

文章编号: 0258-7025(2007)11-1492-06

掺镱双包层光纤放大器的放大特性

常丽萍, 范薇, 王利, 陈嘉琳, 陈柏, 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 从掺镱(Yb)光纤放大器的功率传输方程出发,利用有限差分法对小模场面积(SMA)和大模场面积(LMA)掺镱双包层光纤放大器的放大特性进行了分析比较。采用模场直径(MFD)6.5 μm 和20 μm 的双包层掺镱光纤作为放大器增益介质进行窄线宽连续信号的放大,在915 nm激光抽运下模拟计算了大、小模场面积输出功率随输入信号功率、抽运光功率和光纤长度的变化特性,特别是对于大模场面积光纤放大器,最优光纤长度的选择至关重要;讨论了模场直径不同时的最优抽运功率和光纤长度的选择,得出4 m光纤放大时的临界抽运功率为4 W,理论与实验结果基本一致。为实际应用中根据信号光、抽运光、增益和模式等要求而选择光纤长度和类型等优化设计提供了理论依据。

关键词 激光技术;双包层光纤放大器;数值模拟;大模场面积;小模场面积

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Amplification Performance of Large- and Small-Mode-Area Ytterbium-Doped Double-Clad Fiber Amplifier

CHANG Li-ping, FAN Wei, WANG Li, CHEN Jia-lin, CHEN Bai, LIN Zun-qi

(Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Based on the rate equation, the amplification performance of small-mode-area (SMA) and large-mode-area (LMA) ytterbium-doped double-clad fiber amplifiers was studied using the finite-difference method. The Yb-doped double-clad fibers with the mode diameter 6.5 μm and 20 μm were used as the gain media for the amplification of narrow-band signals. Under the pump laser at the center wavelength of 915 nm, the relationships between output power and input signal power, pump power as well as fiber length, were discussed for SMA and LMA. Especially for LMA fiber amplifiers, it is important to choose the optimal fiber length. For the fiber amplifier with different mode diameters, the optimal pump power and fiber length were also analyzed. It is obtained that the critical pump power is about 4 W with the fiber length of 4 m, which is in accord with the experimental results. The results provide a theoretical guide to optimize fiber type and fiber length considering available signal and pump power, desired gain and mode requirement of fiber amplifiers.

Key words laser technique; double-clad fiber amplifier; numerical simulation; large-mode-area; small-mode-area

1 引言

自从1988年Snitzer等提出双包层光纤结构以来,高功率双包层光纤激光器和放大器取得了很大的进展。掺镱光纤由于其能级结构简单,没有其他稀土掺杂物的竞争过程,具有很宽的增益带宽(975

~1200 nm)和很高的能量转换效率(80%),特别适合于高功率放大过程。近年来出现的大模场面积光纤放大器,由于其极大地提高了输出功率而在很多方面得到广泛应用^[1,2]。但由于光纤芯径较大,很容易引入多个高阶横模的传输,可通过弯曲损耗抑

收稿日期:2007-03-28; **收到修改稿日期:**2007-07-02

作者简介:常丽萍(1980—),女,河南人,博士研究生,主要从事光纤激光器和放大器方面的研究。

E-mail: changliping@siom.ac.cn

导师简介:林尊琪(1942—),男,广东人,中国科学院院士,博士生导师,主要从事激光惯性约束核聚变、高功率激光驱动器等方面的研究。E-mail: zqlin@mail.shcnc.ac.cn

制高阶模从而保证光纤内的基模传输^[3,4]。对大芯径光纤放大器和激光器的稳态和动态特性理论研究也较多^[5~7]。在神光前端驱动系统中,主激光脉冲需要在时间形状、同步精度、空间均匀性、频域、系统稳定性、能量等几个方面满足特定的技术要求。为了满足系统将来升级的需要,将前端光束分成多路输出,光纤放大器对从振荡源出来的脉冲进行预放大,为了避免后续系统的非线性和保证较光滑的时间脉冲形状,要求种子信号源具有瓦级功率输出和高稳定的单横模、单纵模模式。大模场面积光纤激光器虽然可极大地提高前端系统的激光输出能量,但人为控制的模式稳定性对环境稳定性要求较高。小芯径双包层光纤放大器由于芯径较小,可稳定地

