

文章编号: 0258-7025(2004)05-0547-04

光纤放大器侧向多点抽运耦合的研究

孔 勇, 郭明秀, 陆雨田, 王长安, 张春伟, 向世清

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 在微棱镜侧面抽运耦合的基础上提出利用缠绕光纤的方法, 将光纤进行并排缠绕到一跑道型的物体上, 利用微棱镜将抽运光进行侧面多处抽运耦合进入光纤, 利用粒子数速率方程和信号光及抽运光的传输方程进行了相关的数值模拟, 分别讨论了在端面抽运和侧面抽运两种方式下, 各处抽运功率相同和总抽运功率相同时增益随光纤长度变化的情况, 发现多点耦合的确能够有效地提高信号光的增益。讨论了弯曲损耗和过剩抽运光对信号光增益的影响, 结果表明光纤的弯曲半径不要太小以致于产生太多的损耗从而导致增益降低, 而剩余的抽运光可忽略不计。这种方法不仅为微棱镜的制造和实验操作带来了方便, 而且有效地提高了光纤放大器信号光的输出增益。

关键词 光电子学; 光纤放大器; 肾形; 弯曲损耗; 侧向抽运

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Research on Fiber Amplifier of Many Position Side Pump Coupling

KONG Yong, GUO Ming-xiu, LU Yu-tian,

WANG Chang-an, ZHANG Chun-wei, XIANG Shi-qing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In this paper, based on the micro-prism coupling of side pump, the fiber is wound into a coil around a object of racetrack shape to make the micro-prism couple the pump light in many positions. Based on population rate equation, pump and signal propagation equation, a numerical simulation has been done. In the case of end pump and side pump, pump power of different position is same and the hole pump power is same, the fiber gain change with the fiber length has been discussed. It is found that the side pump coupling in many positions increases the fiber gain. The influence of the bending loss and the residual pump power on the fiber gain has been discussed too, the result showed that the fiber bending can't be too small and the residual pump power can be neglected. In this way, it can not only offer a simple way to design the micro prism and operate conveniently, but increase the signal output gain effectively.

Key words optoelectronics; fiber amplifier; kidney; the bending loss; side pump

1 引 言

目前, 能将激光二极管(LD)抽运光有效地耦合进双包层光纤的技术主要有两种: 端面耦合技术^[1~3]和侧面 V 形槽技术^[4~6]。端面耦合技术简单而且耦合效率高($\gg 50\%$)。但是, 由于双包层光纤只有两个端面能将抽运光注入光纤, 因此限制了能入射到光纤中的最大抽运光功率; 侧面 V 形槽耦合

技术则克服了端面耦合技术的缺点, 它既有很高的耦合效率, 又实现了抽运光与双包层光纤的侧面耦合, 使得光纤的端面可以同其他光纤熔接。但由于 V 形槽的槽深只能小于内包层宽度的一半, 因此形成的反光面积小, 对于像大功率 LD 阵列这样的光源, 其光束半径较大, 它的耦合效率就会受限。文献[7]提出了一种微棱镜侧面耦合技术, 在一定程度上克服了上述耦合技术的缺点, 它具有对抽运光不敏

收稿日期: 2003-01-02; 收到修改稿日期: 2003-05-13

基金项目: 国家 863 高科技研究发展项目资助课题。

作者简介: 孔 勇(1977—), 男, 山东人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事锁模激光器和光纤放大器的研究。E-mail: ky7757@sohu.com

感、耦合效率高等优点,有利于特殊形式的大功率光纤激光器。但此法的棱镜尺寸较小,不利于微棱镜的加工和实验中的实际操作,本文在此基础上提出利用缠绕光纤的方法来增大棱镜的尺寸,从而有效地进行侧向耦合。这种空间多点抽运方法与传统的单一端面抽运相比,可将整体所需抽运功率分配至多点,提高了整体的输入功率,从而提高了输出功率。尤其在抽运注入功率量级需要提升到如百瓦级激光器件的高水平时^[8],这种方法就特别重要。文中针对掺铒光纤放大器的缠绕侧向抽运进行了数值分析。

