

文章编号: 100123806(2007)03202742-03

双包层光纤激光器速率方程的解析求解问题

段志春^{1,2}, 陈建国^{*}, 张利平¹, 周鼎富³, 杨泽后³

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064 2 宜宾学院 物理与电子信息系, 宜宾 644007, 3 西南技术物理所, 成都 610041)

摘要: 为了求得用于研究双包层光纤激光器输出特性的更为精确的解析解, 根据稳态速率方程组, 针对典型的双包层光纤激光器参量, 在估计了上能级粒子再发射项和抽运光产生的影响后, 采用保留再发射贡献主导部分的办法以提高可积分近似方程的精确度, 明确地提出了要获得光纤激光器输出功率的解析表达式的关键在于求出损耗系数与光场乘积的积分值, 简洁地求得了输出功率和抽运光斜线效率的显函数解析表达式, 并对其相关问题进行了讨论, 以 915nm, 920nm 和 975nm 的抽运光为例, 当输出激光为 1090nm 时, 得出 975nm 抽运光产生的斜率效率最高并可高达约 87%。结果表明, 所得解析解适用于研究腔长范围更广的光纤激光器的输出特性。

关键词: 激光器; 解析解; 速率方程组; 双包层光纤; 再发射

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Solution to rate equations of a double-clad fiber laser

DUAN Zhichun^{1,2}, CHEN Jianguo¹, ZHANG Liping¹, ZHOU Dingfu³, YANG Zehou³

(1. School of Electronics and Information Engineering Sichuan University, Chengdu 610064, China 2. Department of Physical and Electronic Information, Yibin University, Yibin 644007, China 3. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract In order to obtain more exact analytical solution to study the output characteristics of double-clad fiber lasers according to the continuous-wave rate equations of fiber lasers, using typical parameters of double-clad fiber lasers (DCFLs), the contribution of the reemission effect arising from the interaction between the upper-level atoms and pump light was estimated. Taking into account the predominant part of the reemission to improve the accuracy of the integration approximated rate equations, the integration of the product of the loss and radiation should be found and explicit analytical expressions for the output of the DCFLs and gradient efficiency of the pump radiation were deduced, and certain issues of concern were discussed. As an example, for laser wavelength 1090nm, if the pump wavelength is 915nm, 920nm, and 975nm, respectively, the gradient efficiency of 975nm is the maximum and it is about 87%. The result shows that the analytical solutions are fit to investigate the output characteristics of fiber lasers extending the application range.

Key words lasers; analytical solutions; rate equations; double-clad fiber; reemission

引 言

目前, 对掺杂光纤激光器进行的理论分析大多是围绕速率方程来展开的^[1-9]。由于运用解析解分析光纤激光器的输出特性相对数值解具有一些明显的优点, 人们便尝试在各种合理近似下, 解析求解速率方程组。在忽略激光损耗系数 A_c 的条件下, 人们得到了下列两种情况的解析解: (1) 忽略抽运光损耗系数 A_p ^[5], 一般适用于单包层激光器件; (2) 忽略上能级粒子与

抽运光相互作用的再发射项^[6,7], 较适合于抽运光损耗系数较大的长腔双包层器件。

KELSON 等人^[6]在抽运光方程中忽略了上能级粒子再发射项, 却在粒子数方程中又保留了再发射项所造成的上能级粒子数的减少作用, 这种做法在逻辑上是值得商榷的。此外, 在有些短腔激光器中, 有可能再发射造成的抽运光增益虽然小于损耗系数 A_p , 却未远远小于的地步; 也可能会有再发射项明显大于 A_p 的情况, 这时, 完全舍去再发射项就显得有些不妥了。

在本文中, 作者保留再发射项的主导部分, 只忽略更高阶小量以提高可积分近似方程的精度, 以极其简洁的方式对双包层光纤激光器 (double-clad fiber laser, DCFLs) 进行了求解, 并对所解得的输出激光功率和斜线效率进行了数值分析。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60578013)

作者简介: 段志春 (1972), 女, 讲师, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器和半导体激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: Optics_lab@163.com