实现单横模、单纵模的放大,特别适合于窄线宽信号的放大,但输出功率受到光纤中非线性效应的限制。因此有必要对小模场和大模场面积双包层光纤放大器放大特性进行比较分析,可对其在神光前端系统中的应用和发展起到理论指导作用。

2 理论模型

假定抽运光功率 $P_p(z)$ 在内包层中的分布是均匀的,同时激光上下能级的粒子数密度为 N_2, N_1 , 总粒子数密度 N 在光纤纤芯中的分布也是均匀的,与沿光纤长度的位置 z 和时间 t 无关。在考虑放大自发辐射(ASE)而不考虑非线性效应的前提下,双包层光纤放大器的稳态理论模型^[5]为

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] P_p(z) - \frac{N_2(z,t)}{\tau} + \sum_k \frac{\Gamma \lambda_k}{hcA} [\sigma_a(\lambda_k) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_k) N_2(z,t)] P(z, \lambda_k), \quad (1)$$

$$N = N_1(z,t) + N_2(z,t), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z, \lambda_p)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z)] P_p^\pm(z) - \alpha(\lambda_p) P_p^\pm(z), \quad (3)$$

$$\pm \frac{dP^\pm(z, \lambda_k)}{dz} = \Gamma [\sigma_e(\lambda_k) N_2(z) - \sigma_a(\lambda_k) N_1(z)] P_k^\pm(z, \lambda_k) - \alpha(\lambda_k) P_k^\pm(z, \lambda_k) + 2\sigma_e(\lambda_k) N_2(z) \frac{hc^2}{\lambda_k^3} \Delta\lambda, \quad (4)$$

式中 $P_p^\pm(z, \lambda_p)$ 为抽运光功率, $P^\pm(z, \lambda_k)$ 为波长 λ_k 处的放大自发辐射功率(\pm 表示正向和反向),当 $k = s$ 时,由于信号光功率远大于放大自发辐射,可将放大自发辐射看作背景噪声,故信号光功率可表示为 $P(z, \lambda_s)$ 。 $\alpha(\lambda)$ 为波长 λ 处的散射损耗。 Γ_p, Γ 分别为抽运光和放大自发辐射的填充因子。对于双包层光纤而言,抽运光被耦合进光纤的内包层,有 $\Gamma_p \approx A/S$, 其中 A 为双包层光纤纤芯的横截面积, S 为内包层的横截面积(包含纤芯的横截面积)。 σ_e 和 σ_a 为镱粒子的吸收和发射截面。 c 为光速, τ 为激光上能级粒子寿命, h 为普朗克常数。(4)式右边的第三项与 Yb^{3+} 的自发辐射有关。

稳态情况下,(1)~(4)式的边界条件为

$$P_p^+(0) = P_1, \quad P_p^-(L) = P_2, \quad (5)$$

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

$$k = 1, \dots, K, \quad k \neq s, \quad (6)$$

$$P^+(0, \lambda_s) = P_{s0}, \quad P^-(L, \lambda_s) = 0, \quad (7)$$

式中 P_1, P_2 分别为前向和后向注入的连续抽运光, P_{s0} 为输入的光信号功率。由于放大自发辐射光谱轮廓随波长起伏很大,所以求解时需将其分成几个频带,以 λ_k 为中心波长,等间隔分为 K 个频带, k

$= 1, \dots, K$ 。数值计算中取 $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ 。采用有限差分法^[8]对(1)~(4)式存在双边值问题的微分方程组模型进行理论模拟计算。

3 模拟结果

以纤芯模场直径(MFD)分别为 $6.5 \mu\text{m}$ (数值孔径(NA)=0.12)和 $20 \mu\text{m}$ (数值孔径=0.06)的掺镱双包层光纤作为增益介质进行数值模拟。内包层直径分别为 $130 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ 。主要参数如表1所示。放大器的抽运光中心波长为 915 nm , 带宽为 5 nm 。

表1 模拟采用的主要参数

Table 1 Parameters used in the simulation

λ_p / nm	915	A / m^2	$3.4 \times 10^{-11} / 3 \times 10^{-10}$
λ_s / nm	1053	N / m^{-3}	1×10^{26}
λ_1 / nm	1001	Γ_p	0.0026/0.01
λ_k / nm	1101	Γ	0.56/0.85
$\sigma_a(\lambda_p) / \text{m}^2$	7.92×10^{-25}	α / m^{-1}	0.003
$\sigma_e(\lambda_p) / \text{m}^2$	2.79×10^{-26}	$\Delta\lambda / \text{nm}$	1
$\sigma_a(\lambda_s) / \text{m}^2$	9.40×10^{-27}	$\sigma_a(\lambda)$	See Ref. [9]
$\sigma_e(\lambda_s) / \text{m}^2$	3.77×10^{-25}	$\sigma_e(\lambda)$	See Ref. [9]
τ / s	0.90×10^{-3}		

