

文章编号: 1001-3806(2008)01-0067-04

光纤喇曼放大器的阈值探析

龙青云¹, 吴庭万²

(1 茂名学院 计算机与电子信息学院, 茂名 525000; 2 华南理工大学 物理科学与技术学院, 广州 510640)

摘要: 为了研究光纤喇曼放大器的阈值特性, 首先由受激喇曼散射的耦合微分方程出发, 采用数值模拟的方法, 描述了光纤喇曼放大器中阈值的产生过程, 给出阈值前后的仿真结果, 强调阈值的重要性。然后在已有研究的基础上, 考虑与实际情况相吻合, 采用理论推导的方法, 得到同向抽运和反向抽运光纤喇曼放大器的阈值公式。并且采用 5 种典型光纤的相应参数, 对影响阈值的各参量进行了详细分析, 抽运方式不同, 阈值不同; 同一种抽运方式中, 各参量对阈值的影响也不同。结果表明, 可以根据各个参量对阈值的不同影响来优化参量以降低阈值, 对于如何提高光纤喇曼放大器的抽运效率以及光纤喇曼放大器的实验工作有一定的参考价值。

关键词: 光通信; 阈值; 数值模拟; 光纤喇曼放大器; 受激喇曼散射

中图分类号: TN929.11; O437 **文献标识码:** A

Analysis of threshold characteristics of fibre Raman amplifier

LONG Qing-yun¹, WU Ting-wan²

(1. Department of Computer & Communication Moming University Moming 525000 China; 2. School of Physics, South China University of Technology Guangzhou 510640, China)

Abstract To study theoretically the threshold characteristics of fibre Raman amplifier (FRA), at first the course of FRA's threshold through the coupling equations of stimulated Raman scattering was presented and the numerical simulation results were given. Then, based on the study before the theoretical expression of forward-pumped and backward-pumped FRA's threshold were obtained considering the practical factors and the effect of all parameters on the threshold was studied in detail under the condition of five typical kinds of fibres. The results are threshold are different with different pumping ways and in the same pumping way, each parameter has different effects on threshold. Finally, conclusion has been got that the threshold of the amplifier can be reduced based on different effects of each parameter which gives some advices for improving the pump efficiency and experiment work of the amplifier.

Key words optical communication; threshold; numeric simulation; fibre Raman amplifier; stimulated Raman scattering

引 言

受激喇曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 是一种重要的三阶非线性光学效应。在光纤通信中, 一方面可以制作光纤喇曼激光器、光纤喇曼放大器 (fibre Raman amplifier, FRA) 等; 另一方面也会成为串扰噪声的来源, 即发生高频信号向低频信号的能量转移。其中, 随着光纤通信系统容量的急剧扩大, 掺铒光纤放大器的带宽和饱和输出功率满足不了未来的要求, 需要新的宽带放大器, FRA 应运而生, 因其具有分布式放大、低噪声以及宽带宽等优点, 成为近年来的研究热点^[1-3]。

FRA 基于光纤中的 SRS 效应, 只要合适波长的抽

运光和信号光注入到传输光纤中, 信号光将得到放大。目前, 大量工作集中于 FRA 的特性分析, 包括增益、噪声、偏振相关特性等^[4-5]。阈值也是 FRA 的重要特性之一^[6-8], 它直接影响 FRA 的抽运效率以及器件的性价比。在已有研究基础上^[4,6], 作者试图对阈值进行全面分析, 总结阈值的产生过程, 对同向和反向抽运 FRA 的阈值公式进行理论推导, 系统分析各参量对阈值的影响, 并提出降低阈值的方法。

1 阈值的产生

关于阈值, 现在存在着两种观点。第 1 种观点, 认为“SRS 是没有阈值的”^[8]。因为“这和事实不符, FRA 工作的情况远在阈值之下, 而按照常规理解此时 SRS 是不发生的”。第 2 种观点认为 FRA 有阈值, 这是大部分人赞同的观点。阈值的定义为: 在长为 L 的光纤输出端, 信号光功率和抽运光功率相等时, 所需要的输入抽运光功率^[6]。称信号光和抽运光分别在其

作者简介: 龙青云 (1982-), 女, 助教, 主要从事光纤通信器件的相关研究。

E-mail: lian14965@163.com

收稿日期: 2007-03-05; 收到修改稿日期: 2007-05-21

输出端的功率相等为阈值条件,对应的输入抽运光功率为阈值功率 P_{th} 。根据这一定义,在作者已有研究中^[6],对第1种观点进行了说明,指出 FRA 工作在阈值之下的原因来自于现有书本上的阈值公式是在一定条件下的近似值。

