

# 双频激光泵浦掺铒光纤放大器的增益特性\*

黄青 詹明生 周士康

(中国科学院安徽光机所激光光谱学开放实验室, 合肥 230031)

明海 刘宇

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

**提要** 从理论上研究了双频激光混合泵浦掺铒光纤放大器(HEDFA)的增益特性。着重分析了HEDFA的阈值和饱和行为,证明它比一般单频激光场泵浦的掺铒光纤放大器具有更高饱和增益和更低的单光阈值等优点。实验结果支持了上述结论。

**关键词** 双频激光泵浦掺铒光纤放大器(HEDFA), 增益特性

## 1 引言

掺铒光纤放大器(EDFA;  $\text{Er}^{3+}$  Doped Fiber Amplifier)由于具有增益高、对偏振不敏感、噪声低等优点而特别适应于高速、中长距离光纤通讯系统,自80年代中以来,国内外展开了许多有关的理论和应用研究。通过实验人们已经找到高效率的泵浦和信号源<sup>[1~3]</sup>,并通过理论和数值计算,也提出了优化EDFA参数的各种方案<sup>[4~10]</sup>。

最近,文献[11,12]等报道了用双频激光混合泵浦EDFA(简称HEDFA; Hybrid Pumped  $\text{Er}^{3+}$  Doped Fiber Amplifier)的实验结果。他们组合几个泵浦波段的泵浦源,如980 nm, 1480 nm, 807 nm等,对EDFA进行了双频激光同向或反向的混合式泵浦,发现HEDFA比普通的EDFA具有更高的饱和增益、更低噪声、信号增益平坦等优良特性,有很好的应用前景。同时这种双频激光泵浦过程可能包含有光场与物质相干相互作用的许多有趣的物理内容。但目前关于双频激光泵浦光纤放大器的理论工作国内外尚未见报道。

本文拟用三能级原子模型的速率方程讨论HEDFA的增益特性,证明它比一般EDFA具有更高饱和增益和更低的单光阈值等优点。

## 2 理论模型

将掺铒光纤介质用如图1所示的等价三能级原子系统来描述。其中, $|1\rangle$ 为基态, $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$ 分别为泵浦光 $P_1$ ,  $P_2$ 的上能级, $|2\rangle$ 同时也是待放大信号光 $P_s$ (1536 nm)的上能级。当 $P_1$ ,  $P_2$ 分别为1480 nm, 980 nm(或870 nm)时, $|1\rangle$ 对应 $\text{Er}^{3+}$ 的 $^4I_{15/2}$ ,  $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$ 分别对应 $^4I_{13/2}$ ,  $^4I_{11/2}$ (或

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994年8月8日; 收到修改稿日期: 1994年10月5日

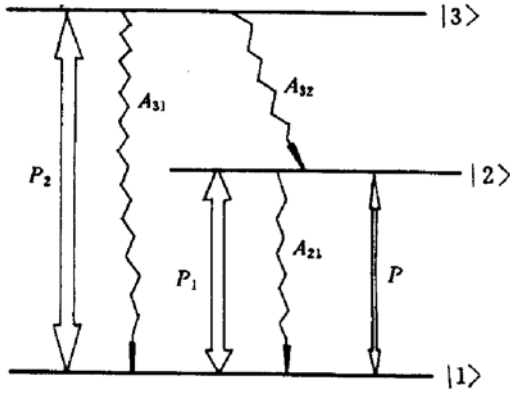


Fig. 1 Energy level diagram of HEDFA

$^4I_{9/2}$ 。  $A_{ij}$  为  $|i\rangle$  至  $|j\rangle$  的粒子弛豫速率。

一般两相干光驱动三能级原子体系的问题需考虑光场诱导原子相干性的影响而用密度算符的方法求解,但作者已详细分析了在 HEDFA 中通常在几十毫瓦的泵浦功率条件下这种诱导原子相干性对增益的影响很小,可以忽略<sup>[13]</sup>。因此,下面采用速率方程和稳态光传播方程来描述,从而既简化处理过程,突出物理内容,又不失一般性。

