

文章编号: 1001-3806(2004)04-0376-03

正向抽运喇曼光纤放大器开关增益数值计算研究

姜海明, 王亚非

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 采用数值计算的方法, 对影响正向抽运喇曼光纤放大器(RFA) 开关增益的几个因素——喇曼增益系数、抽运光功率、光纤长度、光纤损耗、有效纤芯面积等参数与正向抽运喇曼光纤放大器开关增益的关系进行了分析研究, 并把数值分析的结果和小信号的解析结果进行了比较, 然后在此基础上提出了有效提高正向抽运喇曼光纤放大器开关增益的几种方法。

关键词: 正向抽运; 喇曼光纤放大器; 开关增益; 数值计算

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Study on the gain of forward pumped Raman fiber amplifier by numerical simulation

JIANG Hai-ming, WANG Ya-fei

(College of Photoelectric Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The relation between on/off gain of forward pumped Raman fiber amplifier and several important parameters, including Raman gain coefficient, pump power, fiber length, fiber loss, effective area, etc., is investigated by numerical simulation. The results are compared with the analytic solution under small signal. At last, several methods improving the on/off gain of Raman fiber amplifier are presented.

Key words: forward pumped; Raman fiber amplifier; on/off gain; numerical simulation

引 言

喇曼散射现象早在 1928 年就由印度物理学家喇曼所发现, 并因此获得了 1930 年的诺贝尔物理学奖。在很多光学介质中, 当一束强光从输入端入射, 输出光中出现了一小部分频率下移的新光谱成分, 这种现象就是自发喇曼散射, 新产生的光称为斯托克斯光。当入射光的强度足够大时, 斯托克斯光呈现受激的性质, 此时的散射称为受激喇曼散射, 利用受激喇曼散射效应可以制成喇曼光纤激光器和喇曼光纤放大器。

近年来, 随着光纤通信的高速发展对光放大器要求的进一步提高, 喇曼光纤放大器由于自身具有噪声低、频带宽、增益波长由抽运光波长决定、饱和输入信号高等优点, 正在成为光纤通信领域研究的热点之一, 已有很多学者对喇曼光纤放大器的增益问题进行了讨论^[1~5], 但到目前为止, 还未见有对影

响喇曼光纤放大器开关增益的因素进行较全面分析研究的报道, 因此, 文中采用数值计算的方法, 对影响喇曼光纤放大器开关增益的几个因素——喇曼增益系数、抽运光功率、光纤长度、光纤损耗、光纤有效纤芯面积等参数与喇曼光纤放大器开关增益的关系进行了分析研究, 并把数值分析的结果和小信号的解析结果进行了比较, 然后在此基础上提出了有效提高正向抽运喇曼光纤放大器开关增益的方法。

1 理论模型

喇曼光纤放大器是根据受激喇曼散射的原理工作的, 在正向抽运的喇曼光纤放大器中, 信号光与抽运光的相互作用过程可由下面的耦合方程组来进行描述^[6]:

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_p P_s - \alpha_s P_s \quad (1)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_p P_s - \alpha_p P_p \quad (2)$$

式中, P_p 是抽运光功率, P_s 是信号光功率, α_p , α_s 分别是光纤对抽运光和信号光的衰减系数, ω_p , ω_s 分别是抽运光和的信号光角频率, z 为信号光沿光纤的传播方向, A_{eff} 是光纤的有效纤芯面积, g_R 是喇曼

作者简介: 姜海明(1976), 助教, 主要从事光纤通信、声光无损检测方面的相关研究。

E-mail: dddyj@sina.com

收稿日期: 2003-10-11; 收到修改稿日期: 2003-11-26

增益系数,其值与信号光和泵浦光的频差有关,是介质的固有属性。描述抽运光和信号光在光纤中传输规律的(1)式和(2)式只有在假设 $\alpha_p = \alpha_s$ 时才有解析解。为了与实际情况更相符,不采用上面假设条件下的解析解,而用数值计算的方法来求解方程。该方程采用四阶的龙格库塔法进行数值求解^[7],喇曼光纤放大器增益特性采用信号光的开关增益 $G_{\text{on-off}}$ 来衡量,定义为:

