

高功率双包层光纤激光器侧面耦合技术的研究进展

鲁韶华^{1,2}, 许 鸥², 冯素春², 董小伟², 简水生²

(1. 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘 要: 双包层光纤侧面耦合技术将泵浦光从光纤侧面耦合进入内包层, 与端面耦合技术相比, 更有利于高功率光纤激光器的实现。介绍了角度磨抛、微棱镜、V形槽、内嵌反射镜、衍射光栅多种侧面泵浦耦合技术的结构、原理以及系统性能参数, 并分析了各种技术方案中需要解决的问题。

关键词: 高功率光纤激光器; 双包层光纤; 侧面耦合; 耦合效率

中图分类号: TN248

文献标识码: A

Research Progress on Side-coupling Technology of High Power Double-clad Fiber Lasers

LU Shao-hua^{1,2}, XU Ou², FENG Su-chun², DONG Xiao-wei², JIAN Shui-sheng²

(1. Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The side-coupling technology for double-clad fiber can transfer pumping light into inner cladding through the side of the fiber. It has many advantages over end-pumping technology on high power fiber lasers. There are several kinds of side-coupling technology, such as fiber angle-polished, micro-prism, V-groove, embedded mirror and diffraction grating side-coupling. The structures, theories and performance parameters of these technologies are introduced and the problems of each method are analyzed.

Key words: high power fiber laser; double-clad fiber; side-coupling; coupling efficiency

1 引 言

光纤激光器具有光束质量好、效率高、可调谐、体积小、寿命长和性能稳定等诸多优点, 在光通信领域已得到了广泛应用。双包层光纤以及包层泵浦技术的出现使大功率的多模泵浦光有效地耦合到双包层光纤中, 降低了成本, 提高了光-光转化效率, 促成了高功率光纤激光器的实现, 输出功率已达到千瓦级和数千瓦级。高功率光纤激光器的应用更为广阔, 诸如材料加工、产品打标、激光焊接、精密打孔、医疗、雷达遥感、航空航天甚至激光武器等方

面^[1-2], 呈现出逐步替代现有传统高功率激光器的趋势。

单模有源光纤作为增益介质的光纤激光器具有模式单一、光束质量高等优点。但由于单模光纤芯面积小, 不能将大功率的泵浦光耦合进入光纤, 限

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60477017); 北京市自然科学基金(No. 4052023); 新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-05-0091)资助。

作者简介: 鲁韶华(1981-), 女, 博士研究生, 主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: lsh971@163.com

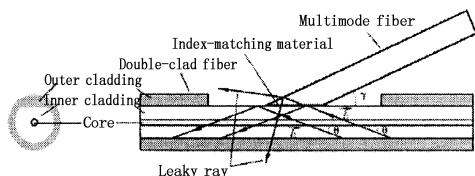
收稿日期: 2008-03-03

制了光纤激光器的输出功率。双包层光纤具有较大的端面面积和数值孔径,内包层中可以容纳数以万计的模式,能与高功率的多模半导体激光器泵浦源相匹配。高功率泵浦光在内包层中传输,不断地通过掺杂稀土离子的纤芯,产生光的受激辐射放大^[3]。但要获得高功率的激光输出,不仅需要提供高的泵浦功率,而且泵浦光与光纤内包层间要有极高的耦合效率,所以泵浦耦合技术至关重要。端面耦合技术较为简单,但是光纤的端面被用来进行泵浦耦合,无法与其他光纤熔接;此外,该方式需采用高精度的多维光纤调节系统,也带来了因调节系统的漂移引起的系统稳定性问题^[4]。因此,提出侧面耦合技术,将泵浦光从光纤侧面耦合进入内包层,这极大地方便了信号光从端面进入纤芯。随着研究逐渐深入,发展了多种泵浦光侧面耦合的技术,以下将针对各种侧面耦合技术的结构、原理以及性能参数进行介绍。

2 泵浦光侧面耦合技术

2.1 角度磨抛侧面泵浦耦合

角度磨抛侧面泵浦耦合技术是利用多模光纤引导泵浦光从侧面耦合进入双包层光纤的内包层。基本原理如图1所示,将双包层光纤的一小段剥去涂敷和外包层,在内包层沿纵向磨抛出一个平面,平面的宽度要足够与泵浦光纤纤芯对接;将泵浦光纤的端面按一定的角度 φ 磨抛平整后与内包层平面对准紧贴,并用折射率匹配的光学胶进行固定。



