

双包层掺染料聚合物光纤放大器的增益性能分析*

李炳新 于荣金

(秦皇岛燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

摘 要 双包层聚合物光纤放大器可以减小染料的热漂白, 使用速率方程的方法, 给出了一个能够全面描述双包层掺染料聚合物光纤放大器增益性能模型, 模型既考虑了染料三重态能级对速率方程的影响, 又考虑了双包层结构对泵浦光的影响, 可以在稳态的情况下计算放大器的各种增益性能指标.

关键词 聚合物光纤放大器; 增益; 染料; 双包层

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

近十年来, 人们致力于开发性能优良的聚合物通信光纤, 希望它能取代双绞线和同轴电缆, 用于光纤局域网和接入网中^[1,2]. 由于高分子材料的本征吸收很大, 聚合物光纤的衰减一般都在 100~200 dB/km 左右, 限制了聚合物光纤的使用距离. 因此聚合物光纤放大器 (Polymer Optical Fiber Amplifier 简称 POFA) 的研究也就成了必然.

有机染料种类很多, 大多都是很好的增益介质, 其荧光波长在可见光范围内正好与聚合物光纤的低衰减窗口波长 (650 nm) 相符合, 文献^[3,4]报道了 PMMA 基掺罗丹明 B 的聚合物光纤放大器. 在固态介质中, 有机染料不能循环流动, 因此热漂白现象严重, 影响了增益介质的寿命. 为了解决这个问题, 本文提出了双包层结构的聚合物光纤放大器^[5], 实验表明这种结构可以有效地解决染料的热漂白问题.

有机染料普遍存在三重态吸收问题^[6], 当泵浦光作用时间比较长的情况下, 三重态吸收就会很严重, 使放大器增益减小以至为零; 双包层结构对泵浦光的吸收也有较大的影响. 本文在充分考虑了以上因素后, 提出了一个能够描述双包层掺染料聚合物光纤放大器的模型, 在稳态情况下求解, 得到了增益谱、饱和增益、最佳长度以及饱和输出功率等性能指标.

1 双包层光纤中泵浦光的吸收

在讨论问题之前, 假设: 1) 光纤芯层中有机染料的浓度是均匀分布的, 浓度为 N_{dye} ; 2) 各个模式等几率激励.

双包层聚合物光纤放大器的泵浦光在光纤的内包层和芯区内传输, 芯区掺入的有机染料能够强烈

地吸收泵浦光功率, 为了使泵浦光能够束缚在内包层中传输, 光纤内包层与外包层之间的折射率差是比较大的, 而芯区与内包层之间的折射率差较小, 因此, 对泵浦光而言, 内包层和芯区可视为多模光纤, 即在内包层和芯区中有大量的模式场. 根据文献^[7], 模式场在传输过程中其场分布是不变的, 其功率衰减系数

$$\alpha_i = \gamma_i \alpha_{core} + \alpha \quad (1)$$

式中 i 代表不同模式, α_{core} 为芯区染料吸收系数, α 为光纤 PMMA 吸收系数, γ_i 是芯区内功率与该模式总功率之比, 定义为芯区功率百分比. 设多模光纤的模式场为 φ_i , 则

$$\gamma_i = \frac{\iint_{core} \varphi_i^2 dS}{\iint_{all} \varphi_i^2 dS} \quad (2)$$

由假设 1) 知, 芯区有机染料浓度是均匀的, 则 $\alpha_{core} = \sigma_a(\nu_p) N_{dye}$, $\sigma_a(\nu_p)$ 为泵浦光吸收截面. 因此

$$\alpha_i = \gamma_i \sigma_a N_{dye} + \alpha \quad (3)$$

即不同的模式有不同的功率衰减系数. 多模光纤的模式场为 $\varphi = \sum c_i \varphi_i$, c_i 由注入条件决定. 光纤内的总功率

$$P(z) = \iint_{all} \sum_{i=1}^N c_i^2 \varphi_i^2 dS = \sum_{i=1}^N c_i^2 p_i(z) \quad (4)$$

式中 $p_i(z) = p_i(0) \exp(-\alpha_i z)$, N 为模式数目. 由假设 2) 知, c_i 为常数, 对各个模式功率作归一化处理, $p_i(0) = P(0)/N$, 则

$$P(z) = \sum_{i=1}^N \frac{P(0)}{N} \exp(-\alpha_i z) \quad (5)$$

由于 γ_i 的差异很大, 且模式数量极多, 因此对 $P(z)$ 只能进行统计处理. 考虑到光纤放大器存在最佳长度, 对于一定的光纤长度 z_0 , 可以认为 $\gamma_i \sigma_a N_{dye} z_0 < 0.001$ 的模式功率未被吸收, 这些模式的集合为 $Unabs$, 数目为 M , 则

$$\alpha_i = \begin{cases} \alpha & (i \in Unabs) \\ \gamma \sigma_a N_{dye} + \alpha & (i \notin Unabs) \end{cases}$$

