

文章编号: 1001-3806(2009)04-0413-03

6 阶掺锗级联喇曼光纤激光器的数值模拟及分析

李发丹^{1,2}, 尚卫东¹, 孙建国¹, 郭占斌¹, 冯光¹, 周晓军², 秦祖军²

(1. 中国电子科技集团公司 第27研究所, 郑州 450015; 2 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 为了研究多阶级联喇曼光纤激光器的结构参量对输出特性的影响, 利用数值模拟的方法对表征多阶级联喇曼光纤激光器的非线性耦合方程组进行了求解, 在此基础上, 对6阶掺锗级联喇曼光纤激光器进行模拟分析, 得到了光纤长度、输出镜反射率、抽运功率等因素与6阶级联喇曼光纤激光器结构参量的关系。结果表明, 在抽运功率不变时, 光纤长度取300m左右, 输出镜反射率取10%左右, 阈值功率比较小, 可以获得最大输出功率。

关键词: 激光器; 喇曼光纤激光器; 数值模拟; 掺锗

中图分类号: TN248.1; O437.3

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.023

Numerical simulation and analysis of six cascaded Raman fiber lasers

LI Fa-dan^{1,2}, SHANG Wei-dong¹, SUN Jian-guo¹, GUO Zhan-bin¹, FENG Guang¹, ZHOU Xiao-jun², QIN Zu-jun²

(1. The 27th Research Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Zhengzhou 450005, China; 2. School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In order to study the dependence of output characteristics on the parameter of multi-order cascaded Raman fiber lasers, the nonlinear coupled equations, describing modeling of multi-order cascaded Raman fiber lasers, were solved. Based on numerical simulation, the effect of fiber length, reflectivity of output coupler and pump power on the output characteristics of a 6-order cascaded Raman fiber laser was obtained. The results showed that the Raman fiber lasers had lower threshold power and could obtain the maximum output power when the fiber length was about 300m, and the reflectivity of the output mirror was about 10%.

Key words: lasers; Raman fiber laser; numerical simulation; Ge-doped

引言

级联喇曼光纤激光器是基于光纤中受激喇曼散射效应的一种光纤激光器, 通常用喇曼增益大的掺杂光纤作为增益介质^[1]。早在1993年, DIANOV等人用掺锗光纤为增益介质, 经过3次喇曼频移获得了输出波长为1240nm的级联喇曼光纤激光器^[2]。掺锗光纤相对于掺磷光纤除了具有较大的非线性系数外, 还具有较强的紫外光敏性, 这使得在此光纤中可以容易地写入光纤光栅, 很容易制作全光纤一体化器件, 因此掺锗级联喇曼光纤激光器成为研究热点之一。

光纤光栅在光纤激光器中的广泛使用^[3-5], 使全光纤级联喇曼激光器成为可能。用输出波长为1064nm的掺镱光纤激光器作为抽运光源, 掺锗光纤^[6]和光纤布喇格光栅组成谐振腔, 经过6次喇曼频移^[7], 从而得到输出波长为1480nm的光纤激光器。本文中给出了

6阶级联喇曼光纤激光器的理论模型^[1,8], 在忽略反向抽运的情况下进行数值求解。在此基础上对6阶级联喇曼光纤激光器进行了模拟分析, 这对相关的实验工作有重要的指导意义。

1 理论模型

6阶掺锗级联喇曼光纤激光器的结构模型如图1所示, 采用输出波长为1064nm的双包层掺镱光纤激

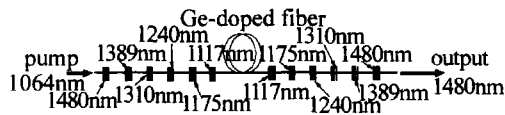


Fig. 1 The configuration of six cascaded Raman fiber laser

光器作为抽运源, 掺锗光纤和布喇格光纤光栅构成谐振腔。掺锗光纤的喇曼频移是 440cm^{-1} , 要获得1480nm波长的激光输出, 1064nm的抽运光需要经过6次喇曼频移, 需要6对光纤布喇格光栅构成谐振腔。每一对光纤光栅只选择性对一种Stokes光波高反射, 输出为1480nm波长的激光, 除了输出镜以外光纤光栅对其它各阶Stokes光反射率为99%, 使谐振腔内各阶Stokes光波最大效率地转化为1480nm的光波。

