

单频光纤拉曼放大器的实验研究*

许将明 冷进勇 韩凯 周朴 侯静†

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011年5月31日收到; 2011年7月27日收到修改稿)

本文进行了 1031 nm 抽运光对 1080 nm 单频信号光的拉曼放大实验, 详细研究了单频信号光种子功率、拉曼增益光纤长度、抽运方式等因素对单频光纤拉曼放大器 (SF-FRA) 输出特性的影响. 结果表明, 在未受激布里渊散射 (SBS) 因素限制时, 相同抽运功率条件下, 单频信号光种子功率越高, SF-FRA 的效率越高; 拉曼增益光纤越长, SF-FRA 的效率越高; 前向抽运时, SF-FRA 的效率较高. 实验中发现 SF-FRA 的拉曼放大过程对单频信号光的线宽有较小的展宽. 此外, 单频信号光远场干涉短曝光图像的对比度为 0.814, 单频信号光与 SF-FRA 放大光远场干涉短曝光图像可见度为 0.719, 表明 SF-FRA 对单频信号光的相干性有一定影响. 实验结论可为其他特殊波长 SF-FRA 的设计提供一定的参考.

关键词: 光纤拉曼放大器, 单频, 输出特性, 影响因素

PACS: 42.65.Dr, 42.55.Wd, 42.25.Kb

1 引言

与传统光纤放大器中通过掺杂粒子的受激辐射获得增益不同, 光纤拉曼放大器 (FRA) 的物理机理是利用石英分子的受激拉曼散射 (SRS) 效应获得增益. SRS 的放大带宽取决于抽运源, 不受光纤掺杂物的影响, 具有增益谱宽、中心波长可变的“全波段”放大特性, 使得 FRA 的输出波长几乎可覆盖整个近红外区^[1], 在通信^[2]及超连续谱产生^[3]等领域得到了广泛应用. 而一些特殊领域, 如引力波探测、非线性频率转换、激光雷达、谱合成及相干合成等, 要求光源的线宽较窄, 需要搭建 SF-FRA.

近年来, 以激光导星 (LGS) 及大气遥感应为背景的 1178 nm, 1271 nm SF-FRA 的研究比较活跃. Feng 等人对 SF-FRA 进行了大量的实验研究, 成功搭建了单路最大输出功率 39 W^[4]、三路合束最大输出功率 60 W^[5] 的 1178 nm SF-FRA, 但由于技术保密等原因, 实验细节的报道较少. Nagel 等人^[6] 搭建了双通道 (dual-channel) SF-FRA, 通过使用特殊设计光纤实现了对 1271 nm 单频信号光的拉曼放大, 两路 SF-FRA 总输出功率为 3W. Vergien 等人^[7] 对 SF-FRA 的抽运方式、拉曼增益光纤长度及芯径大小等因素对放大结果的影响进行了理

论模拟. Leng 等人^[8] 提出了 SF-FRA 中考虑 SBS 因素的强度耦合方程组, 并基于该模型对 SF-FRA 中拉曼增益光纤长度等因素对放大结果的影响进行了模拟. 目前国内方面的研究主要集中在可用于密集波分复用 (DWDM) 超长距离光传输的 FRA^[9], 尚无 SF-FRA 的实验报道.

本文进行了 1031 nm 抽运光对 1080 nm 单频信号光的拉曼放大实验, 详细研究了单频信号光种子功率、拉曼增益光纤长度、抽运方式等因素对 SF-FRA 输出特性的影响; 测量了输出光功率最大时的光谱特性及频谱特性; 研究了 SF-FRA 对单频信号光相干性的影响, 验证了 SF-FRA 输出的放大光可用于相干合束.

2 实验装置

图 1 所示为前向抽运 SF-FRA 结构示意图. 其中 1031 nm 抽运光由自行搭建的主振荡功率放大 (MOPA) 结构的光纤激光器提供, 其种子激光器采用线形腔结构, 1×23 dB 耦合器 (同侧两臂熔接后形成高反的光纤环形镜^[10]) 与半反光纤布拉格光栅 (FBG, 中心波长 1031.1 nm, $R \approx 51.47\%$) 构成谐振腔结构. 再利用 976, 1030 nm 波分复用

* 国家自然科学基金 (批准号: 61077076, 10904173, 11004247) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-08-142) 资助的课题.

