着脉宽进一步增大, 激发态的相对粒子数会出现饱和。当 $t \geq T$ 抽运结束之后, N_3/P_0 和 N_2/P_0 则迅速衰减。

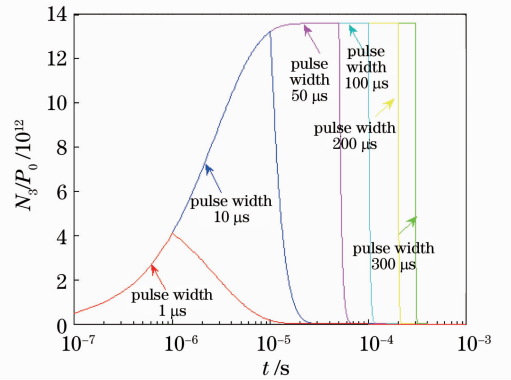


图 2 激发态相对粒子数 N_3/P_0 的变化
Fig. 2 Relative number of particles N_3/P_0 of excited state

不同的脉宽, 根据(6)式基态粒子数 $N_1(t)$ 也会随时间有一些微小的变化(脉冲最大幅值为 15 mW 时, 约为 5%), 所以认为此时为小信号, 图 4 为固定抽运功率为 10 mW 改变脉宽时 $N_1(t)$ 的变化, 图 5 为固定抽运脉宽为 $300 \mu\text{s}$ 改变幅值时 $N_1(t)$ 的变化。

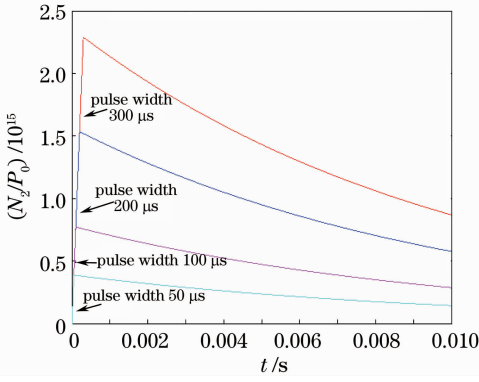


图 3 亚稳态相对粒子数 N_2/P_0 的变化
Fig. 3 Relative number of particles N_2/P_0 of metastable state

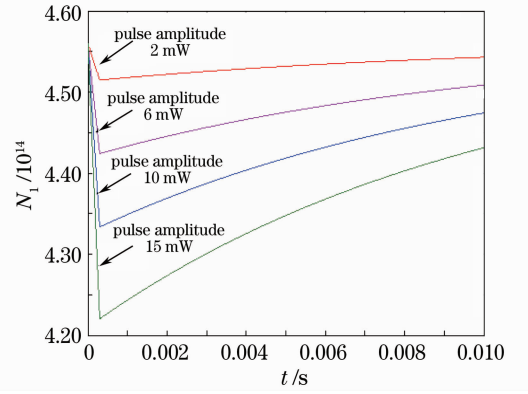


图 5 基态载流子与抽运幅度的关系
Fig. 5 Relation between the carrier of ground state and pump pulse amplitude

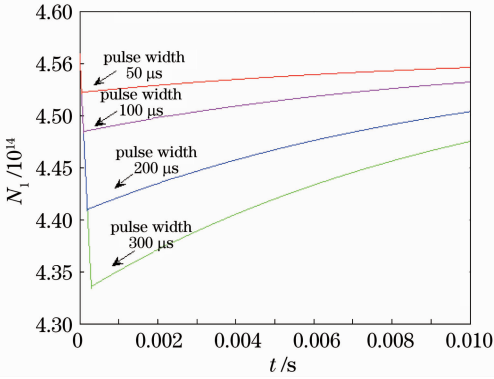


图 4 基态载流子与脉宽的关系
Fig. 4 Relation between the carrier of ground state and pulse width

光子的自发辐射跃迁是一个统计过程,通常用平均光子数 $\langle n \rangle$ 表示,为

$$\frac{\Delta \langle n \rangle}{\zeta S \Delta L} = (N_2 - N_1) \langle n \rangle + N_2, \quad (12)$$

式中 S 为掺铒光纤的吸收截面面积,光子的速度 $v_g = \Delta L / \Delta t = c / n_p$, $\Delta L = \Delta t c / n_p$ 代入上式可得

$$\frac{n_p}{\zeta S} \frac{\Delta \langle n \rangle}{\Delta t} = [N_2(t) - N_1(t)] \langle n \rangle + N_2(t), \quad (13)$$

