

文章编号: 1001-3806(2003)04-0349-03

## 光纤喇曼放大器的功率转换效率分析\*

梅进杰 刘德明 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉, 430074)

摘要: 在定义光纤喇曼放大器(FRA)功率转换效率(PCE)的基础上, 考察了不同工作条件下光纤喇曼放大器的功率转换效率, 分析 PCE 与光纤喇曼放大器的输入信号功率、输入泵浦功率和光纤长度的关系, 比较了分布式与集总式 FRA 的功率转换效率, 给出提高 FRA 功率转换效率的途径。

关键词: 光放大; 光纤喇曼放大器; 功率转换效率; 增益饱和

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Analysis of power conversion efficiency of fiber Raman amplifiers

Mei Jinjie, Liu Deming, Huang Dexiu

(Department of Optoelectronics Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract** After defining the power conversion efficiency(PCE) of fiber Raman amplifiers(FRAs), the PCE of Raman amplifiers under different conditions is analyzed. Then the changes of PCE with input power, input power and gain fiber length of FRAs are discussed. The difference of PCE between the distributed FRA and the discrete FRA is compared. Finally how to improve the PCE of FRAs is presented.

**Key words:** optical amplification; fiber Raman amplifier(FRA); power conversion efficiency(PCE); gain saturation

### 引 言

随着高功率泵浦激光器技术的成熟, 光纤喇曼放大器(FRA)重新引起人们的极大兴趣。喇曼放大器以传输光纤作为增益介质实现分布放大, 具有高增益、高饱和输出功率、低噪声、宽带宽、工作波长不受限制等特性, 成为下一代超长距离、超大容量密集波分复用系统(DWDM)的关键技术。近来演示了基于全喇曼放大 7400km 的 DWDM 传输实验, 在 74nm 的带宽内传输了 2.4Tbit/s 的总容量<sup>[1]</sup>。使用频带交叉复用喇曼放大技术, 在 32×43Gbit/s 的 DWDM 实验中, 双向无中继传输 200km<sup>[2]</sup>。

光纤喇曼放大器至今没有在光通信系统中得到真正实用, 主要原因是成本太高, 而价格昂贵的高功率泵浦源占据其成本的极大部分。提高功率转换效益, 以降低 FRA 的泵浦功率需求, 是 FRA 走向实用的关键技术之一。

在掺铒光纤放大器(EDFA)中, 功率转换效率

强烈依赖铒离子的掺杂浓度。高粒子数反转的 C 带 EDFA 功率转换效率  $\alpha_{PCE}$  可达 26.7%<sup>[3]</sup>, 深度饱和时, 可超过 76.4%<sup>[4]</sup>。但在 L 带 EDFA 中, 粒子数反转水平较低,  $\alpha_{PCE}$  较低, 在 17.2% 以下<sup>[5]</sup>。对于 1047nm 泵浦的掺铈光纤放大器(TDFA),  $\alpha_{PCE}$  大约为 10%~12%, 使用双波长(1047nm, 1200nm)泵浦,  $\alpha_{PCE}$  能提高到 15% 以上<sup>[6]</sup>。为提供足够大的增益, 光纤喇曼放大器需要数百毫瓦以上的泵浦源, 一般认为  $\alpha_{PCE}$  较低, 但到目前, 只有少量特殊情况下的实验测定<sup>[7]</sup>, 还没有详细的理论分析。

笔者考察了不同工作条件下光纤喇曼放大器的功率转换效率, 分析了 PCE 与光纤喇曼放大器的输入信号功率、输入泵浦功率和光纤长度的关系, 比较了分布式与集总式 FRA 的功率转换效率, 给出提高 FRA 功率转换效率的途径。

### 1 理论基础

参考 EDFA, TDFA 的 PCE 定义<sup>[8,9]</sup>, 分布式光纤喇曼放大器的功率转换效率可定义为:

$$\alpha_{PCE} = \frac{P_s^{out} \cdot e^{\alpha_s L} - P_s^{in}}{P_p^{in}} = \frac{P_s^{in}}{P_p^{in}} (G_{off} - 1) \quad (1)$$

