

抽运光谱宽度对喇曼光纤放大器的影响*

张多英^{1,3} 巩稼民² 李建东¹

(1 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

(2 西安邮电学院电信系, 西安 710061)

(3 广州暨南大学信息学院电子工程系, 广州 510632)

摘要 采用受激喇曼散射(SRS)耦合波理论分析了抽运光谱宽度对喇曼光纤放大器的影响,指出当采用宽光谱作抽运光时会降低抽运效率. 同时,文中还给出了抽运光谱宽度、抽运光功率和抽运效率间的变化规律曲线,得出当传输光纤的有效截面积越小、喇曼增益系数越大、抽运光的入纤功率和光谱线宽度越大时,光谱抽运效率越小的结论.

关键词 受激喇曼散射;喇曼放大;石英光纤;密集波分复用

中图分类号 TN919 **文献标识码** A

0 引言

在密集波分复用(DWDM)光纤通信系统中,由于受激喇曼散射(SRS)的存在,短波长光的能量会转移到长波长光上,SRS 光纤放大器就是利用这种效应运行的. 利用 SRS 进行光放大有许多优点^[1]. 在 SRS 光纤放大器中,抽运光一般都具有很高的光强度,当其光谱宽度很窄时,抽运光的功率会因为 SBS 的影响迅速衰减^[2-4],产生极强的后向散射光,从而严重劣化 SRS 光纤放大器的性能. 为了减少 SBS 的负面影响,原则上抽运光都采用一定光谱宽度的光源,这样一来在光纤里传输过程中抽运光的各谱线光之间就会产生强烈的 SRS 相互作用,这种作用是否会对 SRS 光纤放大器的放大性能产生影响,需要从理论上给出确切的回答. 前人在理论研究 SRS 光放大时,大都假设抽运光为单频光^[5-10],其结果显然不适用于抽运光具有一定光谱宽度时的情况. 本文采用 DWDM 系统石英光纤中多波长光之间的 SRS 耦合理论^[7-12]分析了抽运光光谱宽度对 SRS 光纤放大器放大倍数的影响,给出了抽运光谱宽度引入的抽运效率随光纤有关参数、抽运光源有关参数的变化规律.

1 理论模型和分析方法

图 1 为 SRS 光纤放大器结构原理图,以波长 $\lambda_i (i = p_1, p_2 \dots p_N)$ 为标志的第 i 个信道中传输着抽运光,以波长 $\lambda_i (i = s_1, s_2, \dots s_M)$ 为标志的第 i 个信道中传输着信号光,抽运光的波长短于信号光波长.

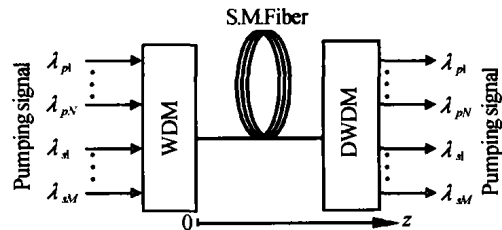


图 1 SRS 光纤放大器结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of FRA in forward configuration

在分析时,我们只考虑 SRS 的一阶 Stokes 效应;忽略其它高阶效应;忽略自发喇曼散射带来的能量损失;假设各信号光在光纤中的线性衰减系数相同;不考虑除 SRS 以外的其它非线性效应带来的影响. 为了说明问题,以石英光纤为例并做以下假设:

- 1) 信道按光波长递增的顺序排列,即 $\lambda_{p_1} < \lambda_{p_2} < \dots < \lambda_{p_N} < \lambda_{s_1} < \lambda_{s_2} < \dots < \lambda_{s_M}$
- 2) 抽运光和信号光波长都处于石英光纤的喇曼增益谱的有效范围之内,即

$$\tilde{\nu}_{p_1} - \tilde{\nu}_{s_M} < 500 \text{ cm}^{-1}$$

式中, $\tilde{\nu}_{p_1}, \tilde{\nu}_{s_M}$ 为 p_1, s_M 信道的波数 ($\tilde{\nu}_{p_1} = \lambda_{p_1}^{-1}, \tilde{\nu}_{s_M} = \lambda_{s_M}^{-1}$), 单位为 cm^{-1} .

