

文章编号: 0258-7025(2002)09-0773-04

两级串级拉曼全光纤激光器的 数值模拟及分析

迟荣华, 运 鹏, 苏红新, 李乙钢, 吕可诚

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

提要 用双通结构理论对采用光纤光栅做腔镜的两级的串级拉曼激光器进行了数值模拟。在此基础上, 分析了光纤长度、谐振腔损耗及输出镜反射率等因素对两级掺磷全光纤拉曼激光器的输出功率、阈值、斜率效率等输出特性的影响, 并给出了串级拉曼激光器的优化设计参数。

关键词 受激拉曼散射, 双通结构, 数值模拟

中图分类号 O 437.3 ; O 242 ; TN 248.1 **文献标识码** A

Numerical Simulation and Analysis of Two Cascaded Raman Fiber Laser

CHI Rong-hua, YUN Peng, SU Hong-xin, LI Yi-gang, LÜ Ke-cheng

(*Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Abstract The two cascaded Raman fiber laser using fiber Bragg gratings as cavity mirrors was theoretically simulated and analyzed by use of the double pass configuration. The effects of fiber length, excess loss and output reflectivity on the output characteristics of two cascaded Raman fiber laser, such as output power, slope efficiency, and threshold power were studied on basis of numerical simulations, and the optimized parameters were given.

Key words stimulated Raman scattering, double pass configuration, numerical simulation

1 引 言

受激拉曼散射(SRS)是光纤中一种重要的非线性现象。根据 SRS 原理可以制成宽带可调谐的光纤拉曼激光器(RFL),可以制成高功率的单模激光器用于拉曼放大器或 EDFA 的远程抽运。目前光纤拉曼激光器的研究正成为大功率单模激光器的一个研究热点。

但是与传统激光器不同,串级拉曼谐振腔的动力学过程很复杂,因为腔内的受激拉曼散射过程涉及到多级斯托克斯波的产生,而且斯托克斯波又是双向的。本文的模拟思想主要来自文献[1],J. A. Yeung 用双通结构分析了一级的拉曼谐振腔,在忽略抽运光消耗的情况下,求出了解析解。但是一级拉曼腔只涉及一级 Stokes 波,腔内的情况要相对简

单,而且他们使用的是两个透镜构成的拉曼谐振腔,没有考虑透镜的插入损耗和拼接损耗。本文用双通结构对两级的串级拉曼过程建立了耦合方程,在考虑抽运光消耗的情况下对串级拉曼腔进行了数值模拟。而且我们分析的是现在普遍采用的光纤光栅(FBG)对作为腔镜的全光纤拉曼激光器,模拟中同时考虑了作为腔镜的光纤光栅的插入损耗和拼接损耗,这样得出的结论与实际情况更为符合。

2 理论模型

两级掺磷串级拉曼激光器结构如图 1 所示。用掺 P 光纤作为增益介质,腔镜由两对光纤光栅(FBG)构成,中心反射波长分别为 1240 nm 和 1480 nm,反射率接近 100%(>99.9%)。所用的抽运源

收稿日期 2001-07-03;收到修改稿日期 2002-01-21

基金项目 国家自然科学基金(69877006)资助项目。

作者简介 迟荣华(1973—),女,内蒙古大学物理系毕业,现为南开大学在读博士研究生,主要从事光纤激光器及光纤放大器的研究。E-mail: chironghua@eyou.com

