

文章编号: 0253-2239(2003)01-53-04

内腔级联拉曼光纤激光器输出特性的实验研究*

苏红新 吕可诚 闫培光 李乙钢 吕福云 董孝义
(南开大学物理学院光电信息科学系, 天津 300071)

摘要: 采用标准单模石英光纤作为拉曼增益介质, 光纤布拉格光栅作为谐振腔镜, 研制了一台内腔级联拉曼光纤激光器。利用掺 Yb 双包层光纤激光器作为抽运源, 实现了二级拉曼转换, 在波长 1176.8 nm 获得了 309 mW 的最大输出功率, 斜率效率接近 51.5%。在小抽运功率下, 发现拉曼光纤激光器的输出中存在重复周期约为 2.9 μ s 的脉冲序列; 当抽运功率大于某一值时, 上述脉冲消失, 获得了十分稳定的连续输出。

关键词: 激光技术; 受激拉曼散射; 级联; 光纤激光器; 输出功率

中图分类号: TN248 文献标识码: A

1 引 言

随着当今社会信息传输量的急剧增加, 近年来光纤通信网络得到了快速发展。作为光网中不可缺少的重要器件, 掺铒光纤放大器(EDFA)和拉曼光纤放大器(RFA)等新一代光放大器受到了普遍重视。特别是拉曼光纤放大器, 以其低噪声特性和几乎无限制的应用带宽, 成为当今光放大器研究的热点。由于拉曼光纤放大器基于受激拉曼散射效应, 它一般具有较高的抽运阈值, 获得具有合适输出波长的高功率抽运激光器是拉曼光纤放大器走向实用化的关键; 此外, 对跨洋光缆和通信干路中的掺铒光纤放大器进行远距离抽运也需要波长 1480 nm 的大功率激光器作为抽运源。

半导体激光器具有体积小、效率高的优点。但限于目前的技术水平, 在光纤放大器所需的多个抽运波段, 单个半导体激光器还不能达到适用的功率水平, 人们只好采取多个半导体激光器耦合复用的办法来解决^[1]。但这将降低抽运激光器的能量利用效率, 并导致系统结构复杂, 可靠性差, 成本增加。为解决这一难题, 人们发展了另一种抽运激光器——级联拉曼光纤激光器^[2-4]。与复用半导体激光器相比, 级联拉曼光纤激光器具有能量利用率高、结构简单、成本低等优点。并且, 以 1.06 μ m 激光器作为抽运源, 级联拉曼光纤激光器原则上可以在光纤放大器所需的任意波长实现高功率、高光束质

量的激光输出。因此, 级联拉曼光纤激光器引起了各国研究者的极大兴趣, 在最近两年内取得了巨大进展。

我们以标准单模通信光纤作为拉曼增益介质, 利用光纤光栅构成内腔级联结构的拉曼谐振腔, 实现了二级拉曼激光输出, 对其功率特性和动态特性进行了实验研究。

2 实验原理与装置

2.1 光纤中的级联受激拉曼散射效应

光纤中受激拉曼散射是高强度的激光与光纤介质的振动模式相互作用产生的一种三阶非线性光学效应, 表现为入射光作为抽运光产生频率下移的斯托克斯光。其量子力学描述为入射光子被介质分子散射为另一低频光子, 同时完成分子振动态间的跃迁。

图 1 中的曲线给出了抽运波长为 1 μ m 时熔融石英光纤的拉曼增益系数 G_R 与拉曼频移的对应关系^[5]。可以看到 G_R 有一个宽达 40 THz 的频率范

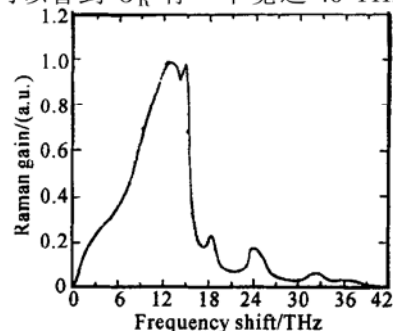


Fig. 1 Raman gain spectrum for fused silica fiber ($\lambda_p = 536$ nm)