$\bar{\gamma}$ 是 γ_i 的平均值. 于是

*国家自然科学基金(69977016)资助项目
Tel: 0335-8071603 Email: xuanyizi@ysu.edu.cn
收稿日期: 2004-07-09

$$P(z) = P_{unabs}(z) + P_{abs}(z) = \frac{M}{N}P(0)\exp(-\alpha z) + \frac{N-M}{N}P(0)\exp(-\bar{\gamma}\sigma_a N_{dye}z - \alpha) \quad (6)$$

式(6)表明泵浦光功率在一定长度内被有机染料吸收的只是其中的一部分,定义泵浦光吸收效率

$$\eta = \frac{P_{abs}(0)}{P(0)} = \frac{N-M}{N} \quad (7)$$

由于 α_i 与光纤内包层中模式的场分布有密切的关系,所以不同结构的内包层决定了泵浦光的吸收效率和平均功率吸收系数. 下面对四种不同结构的内包层加以讨论.

1.1 同心圆结构

光纤结构如图 1,内外包层是同心圆,芯和内包层中的模式场为线偏振模 $LP_{mn} = AJ_m(U_{mn}r/R_0)$, 模式场主要分布在焦散面和外包层之间,焦散面半径 $r_{mn} = mR_0/U_{mn}$,若 $r_{mn} > r_0$,则 $\gamma_i \approx 0$,因此,所有满足 $r_{mn} > r_0$ 的模式就是 Unabs 集合. 对于圆光纤用本征方程求出 U_{mn} 和模式的总数 N . 计算 r_{mn} ,统计 $r_{mn} > r_0$ 时的不同 m 和 n 的组合数目 M ,由式(7)可以得到泵浦光吸收效率 η . 图 1 给出了不同芯半径的泵浦光吸收效率,可见芯半径较小时泵浦光吸收效率很低. 至于平均功率吸收系数 $\bar{\gamma}$,只能用数值计算,图 2 是 $m=30$ 时的 γ_i ,其它 m 也有类似结

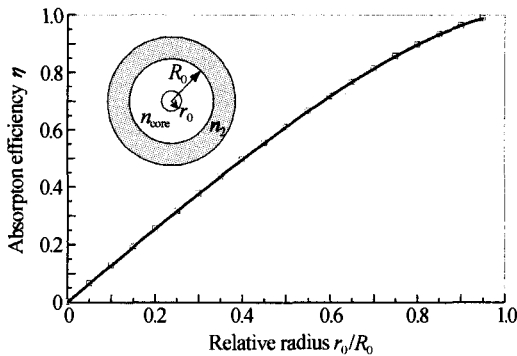


图 1 同心圆双包层光纤泵浦吸收效率与芯半径之间的关系
Fig. 1 Pump power absorption efficiency versus core radius for concentric circle double-clad fiber

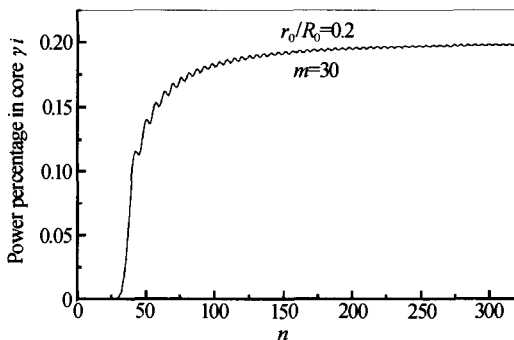


图 2 同心圆双包层光纤芯区功率占有百分比
Fig. 2 Power percentage in core for concentric circle double-clad fiber

果,计算结果是 $\bar{\gamma} \approx r_0/R_0$.

1.2 偏心圆结构

在同心圆结构中,大量的模式场不集中在芯区,使得泵浦光的吸收效率很低,为了提高泵浦光吸收效率,将芯区偏离内包层的圆心,形成图 3 偏心圆结构的双包层光纤. 内包层模式场与同心圆结构相同,但由于芯区位置的变化,使得 γ_i 有很大的变化,即 $r_{mn} > (r_0 + d_1)$ 时, $\gamma_i \approx 0$,相当于扩大了芯区的半径,因此泵浦光吸收效率会提高,图 3 是不同偏心距离 d_1 的吸收效率,偏心距离越大,泵浦光吸收效率越高. 用数值方法计算了偏芯光纤的吸收系数,图 4 是 $m=30$ 时的 γ_i ,对于其他的也得到类似的结果,平均值 $\bar{\gamma} \approx r_0^2/R_0^2$,与偏心距离无关.