为掺镜双包层光纤激光器,输出波长为 1064 nm。通过两级串级拉曼散射,输出波长为 1480 nm 激光。

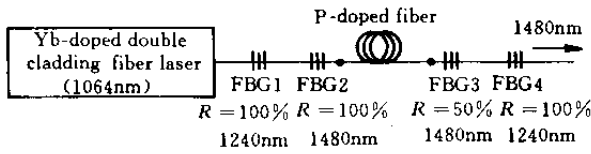


图 1 两级串级拉曼光纤激光器结构

Fig.1 Configuration of two cascades Raman fiber laser

拉曼腔内的过程可以定性描述为:当抽运光功率超过 1 级 Stokes 波阈值时,前后向的 Stokes 波相继产生,它们沿相反方向在光纤中传播,遇到 FBG4 和 FBG1 分别返回(假定反射率为 100%,但是考虑一定的插入损耗和拼接损耗)。当继续增加抽运光功率,超过 2 级 Stokes 波阈值时,就产生 2 级 Stokes 波,假设抽运光到达光纤末端被全部消耗,那么腔内除了正向抽运光外,前后向的 1 级、2 级 Stokes 波分别在各自对应的 FBG 处返回(FBG3 有一定的激光输出)。假设经过一定时间以后,拉曼腔为一稳定谐振腔。

因为考虑双通结构的正反向传播,而且忽略抽运光的反向抽运,所以腔内一共有 5 列波,分别记为: P_p , P_{1f} , P_{1b} , P_{2f} , P_{2b} , 它们分别代表正向传输的抽运光,正反向传输的 1 级 Stokes 波和 2 级 Stokes 波。耦合方程可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{dP_p}{dz} &= -\frac{g_1 \nu_p}{A_1 \nu_1} P_p (P_{1f} + P_{1b}) - \alpha_p P_p \\ \frac{dP_{1f}}{dz} &= \frac{g_1}{A_1} P_p P_{1f} - \frac{g_2 \nu_1}{A_2 \nu_2} P_{1f} (P_{2f} + P_{2b}) - \alpha_1 P_{1f} \\ \frac{dP_{1b}}{dz} &= -\frac{g_1}{A_1} P_p P_{1b} + \frac{g_2 \nu_1}{A_2 \nu_2} P_{1b} (P_{2f} + P_{2b}) + \alpha_2 P_{1b} \\ \frac{dP_{2f}}{dz} &= \frac{g_2}{A_2} (P_{1f} + P_{1b}) P_{2f} - \alpha_2 P_{2f} \\ \frac{dP_{2b}}{dz} &= -\frac{g_2}{A_2} (P_{1f} + P_{1b}) P_{2b} + \alpha_2 P_{2b} \end{aligned} \quad (1)$$

下标 f 和 b 分别代表前向和后向 Stokes 波。其他参数 g 表示拉曼增益系数, A 表示光纤有效面积, α 表示光纤衰减系数, ν 表示各级光的频率;下标中 p 代表抽运波, 1 代表 1 级 Stokes 波, 2 代表 2 级 Stokes 波。

同文献 [1] 一样,我们没有考虑反向抽运光,这样做是合理的,因为如果考虑反向抽运光,即把返回的抽运光重新馈入拉曼腔进行循环,循环的抽运光和腔外光束导致的相移失配就会引起激光器的不稳

定^[2]。

3 数值模拟

因为两对 FBG 很短,其长度与增益介质——掺磷光纤相比可以忽略,所以拉曼腔的长度近似为磷光纤长度 L 。数值模拟所用的参数分别为:光纤长度 $L = 1000$ m;增益系数 $g_1 = 1.159 \times 10^{-13}$ m/W, $g_2 = 0.9953 \times 10^{-13}$ m/W;对应抽运光和 1、2 级 Stokes 波的模场直径分别为 $6.3 \mu\text{m}$, $8.3 \mu\text{m}$ 和 $10.4 \mu\text{m}$, 衰减系数 α_p , α_{s1} 和 α_{s2} 分别为 1.7 dB/km, 1.0 dB/km 和 0.8 dB/km。根据公式: $A = \frac{\pi}{2} (w_p^2 + w_s^2)$ (其中 w_p , w_s 分别为抽运光和斯托克斯光的模场半径) 计算得到光纤有效面积 A_1 和 A_2 分别为 $42.61 \mu\text{m}^2$ 和 $69.49 \mu\text{m}^2$ 。拉曼腔的损耗除光纤损耗之外,还有光纤光栅的插入损耗和因为光栅所用的光纤和磷光纤的模场直径不匹配引起的拼接损耗。插入损耗记为 α_{FBG} (假设四个 FBG 的插入损耗都相同), 拼接损耗 α_x 主要发生在图 1 中的 x_1 , x_2 两点, 记为 $\alpha_{x1} = \alpha_{x2}$ 。通常把除光纤损耗之外的后两种损耗统称为附加损耗 (excess loss)。

