

文章编号: 1001-3806(2005)05-0533-02

微棱镜与双包层光纤侧面耦合效率的实验研究

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: 对微棱镜与双包层光纤侧面耦合技术进行了研究。用光学胶把尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 直角棱镜的直角面胶合在尺寸为 $330\mu\text{m} \times 170\mu\text{m}$ 的内包层侧平面上, 激光束以一定的角度从微棱镜的另一直角面入射并通过它耦合进入双包层光纤的内包层, 实验测得耦合效率为 86%。该方法可用于双包层光纤的侧面抽运。

关键词: 侧面耦合; 微棱镜; 双包层光纤; 胶合

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Research for the side-coupling properties of micro-prism and 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: The side-coupling technology of micro-prism and double-cladding fiber was studied. A right-angle prism of $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$ dimension was glued on the side surface of the double-cladding fiber whose dimension was $330\mu\text{m} \times 170\mu\text{m}$. The tested laser was coupled into the inner cladding of double-cladding fiber through the micro-prism. The coupling efficiency was measured to be 86% or so. This method can be applied in the side-pumping of double-cladding fiber.

Key words: side-coupling; micro-prism; double-cladding fiber; gluing

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, 双包层光纤是在直径不到 $9\mu\text{m}$ 的掺杂纤芯周围增加了一个直径为 $400\mu\text{m}$ 的纯石英波导, 外面是折射率较石英低的聚合物涂敷层, 再外面是保护层, 这样双包层光纤就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, 在传输的过程中, 不断穿越掺杂的纤芯而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。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^[1]方法中, V型槽法^[2]和内嵌反射镜法^[3]须在包层上刻蚀 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^[4]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^[5]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, 作者就微棱镜与双包层光纤内包层的侧面耦合特性进行了研究。

1 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, 一是在光纤内包层内的传输方向, 即所谓传输模; 另一是穿透到内包层外的传输方向, 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_i 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 $n_0 < n_c < n_i$ 。

祛除双包层光纤某处侧面的部分外包层, 让抽运

作者简介: 吴中林 (1963-), 男, 工程师, 现从事光纤激光技术研究。

E-mail: zhonglin_wu@163.com

收稿日期: 2004-06-28; 收到修改稿日期: 2004-09-10

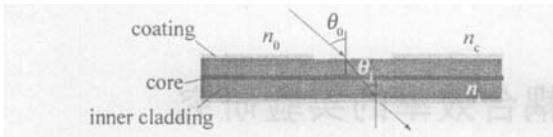


Fig 1 Schematic of side direct incidence

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 $\theta_1 = \arcsin(n_0 \cdot \sin\theta_0 / n_i)$,而该面上全反射临界角为 $\theta_c = \arcsin(n_c / n_i)$,比较这两式, 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。作者采用胶合的方法,用折射率与光纤内包层相近光学胶把直角棱镜的一个直角面胶合在双包层光纤内包层的侧面上,让抽运光从微棱镜的另一个直角面入射,设入射角为 θ ,如图 2 所

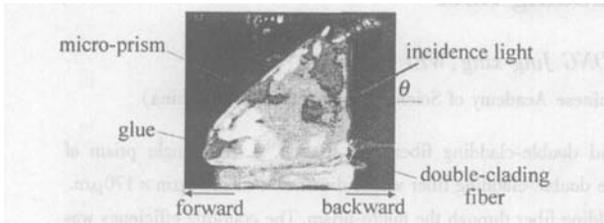


Fig 2 The microscopic photograph of the coupler

示,通过几何光学计算可得在子午面内使抽运光能从侧面进入双包层光纤内包层的最小和最大入射角^[5]为:

$$\theta_{\min} = \arcsin \left\{ n_p \sin \frac{\pi}{2} - \arcsin \left[\frac{n_i}{n_p} \right] \right\} \quad (1)$$

$$\theta_{\max} = \arcsin \left\{ n_p \sin \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left[\frac{n_c}{n_p} \right] \right] \right\} \quad (2)$$

式中, n_p, n_i, n_c 分别为微棱镜、双包层光纤内包层和外包层的折射率。如果入射角小于 θ_{\min} ,则抽运光将会从棱镜或光胶层中漏掉,入射角大于 θ_{\max} ,抽运光将穿过内包层从另一侧穿出光纤。在这个范围调整入射光束的入射角,可获得最佳耦合效率。

