

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0001-04

# 基于 Giles 模型的超荧光光源功率输出特性 仿真研究

常 存 杨九如 叶红安

(黑龙江大学电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 传统的超荧光光源理论分析方法存在着复杂度高、稳定性差等缺点。相反,掺铒光纤放大器的理论研究方法——Giles 模型则具有复杂度高、稳定性好、收敛速度快的优点。考虑到二者在结构上的相似性,将 Giles 模型引入到铒光纤超荧光光源的理论研究中,并利用 4~5 阶龙格-库塔法对单程正向抽运结构超荧光光源输出功率随铒光纤长度、铒离子浓度和抽运功率的变化关系进行了仿真研究。数值结果表明,使用 Giles 模型不但可以精确描述超荧光光源的功率输出特性,而且仿真算法的复杂度得以大大降低,进一步提高了超荧光光源理论分析方法的实用性。

**关键词** 超荧光光源; Giles 模型; 数值模拟; 输出功率

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0001

## Research by Simulation on the Output Power Characteristic of Superfluorescent Source Based Giles Model

Chang Cun Yang Jiuru Ye Hongan

(School of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** In the theoretic research of the superfluorescent source (SFS), the classic methods have some drawbacks such as high complexity and low stability. Comparatively, due to low complexity, good stability and quick convergence, the Giles model is widely applied into the theoretic research of the erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs). Considering the similar structure of them, the Giles model is first introduced into the research of the SFS. Then, by using the four/five-order Runge-Kutta method, the curves of output power of the SFS with the single-pass forward configuration are obtained with the changes of the length of EDF, the density of  $\text{Er}^{3+}$  ion and the pump power. And the numerical results shows that, by using Giles model, not only the characteristics of output power of the SFS is figured out accurately, but the complexity of the simulation algorithm is reduced greatly, which improves the practicability of the theoretic research method of the SFS.

**Key words** superfluorescent source; Giles model; numerical simulation; output power

### 1 引 言

在超荧光(SF)光源的实际应用中,常常会因为抽运源和铒光纤之间的参数失配而导致光源输出功效的降低<sup>[1]</sup>;相反,如果在实际连接之前,借助理论计算来模拟光源设备的输出特性,则可以方便、快速地确定光源工作参数<sup>[2]</sup>。因此,超荧光光源的理论模拟及虚拟化研究成为近年来国内外学者关注的新热点<sup>[3~7]</sup>。目前,大多数的 SF 光源模拟研究工作均是以 Wysocki 模型作为理论基础,但基于“光谱细化”原则的 Wysocki 模型却存在着仿真算法过于复

杂、稳定性差的缺陷<sup>[3~5]</sup>。部分学者开展了有关算法稳定性改进方面的工作,但收效甚微<sup>[6,7]</sup>。另一方面,作为掺铒光纤放大器(EDFA)输出特性理论研究中的主要分析方法,Giles 模型则具有边值条件简单,算法稳定性好,收敛速度快的优点<sup>[8~10]</sup>。考虑到 SF 光源与 EDFA 器件在结构上的相似性,本文将 Giles 模型首次引入到铒光纤超荧光光源功率输出特性的理论研究中,以实现简化运算,提高模拟算法稳定性的目的。

**基金项目**: 黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室项目(DZZD2006-22)资助课题。

**作者简介**: 常 存(1966—),男,硕士,副教授,主要从事激光技术和物理检测方面的研究。E-mail: totti9555@163.com

## 2 理论分析模型

Giles 模型认为:当抽运功率  $P_p \leq 1$  W 时,对于 980 nm/1480 nm 抽运的 EDF 器件均可采用二能级模型来近似描述<sup>[8,9]</sup>。在稳定工作条件下,其对应的光场传播方程为

$$\begin{aligned} \frac{dP_s}{dz} &= (a_s + g_s) \frac{n_2}{n_0} P_s(z) \pm g_s \frac{n_2}{n_0} m h \nu_s \Delta \nu_s \mp \\ & (a_s + \gamma) P_s(z), \\ \frac{dP_p}{dz} &= (a_p + g_p) \frac{n_2}{n_0} P_s(z) \pm g_p \frac{n_2}{n_0} m h \nu_p \Delta \nu_p \mp \\ & (a_p + \gamma) P_p(z), \\ \frac{dP_a}{dz} &= (a_a + g_a) \frac{n_2}{n_0} P_a(z) \pm g_a \frac{n_2}{n_0} m h \nu_a \Delta \nu_a \mp \\ & (a_a + \gamma) P_a(z), \end{aligned} \quad (1)$$

$$n_2 = \frac{\sum_k \frac{a_k}{a_k + g_k} \frac{P_k(z)}{P_k^{\text{sat}}}}{1 + \sum_k \frac{P_k(z)}{P_k^{\text{sat}}}} n_0, \quad (2)$$

