

文章编号: 0253-2239(2003)02-0249-06

# 空间多点抽运双包层光纤激光器的数值分析: 典型三点抽运情形

张春伟 向世清 王常安

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 利用数值模拟对在空间不同三点设立抽运点的几种典型抽运条件下包含放大自发发射的掺 Yb 光纤高功率激光器特性进行了分析。结果表明, 即使不考虑抽运光的腔镜反射, 对于不同的三点抽运情形, 也存在不同的激光分配及功率分布特点。

**关键词:** 光纤激光器; 放大自发发射; 三点抽运; 数值模拟

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## 1 引 言

如何更有效地利用半导体激光器作为高功率双包层光纤激光器的抽运源一直是人们关注的焦点。较普遍的抽运方法有端面抽运、侧面抽运<sup>[1]</sup>, 按抽运光传输方向的不同, 还可分为前向抽运、后向抽运和双向抽运<sup>[2]</sup>等。我们已提出并分析过空间多点抽运方式, 这种方式是指在沿光纤长度方向上的不同位置设立多个抽运点, 抽运点可以在光纤端面或是光纤中某位置。如果在端头, 则属于端面抽运; 如果在中间, 则属于侧面抽运。

空间多点抽运方法与传统的单一端面抽运相比, 是十分不同的多抽运源复用方式, 可以避开其各种不足。如可将整体所需抽运功率分配至多点, 从总体上提高整体输入功率, 从而提高输出功率。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<sup>[3]</sup>, 这种方法就特别重要。此外, 多点抽运可以根据具体情况来设计抽运位置和功率大小。根据我们的分析可以看到, 其中最重要的是可以改变单纯端面抽运只可能形成沿长度的非均匀增益分布的结果, 从而形成更为有效的增益分布。所以这种抽运方法特别适合于抽运超高功率的双包层光纤激光器件, 后者的结构也使其成为可能。

在空间多点抽运中, 三点抽运是最少抽运点的情形。而最简单的三点情形则是在双端面抽运下加入一个侧向抽运。由于刚好包括最基本的端面和侧

面抽运, 所以其有别于单端面或双端面抽运, 是比较特殊且最值得研究的一种情形。此外, 包括一个端面抽运两个侧面抽运的情形(这里包括一个正向端面或一个反向端面抽运)也是基本的情形。本文就研究这两种基本情形。需强调的是, 只包含一个端面抽运的情形可看作是沿光纤分布的任意三点分布中的一点向  $z=0$  或  $z=L$  点靠近的情形。

由于双包层光纤本身的特点(其内包层具有一定的几何形状), 抽运光在内包层中不断反射并穿过纤芯, 将使包层中的抽运光模式发生模式间耦合, 转化为信号光模式, 进而耦合进纤芯, 大大提高了抽运光的耦合效率。在这个过程中, 若存在不完全耦合, 只需将总耦合功率乘一系数, 折算为可完全耦合的功率即可适用本方法。

我们以掺 Yb 的高功率双包层光纤激光器为对象进行研究。这种典型的光纤激光器本身具有高增益的特性, 放大自发发射(ASE)不可忽略。因此我们从理论及数值上详尽地分析了其在考虑放大自发发射情况下的应用三点抽运的激光器特性。

## 2 理论模型

我们从稳态下激光腔内激光光子所满足的方程出发可得出光纤激光器中正反向激光功率沿光纤长度分布的微分方程。

因为双包层光纤中抽运光在内包层中多模传输, 内包层的尺寸可以容纳足够多的模运行, 同时因为光纤足够长, 绝大部分模被很好地传导, 并多次折返通过纤芯产生增益, 故可以认为各模对纤芯中的

E-mail: luqing@siom.ac.cn

收稿日期: 2001-12-12; 收到修改稿日期: 2002-04-28

单模激光形成相等增益。因此,对于这里所分析的 激光增长可以采用以下方程<sup>[4]</sup>:

$$\frac{dP_i^\pm}{dz} = \frac{\sigma_s \tau_f}{h\nu_p} \alpha_a P_p \exp[-(\alpha_a + \alpha_p)z] \frac{\eta_i}{A_f} \frac{P_0 + P_i^\pm(z)}{1 + [P_i^+(z) + P_i^-(z)]/P_s} \mp \alpha_i P_i^\pm(z), \quad (1)$$

$P_s = I_{\text{sat}} A_f / N$ ,  $I_{\text{sat}}$  为线形中心的饱和强度,  $N$  为光纤中激光模数,对于单模光纤,  $N = 1$ 。 $\eta_i$  为第  $i$  个模

