

# 分布式侧面耦合包层抽运光纤激光器数值模拟

黄值河 曹润秋 郭少锋 陈金宝

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

**摘要** 研究了新型分布式侧面耦合包层抽运光纤激光器的特性。通过建立相互耦合的速率方程组,对分布式侧面耦合包层抽运光纤激光器进行了数值仿真。通过数值模拟与端面抽运双包层激光器进行对比,分别得到了两种模型的抽运光场分布和输出激光分布,以及探讨了最佳光纤长度等激光器特性参数。结果显示,分布式侧面耦合包层抽运光纤的信号光纤中抽运光分布比较均匀,两端的热负荷较小,激光产生的线性度很好,热量能够分散到整根光纤,在高功率激光器的应用中具有较大的优势,这为更大功率光纤激光器的实现提供了新的思路。

**关键词** 光纤光学; 光纤激光器; 侧面抽运; 速率方程; 端面抽运

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.040605

## Simulation of the Distributed Side-Coupled Cladding-Pumped Fiber Lasers

Huang Zhihe Cao Jianqiu Guo Shaofeng Chen Jinbao

College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** The characteristics of distributed side-coupled cladding-pumped fiber laser are studied with simulation based on a coupled rate equation model. Both the distributed side-coupled cladding-pumped fiber lasers and the end-pump double-cladding fiber lasers are simulated, and the distributions of the pump light and laser of the two models are given out. Then the optimum fiber length is discussed. The results show that the pump light in the signal fiber of distributed side-coupled cladding-pumped fiber is well-distributed and the thermal load of the two ends is released. The laser is produced linearly so that the heat is dispersed to the whole fiber. It is a great advantage to be applied to high power fiber lasers and provides a new road to the higher fiber lasers.

**Key words** fiber optics; fiber laser; side pumping; rate equation; end pumping

**OCIS codes** 060.2320; 060.2280; 140.3510

## 1 引言

高功率光纤激光器和放大器具有高的光转换效率、紧凑的空间结构、稳定的性能、优良的光束质量和方便的热管理等优点,已经成为近年来的研究热点<sup>[1-2]</sup>。随着掺杂双包层有源光纤的拉制技术和高功率激光二极管(LD)技术的成熟,千瓦级高功率光纤激光器已有报道<sup>[2-3]</sup>。尤其是2009年,IPG Photonics公司宣布成功研制出9.6 kW的单模光纤激光器<sup>[4]</sup>。传统的高功率光纤激光器采用端面抽运,利用合束器来实现抽运光的注入。抽运光大量集中在有源光纤和合束器连接处,由于量子亏损和耦合损耗导致产生了大量的热量,使得光纤端面的温度非常高,严重影响了合束器和有源光纤的运行安全。这也是多数光纤激光器功率受限的重要原因之一。

近年来,一种新型的分布式侧面耦合包层抽运(DSCCP)注入方法被提出<sup>[5-6]</sup>。这种方法较好地解决了光纤端面热量集中的问题,对抽运光的吸收和转化相对平稳<sup>[7]</sup>,使热量比较均匀地分散到整根光纤上。这样为更大功率光纤激光器的实现提供了新的思路。

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-10; 网络出版日期: 2014-03-25

作者简介: 黄值河(1985—),男,博士研究生,主要从事侧面抽运光纤激光器方面的研究。E-mail: hzhihe@163.com

导师简介: 陈金宝(1970—),男,博士,研究员,主要从事高能激光技术方面的研究。

E-mail: kdchenjinbao@aliyun.com

但是基于这种结构的激光器理论和模型还值得进一步研究和探讨。本文通过建立相互耦合的速率方程组,对这种分布式的侧面耦合包层抽运光纤激光器与双包层光纤(DCF)激光器进行了对比,为更好地应用和推广这种抽运耦合技术提供参考。

## 2 模型和理论

分布式侧面耦合包层抽运光纤通常有一根有源信号光纤和至少一根无源抽运光纤平行排列,它们被共同的外包层包裹着。抽运光通过倏逝波在抽运光纤和信号光纤之间耦合。抽运光纤的数量可以根据实际需要来确定,下面以最简单的一根抽运光纤和一根信号光纤的结构进行分析。典型的 DSCCP 光纤的横截面结构如图 1 所示。