输入的信号光波长为 1053 nm, 光纤散射损耗为 0.003 m^{-1} 。

3.1 输出功率与输入信号光功率和抽运方式的关系

基于(1)~(4)式, 首先分析稳态情况下的输出功率特性。图 1 所示为连续光放大时, 不同抽运方式下输出功率随输入信号光功率的变化, 前向抽运 $P_1 = 5 \text{ W}, P_2 = 0 \text{ W}$; 后向抽运 $P_1 = 0 \text{ W}, P_2 = 5 \text{ W}$; 双向抽运 $P_1 = 2.5 \text{ W}, P_2 = 2.5 \text{ W}$ 。双包层光纤长度 10 m。图 1(a) 和 (b) 分别对应于模场直径 $6.5 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 时的情况。由于越靠近抽运端上能级粒子反转数越高, 可以看出抽运方式对放大自发

辐射的输出功率有很大的影响。对于不同的输入信号光功率, 正向输出功率(包含放大自发辐射和信号光功率)反向抽运时最大, 正向抽运时最小; 而反向输出功率则有相反的变化规律。随着输入功率的增加, 不同抽运方式下输出功率的变化规律是一样的。小信号放大时 ($< 5 \text{ dBm}$) 反向抽运时有较高的前向输出功率和较低的反向输出功率; 而大信号放大时 ($> 10 \text{ dBm}$), 前后向输出功率几乎与抽运方式无关。同样可看出, 前向抽运时的输出信噪比较高。同时, 比较图 1(a) 和 (b) 得出, 大模场面积(LMA)前后向输出功率都要小于小模场面积(SMA)光纤放大器输出功率, 此时用 10 m 双包层光纤放大, 抽

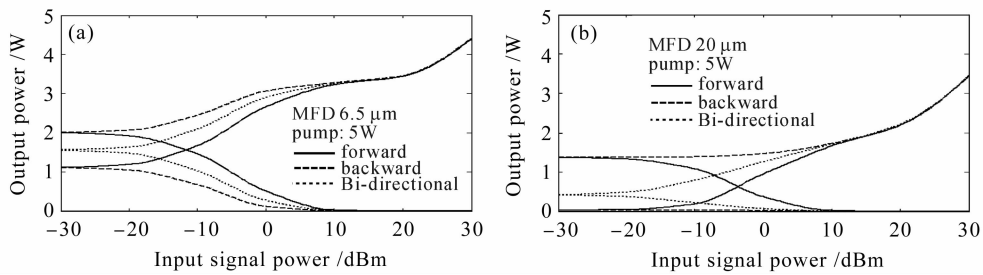


图 1 不同抽运方式下输出功率随输入信号功率的变化
Fig. 1 Output power versus the input signal power under different pump schemes