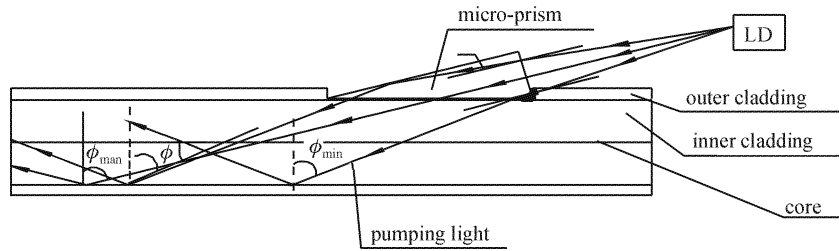


图 1 LD 侧向抽运微棱镜耦合方案示意图

Fig. 1 Scheme for coupling LD pumping light into double-cladding fiber by micro-prism

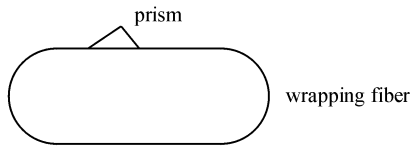


图 2 光纤缠绕及微棱镜耦合方案的截面图

Fig. 2 Cross section of coupling of the wrapping fiber and the prism

3 数值分析

所分析的掺铒离子是四能级分布,掺铒光纤放大器的信号功率、抽运功率和粒子分布满足以下速率方程^[10]

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = (N_3 \sigma_s^e \Gamma_s - N_2 \sigma_e^a \Gamma_s) \times P_s - \alpha_R^s P_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} = (N_1 \sigma_p^a \Gamma_p - N_4 \sigma_p^e \Gamma_p) \times P_p - \alpha_R^p P_p \quad (2)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \omega_p (N_1 - N_4) - A_{43} N_4 \quad (3)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \omega_s (N_2 - N_3) + A_{43} N_4 - A_{32} N_3 \quad (4)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \omega_s (N_3 - N_2) - A_{21} N_2 + A_{32} N_3 \quad (5)$$

$$N_1 = N_0 - N_2 - N_3 - N_4 \quad (6)$$

式中 $P_p, P_s, N_0, N_i (i = 1 \sim 4)$ 分别为抽运功率、信

2 耦合方案

文献[7]中的微型棱镜耦合方案如图 1 所示,具体设计参数在此不再作说明。图 2 是光纤缠绕方式及微型棱镜耦合剖面图,当光纤并排缠绕起来时,可使得微棱镜尺寸增大,这有利于实验中的操作和微棱镜的加工,并且提高了抽运光的输入功率。为减小光纤的螺旋光传播以提高光纤放大器的增益,对于光纤的绕法可采用文献[9]的肾形绕法。

号功率、总粒子数、各能级粒子数, $\sigma_s^a, \sigma_s^e, \sigma_p^a, \sigma_p^e, \omega_s, \omega_p, A_{ij}, \Gamma_s, \Gamma_p, \alpha_R^s, \alpha_R^p$ 分别为信号光吸收截面、信号光发射截面、抽运光吸收截面、抽运光发射截面、受激辐射率、抽运率、各能级自发跃迁几率、信号光与粒子数分布的重叠因子、抽运光与粒子数分布的重叠因子和因光纤弯曲而导致的信号光和抽运光损耗系数。

在稳态下 N_2 和 N_4 的数值可忽略不计^[8],由以上公式可得出

$$N_1 = N_0 \frac{1 + \omega_s \tau}{1 + \tau(\omega_p + \omega_s)} \quad (7)$$

$$N_3 = N_0 \frac{\omega_p \tau}{1 + \tau(\omega_p + \omega_s)} \quad (8)$$

因为 $\omega_s = \left(\frac{\sigma_s}{h\nu_s A} P_s \Gamma_s \right), \omega_p = \left(\frac{\sigma_p}{h\nu_p A} P_p \Gamma_p \right)$, 公式中 A, ν_s, ν_p, τ 分别为抽运有效截面、信号频率、抽运频率和三能级到二能级的自发辐射时间,将上两式代入(7),(8)两式可得