在纤芯中的能量占该模总能量的比例,这里  $\eta_i \approx 1$ 。若考虑拉曼散射引起的损耗,则有

$$\frac{dP_i^\pm}{dz} = \pm \frac{\sigma_s \tau_f}{h\nu_p} \alpha_a P_p \exp[-(\alpha_a + \alpha_p)z] \frac{1}{A_f} \frac{P_0 + P_i^\pm(z)}{1 + [P_i^+(z) + P_i^-(z)]/P_s} \mp (\alpha_0 + \alpha_{\text{SRS}}) P_i^\pm(z), \quad (2)$$

式中  $P^\pm$  为正向和反向激光功率,  $\sigma_s$  为工作介质受激发射截面线宽中心值,  $\tau_f$  为工作介质荧光寿命,  $\nu_p$  为抽运光子频率,  $P_p$  为抽运光入射点入射功率值,  $\alpha_a$  为掺杂离子在抽运波长处引起的光纤吸收系数,  $\alpha_p$  为其它机制引起的损耗系数。 $A_f$  为光纤纤芯的横截面积,  $P_0$  为与增益带宽中一个光子有关的功率,  $\alpha_0$  为在激光波长处的线性损耗系数,  $\alpha_{\text{SRS}}$  为受激拉曼散射产生的非线性损耗系数<sup>[5]</sup>。

(2) 式是变量  $P^+$  和  $P^-$  关于  $z$  的微分方程,其中抽运光在  $z$  到  $z + dz$  处被吸收的分数表达式为

$$l = \alpha_a P_p \exp[-(\alpha_a + \alpha_p)z]. \quad (3)$$

为了简化问题,假定  $\alpha_a$  为与空间变量  $z$  无关的常数,对于抽运点位置及数量的变化,可直接在方程中将对应的  $P_p$  值代入,而抽运位置的变化则体现在(3)式的抽运光吸收表达式中,即(2)式应针对抽运点位置的变化进行相应的坐标平移。现在已经在理论和实验上证明,即使激光器输出功率达到 50 W(这相当于光纤内存在更高功率水平的抽运光),非线性光学效应和热效应也不是重要的影响因素<sup>[3,6]</sup>,因此通过(2)式求解的激光分布基本可以反映掺 Yb 光纤激光器中的实际激光分布。并且由于在单模纤芯内部抽运光发生作用并非是直接由一种模式(或一种波长的光分布)经过耦合转移到另一种光模式(或另一种波长的光分布),而是通过掺杂介质的能量转移作用,因此在双包层光纤激光器中,可按能量方式进行研究<sup>[7]</sup>。此外,(2)式已经考虑了放大自发发射甚至抽运非一致性等的影响,这可在已有的国外文献中找到<sup>[6]</sup>。所以,采用这一公式已经考虑到了实际中可以构成影响的主要因素,保证了结果的正确性。

### 3 数值模拟

为了更清晰地描述激光功率沿光纤长度上的变

化规律,我们应用数值方法(四阶龙格库塔法)对其进行数值模拟计算,计算中一部分参量参考了文献[8]。(2)式只是包含了放大自发发射的  $P^\pm(z)$  的表达式。

在研究实际的光纤激光器时,必须加入两个端面反射镜以对其加以限制。我们采用在方程中以损耗系数  $\alpha_p$  计入反射镜的影响的方法来加以处理。按照一般的实验情形,信号光在一端高反(这里均假定为左反射端),另一端(出射端)为 4% 左右的反射<sup>[9]</sup>。这里除最后给出的一种情况外,其余情形没有考虑腔镜对抽运光的反射,这在实际中也具有一定的意义。

