

WDM 系统中碲基掺铒光纤放大器泵浦问题的理论研究*

周亚训 聂秋华 徐铁峰 周宇

(宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211)

摘要 依据均匀加宽四能级结构速率方程组和光功率传输方程组, 对 WDM 系统中碲基掺铒光纤放大器(EDTFA)的泵浦问题进行了理论研究, 给出了三种泵浦方式小信号和大信号状态下 EDTFA 信号增益分布曲线和放大的自发辐射(ASE)噪声功率谱, 在此基础上探讨了 EDTFA 泵浦方式与信号增益、ASE 噪声的关系。

关键词 碲基掺铒光纤放大器; 泵浦方式; 信号增益; 放大的自发辐射噪声

中图分类号 TN256; TN929. 11

文献标识码 A

0 引言

掺铒光纤放大器是利用光纤中掺入的 Er^{3+} 离子在泵浦光作用下, 形成一定的上下能级粒子数分布, 实现对入射信号光提供光增益。在实际应用中, 光纤放大器有三种泵浦方式: 前向泵浦、后向泵浦和双向泵浦。在前向泵浦方式中, 信号光和泵浦光沿光纤同一方向传输, 也称为正向泵浦; 在后向泵浦方式中, 信号光和泵浦光沿光纤相反方向传输, 也称为反向泵浦; 在双向泵浦方式中, 泵浦光沿两个方向同时进入光纤放大器。

对于三种不同的泵浦方式, 光纤放大器具有不同的放大特性。本文从粒子数速率方程组和光功率传输方程组出发, 从理论上比较详尽地分析了不同泵浦方式下碲基掺铒光纤放大器的信号放大特性和 ASE 噪声特性。

1 理论分析

碲基掺铒光纤中存在着 Er^{3+} 离子能量上转移 ($2^4I_{13/2} = \rangle^4I_{9/2} + \rangle^4I_{15/2}$)、交叉弛豫 ($\rangle^4I_{9/2} + \rangle^4I_{15/2} = \rangle^2I_{13/2}$) 和激发态吸收 ($\rangle^4I_{13/2} = \rangle^4I_{9/2}$) 效应^[1,2], 这些效应的存在使得 980 nm 或 1480 nm 泵浦下的 EDTFA 需要用四能级系统来处理^[3]。设 $N_1(r, z)$ 、 $N_2(r, z)$ 、 $N_3(r, z)$ 和 $N_4(r, z)$ 分别表示 Er^{3+} 离子能级 $\rangle^4I_{15/2}$ 、 $\rangle^4I_{13/2}$ 、 $\rangle^4I_{11/2}$ 和 $\rangle^4I_{9/2}$ 上的粒子数密度, $N_T(r, z)$ 表示 Er^{3+} 离子掺杂密度, 其中 r 表示掺铒光纤径向坐标, z 表示掺铒光纤轴向坐标, 则其粒子数速率

方程可以写为

$$\frac{\partial N_1(r, z)}{\partial t} = -W_{12}N_1 - R_{12}N_1 + R_{21}N_2 + A_{21}N_2 + W_{21}N_2 + C_{up}N_2^2 - C_{14}N_1N_4 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2(r, z)}{\partial t} = W_{12}N_1 + R_{12}N_1 - R_{21}N_2 - A_{21}N_2 - W_{21}N_2 + A_{32}N_3 - 2C_{up}N_2^2 + 2C_{14}N_1N_4 - R_{24}^{esa}N_2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3(r, z)}{\partial t} = -A_{32}N_3 + A_{43}N_4 \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_4(r, z)}{\partial t} = C_{up}N_2^2 - C_{14}N_1N_4 - A_{43}N_4 + R_{24}^{esa}N_2 \quad (4)$$

$$N_1(r, z) + N_2(r, z) + N_3(r, z) + N_4(r, z) = N_T(r, z) \quad (5)$$

式中, A_{43} 和 A_{32} 是能级 $\rangle^4I_{9/2} = \rangle^4I_{11/2}$ 、 $\rangle^4I_{11/2} = \rangle^4I_{13/2}$ 间的非辐射跃迁几率, A_{21} 是能级 $\rangle^4I_{13/2} = \rangle^4I_{15/2}$ 间自发辐射跃迁几率, C_{up} 、 C_{14} 分别是 Er^{3+} 离子能量上转移和交叉弛豫系数, R_{24}^{esa} 是激发态跃迁几率, $W_{12,21}$ 、 $R_{12,21}$ 分别表示信号和泵浦波长下的受激吸收和受激辐射几率, 定义为 (n 路信号光共存时)