$$N_1 = \frac{1 + \tau \left(\frac{\sigma_s}{h\nu_s A} P_s \Gamma_s \right)}{1 + \tau \left(\frac{\sigma_s}{h\nu_s A} P_s \Gamma_s + \frac{\sigma_p}{h\nu_p A} P_p \Gamma_p \right)} \quad (9)$$

$$N_3 = \frac{\tau \left(\frac{\sigma_p}{h\nu_p A} P_p \Gamma_p \right)}{1 + \tau \left(\frac{\sigma_s}{h\nu_s A} P_s \Gamma_s + \frac{\sigma_p}{h\nu_p A} P_p \Gamma_p \right)} \quad (10)$$

对于单位弧长上的弯曲损耗^[11] dB 数 α_R 为

$$\alpha_R = \frac{4.3429\pi W U^2}{2\beta a^2(1+W)V^2 K_1^2(W)} \exp\left(-\frac{2W^3}{3\beta^2 a^2} \frac{R}{a}\right) \quad (11)$$

式中 U 为径向归一化相位常数, W 为径向归一化衰减常数, V 为归一化频率, a 为纤芯半径, R 为弯曲半径, $K_1(W)$ 为一阶第二类修正的贝塞尔函数, β 为光在光纤里沿轴向传播的常数, $K_1(W) = |T + \ln(W/2)| I_1(W) + I_0(W)/W - A$, $T \approx 0.577216$, 其中 $I_1(W) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(W/2)^{2n+1}}{n!(n+1)!}$, $I_0(W) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(W/2)^{2n}}{n!^2}$, $A = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n(W/2)^{2n-1}}{n!(n+1)!} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}\right)$, 对于单模光纤在弱导条件下, 近似地取 $W \approx 2.748 \frac{\lambda_c}{\lambda} - 0.996$ 。

将(9)~(11)式代入(1)和(2)式, 利用龙格-库塔法进行数值求解。光纤参数取如下数据: 抽运波长为 808 nm, 信号波长为 1064 nm, 抽运吸收截面和发射截面 $\sigma_a(\nu_p) = 1 \times 10^{-24} \text{ m}^2$, $\sigma_e(\nu_p) = 0.4 \times 10^{-24} \text{ m}^2$, 信号光吸收截面和发射截面 $\sigma_a(\nu_s) = 0.4 \times 10^{-24} \text{ m}^2$, $\sigma_e(\nu_s) = 1.4 \times 10^{-24} \text{ m}^2$, 三能级荧光寿命为 0.5ms, 掺铈离子浓度 $N_0 = 4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, 信号功率为 1 mW, 纤芯半径为 3 μm , 光纤长 40 m, $\Gamma_s = 0.6$, $\Gamma_p = 1$, 分别对单独的端面抽运和端面抽运结合侧面抽运的两种情况进行了分析, 假设端面抽运光耦合效率为 70%, 单个光纤侧面的耦合效率为 90% (关于微棱镜的耦合的相关分析在文献[7]中已做了详细的分析), 同时假设涂覆层与外包层的直径比为 5:4, 所以光纤缠绕后侧面耦合的效率应为 $90\% \times (4/5) = 72\%$ (忽略了光纤并排缝隙间抽运光的泄露)。

图 3(a) 上面的曲线表示分别在正向端面 0 m, 10 m, 20 m, 30 m 各处抽运功率为 0.8 W, 下面的曲线表示正向端面抽运功率为 0.8 W 时的光纤增益随光纤长度的变化曲线。可以看出当采用多处抽运后光纤增益大大增加, 并且对于多点抽运时在各抽运处有明显的增益突变, 这是因为各处注入的抽运光使得粒子得到了更大程度上的反转, 从而大幅度地提高了增益值。图 3(b) 上面的曲线正向端面抽运功率为 0.8 W, 下面的曲线为正向端面 0 m, 10 m, 20 m, 30 m 各处抽运功率为 0.2 W 时的光纤增益随光纤长度的变化曲线。可以看出采用总功率相同的情况下, 总的增益基本相同。