考虑到反向抽运光与正向抽运光可能引起相位失

作者简介: 李发丹(1981-), 男, 助工, 硕士, 主要从事先进激光器技术方面的研究。

E-mail: fadanli@163.com

收稿日期: 2008-03-04; 收到修改稿日期: 2008-05-19

配导致喇曼增益的不稳定^[9],抽运采取单通结构,在激光器中有13列光波,满足以下耦合方程组^[8]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_p^f}{dz} &= -\alpha_p P_p^f - \frac{g_1}{A_1} \frac{\nu_p}{\nu_{S,1}} (P_{S,1}^f + P_{S,1}^b) P_p^f, \\ &\vdots \\ \frac{dP_{S,k}^{\nu b}}{dz} &= \mp \alpha_{S,k} P_{S,k}^{\nu p} \mp \frac{g_k}{A_k} \frac{\nu_{S,k}}{\nu_{S,k+1}} (P_{S,k+1}^f + P_{S,k+1}^b) P_{S,k}^{\nu b} \times \\ &P_{S,k}^{\nu b} \pm \frac{g_{k-1}}{A_{k-1}} (P_{S,k-1}^f + P_{S,k-1}^b) P_{S,k}^{\nu b}, \\ &\vdots \\ \frac{dP_{S,n}^{\nu b}}{dz} &= \mp \alpha_{S,n} P_{S,n}^{\nu p} \pm \frac{g_n}{A_n} (P_{S,n-1}^f + P_{S,n-1}^b) P_{S,n}^{\nu b} \quad (1) \end{aligned}$$

式中, k 分别为1~6。 P_p^f 为前向抽运光功率, $P_{S,k}^{\nu b}$ 为第 k 阶 Stokes 光功率(上标 f 表示前向 Stokes 光, b 表示后向), $\alpha_p, \alpha_{S,k}$ 分别表示抽运光和第 k 阶 Stokes 光的衰减系数, $\nu_p, \nu_{S,k}$ 分别表示抽运光频率和第 k 阶 Stokes 光的频率, g_k 和 A_k 分别表示第 k 阶 Stokes 光的喇曼增益系数和光纤纤芯有效面积。