考虑小信号 ( $P_s \ll P_1, P_2$ ), 同时忽略光纤的

传播损耗(非吸收损耗), 得到速率方程和光沿光纤传播(取一维  $z$  方向) 方程

$$\dot{n}_3 = W_{2a}n_1 - (A_{32} + A_{31})n_3 - W_{2e}n_3 \tag{1a}$$

$$\dot{n}_2 = W_{1a}n_1 - (A_{21} + W_{1e})n_2 + A_{32}n_3 \tag{1b}$$

$$dP_1/dz = -P_1(\sigma_{1a}n_1 - \sigma_{1e}n_2)\Gamma_1 \tag{2a}$$

$$dP_2/dz = -P_2(\sigma_{2a}n_1 - \sigma_{2e}n_3)\Gamma_2 \tag{2b}$$

$$dP_s/dz = -P_s(\sigma_{sa}n_1 - \sigma_{se}n_2)\Gamma_s \tag{2c}$$

其中,  $n_i = n_i(t, z)$ ,  $\sum_{i=1}^3 n_i = n_t$  ( $n_t$  为掺杂浓度),  $W_{ja}, W_{je}$  分别是第  $j$  个泵浦作用时受激吸收和发射速率,  $\sigma_{ja}, \sigma_{je}$  分别是受激吸收和发射截面。  $\Gamma_j$  为激光与光纤芯有效叠合因子,  $P_j = P_j(z, t)$ 。 泵浦速率  $W$  和泵浦功率  $P_j$  的关系为

$$W_{ja} = \sigma_{ja}P_j\Gamma_j/h\nu_{j1}A$$

其中  $A$  为光纤芯截面积,  $\nu_{j1}$  为  $|j\rangle \rightarrow |1\rangle$  跃迁的光频率。

### 3 分析和讨论

#### 3.1 阈值

暂不考虑传播过程。解(1)式稳态方程得

$$n_1 = n_t/(1 + t_1 + t_2) \tag{3a}$$

$$n_2 = t_1n_t/(1 + t_1 + t_2) \tag{3b}$$

$$n_3 = t_2n_t/(1 + t_1 + t_2) \tag{3c}$$

其中 
$$t_1 = \frac{W_{1a}(A_{31} + A_{32} + W_{2e}) + A_{32}W_{2a}}{(A_{21} + W_{1e})(A_{31} + A_{32} + W_{2e})}, \quad t_2 = \frac{W_{2a}}{A_{31} + A_{32} + W_{2e}}$$

考虑到实际情况  $W_{1e} \ll W_{1a}$ <sup>[9,14]</sup>, 可简化为

$$n_1 = A_{21}n_t/(\tau W_{2a} + W_{1a} + A_{21}) \tag{4a}$$

$$n_2 = (r_2W_{2a} + W_{1a})n_t/(\tau W_{2a} + W_{1a} + A_{21}) \tag{4b}$$

$$n_3 = r_1W_{2a}n_t/(\tau W_{2a} + W_{1a} + A_{21}) \tag{4c}$$

其中定义

$$r_1 = A_{21}/(A_{31} + A_{32} + W_{2e}) \tag{5a}$$

$$r_2 = A_{32}/(A_{31} + A_{32} + W_{2e}) \tag{5b}$$

$$r = r_1 + r_2 \tag{5c}$$

利用  $A_{32} \gg A_{21}^{[10]}$ , 有  $r_1 \approx 0, r = r_1 + r_2 \approx r_2$ , 能级 3 的粒子向下衰减很快, 粒子数分配的结果使得  $n_3/n_2 \approx 0$ . 利用此结果, 可将 (2c) 式写成

$$dP_s(z)/dz = P_s(z)[(1 + \alpha)n_2 - \alpha n_1]\sigma_{se}\Gamma_s \quad (6)$$

其中  $\alpha = \sigma_{sa}/\sigma_{se}$ . 要使  $P_s$  有增益必须使  $dP_s/dz \geq 0$ , 即  $(1 + \alpha)n_2 - \alpha n_1 \geq 0$ . 故得双频光泵浦阈值公式

$$W_{1a} + rW_{2a} \geq \alpha A_{21}, \text{ 或 } \frac{\sigma_{1a}P_1\Gamma_1}{h\nu_{21}A} + \frac{r\sigma_{2a}P_2\Gamma_2}{h\nu_{31}A} \geq \alpha A_{21} \quad (7)$$