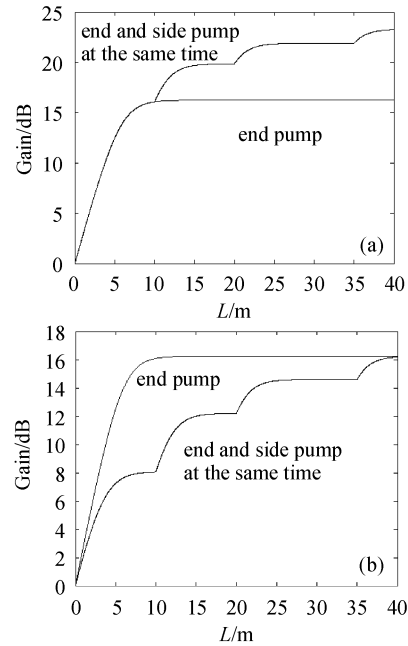


图 3 两种不同抽运方式下光纤增益随光纤长度的变化

(a) 各处抽运功率相同时; (b) 总抽运功率相同时

Fig. 3 Curve of the fiber gain vs the fiber length in the difference pump cases

(a) pump power is same at every couple places; (b) total pump is same

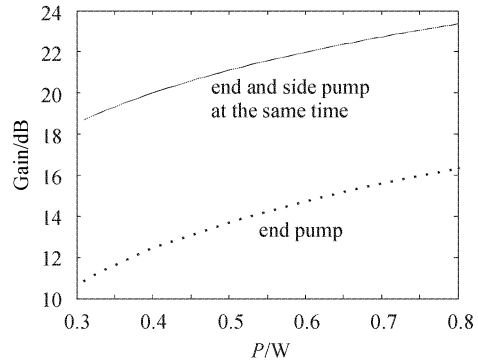


图 4 不同耦合方案下光纤增益随抽运光功率变化的曲线

Fig. 4 Curve of the fiber gain vs pump power in the difference pump cases

图 4 为随抽运功率变化的两种抽运方式的增益变化曲线。当功率提高时, 第二种抽运方案将大大地提高光纤的增益, 这和图 3(a) 的分析结果是一致的。模拟中没有考虑抽运光、信号光在微棱镜处的泄露和光纤弯曲处的损耗影响, 以下将讨论这两种情况的影响。图 5 从上往下的曲线是在端面 and 侧面相结合的抽运方式下光纤弯曲分别为 ∞ (即不发生

光纤弯曲), 3 cm, 2.5 cm 时光纤增益随长度的变化曲线。可以看出光纤的缠绕半径大于 3 cm 时, 光纤增益基本和光纤不发生弯曲时相同, 而稍微小于此值时, 光纤增益就会大大降低, 在实际光纤缠绕实验中应该注意这一点(即如图 2 中缠绕后的半圆长度不要小于 9 cm, 在这里取 50 cm), 不要小于某弯曲半径值, 否则太大的弯曲损耗会大大地降低光纤的增益。

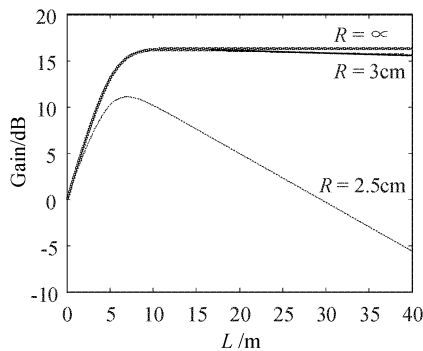


图 5 不同弯曲半径下光纤增益随光纤长度变化的曲线

Fig. 5 Curve of the fiber gain vs the fiber length in the difference bending radius