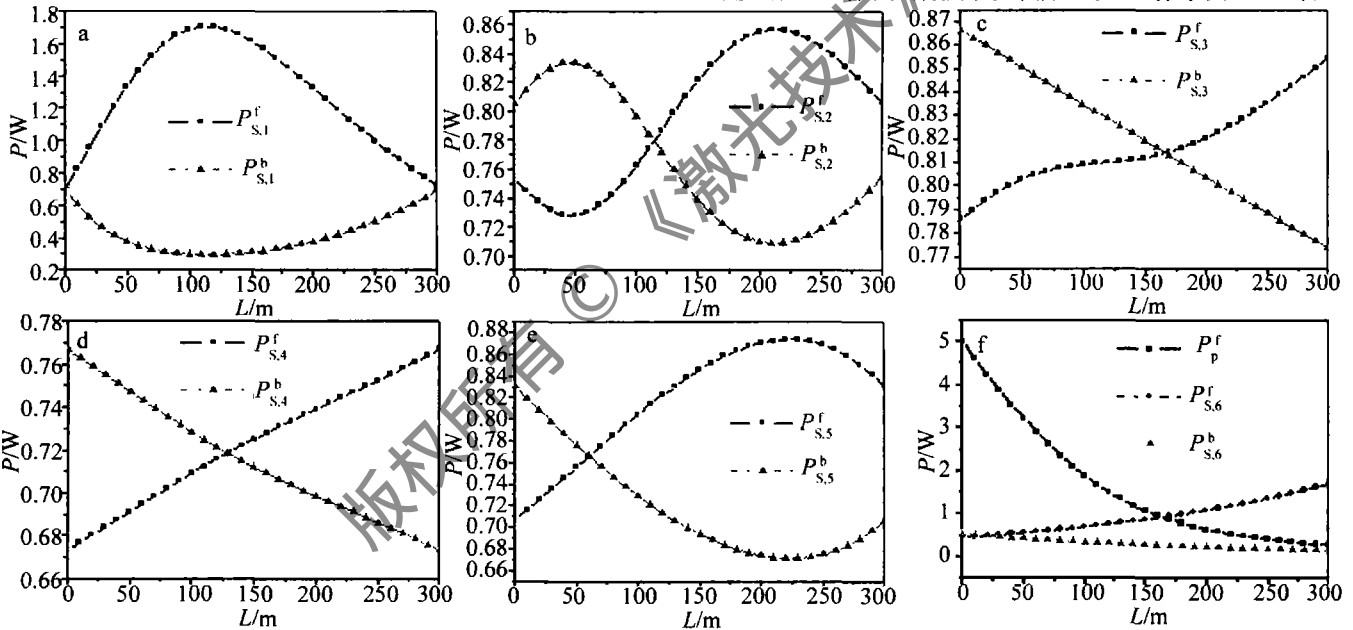


Fig. 2 The evolution of the pump power and the every stokes wave power in six fiber Raman fiber laser resonant cavity

Table 1 Parameters used in calculation

wavelength λ /nm	α /(dB \cdot m ⁻¹)	(g/A) /(m \cdot W) ⁻¹
1064	2.23×10^{-3}	—
1117	2.12×10^{-3}	5.20×10^{-3}
1175	1.75×10^{-3}	4.47×10^{-3}
1240	1.54×10^{-3}	4.31×10^{-3}
1310	1.17×10^{-3}	3.95×10^{-3}
1389	2.63×10^{-3}	3.53×10^{-3}
1480	0.76×10^{-3}	3.03×10^{-3}

纤光栅对其它各阶 Stokes 光反射率都为 99%,模拟结果显示,波长为 1480nm 的激光输出功率达到

设光纤长度为 L , $z=0$ 处为输入端, $z=L$ 处为输出端。级联喇曼光纤激光器的边界条件为:

$$\begin{aligned} P_p^f(0) &= P_{in}, P_{S,k}^b(L) = R_k^b P_{S,k}^f(L), \\ P_{S,k}^f(0) &= R_k^f P_{S,k}^b(0), P_{S,n}^b(L) = R_{out} P_{S,n}^f(L), \\ P_{S,n}^f(0) &= R_n^f P_{S,n}^b(0) \quad (2) \end{aligned}$$

式中, R_k^f, R_k^b 分别为光纤光栅在输入、输出端对第 k 阶 Stokes 光的反射率, R_{out} 是输出镜对波长为 1480nm 的第 6 阶 Stokes 光的反射率, n 为阶数。

2 数值模拟及讨论

有了边界条件,先利用遗传算法^[10]对任意给出的初值进行优化选择,进行适当收敛后再用 4 阶龙格-库塔法结合打靶算法^[11]进行求解,即先利用遗传算法来寻找收敛域,接近最优值时再用打靶法快速求出最终结果。

数值模拟所用光纤的参量见表 1,图 2 是用输出功率 5W 的双包层掺镱光纤激光器作为抽运源,300m 的掺铈光纤作为增益介质,输出镜反射率为 10%,光

1.5447W,斜率效率达 48.09%,与文献结果相符^[12]。

2.1 输出特性研究

在上面求解的基础上,分析抽运功率、光纤长度、输出镜反射率等因素对 6 阶掺铈级联喇曼光纤激光器输出功率的影响。

2.2 抽运功率

从图 3a 中可以看出,随着抽运功率的增加,输出功率呈线性增加。 $R_{out} = 10\%$ 的增加幅度大于 $R_{out} = 20\%$ 。而光-光转化效率开始增幅较大,在抽运功率为 4W 以后增幅减缓。抽运功率越大,光-光转化效率越高。从图 3a 还看出,输出镜反射率低的阈值功率高。