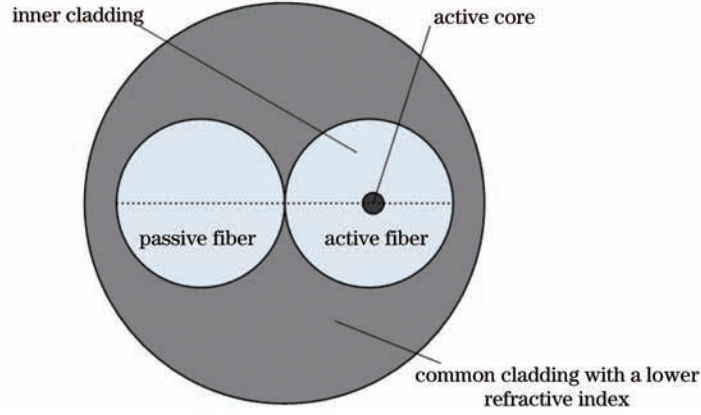


图 1 侧面耦合包层抽运光纤横截面图

Fig.1 Cross section of a side-coupled cladding-pumped fiber

与端面抽运双包层抽运光纤不同的是,有源光纤的内包层有一根与之保持光学接触的多模抽运光纤。抽运光首先被注入到无源光纤中,然后沿着光纤逐渐耦合到有源光纤中去,最终被有源光纤的纤芯所吸收。同时抽运光被折射率较低的外包层限制在光纤中。由于侧面抽运光纤比普通双包层光纤多了一根抽运光纤,并且抽运光在抽运光纤与有源光纤的内包层内是相互耦合传输的,因此在普通激光器速率方程中要把抽运光纤的影响考虑进去。

在该模型中忽略偏振效应,在强抽运条件下<sup>[9]</sup>,假设抽运光为单一波长,并考虑激光和抽运光的散射损耗,将抽运光在抽运光纤和信号光纤间的耦合与激光器速率方程结合,可以得出激光器的稳态速率方程为

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

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p \{ \sigma_{ap} [N - N_2(z)] - \sigma_{ep} N_2(z) \} \cdot P_p^\pm(z) - \alpha(z, \lambda_p) P_p^\pm(z) + K_2 P_{pp}^\pm(z) - K_1 P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_{pp}^\pm(z)}{dz} = -\alpha(z, \lambda_p) P_{pp}^\pm(z) - K_2 P_{pp}^\pm(z) + K_1 P_p^\pm(z), \quad (3)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z, \lambda)}{dz} = -\Gamma_s \{ \sigma_{as}(\lambda) [N - N_2(z)] - \sigma_{es}(\lambda) N_2(z) \} \cdot P_s^\pm(z, \lambda) - \alpha(z, \lambda) P_s^\pm(z, \lambda) + \Gamma_s \sigma_{es}(\lambda) N_2(z) P_0(\lambda), \quad (4)$$

式中  $N$  为稀土离子掺杂浓度,  $N_2(z)$  为上能级粒子数密度,  $P_p^\pm(z)$  为信号光纤中抽运光在  $z$  处的功率(正号表示正向传播,负号表示反向传播),  $P_{pp}^\pm(z)$  为抽运光纤中的抽运光在  $z$  处的功率,  $P_s^\pm(z, \lambda)$  为纤芯中激光在  $z$  处的功率,  $\Gamma_p$  为抽运光的填充因子,  $\Gamma_s$  为信号光的填充因子,  $\sigma_{es}(\lambda)$  和  $\sigma_{as}(\lambda)$  分别是信号光的发射和吸收截面,  $\sigma_{ep}$  和  $\sigma_{ap}$  分别是抽运光的发射和吸收截面,  $\alpha(z, \lambda)$  是散射损耗,  $P_0(\lambda)$  为自发辐射的功率,  $A$  为纤芯的横截面积,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中光速,  $\tau$  为上能级的寿命,  $K_1$  和  $K_2$  为抽运光纤与信号光纤之间的耦合系数。

激光器两端光栅处的边界条件满足

$$P_s^+(0, \lambda) = R_1 P_s^-(0, \lambda), P_s^-(L, \lambda) = R_2 P_s^+(L, \lambda). \quad (5)$$

### 3 数值模拟

对上述侧面耦合包层抽运光纤激光器速率方程模型和普通的端面抽运双包层光纤激光器模型进行数值迭代对比,通过数值结果讨论两种激光器的不同特性。数值模拟所用到的各个参数由表 1 给出。