† E-mail: houjing25@sina.com

器 (WDM) 将中心波长为 976 nm 的抽运光耦合进增益光纤. 增益光纤为 Nufern 公司生产的单包层高掺杂单模光纤, 纤芯、包层尺寸分别为 6 和 125 μm , 长度为 0.5 m. 种子激光器的最大输出功率为 25 mW, 经过一级预放大后达到 200 mW. 1031 nm 抽运光的主放大级使用的抽运源为 2 个最大输出功率 9 W、中心波长为 976 nm 的尾纤输出激光二极管 (LD). 976 nm 抽运光及预放大级 1031 nm 输出光由 (2+1) \times 1 的合束器 (combiner) 注入到双包层掺杂光纤. 合束器对 976 nm 抽运光及 1031 nm 激光的插入损耗分别为 0.42 dB 和 0.6 dB. 主放大级使用的掺杂光纤为 Nufern 公司生产的双包层掺杂光纤, 纤芯、内包层尺寸分别为 5 和 130 μm , 数值孔径 (NA) 分别为 0.12, 0.46, 纤芯对 976 nm 抽运光

的平均吸收系数为 1.7 dB/m. 为了倾泻剩余 976 nm 抽运光, 在双包层掺杂光纤与传能光纤的熔接处进行了抽运倾泻处理. 主放大器输出的 1031 nm 抽运光最大功率为 4.8 W. 图 2(a) 所示为输出功率最大时的光谱, 其中有一定的放大的自发辐射 (ASE) 成分, 但 ASE 抑制比大于 20 dB. 单频信号光经过预放后的最大输出功率达到 35 mW, 使用光纤光谱仪 (Agilent 86142B) 及法布里 - 珀罗 (F-P) 干涉仪 (FPI 100, fineness 400, 自由光谱域 FSR=4 GHz, Topptica Inc) 测量了单频信号光的光谱及频谱特性, 结果如图 2(b) 所示. 经分析, 预放后的单频信号光线宽约为 8 MHz, 中心波长为 1079.7 nm, ASE 抑制比高于 30 dB.