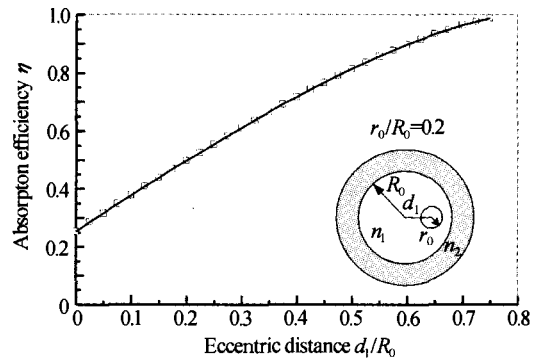


图 3 偏心圆双包层光纤泵浦吸收效率与偏心距离之间的关系

Fig. 3 Pump power absorption efficiency versus eccentric distance for eccentric circle double-clad fiber

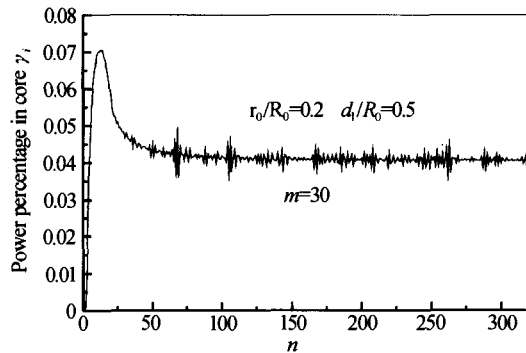


图 4 偏心圆双包层光纤的芯区功率百分比

Fig. 4 Power percentage in core for eccentric circle double-clad fiber

1.3 矩形结构

为了进一步提高泵浦光的吸收效率,可以将内包层做成矩形(图 5),由于模式数量甚多,而且绝大多数模式都处于远离截止的状态,故可以采用马卡梯里近似,内包层模式场为

$$\varphi_{mn}^{(1)} = A \sin \frac{(2m+1)\pi x}{2a} \cos \frac{2n\pi y}{2b} \quad (8)$$

$$\varphi_{mn}^{(2)} = B \sin \frac{(2m+1)\pi x}{2a} \sin \frac{(2n+1)\pi y}{2b} \quad (9)$$

$$\varphi_{mn}^{(3)} = C \cos \frac{2m\pi x}{2a} \sin \frac{(2n+1)\pi y}{2b} \quad (10)$$

$$\varphi_{mn}^{(4)} = D \cos \frac{2m\pi x}{2a} \cos \frac{2n\pi y}{2b} \quad (11)$$

($m, n = 1, 2, 3, \dots$)

计算结果表明, $\eta \approx 1, \bar{\gamma} \approx \pi r_0^2 / 4ab$. 即全部泵浦光功率均可以被吸收, 但功率吸收系数很小.

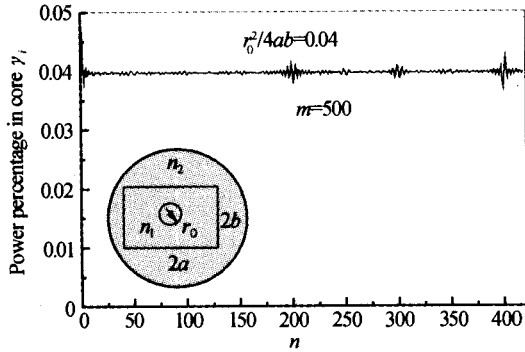


图5 矩形双包层光纤的芯区功率百分比
Fig. 5 Power percentage in core for rectangle double-clad fiber

1.4 D型结构

D型结构的双包层光纤如图6, 为了确定D型

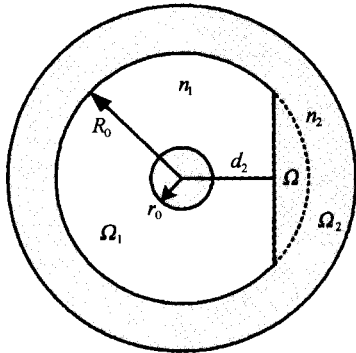


图6 D形双包层光纤
Fig. 6 D shape double-clad optical fiber

光纤内的模式场, 采用微扰法近似处理. 未受微扰的光纤即圆多模光纤, 其模式场 φ 满足方程

$$\hat{H}_0 \varphi = \beta_0^2 \varphi \quad (12)$$

D型缺口视为微扰, 则其模式场 ϕ 满足方程

$$\hat{H} \phi = \beta^2 \phi \quad (13)$$

式中

$$\hat{H}_0 = \begin{cases} \nabla_i^2 + k_0^2 n_1^2 & (r \in \Omega_1) \\ \nabla_i^2 + k_0^2 n_1^2 & (r \in \Omega) \\ \nabla_i^2 + k_0^2 n_2^2 & (r \in \Omega_2) \end{cases} \quad (14)$$