$$G_{\text{on-off}} = P_s(L)/P_s'(L) \quad (3)$$

$P_s(L)$ 和 $P_s'(L)$ 分别为抽运光开和关时光纤输出端的信号光功率。

2 数值计算分析

2.1 喇曼增益系数对开关增益的影响

为了研究喇曼增益系数对喇曼光纤放大器开关增益的影响,每计算一次开关增益就改变一次喇曼增益系数的值,而其它参数保持不变,具体计算参数为:抽运光输入功率 $P_{p0} = 0.5\text{W}$, 信号光输入功率 $P_{s0} = 1\text{mW}$, $\alpha_s = 0.2\text{dB/km}$, $\alpha_p = 0.24\text{dB/km}$, 抽运光波长 $\lambda_p = 1450\text{nm}$, 信号光波长 $\lambda_s = 1550\text{nm}$, 光纤长度 $L = 50\text{km}$, $A_{\text{eff}} = 80\mu\text{m}^2$, 根据以上参数计算的结果如图 1 所示。

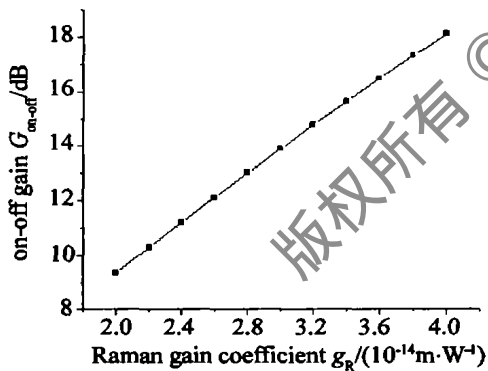


Fig. 1 On-off gain vs. Raman gain coefficient

从图 1 可见,当喇曼增益系数 g_R 逐渐增大时,喇曼光纤放大器的开关增益也逐渐增大,基本上呈现线性关系增长。

2.2 抽运光输入功率对开关增益的影响

研究抽运光输入功率对喇曼光纤放大器开关增益的影响,可以改变抽运光的输入功率,然后对开关增益进行计算, $g_R = 3.4 \times 10^{-14} \text{m}^{-1} \text{W}^{-1}$, 其它参数同前。计算结果如图 2 所示。

观察图 2 可以发现,当抽运光功率从 100mW 逐渐增大到 400mW 时,信号光的开关增益基本上遵循着线性关系逐步增大,当抽运光的功率继续增大

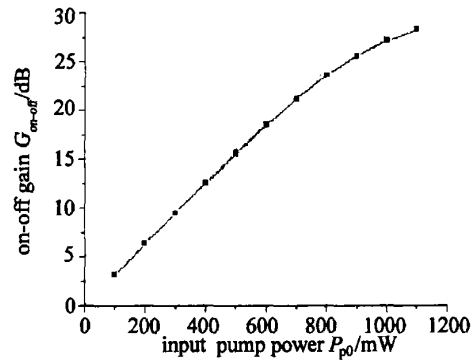


Fig. 2 On-off gain vs. input pump power

时,开关增益虽然继续增长,但是增长幅度逐渐远离线性关系,趋向于饱和。

2.3 光纤长度对开关增益的影响

光纤长度对开关增益的影响,可通过改变光纤的长度 L 以计算相应的开关增益来进行研究,其余计算参数同前。计算的结果如图 3 所示。

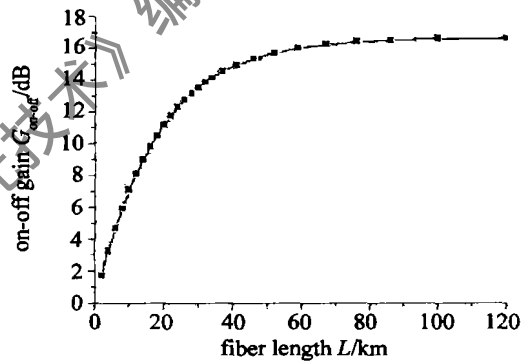


Fig. 3 On-off gain vs. fiber length

从图 3 可见,在光纤长度小于 18km 时,随着光纤长度的增加,信号光的开关增益也基本上按照线性的规律增加,当光纤的长度继续增加时,信号光开关增益的增加明显变缓,越来越偏离线性规律,甚至当光纤的长度大于 70km 以后,信号光的开关增益基本上与光纤的长度无关。