式中  $P_s, P_p$  和  $P_a$  分别为信号光、抽运和自发辐射的功率;对应地,  $a_s, a_p$  和  $a_a$  分别表示信号光、抽运和自发辐射的吸收率;  $g_s, g_a$  和  $g_p$  则分别为信号光、抽运和自发辐射的发射系数;  $\Delta \nu$  为自发辐射等效带宽;  $\gamma$  为铒光纤本征损耗;  $n_0$  为总粒子浓度,  $n_1$  为基态粒子浓度,  $n_2$  是亚能级粒子浓度,且  $n_0 = n_1 + n_2$ ;  $m$  为纤芯所支持的空间导模与偏振导模,对于单模光纤  $m = 2$ ;  $P_k^{\text{sat}}$  为频率  $\nu_k$  处所对应的归一化本征饱和功率,它与纤芯  $b$  及亚稳态能级寿命  $\tau$  有关;  $\pm$  符号分别对应于正、反向传输状态。然而,在铒光纤超荧光光源中,由于  $P_s$  和  $g_p$  均可视为零值,因此对于单程正向抽运结构而言,上述 Giles 模型相应变为

$$\frac{dP_p}{dz} = \left[ -a_p \left( 1 - \frac{n_2}{n_0} \right) - \gamma \right] P_p, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_a}{dz} &= (a_a + g_a) \frac{n_2}{n_0} P_a(z) + 2g_a \frac{n_2}{n_0} h \nu_a \Delta \nu_a - \\ & (a_a + \gamma) P_a(z), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{n_2}{n_0} = \frac{\frac{P_p}{P_p^{\text{sat}}} + \frac{a_a}{a_a + g_a} \frac{P_a}{P_a^{\text{sat}}}}{1 + \frac{P_p}{P_p^{\text{sat}}} + \frac{P_a}{P_a^{\text{sat}}}}. \quad (5)$$

为获得有关超荧光光源输出功率  $P_a$  的数值模拟结果,需对(3)和(4)式所示的二元 Giles 模型进一步简化。整理(3)式可得

$$\frac{n_2}{n_0} = \frac{dP_p}{a_p P_p dz} + \frac{\gamma + a_p}{a_p}, \quad (6)$$

联立(4)和(6)式,则光源输出功率  $P_a$  与抽运功率  $P_p$  的关系表达式为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{(a_a + g_a) P_a + 2g_a h \nu_a \Delta \nu_a} \frac{dP_a}{dz} + \\ & \frac{(a_a + \gamma) P_a}{(a_a + g_a) P_a + 2g_a h \nu_a \Delta \nu_a} = \frac{1}{a_p P_p} \frac{dP_p}{dz} + \frac{\gamma + a_p}{a_p}, \end{aligned} \quad (7)$$

考虑到  $2g_a h \nu_a \Delta \nu_a$  这一项的值很小,因此(7)式可进一步简化为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{(a_a + g_a) \left( P_a + \frac{2g_a h \nu_a \Delta \nu_a}{a_a + g_a} \right)} \frac{dP_a}{dz} + \frac{(a_a + \gamma) P_a}{(a_a + g_a) P_a} = \\ & \frac{1}{a_p P_p} \frac{dP_p}{dz} + \frac{\gamma + a_p}{a_p}, \end{aligned} \quad (8)$$

进而,对(8)式积分并在方程两端同取  $e$  指数可得

$$\begin{aligned} P_p &= P_0 \cdot e^{-\frac{(\gamma + a_p)(g_a + a_a) - a_p(a_a + \gamma)}{a_a + g_a} z} \times \\ & \left[ \frac{(a_a + g_a) P_a}{2g_a h \nu_a \Delta \nu_a} + 1 \right]^{\frac{a_p}{a_a + g_a}}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $P_0$  为初始抽运功率。显然,将(9)和(5)式代入到(4)式中,即可得到自发辐射功率  $P_a$  与铒光纤长度  $z$  的一阶常微分方程。与采用 Wysocki 模型<sup>[4~7]</sup>相比,由于所得常微分方程的边值条件简单,无需细化光谱,因此基于二元 Giles 模型的超荧光光源的功率输出数值模拟过程将被大大简化。