由于起始的光子数目为零,则自发辐射产生的光子的数目为

$$\langle n \rangle = \exp \left\{ \frac{\zeta \zeta S}{n_p} \left[\int_0^t (N_2 - N_1) dt' \right] \right\} \int_0^t N_2 \exp \left\{ - \frac{\zeta \zeta S}{n_p} \left[\int_0^t (N_2 - N_1) dt'' \right] \right\} dt'. \quad (14)$$

定义权函数 $f(t) = \exp \left\{ \frac{\zeta \zeta S}{n_p} \left[\int_0^t (N_1 - N_2) dt' \right] \right\}$ 在抽运脉冲存在 $0 \leq t \leq T$ 期间

$$f(t) = \exp \left\{ \frac{\zeta \zeta S}{n_p} \left\{ \frac{P_0 \tau_{c1}}{\Delta E_{23}} \left(\frac{2\eta_2}{\eta_1} - 1 \right) \frac{\tau_{c1}}{\eta_1} \left[\exp \left(- \frac{\eta_1}{\tau_{c1}} t \right) - 1 \right] - \frac{2P_0 \eta_2}{\Delta E_{23}} \left(\frac{\tau_{c1}}{\eta_1} + \tau_{c2} \right) \tau_{c2} \left[\exp \left(- \frac{t}{\tau_{c2}} \right) - 1 \right] - \left(\frac{2P_0 \eta_2 \tau_{c2}}{\Delta E_{23}} + \frac{P_0 \tau_{c1}}{\Delta E_{23}} - N_0 \right) t \right\} \right\}. \quad (15)$$

当抽运脉冲消失 $t \geq T$ 之后

$$f(t) = \exp \left\{ - \frac{\zeta \zeta S}{n_p} \left\{ \frac{P_0 \tau_{c1}}{\Delta E_{23}} \left(\frac{2\eta_2}{\eta_1} - 1 \right) \frac{\tau_{c1}}{\eta_1} \left[\exp \left(\frac{\eta_1}{\tau_{c1}} T \right) - 1 \right] \exp \left(- \frac{\eta_1}{\tau_{c1}} t \right) - \frac{2P_0 \eta_2}{\Delta E_{23}} \left(\frac{\tau_{c1}}{\eta_1} + \tau_{c2} \right) \tau_{c2} \times \left[\exp \left(\frac{T}{\tau_{c2}} \right) - 1 \right] \exp \left(- \frac{t}{\tau_{c2}} \right) + \left[\left(\frac{2P_0 \eta_2 \tau_{c2}}{\Delta E_{23}} + \frac{P_0 \tau_{c1}}{\Delta E_{23}} \right) T - N_0 t \right] \right\} \right\}. \quad (16)$$

光功率与光子数的变化率成正比, $p(t) = h\nu [\partial \langle n(t) \rangle / \partial t]$, 于是

$$\frac{\partial \langle n \rangle}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{f(t)} \int_0^t f(t') N_2(t') dt' \right] = N_2(t) - \frac{f'(t)}{f^2(t)} \int_0^t f(t') N_2(t') dt'. \quad (17)$$

假设 $\zeta = 0.8$, $S = 5.63 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $n_p = 1.54$ 代入光子数解析式,通过 Matlab 软件仿真可得到光子数随时间的变化如图 6 所示。其中 6(b) 是 $0 \sim 0.5 \text{ ms}$ 内,光子数随时间的变化。

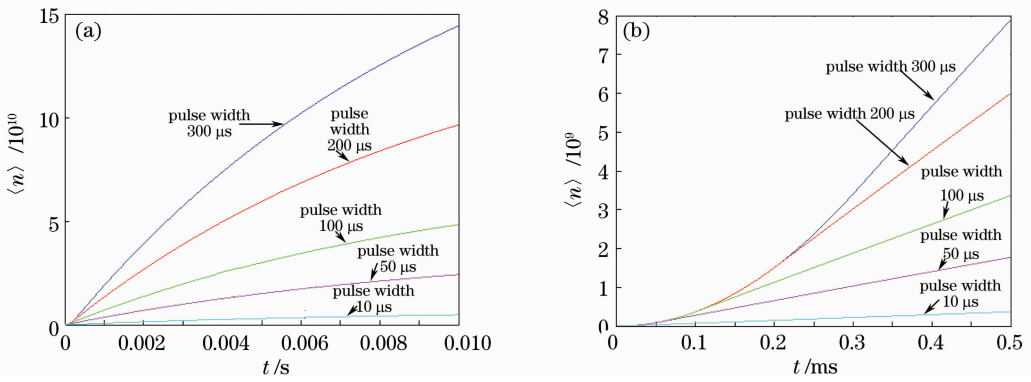


图 6 输出光子数的变化。(a)时间从 0~10 ms；(b)时间从 0~0.50 ms

Fig. 6 Change of output photons. (a) Time from 0 to 10 ms; (b) time from 0 to 0.50 ms