2.4 光纤损耗对开关增益的影响

由于光纤的损耗与光的频率密切相关,所以,光纤对抽运光和信号光的损耗不同,为了研究光纤损耗对信号光开关增益的影响,可以从以下两个方面进行研究。

2.4.1 信号光损耗对开关增益的影响 信号光损耗对开关增益的影响可以通过改变信号光损耗系数 α_s 计算相应的开关增益得出,其余计算参数同前。计算的结果如图 4 所示。从图 4 可见,当光纤对信号光的损耗逐渐增大时,信号光的开关增益基本无变化,说明信号光的开关增益与光纤对信号光的损

耗大小几乎无关。

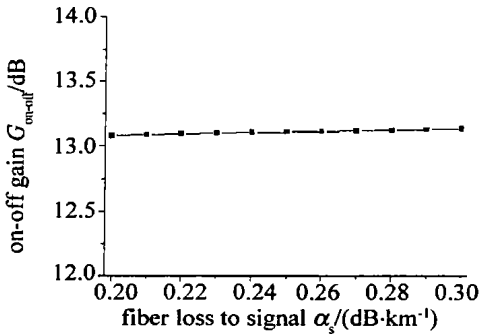


Fig. 4 On off gain vs. fiber loss to signal

2.4.2 抽运光损耗对开关增益的影响 同上面类似, 抽运光损耗对开关增益的影响可以通过改变抽运光损耗系数 α_p 计算相应的开关增益得出, 其余计算参数同前。计算的结果如图 5 所示。由图 5 可见, 随着抽运光损耗系数的增大, 信号光的开关增益也随着下降, 基本上遵循线性规律。

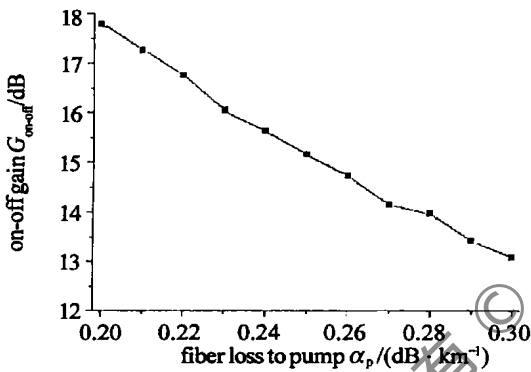


Fig. 5 On off gain vs. fiber loss to pump

2.5 光纤有效纤芯面积对开关增益的影响

光纤的有效纤芯面积也是影响喇曼光纤放大器开关增益的一个重要因素, 通过改变其值的大小计算相应的开关增益可以发现它们之间的关系, 具体计算参数同前。计算的结果如图 6 所示。由图 6 可

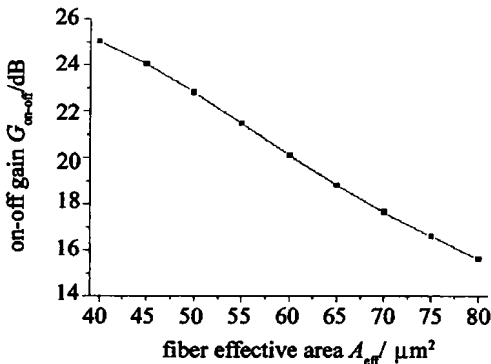


Fig. 6 On off gain vs. fiber effective area

见, 信号光的开关增益基本上随着光纤有效纤面积的增大按照线性规律减小。

3 数值计算结果与小信号理论分析的比较

前面已经提到, (1) 式和(2) 式只有在假设 $\alpha_p = \alpha_s$ 时才有解析解, 但在小信号情况下, 即信号光的光强总是远小于抽运光的光强, 此时可以忽略抽运光的消耗效应, 即略去(2) 式右边的第 1 项, 由此可解得信号光的开关增益:

$$G_{\text{on-off}} = 4.35 \times g_R P_{p0} L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}} \quad (3)$$