可以从 FRA 原理的角度出发,分析阈值的产生过程。FRA 中的 SRS 现象基于自发喇曼散射,其耦合微分方程为^[9]:

$$\frac{dI_i}{dz} = -\alpha I_i + I_i \sum_{j=0}^{i-1} g_R(j, i) I_j - I_i \sum_{k=i+1}^n g_R(i, k) I_k + \sum_{j=0}^{i-1} C_j I_j \frac{g_R(j, i)}{g_R(j, m)} \Delta\nu - \sum_{k=i+1}^n C_k I_k \frac{g_R(j, k)}{g_R(k, m)} \Delta\nu \quad (1)$$

式中, I 为光强 (单位: MW/cm^2), z 为光纤长度 (单位: km), α 为光纤的损耗系数 (单位: km^{-1}), C 为自发喇曼散射系数, g_R 为光纤的喇曼增益系数 (单位: m/W)。将信号光频谱宽度分割为 n 份,每一份频率间隔为 $\Delta\nu$ (单位: m^{-1}) (只要频率间隔小于抽运光的线宽,可以把各个频率区间看作同抽运源一样的许多个独立光源),则 $g_R(j, i)$ 为以第 j 频率区间为抽运光,第 i 频率区间为信号光的喇曼增益系数值, $g_R(j, m)$ 为其最大值。方程中右边第 1 项表示光纤的传输损耗;第 2 项、第 3 项分别代表第 i 频率区间内的光对从第 0 到 $i-1$ 频率区间内所有光的受激喇曼吸收和对从第 $i+1$ 到 n 频率区间内所有光的受激喇曼放大;第 4 项、第 5 项是相应的自发喇曼吸收和自发喇曼放大,由于其值非常小,当信号光强不为 0 时,通常省略^[45]。

采用 1064nm 抽运源, G652 光纤,且 g_R 近似为洛伦兹型时,抽运光强 I_p 分别小于、等于、大于阈值光强 I_{th} (阈值计算采用现有书本上的公式,见文献[6])时的仿真结果见图 1~图 3。

由仿真过程得可知当抽运光强小于阈值光强时,散射光强随抽运光强增加而线性增加;当抽运光强大于阈值光强时,散射光强呈现指数形式的增长;而抽运光强等于阈值光强便是前述两者的转折点,阈值的产生过程及其物理意义正在于此。此外,所有的散射光强在光纤长度上呈现的“几”字形分布,说明对应于一定抽