$$\hat{H} = \begin{cases} \nabla_i^2 + k_0^2 n_1^2 & (r \in \Omega_1) \\ \nabla_i^2 + k_0^2 n_2^2 & (r \in \Omega) \\ \nabla_i^2 + k_0^2 n_2^2 & (r \in \Omega_2) \end{cases} \quad (15)$$

对于圆形光纤, 当 $m+2n \approx p$ 时, 传输常数 β 近似相等, 即这些 LP_{mn} 模式是准简并的, 根据微扰理论^[8],

D型光纤模式场的一级近似为

$$\phi_i = \sum_{j=1}^{M_p} a_{ij} \varphi_j \quad (i=1, 2, 3, \dots, M_p) \quad (16)$$

M_p 是第 p 组简并模式的简并度, 微扰矩阵元

$$H_{mn} = \iint_{\Omega} J_m(U) \hat{H} J_n(U) dS \quad (17)$$

则 a_{mn} 满足方程

$$\sum_n (H_{mn} - \beta^2 \delta_{mn}) a_{mn} = 0 \quad (18)$$

这是 M_p 阶久期方程, 其本征值就是传输常数 β^2 , 与之相应的本征矢量即为 a_{ij} , 因此模式场 ϕ_i 的芯区功率百分比

$$\gamma_i^A = \frac{\sum_{j=1}^{M_i} a_{ij}^2 \gamma_j}{\sum_{j=1}^{M_i} a_{ij}^2} \quad (19)$$

图7给出吸收效率与芯半径的关系, 图8给出了泵浦光吸收效率和D型厚度的关系. 可见D型结构使泵浦光吸收效率提高了很多.

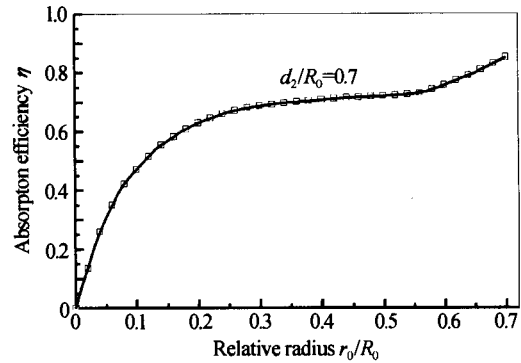


图7 D型双包层光纤泵浦光吸收效率与芯半径之间的关系
Fig. 7 Pump power absorption efficiency versus core radius for D shape double-clad fiber

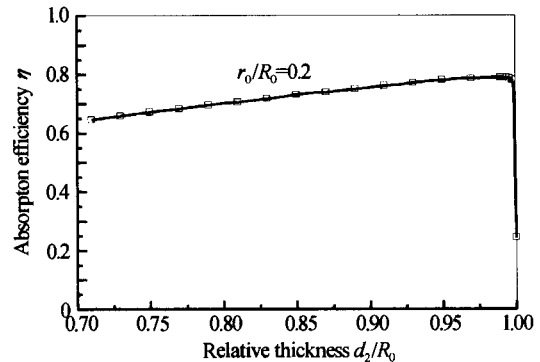


图8 D型双包层光纤泵浦光吸收效率与D型厚度之间的关系

Fig. 8 Pump power absorption efficiency versus the thickness of D shape for D shape double-clad fiber

图9是泵浦光在各种结构双包层光纤中传输时功率衰减的情况, 掺罗丹明B的浓度为2ppm, 同心圆光纤中泵浦功率在几十厘米内就趋向饱和, 光纤芯将不再吸收泵浦光. 在2m之内, 其余三种结构的对光纤泵浦光的吸收都保持较高的比率, 矩形结构最高.