式中,  $P_s^{out}$ ,  $P_s^{in}$ ,  $P_p^{in}$  分别为信号输出功率、信号输入功率和泵浦输入功率,  $\alpha_s$  为光纤在信号波长处的

\* 国家高技术研究发展计划招标课题。

作者简介: 梅进杰, 男, 1970 年 6 月出生。博士研究生。现从事光放大器及光通信的研究工作。

收稿日期: 2003-01-04; 收到修改稿日期: 2003-02-27

衰减系数,  $L$  为增益光纤长度,  $G_{\text{on/off}}$  为开关增益。为了与 EDFA 和 TDFA 比较, 喇曼放大器输出信号功率应加上传输光纤的损耗部分。

集总式 FRA 的功率转换效率为:

$$\alpha_{\text{PCE}} = \frac{P_s^{\text{out}} - P_s^{\text{in}}}{P_p^{\text{in}}} = \frac{P_s^{\text{in}}}{P_p^{\text{in}}} (G - 1) \quad (2)$$

式中,  $G$  为 FRA 的净增益。

不考虑背向瑞利散射, FRA 中信号光、喇曼自发辐射 (ASE)、泵浦光的传输等式为:

$$\begin{aligned} \frac{dP_s(z)}{dz} &= -\alpha_s P_s(z) + \frac{g_R}{k_{\text{eff}} \cdot A_{\text{eff}}} P_p(z) P_s(z), \\ \frac{dP_{\text{ASE}}(z)}{dz} &= \int_V [-\alpha_p P_{\text{ASE}}(z, \nu) + \\ &h \nu \frac{g_R (\nu_p - \nu)}{A_{\text{eff}}} P_p(z) \left( 1 + \frac{1}{e^{h(\nu_p - \nu)/kT} - 1} \right)] d\nu, \\ \frac{dP_p(z)}{dz} &= -\alpha_p P_p(z) - \frac{\lambda_s}{\lambda_p} \cdot \frac{g_R}{k_{\text{eff}} \cdot A_{\text{eff}}} P_p(z) P_s(z) - \\ &P_p(z) \cdot \int_V h \nu \frac{g_R (\nu_p - \nu)}{A_{\text{eff}}} \left( 1 + \frac{1}{e^{h(\nu_p - \nu)/kT} - 1} \right) d\nu \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $P_s(z)$ ,  $P_{\text{ASE}}(z)$ ,  $P_p(z)$  分别为距离  $z$  处信号功率、ASE 功率和泵浦功率,  $g_R$  为喇曼增益系数,  $k_{\text{eff}}$  为偏振相关系数,  $A_{\text{eff}}$  为光纤在泵浦频率  $\nu_p$  处的有效面积,  $\lambda_s$ ,  $\lambda_p$  分别为信号波长和泵浦波长,  $\alpha_s$ ,  $\alpha_p$  分别为频率  $\nu$  和  $\nu_p$  处的光纤衰减系数,  $h$  为 Planck 常数,  $k$  为 Boltzman 常数,  $T$  为环境温度。该式考虑了光纤的衰减、偏振依赖性、温度的变化和 ASE 的宽谱特性。通过对微分表达式(3)式的计算机数值求解, 可同时给出所有频率传输波的解。

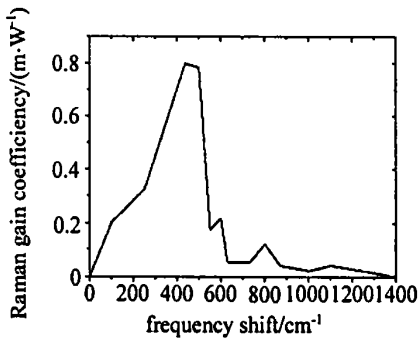


Fig. 1 The approximated Raman gain profile in fibers

光纤的喇曼增益带宽达 40THz, 主峰宽度达 13THz。为了精确分析整个喇曼增益谱内产生的自发辐射功率, 可将喇曼增益曲线用分段折线拟合, 如图 1 所示。该折线与实际测量的增益曲线相当接近<sup>[10]</sup>。