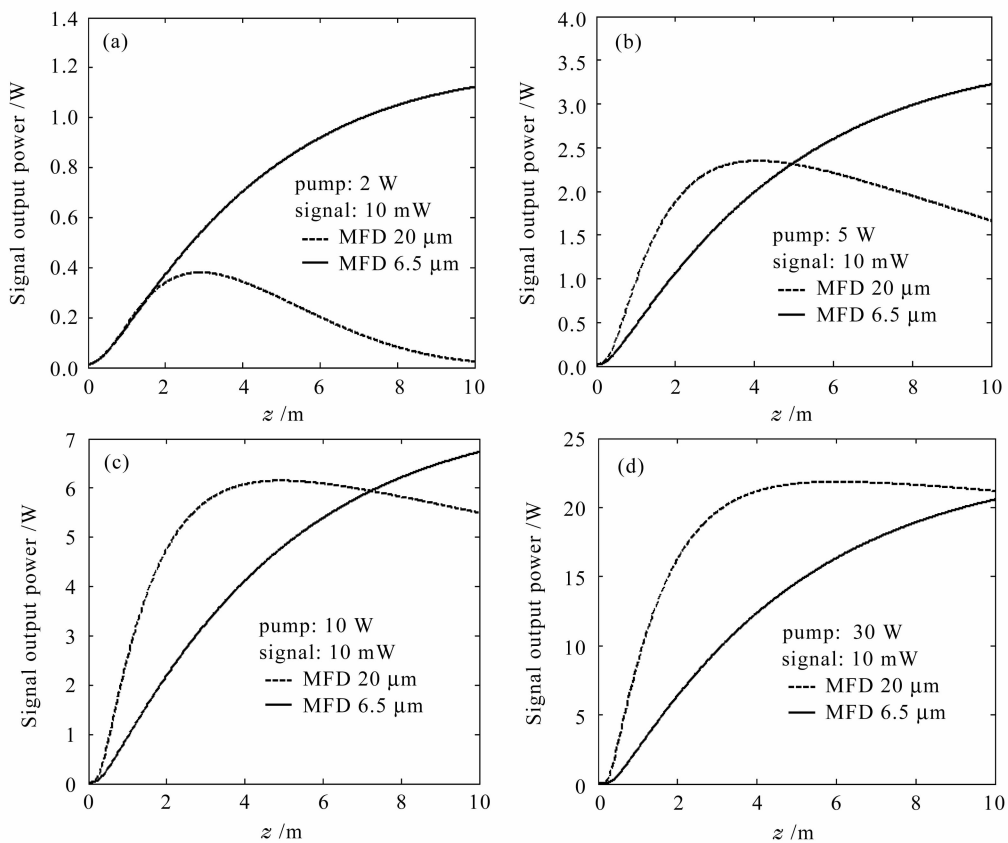


图 2 大小模场面积下, 不同抽运功率时, 大信号放大信号光功率随光纤长度的变化
Fig. 2 Signal power along the fiber length under the large signal input with different pump power for SMA and LMA

运功率为5 W,抽运功率小于临界抽运功率,随着抽运功率的增加,一旦超过临界抽运功率,大模场面积光纤放大器前后向输出功率将大于小模场面积光纤放大器输出功率。实际应用中,可根据实际要求如信噪比、输出功率、抽运源、信号功率和系统结构选择合适的抽运方式。

3.2 信号光和增益随光纤长度的变化

在不同抽运功率下大信号(10 mW)和小信号(10 μW)放大的信号光功率随光纤长度的变化如图2和图3所示。分别对前向抽运功率为2 W,5 W,10 W,30 W的情况下进行计算分析。

从图2和3可以看出,无论是大信号还是小信号放大,在相同的抽运功率下,由于大模场面积光纤纤芯直径较大,较小模场面积光纤抽运光吸收较快,直接导致在光纤的初始阶段,上能级粒子数多,信号光功率增长较快,而随着抽运光逐渐被吸收,在光纤的末端抽运光功率较弱的地方信号光又逐渐被吸收,呈减小趋势,抽运功率越高,大模场面积光纤放大器中的信号光功率峰值越后移。对大模场面积光纤放大器而言,若想得到较高的功率输出,光纤长度

的选择是至关重要的,过长和过短都不能得到输出功率的最优值,抽运功率越高,最优光纤长度越长,且最优光纤长度几乎与信号光大小无关。小模场面积光纤放大器纤芯较小,较高的抽运光功率密度可及时地补充消耗的上能级粒子数,信号光功率随光纤长度呈指数增长。随着抽运功率升高,放大器逐渐趋于饱和。同时采用10 m光纤进行放大时,临界抽运功率大约在30 W左右,即大模场面积输出功率超过小模场面积光纤放大器输出功率时的抽运功率。当抽运功率小于30 W时,若想得到较大输出功率,应选用小模场面积光纤放大器,或缩短光纤长度至大模场面积光纤放大器信号光功率峰值处。临界抽运功率与光纤长度、掺杂浓度、受激吸收截面、衰减系数等诸多光纤参数有关,在其他参数一定的情况下光纤长度越短,临界抽运功率越低。

图4所示为大模场面积和小模场面积光纤放大器增益随光纤长度的变化,同样可看出,在相同的抽运功率和信号功率下,存在一临界光纤长度 L_{cr} , 使大模场面积和小模场面积光纤放大器的增益大小发生转变。由图4(a)和(b)比较得到,随抽运功率的