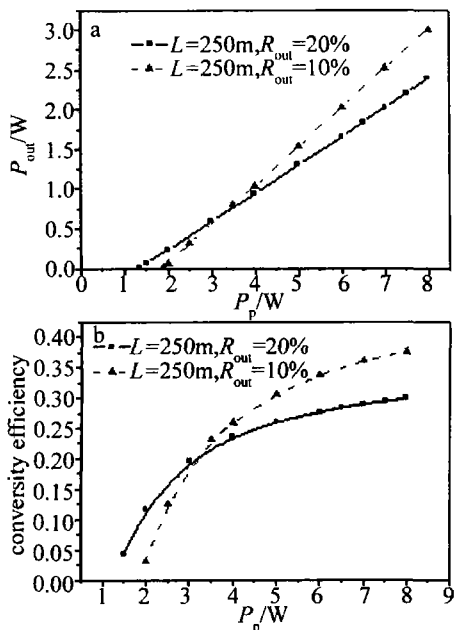


Fig. 3 Variation of output power, conversion efficiency of Raman laser versus the pump power for different output reflectivity

2.3 光纤长度

图4中给出抽运功率为5W、不同输出镜反射率的情况下光纤长度对输出功率的影响。从图4中可以看

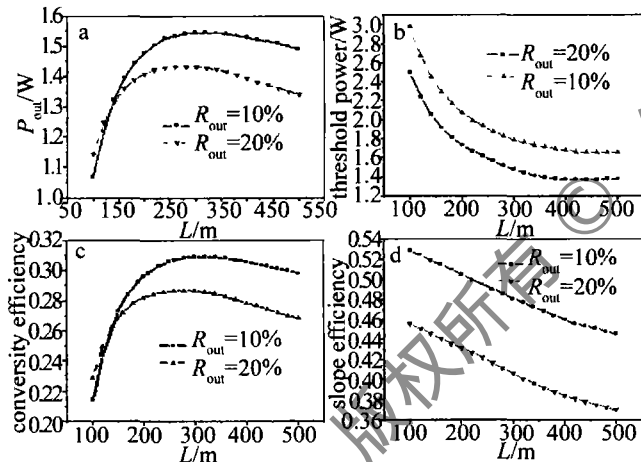


Fig. 4 Variation of output power, threshold power, conversion efficiency and slope efficiency of Raman laser versus the fiber length for different output reflectivity

看出,随着光纤长度的增加,输出功率增加到峰值后慢慢减小, $R_{out} = 10\%$ 的输出功率开始较小,在光纤长度160m后 $R_{out} = 10\%$ 时的输出功率大于 $R_{out} = 20\%$ 时的输出功率。另外可以看出光-光转化效率随光纤长度的增加先增加后减小,而斜率效率随光纤长度的增加不断减小,阈值功率随光纤长度的增加,开始减小很快,后来趋于稳定。

2.4 输出镜反射率

图5中给出了在抽运功率为5W,不同光纤长度条件下,输出功率、阈值功率、光-光转化效率、斜率效率随输出镜反射率的变化。可以看出,随着输出镜反

射率的增大,输出功率和光-光转化效率是先增大,到达峰后几乎呈线性减小;而阈值功率和斜率效率都

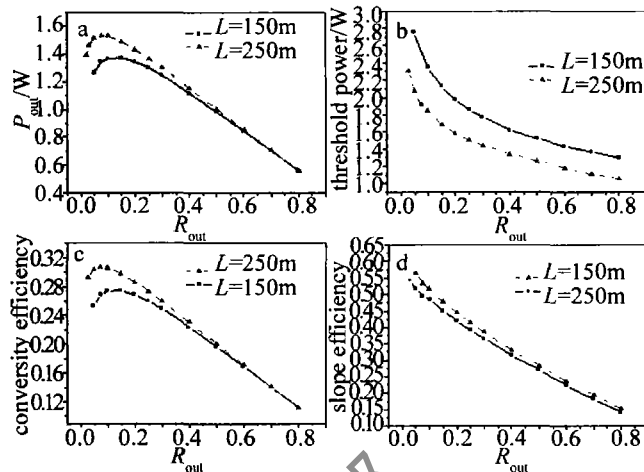


Fig. 5 Variation of Raman laser versus the output reflectivity for different fiber length