$$W_{12}(r, z) = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{a12}^i(v_s^i)}{h\nu_s^i} I_s^i(r, z, v_s^i) + \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_{a12}^j(v_k^j)}{h\nu_k^j} [I_{ASE+}^j(r, z, v_k^j) + I_{ASE-}^j(r, z, v_k^j)] \quad (6)$$

$$W_{21}(r, z) = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{e21}^i(v_s^i)}{h\nu_s^i} I_s^i(r, z, v_s^i) + \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_{e21}^j(v_k^j)}{h\nu_k^j} [I_{ASE+}^j(r, z, v_k^j) + I_{ASE-}^j(r, z, v_k^j)] \quad (7)$$

$$R_{12}(r, z) = \frac{\sigma_{a12}(v_p)}{h\nu_p} [I_{p+}(r, z, v_p) + I_{p-}(r, z, v_p)] \quad (8)$$

$$R_{21}(r, z) = \frac{\sigma_{e21}(v_p)}{h\nu_p} [I_{p+}(r, z, v_p) + I_{p-}(r, z, v_p)] \quad (9)$$

式中用下标 p 和 s 分别标记泵浦光和信号光, ‘+’表示前向, ‘-’表示后向, h 是普朗克常数, $I_s(r, z,$

*国家自然科学基金(No:60272034)、浙江省自然科学基金(No:601011、M603019)和浙江省教育厅(No:20030491)资助课题

Tel:0574-87600319 Email:nbu-zyx@21cn.com

收稿日期:2003-08-12

ν_s)、 $I_p \pm(r, z, \nu_p)$ 和 $I_{ASE \pm}(r, z, \nu_k)$ 分别是相应波长下在径向位置 r 、轴向传输距离 z 处的信号光强、泵浦光强和 ASE 噪声强度, $\sigma_{a/ekq}$ 表示相应波长下在能级 k, q 间的吸收(a)和发射(e)截面.

掺铒光纤中同时存在信号光、泵浦光和 ASE 噪声光时,它们在光纤中的传播变化可用下述光功率传输方程来描述^[4]

$$\frac{dP_{p \pm}(z, \nu_p)}{dz} = \mp [\gamma_{p12}(z, \nu_p) - \gamma_{p21}(z, \nu_p)] \cdot P_{p \pm}(z, \nu_p) \quad (10)$$

$$\frac{dP_s^i(z, \nu_s^i)}{dz} = [\gamma_{s21}(z, \nu_s^i) - \gamma_{s12}(z, \nu_s^i)] \cdot P_s^i(z, \nu_s^i) \quad (11)$$

$$\frac{dP_{ASE \pm}(z, \nu_k^j)}{dz} = \pm [\gamma_{s21}(z, \nu_k^j) - \gamma_{s12}(z, \nu_k^j)] \cdot P_{ASE \pm}(z, \nu_k^j) \pm 2h\nu_k^j \delta\nu \gamma_{s21}(z, \nu_k^j) \quad (12)$$

式中, P_p 表示泵浦光功率, P_s^i 表示第 i 路信号光功率, P_{ASE} 表示中心频率 ν_k^j 带宽 $\delta\nu$ 内的 ASE 噪声功率, $2h\nu_k^j \delta\nu$ 为等效的输入噪声(忽略 ASE 功率的精细谱分布). γ_{p12} 、 γ_{p21} 和 γ_{s12} 、 γ_{s21} 分别表示泵浦光和信号光的吸收系数和发射系数, 定义为

$$\gamma_{p12}(z, \nu_p) = 2\pi \int_{r=0}^{r_{Er}} \Psi_p(r) [\sigma_a(\nu_p) N_1(r, z) + \sigma_{a24}(\nu_p) N_2(r, z)] r dr + L_{bg} \quad (13)$$

$$\gamma_{p21}(z, \nu_p) = 2\pi \int_{r=0}^{r_{Er}} \Psi_p(r) [\sigma_e(\nu_p) N_2(r, z)] r dr \quad (14)$$

$$\gamma_{s12}(z, \nu_s^i) = 2\pi \int_{r=0}^{r_{Er}} \Psi_s(r) [\sigma_a(\nu_s^i) N_1(r, z) + \sigma_{a24}(\nu_s^i) N_2(r, z)] r dr + L_{bg} \quad (15)$$

$$\gamma_{s21}(z, \nu_s^i) = 2\pi \int_{r=0}^{r_{Er}} \Psi_s(r) [\sigma_e(\nu_s^i) N_2(r, z)] r dr \quad (16)$$