2 实验研究

2.1 微棱镜与光纤侧面的胶合

取一根长度为 40cm 的双包层光纤,内包层的横截面为 $330\mu\text{m} \times 170\mu\text{m}$ 的矩形,其折射率为 $n_i = 1.458$,外包层是折射率为 $n_c = 1.40$ 的聚合物,直角棱镜的尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$,折射率为 $n_p = 1.516$,匹配光学胶的折射率为 1.46。在双包层光纤的侧面上用小刀刮去 $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$ 外包层,露出侧面宽度为 $330\mu\text{m}$ 的一侧内包层平面,然后用光学胶把微棱镜的一个直角面胶合在双包层光纤的内包层上。显微照片如图 2 所示。

由于实验用的双包层光纤的长度较短,纤芯的吸收峰位于 976nm 处,因此用波长为 633nm 的 He-Ne 激光进行测试,吸收损耗较小,而且较为方便。测试时把

He-Ne 激光经 5cm 焦距的透镜聚焦于微棱镜的一个直角面上,用功率计测量从双包层光纤前后两个端面传出的激光功率。

2.2 实验结果

He-Ne 激光从微棱镜的一个直角面入射进入双包层光纤的内包层,测量了从棱镜光纤耦合器的前端输出的耦合效率与在微棱镜上入射角的关系,见图 3。

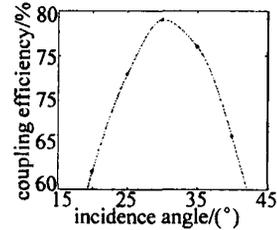


Fig 3 The coupling efficiency as a function of the incidence angle

从图 3 可见,入射光在 30° 入射角处 15 范围内有较大的耦合效率。实验中还观察到不但在双包层光纤的前端有激光输出,而且在后端也有激光输出,经测量向后输出的光功率为向前输出的光功率的 7% 左右,因此微棱镜侧面耦合的总效率为 $\eta_t = (P_f + P_b) / P_i$,这样总的耦合效率最大可达 86%。

实际应用的双包层光纤不是直的而是圆形状环绕着的,如果弯曲的程度较大而且离微棱镜胶合处较近时,抽运光的耦合效率将有所下降,从而影响光纤激光器的正常工作。实验中采用直径为 2cm 的圆柱体压住双包层光纤做弯曲试验。耦合效率随弯曲处与棱镜距离变化的关系曲线如图 4 所示。

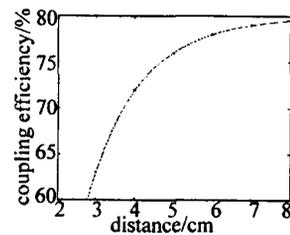
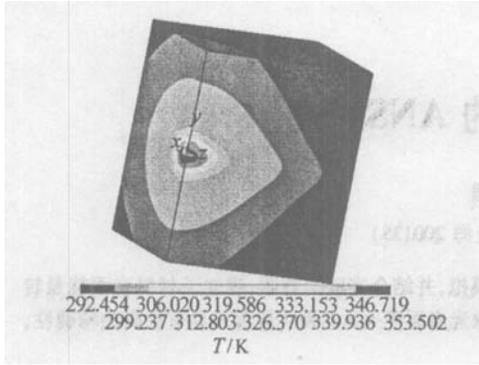
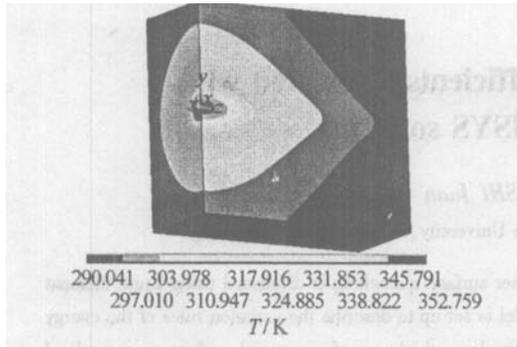


Fig 4 The coupling efficiency as a function of the distance between the bend and the coupling point

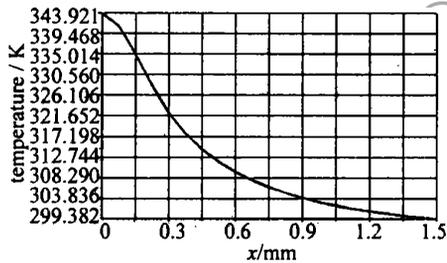
从图中可知,当弯曲处离微棱镜距离小于 3cm 时,耦合效率有较明显的下降,当距离大于 4cm 时,耦合效率下降较少,当距离大于 6cm 时,弯曲对耦合效率的影响几乎消失。最后采用大功率半导体激光对胶层进行耐热试验,当从双包层光纤前端输出功率为 320mW 时,未发现功率的下降,棱镜耦合器可正常工作。