图 7 是固定输入脉冲的峰值功率改变脉冲宽度得到的自发辐射光功率,由图可以看出,EDF 自发辐射功率随着抽运脉宽的增大而增大,且增长的时间和抽运脉冲宽度相对应,后迅速的衰减。图 8 是固定输入脉冲的宽度改变脉冲峰值功率得到的自发辐射光功率,由图可见 EDF 的自发辐射功率随着抽运功率的增大而增大。

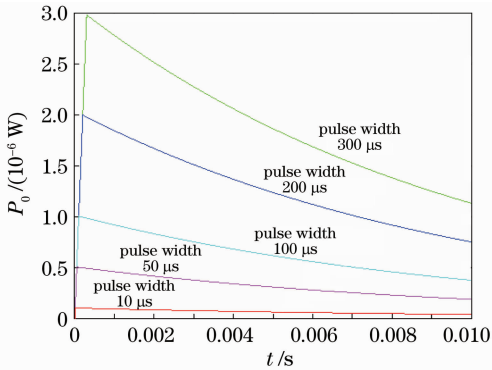


图 7 自发辐射光功率与抽运脉宽关系

Fig. 7 Relation between output power of ASE and input widths of pump pulse

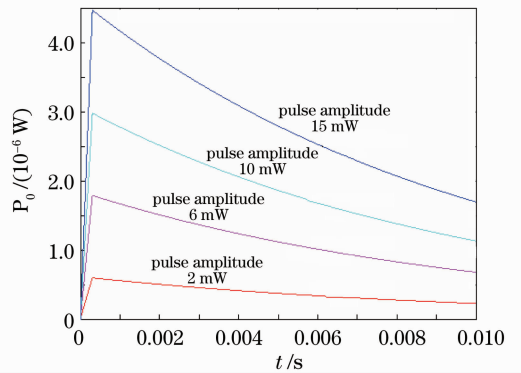


图 8 自发辐射光功率与抽运功率关系

Fig. 8 Relation between output power of ASE and input powers of pump pulse

程门阵列(FPGA)产生频率为 77.76 MHz、宽度可调的电脉冲信号;并去调制中心波长为 976.106 nm 的激光器;激光器输出的脉冲光通过一个隔离器注入 EDF,型号为 Nufern EDFC-980-HP C-Band EDF,长度为 20 m;波分复用器(WDM)用于将输出的自发辐射光端和剩余的抽运光分开,1550 nm 的自发辐射光直接进入光示波器的光口,980 nm 的剩余光经探测器(detector)变为电信号进入光示波器的电口,由于示波器的测量灵敏度不够,故实验时加入少许的直流抽运光。

3 实 验

实验系统如图 9 所示,工作原理为:现场可编

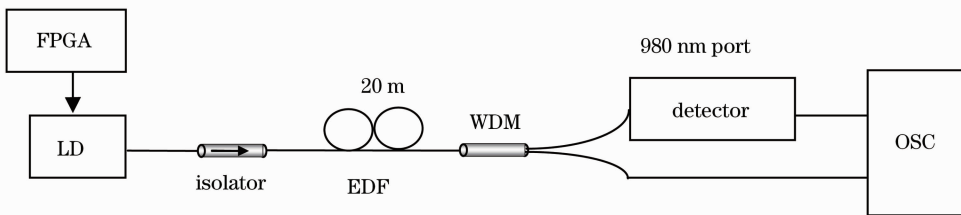


图 9 980 nm 单脉冲抽运光作用下 EDF 的自发辐射

Fig. 9 ASE of EDF with the single pulse pump of 980 nm

1) 变脉宽:固定输入脉冲的重复周期为 10 ms, 输入抽运脉冲幅值 P_0 为 12 mW, 脉宽分别为 50、100、200、300 μs 时, 对应的 EDF 自发辐射输出波形经处理合成后如图 10 所示。由图可见, 在抽运脉冲幅值一定的情况下, 随着脉冲宽度的增大, EDF 的自发辐射波形输出幅值会随着增大。经过拟合后的曲线如图 11 所示, 由图可见二者近似于正比关系。