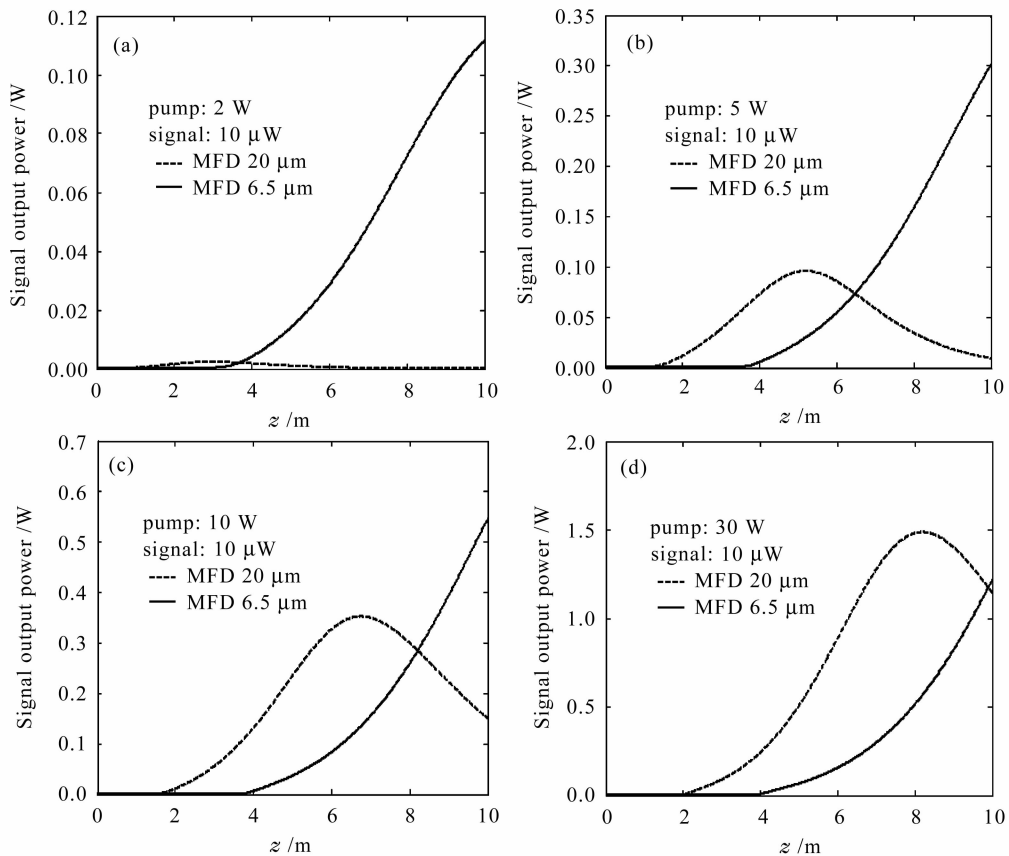


图3 大小模场面积下,不同抽运功率时,小信号放大信号光功率随光纤长度的变化

Fig. 3 Signal power along the fiber length under the small signal input with different pump power for SMA and LMA

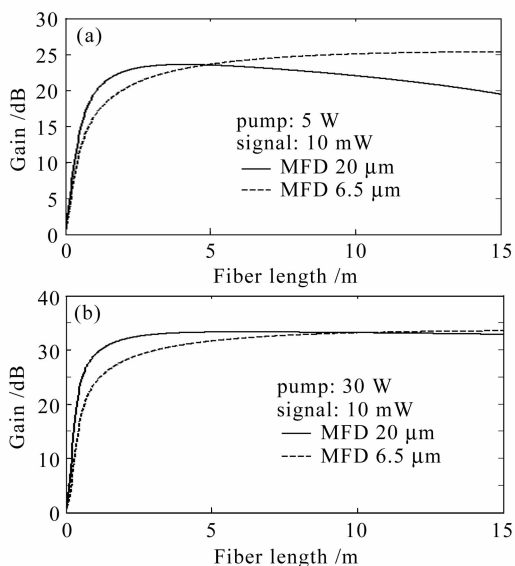


图 4 大功率信号放大时,增益随光纤长度的变化
Fig. 4 Gain along the fiber length under the large signal input with different pump power

增加, L_{cr} 逐渐增长,当抽运功率为 5 W 时, L_{cr} 约为 5 m,抽运功率为 30 W 时, L_{cr} 增长为 10 m。与图 2 和图 3 的规律是一致的。