在方程求解中是利用迭代的方法逐次求出所设点的正向和反向激光功率值,所设步长可以使方程求解较为准确,从而准确地反映抽运光和正反向激光的功率分布。

图 1 中将单点抽运同多点抽运进行了对比,总抽运功率相同,但多点抽运的每单个抽运功率均小于单点的端面抽运功率。图 1(a)中增益曲线较为平滑,但是很不均衡,初始端增益较高( $12.4 \times 10^{-4}$ ),随长度增加逐渐降低( $0.73 \times 10^{-4}$ ),因此,正向激光后半部分增长很小,趋于平稳。这与抽运光功率分布趋势相一致。图 1(b)中,在加入抽运点后,增益分布明显得到了均衡,增益在加入抽运点处有一小小尖峰( $4.202 \times 10^{-4}$ ),沿光纤长度上能保持较高的均衡,最低点为  $0.73 \times 10^{-4}$ ,因此正向激光始终保持增加。可以看出,增益的分布将直接影响激光的增长,而多点抽运在新抽运点处使增益得到了均衡是明显的。图 1(b)中(多点抽运)的输出功率超过 30 W(31.085 W),图 1(a)中(单点抽运)的输出功率接近 30 W(29.511 W)。改变抽运点的位置,均可得到类似结果。因此,通过多点抽运,可以使增益在整个光纤长度上保持均衡,从而提高输出

功率,即转换效率得到了提高。在实际工作中,可以在不增加单个半导体激光器功率的前提下,用多个

半导体激光器组合达到高输入功率,从而得到更高的输出功率。

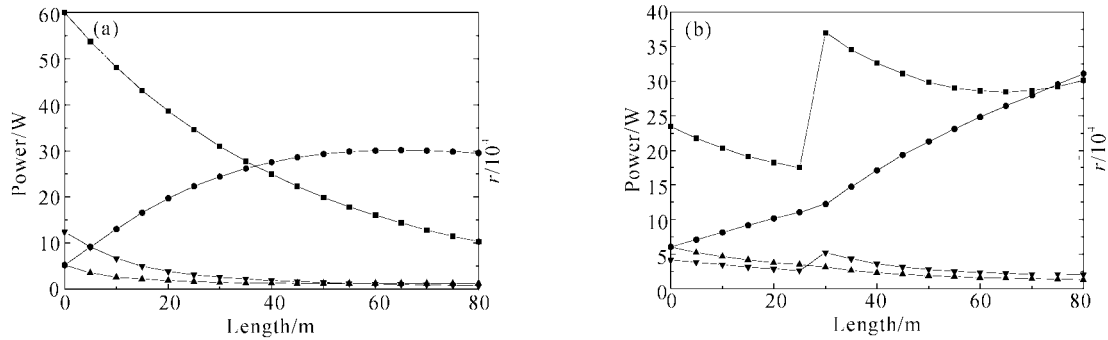


Fig. 1 Contrast of one-end-pumping and many-position-pumping. (a) Forward pumping of 60 W end-pumping; (b) Pumping of 20 W, 20 W, 20 W at  $z=0$ ,  $z=30$  m,  $z=L$  respectively. —■—: pump light, —•—: forward laser; —▲—: backward laser; —▼—: gain factor  $r$

图 2 中两种情况抽运光均为正向抽运,没有反向抽运,总抽运功率均为 60 W,并且在  $z=0$  点都设置了 20 W 的抽运功率。从增益分布曲线分析,图 2(a)和图 2(b)中的增益分布都较为均衡,都有两个尖峰,这与抽运光分布相一致,图 2(b)中的增益在  $z=30$  m 处有个大尖峰( $6.977 \times 10^{-4}$ ),随后在较长一段距离保持高增益,因此尽管两图的增益都较为均衡,但激光输出功率仍有差异。图 2(a)中,高抽运点在  $z=60$  m 处,图 2(b)中高抽运点在  $z=30$  m 处。图 2(b)中输出功率为 22.851 W,图 2(b)中输

输出功率为 26.842 W。在正反向激光分布曲线中,在新的抽运源引入的位置,正向激光都有一个小的功率攀升。

由于新的抽运点的抽运光注入,使该点增益上升,整体上提高了增益。由于这里的抽运点位置分别对应相同,只是功率大小不同,所以,我们得出在三点总功率相同情况下,并且三点均进行正向抽运时,若想得到高的激光功率输出,就要把高功率抽运源适当靠近入射端方向。改变抽运点的位置,均可得到类似结果。