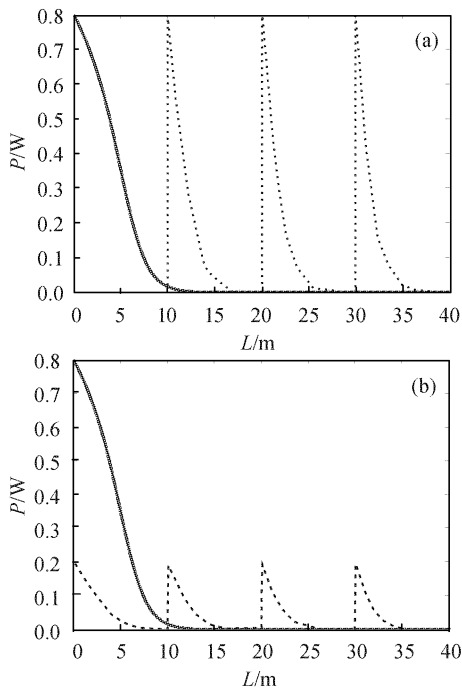


图 6 图 3 情况下抽运光随光纤长度的变化
(a) 图 3(a)情况; (b) 图 3(b)情况

Fig. 6 Curve of the pump power vs the fiber length in the same instance of Fig. 3
(a) for Fig. 3(a); (b) for Fig. 3(b)

图 6(a), (b) 分别是图 3(a), (b) 中各点抽运光功率在光纤内随光纤长度变化的曲线。由此可知各点的抽运功率在下一个抽运点处已变得很小, 所以模拟中可以忽略上一点抽运对下一点剩余抽运光的影响(即没有考虑抽运光的叠加效应), 另外为了避免信号光一部分从微棱镜逃离, 应当对微棱镜进行信号光波长处的增反膜处理, 使得信号光重新返回到光纤中从而避免信号光引起过大的泄露损耗。

4 结 论

利用缠绕光纤的方法, 用微棱镜对光纤进行多处抽运耦合, 这种方法有利于微棱镜的加工和实验中的操作, 对大功率的光纤耦合提供了一种新的方案, 通过数值模拟的方法证明了它确实能够大幅度地提高光纤放大器的增益, 并对相关问题进行了分析。

参 考 文 献

- H. Po, J. D. Cao, B. M. Laliberte. High power neodymium-doped single transverse mode fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(17):1500~1501
- Tetsuya Miyazaki, Keizo Inagaki, Karasawa Yoshio *et al.*. Nd-doped double-clad fiber amplifier at 1.06 μm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(4):562~566
- H. Zellmer, U. Willamowski, A. Tünnermann *et al.*. High-power cw neodymium-doped fiber laser operating at 9.2 W with high beam quality [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6):578~580
- D. J. Ripin, L. Goldberg. High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded V-grooves [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(25):2204~2205
- L. Goldberg, J. P. Koplow, R. P. Moeller *et al.*. High-power superfluorescent source with a side-pumped Yb-doped double-cladding fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(13):1037~1039
- L. Goldberg, J. P. Koplow, Dahv A. V. Kliner. Highly efficient 4-W Yb-doped fiber amplifier pumped by a broad-stripe laser diode [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10):673~675
- Wang Chang'an, Xiang Shiqing, Lu Yutian *et al.*. New side-pumped technology of coupling LD pumping light into double-cladding fiber by micro-prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10):1259~1262
王常安, 向世清, 陆雨田 等. 利用微型棱镜将激光二极管抽运光耦合进双包层光纤的新技术[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10):1259~1262
- V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14):1158~1160
- H. Zellmer, A. Tünnermann, H. Welling. Fiber lasers-compact laser light sources for the near infrared spectral range [J]. *Laser und Optoelektronik*, 1997, **29**(4):53~59
- Etienne Rochat. High Power optical fiber amplifiers for coherent inter-satellite communication [D]. Universite de Neuchatel Institut de Microtechnique, 2000. 1~113
- J. A. Lazaro, M. A. Rebolledo. Numerical simulation of bending effects in erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Pure Appl. Opt.*, 1996, **5**(3):293~300