## 2 分析结果

由(1)式~(3)式可以看出, 功率转换效益依赖放大器的参数和工作状态。下面具体分析分布式和集总式喇曼放大器的 PCE 与输入信号功率、输入泵浦功率和增益光纤长度的关系。

图 2 为不同泵浦功率下, 分布式光纤喇曼放大器的信号和 ASE 输出功率随信号输入功率的变化情况。该 FRA 的增益介质为 50km 的色散位移光纤 (DSF), 信号和泵浦波长分别为 1555nm, 1453nm。随着输入信号功率的增加, 信号输出功率逐渐增加, ASE 输出功率下降, FRA 逐渐饱和。在输入信号功率很小, 且泵浦功率比较小时, 即小信号、小增益放大时, ASE 功率可与信号功率相比拟, ASE 对 FRA 输出信噪比和  $\alpha_{\text{PCE}}$  的影响较大。深度饱和时, ASE 功率远小于信号功率, ASE 的影响可忽略不计。泵浦功率越大, ASE 的影响越小。

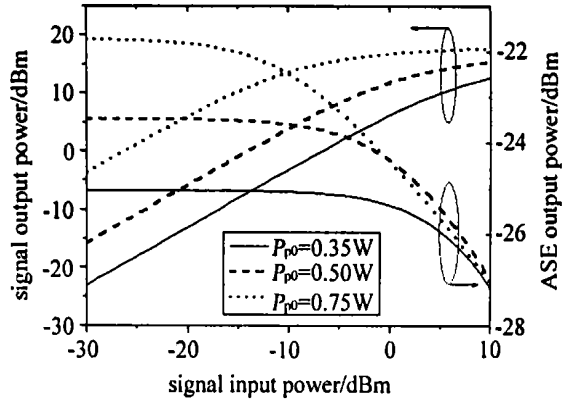


Fig. 2 The output signal and ASE power of distributed FRA

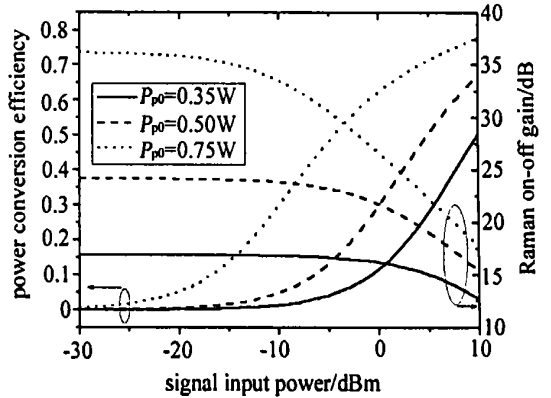


Fig. 3 The  $\alpha_{\text{PCE}}$  and on/off gain of distributed FRA varying with the signal input power

不同泵浦功率下, 分布式 FRA 的功率转换效益和开关增益随信号输入功率的变化如图 3 所示。随着输入信号功率增加, 喇曼增益下降, 喇曼放大器逐渐饱和,  $\alpha_{\text{PCE}}$  逐渐增加。喇曼放大器饱和越深,  $\alpha_{\text{PCE}}$  越大。在饱和的过程中, 饱和逐渐加深,  $\alpha_{\text{PCE}}$  迅速增

