

文章编号: 1001-3806(2003)06-0523-03

## 双包层光纤激光器泵浦光耦合及激光反馈研究\*

董淑福<sup>1,2</sup> 程光华<sup>1</sup> 杨玲珍<sup>1</sup> 陈国夫<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>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, 710068)

(<sup>2</sup>空军工程大学电讯工程学院, 西安, 710077)

**摘要:** 总结分析了高功率双包层光纤激光器的泵浦耦合及激光反馈方式, 指出了相关方式中应采取的一些措施。结果表明, 采用树枝状结构多模耦合器进行侧向泵浦及采用光纤光栅进行激光反馈是最佳方式。同时特别指出菲涅耳波带片耦合方式的潜在优势, 并提出采用镀二色膜等厚球透镜作为双包层光纤激光器腔镜以避免直接端面泵浦对腔镜膜的损坏。

**关键词:** 双包层光纤; 光纤激光器; 光纤激光理论; 包层泵浦; 光纤光栅

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Studies on the pump coupling and laser feedback in double cladding fiber lasers

Dong Shufu<sup>1,2</sup>, Cheng Guanghua<sup>1</sup>, Yang Lingzhen<sup>1</sup>, Chen Guofu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710068)

(<sup>2</sup> Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710077)

**Abstract:** In this paper, the pump coupling and laser feedback in high power double cladding fiber lasers are analyzed, and some ways that should be taken to enhance the capability are also pointed. Conclusions can be drawn that the best scheme is to use side pump with tapered fiber bundle and fiber grating as the reflector of laser. The potential of Fresnel zone plate used as the coupling device is given. In order to avoid the destruction of plane dichromatic mirror used as the laser reflector, dichromatic spherical lens with the same thickness used as the feedback of laser is proposed in optical fiber laser design for the first time.

**Key words:** double-clad fibers; optical fiber lasers; optical fiber lasers theory; cladding pump; fiber grating

## 引 言

高功率双包层光纤激光器已成为国际上的研究热点。国外的一些机构利用不同结构、不同稀土掺杂的双包层光纤获得了不同波长、不同功率的高性能激光, 最具代表意义的是 IPG 报道的 10000W 掺镱双包层光纤激光器<sup>[1]</sup>。在国内, 南开大学、上海光机所等单位利用掺镱的双包层光纤, 实现了 1.06 $\mu\text{m}$  波长的激光输出<sup>[2,3]</sup>。在高功率双包层光纤激光器的研究中, 如何高效地将大功率多模泵浦光耦合进光纤是产生激光的首要条件; 提供高效的激光反馈是实现高功率光纤激光器的关键条件。本文中针对当前存在的泵浦耦合及激光反馈技术进行了总结与分

析。

## 1 泵浦光的高效耦合

高功率双包层光纤激光器的泵浦大都采用大功率多模激光二极管阵列激光器, 直接输出或经尾纤输出, 最大输出功率达几十瓦。尾纤的纤芯直径为数百微米, 数值孔径( $NA$ ) 约为 0.20。而当前国内使用的几种双包层光纤的内包层直径最大仅约为 200 $\mu\text{m}$ , 其  $NA$  为 0.35~0.40。根据泵浦方式, 可分为端面泵浦和侧向泵浦两种。

### 1.1 直接端面泵浦耦合

1.1.1 利用传统光学透镜耦合 利用传统光学透镜耦合是进行双包层光纤激光器研究的普选方案, 其基本结构如图 1 所示。

从大功率多模激光二极管阵列激光器尾纤输出的光束经透镜  $L_1$  (焦距为  $f_1$ ) 准直后, 再经透镜  $L_2$  聚焦到双包层光纤的内包层。由于激光器为多模激

\* 国家自然科学基金、中科院重点项目资助项目。

作者简介: 董淑福, 男, 1971 年 12 月出生。讲师, 博士研究生。主要从事光纤通信、光纤激光器与放大器研究。

收稿日期: 2003-03-28; 收到修改稿日期: 2003-05-26

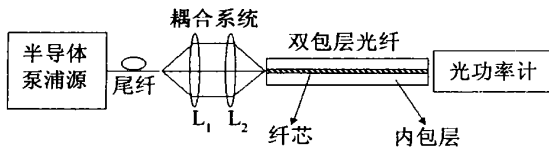


图1 双包层光纤激光器的端面泵浦结构

光二极管阵列结构(并且尾纤也为多模),不同于一般的产生基模或高阶高斯光束的稳定腔激光器,因此,基模高斯光束的传输及变换关系在此不适用,必须重新建立相应的传输及变换关系。通常的作法是,按照下述的简单关系来设计,即:

$$R_{in} \times NA_{in} = R_{out} \times NA_{out} \quad (1)$$

式中,  $R_{in}$ ,  $NA_{in}$  为输入光束的光斑半径和数值孔径,  $R_{out}$ ,  $NA_{out}$  为输出光束的光斑半径和数值孔径。这类类似于基模高斯光束。