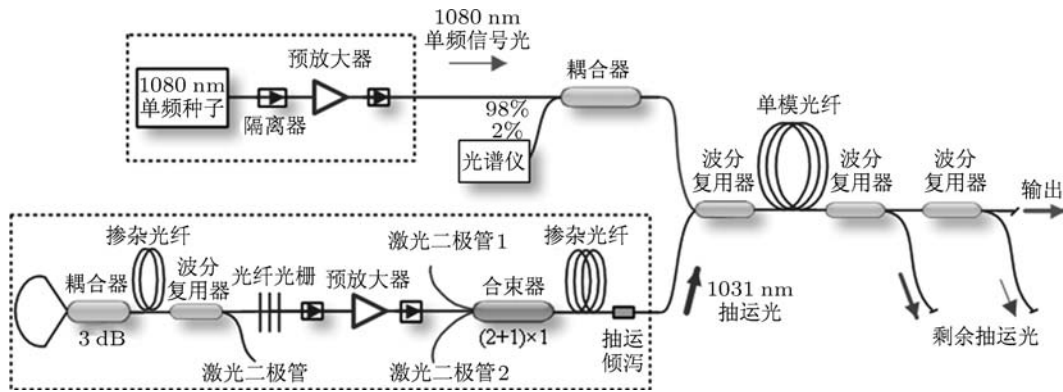


图 1 前向抽运 SF-FRA 结构示意图

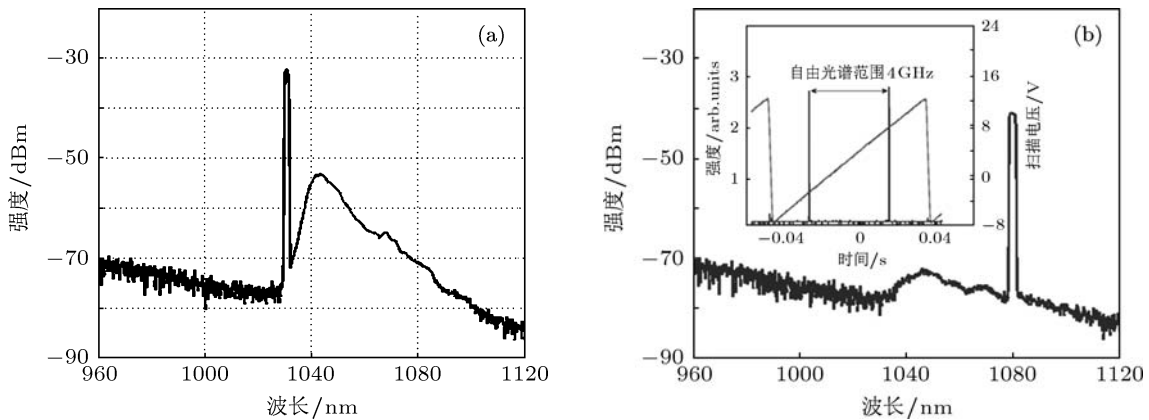


图 2 (a) 1031 nm 抽运光输出功率最大时的光谱; (b) 1080 nm 单频信号光输出功率最大时的光谱及频谱特性

单频信号光及抽运光由 1030, 1080 nm WDM 注入拉曼增益光纤. WDM 对 1031 nm 抽运光的插入损耗为 0.65 dB, 对 1080 nm 单频信号光的插入损耗为 0.48 dB. 拉曼增益光纤采用长飞公司生产的

单模光纤 (SMF, 纤芯、包层直径分别为 6, 125 μm , NA 为 0.14), 最大长度 310 m. 剩余 1031 nm 抽运光由 1030, 1080 nm WDM 的 1030 nm 臂导出, 为保证分光效果, 实验中将两个 WDM 串接用于导

出剩余抽运光. 由于 SF-FRA 输出端及剩余抽运光倾泻端的反射回光可能导致器件损坏, 实验中对 1080 nm 输出端进行了切斜角处理. 此外, 为观察实验中是否有 SBS 产生, 实验中还在单频信号光预放级与 SF-FRA 之间接入了一个 98 : 2 的耦合器, 将 2% 端口输出的后向散射光耦合进光纤光谱仪进行监测.

3 实验结果及讨论

本文实验研究了单频信号光种子功率、拉曼增益光纤长度、抽运方式等因素对 SF-FRA 输出特性的影响. 此外, 为了研究 SF-FRA 的拉曼放大过程对单频信号光相干性的影响, 还分别测量了单频信号光远场干涉短曝光图像的可见度及单频信号光与输出的放大光远场干涉短曝光图像的可见度.

3.1 单频信号光种子功率对输出特性的影响

本文首先研究了单频信号光种子功率大小对 SF-FRA 输出特性的影响, 并测量了 SF-FRA 输出功率最大时的光谱特性及频谱特性. 由于单频信号光预放后的最大功率为 35 mW, 实验中比较了单频信号光种子功率分别为 10 mW, 20 mW 和 30 mW 时 SF-FRA 的放大结果. 为了确保实验系统的安全, 本组比较实验都采用前向抽运方式, 拉曼增益光纤长度为 310 m. 图 3 所示为不同种子功率条件下 SF-FRA 输出功率随抽运功率的变化曲线. 由图可知, 在未受 SBS 因素限制, 且抽运方式及拉曼增益光纤长度相同的条件下, 注入的单频信号光种子功率越大, SF-FRA 的输出功率越大, 即 SF-FRA 的效率越高. 当 1080 nm 单频信号光种子功率为 30 mW, 1031 nm 抽运光功率为 4.7 W 时, 输出功率达到最大值 791 mW, 此时 SF-FRA 的光光转换效率为 16.2%. 输出功率最大时的光谱如图 4 所示, 1031 nm 抽运光及 1031 nm 抽运光中峰值位于 1040 nm 附近的 ASE 光未能完全导出, 但 1080 nm 单频信号光为 1031 nm 抽运光的 26dB 以上. 利用 F-P 干涉仪对 SF-FRA 输出光的频谱特性进行扫描, 得到图 5 所示结果. 经分析可知, 输出光线宽约为 9.7 MHz, 有一定程度的展宽. 由于抽运光功率较低, SF-FRA 输出功率最大时放大光的功率、光谱及频谱均较为稳定, 未观察到级联拉曼现象, 且 SBS 监测端口未观察到 SBS 效应发生.