## 3 超荧光光源功率输出特性仿真研究

“龙格-库塔法”是常微分方程的初值问题求解过程中的典型方法,它具有数值精度高,计算复杂度低,收敛速度快等优点,本文采用 4~5 阶龙格-库塔法对上述有关  $P_a$  的一阶线性微分方程进行求解,以验证基于 Giles 模型所获得的超荧光光源速率方程在功率输出特性方面的精确性。仿真研究以 DF1500F-980 型铒光纤作为放大媒质,其主要特性参数为:  $\text{NA} = 0.22$ ,  $n_0 = 5.9 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ,  $\omega_s = 2.95 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$ ,  $\omega_p = 1.75 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$ ,  $\lambda_c = 900 \sim 970 \text{ nm}$ ,  $\tau = 10 \text{ ms}$ ,  $\sigma_p = 2.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2$  (抽运光吸收截面),  $b = 1.6 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $\gamma = 5.68 \text{ dB/km}$ ,  $\Delta \nu = 50 \times 10^{11} \text{ GHz}$  (设自发辐射荧光谱为 40 nm,信道带宽 100 GHz)<sup>[10]</sup>。于是,基于改进的 Giles 模型,对掺铒光纤长度、铒离子浓度以及抽运光强度三者对超荧光光源在功率输出特性方面的影响进行仿真研究。

### 3.1 掺铒光纤长度对超荧光光源输出功率的影响

首先,取定掺铒光纤的长度  $L = 20 \text{ m}$ ,则当  $P_p = 100 \text{ mW}$ ,  $n_0 = 5.9 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  时,超荧光光源在铒光纤内部的输出功率分布特性如图 1 所示。由图 1 可知,沿铒光纤纵轴方向,光源的输出功率值先

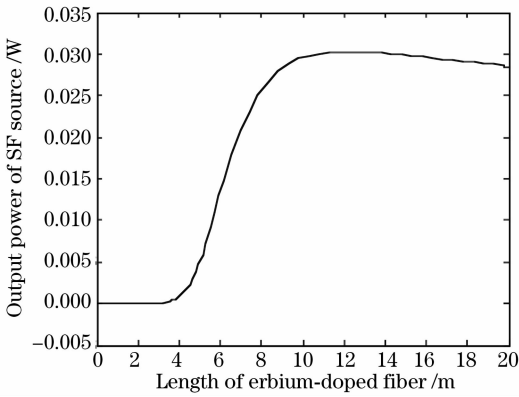


图1 固定铒光纤长度 SF 光源输出功率分布曲线  
Fig.1 Curve of output power of SF source in the fixed erbium-doped fiber length

迅速增加,在达到一个最大值后又开始缓慢减小。这表明,当  $L < 10$  m 时,抽运光的能量不能够完全被铒光纤吸收;当  $L = 10$  m 时,超荧光功率输出达到峰值,亦即最佳铒光纤长度为 10 m;当  $L > 10$  m 时,铒光纤的内部损耗大于增益,导致光源的输出功率降低。在数值上,  $L = 10$  m 时,  $P_a = 0.031$  W;而当  $L = 20$  m 时,  $P_a \approx 0.028$  W,光源转换效率略有降低。上述仿真结果与实际测量结果具有高度一致性<sup>[11]</sup>。

进一步,最佳铒光纤长度 ( $L_{opt} = 10$  m) 下光源的功率输出特性如图 2 所示。与图 1 相比,图 2 为一类单调曲线,光源的输出功率在输出端口处达到最大。在形状上,图 2 与图 1 的前半部分 ( $L \leq 10$  m) 具有相似性;但在数值上,  $L = 10$  m 处,图 2 中  $P_a$  的值却要明显高于图 1,约为 0.045 W。究其原因是由于铒光纤内部的抽运充分,使得粒子数呈反转分布,且具有极强的相互作用。于是,粒子发光的“个性化”特征逐渐向“共性化”特征转化,单个粒子