在以上假设下, $N + M$ 个抽运光和信号光在石英光纤中单向传输 z 距离、经 SRS 相互作用后,输出光功率为^[7-10]

$$\left. \begin{aligned} P_i(z) &= P_i(0) e^{-\alpha} \frac{P_{\Sigma}(0)}{\sum_{j=p_1}^{p_N+s_M} \frac{\tilde{\nu}}{\nu_j} P_j(0) e^{G_j}} \\ (i &= p_1, p_2 \dots p_N, s_1, s_2 \dots s_M) \\ P_{\Sigma}(0) &= \sum_{j=p_1}^{p_N+s_M} P_j(0) (\tilde{\nu}/\nu_j) \\ G_j &= -\frac{k}{|\tilde{\lambda}| MA_e} (\tilde{\nu}_j - \tilde{\nu}_i) P_{\Sigma}(0) L_e \\ L_e &= \frac{1 - e^{-\alpha}}{\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

*陕西省自然科学基金项目(No. 2000x12)资助
Tel: 020-85220231 Email: johnson-zdy@vip.sina.com
收稿日期: 2004-08-23

式中: $\bar{\nu}$ 、 M 、 A_e 分别为平均光频率、保偏系数 ($1 \leq M \leq 2$)、光纤有效截面积; $|\bar{\lambda}|$ 为无量纲量, 其值大小为平均波长在单位取微米时的大小; k 为石英光纤喇曼增益谱拟合直线的斜率, 其值约为 $k = 1.80 \times 10^{-16} (\text{m} \cdot \text{cm}/\text{W})$; α 为石英光纤的线性衰减系数; $P_i(0)$ 、 $P_i(z)$ ($i = p_1, p_2, \dots, p_N, s_1, s_2, \dots, s_M$) 是各信道在传输距离为 0、 z 处的光功率; L_e 称为光纤的有效作用距离. 一般地, 在 SRS 光纤放大器的输入端 ($z=0$ 处), 信号光的功率十分微弱, 相对于功率很高的抽运光来说完全可以忽略, 此时抽运光和信号光的输出光功率可简化为

$$\left. \begin{aligned} P_i(z) &= P_i(0) e^{-\alpha z} \frac{P_\Sigma(0)}{\sum_{j=p_1}^{p_N} \frac{\bar{\nu}}{\nu_j} P_j(0) e^{G_{ji}}} \\ (i &= p_1, p_2, \dots, p_N, s_1, s_2, \dots, s_M) \\ P_\Sigma(0) &= \sum_{j=p_1}^{p_N} P_j(0) \frac{\bar{\nu}}{\nu_j} \\ G_{ji} &= -\frac{k}{|\bar{\lambda}| MA_e} (\bar{\nu}_j - \bar{\nu}_i) P_\Sigma(0) L_e \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1)和式(2)是分析 SRS 石英光纤放大器放大倍数的基本公式. 如果抽运光光谱是分离的线光谱结构, 原则上, 只要知道了抽运光的光谱功率分布规律, 就可以利用式(1)和式(2)直接进行分析. 但有些抽运光光谱是带状光谱结构, 为此对式(2)进行改造得到式(3)

$$\left. \begin{aligned} P_i(z) &= P_i(0) e^{-\alpha z} \frac{P_\Sigma(0)}{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \frac{\bar{\nu}}{\nu} p(0, \nu) e^{G_i(\nu)} d\nu} \\ (i &= s_1, s_2, \dots, s_M) \\ P_\Sigma(0) &= \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} p(0, \nu) d\nu \\ G_i(\nu) &\approx -\frac{k}{\lambda_0 MA_e} (\bar{\nu} - \bar{\nu}_i) P_\Sigma(0) L_e \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中, $p(0, \nu)$ 为抽运光光谱功率密度分布函数, ν_{\min} 、 ν_0 、 ν_{\max} 分别为抽运光光谱的最小频率、中心频率和最大频率.