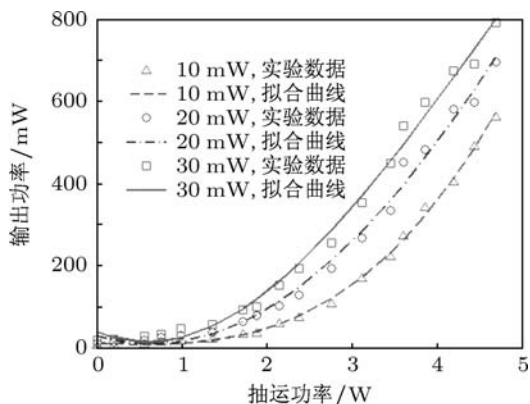


图 3 不同单频信号光种子功率时 SF-FRA 的输出功率与抽运功率的关系

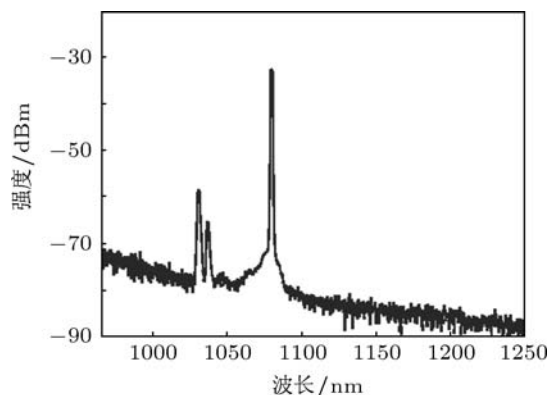


图 4 输出功率最大时的光谱

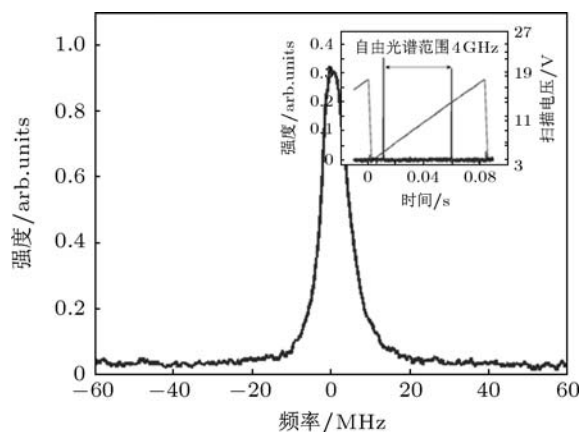


图 5 输出功率最大时的频谱

3.2 拉曼增益光纤长度对输出特性的影响

为了研究拉曼增益光纤长度对 SF-FRA 输出特性的影响, 本文比较了两种单频信号光种子功率条件下拉曼增益光纤长度分别为 310 m 和 205 m 时的放大结果, 四组对比实验都采用前向抽运方式. SF-FRA 输出功率与抽运光功率的关系曲线如图 6 所示, 在未受 SBS 因素限制, 且抽运方式和单

频信号光种子功率相同的条件下, 拉曼增益光纤长度较短时, 相同的抽运光功率对应的输出功率较小, 即 SF-FRA 的效率较低. 此外, 拉曼增益光纤较长时, 非线性增长的抽运功率阈值较低. 受限于 1031 nm 抽运光功率的限制, 本文未能验证 SBS 因素限制下 SF-FRA 最大输出功率与拉曼增益光纤长度的关系.