泵浦光的耦合效率受泵浦光纤磨抛角度 φ 的影响较大,图2反映了两者之间的关系,这里,泵浦光纤芯径 $400\mu\text{m}$,双包层光纤内包层为矩形截面,尺寸为 $400\times 200\mu\text{m}$,数值孔径NA均为0.4。若磨抛角度太大,泵浦光进入双包层光纤内包层后不能满足全内反射的条件;若角度太小,则泵浦光纤与双

包层光纤内包层的接触面积过大,这两种情况都会造成泵浦光的泄漏,导致耦合效率的降低。选择最优的磨抛角度,可以获得90%以上的耦合效率,如图2所示,J. Xu等人^[5]用该方法实现了线腔激光器197mW的稳定功率输出、斜率效率20%,环腔激光器160mW的稳定功率输出,斜率效率17%。

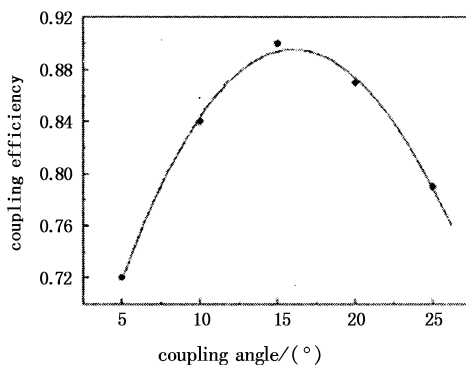
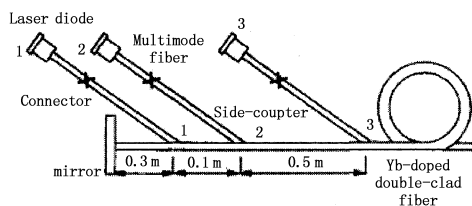


图2 耦合效率与磨抛角度关系曲线图

为了获得更高的功率输出,多个泵浦光纤同时进行侧向耦合是必然选择,P. Ou等人^[6]采用了3根多模光纤实现了1.38W的激光输出,斜率效率为48.9%,结构如图3所示。当有多个耦合点时,泵浦光会在邻近的耦合界面泄漏(如图1所示),图3所示的结构中,由于第二个耦合点的泵浦光泄漏引入的损耗为12.8%,第三个为9.4%,所以两个耦合点之间的距离要足够远以保证泵浦光被充分吸收,否则会造成耦合效率的大幅降低。



该方案耦合效率高,但是对泵浦光纤大角度地磨抛是技术难点,而且光学胶可以承受多大功率的入纤泵浦激光还有待验证。

2.2 微棱镜侧面泵浦耦合

微棱镜侧面泵浦耦合与角度磨抛侧面泵浦耦合类似,只是把泵浦光的导引介质由多模泵浦光纤变为微棱镜,如图4所示,与内包层胶合的面可以是棱镜的直角面或者斜面。棱镜、光学胶和内包层的折射率应尽量匹配,以减小界面反射带来的损耗。为

为了使进入双包层光纤的泵浦光满足全内反射,避免泄漏造成的耦合效率降低,棱镜的角度以及泵浦光入射棱镜的角度要与 LD 出射光(或整形后的出射光)的发散角协调。

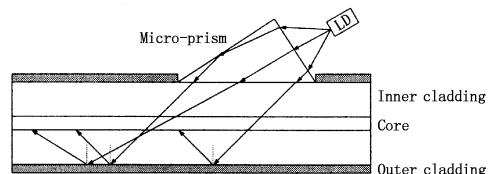


图4 微棱镜侧面泵浦耦合示意图

这种耦合技术的耦合效率理论上可以达到90%^[7],实验已经达到86%^[8]。耦合效率对棱镜与双包层光纤间的校准误差以及棱镜本身的角度误差不敏感,文献[8]中,当校准误差为10 μm 时,耦合效率下降不到5%,棱镜的角度误差在3"以内时,对耦合效率几乎不产生影响。对于棱镜斜面与内包层胶合的情况,泵浦光垂直棱镜斜面入射时可以获得最大的耦合效率,当泵浦光相对于入射面不是垂直入射,而是存在一定的倾角时,会对耦合效率产生影响,如图5所示。角度在0°~5°范围内变化对耦合效率的影响小于10%。