式中 L_{bg} 表示光纤的背景损耗, r_{Er} 是铒掺杂有效半径, $\Psi_{s,p}(r, z)$ 是归一化的信号光和泵浦光模场分布.

2 数值模拟结果

以 8 路信号同时输入作为 WDM 系统中多信道共存时的模拟环境, 信道间隔波长 8 nm, 信号波长选择为 1552 nm、1560 nm、1568 nm、1576 nm、1584 nm、1592 nm、1600 nm 和 1608 nm. 光纤激活长度 $L = 240$ cm, 纤芯折射率 2.083, 包层折射率 2.052. 模拟中所用其它参量^[1,5,6]: Er^{3+} 离子吸收截面 σ_a 和发射截面 σ_e 数据如表 1 所示; 模场分布 $\Psi_{s,p,ASE}$ 选用第一类零级 Bessel 函数; 掺杂浓度 1000 ppm ($2 \cdot 10^{25}/m^3$), 掺杂分布 $N_T(r) = N_0 [1 - (r/r_{Er})^\alpha]$, 掺杂分布因子 $\alpha = 3$, 掺杂有效半径 $r_{Er} = 1.5 \mu m$; 自发辐射跃迁几率 $A_{21} = 263.2/s$, 非辐射跃迁几率 $A_{32} = A_{43} = 10^9/s$; 背景损耗 $L_{bg} = 1$ dB/m; 能量上转移系数 $C_{up} = 5.0 \cdot 10^{-23} m^3/s$, 交叉弛豫系数 $C_{14} = 3.5 \cdot 10^{-23} m^3/s$; 波长 $\lambda \leq 1630$ nm 时, 忽略激发态吸收, 即 $R_{24}^{esa} = 0$.

表 1 不同波长时的吸收和发射截面

Wavelength/nm	1480	1552	1560	1568	1576	1584	1592	1600	1608
$\sigma_a/10^{-25} m^2$	3.93	3.45	2.64	1.59	1.00	0.74	0.58	0.45	0.34
$\sigma_e/10^{-25} m^2$	1.29	5.29	4.82	3.42	2.42	2.15	2.03	1.88	1.64

2.1 前向泵浦和后向泵浦

图 1 给出了前向泵浦(实线表示)和后向泵浦(虚线表示)方式下, 泵浦功率分别为 200 mW 和 50 mW、各路信道为小信号(-30 dBm)和大信号(0 dBm)输入状态时 WDM 系统中第 2 信道(1560 nm)和第 7 信道(1600 nm)的信号增益 $G(z)$ 沿光纤的分布曲线. 图 2 是前向泵浦(实线表示)和后向泵浦(虚线表示)方式下, 泵浦功率为 200 mW 时(泵浦功率 50 mW 时, 曲线形状类似), 大小信号输入状态下光纤输入和输出端处放大的后向和前向自发辐射噪声功率谱.