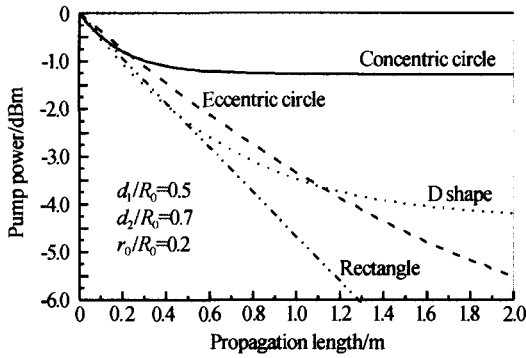


图9 不同结构双包层光纤中泵浦功率的衰减
Fig. 9 Longitudinal evolution of pump power for different inner clad shape

2 染料能级结构与速率方程

有机染料分子结构比较复杂,一般有一条多个碳原子组成的碳链,是一种大分子结构.染料分子与其他分子的主要区别在于,除了有一个单态能级结构 S_0 、 S_1 、 S_2 ...外,还有一个三重态能级结构 T_1 、 T_2 、 T_3 ... (图 10). 有机染料分子吸收光谱不同于原子光谱或离子光谱,它有一个数纳米至 100 多纳米的宽吸收带,这是由于分子的众多振动及转动能级吸收形成的.同理,染料分子的发射光谱也是由电

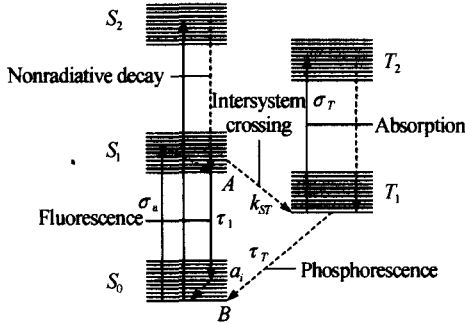


图 10 染料分子能级
Fig. 10 Schematic energy levels of a dye molecule

子激发态 S_1 向基态 S_0 的众多亚振动-转动能级跃迁的结果.因此染料分子的能级结构属于宽带二能级系统. $S_0 \rightarrow T_1$ 的吸收跃迁是自旋禁戒的,因此三重态 T_1 的粒子数集结只能由 $S_1 \rightarrow T_1$ 的系际交叉形成,染料分子的单态能级对光子的放大起决定作用,而三重态能级对光子的放大是没有贡献的,系际交叉会减小激发态的粒子数,三重态 $T_1 \rightarrow T_2$ 的跃迁吸收信号光功率.染料分子单态的宽带能级结构可以看作是一个等效的四能级结构, S_0 的最低能级 B 即为四能级的基态,第一激发态 S_1 最低能级 A 相当于四能级系统的亚稳态,而宽带能级 S_0 的某个振动能级 a_i 则是下能级.对这种宽带二能级等效的四能级结构,光子的吸收和辐射过程可用以下一组速率方程进行定量描述.

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{\sigma_a(\nu_p)N_0I_p}{h\nu_p} + \frac{\sigma_a(\nu_s)N_0I_s}{h\nu_s} - \frac{\sigma_e(\nu_s)N_1I_s}{h\nu_s} - k_{ST}N_1 - \frac{N_1}{\tau_1} \quad (20)$$

$$\frac{dN_T}{dt} = k_{ST}N_1 - \frac{N_T}{\tau_T} - \frac{\sigma_T(\nu_s)N_TI_s}{h\nu_s} \quad (21)$$

$$N_0(t) + N_1(t) + N_T(t) = N_{dye} \quad (22)$$

式中 $\sigma_a(\nu_p)$ 和 $\sigma_a(\nu_s)$ 分别是 $S_0 \rightarrow S_1$ 跃迁对泵浦光和信号光的吸收截面, $\sigma_T(\nu_s)$ 是三重态 $T_1 \rightarrow T_2$ 跃迁的吸收截面, $\sigma_e(\nu_s)$ 是 $S_0 \rightarrow S_1$ 的受激发射截面, τ_1 是激发态 S_1 的寿命, τ_T 是三重态 T_1 的寿命, k_{ST} 是系际交叉跃迁几率, I_p 和 I_s 分别是泵浦光和信号光的光强, N_{dye} 是染料分子浓度, N_0 、 N_1 和 N_T 分别是 S_0 、 S_1 和 T_1 态的粒子数密度.

式(20)和(21)两边对光纤横截面积分,考虑到仅在光纤芯区掺有染料,因此积分区域为光纤芯

$$\iint_{\text{core}} \frac{dN_1}{dt} dS = \iint_{\text{core}} \frac{\sigma_a N_0 I_p}{h\nu_p} dS + \iint_{\text{core}} \left(\frac{\sigma_a N_0 I_s}{h\nu_s} - \frac{\sigma_e N_1 I_s}{h\nu_s} - k_{ST} N_1 - \frac{N_1}{\tau_1} \right) dS \quad (23)$$

信号光在芯区传输, $\iint_{\text{core}} I_s dS = P_s(z)$, 而

$$\iint_{\text{core}} \frac{\sigma_a N_0 I_p}{h\nu_p} dS = \sum_{i=1}^N \gamma_i \sigma_a N_0 p_i(z) = \bar{\gamma} \sigma_a N_0 P_{\text{abs}}(z)$$