对窄线宽连续信号光放大而言,其最大输出功率主要受限于非线性受激布里渊散射(SBS),大模场面积光纤由于纤芯较粗,降低了光纤内的光强密度,极大地提高了非线性阈值,若采用受激布里渊散射线宽 36.5 MHz^[10],当信号光波长 1064 nm,带宽 3 kHz,波长 915 nm 半导体激光器抽运时,对于长度 25 m,纤芯直径 5 μm ,数值孔径 0.15 的单模光纤,受激布里渊散射阈值约 39 W,而对于纤芯直径 20 μm ,数值孔径 0.05 的光纤,受激布里渊散射阈值可提高约 10 倍,约 338 W^[11],故大模场面积可获得更大的输出功率。但 25 m 的 20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ (纤芯直径/内包层直径)掺镱大模场面积光纤可支持两个模式的光传输,理想情况下弯曲直径必须小于 10 cm 时可

得到 M^2 值小于 1.1^[11]。文中采用的 10 m 光纤,受激布里渊散射阈值应更高,故未考虑受激布里渊散射的影响。

4 实验结果与分析

图 5 为掺镱双包层光纤放大器结构。采用 915 nm 半导体激光器作为抽运源,取双包层光纤长度为 4 m,输出端接最高承受功率为 3 W 的光纤隔离器,以防止光纤端面反射光在放大器中形成自激。信号光源为 1053 nm 窄线宽分布反馈(DFB)激光器。1:9 耦合器用来监控信号光输入。多模抽运耦合器可实现抽运光与信号光的高耦合效率,信号光约 85%,抽运光约 90%。输入信号光功率为 11 mW,考虑到耦合损耗,实际输入信号约为 9 mW。分别选用模场直径 6.5 μm 和 20 μm ,内包层直径分别为 130 μm 和 200 μm 的双包层光纤作为放大介质,实验结果如图 6 所示。与图 7 的理论模拟结果进行比较,模拟中采用直接光纤输出,略去了所有实验器件的损耗。由于实验中不可避免存在误差,特别是对于大模场面积光纤放大器,由于多模抽运合束器尾纤与大模场面积光纤参数极不匹配,对熔接质量提出了极高的要求,需反复熔接达到最优值,但熔接后损耗依然偏大。而且 3 W 隔离器对 1053 nm 信号光有大约 3 dB 的损耗,所以实际激光输出功率要比图 6 中所示大一倍以上。尽管实际输出信号功率要比模拟输出功率偏小,但同样可看出,实验中临界抽运功率大约为 3.7 W 左右,与理论模拟结果 4 W 基本一致。当抽运功率较小时 ($< 4 \text{ W}$),大模场面积光纤放大器输出功率大于小模场面积光纤放大器输出功率;随着抽运功率的增加,大于 4 W 时,小模场面积光纤放大器趋于饱和,大模场面积光纤放大器逐渐显示出其可得到大功率输出的优势,输出功率大于小模场面积光纤放大器,且均未有非线性现象发生。