假定谐振腔是稳定连续状态。对上述耦合方程进行数值求解。求解所用的边界条件分别如下: 令 x_1 点为坐标原点 $z = 0$, x_2 点为 $z = L$ 点, 则

在 $z = 0$ 处边界条件为

$$\begin{aligned} P_p &= P_{p0} \\ P_{1f} &= R_1 \alpha_1 P_{1b} \\ P_{2f} &= R_2 \alpha_2 P_{2b} \end{aligned} \quad (2)$$

在 $z = L$ 处的边界条件为

$$\begin{aligned} P_{1b} &= R_4 \alpha_4 P_{1f} \\ P_{2b} &= R_3 \alpha_3 P_{2f} \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_{x1} + 2\alpha_{\text{EBG}} \\ \alpha_2 &= \alpha_{x1} \\ \alpha_3 &= \alpha_{x2} \\ \alpha_4 &= \alpha_{x2} + 2\alpha_{\text{EBG}} \end{aligned}$$

用龙格-库塔方法解耦合方程组 (1), 使用 Matlab 5.3 软件编程使之满足上述边界条件 (2), (3) 最后对一给定输入抽运光功率得到一组唯一的自恰解。图 2(a) 给出 $P_p = 3$ W, 输出镜反射率 $R = 15\%$, 附加损耗 $\alpha = 0.6$ dB 时腔内抽运光和各级 Stokes 光的演化情况 (光纤长度 $L = 1000$ m)。从图

中可以看出,抽运光功率按指数衰减,到达光纤末端几乎全部耗尽,所以我们忽略反向抽运光是合理的。产生的 1 级 Stokes 波在 $z = 0$ 和 $z = L$ 处几乎相等,因为 FBG 插入损耗很小。2 级 Stokes 波在 $z = 0$ 处也几乎相等,在 $z = L$ 处,由于 FBG3 的选择输出作用,有一定功率输出,其大小取决于 FBG3 的反射

率。图中各输出功率均为图 1 中 x_1, x_2 两点的前后向 Stokes 光,抽运光为 x_1 点的前向功率。所以图 2 (a) 中激光的输出并非图中所示数值,要乘以输出镜反射率和损耗,结果为 1.09 W。图 2 (b) 给出抽运光功率从 3 W 增大到 10 W 时的输入输出曲线。随着抽运光功率增加,2 级 Stokes 输出功率呈线性增加。

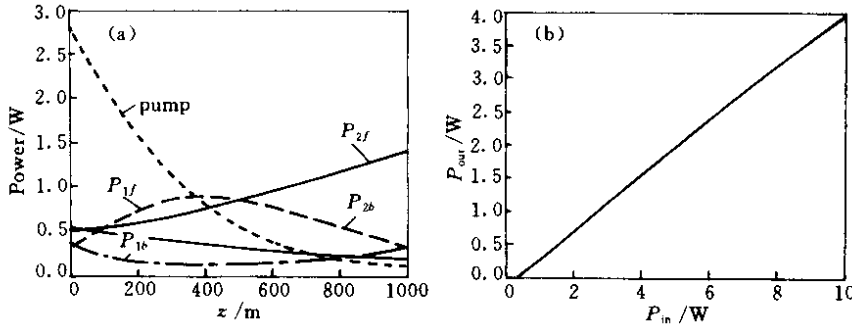


图 2 拉曼光纤激光器内抽运光和 Stokes 光的演化 (a) 及输入输出曲线 (b)

Fig.2 The evolution of the pump power and the Stokes wave power in Raman resonant cavity (a) and the output curve (b)