2 抽运光谱宽度对 SRS 光纤放大器的放大倍数的影响

在工程应用中, 对于光谱较为集中的抽运光光谱功率密度分布函数 $p(0, \nu)$, 一般可采用矩形光谱功率密度分布函数 $p_{\text{rec}}(0, \nu)$ 来等效, $p_{\text{rec}}(0, \nu)$ 的取值为

$$p_{\text{rec}}(0, \nu) = \begin{cases} p_p & (\nu \in [\nu_1, \nu_2]) \\ 0 & (\nu \notin [\nu_1, \nu_2]) \end{cases}$$

式中, p_p 为抽运光光谱功率密度分布函数的峰值功

率密度, $\nu_1 (= \nu_0 - \Delta\nu_H/2)$ 、 $\nu_2 (= \nu_0 + \Delta\nu_H/2)$ 为半峰值功率密度处对应的两光频率, $\Delta\nu_H (= \nu_2 - \nu_1)$ 为抽运光光谱的半值光频率宽度, 如图 2. 为了分析的简便, 假定 $\Delta\nu_H \ll \nu_0$, 此时 $\nu_0/\nu \approx 1$. 将这一条件以及 $p_{\text{rec}}(0, \nu)$ 代入式(3)积分得到结果

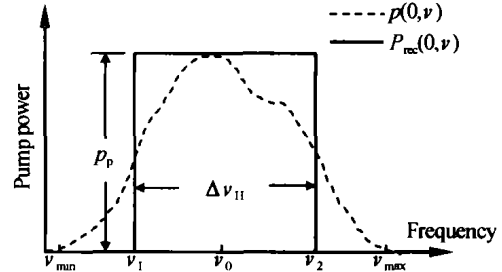


图 2 抽运光光谱功率密度分布函数及其等效矩形函数
Fig. 2 Spectrum of pump light (broken curve) and rectangular function approximation used in calculations (solid curve)

$$\left. \begin{aligned} P_i(z) &= \eta P_i(0) e^{-\alpha z} e^{\beta(\nu_0 - \nu_i)} \quad (i = s_1, s_2, \dots, s_M) \\ \eta &= \frac{\beta \Delta\nu_H}{2 \text{sh}(2^{-1} \beta \Delta\nu_H)} \\ \beta &= \frac{k}{\lambda_0 MA_e} P_\Sigma(0) L_e \\ P_\Sigma(0) &= p_p \Delta\nu_H \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由式(4)可以得到 SRS 光纤放大器的放大倍数 A_i 为

$$A_i = \frac{P_i(z)}{P_i(0) e^{-\alpha z}} = \eta e^{\beta(\nu_0 - \nu_i)}, \quad (i = s_1, s_2, \dots, s_M) \quad (5)$$

由式(5)可以看出, 当采用光谱线宽度为 $\Delta\nu_H$ 的光源抽运 SRS 光纤放大器时, 放大倍数比单频光源 ($\Delta\nu_H = 0$) 抽运时多了一个小于 1 的倍数 η , 由式(4)中 η 的表达式可以看出, η 是因为抽运光源具有光谱线宽度 $\Delta\nu_H$ 而引入的, 我们把它定义为光谱抽运效率. 十分不妙的是光谱抽运效率 η 随 $\beta \Delta\nu_H$ 发生变化, 传输光纤的喇曼增益系数、 $P_\Sigma(0)$ 和 $\Delta\nu_H$ 越大, 光谱抽运效率 η 越小. 图 3 给出了石英光纤的 $P_\Sigma(0)$ 取 210.3 mW、500 mW 和 1000 mW 时光谱抽运效率 η 随 $\Delta\nu_H$ 的变化规律, 图 4 给出了 $\Delta\nu_H$ 取 92.56 cm^{-1} ($1 \text{ cm}^{-1} = 30 \text{ GHz}$) 时光谱抽运效率 η 随 $P_\Sigma(0)$ 的变化规律.

