

高功率光子晶体光纤放大器实验研究^{*}

赵振宇^{1)†} 段开棕^{1)†} 王建明^{1)‡} 赵 卫¹⁾ 王屹山¹⁾

1) 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710119)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 1 月 26 日收到, 2008 年 3 月 5 日收到修改稿)

利用掺 Yb³⁺ 的光子晶体光纤作为光纤放大器的增益介质, 采用反向抽运方式, 分别从理论和实验方面研究了不同信号的增益特性, 在信号光功率为 6 W, 抽运光功率为 160 W 时, 获得了 104 W 的输出功率. 实验发现, 当抽运功率大于一定值时, 放大器输出会有一定的不稳定性, 并影响输出功率的进一步提高.

关键词: 光子晶体光纤, 光纤放大器, 反向抽运, 高功率

PACC: 4255N, 4281W

1. 引 言

光纤激光器/放大器具有体积小、结构简单、散热性好、转换效率高特点, 因此得到了广泛的研究^[1-3]. 通过采用包层抽运技术, 传统双包层光纤激光器已获得超过千瓦级的功率输出^[4], 可被广泛应用于工业加工、国防等领域. 随着光子晶体光纤技术的发展, 高功率光子晶体光纤激光器也获得了快速的发展, 其输出功率已达到与传统双包层光纤激光器相当的水平^[5]. 与传统双包层光纤相比, 光子晶体光纤具有较大的内包层数值孔径、较大的模场面积和无尽单模等特点^[6]. 光子晶体光纤可实现较大的内包层数值孔径, 便于获得较高的抽运耦合效率, 而较大的模场面积可有效减小纤芯的激光功率密度, 减小在高功率输出时非线性效应; 另一方面, 光子晶体光纤的无尽单模特性, 保证了光子晶体放大器/激光器输出光束的光束质量. 因此, 使用光子晶体光纤研制高功率激光器/放大器具有很大的潜力和优势, 可在保持良好的光束质量的前提下, 实现高功率输出.

高功率光纤激光器/放大器一般采用掺 Yb³⁺ 光纤作为增益介质, 这是由于掺 Yb³⁺ 光纤具有较高的转换效率, 对抽运光和激光不存在激发态吸收, 在高功率运转时性能稳定. Yb³⁺ 能级结构简单, 且激光能级间隔比较大, 有利于消除多声子非辐射弛豫; 另

外, 掺 Yb³⁺ 光纤不存在浓度淬灭问题, 可利用高掺杂浓度的较短光纤获得较高的增益^[7]. 这些特性使得掺 Yb³⁺ 光纤激光器/放大器更易于实现高功率输出.

目前, 国外对光纤放大器的研究已经获得了很大的发展. Höfer 等人^[8]使用 NPRO 激光器作为种子源, 采用后向抽运方式, 在掺 Yb³⁺ 光纤放大器中得到了 20.1 W 的功率输出. Friedrich Schiller 大学 Liem 等人^[9]报道了利用相同技术在掺 Yb³⁺ 光纤放大器中获得 100 W 的功率输出. 南开普敦大学的 Jeong 等人^[10]使用 DFB 激光器作为种子源, 通过 4 级光纤放大, 获得 264 W 的功率输出. 近年来, 国内在此方面也开展了一些工作, 北京理工大学报道了使用 NPRO 激光器作为种子源, 采用后向抽运方式, 利用掺 Yb³⁺ 双包层光纤进行放大获得 16.1 W 的功率输出^[11].

本文利用掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤进行光纤放大器的实验研究, 重点研究了高功率抽运时, 放大器的增益特性. 使用自制的光子晶体光纤振荡器作为种子源, 采用了双包层掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤作为增益介质. 由于反向抽运具有较好的功率增益特性^[12], 实验中采用反向抽运方式, 研究了不同功率的信号光条件下, 信号增益随抽运功率的变化情况. 在信号光功率为 6 W, 抽运功率为 160 W 时, 获得了 104 W 的高功率输出.

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号: 60537060)和中国科学院“西部之光”联合学者项目(批准号: 0729591213)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zhaozhenyu513@163.com

2. 实验装置与原理

实验装置如图 1 所示. LD1 和 LD2 为半导体抽运源, 中心波长为 976 nm, 分别作为激光器和放大器的抽运源. PCF1 和 PCF2 为结构相同掺 Yb^{3+} 双包层光子晶体光纤, 它们的内包层数值孔径为 0.55, 纤芯直径为 $20 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.06, 光纤对 976 nm 抽运光的吸收系数为 1.45 dB/m. 非球面镜 $L1$ 和 $L2$, $L5$ 和 $L6$ 组成的两个耦合器分别将抽运光耦合到增