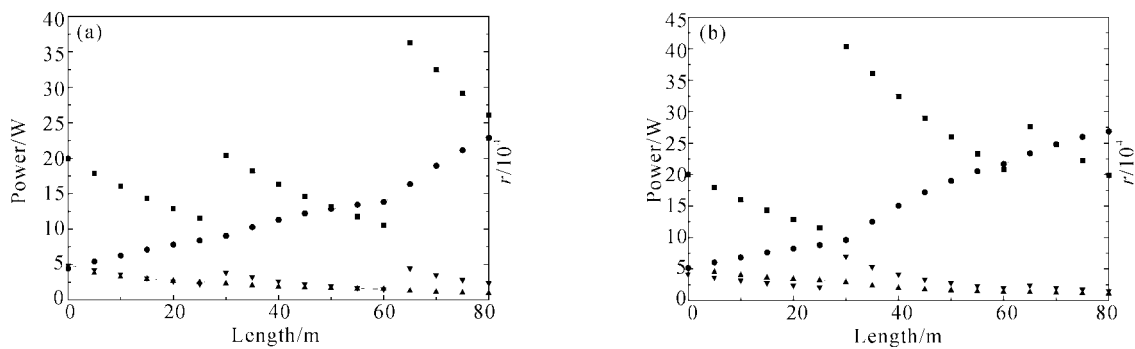


Fig. 2 Many-position-pumping of equal pump position and different pump power. (a) Pumping of 20 W, 10 W, 30 W at  $z=0$ ,  $z=30$  m,  $z=60$  m respectively; (b) Pumping of 20 W, 30 W, 10 W at  $z=0$ ,  $z=30$  m,  $z=60$  m respectively. —■—: pump light, —•—: forward laser; —▲—: backward laser; —▼—: gain factor  $r$

图 3 中的两种情况各点抽运功率均为 20 W,仅抽运位置不同。图 3(a)中,增益波动较大,最高点  $5.494 \times 10^{-4}$ ,最低点为  $1.93 \times 10^{-4}$ 。图 3(b)中的增益分布较为均衡,始终保持了较高的水平,因此,整体上要高于图 3(a)中的增益分布。图 3(a)中第三抽运点为正向抽运,图 3(b)中第三抽运点在出射端进行反向抽运。

我们可以看到两图中正向激光都始终在增长,

图 3(b)中增长幅度大于图 2(a)中的增长幅度。图 3(b)中的输出功率(约 31 W)要明显高于图 3(a)中的输出功率(约 25 W),这是由于图 3(a)中第三个抽运点在光纤尾部进行反向抽运,而在相同功率抽运情况下,正向端面抽运的输出功率要略小于反向抽运的输出功率,这已经有文献报道<sup>[8]</sup>。所以,在总功率相同、各抽运点抽运功率也对应相同情况下,正反向抽运相结合的输出功率要比仅单纯实现正向抽

运功率分配的输出功率要高。因此应尽量实现包括 反向抽运的多点抽运。

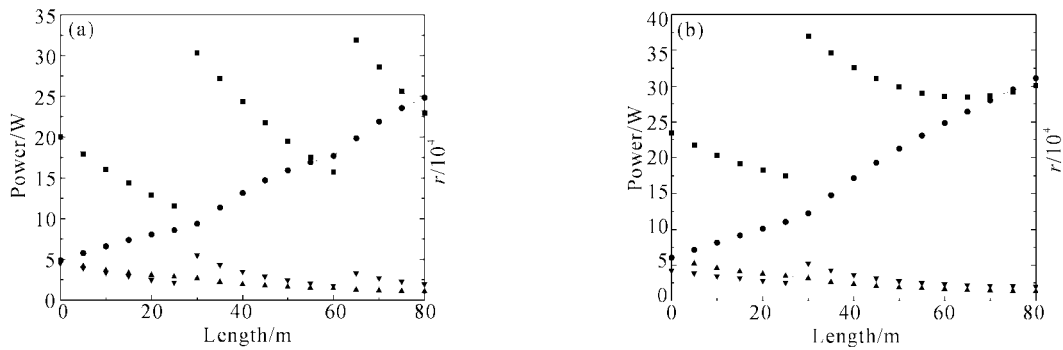


Fig. 3 Many-position-pumping of equal pump power at pump position respectively. (a) Pumping of 20 W, 20 W, 20 W at  $z=0$ ,  $z=30$  m,  $z=60$  m respectively; (b) Pumping of 20 W, 30 W, 10 W at  $z=0$ ,  $z=30$  m,  $z=60$  m respectively. —■—: pump light, —•—: forward laser; —▲—: backward laser; —▼—: gain factor  $r$

图 4 的两种情况是抽运位置设置相同功率分配不同的研究情况。图 4(a)和图 4(b)中的增益分布都较为均衡,激光输出功率都较高。图 4(a)中的增益分布曲线始终保持了较高的水平,仅仅在  $z=30$  m 处有一个突起,然后基本保持水平状态,最高点为  $4.339 \times 10^{-4}$ ,最低点为  $2.382 \times 10^{-4}$ 。图 4(b)中的增益分布起伏较大,在光纤尾部增益降低,最高点为  $5.225 \times 10^{-4}$ ,最低点为  $2.201 \times 10^{-4}$ 。图 4(a)中,20 W 和 10 W 两个抽运源分别在入射端和  $z=30$  m