通过实验发现,从准直透镜  $L_1$  输出的光束类似高斯分布,也具有一个束腰。当尾纤输出端(可视为束腰位置)位于透镜的物方焦面上时,经透镜变换后,其束腰位于透镜的像方焦面上,且具有最大束腰半径(准直效果最好)。对聚焦透镜  $L_2$ ,要求其具有短焦距和大相对孔径,这要与  $L_1$  及 DCF 匹配;同时还应很好地校正轴上点的球差,因为球差太大,会导致束腰光斑的增大,影响聚焦效果,为此,聚焦透镜常采用高倍显微物镜。

由于显微物镜的孔径较小,因此要求  $L_1$  的焦距不能太大,否则会有部分光不能进入显微物镜,降低耦合效率。当准直光束的束腰稍大于物镜的孔径时,可通过使  $L_1$  稍微远离输出尾纤来提高。

1.1.2 利用菲涅耳波带片耦合 菲涅耳波片就是将奇数波带或偶数波带挡住的特殊光阑<sup>[4]</sup>。传统的制作过程为:放大绘图→涂黑→缩微→复制。通常的波带片至少有十几个环带,多的可达上百个。环带越多,成像的光点愈强,像点也愈小。

最近,Watanabe 等报道了用飞秒激光脉冲制作菲涅耳波片的实验<sup>[5]</sup>。对波长 632.8nm 的 He-Ne 激光,照射到在硅玻璃制作的  $400\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$  菲涅耳波片,获得了 2% 的衍射效率。

上述两种方法制造的菲涅耳波片,沿光轴具有多个光强峰值。当波带数无穷时,主焦点的理论衍射效率为  $1/\pi^2 \approx 10.1\%$ 。但是,采用相位补偿的办法,通过减小或增加奇数波带的厚度(如在玻璃表面上蚀刻或薄膜沉积的方法形成浮雕结构,构成二元相位菲涅耳透镜),使光通过偶数波带时相对于奇数波带产生  $\pi$  的相位变化,于是通过偶数波带的光与通过奇数波带的光在主焦点变成同相位,它们互相

加强。根据二元光学元件各级衍射强度特点,当增加台阶的数目时,可以使光能向二元相位光栅衍射的+1级集中,因此可提高菲涅耳透镜主焦点的衍射效率。例如当台阶数为  $N=8$  时,主焦点的衍射效率达到 95%;而  $N=16$  时,达到 99%。

波带片与普通透镜相比的优点是:(1)不具有普通透镜的球差和慧差等像差;(2)聚焦焦点的尺寸不受衍射极限的限制。

## 1.2 侧向泵浦耦合

要想获得功率在几十瓦以上的高激光输出功率,必须将更高功率的泵浦光耦合进 DCF。显然,直接端面泵浦耦合很难做到,一般应采用侧向泵浦的方法。2002 年 IPG 公司报道的输出功率为 2000W 和 10000W 的掺镱双包层光纤激光器就是采用的一种叫做树枝状结构(tapered fiber bundle)的侧向泵浦方式<sup>[1]</sup>,其结构如图 2 所示。

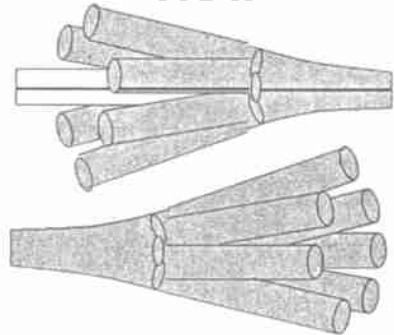


图2 侧向泵浦方式中的树枝状结构

该方案采用多个带尾纤多模激光二极管作为泵浦源,通过其尾纤直接与树枝状结构接续在一起,避免了端面泵浦中的耦合系统,提高了系统的耦合效率及稳定性和可靠性。但目前国内尚不能制作类似器件,还存在双包层光纤与树枝状结构接续等困难。