* 国家自然科学基金重点项目(61037010)资助课题。

E-mail: opticl@eyou.com

收稿日期: 2001-12-18; 收到修改稿日期: 2002-03-11

围,其主峰对应的本征拉曼频移约为 13 THz(对应波数为 440 cm^{-1})。若一束频率为 ω_s 的信号光与一束频率为 ω_p 的连续抽运光共同在光纤中传播,只要频率差 $\omega_p - \omega_s$ 位于图 1 中拉曼增益带内,信号光就会由于拉曼增益而被放大。在光纤两端加上具有适当反射率的反射镜,对光纤内由受激拉曼散射产生的斯托克斯光提供反馈,就会形成激光振荡,成为拉曼光纤激光器。

如果抽运光功率足够强,那么生成的斯托克斯光又将激起二级乃至更高级次的斯托克斯光,形成级联受激拉曼散射。图 2 是抽运功率约 1 kW 时

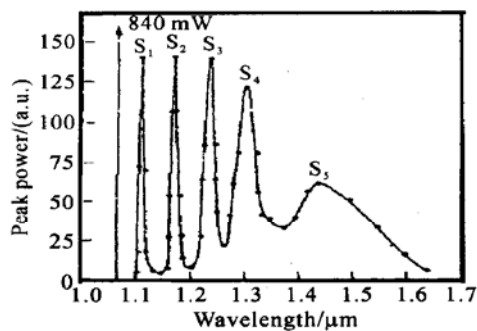


Fig. 2 Cascaded Raman spectrum for silica fiber ($\lambda_p = 1.06 \mu\text{m}$)

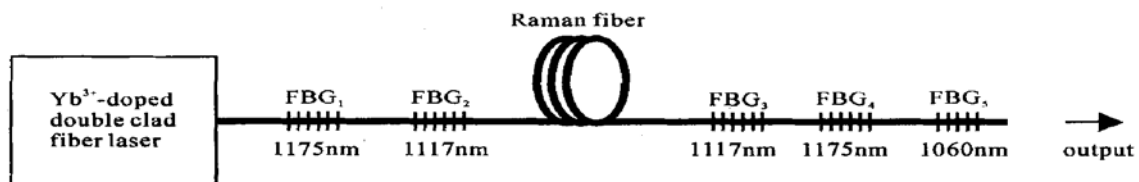


Fig. 3 Schematic structure of the cascaded Raman fiber laser

3 实验结果与分析

3.1 级联拉曼光纤激光器的功率特性

如图 4(a) 所示,当注入到拉曼光纤激光器的 Yb 激光功率(本文简称抽运功率)为 0.123 W 时,在输出光谱中观察到了波长为 1059.2 nm 的抽运光。

当抽运光功率增加到 0.21 W 时,输出谱中开始出现波长 1115.2 nm 的一级斯托克斯线,并且其强度随着抽运功率的增加而增大,而抽运光的强度随之下降,如图 4(b) 所示。这表明,抽运光功率正在向一级斯托克斯波转化。当抽运功率增大到 0.35 W 时,输出光谱中的抽运光成分已经很小,与 1115.2 nm 的一级斯托克斯光相比基本可以忽略。此时抽运光大部分转化为斯托克斯光。

继续增加抽运功率到接近 0.4 W 时,达到二级

石英光纤的拉曼光谱^[6],五条斯托克斯线清晰可辨。人们在实验中已经观察到高达 10 级以上的级联受激拉曼散射^[7]。通过相互级联的多次拉曼频移,就能够将抽运光能量转化到所需要的波长。