式中, L_{eff} 为有效光纤长度, 表达式为:

$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)] \quad (4)$$

从(3) 式可见, 信号光的开关增益与喇曼增益系数、抽运光的输入功率、光纤的有效长度成正比, 与光纤的有效纤芯面积成反比, 表达式中没有出现光纤对信号光损耗, 所以该参数与信号光的开关增益无关。结合(3) 式和(4) 式可以发现, 当光纤的长度足够长时, 有效长度 $L_{\text{eff}} = 1/\alpha_p$, 所以, 开关增益与损耗系数 α_p 成反比, 而与光纤长度无关。由此可见, 小信号时的解析解与数值计算的结果是非常一致的, 同时数值计算表明, 当光纤的长度、喇曼增益系数、抽运光的输入功率大于一定值的时候, 抽运光的功率消耗就不能忽略, 结果导致开关增益偏离了线性变化, 呈现饱和的趋势, 此时小信号近似就变得不精确, 需要用数值计算的方法求解。

4 结论

由分析可知, 要提高正向抽运喇曼光纤放大器的开关增益可采取以下几项措施: (1) 采用合适类型的光纤, 该光纤应具有喇曼增益系数大、有效面积小、对抽运光的损耗系数小等特点; (2) 提高抽运光的输入功率, 目前激光器的制作工艺还不能达到很高的光输出功率, 但可以采用专用的抽运光合波器来提高总的输出功率; (3) 在有效光纤长度内尽量提高光纤的长度, 但长度超过有效长度后, 增加光纤的长度并不能明显提高信号光的开关增益。

参考文献

- [1] WANG L L, WANG B C, YANG L M. Gain transients in co-pumped and counter pumped Raman amplifiers [J]. Photon Technol Lett, 2003, 15(5): 664~ 666.
- [2] BONONI A, PAPPARARO M. Transient gain dynamics in saturated counter pumped Raman amplifiers [A]. IEEE LEOS OSA OFC2002 Technical Digest [C]. California: IEEE Communications Society, 2002. 511~ 512.

(下转第 405 页)

放电降低了主放电的击穿电压,而且主放电 E/P 值的降低还有利于提高激光器的电光转换效率^[5]。

激光器的激励电路为电容脉冲放电电路,自制的高压开关式脉冲充电电源最高充电电压为 20kV,用来给储能电容器 C 充电。 R 为充电回路电阻,与激光器并联。开关 T 采用触发管,当 T 突然导通时,电容 C 通过开关 T 对激光器放电。高压脉冲充电电源的最高重频为 56Hz,电激励脉宽约为 7.5 μ s。

放电腔是一端以 ZnSe 布儒斯特窗(布儒斯特角为 67.38°)密封的半外腔结构。激光谐振腔由曲率半径为 2m 的镀金凹球面全反镜和透过率为 22% 的锗透射输出镜组成,腔长在 1m~1.5m 之间。激光介质为 $V(\text{CO}_2)V(\text{N}_2)V(\text{He})=1:4$ 的混合气。激光脉冲能量和波形分别由 Gentec 能量计和 Molectron P3-01 波形探测器测量,平均功率由 Molectron PM30 型激光功率计监测。