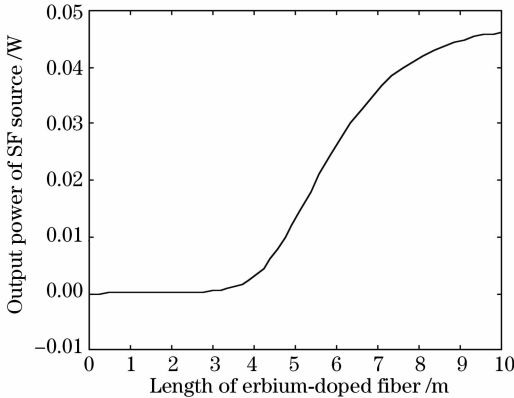


图2 最佳铒光纤长度时 SF 光源输出功率分布曲线  
Fig.2 Curve of output power of SF source in the optimal erbium-doped fiber length

独立的自发辐射逐渐变为多个粒子协调一致的受激辐射,因此使得最佳铒光纤长度时的光源转换效率  $\eta$  得以大大提高。

最后,对不同铒光纤长度条件下,超荧光光源在纤尾所输出的功率值进行了仿真分析。由图 3 可知:1) 超荧光光源的掺铒光纤长度存在一个最佳值,  $n_0 = 5.9 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  时,最佳铒光纤长度约为 10 m;2) 若铒光纤长度取过长,则将导致光源的转换效率迅速下降,  $L \geq 15$  m 时,  $\eta \leq 0.4$ 。

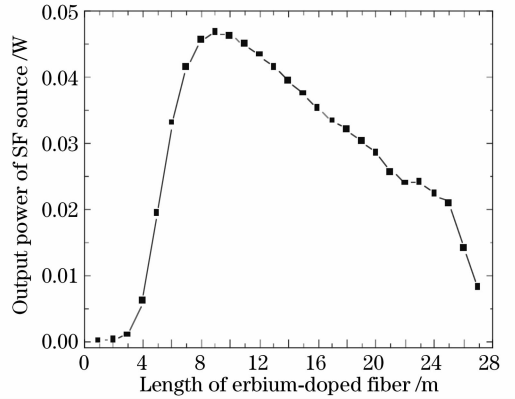


图3 掺铒光纤长度变化时 SF 光源输出功率分布曲线  
Fig.3 Curve of output power of SF source with the change of the erbium-doped fiber length

### 3.2 掺铒光纤浓度及抽运功率对超荧光光源输出功率的影响

设  $P_p = 100$  mW,  $L = 15$  m, 则不同铒离子浓度条件下超荧光光源的功率输出特性如图 4 所示。由图 4 可知:1) 超荧光光源的转换效率随着光纤内部铒离子浓度的增加而减小,  $n_0 = 5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  时,  $\eta \approx 0.42$ ;  $n_0 = 11 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  时,  $\eta \approx 0.2$ 。2) 随着光纤内部铒离子浓度的增加,铒光纤的最佳长度降低,  $n_0 = 5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  时,  $L_{opt} \approx 12$  m;  $n_0 = 11 \times$

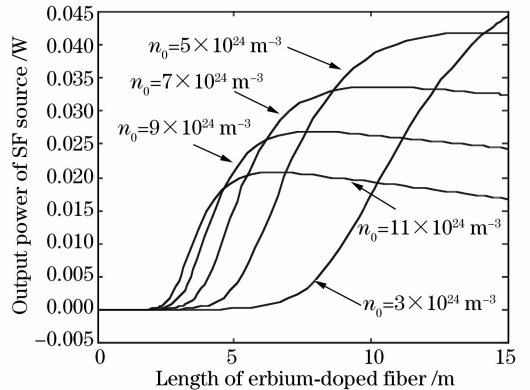


图4 铒离子浓度变化时 SF 光源输出功率分布曲线  
Fig.4 Curves of output power of SF source with the change of the  $\text{Er}^{3+}$  ions density

$10^{24} \text{ m}^{-3}$ 时,  $L_{\text{opt}} = 5 \text{ m}$ 。以上结果表明,对于不同浓度的掺铒光纤,其对应的最佳长度是不同的,浓度越高,粒子的反转分布条件越容易达到,  $L_{\text{opt}}$  的值越小。

进而,取  $L = 13 \text{ m}$ ,  $n_0 = 5.9 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ,则在不同抽运光注入条件下,超荧光光源输出功率分布特性曲线如图 5 所示。数值结果表明:1) 随着抽运功率  $P_p$  的增加,铒光纤的最佳长度逐渐增加,  $P_p = 100 \text{ mW}$ 时,  $L_{\text{opt}} = 10 \text{ m}$ ;当  $P_p$  增加至  $250 \text{ mW}$ 时,  $L_{\text{opt}} \approx 13 \text{ m}$ 。2) 当抽运功率从  $100 \text{ mW}$  增加至  $250 \text{ mW}$ 时,超荧光光源的最佳转换效率基本保持不变,始终在 0.4 附近。这表明,为获得最佳输出,强抽运注入需伴随着更长的铒光纤,但光源的输出效率不会被显著提高,而抽运功率和铒光纤长度的增加只会导致系统成本增加。由此可知,对于一般的实验及工程应用,只需满足功率输出要求即可。