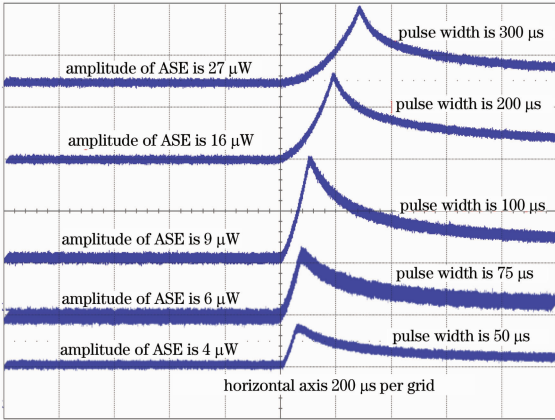


图 10 不同脉宽的自发辐射波形图

Fig. 10 Output waveform of ASE with different pulse widths

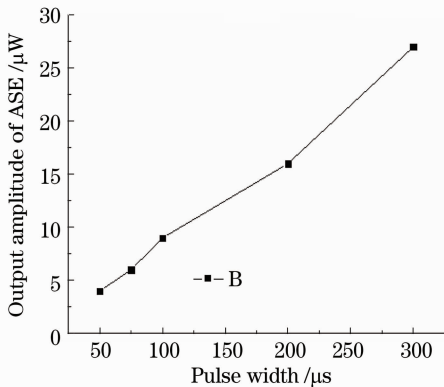


图 11 自发辐射幅度和抽运脉宽的关系

Fig. 11 Relation between the output amplitude of ASE and pulse width

2) 变幅度:观察当抽运脉冲光脉宽为 300 μs 的情况下, 改变抽运脉冲的幅值分别为 2、6、10、15 mW EDF 时, 自发辐射的波形输出如图 12 所示, 自发辐射的幅度与输入抽运功率大小的关系如图 13 所示。

由图 12 与图 13 可以看出抽运光脉宽一定的情况下, 输入脉冲抽运光幅值越大, EDF 自发辐射输出波形幅值也随着增大, 近似于正比关系, 这与理论结果保持一致。

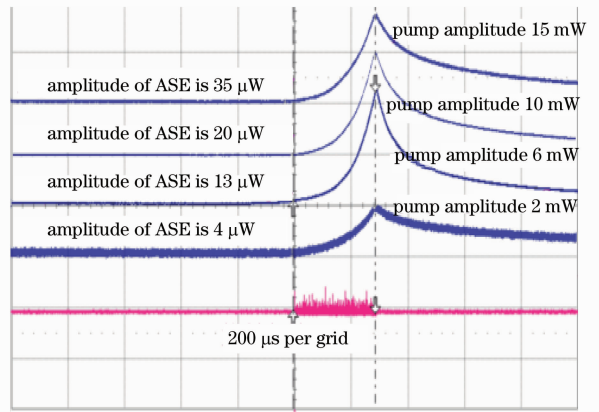


图 12 不同抽运幅值的自发辐射波形

Fig. 12 Output waveform of ASE with different pump amplitudes

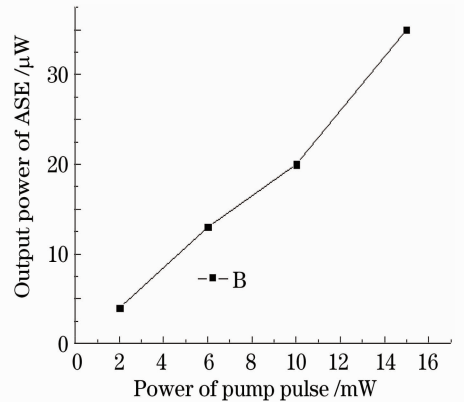


图 13 自发辐射功率和抽运功率的关系

Fig. 13 Relation between the output power of ASE and pump power

4 结 论

对在小信号脉冲光抽运情况下 EDF 的自发辐射进行了深入的理论和实验研究, 得到了小信号抽运时输出 ASE 噪声平均值的近似解析解。当抽运光脉冲幅值一定时, 随着脉冲宽度的增大, 输出波形的幅值也随着增大, 而且近似成正比; 同时, 当抽运脉冲光脉宽一定时, 随着脉冲幅值的增加, EDF 自发辐射输出波形的幅值也随着增大, 且二者成正比。这种输出脉冲幅度与输入脉冲宽度成正比的现象, 可用于在光域直接对脉冲宽度的测量。