益光纤 PCF1 和 PCF2 之中, 实验测得它们的耦合效率约为 70%. $M1$ 和 $M4$ 为 45° 放置的对激光高反 ($R > 99\%$) 对抽运光高透 ($T > 95\%$) 的双色镜; $M2$ 为对激光高反 ($R > 99.5\%$) 的平面镜, $M3$ 是对激光反射率为 10% 的耦合输出镜, 它与 $M2$ 构成 PCF 激光器的谐振腔. 激光通过腔镜 $M3$ 输出, 作为放大器的信号光. $L3$ 为信号光的准直透镜, $L4$ 为信号光会聚透镜, 将信号光耦合到放大器 PCF2 中, 在 PCF2 中得到放大, 放大后光束通过双色镜 $M4$ 输出, 并用放置在输出光路上的功率计对输出功率进行测量.

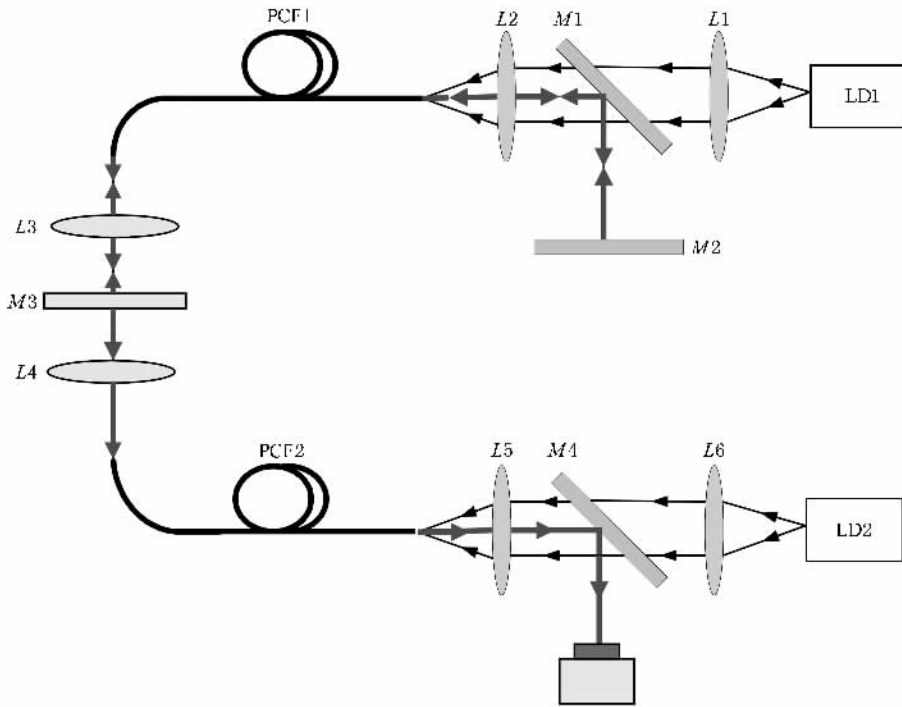


图 1 实验装置示意图

3. 数值分析与实验结果

首先借助速率方程对上面结构的光纤放大器进

行了数值模拟, 研究放大器对不同功率信号光的增益情况, 以便为实验做一定的参考. 放大器稳态速率方程为^[1]

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{(P_p^+(z) + P_p^-(z))\sigma_{ap}\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{\Gamma_s}{hcA} \int \sigma_a(\lambda) [P^+(z, \lambda) + P^-(z, \lambda)] \lambda d\lambda}{\frac{(P_p^+(z) + P_p^-(z))(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{\Gamma_s}{hcA} \int (\sigma_a(\lambda) + \sigma_e [P^+(z, \lambda) + P^-(z, \lambda)]) \lambda d\lambda}, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p \{ \sigma_{ap} N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z) \} P_p^\pm(z) - \alpha(z, \lambda_p) P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_s [(\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda)) N_2(z) - \sigma_a(\lambda) N] P^\pm(z, \lambda) + \Gamma_s \sigma_e(\lambda) N_2(z) P_0(\lambda) - \alpha(z, \lambda_p) P^\pm(z, \lambda), \quad (3)$$

$$P_p^+(0) = 0, P_p^-(L) = P_p^0, P^+(0) = P^0, P^-(L) = 0, \quad (4)$$

式中, $\lambda_p = 976 \text{ nm}$ 为抽运光波长, $\lambda = 976 \text{ nm}$ 为信号光波长, Γ_s, Γ_p 分别为信号光和抽运光的功率填充因子, $P_p^+(z)$ 和 $P_p^-(z)$ 分别为正向和反向传播的抽运光功率分布函数, $P^+(z)$ 和 $P^-(z)$ 分别为正向和反向传播的信号光功率纵向分布函数, σ_{ap}, σ_{ep} 和 σ_a, σ_e 分别为抽运光和信号光的吸收和发射截面, τ 为上能级电子寿命, h 为普朗克常数, c 为真空中的光速, α_s, α_p 为抽运光的损耗因子, N 为掺杂浓度, N_2 为上能级粒子数, 其余各参数值选择见文献 [13].