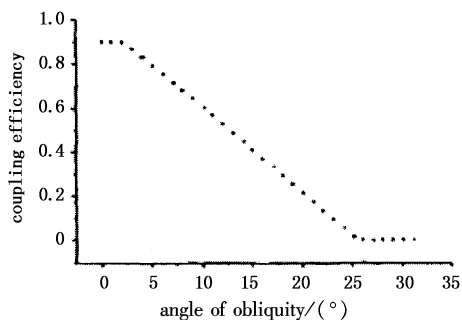


图5 耦合效率与泵浦光入射角度关系曲线图

吴中林等人^[9]利用从双包层光纤上截下的一段去除了外包层的D形石英柱体取代微棱镜胶合在双包层光纤内包层的侧面上,泵浦光从D形石英柱体的截面斜入射,耦合进入双包层光纤的内包层,实现了1.23W的激光输出,耦合效率达到85%,柱体-光纤侧面耦合器的横截面示意图如图6所示。该方法可以在单个D形石英柱体的两端同时耦合泵浦光,也可以在双包层光纤的多个部位进行多点侧面耦合。这种方案中使用的D形石英柱体作为导引泵浦光的介质,省去了加工微棱镜的复杂过程,且折射率能够完全的与光纤内包层匹配。

微棱镜(包含石英柱体)侧面耦合技术能够实现高的耦合效率,但是由于使用了光学胶,热稳定性问题也是限制其超大功率耦合的一个重要因素。

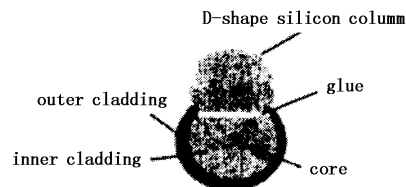


图6 柱体-光纤侧面耦合器的横截面示意图

2.3 V形槽侧面泵浦耦合

V形槽侧面泵浦耦合的基本结构如图7所示,首先将一小段双包层光纤的外包层去除,在裸露的内包层上刻蚀一个V形小槽,从激光二级管出射的泵浦光经过整形聚焦后由未刻槽的内包层一面入射,在V形槽的两个斜面反射耦合进入光纤内包层。为了提高耦合效率,V形槽的深度和角度是两个需要考量的重要参量:槽太深会降低机械稳定性,甚至伤及光纤纤芯,若槽深度太浅,由于角度的限制,使得槽的宽度太小,泵浦源对准敏感度的要求提高,增加了难度;V形槽角度的选取首先要满足入射的泵浦光在V形槽斜面上全反射,其次入射的泵浦光经V形槽斜面反射后也应该满足由内包层的折射率和数值孔径NA所决定的全反射条件^[10]。另外,还需在泵浦光入射的内包层一侧增加一层衬底,衬底材料的折射率应该与光纤内包层折射率相近,并且可以加镀增透膜来提高泵浦光的入纤效率。利用微透镜代替大尺寸透镜对泵浦光进行整形可以减小整个器件的体积^[11],有利于多点耦合。

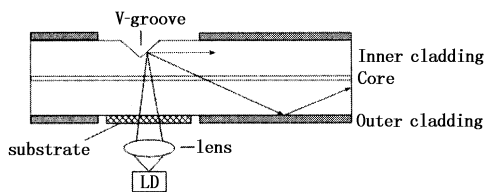


图7 V形槽侧面泵浦耦合示意图

L. Goldberg等人^[12]在50 μm ×120 μm 的内包层上刻入一深度为20 μm 的直角V形槽,实验测得泵浦光的耦合效率约为76%。

V形槽侧面泵浦耦合原理简单,但是对光纤有一定程度上的损害,降低了机械稳定性,而且V形槽的工艺加工要求很高,由于V形槽的斜面要作为反射面,表面的抛光等处理是必不可少的。另外,泵

浦源、透镜以及双包层光纤三者的对准失调对耦合效率的影响也较大。

2.4 内嵌微反射镜侧面泵浦耦合

内嵌反射镜侧面耦合技术同样需要在双包层光纤的内包层上刻槽,然后将微反射镜用折射率匹配的光学胶固定在槽中,如图8所示。泵浦源不必经过透镜聚焦直接入射到微反射镜上,微反射镜的反射面可以是平面或曲面,适当曲面的设计可以减小泵浦光的发散,使其在反射的同时达到会聚的效果,这样,可以降低对泵浦光发散角和光纤内包层数值孔径的要求。该方案中采用了光学胶将嵌入微反射镜的出射面和光纤内包层的槽面黏接固定,光学胶作为折射率匹配介质可降低界面的反射损耗,而且避免了V形槽侧面耦合中对槽的光滑度的要求,加工难度大大降低。