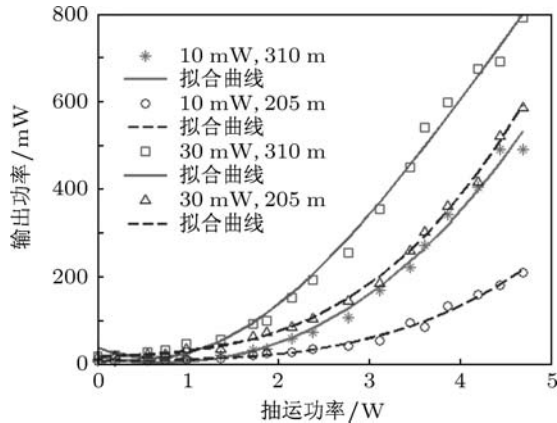


图 6 不同拉曼增益光纤长度时 SF-FRA 的输出功率与抽运功率的关系

3.3 抽运方式对输出特性的影响

图 7 所示为拉曼增益光纤长度为 310 m、单频信号光种子功率为 30 mW 条件下抽运方式对 SF-FRA 输出特性的影响. 在未受 SBS 因素限制, 且抽运功率及单频信号光种子功率相同的条件下, 前向抽运对应的输出功率较高, 即前向抽运时 SF-FRA

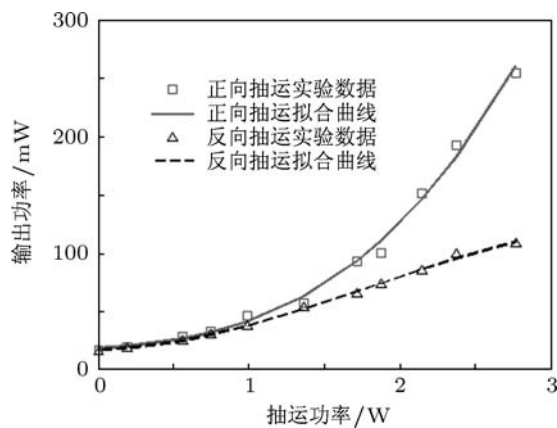


图 7 不同抽运方式时 SF-FRA 的输出功率与抽运功率的关系

的效率更高. 此外, 前向抽运时, 非线性增长的抽运

功率阈值较低. 这是由于 SF-FRA 中抽运方式不同会导致拉曼增益光纤内的抽运光功率分布存在差异, 使得单频信号光的增益过程不同. 前向抽运时, 靠近单频信号光输入端的拉曼增益光纤上的抽运光功率较高, 输入的单频信号光得以迅速增长; 后向抽运时, 单频信号光输入端的抽运光功率较低, 使得单频信号光的拉曼增益较低.

由于使用的 1030, 1080 nm WDM 两臂分光性能有限, 在进行后向抽运实验时, 为避免过高功率的剩余抽运光及后向瑞利散射光进入 1080 nm 单频信号光的预放级造成器件损坏, 未进行更高抽运功率下的后向抽运放大实验.

3.4 SF-FRA 对单频信号光相干性的影响

受 SBS 等非线性效应的限制, 单路 SF-FRA 输出功率较低, 实际应用中常需要进行多路 SF-FRA 的相干合束. 为研究 SF-FRA 输出光是否可用于相干合束及 SF-FRA 放大过程对单频信号光相干性的影响, 本文还分别测量了单频信号光及 SF-FRA 输出的放大光的相干性, 测量原理如图 8 所示. 实验中, 先利用 50:50 分束器将 30 mW 1080 nm 单频信号光分为两束, 分别经过准直器 (CO) 准直, 然后用红外相机抓取远场干涉短曝光图像, 如图 9(a) 所示. 定义可见度 $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, 其中 I_{\max} 为光强极大值, I_{\min} 为 I_{\max} 的临近极小值. 经计算, 单频信号光远场干涉短曝光图像的可见度为 0.814. 为研究 SF-FRA 拉曼放大过程对单频信号光相干性的影响, 利用 30:70 分束器将 30 mW 1080 nm 单频信号光分为两束, 其中 30% 端口输出光注入 SF-FRA 进行拉曼放大; 70% 端口输出光接入 315 m 延迟光纤 (SF-FRA 的拉曼增益光纤长度 310 m, 三个 WDM 和分束器的尾纤长度共约 5 m), 以保持光程差的稳定. 为使远场干涉的两束光强度大致相等, SF-FRA 的输出端接入了 5:95 的分束器, 其中 5% 端口与准直器相接, 如图 8(b) 所示. 实验中抓取了 SF-FRA 种子光功率约 9 mW, 输出光功率约 450 mW 时 SF-FRA 输出的放大光与 1080 nm 单频信号光的远场干涉短曝光图像, 如图 9(b) 所示. 经计算, 单频信号光与 SF-FRA 放大光远场干涉短曝光图像的可见度为 0.719. 结果表明, SF-FRA 的拉曼放大过程对单频信号光的相干性有一定影响.