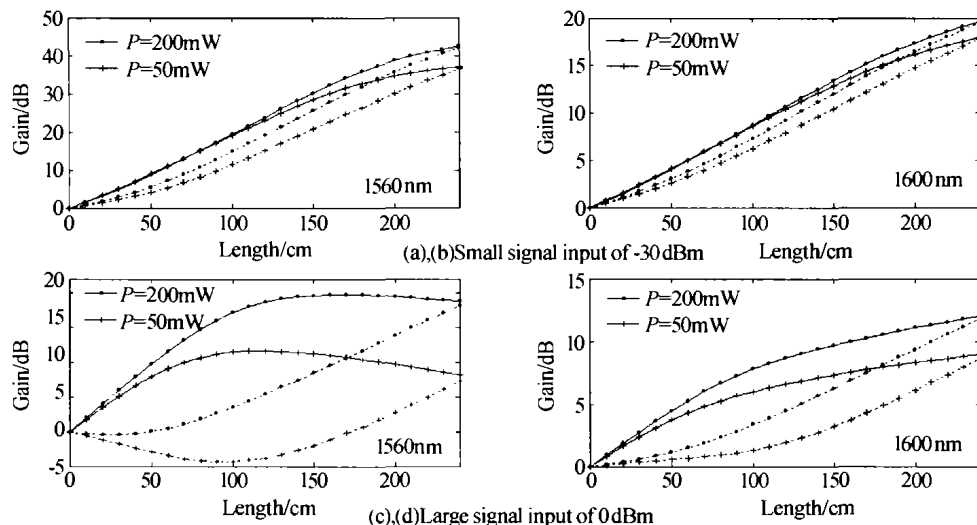


图 1 前向和后向泵浦方式下信号增益沿光纤的分布

Fig. 1 Signal gain distribution versus fiber coordinate in the forward and backward pumping cases

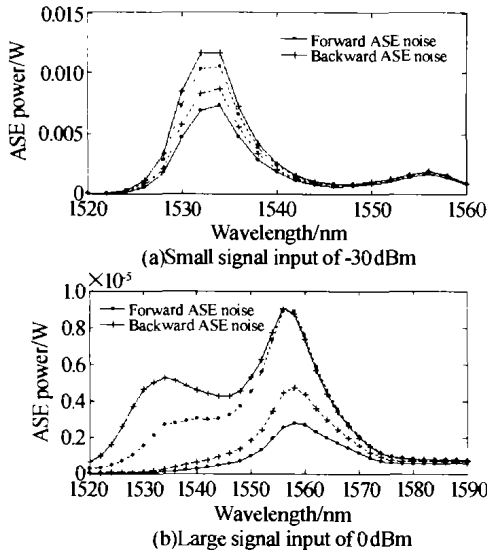


图2 前向和后向泵浦方式下 ASE 噪声功率谱
Fig. 2 ASE noise power spectrum in the forward and backward pumping cases

显然,从图 1、图 2 可以得到一些结论:

1) 相同泵浦功率、前向和后向泵浦方式下(其它条件相同),同一信道信号增益 $G(z)$ 沿光纤分布是不同的,但光纤输出端的信号增益差异很小($G_{前向}$ 略大于 $G_{后向}$),近似相等. 两种泵浦方式小信号输入状态下,光纤输出端不同信道的信号增益起伏较大,短波长信道信号增益要远大于长波长信道信号增益,EDTFA 本征增益谱表现出极不平坦化特征;大信号状态下,各信道的信号增益都要小于小信号状态下相应信道的信号增益,且光纤输出端各信道间信号增益差异明显减小,在该工作参量条件下 EDTFA 本征增益谱有趋于平坦化趋势.

2) 同一泵浦功率、前向和后向泵浦方式下(其它条件相同),光纤输出端放大的前向和光纤输入端放大的后向自发辐射噪声功率谱并不相同,但噪声谱形状比较一致. 在前向泵浦方式中,后向的 ASE 噪声功率大于前向的 ASE 噪声功率;而在后向泵浦方式中,前向的 ASE 噪声功率大于后向的 ASE 噪声功率. 两种泵浦方式小信号状态下 ASE 噪声功率较大,可以与放大得到的各信道信号功率相比拟,且其噪声功率谱主峰出现在 1534 nm 波长附近;大信号状态下 ASE 噪声功率变得很小,与信号功率相比已可忽略不计,且 ASE 噪声谱的主峰已移到 1556 nm 波长附近. 同一泵浦功率、前后向两种泵浦方式下,两者的 ASE 总噪声功率谱近似相等.

3) 大信号状态下,在前向泵浦方式中,对于某些波长信道(例如 1560 nm),存在着信号增益分布由大变小的情况;在后向泵浦方式中的光纤输入信号前端,信号增益分布 $G(z)$ 甚至小于零. 信号增益分布由大变小或者小于零,表明在一定的工作条件

下,在该段光纤区域里,光纤对信号光不再有放大作用,反而起到吸收信号光的作用.

4) 在前向和后向泵浦方式中,随着泵浦功率的减小、输入信号功率的增加,各路信道的信号增益逐步下降,但下降幅度是不尽相同的. 相比于长波长信道,短波长信道的信号增益更易随着泵浦功率的减小、输入信号功率的增加而衰减.