图 2 为数值求解速率方程 (1)–(4) 得出的抽运功率与输出功率的函数关系图. 图中各曲线由下到上依次对应的信号光功率为 2 W 和 6 W. 由图 2 可以看出在相同的抽运功率下, 大信号光对应较大的输出功率. 2 W 和 6 W 的信号光对应的增益曲线平均斜率分别约为 50%, 55% 和 70%. 另一方面, 对应于相同的信号光, 随着抽运功率的增加, 增益曲线的斜率有减小趋势, 这是由于光纤掺杂浓度一定, 当抽运光功率增大时, 光纤所能吸收的光子数有饱和的趋势, 导致增益降低.

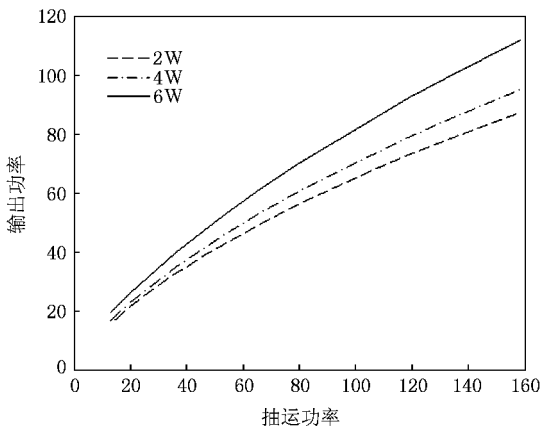


图 2 数值模拟抽运光功率与输出光功率示意图

根据理论模拟结果, 实验中选择不同功率的信号光, 研究了放大器的增益特性. 图 3 为实验测得的不同信号光条件下放大器输出功率随抽运功率的变化, 图中各曲线由下到上依次代表信号光功率为 2, 4 和 6 W 的增益曲线.

由图 3 可以看出, 抽运功率较低 ($< 120 \text{ W}$) 时, 增益曲线基本是线性变化. 其中功率 6 W 的信号光的平均增益斜率约为 66%, 略低于理论模拟所得结

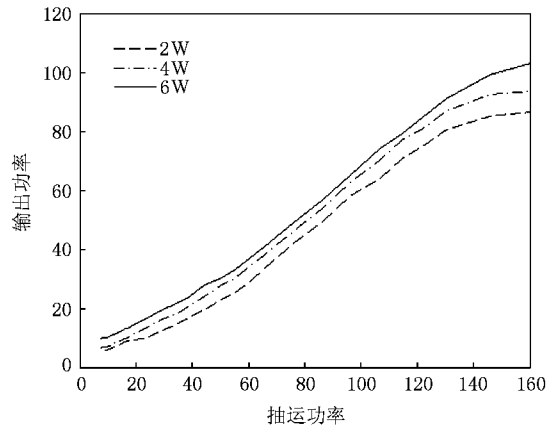


图 3 输出功率与抽运功率关系示意图

果 70% 的增益斜率, 实验结果与模拟吻合较好. 但实验中发现当抽运功率较高 ($> 120 \text{ W}$) 时, 功率 2 W 和 6 W 的信号光的功率增益曲线均趋于平坦, 这时放大器输出有一定不稳定现象. 在抽运功率为 160 W 时, 信号光功率 6 W 时的输出功率最大, 得到了 104 W 的输出功率.

4. 讨 论

实验中我们发现, 在高功率状态下, 放大器增益具有一定的不稳定性, 甚至当抽运功率大于一定值后, 出现脉冲现象, 放大器的输出光功率不再增大. 我们分析这主要归因于以下几种原因: 其一, 信号光的频谱质量. 一方面, 由于实验条件限制, 我们使用自制的掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤振荡器作为放大器的种子源, 而 Yb^{3+} 光纤激光器激光谱谱线较宽, 带宽约为 10 nm, 如图 4 所示. 这样在高功率抽运时, 放大器内会发生模式竞争等效应, 导致输出光强的不稳定, 甚至出现脉冲现象.