故速率式(20)和(21)化为

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{\bar{\gamma} \sigma_a(\nu_p) N_0 P_{\text{abs}}(z)}{\pi r_0^2 h\nu_p} + \frac{\sigma_a(\nu_s) N_0 P_s(z)}{\pi r_0^2 h\nu_s} - \frac{\sigma_e(\nu_s) N_1 P_s(z)}{\pi r_0^2 h\nu_s} - k_{ST} N_1 - \frac{N_1}{\tau_1} \quad (24)$$

$$\frac{dN_T}{dt} = k_{ST} N_1 - \frac{N_T}{\tau_T} - \frac{\sigma_T(\nu_s) N_T P_s(z)}{\pi r_0^2 h\nu_s} \quad (25)$$

3 双包层光纤中泵浦与信号光的功率传输

双包层结构聚合物光纤的芯区掺有机染料,信号光在其中传输,泵浦光同时注入内包层和芯区.在内包层和芯区的传输过程中,光功率被有机染料吸收的过程在上面已经讨论,泵浦光可以分为吸收光 $P_{\text{abs}}(z)$ 和未吸收光 $P_{\text{unabs}}(z)$. 吸收光 $P_{\text{abs}}(z)$ 在光纤中的传输方程为

$$\frac{dP_{\text{abs}}(z)}{dz} = -(\bar{\gamma} \sigma_a(\nu_p) N_0 + \alpha) P_{\text{abs}}(z) \quad (26)$$

信号光 $p_s(z)$ 的传输方程为

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = (\sigma_e(\nu_s) N_1 - \sigma_a(\nu_s) N_0) P_s(z) - (\sigma_T(\nu_s) N_T + \alpha) P_s(z) \quad (27)$$

这里忽略了 $S_0 \rightarrow S_1$ 的自发辐射,而且只考虑同向泵浦.

4 双包层聚合物光纤放大器的增益特性

利用上述模型,可以具体计算掺罗丹明 B 的双包层聚合物光纤放大器的稳态增益特性,由式(22)解出 N_0 ,代入式(24)和(25)中,在已知初始条件 $P_p(0)$ 和 $P_s(0)$ 的情况下,求解微分方程组就可以得到 $P_p(z)$ 和 $P_s(z)$,从而确定放大器的增益特性. 计算用的参数见表 1.

表 1 计算参数

参数	数值	参数	数值
$\sigma_a(\nu_p)$	$2.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2$	τ_1	$1.0 \times 10^{-9} \text{ s}$
$\sigma_a(\nu_s)$	$0.9 \times 10^{-20} \text{ m}^2$	τ_T	$1.0 \times 10^{-4} \text{ s}$
$\sigma_e(\nu_s)$	$2.4 \times 10^{-20} \text{ m}^2$	k_{ST}	$1.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
$\sigma_T(\nu_s)$	$0.48 \times 10^{-20} \text{ m}^2$	α	300dB/km
a	$5.0 \times 10^{-4} \text{ m}$	n_1	1.49
b	$2.5 \times 10^{-4} \text{ m}$	n_2	1.38
λ_s	590nm	d_1/R_0	0.5
λ_p	532nm	d_2/R_0	0.7
R_0	$4.0 \times 10^{-4} \text{ m}$	r_0	$0.8 \times 10^{-4} \text{ m}$

图 11 是矩形结构 POFA 的增益随时间变化曲线,由于有机染料三重态的吸收,信号增益逐渐衰减最终趋于稳定. 由于实际交叉系数 k_{ST} 较小,令 $\tau_a = \sigma_e/\sigma_T k_{ST}$,从最大增益到稳定状态的时间大约是几百 ns,如果泵浦光是脉冲激光,脉冲宽度较窄(几个 ns),则这段时间内增益变化很小,接近最大增益. 所以,若泵浦光脉冲宽度很窄($\tau \ll \tau_a$)时,三重态的吸收可以忽略,即 $n_T = 0$. 再计算 POFA 的增益随时间变化曲线,增益在 1 ns 内就趋向稳定,因此,可以用 $n_T = 0$ 时的稳态速率方程来描述泵浦光脉冲时间较短时的 POFA 的增益特性. 而泵浦光脉冲宽度 $\tau \gg \tau_a$ 时,达到真正的稳态,因此,POFA 的增益