对于单频光泵浦情况, (1) 若  $P_1 = 0, P_2 \neq 0$ , 则  $rW_{2a} \geq \alpha A_{21}$ ; (2) 若  $P_1 \neq 0, P_2 = 0$ , 则  $W_{1a} \geq \alpha A_{21}$ . 令  $W = W_{1a} + rW_{2a}$  为总的泵浦速率, 则形式上双频光泵浦的阈值公式与单频光的相同. 但若针对某一泵浦光而言, 其阈值降低. 因为对于  $P_1$ , 当  $P_2$  一定时, 双泵浦阈值  $W_{1th}(\text{双}) = \alpha A_{21} - rW_{2a} < \alpha A_{21} = W_{1th}(\text{单})$ . 同理, 对  $P_2$  而言,  $P_1$  一定时,  $rW_{2th}(\text{双}) = \alpha A_{21} - W_{1a} < \alpha A_{21} = rW_{2th}(\text{单})$ . 单光泵浦阈值降低的原因是两泵浦光功率互补.

实际应用时是用功率来测量的. 将 (7) 式写成

$$mP_1 + nP_2 > \alpha A_{21} \quad (7')$$

其中  $m = \sigma_{1a}\Gamma_1/h\nu_{21}A$ ,  $n = \sigma_{2a}\Gamma_2/h\nu_{31}A$ . 比较功率阈值  $(P_1 + P_2)_{th}$  与  $P_{1th}$ ,  $P_{2th}$ , 假定  $P_{2th} > P_{1th}$ , 则  $P_{1th} < (P_1 + P_2)_{th} < P_{2th}$ . 可见双频泵浦光其总功率阈值也比某一单频光的低. 由于一般  $m \neq n$ , 故从功率的角度说,  $P_1, P_2$  的地位并不相同. 系数  $m, n$  大的相应的泵浦效率高.

这里阈值的讨论没有计及泵浦光的传播过程, 因而是最低限. 若计及传播衰减, 阈值比上述得到的要高.

### 3.2 饱和增益

这里所说的饱和, 是指泵浦功率增加到一定水平时, 增益不再明显增加. 实际上当泵浦功率在几十毫瓦水平时基态粒子绝大多数已泵浦到了亚稳态  $|2\rangle$  上. 只有在  $P_j \rightarrow \infty$  时, 受激发射才对饱和特性起关键作用.

以下采用与单泵浦相比较的方法, 有两种情况:

#### 3.2.1 $P_1$ 引起增益饱和 ( $P_1$ 很大) 时, 加入 $P_2$ 的影响

关键看抽运到亚稳态上的粒子数的多少 (此时,  $n_1, n_3$  布居相对很小). 信号的增益取决于  $(\sigma_{se}n_2 - \sigma_{sa}n_1) \approx \sigma_{se}n_2$  的大小.

单泵浦时,  $P_2 = 0$ , 则  $W_{2a} = W_{2e} = 0$ , 代入 (3b) 得

$$n_2 = \frac{W_{1a}n_1}{A_{21} + W_{1c} + W_{1a}} \quad (8)$$

双泵浦, 即加入  $P_2$  时,  $W_{2a}, W_{2e} \neq 0$ ,  $n_2$  由 (3b) 式得到.

比较 (3b), (8) 两式, 当

$$W_{1a} < A_{32} \quad (9)$$

时, 双泵浦比单泵浦抽运更多的粒子到亚稳态上. 由于讨论的是饱和时的情形,  $P_1$  需大到足以使  $n_2 \rightarrow n_1$ , 此对应

$$W_{1a} \gg A_{21} - W_{1c}, \rightarrow W_{1a} > A_{21} \quad (\because W_{1a}/W_{1c} \gg 1) \quad (10)$$

综合 (9), (10) 得到结论: 当

$$A_{21} < W_{1a} < A_{32} \quad (11)$$

时, 在  $P_1$  使增益饱和后加入  $P_2$ , 可使饱和增益进一步提高.

### 3.2.2 $P_2$ 引起增益饱和 ( $P_2$ 很大) 时, 加入 $P_1$ 的影响

经过与 3.2.1 同样的分析, 可得到结论: 当

$$\sigma_{1a}A_{21}/r_2\sigma_{1c} > W_{2a} > A_{21}/r_2 \quad (12)$$

时 [ $r_2$  见 (5b)], 在  $P_2$  使增益饱和时再加入  $P_1$  后, 也使饱和增益进一步提高。

具体说明一下  $W$  的大致量级。若取  $P = 1 \text{ mW}$ ,  $\Gamma = 0.5$ ,  $\sigma_a = 2.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $A = 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ,  $h = 6.23 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $\nu = 3 \times 10^8 / 1.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , 则  $W \approx 50 \text{ s}^{-1}$ , 即  $1 \text{ mW}$  的功率相当于  $50 \text{ s}^{-1}$  的泵浦速率。而一般饱和功率在十几到几十毫瓦之间, 这要看光纤长度和浓度等参数的大小。一般情况下, (11), (12) 式是成立的, 故双频激光泵浦 EDFA 可得到比单频光泵浦更高的信号饱和增益。