两处进行正向抽运,30 W 进行反向抽运。图 4(b)中则三个 20 W 分别在相应位置进行抽运,抽运方式相同。图 4(a)中的输出功率为 32.212 W,图 4(b)中的输出功率为 31.085 W,图 4(a)中的抽运光曲线分布较为平滑,出射端抽运功率较高,这是决定两图中输出功率差异的主要原因。所以在三点设置相同功率的抽运源时的输出不是最大输出,可适当实现反向高抽运,从而使增益得到均衡,进而提高输出功率。

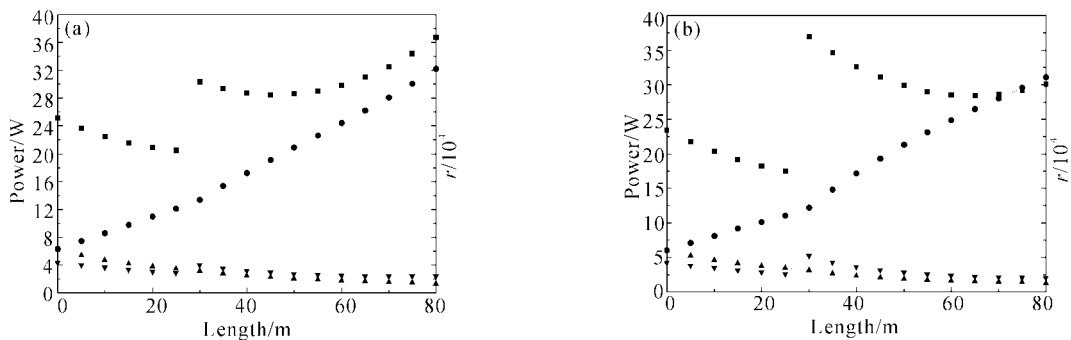


Fig. 4 Contrast of operation of equal position and different power. (a) Pumping of 20 W, 10 W, 30 W at  $z=0$ ,  $z=30$  m,  $z=L$  respectively; (b) Pumping of 20 W, 20 W, 20 W at  $z=0$ ,  $z=30$  m,  $z=L$  respectively. —■—: pump light, —•—: forward laser; —▲—: backward laser; —▼—: gain factor  $r$

图 5 中抽运位置设置相同、功率分配相同、但对抽运光反射限制不同。两图中增益分布都很均衡,增益差都不超过  $2 \times 10^{-4}$ 。图 5(b)中增益曲线由于抽运光加了反射限制,光纤中抽运功率分布增加,整个光纤长度上保持了高增益。图 5(a)中的输出功率为 32.212 W,图 5(b)中的输出功率为 38.675 W。两种情况比较,尽管抽运位置设置相同功率分配相同,但输出功率却相差较大,可见对抽运光加反射限制可大大改善多点抽运情况下的功率输出。因此,在实际工作中,可适当加入对抽运光的反射限制,从而

提高激光输出功率。

我们也曾经做过 60 W 以外的多组数据分析,结论和趋势与上述结论完全一致。因此,这里得到的结论具有一定的普遍性。

受篇幅所限,本文中并没有给出抽运点位置变化对激光特性的具体影响情况。

综上所述,采用多点抽运,可以使抽运光在光纤中的分布更加平坦,进而使光纤中的增益更加均衡,从而在较长光纤长度上对信号光进行均衡的放大。相比于正反双向抽运,更加增添了抽运方式的灵活