加。对于 0.75W 的泵浦功率,当输入信号功率从 -30dBm 增加到 -20dBm,增益从 36.2dB 下降到 35.8dB,  $\alpha_{PCE}$  从 0.55% 增加到 5.1%;当输入信号功率从 -20dBm 增加到 -10dBm,增益下降到 33.5dB,  $\alpha_{PCE}$  增加到 29.7%。当输入信号功率为 10dBm 时,  $\alpha_{PCE}$  可达到 77.7%。泵浦功率越大,喇曼放大器饱和越快,喇曼放大器饱和越深,  $\alpha_{PCE}$  越大。当泵浦功率分别为 0.35W, 0.5W, 0.75W, 增益下降 3dB (开始饱和) 所对应的输入信号功率分别为 8dBm, 1dBm, -9dBm, 此时的  $\alpha_{PCE}$  分别为 41.2%, 33.8%, 33.5%。当输入信号功率很大,对不同泵浦功率,喇曼放大器饱和程度差别减小,  $\alpha_{PCE}$  将趋向一致。

图 4 为不同输入信号功率下分布式 FRA 功率转换效率随增益光纤长度的变化。0.5W 的输入功率泵浦 DSF 增益光纤。随着光纤长度增加,喇曼增益迅速上升。当光纤到达有效长度,增益基本保持不变。增益光纤长度从 10km 增加到 80km,小信号放大时的功率转换效率变化很小,对于 -10dBm 和 -20dBm 的输入信号,  $\alpha_{PCE}$  分别从 0.03% 增加到 0.6%, 从 0.3% 到 5.8%。当输入信号功率为 0dBm, FRA 接近饱和,超过有效长度后的  $\alpha_{PCE}$  基本不变,可达到 31%。

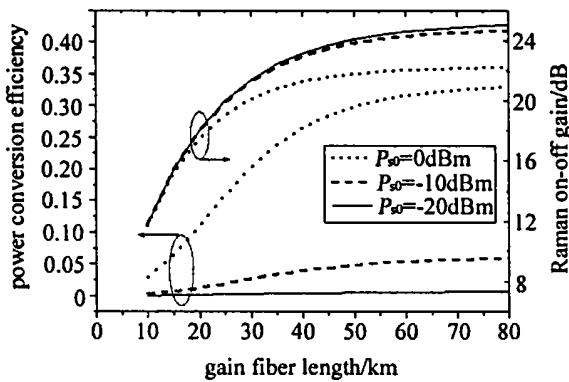


Fig. 4 The  $\alpha_{PCE}$  and on-off gain of distributed FRA varying with gain fiber length

同样可以分析集总式光纤喇曼放大器的功率转换效率。8km 色散补偿光纤 (DCF) 喇曼放大器的 PCE 和净增益随输入信号功率的变化如图 5 所示,其变化规律与分布式 FRA 类似。由于 DCF 的喇曼增益系数较高,对于相同的泵浦功率,集总式 FRA 在更小的输入信号功率下即可饱和。对于 0.35W, 0.5W 的泵浦功率,增益下降 3dB 所对应的输入信号功率分别为 -11.2dBm, -24.8dBm, 此时的  $\alpha_{PCE}$  分别为 17.1%, 16.5%, 比分布式 FRA 的  $\alpha_{PCE}$  低,原因在于信号功率在传输光纤内地损耗达 4dB。同

样的原因,深度饱和时的  $\alpha_{PCE}$  也比分布式 FRA 低,只能达到 35%。可见对于集总式 FRA,当泵浦功率较大,在很小输入信号功率下, FRA 即可接近饱和,其  $\alpha_{PCE}$  可达到 16%。

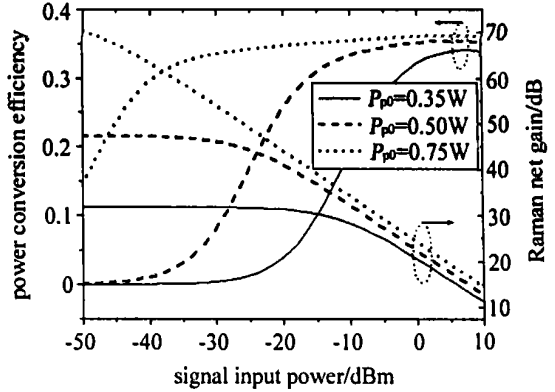


Fig. 5 The  $\alpha_{PCE}$  and net gain of discrete FRA varying with the signal input power