4 拉曼激光器输出特性研究

在第 3 节求解的基础上,通过改变光纤长度,输出镜反射率和腔内附加损耗对掺磷全光纤拉曼激光器的输出特性进行研究。

图 3 给出输出镜反射率 R 分别为 4%, 50%, 85% 时,光纤长度的变化对激光器输出特性的影响。从图 3 (a) 可以看出,输出镜反射率 R 值一定时,2 级 Stokes 波输出功率先增加后减小。 $R = 4%$ 时,在光纤长度 $L = 400$ m 附近有一最大值 1.35 W。 $R = 50%$ 时, $L = 200$ m 附近有最大输出功率 0.81 W。 $R = 85%$ 时,最大值出现在 150 m 处,为 0.25 W。图 3 (b) 说明,随着光纤长度增加,拉曼阈值减小,逐渐趋于某一稳定值。从图 3 (c) 中可以看出,随着光纤长度增加,斜率效率线性减小,同时随着 R 值增加,减小趋势趋缓。

通过图 3 可以得到如下结论:光纤长度一定时,输出镜反射率越小,输出功率越大,阈值越高,斜率效率也越大。原因是当 R 值减小时,拉曼腔中的激光光子数减少,所以拉曼阈值升高,同时输出到腔外的激光光子数增加,从而输出功率和斜率效率都增大。而且从图中还可以看出,随着 R 值增加,拉曼激光器的输出功率、阈值、斜率效率的变化逐渐趋缓。光纤长度从 100 m 到 1000 m,当 $R = 4%$ 时,阈值从 1.07 W 下降到 0.4 W,斜率效率从 58.66% 下降到 43.94%;当 $R = 85%$ 时,阈值从 0.34 W 降到 0.19

W,变化幅度不大,而且当 $L > 500$ m 以后,阈值几乎不再改变,相应的斜率效率曲线也近似为一条水平直线。所以在设计拉曼激光器时,要综合考虑输出功率、阈值和斜率效率等因素,选择恰当的光纤长度和输出镜反射率,在实际拉曼激光器的设计中,光纤长度一般取 200 ~ 400 m,光纤光栅反射率一般取 10% ~ 15% 比较合适。图 4 给出光纤长度、输出镜反射率、附加损耗对输出功率的影响。其中图 4 (a) 是附加损耗 $\alpha = 0.6$ dB,光纤长度分别为 200 m, 500 m, 1000 m 时,输出功率随输出镜反射率的变化曲线。可以看出, L 越短,输出功率越大,而且光纤长度取一定值时,输出功率与输出镜反射率基本呈线性关系。图 4 (b) 给出输出镜反射率 $R = 15%$,附加损耗分别为 0.15 dB, 3.0 dB 时,输出功率随光纤长度的变化。可以看出,附加损耗对激光器的输出功率影响很大,当损耗为 0.15 dB 时,最大输出功率达到 1.58 W,而附加损耗为 3.0 dB 时,最大输出功率只有 1.27 W。所以,减小光纤光栅的插入损耗和光纤之间的拼接损耗从而减小附加损耗对于提高激光器的输出功率具有非常重要的意义。目前拉曼激光器的输出功率不高,斜率效率只能达到 40% 以下^[3,4],主要是因为附加损耗比较大。图 4 (c) 给出光纤长度 $L = 1000$ m,附加损耗分别为 0.15 dB, 0.6 dB, 3.0 dB 时,输出功率随反射率的变化。从图 4 (a) 和 4 (c) 中也可以看出,输出功率随输出镜反射率的增加而减小,与从图 3 得出的结论是一致的。