由图中曲线可以看出, 当抽运光的入纤功率 $P_\Sigma(0)$ 和光谱宽度 $\Delta\nu_H$ 很大时, 光谱抽运效率 η 值不可忽略. 原则上, 为了得到较大的放大倍数, 在设计 SRS 光纤放大器时, 一般采用具有较大喇曼增益系数和较小有效截面积的特种光纤、输入较高的抽运光功率. 为了减少 SBS 带来的影响, 尽量增大抽运光源的光谱宽度. 而这些恰恰增大了光谱抽运效率 η , 同样降低了 SRS 光纤放大器的放大倍数. 可见在设计 SRS 光纤放大器时对抽运光源的光谱宽度 $\Delta\nu_H$ 的选取需要折中考虑.

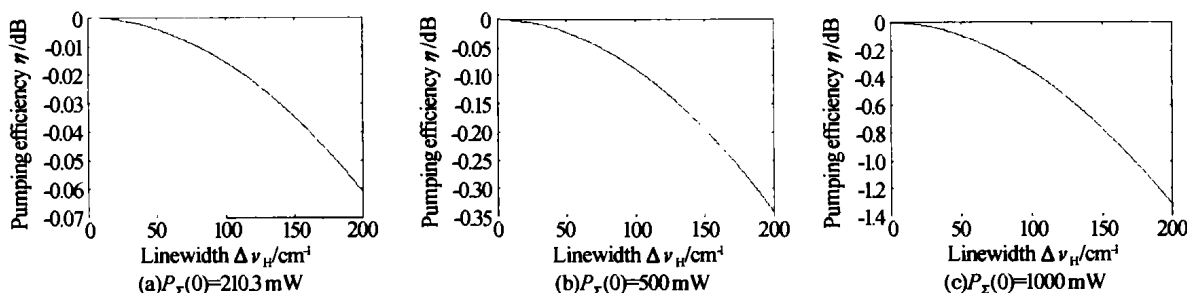


图3 光谱抽运效率 η 随抽运光谱宽度 $\Delta\nu_H$ 变化规律

Fig. 3 η as a function of spectrum linewidth $\Delta\nu_H$ of pump light

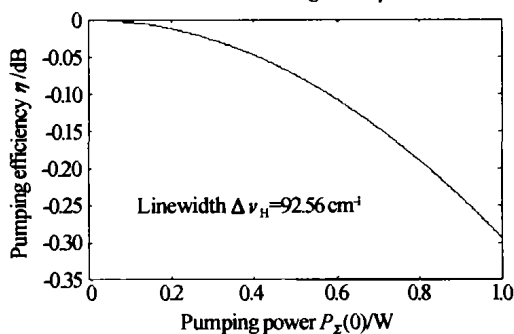


图4 光谱抽运效率 η 随抽运光功率 $P_z(0)$ 变化规律

Fig. 4 η as a function of power $P_z(0)$ of pump light

3 结论

1) 在 SRS 光纤放大器中, 一般采用具有较大喇曼增益系数和较小有效截面积的特种光纤、输入较高的抽运光功率. 在这种情况下, SRS 光纤放大器的放大倍数会因为抽运光源具有光谱宽度而引入一个小于 1 的倍数—光谱抽运效率. 传输光纤的有效截面积越小、喇曼增益系数越大、抽运光的人纤功率和光谱线宽度越大, 光谱抽运效率越小.

2) 从抽运光源的光谱宽度对 SRS 光纤放大器的影响来说, 为了获得较大的放大倍数, 选取的抽运光源的光谱宽度越窄越好. 从受激布里渊散射对 SRS 光纤放大器的影响来说, 为了获得较大的放大倍数, 选取的抽运光源的光谱宽度越宽越好. 显然, 这两种因素对抽运光源的光谱宽度的要求是矛盾的, 在设计 SRS 光纤放大器时应折中考虑.