2 实验结果

对不同脉冲重复频率时的激光输出平均功率进行了研究。图 2 为气压 3.2kPa、电压 15kV 时输出平均功率随脉冲重复频率的变化曲线。可以看出,

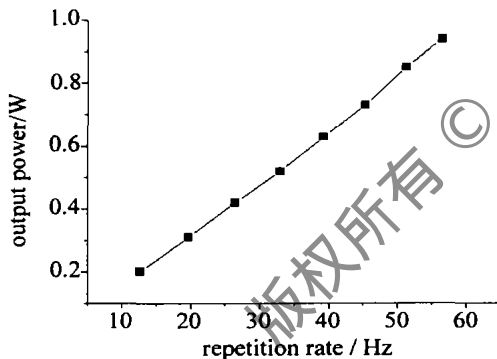


Fig. 2 Dependence of output power on pulse repetition rate

随着放电的脉冲重复频率的升高,激光器平均输出功率不断的增加,且呈线性关系。输出功率的这种增长趋势在频率达到电源的最高重复频率(56Hz)时仍然没有减弱的趋势。这说明激光的单脉冲能量基本保持常数,如果电源的重复频率可以升高的话,激光器运行的重复频率将继续增加,获得的平均功

率就可能继续增大。

图 3 为典型的激光脉冲波形图。激光脉冲宽度(FWHM)约为 40 μ s,由相应的单脉冲能量(15mJ)可以得到激光脉冲的峰值功率约 375W。

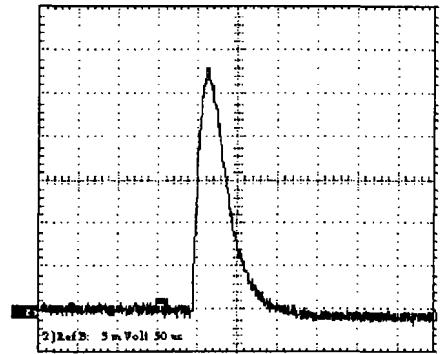


Fig. 3 Typical laser shape
transversal—5mV/div, horizontal—50 μ s/div

3 结 论

成功研制了一种新型的小型纵向电容脉冲放电 CO₂ 激光器,采用了螺旋状外电极横向脉冲预电离技术。从内径 7.5mm、长 50cm 的放电区获得激光脉冲输出能量为 15mJ,脉冲峰值功率达到 375W,脉冲宽度 40 μ s。实验中,激光器的脉冲重复频率受自制的脉冲电源的限制,最高为 56Hz。如果进一步提高电源工作频率,激光器具有在更高重复频率下运转的潜力。这种高重复率脉冲 CO₂ 激光器,可满足激光加工、探测、光电对抗、雷达等方面对脉冲宽度和重复频率的需要,具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] ORCHARD D A, HOLLINS R C. A high pulse repetition rate helium-xenon laser [J]. SPIE, 1997, 3092: 82~85.
- [2] EL-OSEALY M A, JITSUNO T, NAKATSUKA M *et al.* Co axially excited gas lasers toward vacuum ultraviolet region [J]. SPIE, 2000, 3889: 774~779.
- [3] 于延宁, 万重怡, 王东蕾. 一种新型纵向放电脉冲激光器 [J]. 光电子·激光, 2001, 12(8): 810~812.
- [4] 于延宁, 万重怡. 脉冲预电离非自持纵向放电 CO₂ 激光器 [J]. 激光技术, 2003, 27(1): 11~13.
- [5] WHITEMAN W J. The CO₂ laser [M]. Heidelberg: Springer verlag, 1988. 157~168.

(上接第 378 页)

- [3] KOCH F, CHERNIKOV S V, LEWIS S A E *et al.* Characterisation of single stage, dual pumped Raman fibre amplifiers for different gain fibre lengths [J]. Electron Lett, 2000, 36(4): 347~348.
- [4] DIANOV E M, ABRAMOV A A, BUBNOV M M *et al.* 30dB gain Raman amplifier at 1.34 μ m in low loss high GeO₂ doped silica fibres [J]. Electron Lett, 1999, 31(13): 1057~1058.

- [5] LEWIS S A E, CHERNIKOV S V, TAYLOR J R. Gain saturation in silicic fibre Raman amplifier [J]. Electron Lett, 1999, 35(11): 923~924.
- [6] AGRAWAL G P. 非线性光纤光学 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1992. 241~242.
- [7] 邓建中, 刘之行. 计算方法 [M]. 2 版, 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 224~230.