收稿日期: 2007-02-04; 收到修改稿日期: 2007-03-07

1 速率方程组求解

对于在稳态下的端面单向抽运情况, 掺 Yb^{3+} 的 DCFLs 速率方程组可写为^[8]:

$$dP_p(z)/dz = [<_p N(z) - W_p N_0] P_p(z) - A_p P_p(z) \tag{1a}$$

$$dP_s^+(z)/dz = [<_s N(z) - W_s N_0] P_s^+(z) - A_s P_s^+(z) \tag{1b}$$

$$N(z)/S = [W_p N_0 - <_p N(z)] P_p(z) / hA M + [W_s N_0 - <_s N(z)] [P_s^+(z) + P_s^-(z)] / hA M \tag{1c}$$

式中, P_p 和 P_s 分别代表抽运光和激光的功率, 上标 $+$ 和 $-$ 分别表示光线沿 $+z$ 和 $-z$ 方向传输, 下标 s 和 p 分别表示所限定为激光和抽运光的参量, N_0 表示掺杂浓度, N 为激光上能级粒子数密度, S 为上能级粒子寿命, h 为普朗克常量, M 和 M 分别为激光和抽运光的频率, A 为纤心面积, 定义参量 $<_j = \#_j (R_{aj} + R_{ej})$, $W_j = \#_j R_{aj}$ ($j = s, p$), 其中, R_a 和 R_e 分别表示介质的吸收截面和发射截面, $\#$ 为光束与纤芯的交迭因子。

两点说明: (1) 由 1c 式可以求出 $N(z) N_0$, 从而可得到多数文献采中用的形式^[5-9]; (2) 双向抽运的情况下, 下边的推导同样适用。

将 (1a) 式, (1b) 式和 (1c) 式相加可得:

$$N/S + (dP_p/dz)/hA M + (dP_s^+/dz - dP_s^-/dz)/hA M - A_p P_p/hA M - A_s (P_s^+ + P_s^-)/hA M = 0 \tag{2}$$

(2) 式表明了抽运光的消耗用于使激光增长以及维持上能级粒子数这一事实。

对于长度为 L , 两端反射系数分别为 r_1 和 r_2 的光纤激光器来说, 边界条件为:

$$P_s^+(L) r_2^2 = P_s^-(L), P_s^-(0) r_1^2 = P_s^+(0) \tag{3a}$$

$$P_p(0) = P_{in} \tag{3b}$$

式中, P_{in} 为输入端 ($z=0$) 光纤内的抽运光功率。由 (1b) 式中分别沿 $+z$ 和 $-z$ 方向传输激光功率满足的两个式子不难证明, $[P_s^+(z)P_s^-(z)]$ 是 1 个与 z 无关的常数, 在本文中记作 C^2 。于是, 边界条件可以写为: $P_s^+(L) = C/r_2, P_s^-(0) = Cr_1, P_s^-(L) = Cr_2, P_s^+(0) = C/r_1$ 。

(1b) 式中关于 $P_s^+(z)$ 的方程两边除以 $P_s^+(z)$, 完成积分并利用边界条件可得上能级粒子数的平均值:

$$\bar{N} = \left[\int_0^L N(z) dz \right] / L = g_{th} / <_s \tag{4}$$

$$g_{th} = - \ln(r_1 r_2) / L + W N_0 + A_s \tag{5}$$

计及 (3) 式, 对 (1a) 式作同样的处理可得:

$$P_p(L) / P_{in} S Q = \exp(-C_p L) \tag{6}$$

式中,

$$C_p = A_p + W N_0 - (<_p / <_s) g_{th} \tag{7}$$

由 (6) 式可见, $(1-Q)$ 表征了抽运光的利用效率。

观察 (2) 式, 其左端是可积的。一般情况下, 参量 A_s 相对较小可忽略, 因而对于 (2) 式右端只需求 $A_p P_p$ 的积分。由此, 可得:

$$g_{th} L / S <_s - P_{in} [1 - Q] / hA M + KC / hA M = - \left[\int_0^L Q A_p P_p dz \right] / hA M \tag{8}$$

$$K = (1 - r_1 r_2) (r_1 + r_2) / (r_1 r_2) \tag{9}$$

至今, 前人对 (8) 式右端积分采用了两种近似处理方法: 一是忽略 A_p ^[5]; 二是忽略 (1a) 式右端的 N , 从而使 P_p 直接可积^[6, 7]。