2.2 双向泵浦

图 3 给出了双向泵浦方式下、各路信道为小信号和大信号输入状态时,WDM 系统中第 2 信道和第 7 信道的信号增益 $G(z)$ 沿光纤的分布曲线. 图中,实线表示大泵浦功率(200 mW)的模拟结果,虚线表示小泵浦功率(50 mW)的模拟结果. 图 4 是大泵浦功率时相应的 ASE 噪声功率谱(小泵浦功率时,噪声谱形状类似).

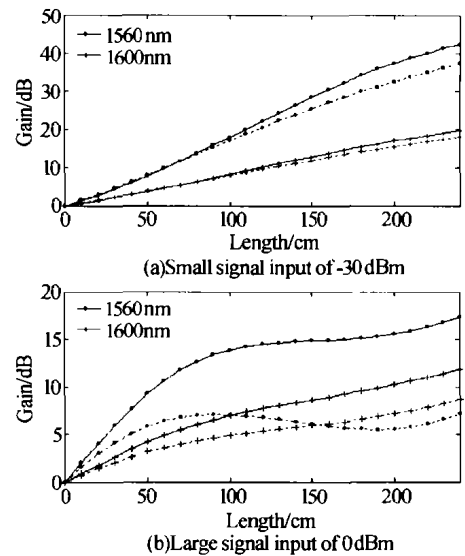


图 3 双向泵浦方式下信号增益沿光纤的分布
Fig. 3 Signal gain distribution versus fiber coordinate in the bi-directional pumping cases

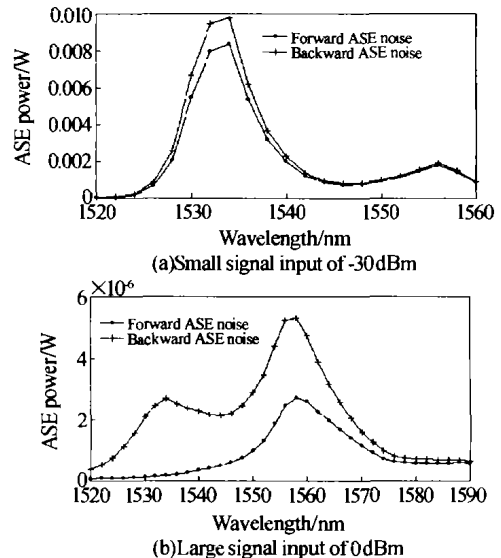


图 4 双向泵浦方式下 ASE 噪声功率谱
Fig. 4 ASE noise power spectrum in the bi-directional pumping cases

比较图 1 ~ 图 4, 可以看出:

1) 双向泵浦方式下, 各路信道的信号增益分布与同一泵浦功率前向和后向泵浦方式下 (其它条件相同) 的信号增益分布是不相同的, 在大信号状态时甚至相差很大, 但增益分布曲线介于后两者之间, 且在光纤输出端, 放大的信号增益与后两者差异极小 ($G_{前向}$ 略大于 $G_{双向}$ 又略大于 $G_{后向}$), 近似相等.

2) 双向泵浦方式下, 后向的 ASE 噪声功率大于前向的 ASE 噪声功率, 这一点与前向泵浦方式相类似, 但 ASE 总噪声功率要小于前后向泵浦方式. 而双向泵浦方式下 ASE 噪声谱的形状, 以及噪声谱随输入信号功率、泵浦功率的变化与同一条件前向、后向泵浦方式下结果相类似.

3 结果分析

掺铒光纤放大器的信号放大过程实质上是一个泵浦光转换为信号光 (包括 ASE 噪声) 的过程, 即在泵浦光的抽运下形成一定的上下能级 Er^{3+} 粒子数分布, 通过 Er^{3+} 粒子的受激辐射实现入射信号的光放大. 因此, 光纤内上下能级 Er^{3+} 粒子数分布决定了该条件下信号增益沿光纤的具体分布以及最终能放大的信号增益. 不同泵浦方式、不同泵浦功率或者不同输入信号状态下, 同一信道或不同信道间信号增益沿光纤分布的不同实质上体现了上下能级 Er^{3+} 粒子数分布的差异. 这种差异可以用信号的增益系数 $\{g(z, \nu_s) \propto N_2(z, \nu_s) \sigma_e(\nu_s) - N_1(z, \nu_s) \sigma_a(\nu_s)\}$ (参见 11 式, 不考虑激发态吸收) 来表现. 显然, 增益系数 $g(z, \nu_s)$ 是信号波长、传输距离的函数.