a—output power b—threshold power c—conversion efficiency d—slope efficiency

随输出耦合器反射率增大不断递减。因此,级联喇曼光纤激光器的输出镜反射率取10%~15%比较合适。

通过模拟分析可以看出,抽运功率越大,输出功率越大,而光纤长度和输出镜反射率都要选取合适的值才能获得最大输出功率,综合输出镜反射率和光纤长度对输出功率的影响,最大功率大约在光纤长度为300m,输出镜反射率为0.1左右达到。

3 结论

根据6阶掺锗级联喇曼光纤激光器理论及结构模型,对其进行了数值分析及模拟,在此基础上,研究了抽运功率、纤长度、输出镜反射率对光纤激光器输出功率的影响,从而优化激光器的结构。结论表明,光纤长度取300m左右,输出镜反射率取10%左右,阈值功率比较小,可以获得最大输出功率。本文中的分析对级联喇曼光纤激光器的研制和设计有较重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Y Ch, JACKSON S D. Highly efficient first order Raman fibre lasers using very short Ge-doped silica fibres [J]. Opt Commun, 2005, 253(1/3): 172-176.
- [2] DIANOV E M, FURSA D G. Raman fiber-optic amplifier of signals at the wavelength of 1.3μm [J]. IEEE J Q E, 1994, 24(9): 749-751.
- [3] GILES C R. Lightwave applications of fiber Bragg gratings [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1391-1404.
- [4] WANG Y, PO H. Characteristics of fibre Bragg gratings and influences on high-power Raman fibre lasers [J]. Measurement Science and Technology, 2004, 14(6): 883-891.
- [5] YANG X B, LIU D M, HUANG D X. Analysis of fiber Raman lasers and multi-wavelength lasers [J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 409-414 (in Chinese).

(下转第418页)

3 基于自成像效应设计 TM 波分束器

图5是作者设计的一种2维光子晶体波导分束器的结构示意图,由一个单模输入光子晶体波导、耦合区

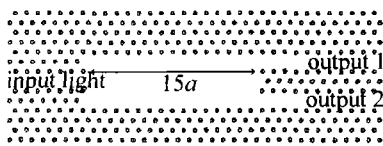


Fig. 5 Schematic diagram of this kind of power splitter with coupling length $L_m = 15a$

和两个单模输出波导组成,耦合区的长度都为 $L_m = 15a$ 。以 TM 模时域高斯脉冲作为入射光,波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,用有限时域差分法分析了这种装置。由于结构的对称性和入射波从中心位置输入,在多模耦合区的强度和电磁波传播的相位分布也是对称的。从图6的电场强度和坡印亭矢量分布图可以看出,这种分束器的两个输出端口输出的透射光强是完全相等的,并

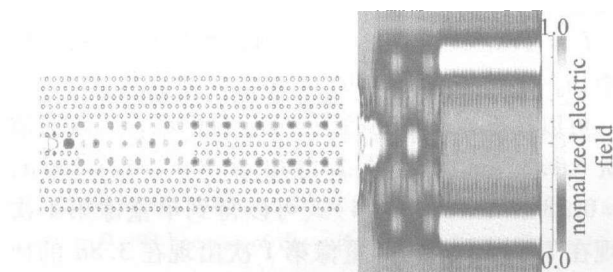


Fig. 6 Simulated electric field and time-averaged Poynting vector at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

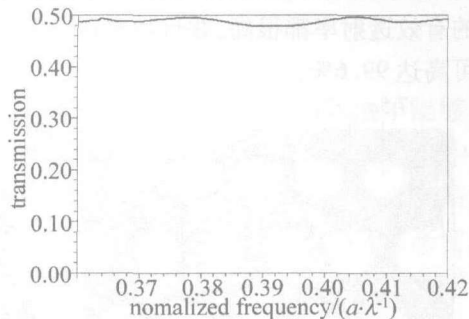


Fig. 7 The transmission coefficient changing with frequency at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