表 1 数值模拟参数表

Table 1 Parameters used in simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
$\lambda_p / \text{nm}$	976	Core diameter $D_{\text{core}} / \mu\text{m}$	5.3
$\lambda_s / \text{nm}$	1064	Cladding diameter $D_{\text{cladding}} / \mu\text{m}$	118
$\tau / \text{ms}$	0.84	$\Gamma_p$	0.002
$\sigma_{\text{sp}} / \text{m}^2$	$2.5 \times 10^{-24}$	$\Gamma_s$	0.95
$\sigma_{\text{ep}} / \text{m}^2$	$2.5 \times 10^{-24}$	$N / \text{m}^{-3}$	$8.492 \times 10^{25}$
$\sigma_{\text{as}}(\lambda) / \text{m}^2$	$1.4 \times 10^{-27}$	$L / \text{m}$	10
$\sigma_{\text{es}}(\lambda) / \text{m}^2$	$2.0 \times 10^{-25}$	$R_1^* / \%$	99.9
$\alpha_p / \text{m}^{-1}$	0.005	$R_2^{**} / \%$	4
$\alpha_s / \text{m}^{-1}$	0.003	Numerical aperture of the core $NA_{\text{core}}$	0.12
$K_1, K_2 / \text{m}^{-1}$	2	Numerical aperture of the cladding $NA_{\text{cladding}}$	0.48

\*Reflectivity of high reflected grating

\*\*Reflectivity of low reflected grating

#### 3.1 上能级粒子数

通过数值模拟,在参数一致的情况下得到的两种模型的上能级粒子数与总的粒子数之比随着有源光纤位置的变化关系如图 2 所示。

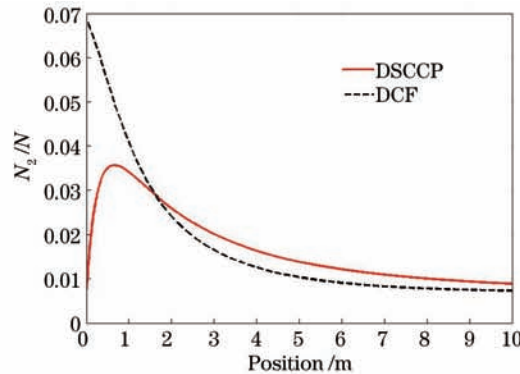


图 2 上能级粒子数与总的粒子数之比与光纤位置的关系

Fig.2 Relation between the ratio of up-level ions to total ions and fiber position

图 2 显示, DSCCP 光纤的上能级粒子数与总的粒子数之比始终小于 0.04, DCF 的上能级粒子数与总的粒子数之比始终小于 0.07, 即两者都满足  $N_2 \ll N$  的条件, 因此对模型的求解可以采用近似处理, 能够得到近似的解析解。DSCCP 光纤的上能级粒子数是随着光纤长度先增加后逐渐减小的, 这是抽运光的耦合效应与吸收效应的综合效果。这与 DCF 激光器中上能级粒子数的单调减小趋势是不一样的。

#### 3.2 抽运光光场分布

对两种模型的速率方程进行数值模拟, 得到它们抽运光分布的结果如图 3 所示。

图 3 中虚线为 DCF 中抽运光的分布, 呈“U”形状态; 点划线为 DSCCP 光纤中抽运光的抽运光分布, 也呈现“U”形状态; 而实线为 DSCCP 光纤中信号光纤的抽运光分布, 呈“M”形状态。因此 DSCCP 光纤中信号光纤的抽运光在两端是最少的, 而 DCF 在两端的抽运光是最多的, 这将导致两者在两端呈现出差别巨大的热效应。另外由于 DSCCP 光纤中抽运光分布整体比较均匀平坦, 在产生激光的过程中热量也将比较分散