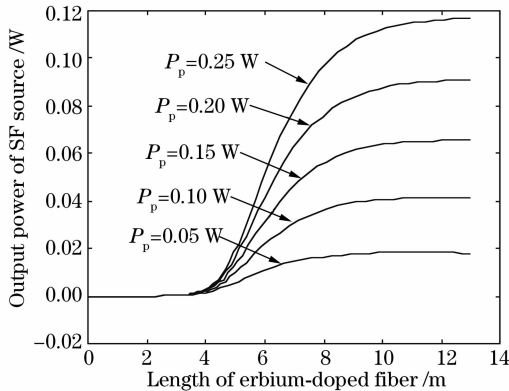


图 5 抽运功率变化时 SF 光源输出功率分布曲线

Fig. 5 Curves of output power of SF source with the change of pumping power

## 4 结 论

为克服 Wysocki 模型的固有缺陷,降低超荧光光源模拟算法的复杂度,本文将改进的 Giles 模型引入超荧光光源功率输出特性的理论研究中。仿真结果表明,采用二元 Giles 模型获得了与 Wysocki 模型极为接近的数值模拟结果。鉴于 Giles 模型极低的复杂度与良好的稳定性,它完全可以作为一种新的数值分析方法应用于超荧光光源的理论研究中,

从而进一步提高超荧光光源理论分析工具的实用性。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Xiulin, Huang Wencai, Ming Hai. Broadband and high stability erbium-doped superfluorescent fiber source [J]. *Laser & Optics Progress*, 2005, **42**(5):32~36  
王秀琳,黄文财,明海. 宽带、高稳定掺铒光纤超荧光光源[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(5):32~36
- 2 P. Wysocki, M. Digonnet. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **17**(3):550~567
- 3 D. Hall, W. Burns. High stability Er-doped superfluorescent fiber sources [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7):1452~1460
- 4 Shen Linfang, Qian Jingren. Theoretical analysis of erbium-doped superfluorescent fiber source in double-pass backward configuration [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2000, **17**(4):345~349  
沈林放,钱景仁. 双程后向结构铒光纤超荧光光源的理论分析[J]. *量子电子学报*, 2000, **17**(4):345~349
- 5 Shen Linfang, Chen Dengpeng. The numerical modeling of erbium-doped superfluorescent fiber source [J]. *Chinese J. Computation Physics*, 2001, **18**(1):56~58  
沈林放,陈登鹏. 掺铒光纤超荧光光源的理论模拟[J]. *计算物理*, 2001, **18**(1):56~58
- 6 Xiao Rui, Feng Ying. Simulation method and improvement of Er-doped fiber source [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2004, **21**(3):360~365  
肖瑞,冯莹. 掺铒光纤光源的模拟算法与改进[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(3):360~365
- 7 Ning Jiping, Zhou Lei, Sun Liangyong *et al.*. Simulation algorithm for C+L band erbium-doped fiber light source [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **43**(7):45~49  
宁继平,周雷,孙良勇等. C+L 波段掺铒光纤光源模拟算法[J]. *光电工程*, 2007, **43**(7):45~49
- 8 C. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **15**(12):271~283
- 9 Qin Zheng, Sun Junqiang, Li Bo. The new solution of the model of L-band erbium-doped amplifiers [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2005, **18**(3):55~57  
秦正,孙军强,李博. 有关 L 波段 EDFA 的模型及其解法[J]. *光电子技术与信息*, 2005, **18**(3):55~57
- 10 Tan Li, Ding Yongkui, Wang Yanyong *et al.*. Theoretical analysis of L-band EDFA by Giles model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2):143~146  
谭丽,丁永奎,王衍勇等. 由 Giles 模型对 L-band EDFA 理论分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2):143~146
- 11 Guo Xiaodong, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. A novel C+L band erbium-doped fiber broadband light source with high power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):609~612  
郭小东,乔学光,贾振安等. 一种高功率掺铒光纤超荧光光源[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):609~612