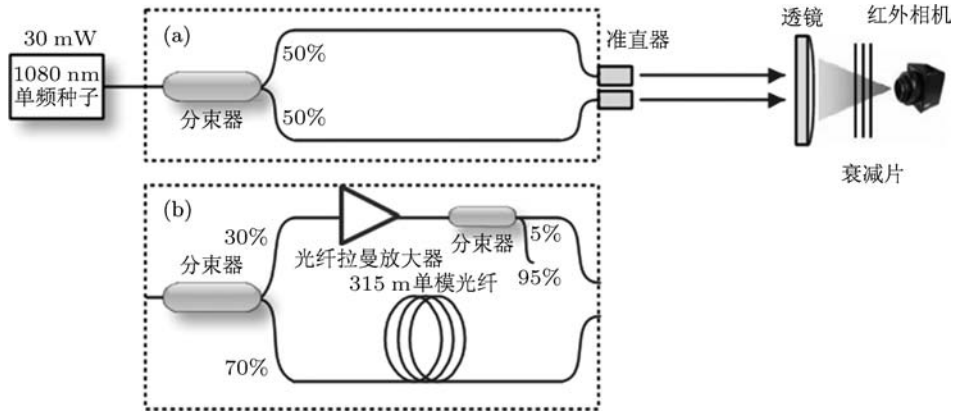


图8 相干性测量原理图

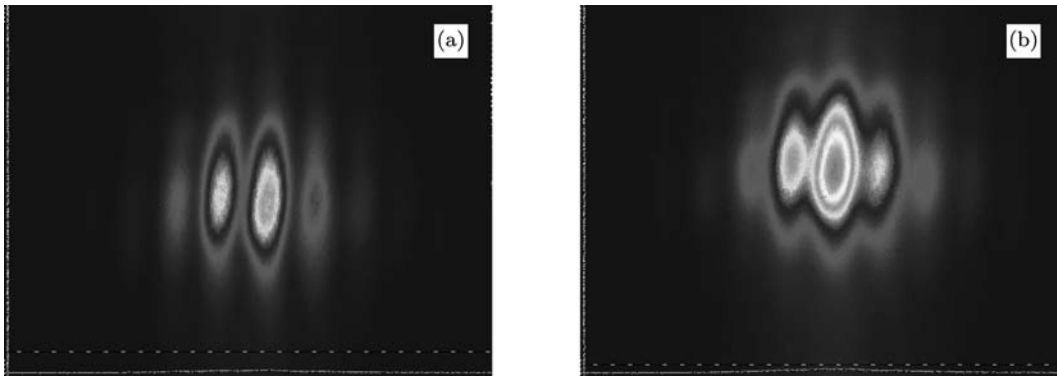


图9 (a) 单频信号光远场干涉短曝光图像; (b) SF-FRA 放大光与单频信号光远场干涉短曝光图像

4 结论

本文进行了 1031nm 抽运光对 1080nm 单频信号光的拉曼放大实验, 详细研究了单频信号光种子功率、拉曼增益光纤长度、抽运方式等因素对 SF-FRA 输出特性的影响. 结果表明, 在未受 SBS 因素限制时, 相同抽运功率条件下, 单频信号光种子功率越高, SF-FRA 的效率越高; 拉曼增益光纤越长, SF-FRA 的效率越高; 前向抽运时, SF-FRA 的效率较高. 受限于抽运光功率, 未验证 SBS 因素限制