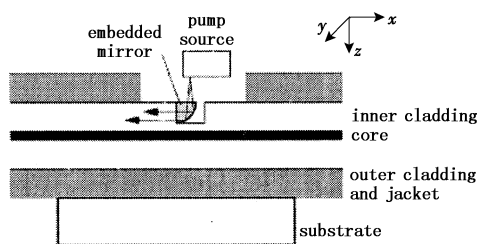


图8 内嵌微反射镜侧面泵浦耦合示意图

J. P. Koplow 等人^[13]应用该方案,在实验中测得的泵浦光的最大耦合效率为80%,用掺镱双包层光纤在抽运功率为7.6W时获得5.2W的激光输出,斜率效率为79%。用铒镱共掺双包层光纤放大器获得2.2W的激光输出,斜率效率为31%。泵浦光与微反射镜需要很高的对准度,尤其是 x 方向位置偏离的细微变化会导致耦合效率的急剧下降,如图9所示。

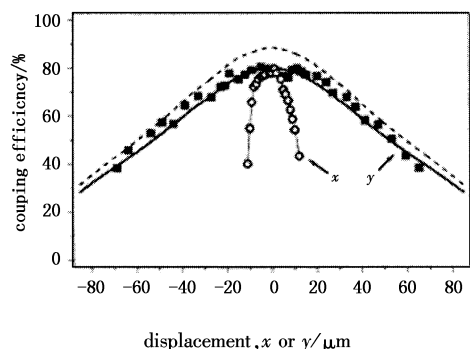


图9 耦合效率与 x 和 y 方向位移关系曲线图

与V形槽侧面泵浦耦合相比,该方案不需要透镜对泵浦光进行整形,减小了透镜对准失调带来的额外损耗;光学胶的使用使槽的加工要求也大大降低,但是光学耐热问题依然存在,且泵浦光与微反射镜的对准度要求较高。

2.5 衍射光栅侧面泵浦耦合

衍射光栅侧面泵浦耦合是通过在双包层光纤内包层表面附加反射型或透射型衍射光栅,使得泵浦光在光栅的作用下衍射进入光纤内包层的一种方法。R. Herda 等人^[14]利用二元反射型衍射光栅实现泵浦光的侧向耦合,其结构如图10所示。将光栅用折射率匹配的胶固定在光纤内包层上,泵浦光从另一侧入射,在光栅作用下发生衍射, $+1$ 阶和 -1 阶衍射光进入内包层中传输,这需要光栅有很高的 $+1$ 阶和 -1 阶衍射效率,才能得到较高的耦合效率。另外,双层光纤内包层的数值孔径决定了泵浦光在内包层中传输的全反射临界角,无论反射或者透射型光栅,其 $+1$ 阶和 -1 阶衍射光在内包层中必须满足全反射。为此,光栅的折射率、条纹深度和宽度需要适当选取以满足以上的条件。这种结构理论上可以获得80%的耦合效率(光栅的衍射效率为94%时),实验上由于光栅的非理想化,只获得了57%的耦合效率,可以通过提高光栅的衍射效率加以改善。但是这种方法由于在二元衍射光栅与光纤内包层表面之间使用了折射率匹配层,以达到折射率匹配和固定二元衍射光栅的目的,所以依然存在热稳定性的问题。

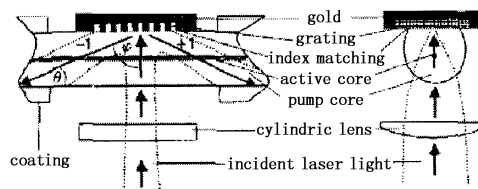


图10 二元金衍射光栅侧面泵浦耦合示意图

张帆等人^[15]对此结构提出了改进,运用易实现的镀膜技术在双包层掺杂光纤的矩形结构的内表面上镀上了一定厚度的金薄膜,并在其上覆盖上一层二氧化硅。这样光纤的内包层、金的薄膜层以及二氧化硅层就构成了一个介质-金属-介质的结构的

亚波长光栅,并在内包层的另一侧镀上高反膜,使得零级衍射光在光栅的作用下二次衍射,以提高耦合效率,其结构如图 11(a)所示,图 11(b)为光栅结构示意图。这种方法可以实现对 TM 模的耦合效率达到 91% 以上,而 TE 模的耦合效率也可以达到 80% 以上。由于这种新的侧面耦合结构采用的是比较成熟的镀膜技术,而不是光学元件的加工技术,降低了制作成本和制作难度,而且因为没有使用诸如折射率匹配液、光学胶等承受不了较高温度的黏接物质,可以用于大功率泵浦光的侧面耦合。