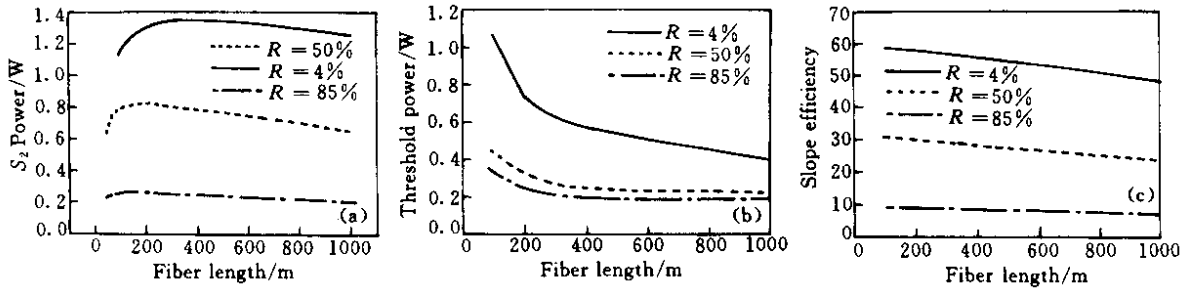


图3 输出镜反射率不同时激光器输出功率(a)、阈值(b)和斜率效率(c)随光纤长度的变化

Fig.3 Variation of output power(a), threshold power(b) and slope efficiency(c) of Raman laser versus the fiber length for different output reflectivity

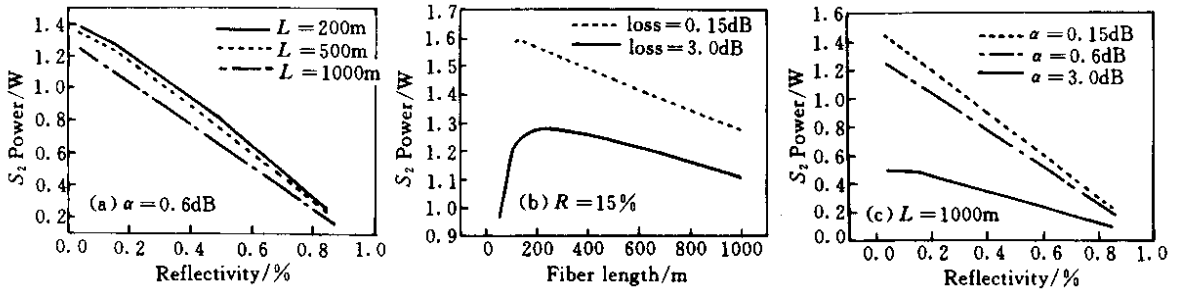


图4 光纤长度、输出镜反射率、附加损耗对输出功率的影响

(a) 光纤长度不同时, 输出功率随输出镜反射率的变化 (b) 附加损耗不同时, 输出功率随光纤长度的变化; (c) 附加损耗不同时, 输出功率随输出镜反射率的变化

Fig.4 Effects of fiber length, output coupler reflectivity and excess loss on output power

(a) variation of output power versus the output reflectivity for different fiber length; (b) variation of output power versus fiber length for different excess loss; (c) variation of output power versus output reflectivity for different excess loss

5 结论

我们用双通结构对两级全光纤串级拉曼激光器进行了理论模拟和分析。在数值模拟的基础上分析了光纤长度、附加损耗及输出镜反射率对激光器输出特性的影响, 从而可以优化串级拉曼激光器的结构设计, 对拉曼激光器的研制和设计有一定参考价值。

参考文献

1 J. A. Yeung, A. Yariv. Theory of cw Raman oscillation in

optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(6): 803 ~ 807

2 M. Haelterman, S. Trillo, S. Wabnitz. Dissipative modulation instability in a nonlinear dispersive ring cavity [J]. *Opt. Comm.*, 1992, **91**: 401 ~ 407

3 V. I. Karpov, E. M. Dianov, V. M. Paramonov *et al.*. Laser-diode-pumped phosphosilicate-fiber Raman laser with an output of 1 W at 1.48 μm [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(13): 887 ~ 889

4 Nam Seong Kim, Mahendra Prabhu, Cheng Li *et al.*. 1239/1484 nm cascaded phosphosilicate Raman fiber laser with CW output power of 1.36 W at 1484 nm pumped by CW Yb-doped double-clad fiber laser at 1064 nm and spectral continuum generation [J]. *Opt. Comm.*, 2000, **176**: 219 ~ 222