图 6 为输入信号功率变化时,集总式 DCF 喇曼放大器的功率转换效率和净增益随放大光纤长度的变化曲线。输入泵浦功率为 0.65W。随着光纤长度增加,喇曼放大器逐渐饱和,  $\alpha_{PCE}$  和喇曼增益逐渐增加到最大值。长度进一步增加,光纤损耗增加,  $\alpha_{PCE}$  开始下降。对不同的输入信号功率,  $\alpha_{PCE}$  到达最大值所对应的光纤长度不同,当输入信号功率分别为 -10dBm, -20dBm, -30dBm 时,最大  $\alpha_{PCE}$  为 46.6%, 38.1%, 29.9%, 所对应的光纤长度为 4.9km, 6.5km, 8.1km。输入信号功率越大,达到饱和和需要的增益光纤长度越短,所能达到的最大  $\alpha_{PCE}$  越大,但增益越小。为提高集总式 FRA 的 PCE,同样要使集总式 FRA 工作于饱和状态,且增益光纤有一最佳长度。

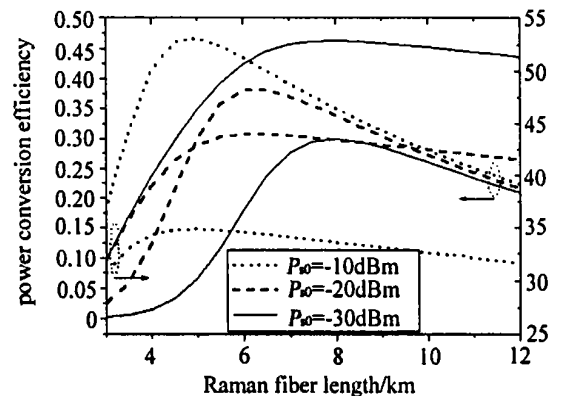


Fig. 6 The  $\alpha_{PCE}$  and net gain of discrete FRA varying with gain fiber length

### 3 结论

在定义光纤喇曼放大器功率转换效率的基础

(下转第 356 页)

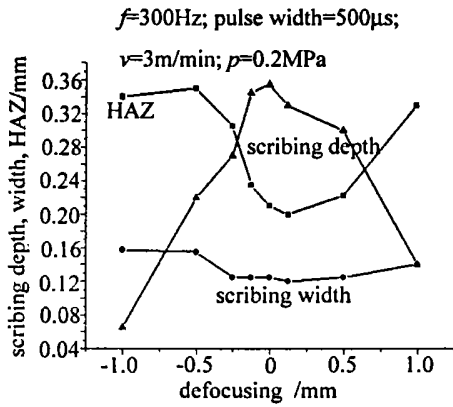


Fig. 11 The influence of defocusing to scribing parameter

用氩气和氮气,划缝发黑,而使用氧气,划缝颜色和氧化铝材料的颜色一样,使用压缩空气,划缝颜色介于上述两种气体之间。从经济的角度,一般使用过滤干燥的压缩空气即可达到所需的表面颜色。

图12是作者研制的RF CO<sub>2</sub>激光陶瓷划片机所加工的氧化铝陶瓷基片样品。



Fig. 12 The processed samples of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic by RF CO<sub>2</sub> laser

### 3 总结

应根据所使用的激光器的性能及到达陶瓷表面的激光束性能选择陶瓷划片的工艺参数。由于激光

(上接第351页)