图 5、图 6 分别给出了前后向和双向泵浦方式

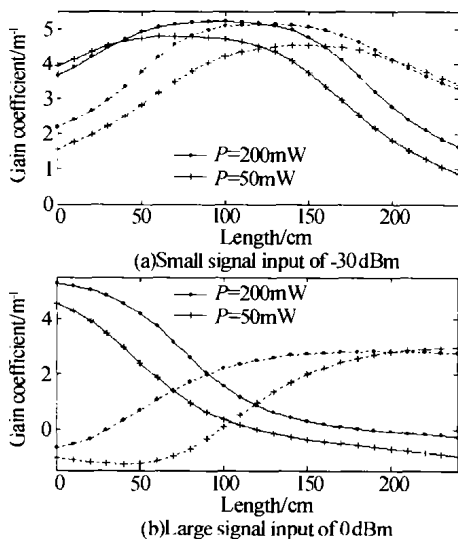


图 5 前向泵浦 (实线) 和后向泵浦 (虚线) 方式下信号增益系数沿光纤的分布

Fig. 5 Signal gain coefficients distribution versus fiber coordinate in the forward (solid line) and backward (dash line) pumping cases

下, 各路信道为小信号和大信号输入状态, 泵浦功率为 200 mW 和 50 mW 时, WDM 系统中第 2 信道的信号增益系数沿光纤的分布曲线 (其它信道分布类似).

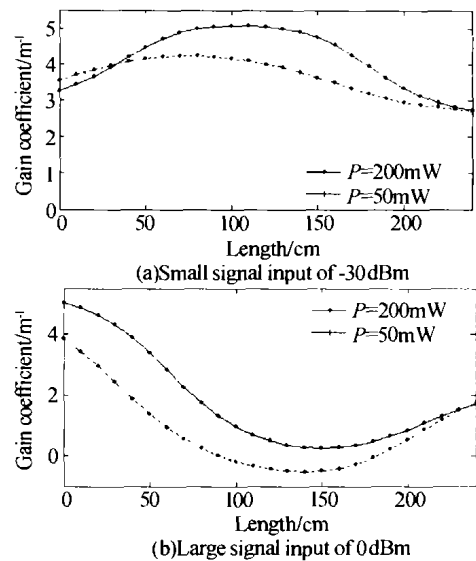


图 6 双向泵浦方式下的信号增益系数沿光纤的分布
Fig. 6 Signal gain coefficients distribution versus fiber coordinate in the bi-directional pumping cases

结合图 5 和图 6, 可以对上面的理论模拟结果作出定性的解释:

1) 同一泵浦功率、三种泵浦方式下 (其它条件相同), 上下能级 Er^{3+} 粒子数 $N_2(z)$ 、 $N_1(z)$ 沿光纤分布显然是不同的, 由此形成了信号增益系数 $g(z, \nu_s)$ 分布的差异, 这就决定了三种泵浦方式下同一信道的信号增益沿光纤分布的不同. 不过, 三种泵浦方式下分布曲线 $g(z, \nu_s)$ 所覆盖的面积是近似相同的, 因此, 光纤输出端处同一信道的信号增益近似相等; 同种泵浦方式下不同信道间信号增益和信号增益分布的不同, 则在于它们发射截面 $\sigma_e(\nu_s)$ 和吸收截面 $\sigma_a(\nu_s)$ 不同的缘故.

2) 同一泵浦功率下, 在前向泵浦方式中, 光纤前半段的信号增益系数大于后半段, 也就是光纤前半段的上下能级粒子数反转比 $N_2(z)/N_1(z)$ 高于后半段, 因此, 由自发辐射产生的前向 ASE 噪声功率要小于后向 ASE 噪声功率; 在后向泵浦方式中, 光纤后半段的上下能级粒子数反转比 $N_2(z)/N_1(z)$ 要高于前半段, 虽然后半段粒子数反转比因放大了信号光的消耗有所减小, 但前向 ASE 噪声功率仍要大于后向 ASE 噪声功率. 不过, 这时前后向 ASE 噪声功率的差异已不如前向泵浦方式中明显了; 在双向泵浦方式对称泵浦功率 ($P_{前向} = P_{后向}$) 中, 光纤前后半段上下能级粒子数反转比对称分布的特点, 由于受到放大的信号光对上能级粒子数的消耗作用而遭到破坏, 使得后向 ASE 噪声功率大于前向 ASE 噪声

功率. 在大信号态时, 由于大输入信号及其放大部分信号对上能级粒子数的消耗作用加剧, 三种泵浦方式下的 ASE 噪声功率明显减小, 但同种泵浦方式下前向、后向 ASE 噪声间差异较小信号态时反而大得多.