3) 论文提出的理论分析方法适用于超宽带喇曼光纤放大器的优化设计.

参考文献

- Govind P A. Nonlinear fiber optics. London: Academic Press, 1989. 266 ~ 270
- Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering. *Appl Opt*, 1972, 11(11): 2489 ~ 2494
- 巩稼民, 梁猛, 方强, 等. SBS 效应对 EDFA + HD-WDM 系统中光信号功率的影响. *应用光学*, 1999, 20(1): 23 ~ 26

- Gong J M, Liang M, Fang Q, et al. *Journal of Applied Optics*, 1999, 20(1): 23 ~ 26
- Hong Li, Xianglin Yang. Study of SRS effect in distributing EDFA. *Chinese J Lasers*, 1997, 24(5): 421 ~ 425
- Kao M S, Wu J. Extending transmission distance of HD-WDM systems using post transmitter fiber Raman amplifiers. *J Lightwave Technol*, 1991, 9(3): 394 ~ 399
- Salim T, Joseph P C. A compute model of non-disper-limited Stimulated Raman Scattering in optical fiber multiple-channel communication. *J Lightwave Technol*, 1993, 11(12): 1914 ~ 11924
- Gong Jiamin, Fang Qiang, Liu Juan, et al. The effect on signal power in single-mode silica fiber DWDM optical communication system with equally spaced channels. *Chinese J Lasers*, 2000, B9(1): 51 ~ 56
- Gong Jiamin, Fang Qiang, Liu Juan, et al. Analytical model of non-dispersion-limited transient stimulated Raman scattering in single-mode silica fiber in WDM optical communication system. *Chinese J Lasers*, 2000, B9(2): 451 ~ 454
- 巩稼民, 方强, 刘娟, 等. N 信道高密度波分复用石英光纤传输系统中受激喇曼散射对信号光功率的影响. *物理学报*, 2000, 49(3): 449 ~ 454
- Gong J M, Fang Q, Liu J, et al. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(3): 449 ~ 454
- 巩稼民, 方强, 刘娟, 等. WDM 石英光纤传输系统中 SRS 的稳态分析模型. *物理学报*, 2000, 49(7): 1287 ~ 1291
- Gong J M, Fang Q, Liu J, et al. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(7): 1287 ~ 1291
- Xin Xiangjun, Yu Chongxiu, Zhang Ru, et al. The influence of configuration of raman fiber amplifier on performance. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(2): 140 ~ 143
- 薛飞, 邱昆, 李中桂, 等. S 波段宽带光纤喇曼放大器研究. *光子学报*, 2003, 32(6): 676 ~ 678
- Xue F, Qiu K, Li Z G, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(6): 676 ~ 678

Effect of Pumping Light Linewidth on Fiber Raman Amplifier

Zhang Duoying^{1,3}, Gong Jiamin², Li Jiandong¹

1 *National Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071*

2 *Telecommunications Department of Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061*

3 *Department of Electronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632*

Received date: 2004-08-23

Abstract The effect of pumping light linewidth on fiber Raman amplifier used in density wavelength division multiplexed (DWDM) system is analyzed by applying SRS coupling wave theory. It is pointed out that the pumping efficiency will be reduced if the wide-spectrum pumping light is used. The variation curves of pumping light linewidth and power versus pumping efficiency are given. A conclusion is presented that lower pumping efficiency will be obtained with larger pumping light power, pumping light linewidth, Raman gain and lesser effective fiber section.

Keywords Stimulated Raman Scattering (SRS); Raman amplification; Fused silica fiber; Density Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

Zhang Duoying was born in 1963. Now he is an instructor at Department of Electronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, and a Ph. D. candidate at National Key Lab. of Integrated Service Networks of Xidian University, Xi'an, China. P. R. His research interests involve optical fiber communications and mobile communications.