参 考 文 献

- 1 C. R. Giles, Emmanuel desurvire, modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, 9(2): 271~283
- 2 C. R. Giles, C. A. Burrus, D. J. DiGiovanni *et al.*. Characterization of erbium-doped fibers and application to modeling 980-nm and 1480-nm pumped amplifiers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, 3(4): 363~365

- 3 Sun Tingting, Wang Zhi, Zhao Lilong. Performance studies on Er^{3+} -doped amplifier based on Bragg fiber with high index core [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2010, **47**(12): 120603
孙婷婷, 王志, 赵立龙. 高折射率纤芯掺铒布拉格光纤放大器研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(12): 120603
- 4 Cui Guoqi, Dong Xiaoyi, Zhang Jianzhong *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. 连续抽运与脉冲抽运掺铒光纤放大特性分析[J]. *激光与红外*, 1992, **22**(2): 26~29
- 5 S. W. Harun, H. Ahmad. Gain and noise figure improvements in double-pass S-band EDFA [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(5): 935~938
- 6 Chienhung Yeh. Utilizations of two-stage erbium amplifier and saturable-absorber filter for tunable and stable power-equalized fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 3680~3684
- 7 N. Kumar, M. R. Shenoy, B. P. Pal. A standard fiber-based loop mirror as a gain-flattening filter for erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(10): 2056~2058
- 8 Liu Lisong, Peng Jian, Zhang Chenfang *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
- 9 Liu Lisong, Ren Wenhua, Chen Weiguo *et al.*. Research on fabrication and characteristic of twin-core erbium-doped fiber [J]. *Chinese J. 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
- 10 H. Shin, A. Schweinsberg, G. Gehring *et al.*. Reducing pulse distortion in fast-light pulse propagation through an erbium-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(8): 906~908
- 11 N. N. Lepeshkin, A. Schweinsberg, M. S. Bigelow *et al.*. Slow and fast light propagation in erbium-doped fiber [C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), 2005, TQuC3
- 12 J. Chow, G. Town, B. Eggleton *et al.*. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 60~62
- 13 J. D. Kafka, T. Baer, D. W. Rush *et al.*. Mode-locked erbium-doped fiber laser with soliton pulse [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(22): 1269~1271
- 14 Wu Xu, Ruan Shuangchen, Liu Chengxiang *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
- 15 H. G. Rosa, E. A. de Souza. 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
- 16 M. Horowitz, C. R. Menyuk, T. F. Carruthes *et al.*. Theoretical and experimental study of harmonically mode-locked fiber laser for optical communication systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(11): 1565~1574
- 17 Tian Zhen, Liu Shanliang, Zhang Bingyuan *et al.*. Graphene mode-locked Er doped fiber pulse laser [J]. *Chinese J. 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
- 18 Liu Pengzu, Hon Jing, Zhang Bin *et al.*. 1550 nm passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber [J]. *Chinese J. 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
- 19 Ren Fang, Xiang Wanghua, Zu Peng *et al.*. Experimental study on Er/Yb Co-doped double-clad all fiber laser [J]. *Chinese J. 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
- 20 Pu Lichun, Wang Fei. Tunable multiwavelength mode-locked fiber ring laser incorporating Mach-Zehnder interferometer [J]. *Chinese J. 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
- 21 Jiang Nan, Wu Chongqing, Wang Yongjun *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 Weinan. Study on the Transient Response of the of EDFA Caused by the Pump [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012
李伟南. 由抽运光引起的掺铒光纤放大器瞬态特性的研究 [M]. 北京: 北京交通大学, 2012
- 23 Liu Yu, Ming Hai, Wang Shengbo *et al.*. Research into gain modulation characteristics of erbium-doped fiber pumped pulsed laser [J]. *Chinese J. 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
- 24 K. Y. KO, M. S. Demokan, H. Y. Tam. Transient analysis of erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(12): 1436~1438
- 25 Wu Chongqing. Introduction to Optical Communication [M]. Beijing: Tsinghua University Publisher, 2008
吴重庆. 光通信导论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008
- 26 E. S. Chio, J. H. Na, B. H. Lee. Spatial resolution enhancement with fiber-based spectral filtering for optical coherence tomography [J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2003, **7**(4): 216~233