3) 小信号状态下, 在前向泵浦方式中, 放大的后向 ASE 噪声光对上能级粒子数 $N_2(z)$ 有一定的消耗, 光纤输入端附近上下能级粒子数反转比 $N_2(z)/N_1(z)$ 会有一定程度的下降, 而剩余的泵浦光在前向传输过程中的一段距离内仍能够使上能级粒子数激发到一定的水平, 此处 ASE 噪声、信号光的影响相对较弱, 所以光纤中间段信号增益系数可以高于泵浦功率最大处的值, 如图 5(a) 所示. 至于光纤后半段信号增益系数的快速下降, 则主要源于泵浦功率进一步衰减的结果; 在后向泵浦方式中, 由于同时受到放大的前向 ASE 噪声和放大的信号光对上能级粒子数的双重消耗, 泵浦光入射端(光纤输出端)附近处的信号增益系数较同一泵浦功率前向泵浦方式中泵浦光入射端(光纤输入端)附近处信号增益系数要小; 在双向泵浦方式中, 信号增益系数分布则介于前向和后向泵浦方式之间. 小信号状态、三种泵浦方式下, 信号增益系数的这种分布特点, 可以很好地解释各自泵浦方式下信号增益沿光纤的具体分布形状.

4) 与小信号状态相比, 大信号状态、三种泵浦方式下, 前向 ASE 噪声和后向 ASE 噪声对粒子数分布的影响已可忽略. 这时, 沿着光纤信号传输方向, 在前向泵浦方式中, 随着泵浦功率不断衰减, 大输入信号对粒子数的消耗不断增强, 粒子数反转比一直在减小, 表现为信号增益系数沿光纤呈现单调下降趋势. 在泵浦功率下降至某一阈值后, 上下能级粒子数反转比减小到不足以使该波长信号产生光增益, 增益系数小于零, 这时信号增益升至最大值后开始下降, 如图 1(c) 所示. 信号增益由大变小, 意味着对于该波长信号在给定泵浦条件下所用光纤太长了, 超过了最佳光纤长度. 当然, 最佳光纤长度与泵浦功率、输入信号状态、输入信号波长、铒掺杂浓度等参量有关. 在后向泵浦方式中的光纤输入端附近, 以及双向泵浦方式中的光纤中间段, 信号增益系数小于零以及信号增益由大变小, 原因类似.

5) 与小信号状态相比, 大信号状态、三种泵浦方式下, 如前所述, 掺铒光纤中上下能级粒子数反转比已减小许多, 增益系数 $[N_2(z, \nu_s) \sigma_e(\nu_s) - N_1(z, \nu_s) \sigma_a(\nu_s)]$ 的值相应减小, 因而, 光纤输出端处各信道的信号增益都有不同程度的下降, 但下降幅度是不一样的. 对于 WDM 系统中多信道信号同时共

存的情形, 各个信道的信号放大过程实际上是一个信道间相互竞争反转粒子数的过程. 显然, 增益系数大的信道将占据优势而获得较高的信号增益. 随着信道泵浦功率的降低, 输入信号功率的增大, 光纤放大器饱和程度的加深, 上能级粒子数迅速减小, 以至于 $N_2(z)$ 小于 $N_1(z)$, 这时, 信号增益系数大小主要取决于各波长信号的发射截面 $\sigma_e(\nu_s)$ 和吸收截面 $\sigma_a(\nu_s)$ 之比值:

$$g(z, \nu_s) = N_1(z, \nu_s) \sigma_a(\nu_s) \cdot \left[\frac{N_2(z, \nu_s) \sigma_e(\nu_s)}{N_1(z, \nu_s) \sigma_a(\nu_s)} - 1 \right] \propto \frac{\sigma_e(\nu_s)}{\sigma_a(\nu_s)}$$

对于碲基掺铒光纤, 在 C + L 波段范围内, 截面比值 $\sigma_e(\nu)/\sigma_a(\nu)$ 是随信号波长的增长趋于增大, 因而长波长信道的信号增益随着饱和程度的加深而占据一定优势, 导致 EDTFA 增益谱呈现出一定程度的平坦化. 但随着放大器饱和程度的进一步加深, 短波长信道增益加速下移, EDTFA 增益谱峰移向长波段, 且其有效带宽日益变窄.