2.2 实验装置

实验装置采用了镶嵌式线性级联结构,如图 3 所示。由反射中心波长分别为 1117 nm 和 1175 nm 的两对光纤布拉格光栅 FBG₁~FBG₄ 与标准单模通信光纤构成二级级联拉曼腔。单模光纤的本征拉曼频移约为 440 cm^{-1} ,光纤长度为 2.2 km。FBG₁ 和 FBG₄ 对于 1175 nm 波长的峰值反射率分别为 99% 和 15%,其中 FBG₄ 作为输出耦合器;FBG₂ 和 FBG₃ 对 1117 nm 波长均具有 99% 的高反射率。另外,为了减小输出光中的抽运光成分,同时提高抽运光的利用率,在激光器输出端加入一个工作波长为 1060 nm 的高反射光纤光栅 FBG₅。所有的光纤布拉格光栅与光纤之间均采用折射率匹配熔接的方法,实现了低损耗连接。抽运源为一台由我们自行研制的掺 Yb 双包层光纤激光器,其输出波长位于 1060 nm 附近,最高连续输出功率大于 1 W。

斯托克斯光的振荡阈值,输出光谱中开始出现波长 1176 nm 左右的二级斯托克斯光,如图 4(c) 所示。随着抽运功率的进一步增大,一级斯托克斯光强度有所下降,而二级斯托克斯光的强度迅速增大。这表明,一级斯托克斯光正在向二级斯托克斯光转化。实验同时发现,随着抽运功率的不同,拉曼光纤激光器的输出波长在约为 0.5 nm 的范围内随机漂移。

当抽运功率增加到 0.7 W 左右时,输出光谱中的一级斯托克斯成分所占比例已经很小,而绝大部分为 1176.8 nm 的二级斯托克斯光。当抽运功率达到 1.05 W(抽运激光功率的最大值)时,二级斯托克斯谱线的光谱强度达到最大,如图 4(d) 所示。此时发现,抽运光和一级斯托克斯光完全可以忽略,光谱中只有 1176.8 nm 的二级斯托克斯线,激光谱线的半峰值宽度(FWHM)为 1.2 nm。当二级斯托克