### 3.3 增益随光纤长度及泵浦光功率的变化特性

以上讨论了 HEDFA 在阈值和饱和时的行为。这是两种极端情况。它们都没有考虑传播时的衰减, 而在一般情况下, 需要联立求解方程 (1) 和 (2)。

#### 3.3.1 单泵浦的情况

考虑  $P_1$  单泵浦的情况 (对  $P_2$  可同样分析), 但写成  $P_p$ 。忽略受激发射, 将 (4) 式代入 (2) 式得稳态时的泵浦和信号传播方程

$$\frac{dW_p(z)}{dz} = -\frac{W_p\beta_p A_{21}}{W_p + A_{21}} \quad (13)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = -\frac{P_s\beta_s(W_p - \alpha A_{21})}{W_p + A_{21}} \quad (14)$$

其中  $W_p = \sigma_{pa}P_p\Gamma_p/h\nu_pA$ 。并定义  $\beta_j = \sigma_{ja}\Gamma_jn_t$ 。对 (13) 式积分得

$$W_p(z) - W_p(0) + A_{21}\ln[W_p(z)/W_p(0)] = \beta_p A_{21}z \quad (15)$$

$W_p(0)$  为输入端 ( $z = 0$ ) 的泵浦速率。若定义

$$A_p(z) = W_p(z) - W_p(0), \quad \delta_j(z) = \ln W_j(z)/W_j(0) \quad (j = p, s)$$

则 (15) 式变成

$$A_p(z) + \delta_p(z)A_{21} = -\beta_p A_{21}z \quad (16)$$

利用 (13) 式可得

$$\delta_s(z) = \frac{[\alpha A_{21}\delta_p(z) - A_p(z)]\beta_s}{\beta_p A_{21}} \quad (17)$$

若  $\alpha \approx 0$ , 则有  $\delta_s(z) = A_p(z)\beta_s/\beta_p A_{21}$ , 即  $\delta_s$  与  $A_p$  成正比。一般地, 利用 (16) 式, 可将 (17) 式写成

$$\delta_s(z) = [(1 + \alpha)\delta_p + \beta_p z]\beta_s/\beta_p \quad (18)$$

要进一步求出  $P_s$  与输入  $W_p(0)$  和  $z$  的关系, 需作近饱和近似。近饱和近似是指泵浦功率较大而信号增益趋近饱和但未饱和的过渡情况。物理上由于基态粒子数较少, 因而泵浦光衰减较小。数学上对应如下近似

$$A_p = W_p(0)[e^{\delta_p} - 1] \approx W_p(0)\delta_p \quad (19)$$

计算机模拟计算表明, 对不很长的光纤 (如  $L < 10 \text{ m}$  以内), 泵浦功率在几毫瓦到十几毫瓦间就有  $P_{\text{out}}/P_{\text{in}} > 0.5$ , 可用此近似。

由近饱和近似 (19) 式, (16) 式变为

$$\delta_p(z) = -\frac{\beta_p A_{21}z}{W_p(0) + A_{21}} \quad (20)$$

将(20)式代入(19)式,于是得到信号对数增益

$$\delta_s(z) = \frac{\beta_s[W_p(0) - \alpha A_{21}]z}{W_p(0) + A_{21}} \quad (21)$$

可见, $W_p(0)$ 一定时, $\delta_s(z)$ 与 $z$ 成正比。而 $L$ 一定时, $d\delta_s/dW_p(0) = \beta_s(\alpha + 1)A_{21}L/[W_p(0) + A_{21}]^2$ ,即增益对于泵浦输入功率是非线性增加的。

