

文章编号: 0258-7025(2005)07-0953-03

双包层光纤侧面耦合器

吴中林, 楼祺洪, 董景星, 魏运荣

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 研究了一种侧面抽运双包层光纤的方法, 从被剥除了外包层、端面为 $350\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ 的 D 型双包层光纤内包层上切下长度为 3 mm 的一段柱体, 并胶合在相同的双包层光纤内包层的侧面上, 构成了柱体-光纤侧面耦合器。半导体激光器的抽运光从该柱体的一端入射并通过它耦合进入双包层光纤的内包层, 实验测得耦合器最大耦合效率为 85%。该方法适用于输出功率为数瓦的光纤激光器和放大器的侧面抽运。

关键词 光纤光学; 侧面耦合; D 形石英柱体; 双包层光纤; 胶合

中图分类号 TN 253; TN 248.1 **文献标识码** A

Side Coupler of Double-Cladding Fiber

WU Zhong-lin, LOU Qi-hong, DONG Jing-xing, WEI Yun-rong

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

Abstract A new method for side-pumping double-cladding fiber is researched. A column of 3 mm length is cut off from D-shape double-cladding fiber which has a transverse sectional dimension of $350\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$. Then the column-fiber coupler is formed by gluing the column onto the side of inner cladding. The pumping light is coupled into the inner cladding from the end of column. When the output power is 1.3 W from the forward end of the coupler, the optimum efficiency is 85%. This method suits for pumping the fiber laser and amplifier of several watts output power.

Key words fiber optics; side coupling; D-shape quartz column; double-cladding fiber; gluing

1 引言

随着上世纪末光纤通信的飞速发展和大功率半导体激光器制造工艺的进一步成熟, 双包层光纤激光器获得了长足的发展。与原先的单包层有源光纤相比, 双包层光纤具有较大的端面面积和较大的数值孔径, 大功率多模半导体激光可从光纤的端面进入内包层波导, 在传输过程中, 不断穿越掺杂的纤芯, 抽运纤芯中的掺杂离子, 使输出功率从原先单包层光纤激光器的几百毫瓦量级提升到现在双包层光纤激光器的百瓦量级^[1,2]。由于较大尺寸内包层的引入, 双包层光纤的抽运方法已不只限于常用的端面抽运, 侧面抽运也可以实现。对于双包层光纤放大器, 侧面抽运极大地方便了信号光从端面进入纤芯, 因此倍受人们关注。在侧面耦合方法中, V 型槽法^[3]和内嵌反射镜法^[4]需在内包层上刻蚀 V 型槽

和小方槽, 这样会造成内包层的机械损伤, 且不易实现多点抽运。磨抛光纤侧面胶合法^[5]虽然有很高的耦合效率, 但光纤的大角度磨抛也较难实现。微棱镜^[6]侧面抽运方法通过把直角棱镜的一个直角面胶合在双包层光纤内包层的侧平面上, 抽运光通过棱镜匹配耦合进入内包层, 这种方法较易实现, 耦合效率较高, 而且可在双包层光纤上实现多点侧面抽运, 与微棱镜侧面抽运方法类似, 本文将介绍一种侧面抽运双包层光纤的方法。

2 基本原理

大尺寸内包层的引入为大功率半导体抽运激光从侧面进入内包层创造了条件。进入到内包层的抽运光有两种可能的传输方向, 一种是在光纤内包层内的传输方向, 即所谓传输模; 另一种是穿透到内包

收稿日期: 2004-07-21; 收到修改稿日期: 2004-12-22

作者简介: 吴中林 (1963—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所工程师, 主要从事光纤激光技术研究。E-mail: zhonglin.wu@163.com

层外的传输方向,即辐射模。当进入内包层的抽运光在内外包层交界面上的入射角大于该面上的全反射临界角时,抽运光因全反射而得以在内包层中传输,不断穿越掺杂的纤芯实现其抽运作用;反之,当入射角小于或等于临界角时,抽运光将穿透外包层进入空气中,不能在内包层中传输,失去其抽运作用。如图 1 所示, n_0, n_c, n_1 分别为空气、聚合物外包层和石英内包层的折射率,它们的关系是 $n_0 < n_c < n_1$, 祛除双包层光纤某处侧面的部分外包层,让抽运光以入射角 θ_0 直接从空气中入射到内包层上,穿过内包层后在内外包层交界面上的入射角为