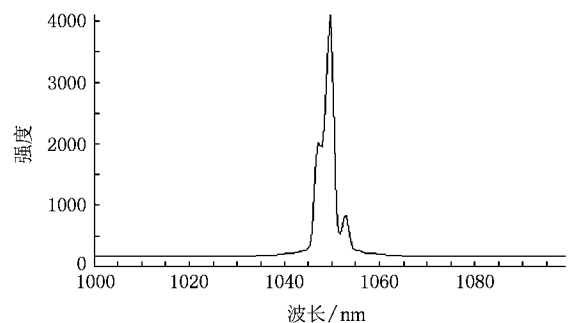


图 4 信号光频谱

另一方面,由于温度、机械等环境噪声的影响,实验中我们观测到振荡器的输出光谱也存在噪声现象,信号光光谱随时间变化存在不规则的漂移行为,这也会导致输出功率的不稳定.其二,随着纤芯内功率密度增大,掺 Yb^{3+} 光纤内受激布里渊散射(SBS)等非线性效应逐渐增强,非线性的存在会导致激光输出的自脉冲现象,造成放大器输出的不稳定.

5. 结 论

采用掺 Yb^{3+} 的光子晶体光纤作为放大器的增

益介质,进行了高功率光纤激光放大器的研究,对不同功率的信号光放大效果进行了数值分析和实验比较.重点考察了高功率抽运条件下信号光的增益特性.当抽运功率 160 W,信号光功率 6 W 时,获得 104 W 的最高输出功率.实验表明,信号光的稳定性和频谱特性对放大器的输出有影响很大,甚至影响放大器输出功率的进一步提高.在今后的实验中,我们将通过采取有效措施来提高种子信号光的光束质量和光谱稳定性,从而提高光纤放大器输出的稳定性和输出功率.

-
- [1] Ido K ,Amos A H 1998 *IEEE J. Quantum Electron* **34** 1570
- [2] Rudiger P ,Johan N ,Anne C T ,David C H 1997 *IEEE J. Quantum Electron* **33** 1049
- [3] Song F ,Shu R Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5228 (in Chinese)
[宋 峰、苏瑞渊 2005 物理学报 **54** 5228]
- [4] Jeong Y ,Sahu J ,Payne D ,Nilsson J 2004 *Opt. Express* **12** 6088
- [5] Bonat G ,Voelckel H ,Gable T 2005 *Photonics West. San Jose ,Late Breaking Developments ,Session 5709*
- [6] Li S G ,Liu X D ,Hou L T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2811 (in Chinese) [李曙光、刘晓东、侯蓝田 2003 物理学报 **52** 2811]
- [7] Lu X Q ,Chen S H 2001 *Chinese Journal of Lasers* **28** 209 (in Chinese) [卢秀权、陈绍和 2001 中国激光 **28** 209]
- [8] Höfer S ,Liem A ,Limpert J ,Zellmer H ,Tünnermann A 2001 *Opt. Lett.* **26** 1326
- [9] Liem A ,Limpert J ,Zellmer H ,Tünnermann A 2003 *Opt. Lett.* **28** 1537
- [10] Jeong Y ,Nilsson J ,Sahu J K ,Soh D B S ,Alegria C ,Dupriez P ,Codemard C A ,Payne D N 2005 *Opt. Lett.* **30** 459
- [11] Sun X P ,Zhao C M ,Yang S H ,Yang C X 2007 *Transactions of Beijing Institute of Technology* **27** 533 (in Chinese) [孙鑫鹏、赵长明、杨苏辉、杨春香 2007 北京理工大学学报 **27** 533]
- [12] Lu W Q 1997 *Optical Communication Technology* **20** 209 (in Chinese) [卢文全 1997 光通信技术 **20** 209]
- [13] Wu Z L ,Chen G F ,Wang X H ,Wang Y S ,Zhao S H ,Ren Y L ,Zhao W ,Hou X 2002 *Acta Photonic* **31** 332 (in Chinese) [武自录、陈国夫、王贤华、王屹山、赵尚弘、任友来、赵 卫、侯 洵 2002 光子学报 **31** 332]

Experimental study of characteristics of high power photonic crystal fiber amplifier^{*}

Zhao Zhen-Yu^{1,2)} Duan Kai-Liang^{1)†} Wang Jian-Ming^{1,2)} Zhao Wei¹⁾ Wang Yi-Shan¹⁾

¹ *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*

² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 26 January 2008 ; revised manuscript received 5 March 2008)

Abstract

The gain characterization of photonic crystal fiber amplifier is theoretically and experimentally studied by using reverse pumping technique. The gain curves for different pumping powers and different signal lights are obtained experimentally. When the power of the probe light is 6 W and the pump power is 160 W, the output power up to 104 W has been achieved eventually. It is found in the experiment that when the pump power is increased over a certain value, the output of the amplifier evolves into the unstable state, which in turn degrades the system performance.

Keywords : photonic crystal fiber, fiber amplifier, reverse pumping, high power

PACC : 4255N, 4281W

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60537060) and the West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences of China (Grant No. 0729591213).

[†] Corresponding author. E-mail : zhaozhenyu513@163.com