### 3.3.2 双泵浦的情况

将(4)式代入(2)式得(简记 $W_{j_0}$ 为 $W_j$ )

$$dW_1/dz = -\beta_1 A_{21} W_1 / (A_{21} + W_1 + rW_2) \quad (22a)$$

$$dW_2/dz = -\beta_2 A_{21} W_2 / (A_{21} + W_1 + rW_2) \quad (22b)$$

积分(22)式得 $\delta_2/\beta_2 = \delta_1/\beta_1$ ,即

$$\delta_1/\sigma_{1a}\Gamma_1 = \delta_2/\delta_{2a}\Gamma_2 \quad (23)$$

(23)式表明,在 HEDFA 中各个泵浦光的对数衰减与其有效吸收截面成正比。这对于存在亚稳态且发射截面可忽略的情形,可作为测量吸收截面之比的方法。

引入等效总泵浦速率 $W_p = W_1 + rW_2$ ,则有

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = -\frac{P_s\beta_s(W_p - \alpha A_{21})}{W_p + A_{21}} \quad (24)$$

(24)与(14)式形式完全一样。同样,作近饱和近似

$$A_1 = W_1(0)\delta_1, \quad A_2 = rW_2(0)\delta_2 \quad (25)$$

由此得信号 $\delta_s$ 与泵浦 $\delta_1$ 的关系为

$$\delta_s(z) = -\frac{\beta_s\delta_1[W_p(0) - \alpha A_{21}]z}{A_{21}\beta_1} \quad (26)$$

利用(23),(22a)求得 $\delta_1$ 代入(26)式得

$$\delta_s(z) = \frac{\beta_s[W_p(0) - \alpha A_{21}]z}{W_p(0) + A_{21}} = \frac{\beta_s[W_1(0) + rW_2(0) - \alpha A_{21}]z}{W_1(0) + rW_2(0) + A_{21}} \quad (27)$$

(27)式与(21)式形式相同。

与单泵浦情况一样,我们也得到信号增益与长度成正比关系及与泵浦总输入功率成非线性的关系,但泵浦总输入功率包含两项〔见(7')〕,说明了泵浦互补的作用。但因 $m \neq n$ , $P_1, P_2$ 地位不同。可见,可以利用某个泵浦光起功率漂白作用,系数大的 $P_i$ 漂白作用明显。

## 4 HEDFA 实验及数值计算

### 4.1 实验

980 nm 泵浦源是 Coherent 公司 899-29 型钛宝石调谐激光,额定输出功率是 600 mW,激光线宽小于 1 MHz,1480 nm 激光二极管(LD)、807 nm LD(Sharp LT017MNDO)均为日本产单纵模半导体激光器,额定功率分别为 90 mW, 50 mW。信号源是单纵模分布反馈式半导体激光器,工作波长为 1.536  $\mu\text{m}$ ,额定功率为 3.5 mW。信号光和泵浦光通过光纤波分复用器耦合到  $\text{Er}^{3+}$  光纤中。掺铒浓度量 230 ppm,数值孔径 0.22,直径 4.9  $\mu\text{m}$ ,当 980 nm 单独泵浦 21 m 光纤时,放大器饱和增益为 29 dB,加 1480 nm LD 泵浦,饱和增益为 32 dB,提高了 3 dB<sup>[12]</sup>,见图 2。另一实验中 1480 nm 单独泵浦尚处于负增益状态,加入 807 nm LD 后,出现正增益(图 3),体现了漂白作用。