性,使总的抽运功率得以增加。三点抽运是其中最典型的情况,它在包含了正反向端面抽运的同时,拥有了最少数量的侧向抽运,并且也充分体现了空

间多点抽运的优越性。可以说,三点抽运可以比较充分地说明多点抽运的特点。

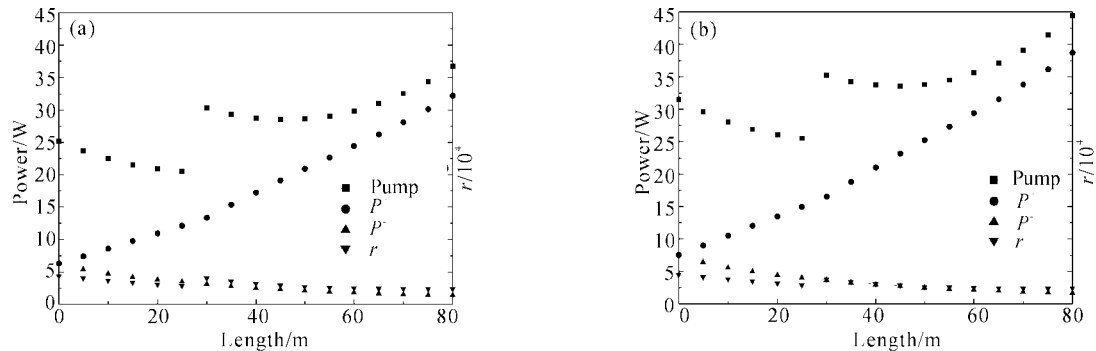


Fig. 5 Contrast of operation of equal power distribution under situation with reflection of pump light and situation without reflection of pump light. (a) Pumping of 20 W, 10 W, 30 W at  $z=0$ ,  $z=30$  m,  $z=L$  respectively (without reflection of pump light); (b) Pumping of 20 W, 10 W, 30 W at  $z=0$ ,  $z=30$  m,  $z=L$  respectively (with reflection of pump light)

**小结** 本文从光传输方程出发,利用数值模拟获得了几种最典型的三点抽运方式情形,具有一定的普遍性。同时,得出了以下结论:

1) 在总功率一定并且三点均进行正向抽运时,若想得到高的激光功率输出,就要把高功率抽运源适当靠近入射端方向。

2) 在总功率相同各抽运点抽运功率也对应相同情况下,正反向抽运相结合的输出功率要比仅单纯实现正向抽运功率分配时的输出功率高。

3) 若进行正反抽运相结合的抽运方式,将总功率平均分配给三点设置进行抽运时的输出不是最大输出,可略微实现反向端的高功率抽运,正向抽运功率略微降低。

4) 在实际工作中,可通过加入对抽运光的反射限制,来改善激光输出。

本文也说明,虽然由于侧面抽运技术的引入会不可避免地增加抽运光损耗,但是多点抽运技术有其不可替代的优势:对于低输出功率(几瓦量级)的光纤激光器中,端面抽运完全可以适用。在需要光纤激光器输出功率达到 100 W 以上甚至数百瓦量级的时候,端面耦合将无法再将数百瓦的抽运光

耦合进双包层光纤中的要求,此时,只能采用多点抽运技术。

### 参 考 文 献

- Ripin D J, Goldberg L. High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded v-grooves. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(25):2204~2205
- Du Geguo, Chen Guofu, Liu Dongfeng. Theoretical studies on the distribution of pump power for 980 nm-pumped erbium-doped fiber amplifier. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **20**(2):175~180 (in Chinese)
- Dominic V, MacCormack S, Waarts R *et al.*. 110 W fibre laser. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14):1158~1160
- Digonnet M J F. Theory of superfluorescent fiber lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **L1-4**(11):1631~1639
- Li Cheng, Song Jie, Kim N S *et al.*. Diode-pumped high-power fiber lasers and applications. *Proc. SPIE*, 1999, **3862**:246~253
- Kim N S, Hamada T, Prabhu M *et al.*. Numerical analysis of output performance of Nd-doped double-clad fiber lasers. *Proc. SPIE*, 2000, **3889**:583~589
- DiGiovanni D J, Mucndel M H. High-power fiber lasers. *Optics and Photonics News*, 1999, **10**(1):27~30
- Kelson I, Hardy A A. Strongly pumped fiber lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **34**(9):1570~1577
- Minelly J D *et al.*. Diode-array pumping of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  Co-doped fiber lasers and amplifiers. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1993, **5**(3):301~303

## Numerical Analysis on Spatial Three-Position-Pumped Yb-Doped Double-Cladding Fiber Laser

Zhang Chunwei Xiang Shiqing Wang Chang'an

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

(Received 12 December 2001; revised 28 April 2002)

**Abstract:** Based on the numerical analysis of spatial different three-position-pumped situations, the research was carried out on the Yb-doped double-cladding fiber laser containing amplified spontaneous emission. The results show the different laser distribution and power characteristics for different three-position-pumped situations, even ignoring the reflection of the resonator to the pump light.

**Key words:** fiber laser; amplified spontaneous emission (ASE); three-position-pumping scheme; numerical simulation