对于典型的 DCFLs 当 $r_1^2 r_2^2 U 0.04$ ^[6] 时, (5) 式中仅腔镜损耗一项约为 7dB 何况还有可观的激光再吸收问题 (第 2 项)。由于 $\#_p$ 比 $\#_s$ 小 2 个, 3 个数量级, ($<_p / <_s$) 通常只有千分之几^[6], 对长度 $L = 100\text{m}$ 的光纤激光器而言, (1a) 式中再发射项提供的增益约每千米零点几分贝, 当光纤长度为 10m 时, 则上升到约每千米几个分贝, 在光纤长度短于 1m 后, 再发射的贡献可超过约每千米几十分贝的水平。由此可以看到, 在单包层器件中, A_p 可以舍去; 对双包层器件来说, 若光纤长度不太短, 则再发射项可以舍去。

鉴于上述分析, 对于不太长的双包层光纤, 可能会出现上能级粒子再发射的贡献虽小于却未远远小于 A_p 的情况。此时, 可把 N 写成 $(\bar{N} + n)$ (n 是粒子数对平均值的偏离的更高阶小量)^[7], 舍去 n , 这样导出的结果应该比文献 [6], 文献 [7] 中完全舍去 N 更精确, 而且, 它可同时适用于长腔和短腔的光纤激光器。于是 (1a) 式变为 $dP_p(z)/dz = (<_p \bar{N} - W_p N_0 - A_p) P_p(z)$, 对此式作两次积分并代入 (8) 式可得:

$$C = (hA M / K) @ [P_{in} (1 - Q) (1 - A_p / C_p) / hA M - g_{th} L / (<_s S)] \tag{10}$$

至此, 导出了精度提高后的 DCFLs 中参量 C 的近似解析解式。求得了 C 与 P_{in} 的关系后, 就可以根据边界条件得到激光器输出功率的解析表达式。在具体讨论之前, 补充说明一点, 由于所有近似都是在忽略 A_s 的情况下得到的, 故在下列计算中把 (5) 式中的 A_s 取作 0。

2 分析与讨论

2.1 输出激光功率

将 (10) 式代入 $P_{out}^+ = P_s^+(L) (1 - r_2^2) = (1 - r_2^2) C / r_2$, 可得激光输出功率 P_{out}^+ 为:

$$P_{out}^+ = M r_1 (1 - r_2^2) [P_{in} (1 - Q) (1 - A_p / C_p) / M - hA g_{th} L / (<_s S)] / [(1 - r_1 r_2) (r_1 + r_2)] \tag{11}$$

上式可见, P_{out}^+ 随 $(1-Q)$, M 以及 P_{in} 的增大而增大。图 1 中给出了不同光功率下的 975nm 抽运波长在输

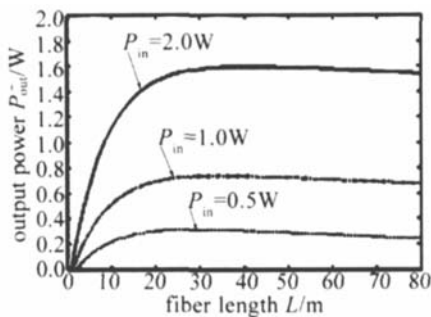


Fig 1 Output power P_{out}^+ versus fiber length L

出激光波长为 1090nm 情况下的 P_{out}^+ 与 L 的关系。计算的参数为^[6,10]: $K_p = 975\text{nm}$ ($R_{ap} = 25 @ 10^{-25}\text{m}^2$, $R_{ep} = 25 @ 10^{-25}\text{m}^2$), $K_s = 1090\text{nm}$ ($R_{as} = 1.4 @ 10^{-27}\text{m}^2$, $R_{es} = 2 @ 10^{-25}\text{m}^2$), $N_0 = 4 @ 10^{25}\text{m}^{-3}$, $s = 0.82$, $p = 0.0012$, $r_1 = 0.98^{1/2}$, $r_2 = 0.2$, $A_p = 3 @ 10^{-3}\text{m}^{-1}$, $h = 6.626 @ 10^{-34}\text{J}$, $S = 1 @ 10^{-3}\text{s}$, $A = 5 @ 10^{-11}\text{m}^2$ 。图 1 表明,在抽运功率固定时,激光器的长度有一个最佳值 L_{opt} (根据 $dC/dL = 0$ 可求得其函数表达式)可以获得最大的激光输出功率。光纤偏短,抽运光无法充分利用;光纤过长,光纤远离抽运的地方因抽运下降而不能获得足够的增益,这两种情况都可能导致输出功率下降。