下的 SF-FRA 最大输出功率与各因素的关系. 实验中还测量了输出光功率最大时的光谱特性和频谱特性, 1080nm 单频信号光线宽约为 8MHz, 输出放大光线宽约为 9.7MHz, SF-FRA 的拉曼放大过程对单频信号光线宽有较小的展宽. 最后, 抓取了单频信号光远场干涉短曝光图像及单频信号光与 SF-FRA 放大光远场干涉短曝光图像, 经分析对应的可见度分别为 0.814 和 0.719, SF-FRA 对单频信号光的相干性有一定影响. 实验结论可为其他特殊波长 SF-FRA 的设计提供一定的参考.

- [1] Dianov E M, Bufetov I A, Bubnov M M, Grekov M V, Vasiliev S A, Medvedkov O I 2000 *Opt. Lett.* **25** 402
- [2] Kim N S, Prabhu M, Li C, Song J, Ueda K I 2000 *Opt. Commun.* **176** 219
- [3] Masuda H, Suzuki K I, Kawai S, Aida K 1997 *Electron. Lett.* **33** 753
- [4] Feng Y, Taylor L R, Calia D B, Holzlöhner R, Hackenberg W 2009 *Frontiers in Optics, OSA Technical Digest (CD)*, San Diego, paper PDP44
- [5] Taylor L R, Feng Y, Calia D B 2010 *Opt. Express* **18** 8450
- [6] Nagel J A, Temyanko V, Norwood R A, Peyghambarian N, Dianov E M, Biriukov A S, Sysoliatin A A 2011 *OSA/FILAS FWC2*
- [7] Vergien C, Dajani I, Zeringue C 2010 *Opt. Express* **18** 26214
- [8] Leng J Y, Chen S P, Wu W M, Hou J, Xu X J 2011 *Opt. Commun.* **284** 2997
- [9] Tong Z, Wei H, Jian S S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1873 (in Chinese) [童治, 魏淮, 简水生 2006 物理学报 **55** 1873]
- [10] Gao X S, Gao C Q, Song X Y, Li J Z, Wei G H 2006 *Acta Photonica Sin.* **35** 1812 (in Chinese) [高雪松, 高春清, 宋学勇, 李家泽, 魏光辉 2006 光子学报 **35** 1812]

Experimental research on single-frequency fiber Raman amplifier*

Xu Jiang-Ming Leng Jin-Yong Han Kai Zhou Pu Hou Jing[†]

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 31 May 2011; revised manuscript received 27 July 2011)

Abstract

Single-frequency fiber Raman amplifier (SF-FRA) is known for the ability of all-band amplification, and it is very attractive for the amplification of single-frequency seed light at a special wavelength, such as 1178nm and 1271nm. The 1080nm single-frequency signal light is amplified by a 1031nm pump source, and the influences of seed power of single-frequency signal light, length of Raman gain fiber, pump scheme are experimentally investigated. The results show that the efficiency of SF-FRA increases with the enhancement of the single-frequency signal power and the length of Raman gain fiber. The efficiency of co-pump SF-FRA is higher than that of the counter-pump SF-FRA. The measurements show that the linewidth of single-frequency signal light is not broadened obviously in the process of Raman amplification. The visibilities of the rapid-exposure pattern of far-field interference of single-frequency seed light and the amplified light are 0.814 and 0.719, respectively. The results show that the coherence of single-frequency signal light is affected by the SF-FRA more or less. These experimental results can provide a reference for designing other special wavelength SF-FRA.

Keywords: fiber Raman amplifier, single-frequency, output characteristic, influences factors

PACS: 42.65.Dr, 42.55.Wd, 42.25.Kb

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077076, 10904173, 11004247), and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-08-142).

[†] E-mail: houjing25@sina.com