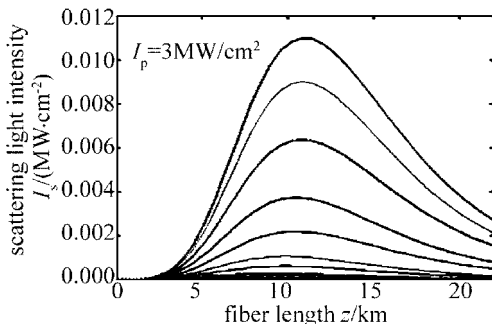


Fig 1 Scattering light intensity when $I_p = 3 \text{ MW}/\text{cm}^2$

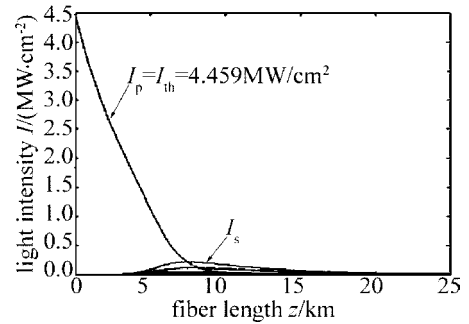


Fig 2 Light intensity when $I_p = I_{th} = 4.459 \text{ MW}/\text{cm}^2$

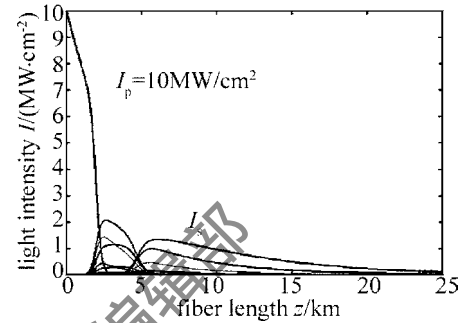


Fig 3 Light intensity when $I_p = 10 \text{ MW}/\text{cm}^2$

运功率,每一频率区间的信号光都对应一个散射光强最大的光纤长度,此结论和文献[6]中得到的结论一致。

2 阈值公式

2.1 阈值公式的推导

抽运方式不同,信号放大的过程也不同。阈值公式的推导可分两种情况:同向抽运 FRA、反向抽运 FRA。在光纤传输系统 (特别是波分复用系统) 中,同向抽运 FRA 的信号光从一开始就能迅速得到放大,其功率可以接近抽运光功率,因此为了与实际更吻合,应考虑抽运光转移给信号光的能量^[6];反向抽运 FRA 的信号光和抽运光沿相反方向传输,被放大的是微弱信号,在一定的抽运功率条件下,可忽略抽运光转移给信号光的能量。另外,为了对两种抽运方式进行对比,在 1550nm 波段,可认为信号光和抽运光频率处光纤的损耗系数为常数,即 $\alpha_s = \alpha_p = \alpha$ ^[6]。以下分别对它们进行推导。

2.1.1 同向抽运 FRA 的阈值 假设信号光和抽运光都沿 z 轴的正方向传播,在连续波情况下,信号光和抽运光的耦合方程为:

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \frac{g_R}{A_{eff}} P_p(z) P_s(z) - \alpha_s P_s(z) \quad (2)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\frac{V_p}{V_s} \frac{g_R}{A_{eff}} P_p(z) P_s(z) - \alpha_p P_p(z) \quad (3)$$

式中, $P_s(z)$, $P_p(z)$ 分别是信号光和抽运光沿光纤分布的光功率,已知初始信号光功率 $P_s(0)$; ν_s , ν_p 分别是信号光和抽运光的频率; A_{eff} 为光纤有效面积;考虑抽运光转移给信号光能量,即联立 (2) 式、(3) 式进行

求解, 得到阈值功率公式为:

$$\frac{P_{th}}{\exp\left(\frac{g_R L_{eff} P_{th}}{A_{eff}}\right)} = P_s(0) \exp\left[\frac{V_p g_R L_{eff} P_s(0)}{V_s A_{eff}}\right] \quad (4)$$

通常近似为:

$$P_{th} = \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (5)$$

式中, $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha z)] / \alpha$, 表示光纤的有效作用长度。

2.1.2 反向抽运 FRA 的阈值 假设信号光沿 z 轴的正方向传播, 抽运光沿 z 轴负方向从 $z=L$ 到 $z=0$, 在连续波情况下, 信号光和抽运光的耦合方程为:

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \frac{g_R}{A_{eff}} P_p(z) P_s(z) - \alpha_s P_s(z) \quad (6)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = \frac{V_p}{V_s} \frac{g_R}{A_{eff}} P_s(z) P_p(z) + \alpha_p P_p(z) \quad (7)$$

式中各参量含义和前面相同, 且已知 $P_s(0)$ 。忽略抽运光转移给信号光的能量, 即不考虑 (7) 式等号右边第 1 项, 联立 (6) 式、(7) 式, 可得阈值功率公式:

$$P_{th} = P_s(0) \exp\left\{\frac{g_R}{A_{eff}} \frac{P_{th}}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)]\right\} \quad (8)$$

通常近似为^[10]:

$$P_{th} = \frac{20A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (9)$$

2.2 阈值公式的分析

由同向抽运 FRA 的阈值公式 (4) 式、(5) 式以及反向抽运 FRA 的阈值公式 (8) 式、(9) 式, 可知阈值与多个参量有关。图 4~图 6 是采用文献 [6] 中的参量

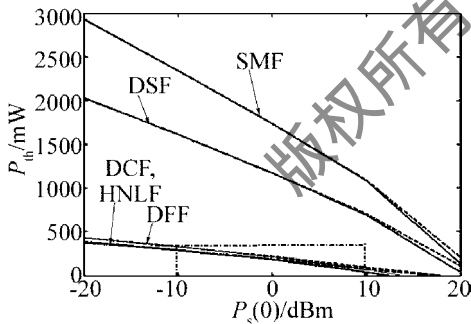


Fig 4 P_{th} and $P_s(0)$ of forward and backward pumped FRA for SMF, DSF, DCF, HNLFF and DFF

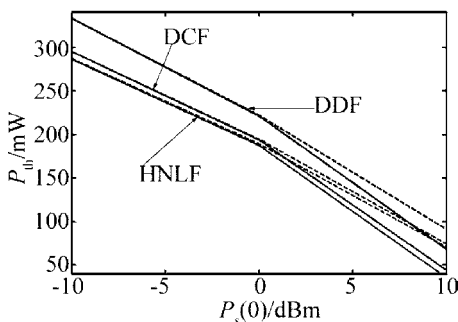


Fig 5 P_{th} and $P_s(0)$ of forward and backward pumped FRA for DCF, HNLFF and DFF