和均匀。而端面抽运 DCF 的热量产生集中在光纤的两端,对光纤两端和合束器造成巨大的热负荷。DSCCP 光纤的这个优势使其在高功率激光器中更富有潜力。

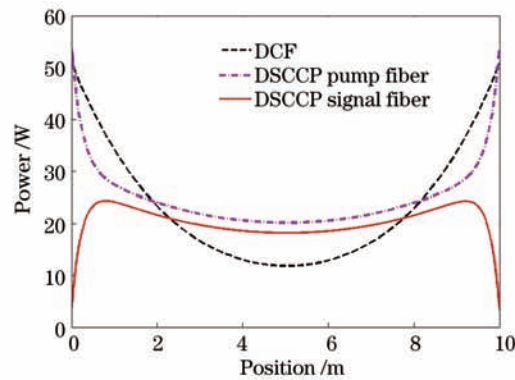


图3 数值模拟得到的抽运光分布

Fig.3 Distributions of pump light in simulation

### 3.3 光纤中激光功率与最佳光纤长度

针对光纤谐振腔中的激光功率分布,可以用数值迭代的办法得出稳态时的激光光场分布。图4是对两个模型进行数值模拟得到的激光光场分布的结果。

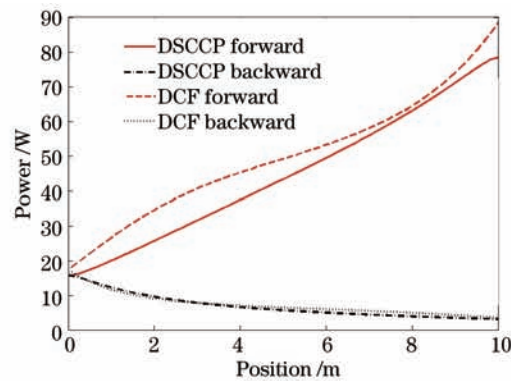


图4 光纤中的光场随光纤位置的分布

Fig.4 Distribution of laser field along the fiber

图4中实线表示的是 DSCCP 光纤的前向激光光场分布,激光增长的线性度很好,印证了抽运光分布对均匀产生激光的作用,这将会使得光纤纵向温度比较均匀,有利于热量的分散,不会产生热点;短划线表示的是 DCF 的前向激光光场分布,激光功率比 DSCCP 光纤稍微高一些,但是两端的斜率最高,热效应将会更加显著。点划线和虚线分别表示的是 DSCCP 光纤和 DCF 的后向激光光场分布,两者比较接近,差别不太明显。

模拟 DSCCP 输出激光功率与光纤长度的关系,如图5所示,其中实线表示的是抽运光由后向注入的结果,虚线表示的是抽运光由前向注入的结果。

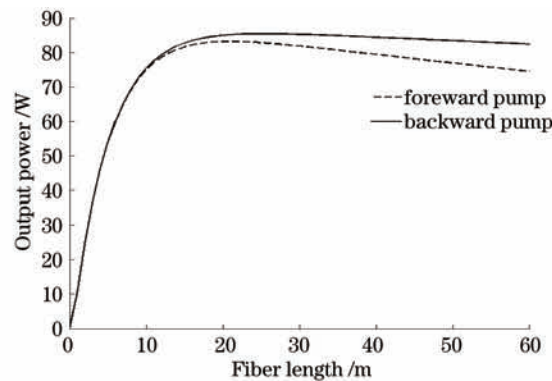


图5 输出功率与光纤长度的关系图

Fig.5 Relation between output power and fiber length

图5中还显示出后向抽运的激光输出功率比前向抽运高。模拟得到的后向抽运和前向抽运的最佳光纤长度分别为25 m和21 m。这与计算得到的相同纤芯和包层面积的端面抽运双包层光纤激光器的最佳长度20 m差不多,出光的光-光转换效率也差不多。因此,这种DSCCP光纤激光器能够在保持与DCF一样高效率的情况下,大大减缓光纤整体的热负荷。

## 4 结 论

对基于分布式侧面耦合包层抽运技术的光纤激光器的特性进行了数值模拟。首先从速率方程出发建立理论模型,通过数值模拟对比分别给出了DSCCP光纤和DCF的抽运光和激光的分布。与端面抽运光纤激光器相比,这种新型的DSCCP光纤激光器在两端的抽运光吸收和激光的产生都比较平缓。因此能够显著降低激光器两端的热载荷,使热量比较均匀地分布在整根光纤上,充分发挥光纤激光器的优点。这为设计高功率光纤激光器提供了理论指导和新的思路。

## 参 考 文 献

- 1 S Norman. Latest development of high power fiber lasers in SPI [C]. SPIE, 2004, 5335: 229-237.
- 2 Y Jeong, J Sahu, D Payne, *et al.*. Ytterbium doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous wave output power [J]. Opt Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- 3 V Gapontsev. 3 kW Single-Mode Output at  $\sim 1 \mu\text{m}$  from a Yb-Doped Fibre MOPA [C]. Photonics West, 2007.
- 4 IPG Photonics. IPG Photonics Successfully Tests World's First 10 Kilowatt Single-Mode Production Laser [OL]. <http://www.ipgphotonics.com/newsproduct.htm>, 2009-06-15.
- 5 C Codemard, A B Grudinin, P W Turner. Low noise, intelligent cladding pumped L-band EDFA [C]. Proc. ECOC'2002, 2002. PD1.6.
- 6 A B Grudinin, D N Payne, P W Turner, *et al.*. Multi-fiber arrangements for high power fiber lasers and amplifiers [P]. US Patent, 6826335 B1, 2004-11-30.
- 7 Zhao Baoyin, Duan Kailiang, Zhao Wei, *et al.*. High-power fiber laser amplifiers based on a new pump-coupling technology [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702014.  
赵保银, 段开棕, 赵 卫, 等. 基于一种新型抽运耦合技术的光纤激光放大器[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702014.
- 8 I Kelson, A A Hardy. Strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1998, 34(9): 1570-1577.
- 9 R Paschotta, J Nilsson, A Tropper, *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(7): 1049-1056.