上,分析了分布式和集总式FRA的PCE与放大器参数和工作状态的关系,可得出以下结论:(1)在小信号增益下,分布式喇曼放大器的功率转化效率小于5%,比EDFA和TDFA低。(2)当工作于饱和状态,分布式FRA的 $\alpha_{PCE}$ 可到达34%,比C带EDFA略高,远高于TDFA。(3)集总式FRA在饱和下的 $\alpha_{PCE}$ 只能到达16%,原因在于放大器内数公里长的光纤损耗。(4)喇曼放大器的功率转换效率主要依赖其饱和程度,放大器饱和越深, $\alpha_{PCE}$ 越高。要提高光纤喇曼放大器的功率转换效率,须使FRA尽量接近饱和工作状态,当输入信号功率较小,需要较大的泵浦功率。(5)分布式FRA的增益光纤只要大于有效长度,都能使其 $\alpha_{PCE}$ 最大。当超过有效长度,再增加增益光纤长度,喇曼增益和功率转换效率都基本保持不变。对于集总式FRA,有一最佳长度,使其 $\alpha_{PCE}$ 最大。

### 参考文献

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

器的特性以及激光束和材料相互作用的过程的复杂性决定了刻槽深度、宽度和热影响区和工艺参数的变化并非是简单的线性关系。对不同的RF激光器和不同的激光束有不同的划片工艺参数。但RF激光器对氧化铝陶瓷划片工艺还是有一些规律可循:

(1)根据氧化铝陶瓷材料的特殊物理性质,若以激光为主要加工方式时,应以脉冲模式为最佳;(2)控制断裂切割是以裂痕连结对向为加工的主要方式,因此低功率、短脉冲是可行的加工模式;(3)为避免过高的吹气压力造成裂痕异常扩散而破裂,应考虑运用低压辅助空气吹气;(4)利用平均功率、脉冲频率、占空比、划片速度和辅助空气压力等的正交实验可优化陶瓷划片的工艺参数;(5)用RF激光器进行陶瓷划片时,脉冲频率比其他加工参数有较大的选择空间;(6)划片速度根据单脉冲激光能量作用在陶瓷基片时,在材料表面造成的热扩散裂痕面积的直径及相邻两脉冲所造成的热扩散裂痕面积的重叠率和脉冲频率而定。

### 参考文献

- [1] 朱企业. 激光精密加工. 北京: 机械工业出版社, 1990: 125.
- [2] 李力钧. 现代激光加工及其装备. 北京: 北京工业大学出版社, 1993: 164.
- [3] 汪秀琳, 姜兆华, 吴宾初. 上海交通大学学报, 1997, 31(10): 80~82.
- [4] 张铭峰, 郑邵家, 张胜雄 *et al.* 中国激光, 2000, 27(11): 1045~1049.
- [1] Shimojoh N, Naito T, Tanaka T *et al.* 2.4Tbit/s WDM transmission over 7400 km using all Raman amplifier repeaters with 74nm continuous single band. European Conf. Optical Communication, 2001, TuA2.4: 162~163.
- [2] Kinjo K, Mizuochi T, Kajiya S. Electron Lett, 2002, 38: 579~580.
- [3] Myslinski P, Szubert C, Bruce A J *et al.* IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11: 973~975.
- [4] Myslinski P, Nguyen D, Chrostowski J. J Lightwave Technol, 1997, 15: 112~114.
- [5] Muro R D, Jolley N E, Mun J. Measurement of the quantum efficiency of long wavelength EDFAs with and without an idler signal. European Conf. Optical Communication, 1998, Post Deadline Paper: 20~24.
- [6] Sakamoto T. S-band Fiber Optic Amplifiers. OFC' 2001, 2001, Paper TuQ1: 1~4.
- [7] Lewis S A E, Chemikov S V, Taylor J R. Electron Lett, 1999, 35: 923~924.
- [8] Kagi N, Oyobe A, Nakamura K. IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2: 559~561.
- [9] Aozasa S, Masuda H, Sakamoto T *et al.* Electron Lett, 2002, 38: 361~363.
- [10] Kao M S, Wu J. J Lightwave Technol, 1991, 9: 394~398.