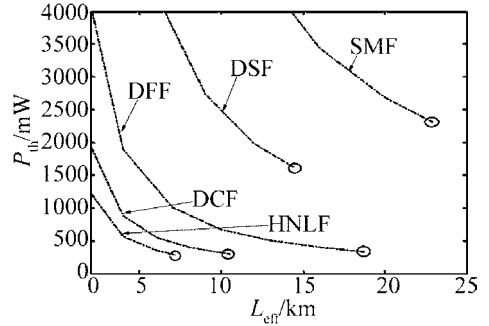


Fig 6 P_{th} and L_{eff} of forward and backward pumped FRA for SMF, DSF, DCF, HNLFF and DFF

值, 并取人们尝试用作 FRA 的 5 种典型光纤^[11] 的相应参数 (见表 1) 得到的结果 (图中虚线表示反向抽运 FRA, 实线表示同向抽运 FRA。其中图 5 是图 4 虚线框以下的放大图), 由此可得各参量对阈值的影响。

Table 1 The Raman characteristics of five different kinds of fiber

fiber	$\alpha / (\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})$	$A_{eff} / \mu\text{m}^2$	$g_R / (10^{-14} \text{m} \cdot \text{W}^{-1})$
standard mode fiber (SMF)	0.190	80.0	1.52
dispersion shifted fiber (DSF)	0.300	50.0	2.08
dispersion flattened fiber (DFF)	0.231	23.9	3.11
dispersion compensating fiber (DCF)	0.412	15.3	3.93
high nonlinear fiber (HNLFF)	0.600	11.5	4.41

(1) 初始信号光功率对阈值大小影响很大。对于任意光纤, 随着 $P_s(0)$ 增加, 阈值减小。理论上, 阈值的最小值可为 0。

$P_s(0)$ 对两种抽运方式 FRA 的阈值呈现出这样的变化: 小信号时, 两种抽运方式的阈值相差不大, 从图中来看, 几乎相同; 大信号时, 反向抽运 FRA 的阈值明显高于同向抽运 FRA, 且两者的差距随着 $P_s(0)$ 增加而增加。这由抽运方式本身决定。同向抽运 FRA 的阈值虽然小, 但信号光和抽运光同时注入光纤时, 抽运光功率的波动容易引入相对强度噪声, 且同向时偏振相关增益影响也大一些。

(2) 光纤类型包括 α , A_{eff} , g_R 等参量。由图 4~图 6 可知, FRA 采用 DCF, DFF, HNLFF 3 种光纤时, 其阈值要远远低于采用 SMF 和 DSF。并且, 其它参量相同时, SMF 的阈值最高, HNLFF 的阈值最低。这表明光纤类型是影响阈值的重要因素。

(3) 光纤有效作用长度越长, 阈值越低。对任意光纤, 当 L_{eff} 到达其最大值 ($(L_{eff})_{max} = 1/\alpha$) 时, 阈值取得最小值 (图 6 中的圆圈处)。

此外, 图 6 中初始信号光为小信号, 虽然反向抽运

FRA的阈值从数值上稍微高于同向抽运 FRA,但因差别很小,两者曲线几乎重合,说明 L_{eff} 对两种抽运方式 FRA的阈值影响相似。

(4)同向抽运 FRA的阈值还受到抽运光和信号光的频率比等因素的影响。

3 结 论

通过数值仿真 SRS现象,描述了阈值的产生过程。要指出的是,这里着重描述阈值前后 SRS光强的不同。当抽运光强大于阈值光强后,SRS光强将呈现指数形式的增长,并可能出现多阶 SRS现象,其具体分析过程详见其它文献。

理论推导了同向抽运和反向抽运 FRA的阈值公式,其推导的前提条件强调与实际情况相吻合。并且,采用5种典型光纤的参数,对阈值公式进行了详细分析,结果表明:抽运方式不同,阈值不同;而且,同一种抽运方式中,各参量对阈值的影响也不同。可据此结论来优化参量,降低 FRA的阈值,提高 FRA的抽运效率。当然,设计 FRA需要考虑多方面的因素,因此上述结论仅作为设计 FRA的参考,同时对 FRA的实验有一定参考价值。

参 考 文 献

[1] ROTTWITT K, POVLSEN JH. Analyzing the fundamental properties of Raman amplification in optical fibers [J]. IEEE Journal of Light

wave Technology 2005, 23(11): 3597-3605.