斯光占优势后,激光输出波长几乎不再随抽运功率变化,基本上稳定在 1176.8 nm。引起激光器输出波长变化的原因,主要是光纤光栅中心反射波长随

温度的漂移和腔内各振荡模式间的竞争。当抽运功率远远高于阈值时,激光器的工作状态趋于稳定,输出波长也基本不再变化。

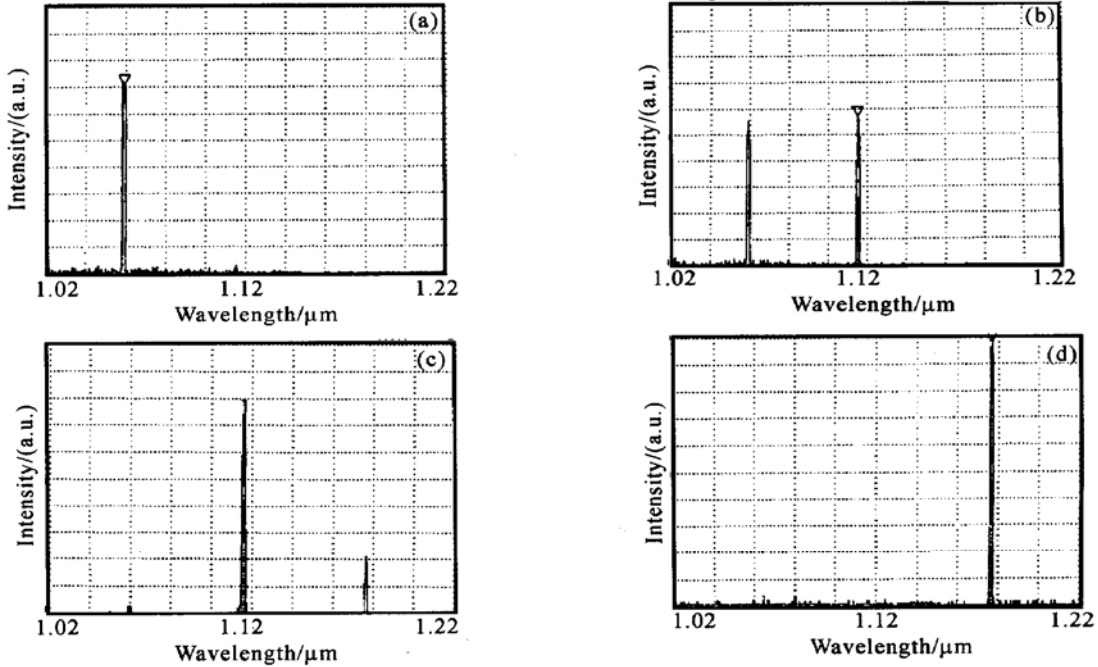


Fig. 4 Spectra of cascade Raman fiber laser with different input pump powers.
(a) 0.123 W; (b) 0.210 W; (c) 0.420 W; (d) 1.050 W

显然,拉曼光纤激光器的总输出功率中包括少量未被吸收完的抽运光(波长 1115 nm 左右的一级斯托克斯光以及波长 1176 nm 左右占绝对优势的二级斯托克斯光)。总输出功率与抽运光功率的对应关系如图 5 所示。结果表明,功率曲线由三个具有不同斜率的线性部分构成,这三个部分的衔接点恰好对应二级斯托克斯光的振荡阈值和二级斯托克斯光占绝对优势(一级斯托克斯光几乎完全消失)时的抽运功率。分析表明,这三个线性部分对应的斜率分别为 2.1%、35.6% 和 51.5%。即 1176.8nm 二级斯托克斯光相对于 1060 nm 抽运光的斜效率为 51.5%。当抽运功率为 1.05 W 时,拉曼光纤激光器的最大输出功率达

到了 309 mW,光-光转化效率约为 30%。

在实验室条件下,经过长达三周的反复实验,发现上述拉曼光纤激光器的输出功率能够很好地重复,这说明该激光器的功率特性十分稳定。

3.2 级联拉曼光纤激光器的动态特性

我们利用 HP4645A 型示波器对级联拉曼光纤激光器的输出特性进行了研究。发现随着抽运功率的不同,激光器的输出展示出不同的动态特征。

当抽运功率超过二级斯托克斯线的振荡阈值(0.42 W)时,发现激光器的输出中出现了微秒量级的脉冲序列,其重复周期约为 2.9 μs,如图 6(a)所示。随着抽运功率的增加,脉冲的幅度随之上升,但是脉冲周期没有明显的变化。然而,当抽运功率大于 0.7 W 时,随着二级斯托克斯波光强迅速上升,上述的脉冲序列很快消失,如图 6(b)所示。直到抽运功率增加到 1.05 W,没有再次出现上述的脉冲序列。逐渐降低输出功率,发现上述实验现象具有较好的可重复性。

根据我们的进一步研究和有关的文献报道,我们分析产生脉动的原因来自拉曼光纤激光器前端的掺 Yb 双包层光纤激光器。由于 Yb 离子具有典型的二能级结构,在抽运功率不足的情况下掺 Yb 光纤中会

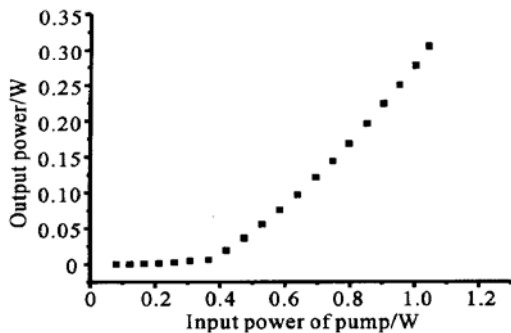


Fig. 5 Total output power versus pump power

存在一段可饱和吸收区^[8],因而使双包层光纤激光器工作在被动调 Q 状态,以脉冲方式对级联拉曼光纤激光器进行抽运,导致其出现脉冲输出。当抽运功率足够大时,掺 Yb 双包层光纤中的可饱和吸收区消失,双包层光纤激光器工作在连续输出状态,因此拉曼光纤激光器输出中的脉动现象随之消失。