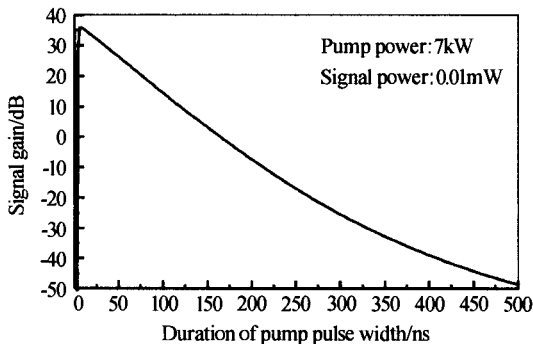


图 11 矩形双包层光纤放大器信号增益与泵浦脉冲宽度的关系
Fig. 11 Signal gain against the duration of pump pulse for rectangle double-clad fiber amplifiers

$$A = A_0 + (A_0 - A_\infty) \exp(-\tau/\tau_a) \quad (28)$$

A_0 为 $n_T = 0$ 时的稳态增益, A_∞ 为 $n_T \neq 0$ 时的稳态

增益, τ 为泵浦光脉冲宽度. 因此只需要讨论 $n_T = 0$ 和 $n_T \neq 0$ 的稳态增益即可. 下面讨论的 POFA 结构为矩形,罗丹明 B 浓度为 1 ppm. 脉冲短时,只需讨论 $n_T = 0$ 的情况. 图 12 给出了 $n_T = 0$ 时不同结构的 POFA 信号增益与光纤长度的关系,0.01 mW 的信号光在 7 kW 的泵浦光功率作用下,1.0 m 矩形结构的 POFA 增益为 39 dB,是最大的;D 形 POFA 次之,为 35 dB;同心圆和偏心圆结构的 POFA 增益较小. 矩形结构 POFA 增益性能是最佳的. 图 13 是矩形结构的 POFA 在不同罗丹明 B 浓度时的增益,可见罗丹明 B 浓度大于 2 ppm 以后,增益基本与浓度无关,罗丹明 B 浓度不宜大于 2 ppm. 由于在制作掺罗丹明 B 聚合物光纤时,罗丹明 B 容易分解^[9],因此实际罗丹明 B 的掺杂浓度为 10 ppm 或更高.

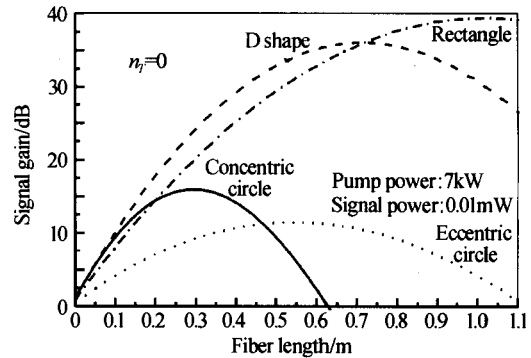


图 12 不同结构 POFA 信号增益与光纤长度的关系
Fig. 12 Signal gain against fiber length for different double-clad fibers

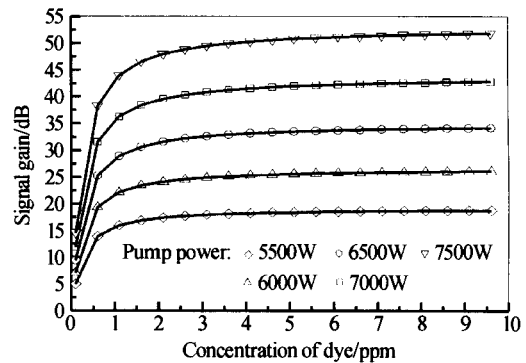


图 13 矩形结构双包层光纤放大器信号增益与掺 RB 浓度之间的关系
Fig. 13 Signal gain versus concentration of dye for rectangle double-clad fiber amplifiers

图 14 表示信号增益与输入信号功率之间的关系,在 7.5 kW 泵浦光作用下,信号饱和输出功率为 1898.95 W.

图 15 是 POFA 的增益谱特性,这是利用 RB 的吸收和发射截面^[9]得到的,由图可见在波长 581 nm ~ 591 nm 之间有 10 nm 的平坦增益区间.

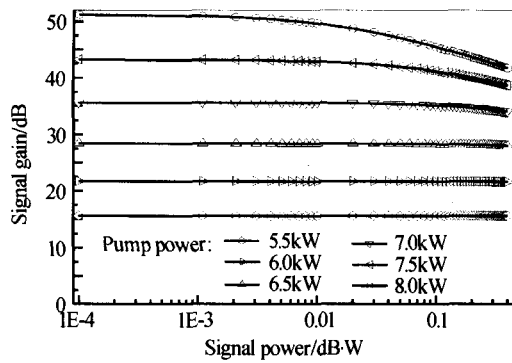


图 14 矩形结构双包层光纤放大器信号增益与输入信号功率之间的关系

Fig. 14 Signal gain versus input signal power for rectangle double-clad fiber amplifiers