## 2 激光的高效反馈

提供高效的激光反馈是实现高功率、低阈值光纤激光器的关键条件。

### 2.1 利用镀膜平面镜

它是将一镀膜二色平面镜(对泵浦光高透、对激光高反)紧贴于光纤的输入耦合端,另一端加另一个镀膜二色平面镜(对泵浦光高反、对激光反射适当)或直接利用光纤端面的菲涅耳反射。利用镀膜平面镜作为激光的反馈机制具有结构简单、成本低、易于实现等优点,在中、低功率光纤激光器研究中得到了广泛应用。

### 2.2 利用镀膜等厚球透镜

在高功率双包层光纤激光器中,如果仍旧在光

纤端面紧贴镀二色膜平面镜作为腔镜, 则由于聚焦后的泵浦功率密度以及产生的激光功率密度极高(约在  $10^9 \text{W}/\text{m}^2$  以上), 极易把镀膜打坏。如果将腔镜离开光纤端面一定距离, 由于产生的激光的发散特性(起因于光纤纤芯的数值孔径), 激光反馈效率将大大下降。因此, 提出用镀二色膜的等厚球透镜取代平面镜, 作为激光的反馈元件。图 3 给出了用镀膜等厚球透镜 L(对泵浦光高透、对激光高反)作为前腔镜的双包层光纤激光器结构。双包层光纤的纤芯端面位于等厚球透镜的球心, 这样从双包层光纤的纤芯出射的激光被沿原路返回, 而对不同路径的多模泵浦光而言, 仅引入了一相同时延而已。该等厚球透镜的通光孔径及曲率半径要与聚焦透镜以及双包层光纤的参数相匹配, 同时, 要求必须保证等厚球透镜的内侧曲率的一致性, 否则激光的反馈效率将大大降低。

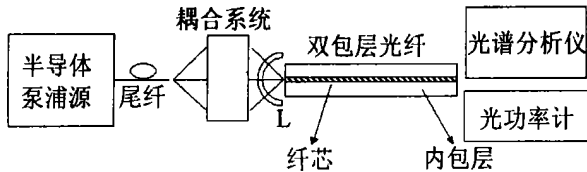


图 3 用等厚球透镜作腔镜的双包层光纤激光器

由于镀膜等厚球透镜的引入, 可使双包层光纤激光器的腔镜在不提高功率密度损伤阈值的情况下使承受功率提高 1~2 个数量级, 从而可以获得更高的激光功率输出。

### 2.3 利用光纤光栅

采用光纤布喇格光栅作为激光反馈的光纤激光器, 具有反馈效率高(可达 100%)、输出谱线窄、中心反射波长可以精确控制、反射带宽可以任意选择以及易于集成等优点。国外的高功率光纤激光器都

是采用光纤光栅作为激光的反馈元件, 国内在低功率光纤激光器中有使用报道。目前流行的光纤光栅制作技术主要有两种, 即全息写入技术和相位掩模写入技术。

光纤布喇格光栅反射波长和反射率可分别表示为<sup>[6,7]</sup>:

$$\lambda_B = 2nm\Lambda \quad (2)$$

$$R = \tan^2(kL) \quad (3)$$

式中,  $n$  为折射率,  $m$  为级数,  $\Lambda$  为光栅周期,  $k$  为耦合系数,  $L$  为光栅长度。

### 3 结 论

双包层光纤激光器的研究正在向高功率化、高集成化、高稳定化发展。如何高效地将大功率多模泵浦光耦合进光纤并提供高效的激光反馈是实现高功率光纤激光器的两个最重要条件。从对比分析可以看出, 采用树枝状结构多模耦合器进行侧向泵浦及采用光纤光栅进行激光反馈是最佳方式。同时特别指出菲涅耳波带片耦合方式的潜在优势, 并提出采用镀二色膜等厚球透镜作为双包层光纤激光器腔镜以避免直接端面泵浦对腔镜膜的损坏。

### 参 考 文 献

- [1] 杜卫冲. 激光与光电子学进展, 2002, 39(10): 36~40.
- [2] 宁 鼎, 傅成鹏, 丁 镭 *et al.* 光子学报, 2001, 30(4): 442~444.
- [3] Lou Q H, Peter W Y, Zhou J *et al.* Proc SPIE, 2002, 4914: 131~136.
- [4] 郁道银, 谈恒英. 工程光学. 北京: 机械工业出版社, 1999: 277~281.
- [5] Watanabe W, Kuroda D, Itoh K. Optics Express, 2002, 10(19): 978~983.
- [6] Erdogan T. J Lightwave Technol, 1995, 15(8): 1277~1294.
- [7] Agrawal G P. Applications in nonlinear fiber optics. New York: Academic Press, 2001: 1~22.

请向邮局订阅 2004 年度《激光技术》

国内统一刊号: CN51-1125TN, 邮发代号: 62-74