且由图7可以得出每个输出端口的反射率都低于0.002,透射率可高达0.498。

4 结论

基于自成像多模干涉效应,提出了一种2维光子晶体分束器,用时域有限差分法和平面波展开法作为研究工具, TM 模为研究对象,数值计算和分析了这种分束器的特性。结果表明,当入射光 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、耦合长度 $L_m = 15a$ 时,这种分束器每个输出端口的透射率可高达0.498。造成这种现象的物理原因是多模干涉区的自成像效应,这种自成像多模干涉在光子晶体光学集成电路中具有重大的潜在应用价值。

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission on solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20):2059-2062.
- [2] YU T B, JIANG X Q, YANG J Y, *et al.* Self-imaging effect of TM mode in photonic crystal multimode waveguides only exhibiting band gaps for TE modes [J]. *Phys Lett*, 2007, A369 (1/2):167-171.
- [3] YU T B, WANG M H, JIANG X Q, *et al.* Coupling characteristics of electromagnetic wave in parallel three photonic crystal waveguides and its applications [J]. *Acta Physics Sinica*, 2006, 55(4):1851-1856 (in Chinese).
- [4] ZHANG Y, LI Zh J, LI B J. Multimode interference effect and self-imaging principle in two-dimensional silicon photonic crystal waveguides for terahertz waves [J]. *Optics Express*, 2006, 14(7):2679-2689.
- [5] YU T B, WANG M H, JIANG X Q, *et al.* Ultracompact and wideband power splitter based on triple photonic crystal waveguides directional coupler [J]. *J Optics*, 2007, A9(1):37-42.
- [6] CHEN C C, CHEN C Y, WANG W K, *et al.* Photonic crystal directional couplers formed by In AlGaAs nano-rods [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1):38-43.
- [7] LIU T, ZAKHARIAN A R, FALLAHI M, *et al.* Design of a compact photonic-crystal-based polarizing beam splitter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(7):1435-1437.
- [8] OU P, YAN P, GONG M L, *et al.* Fused side-coupler for double-clad fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1):8-10 (in Chinese).
- [9] WARD A J, PENDRY J B. Calculating photonic green's functions using a nonorthogonal finite-difference time-domain method [J]. *Phys Rev*, 1998, B58(11):7252-7259.

(上接第415页)

- [6] CHERNIKOV S V, PLATONOV N S, GAPONTSEV D V. Raman fiber laser operating at $1.24 \mu\text{m}$ [J]. *Electron Lett*, 1998, 34(7):680-681.
- [7] VAREILLE G, AUDOUIN O, DESURVIRE E. Numerical optimization of power conversion efficiency in 1480nm fibre lasers multi-Stokes Raman [J]. *Electron Lett*, 1998, 34(7):675-676.
- [8] MATTEO R, ILARIA C, VITTORIO D. Numerical modeling and optimization cascaded CW Raman fiber lasers [J]. *IEEE J Q E*, 2000, 36(10):1117-1122.
- [9] HAELTERMAN M, TRILLO S, WABZITZ S. Dissipative modulation instability in a nonlinear dispersive ring cavity [J]. *Opt Commun*, 1992, 91(5/6):401-407.
- [10] LEI Y J, ZHANG Sh W, LI X W. MATLAB genetic algorithm toolbox and its application [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005:52-60 (in Chinese).
- [11] HAN Q, NING J P, CHEN Zh Q, *et al.* An efficient shooting method for fibre Raman amplifier design [J]. *J Optics*, 2005, A7(8):386-390.
- [12] GRUBB S G, STRASSER T, CHEUNG W Y, *et al.* High power, $1.48 \mu\text{m}$ cascaded Raman laser in germanosilicate fibers [C]//Proceedings Topical Meeting on Optical Amplifiers and Applications. Washington DC: Optical Society of America, 1995:197-199.