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{n_0 \cdot \sin\theta_0}{n_1}\right), \quad (1)$$

而该面上全反射临界角为

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_c}{n_1}\right), \quad (2)$$

比较式(1),(2),由于 θ_1 总是小于 θ_c , 因此这种直接从侧面入射的抽运光是不能进入内包层中传输的,必须用棱镜加以匹配。

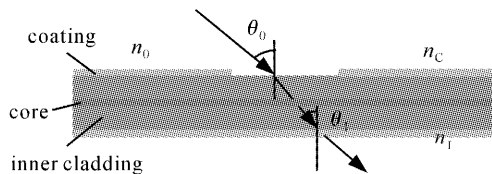


图 1 直接入射示意图

Fig. 1 Schematic of side direct incidence

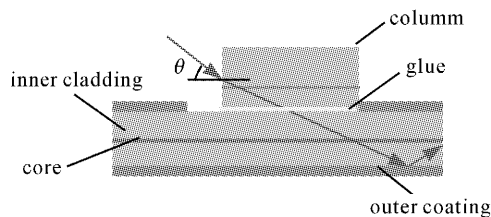


图 2 石英柱体-光纤侧面耦合器

Fig. 2 Side-coupler of silicon column-fiber

由于抽运光以较大的入射角在胶层上入射,当胶的折射率与石英不一致、过小或过大时,抽运光将分别在胶层的上下两表面发生全反射,而不能进入双包层光纤。实验采用自制胶,折射率为 1.458 左右,与石英几乎一致。

与微棱镜侧面胶合相类似,用一个横截面为 D 形的石英柱体胶合在双包层光纤内包层的侧面上,而这个 D 形的石英柱体正是从双包层光纤上截下的一段,并祛除了外包层,如图 2 所示。

D 形石英柱体的长度会影响耦合效率的大小。

若柱体较长,经石英柱体耦合进入到双包层光纤的部分抽运光只经过一次全反射后就会反过来再从石英柱体中穿透出去;若柱体较短,则有一部分抽运光将会从耦合器的石英柱体和胶层中泄漏出去。通过几何光学的计算,石英柱体的长度取 3 mm 时,可有效地避免这两种情况。同时入射角的大小也会影响耦合效率。设子午面内光线在 D 形石英柱体上的入射角为 θ ,由几何光学计算可知,当入射角 θ 满足下式

$$\theta_{\max} \leq \arcsin\left[n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin\frac{n_c}{n_1}\right)\right], \quad (3)$$

$$\theta_{\min} \geq \arctan(h/l), \quad (4)$$

且会聚光束的光斑被约束在石英柱体与双包层光纤的胶合面上时,入射的抽运光束才可进入双包层光纤的内包层,并得以在其中传输而实施抽运作用。式中 h 为入射光在石英柱体上的高度, l 为柱体的长度。

3 实验研究

3.1 耦合器的构造

所采用的 D 型双包层光纤,内包层端面为 $350 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$,侧表面由直径为 $400 \mu\text{m}$ 的圆柱面和宽度为 $265 \mu\text{m}$ 的平面组成,外包层为折射率较低的聚合物。取一根长度为 30 cm 的这种双包层光纤,从其一端截取一段长度为 3mm 的柱体,祛除其上面的聚合物外包层,形成一个横截面为 D 形的石英柱体,然后用小刀在待耦合的双包层光纤上距一端 10 cm 处刮去一段长度为 5 mm 的外包层,露出面积为 $5 \text{ mm} \times 265 \mu\text{m}$ 的内包层平面,然后用折射率与石英相同的光学胶把那段 3 mm 长的 D 形石英柱体胶合在该双包层光纤的内包层上,使得 D 形石英柱体上的侧平面与露出的内包层平面相互对准胶合。由于抽运光以较大的入射角在胶层上入射,当胶的折射率与石英不一致、过小或过大时,抽运光将分别在胶层的上下两表面发生全反射,而不能进入双包层光纤,因此,胶的选择对耦合效率是有影响的。柱体-光纤侧面耦合器的横截面示意图如图 3 所示,耦合器的显微照片如图 4 所示。

用输出波长 975 nm,功率 1.5 W,尾纤直径 $200 \mu\text{m}$,数值孔径 0.22 的带尾纤的激光二极管(LD)作为抽运光源,把激光二极管的尾纤以一定的角度直接对准 D 形石英柱体一个端面,考虑到尾纤输出的光束一般为发散状,因此把激光二极管的光纤输出