- [2] WU B LIK, KONG FM, *et al*. A study of the simulation algorithm for multipumped broadband Raman amplifier [J]. Laser Technology 2005, 29(4): 410-413 (in Chinese).
- [3] LONG Q Y, KONG FM, *et al*. Simplified model design and pump optimization of multipumped fiber Raman amplifiers [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 333-336 (in Chinese).
- [4] DENG H Q, LONG Q Y, WU J F. Gain characteristics of forward pumped Raman fiber amplifier [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2005, 33(10): 44-47 (in Chinese).
- [5] DENG H Q, LONG Q Y. Analysis of the gain characteristics of backward-pumped fibre Raman amplifier [J]. Acta Photonica Sinica 2006, 35(10): 1534-1537 (in Chinese).
- [6] LONG Q Y, WU T W, DENG H Q. The analysis of critical condition of fiber Raman amplifier [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(1): 35-37 (in Chinese).
- [7] XIN X J, YU CH X, REN JH, *et al*. Analysis of the threshold of Raman fiber amplifiers [J]. Acta Photonica Sinica 2002, 31(8): 1003-1006 (in Chinese).
- [8] GENG X, ZHANG ZH. Simulink and its application in fiber telecommunication [J]. Computer Simulation, 2002, 20(12): 121-123 (in Chinese).
- [9] LIU X K, GARMIRE E. Understanding the formation of the SRS Stokes spectrum in fused silica fibers [J]. IEEE J Q E, 1991, 27(4): 1022-1030.
- [10] SHI Sh X, CHEN G F, ZHAO W, *et al*. Nonlinear optics [M]. Xi'an Xidian University Press, 2003, 440-442 (in Chinese).
- [11] JIA D F, LI Sh Ch, SONG L J. Optimized design of fiber Raman amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(7): 808-811 (in Chinese).

(上接第 66页)

照射在基体表面不会造成基体表面温度的很大升高。另一方面,一般金属的热导率很高,当激光束移走后,可通过金属基体本身进行快速冷却,当工艺参数适当时,可以在不损伤基体的前提下完全去除基体表面的油漆层。激光功率密度在脱漆过程中是非常重要的参数,增加功率可去除更多的油漆。如果在增加功率的同时提高扫描速度,则可以减小激光束与物质的作用时间,减小对基体的热效应,减小基体的变形、表面损伤等,同时可提高脱漆速度。选取合适的工艺参数,能完全清除漆板表面的油漆而不损伤基体,并可获得高的清洗效率和好的清洗效果。

参 考 文 献

[1] SONG F, LIU S J, ZOU W F. Laser cleaning—removal of rust and paint [J]. Cleaning World 2005, 21(11): 38-41 (in Chinese).

[2] KIM T, LEE JM, CHO SH, *et al*. Aoustic emission monitoring during laser shock cleaning of silicon wafers [J]. Optics and Laser in Engi-

neering 2005, 43(9): 1010-1020.

- [3] BRYGO F, DUTOUQUET C, GUERN F L, *et al*. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation [J]. Applied Surface Science 2006, 252(6): 2131-2138.
- [4] DAURRLO G, CHIFFA M, CINQUEPALM IM. Laser surface cleaning: de-rusting, de-painting and de-oxidizing [J]. Appl Phys 1999, A69(7): S543-S546.
- [5] LIU H. X, CHEN Z G. High power CO₂ laser using in aircraft laser paint removing [J]. Laser Journal 2002, 23(6): 52-53 (in Chinese).
- [6] LI J C. Laser diffraction and heat effect calculation [M]. Beijing Science Press 2002, 341-432 (in Chinese).
- [7] WATKINS K G, CURRAN C, LEE JM. Two new mechanisms for laser cleaning using Nd:YAG sources [J]. Journal of Cultural Heritage 2003, 4(S1): 59-64.
- [8] ROBERTS D E. Pulsed laser coating removal by detachment and ejection [J]. Appl Phys 2004, A79(5): 1067-1070.
- [9] ZHANG Y K, ZHOU J Z, YE Y X. Laser process technology [M]. Beijing Chemical Industry Press 2004, 106-122 (in Chinese).
- [10] GUO Y J, LU C S, HE C L, *et al*. 89-1 coating for laser surface hardening [J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 252-254 (in Chinese).