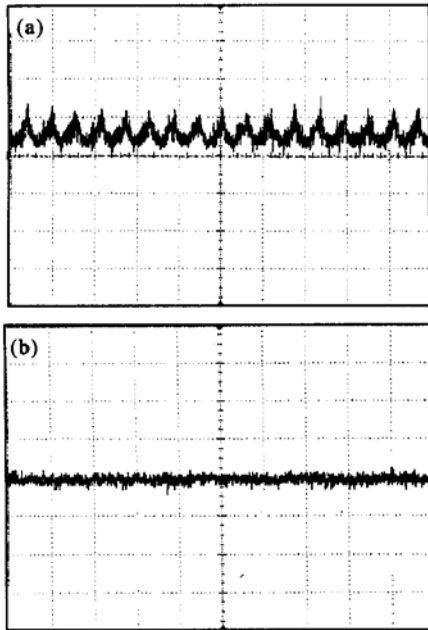


Fig. 6 Dynamical output power of cascaded RFL. (a) With low pump power; (b) With high pump power

结论 我们研制的全光纤级联拉曼光纤激光器实现了二级拉曼振荡,在 1176 nm 波段获得了稳定的连续激光输出,斜率效率达到 51.5%,光-光转化效率接近 30%,基本指标已达到国际水平。测得拉曼光纤激光器的最高输出功率大于 300 mW,如果采用更高功率

的抽运源,其输出功率还可以大幅度提高。同时,我们对掺 Yb 双包层光纤激光器抽运的级联拉曼光纤激光器的动态特性进行了实验研究。发现只有在抽运功率足够高的情况下,才能实现稳定连续的拉曼激光输出。本文这一发现,对于级联拉曼光纤激光器的实用化具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Emori Y, Tanaka K, Namiki S *et al.*. 100 nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalised by 12-wavelength channel WDM laser diode unit. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(16): 1355~ 1356
- 2 Chernikov S V, Platonov N S, Gapontsev D V *et al.*. Raman fiber laser operating at 1.24 μm . *Electron. Lett.*, 1998, **34**(7): 680~ 681
- 3 Chang Do Il, Lee H K, Kim K H. Cascaded Raman fiber laser operating at 1.48 μm . *Electron. Lett.*, 1999, **35**(22): 1951~ 1952
- 4 Kim N S, Prabhu M, Cheng Li *et al.*. 1239/1484 nm cascaded phosphosilicate Raman fiber laser with CW output power of 1.36 W at 1484 nm pumped by CW Yb-doped double-clad fiber at 1064 nm and spectral continuum generation. *Opt. Commun.*, 2000, **176**: 219~ 222
- 5 Stolen R H, Ippen E P. Raman gain in glass optical waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**(6): 276~ 278
- 6 Cohen L G, Lin C. A universal fiber optic (UFO) measurement system based on a near-IR Raman fiber laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1978, **QE-14**: 855~ 860
- 7 Gao P J, Nic C J, Yang T L *et al.*. Stimulated Raman scattering up to 10 orders in an optical fiber. *Appl. Phys.*, 1981, **24**: 303~ 306
- 8 Marcuse D. Pulsing behavior of a three-level laser with saturable absorber. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **QE-29**(8): 2390~ 2396

Output Characteristics of a Cascaded Raman Fiber Laser

Su Hongxin Lü Kecheng Yan Peiguang Li Yigang Lü Fuyun Dong Xiaoyi

(*Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 18 December 2001; revised 11 March 2002)

Abstract: A cascaded Raman fiber laser (RFL) based on standard mono-mode silica fiber and fiber Bragg gratings is fabricated. Pumped by a Yb-doped double clad fiber laser, output power of the second Stokes wave around 1176 nm is obtained. The maximal total output power of the RFL is up to 309 mW, and the slope efficiency of the 1176.8 nm output is about 51.5%. Pulses with a repetition rate of 2.9 μs are observed in the laser output when the pump power is near to the threshold. However, when the pump power reaches to a value high enough, stable continuous-wave output power is achieved.

Key words: laser technique; stimulated Raman scatter; cascaded; fiber laser; output power