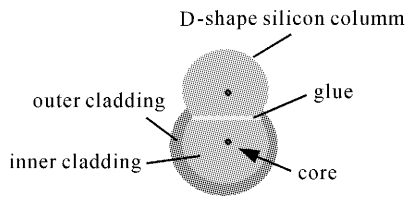


图 3 耦合器横截面示意图

Fig. 3 Transverse sectional schematic of the coupler

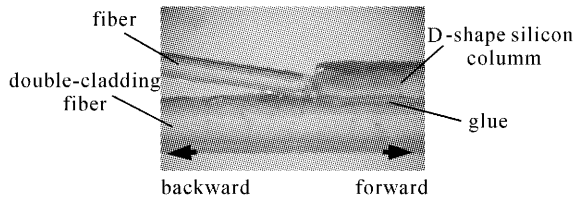


图 4 耦合器的显微照片

Fig. 4 Microscopic photograph of the coupler

端烧成球状,可有效地减少发散。

3.2 耦合效率

用探测器在双包层光纤的前后端探测激光功率。由于所用的双包层光纤的长度只有 30 cm,因此 976 nm 的激光在其中传输时纤芯对其吸收很少,可认为不影响耦合效率的测定。调节固定激光二极管尾纤的调整架,则可调节尾纤的端面在前后、上下、左右的位置,使对应这三个位置时双包层光纤的输出功率均为最大。实验测量了从柱体-光纤侧面耦合器前端输出的效率与两光纤夹角的关系,如图 5 所示。

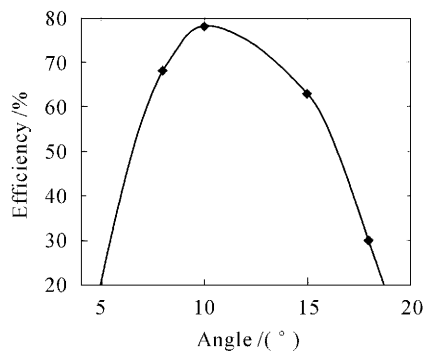


图 5 耦合效率与两光纤夹角的关系曲线

Fig. 5 Coupling efficiency as a function of the clamp angle between two fiber

从图 5 中可见两光纤夹角为 10° 时,耦合效率最高。同时耦合器前端有功率为 P_{forward} 的激光输出,后端也有功率为 P_{backward} 的激光输出,通过测量可知 P_{backward} 约为 P_{forward} 的 10% 左右,这是由于胶层中的杂质对光的反射以及耦合器前端的反射引起的。因此 D 形柱体-光纤耦合器的总耦合效率 η_{total} 为

$$\eta_{\text{total}} = (P_{\text{forward}} + P_{\text{backward}}) / P_{\text{total}}, \quad (5)$$

这样总耦合效率最大可达 85%,这说明还有一些抽运光从耦合器中泄漏出去。实验中观察到当激光二极管尾纤输出功率为 1.6 W 时,耦合器前端输出功率为 1230 mW,经 10 min 的时间观察,未发现效率明显下降。

4 结 论

D 形石英柱体与双包层光纤的侧面耦合为双包层光纤的侧面抽运提供了一种途径,该方法简单可行,效率可达 85%,在耦合 1 W 左右的抽运功率时,未见因胶层发热而引起的耦合效率下降和柱体的脱落现象。该方法可以在双包层光纤的多个部位进行多点侧面抽运,还可以在单个 D 形石英柱体的两端同时耦合进抽运光,可用于实施输出功率在数瓦的光纤激光器和放大器的侧面抽运。

参 考 文 献

- 1 Qihong Lou, Jun Zhou, Jianqiang Zhu. 10 W double-cladding fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(Supplement):385~386
- 2 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. 100 W level Yb-doped double-cladding fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12):1064
楼祺洪,周 军,朱健强 等. 百瓦级掺镱双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12):1064
- 3 Ammar Hideur, Thierry Chartier, Cafer Özkul *et al.*. Dynamics and stabilization of a high power side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **186**:311~317
- 4 Jeffrey P. Koplow, Sean W. Moore, Dahv A. V. Kliner. A new method for side pumping of double-clad fiber sources [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(4):529~540
- 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 Th. Weber, W. Lüthy, H. P. Weber *et al.*. A longitudinal and side-pumped single transverse mode double-clad fiber laser with a special silicone coating [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**:99~104