3 结论

棱镜-光纤耦合器为双包层光纤激光器的侧面抽运提供了一种途径,可以获得较高的耦合效率,单个微棱镜耦合数百毫瓦的功率未发现因胶层发热而引起棱 (下转第 545 页)

Fig 6 Temperature distribution in the laser medium $h = 8000 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ Fig 7 Temperature distribution in the laser medium at $T_c = 285 \text{ K}$

冷却液的热对流换热系数 h 以及降低冷却液的温度,可以降低晶体内温度的分布,但是对于温度梯度来说基本上没有发生变化,端面轴线上温度差都为 52 K 左右,可见通过改变热对流换热系数 h 和冷却液温度不能有效地改善晶体内温度场分布的不均匀性。

Fig 8 Temperature distribution along x axes at pumped face after pumped-face cooled

然而在抽运光入射端面上进行水冷的情況下,温度场模拟如图 8 和图 9 所示(其中水流冷却的热对流换热系数为 $5000 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$)。从图 9 中可以得到

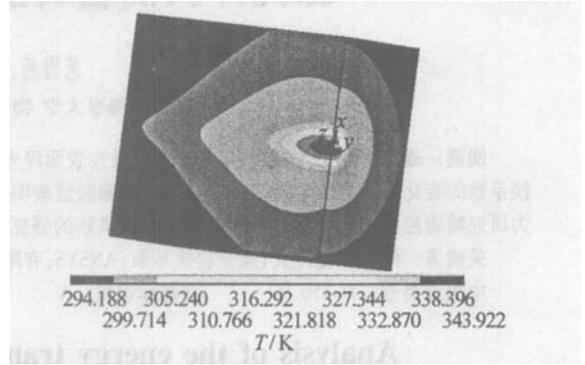


Fig 9 Temperature distribution in the laser medium after pumped-face cooled

端面中心温度为 343.921 K ,端面轴线边缘温度是 299.382 K ,故温差变为 44.539 K ,通过数据可以看到,通过端面冷却不仅可以降低晶体的温度值,还能有效地降低温度的不均匀性,从而减少了晶体热效应。

3 结论

对端面抽运的 Nd:YAG 晶体的热效应进行了详细的有限元模拟。通过提高晶体侧面的热对流换热系数和降低冷却液温度可以降低晶体的温度值,但是几乎不对温度梯度产生影响,然而通过抽运端面水冷后,不仅降低了温度值,还减少了温度的不均匀性,从而能有效地降低了晶体的热效应。

参考文献

- [1] 余锦,檀慧明,钱龙生 *et al* 纵向抽运固体激光介质热透镜效应的理论研究 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(1): 27~30.
- [2] BROWN D C. Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(12): 2383~2392.
- [3] 张玲,杨少辰,路绪鹏 *et al* LD 端面抽运 Nd:YAG 激光器的热效应研究 [J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(6): 45~47.
- [4] 李隆,史彭,白晋涛. 单端抽运激光晶体温度分布的半解析热分析 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(4): 369~372.

(上接第 534 页)

镜脱落的现象。如果采用微棱镜在光纤的多个位置进行胶合,可以把数瓦的抽运光耦合进入双包层光纤的内包层中,这种方法可用于实施输出功率在几十毫瓦到几瓦的双包层光纤激光器和放大器的侧面抽运。

参考文献

- [1] 韦文楼,欧攀,阎平 *et al* 双包层光纤的侧面抽运耦合技术 [J]. 激光技术, 2004, 28(2): 116~120.
- [2] HDEUR A, CHARTIER T, ZKUL C. Dynamics and stabilization of a

high power side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. Opt Commun, 2000, 186: 311~317.

- [3] KOPLow J P, MOORE S W, KLNER D A V. A new method for side pumping of double-clad fiber sources [J]. IEEE J Q E, 2003, 39(4): 529~540.
- [4] XU J Q, LU J H, KUMAR G A. A non-fused fiber coupler for side-pumping of double-clad fiber lasers [J]. Opt Commun, 2003, 220: 389~395.
- [5] WEBER T, LOTHY W, WEBER H P. A longitudinal and side-pumped single transverse mode double-clad fiber laser with a special silicene coating [J]. Opt Commun, 1995, 115: 99~104.