4 结论

本文对 WDM 系统中新型宽带 EDTFA 泵浦问题进行了理论研究, 比较详尽地分析了三种泵浦方式、大小信号态下信号增益沿光纤的分布特性以及放大的自发辐射噪声. 模拟结果表明: 1) 同一泵浦功率、三种泵浦方式下, 信号增益沿光纤分布并不相同, 但同一信道光纤输出端的信号增益近似相同. 2) 同一泵浦功率、三种泵浦方式下, 短波长信道光纤输出端的信号增益、饱和输出功率大于长波长信道的相应输出参量. 3) 在反向泵浦方式中, 前向 ASE 噪声功率大于反向 ASE 噪声功率, 因此反向泵浦适合作为功率放大器的 EDTFA 泵浦方式; 在前向和双向泵浦方式中, 前向 ASE 噪声功率小于反向 ASE 噪声功率, 且双向泵浦方式下的 ASE 总噪声功率小于前向和后向泵浦方式的相应噪声功率, 因此双向泵浦更适合作为低噪声的前置放大器、线路放大器的 EDTFA 泵浦方式; 4) 随着泵浦功率的减小、输入信号功率的增加, EDTFA 饱和程度的加深, 短波长信道的信号增益下移速度大于长波长信道的信号增益. 利用这一特点, 通过设置适当的工作参量, 可以实现 WDM 系统中 EDTFA 本征增益谱一定程度的平坦化.

参考文献

- 1 Lopez-Barbero A P, Arellano-Espinoza W A, Freguito H L, et al. Tellurite-based optical fiber amplifier analysis using the finite-element method. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2000, 25(2): 103 ~ 107

- 2 杨祥林, 等编. 光纤放大器及其应用 北京: 电子工业出版社, 2000. 18 ~ 19
Yang X L, *et al.* Fiber amplifiers and applications. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 18 ~ 19
- 3 周亚训, 聂秋华, 徐铁峰, 等. 碲基掺铒光纤放大器增益饱和特性的数值模拟. 光子学报, 2003, 32(6): 679 ~ 682
Zhou Y X, Nie Q H, Xu T F, *et al.* Acta Photonica Sinica, 2003, 32(6): 679 ~ 682
- 4 Giles C R, Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(2): 271 ~ 283
- 5 Wang J S, Vogel E M, Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices. *Optical Matters*, 1994, 3: 187 ~ 203
- 6 Mori A, Sakamoto T, Kobayashi K, *et al.* 1.58 μm broadband erbium-doped tellurite fiber amplifier. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(5): 794 ~ 799

Theoretical Studies on the Pumping Schemes for Erbium-doped Tellurite-based Fiber Amplifier in WDM

Zhou Yaxun, Nie Qiuhua, Xu Tiefeng, Zhou Yu

The College of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211

Received date: 2003-08-12

Abstract Based on the rate equations and light power propagation equations of homogeneously broadened four energy-level system, the theoretical studies of the pumping schemes for erbium-doped tellurite-based fiber amplifier (EDTFA) in WDM are presented. The signal gain curves versus fiber coordinate and the amplified spontaneous emission (ASE) noise spectrum for three kinds of pumping configurations, namely, forward pumping, backward pumping and bi-directional pumping with small (-30 dBm) and large (0 dBm) signal power conditions, respectively, are obtained. Also, investigations of the relations between the pumping schemes with the signal gain and ASE noise, are given.

Keywords EDTFA; Pumping schemes; Signal gain; ASE noise



Zhou Yaxun was born in 1965. He received B. S. degree in 1987 and M. S. degree in 1990 from Nankai University, respectively. He is now an associate professor in the College of Information Science and Technology, Ningbo University. His major research fields include optical fiber communication and image processing.