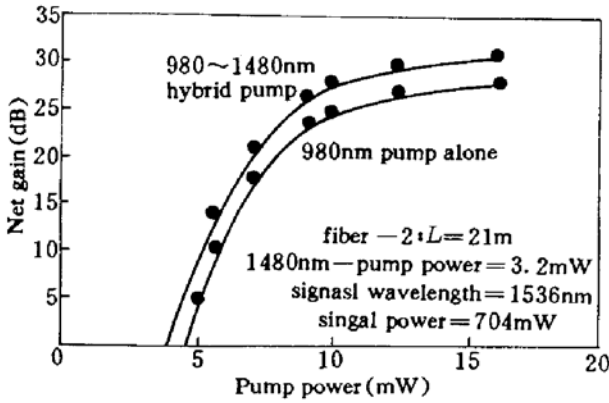


Fig. 2 Net gain against 1480-pump power with constant 980-pump

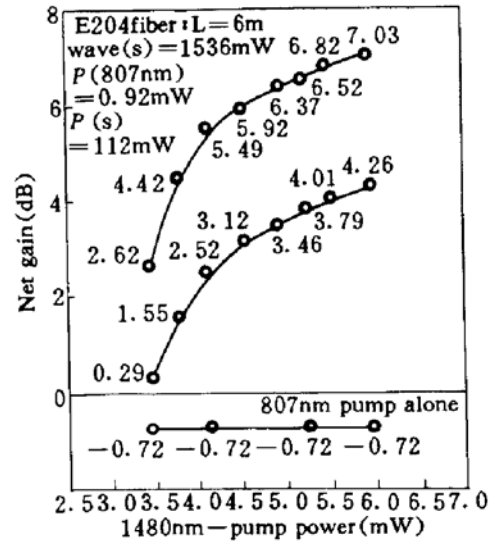


Fig. 3 Net gain against 1480-pump power with constant 807-pump

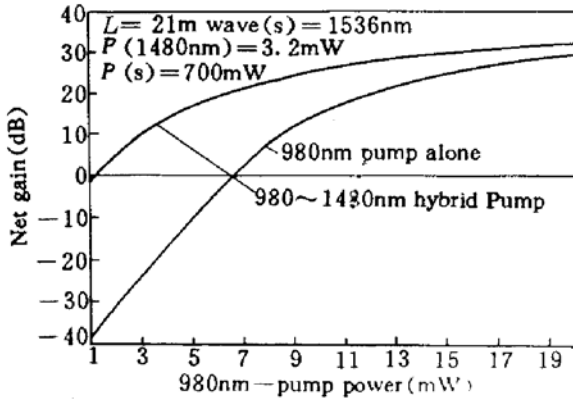


Fig. 4 Calculated net gain against 980-pump power with constant 1480-pump

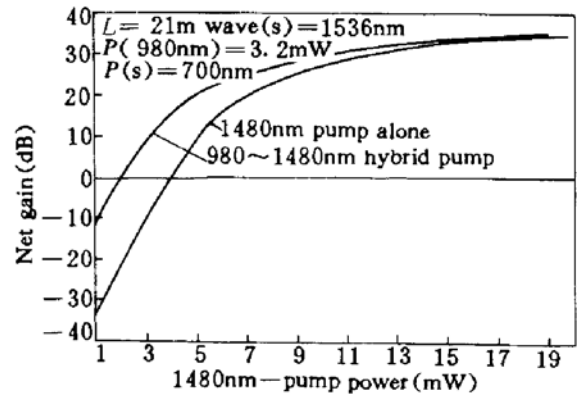


Fig. 5 Calculated net gain against 1480-pump power with constant 980-pump

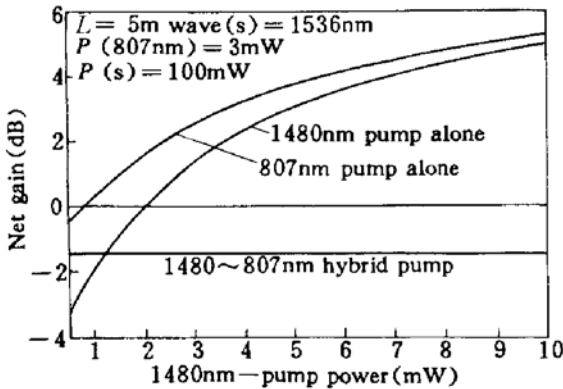


Fig. 6 Calculated net gain against 1480-pump power with constant 807-pump

### 4.2 数值计算及分析

采用实验中的光纤参数(几何尺寸及掺杂浓度等),根据 E204 型掺铒光纤实验所测的谱损图估计吸收和发射截面,另外,截面、弛豫等数据还参考了文献[9,10,14]。计算中发现,泵浦阈值由(7)式决定,对参数  $\alpha, A_{21}$  敏感,而信号增益受  $\Gamma_p, \Gamma_s$  取值大小的影响,且效果不同。 $\Gamma_p$  增大使  $G-P$  曲线向上平移,  $\Gamma_s$  增大则使  $G-P$  曲线的斜率明显变大。由于吸收、发射截面及其他参数应由实验中具体光纤决定,而计算中所用参数带有一定推测性,故很难将两者结果作一一对应的比较。另外,

为简化分析没有考虑光场横向的改变,而在实际中  $\Gamma_s, \Gamma_p$  是传播距离的函数,并可能在输入端与输出端有很大不同,故数值模拟描述的增益曲线与实验不尽相同。但是,实验现象与计算的结果在信号增益特性方面是一致的,变化趋势也一样,这从图 2 和图 4,图 5 以及图 3 和图 6 的