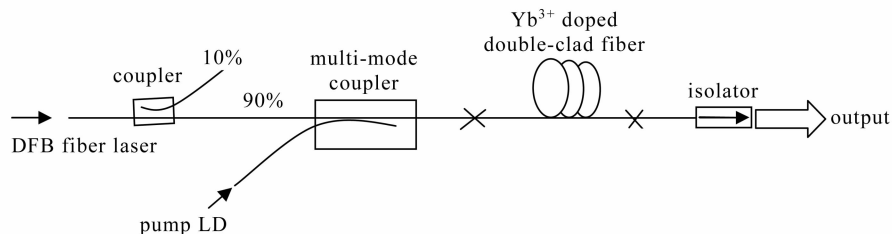


图 5 掺镱双包层光纤放大器结构

Fig. 5 Configuration of the ytterbium-doped double-clad fiber amplifier

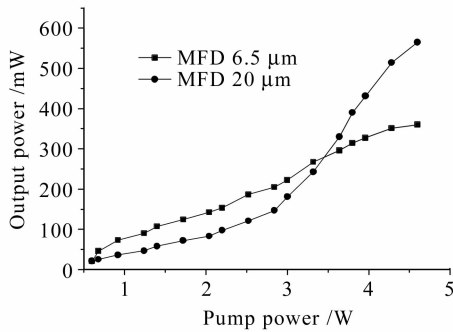


图 6 输出功率随抽运功率变化的实验结果

Fig. 6 Experiment results of the output power versus the pump power

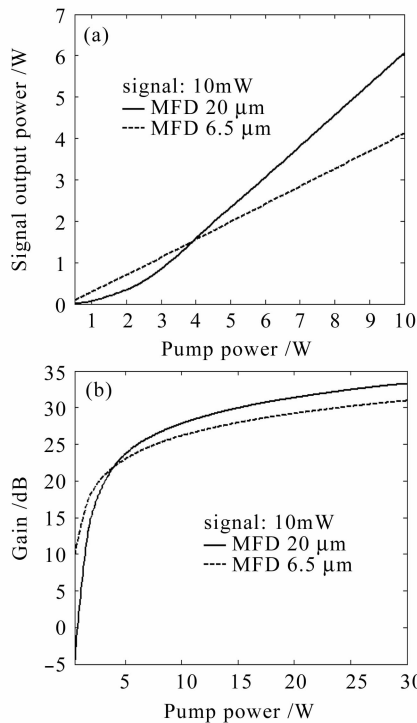


图 7 输出功率(a)和增益(b)随抽运功率变化的理论模拟结果

Fig. 7 Simulation results of the output power (a) and gain (b) versus the pump power

5 结论

从掺镱双包层光纤放大器的速率方程理论模型出发,对于915 nm半导体激光抽运,信号光波长1053 nm,模场直径6.5 μm 和20 μm 的双包层光纤放大器,模拟计算了输出功率随信号光、抽运光和光纤长度的变化等放大特性。对于小信号放大(<5 dBm)时前向抽运有较高的输出信噪比,反向抽运时有较高的前向输出功率和较低的反向输出功率;而大信号放大(>10 dBm)时,前后向输出功率

几乎与抽运方式无关;存在一临界光纤长度 L_{cr} ,实际光纤长度小于 L_{cr} 时,大模场面积光纤放大器的输出功率大于小模场面积光纤放大器输出功率,应根据光纤类型选择合适的光纤长度,以得到最优的放大输出。并同时与实验结果进行比较,考虑到模拟的理想状态,模拟和实验结果基本一致。小模场面积光纤放大器由于纤芯较细,可保持单横模单纵模信号的高稳定放大,而大模场面积光纤放大器由于纤芯较粗,很容易引入高阶模的传输,但同时降低了光纤内的功率密度,增大了光纤内的非线性阈值,极大地提高了输出功率和能量。这些特点为实际应用中根据抽运光功率、信号功率、增益和模式等要求选择光纤类型和长度提供了理论指导。

参 考 文 献

- Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jiangqiang *et al.*. A continuous-wave 714 W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1119~1120
周 军,楼祺洪,朱健强 等. 采用国产大模场面积双包层光纤的714 W连续光纤激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1119~1120
- Changgeng Ye, Ping Yan, Mali Gong *et al.*. Pulsed pumped Yb-doped fiber amplifier at low repetition rate [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5):249~250
- J. Limpert, A. Liem, H. Zellmer *et al.*. 500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(8):645~647
- Jeffrey P. Koplow, Dahv A. V. Kliner, Lew Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7):442~444
- Yong Wang, Hong Po. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10):2262~2271
- Yong Wang. Optimization of pulse amplification in ytterbium-doped double-clad fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6):2139~2147
- Chen Jixin, Sui Zhan, Chen Fushen *et al.*. Stimulated Raman scattering in high power double clad fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):298~302
陈吉欣,隋 展,陈福深 等. 高功率双包层光纤激光器的受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3):298~302
- Sun Zhizhong, Yuan Weiping, Wen Zhenchu. Numerical Analysis [M]. 2nd ed.. Nanjing: Southeast University Press, 2002. 237~282
孙志忠,袁慰平,闻震初. 数值分析[M]. 第二版. 南京:东南大学出版社, 2002. 237~282
- Rudiger Paschotta, Johan Nilsson, Anne C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7):1049~1056
- A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer *et al.*. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17):1537~1539
- David Machewirth, Victor Khitrov, Upendra Manyam *et al.*. Large mode area double clad fibers for pulsed and CW lasers and amplifiers [C]. *SPIE*, 2004, **5335**:140~150