2.2 输出功率对抽运功率的斜线效率

根据 (11) 式,可导出输出功率对抽运功率的斜线效率为:

$$\frac{dP_{out}^+}{dP_{in}} = r_1(1 - r_2) \left(\frac{K_p}{K_s} \right) \left(\frac{1 - Q}{1 - A_p/C_p} \right) / \left[(1 - r_1 r_2) (r_1 + r_2) \right] \quad (12)$$

从 (12) 式可以看出,斜线效率与 $(1 - Q)$ 及 K_p 成正比。图 2 中给出了斜线效率与 L 的关系。计算的参数

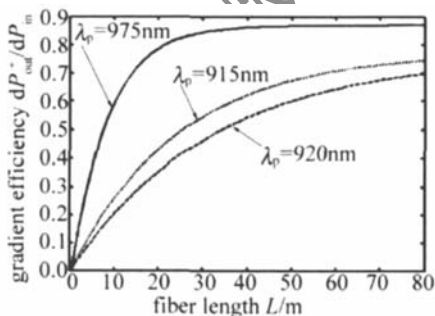


Fig 2 Gradient efficiency dP_{out}^+/dP_{in} versus fiber length L

为^[6,10]: $K_p = 915\text{nm}$ ($R_{ap} = 8 @ 10^{-25}\text{m}^2$, $R_{ep} = 1.1 @ 10^{-27}\text{m}^2$), $K_p = 920\text{nm}$ ($R_{ap} = 6 @ 10^{-25}\text{m}^2$, $R_{ep} = 0.25 @$

10^{-25}m^2), 其它参数同图 1。图 2 中, L 一定时, 975nm 抽运光的斜线效率最大, 在 L 到 20m 之前急剧上升, 20m~40m 缓慢上升, 40m 后几乎保持恒定值约为 87%。

3 结 论

从稳态速率方程组出发,通过简短分析,明确了求解参量 C 的解析表达式的关键是要找到 $A_p P_p$ 和 $A_s(P_s^+ + P_s^-)$ 的积分值。由于一般情况下参量 A_s 相对较小,在解析求解时可以忽略它,因而只需求解 $A_p P_p$ 的积分值就可以了。由此,在保留再发射贡献主体部分的情况下,求解了掺 Yb^{3+} DCFLs 激光输出功率的显函数解析表达式,导出了输出功率对抽运功率的斜线效率。讨论分析结果表明,本文中所得解析解适于分析腔长范围更广的 DCFLs 有利于在实验中优化设计稳定性较高的具有最大输出激光功率的 DCFLs。

参 考 文 献

- [1] WANG F, PAN W, LUO B et al Performance analysis of multi-wavelength Yb-doped double-clad fiber lasers [J]. Laser Technology 2005, 29(5): 497~500 (in Chinese).
- [2] XIA J Z, QU R H, CAI H W et al Studies on relaxation oscillation characteristics of fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers 2004, 31(7): 807~810 (in Chinese).
- [3] WU Z L, CHEN G F, WANG X H et al Numerical analysis of Yb³⁺ doped double-clad fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica 2002, 31(2): 332~335 (in Chinese).
- [4] WANG F, PAN W, LUO B et al Influence of the typical parameters on slope efficiency of Yb-doped double-clad fiber lasers [J]. High Power Laser and Particle Beams 2004, 16(12): 1509~1512 (in Chinese).
- [5] CHEN J G, ZHU X, SIBBETT W. Rate equation studies of erbium-doped fiber lasers with common pump and laser energy bands [J]. Journal of the Optical Society of America 1992, B9(10): 1876~1882.
- [6] KELSON J, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE JQE 1998, 34(9): 1570~1577.
- [7] XIAO L M, YAN P, GONG M L et al An approximate analytic solution of strongly pumped Yb-doped double-clad fiber lasers without neglecting the scattering loss [J]. Opt Commun 2004, 230: 401~410.
- [8] WANG Y, XU Ch Q, PO H. Thermal effects in kilowatt fiber lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2004, 16(1): 63~65.
- [9] KELSON J, HARDY A. Optimization of strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology 1999, 17(5): 891~897.
- [10] NILSSON J, CLARKSON W A, SELVAS R et al High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers [J]. Optical Fiber Technology 2004, 10(1): 5~30.