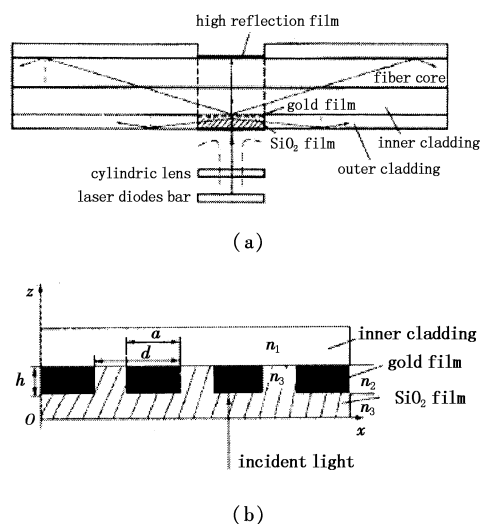


图 11 (a)基于介质-金属-介质的对称夹层结构侧面泵浦耦合示意图;(b)介质-金属-介质对称夹层结构示意图

3 结 论

本文介绍了几种目前主要的高功率双包层光纤激光器的侧面耦合技术,与端面耦合技术相比,侧面耦合不仅解决了双包层光纤与其他光纤熔接的问题,而且可以多点同时进行侧面泵浦耦合,有利于实现更高的功率输出。这些侧面耦合技术方案中大多数都使用了光学胶,因此,寻找折射率匹配且耐高温的光学胶,是决定这些方案能否实现超大功率激光器的关键技术之一。采用镀膜技术的衍射光栅方案避免了光学胶的使用,而且理论上也可以达到较高的耦合效率,但需要进一步的实验来验证此方案的有效性。总之,侧面泵浦耦合技术表现出了不可替代的优越性,有望实现更大的激光功率输出,已成为国内外的研究热点。

参考文献:

- [1] 胡凯,蒋群. 包层抽运技术原理及其应用[J]. 光通信研究,2004,125(5):58-61.
- [2] 陈苗海. 高功率光纤激光器的研究进展[J]. 激光与红外,2007,37(7):589-592.
- [3] 刘传先,武文远. 双包层光纤激光器的研究进展[J]. 光学仪器,2005,27(3):85-88.
- [4] 祝颂军,张彬,蔡邦维. 高功率双包层光纤激光器抽运技术的方案分析[J]. 光学与光电技术,2006,4(1):38-41.
- [5] Jianqiu Xu, Junhua Lu, G Kumar, et al. A non-fused fiber coupler for side-pumping of double-clad fiber lasers[J]. Opt. Commun., 2003(220):389-395.
- [6] P Ou, P Yan, M L Gong, et al. Multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fibre laser and pump light leakage at coupler[J]. Electron. Lett., 2004(40), 7:418-419.
- [7] 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.
- [8] 吴中林,楼祺洪,董景星,等. 微棱镜与双包层光纤侧面耦合效率的实验研究[J]. 激光技术,2005,29(5):533-535.
- [9] 吴中林,楼祺洪,董景星,等. 双包层光纤侧面耦合器[J]. 中国激光,2005,32(7):953-955.
- [10] 张帆,王春灿,童治,等. V形槽侧面抽运的光学耦合模型的研究[J]. 光子技术,2006,3(2):83-87.
- [11] Jeffrey P Koplow, Lew Goldberg, Dahv A V Kliner. Compact 1-W Yb-doped double-cladding fiber amplifier using V-groove side-pumping [J]. Photon. Technol. Lett., 1998,10(6):793-795.
- [12] L Goldberg, B Cole, E Snitzer. V-groove side-pumped 1.5 μm fibre amplifier [J]. Electron. Lett., 1997, 33(25):2127-2129.
- [13] Jeffrey P Koplow, Sean W Moore, Dahv A V Kliner. A New Method for Side Pumping of Double-Clad Fiber Sources [J]. J. Quantum Electron., 2003,39(3):529-540.
- [14] R Herda, A Liem, B Schnabel, et al. Efficient side-pumping of fibre lasers using binary gold diffraction gratings [J]. Electron. Lett., 2003,39(3):276-277.
- [15] 张帆,王春灿,童治,等. 用于高功率双包层光纤激光器侧面耦合的对称夹层结构[J]. 中国激光,2007,34(7):470-474.