比较可以看出(尽管泵浦、长度等条件不一样)。图 4, 图 5 和图 6 表明, 双泵浦情形下确实使饱和和增益提高, 使单光泵浦阈值降低。比较图 4 和图 5, 单泵浦时, 980 nm 泵浦比 1480 nm 泵浦的增益阈值高, 这是由于  $P(807 \text{ nm}) = 3 \text{ mW}$  时, 增益为负。双泵浦时, 这部分功率却能用来提高单泵浦  $P(1480 \text{ nm})$  的系数  $m$  大于  $P(980 \text{ nm})$  的系数  $n$ , 因而两者效率不同, 而且图 4(b) 相对图 4(a) 的增益偏移幅度比图 5 更大, 由图 6 可见, 单泵浦  $P(1480 \text{ nm})$  时的信号增益, 并且由于功率互补使得近饱和区双泵浦增益曲线相对于单泵浦增益曲线有向左平移的趋向, 对某一泵浦来说另一泵浦起漂白作用。这正验证了文中的分析。

### 参 考 文 献

- 1 M. Shimizu, M. Yamada, M. Horiguchi *et al.*. Erbium-doped fiber amplifiers with an extremely high gain coefficient of 11.0 dB/mW. *Electr. Lett.*, 1990, **26**(20): 1641~1643
- 2 Y. Kimura, K. Suzuki, M. Nakazawa. 46.5 dB gain in EDFA pumped by 1.46  $\mu\text{m}$  LD. *Electr. Lett.*, 1989, **25**(24): 1656~1657
- 3 T. G. Whitley. Laser diode operation of  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber amplifier. *Electr. Lett.*, 1988, **24**(25): 1537
- 4 E. Desurvire, J. R. Simpson, P. C. Becker. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11): 888~890
- 5 P. R. Morkel, R. I. Laming. Theoretical modelling of erbium-doped fiber amplifiers with excited absorption. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(19): 1062~1064
- 6 宁继平, 何志宏, 刘宏伟等. 掺铒光纤激光放大器的研究. *光学学报*, 1992, **12**(8): 678~683
- 7 Anders Bjarklev, Jorn Hedegaard Povlsen. Large signal modelling of an erbium doped fiber amplifier. *SPIE*, 1989, **1171**: 118~129
- 8 S. Tammela, X. Zhan, P. Kiiveri. Comparison of gain dependence of different-erbium-doped fiber structure. *SPIE*, 1990, **1373**: 103~110
- 9 C. R. Giles, Emmanuel Desurvire. Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber optical amplifiers. *J. of Lightwave Tech.*, 1991, **9**(2): 147~154
- 10 E. Desurvire, C. R. Giles, J. R. Simpson. Gain dynamics of erbium-doped amplifiers. *SPIE*, 1989, **1171**: 103~117
- 11 J. M. P. Delavaux, C. F. Flores, R. E. Tench *et al.*. Hybrid Er-doped fiber amplifiers at 980~1480 nm for long distance optical communications. *Electr. Lett.*, 1992, **28**(17): 1642~1643
- 12 明海, 谢建平, 刘宇等. 980 nm 波段钛宝石可调谐激光泵浦掺铒光纤放大器的净增益达 49.6 dB. *中国激光*, 1993, **20**(11): 809
- 13 詹明生, 黄青, 周士康等. 双频激光泵浦光纤放大器的原子相干效应. *光学学报*, (待发表)
- 14 J. L. Zyskind, J. R. Simpson, C. R. Giles *et al.*. Optimization of erbium-doped fiber amplifiers pumped near 1.5  $\mu\text{m}$ . *SPIE*, 1989, **1171**: 137~143

## Study on Characteristics of Hybrid Pumped Erbium-doped Fiber Amplifiers

Huang Qing Zhan Mingsheng Zhou Shikang

(Laser Spectroscopy Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Academia Sinica, Hefei 230031)

Ming Hai Liu Yu

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**Abstract** The signal gain characteristics of hybrid pumped erbium doped fiber amplifiers (HEDFA) are studied theoretically. The behaviors near gain threshold and saturation region are analyzed in detail. It shows that HEDFA has higher gain and lower threshold than the usual EDFA which is pumped by one laser source. The conclusion is supported by our experimental results.

**Key words** hybrid pumped erbium-doped fiber amplifier (HEDFA), gain characteristics