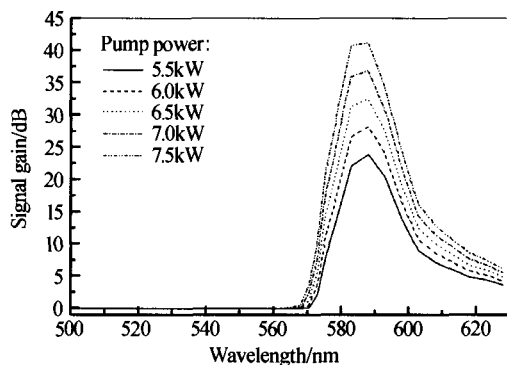


图 15 矩形结构双包层光纤放大器信号增益谱

Fig. 15 Signal gain spectrum for rectangle double-clad fiber amplifiers

综上所述,双包层 POFA 的最佳设计方案如下:罗丹明 B 浓度为 1-2 ppm,内包层为矩形,7 kW 泵浦功率,脉冲宽度几个 ns,POFA 的最佳长度为 1 m,在很宽的输入信号功率范围内,信号增益约为 40 dB.

5 结论

在考虑了染料分子三重态以及双包层的影响后,得到的速率方程和功率传输方程能够比较全面的描述 POFA 的增益特性,应用这个模型可以得到 POFA 的增益谱特性、最佳长度、饱和输出功率等性

能指标,为设计研制性能优良的掺染料聚合物光纤放大器提供了理论基础.模型进一步改进,还可以预测放大器的噪声特性.

参考文献

- 1 张宁,于荣金.一种用于塑料光纤接入网的多优先级控制协议设计.光子学报,2003,32(10):1192~1195
Zhang N, Yu R J. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(10): 1192~1195
- 2 于荣金.塑料通信光纤.光电子·激光,2002,13(3):315~320
Yu R J. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(3): 315~320
- 3 Peng G D, Chu P L, Xiong Z, et al. Broadband tunable optical amplification in Rhodamine B-doped step-index polymer optical fibre. *Opt Com*, 1996, 129(5): 353~357
- 4 Yamamoto T, Fujii K, Teramoto S, et al. High-power polymer optical fiber amplifier and their applications. *Proc SPIE*, 1994, 2289: 142~152
- 5 Li Bingxin, Yu Rongjin, Shi Hongyin, et al. Cladding pumping organic dye-doped polymer optical fiber amplifiers. *Proc SPIE*, 2001, 4581: 158~163
- 6 张国威.可调谐激光技术.北京:国防工业出版社,2002.21~22
Zhang G W. *Tunable Lasers*. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 21~22
- 7 A. W. 斯奈德, J. D. 洛夫. 周幼威, 林志瑗, 姚慧海等译. 光波导理论. 北京:人民邮电出版社,1991.458
Synder A W, Love J D. Interpretated by Zhou Youwei, Lin Zhiyuan, Yao Huihai, et al. *Optical Waveguide Theory*. Beijing: People's posts and Telecommunications Press, 1991. 458
- 8 曾谨严.量子力学(卷 I),北京:科学出版社,1990.473
Zeng J Y. *Quantum Mechanics (Volume I)*. Beijing: Science Press, 1990. 473
- 9 Tagaya A, Teramoto S, Yamamoto T, et al. Theoretical and experimental investigation of Rhodamine B-doped polymer optical fiber amplifier. *IEEE J Quant Electron*, 1995, 31(12): 2215~2219

The Gain Performance of a Double-clad Dye-doped Polymer Optical Fiber Amplifier

Li Bingxin, Yu Rongjin

College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004

Received date: 2004-07-09

Abstract Double-clad polymer optical fiber amplifiers (POFA) have lower dyes bleaching. A numerical model for characterizing double-clad dye-doped polymer optical fiber amplifiers is proposed. Based on rate equation and the pump power propagation equation in a double-clad dye-doped polymer fiber, the models take into account both the influences of the ternary state of dye molecule on rate equation and double-clad scheme on pump light absorption. The model is capable to predict amplifier gain, output spectrum and gain saturation when the POFA is in a steady state. The numerical simulation result shows the Double-clad POFA can achieve a gain of 39 dB when pumping power is 7 kW.

Keywords Polymer optical fiber amplifiers; Gain; Dye; Double-clad



Li Bingxin was born in 1968 and received his B. S. degree from the Department of Physics, Nankai University in 1990. He is currently working towards the Ph. D. degree in the College of Information Science and Engineering, Yanshan University. Now his main research interests are polymer optical fiber and polymer microstructured optical fiber.