

文章编号 : 0253-2239(2002)10-1259-04

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*

王常安 向世清 陆雨田 张春伟

(中科院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 提出了一种新的耦合技术——微型棱镜耦合技术, 能有效地将激光二极管抽运光耦合进双包层光纤。这种技术具有简单、对光纤本身几乎无损伤等特点。介绍了微型棱镜耦合的原理和具体使用方法, 理论计算所得的耦合效率约为 90%。通过分析, 对光源提出了相应要求, 并指出了它的应用范围。

关键词: 激光二极管; 双包层光纤; 侧面耦合; 微型棱镜

中图分类号: TN245 文献标识码: A

双包层光纤激光器至目前已能提供几十瓦甚至 100 W 的单模连续输出, 其波长范围可覆盖整个近红外区域, 在图象、通信、材料处理和医疗、远程传感等方面有广泛的潜在应用^[1]。此类激光装置的抽运光由大功率激光二极管单管或阵列提供, 因此最重要的技术之一就是激光二极管抽运光低损耗地耦合进双包层光纤。双包层光纤由传输单模信号光的纤芯、传输抽运光的内包层以及聚合物外包层构成。抽运光在内包层中传输并逐渐地被纤芯吸收, 内包层的数值孔径 NA 一般较大以便于与抽运光耦合。将抽运光由激光二极管注入双包层光纤含有两层意思, 一是将抽运光高效注入内包层, 二是抽运光可高效地在纤芯中引起激发。

目前, 能将激光二极管抽运光有效地耦合进双包层光纤的技术主要有两种: 端面耦合技术^[2~5]和侧面 V 形槽技术^[6~8]。端面耦合技术简单而且耦合效率高于 50%。但是, 由于双包层光纤只有两个端面能将抽运光注入光纤, 因此限制了能入射到光纤中的最大抽运光功率。另外, 因为耦合占用端面, 端面耦合需要块状的分光镜将单模信号光和多模抽运光组合入射到双包层光纤的端面, 使双包层光纤不能同其他光纤直接熔接, 当光纤需要同其它光纤相连时会增加损耗。侧面 V 形槽耦合技术则克服了端面耦合技术的缺点, 它既有很高的耦合效率, 又实现了抽运光与双包层光纤的侧面耦合, 将光纤的

端面解放出来同其它光纤熔接。但由于 V 形槽的槽深只能小于内包层宽度的一半, 因此形成的反光面积小, 对于象大功率激光二极管阵列这样的光源, 其光束半径较大, 它的耦合效率就会受限。另外, 侧面 V 形槽技术需要在光纤内包层上刻一深槽, 对光纤本身造成损伤, 导致光纤的机械强度减弱。从加工工艺的角度来说, V 形槽技术因其槽深一般只有几十微米, 加工不太容易。因此, 研究更有效的方法是当务之急。本文提出了一种新的侧面耦合技术, 它仅采用一块体积可以稍大从而利于加工的直角棱镜, 在制作时也仅需要将光纤在棱镜紧贴处的保护层和外包层剥掉, 并且克服了上述耦合技术的缺点, 能将抽运光有效地耦合进双包层光纤。其更大的优点还在于它十分有利于特殊形式的大功率光纤激光器, 如碟形光纤激光器^[9]等。可以放在沿光纤长度的任何位置, 可以使用空间多点抽运法。

1 耦合方案

在参考文献 [10] 中, 曾有一种微型棱镜耦合方案, 其特点是直角面与内包层贴近, 导致耦合效率对于抽运光束质量敏感。当以大功率激光二极管作为抽运光源时, 耦合效率不高。本文提出的方法与该方案有很大的不同。

微型棱镜耦合方案如图 1 所示, 在一小段剥去外包层的双包层光纤上, 沿光纤长度方向将一微型棱镜用折射率匹配的粘合剂与双包层光纤的内包层粘在一起。棱镜及其尺寸如图 2 所示, π_1 、 π_2 为两个互相平行的直角三角形, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为三个平行四

* 中国科学院一期创新基金资助课题。

E-mail: sqxiang@mail.shenc.ac.cn

收稿日期: 2001-09-17; 收到修改稿日期: 2001-11-12

边形,在 σ_3 与内包层间为折射率匹配(棱镜-粘合剂-内包层三者间的折射率相等或近似相等)的粘合剂。 σ_1 为光束入射面,激光二极管出射光束垂直入射到该面上。考虑到光束的发散性(对于发散性引起的耦合损失后面将粗略给出计算。从而可大致给

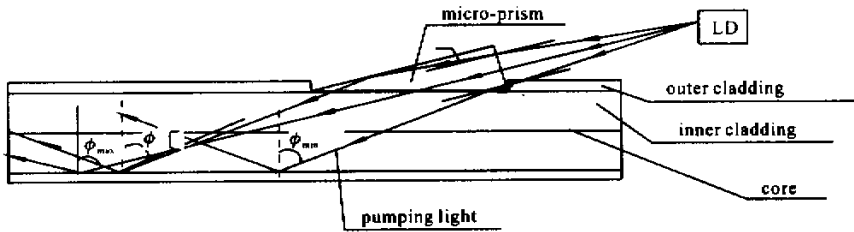


Fig. 1 Scheme for coupling LD pumping light into double-cladding fiber by micro-prism

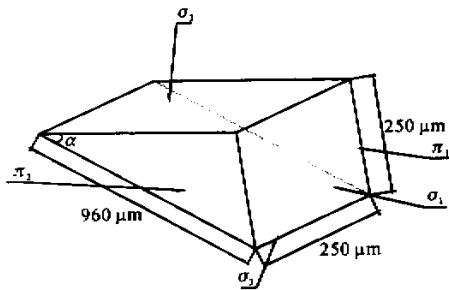


Fig. 2 Scheme of the micro-prism, σ_1 , σ_2 , σ_3 are optical facets

为了阐述微型棱镜耦合技术原理,选择以双包层光纤的内包层横截面为 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ 的正方形为例(对于其它尺寸的内包层,只需微调所采用的棱镜的尺寸,其余原理和方法与此处叙述一致),其折射率 $n_f = 1.45$,数值孔径 $NA = 0.6$,外包层折射率 1.32。因此,其临界全反射角:

$$\phi_c = \arccos(0.6/1.45) = 65.5^\circ. \quad (1)$$

1.1 棱镜参数选择

根据内包层的折射率 $n_f = 1.45$,为了实现棱镜-粘合剂-内包层三者间折射率匹配,棱镜的材料可选用科宁(Corning)7913 玻璃,其折射率正好为 1.45。对于直角三角形 π_1 、 π_2 中较小的锐角 α 的选择,有以下几个因素必须权衡:1)原则上只要 α 小于 $90^\circ - 65.5^\circ = 24.5^\circ$ 就可以了。考虑到入射光束的发散性,应该将 α 角选择得越小越好。 α 角越小,对光束发散角的要求越低;2) α 角太小,又会影响到入射光束与 σ_1 面的准直以及光源放置的位置。本文将 α 角选为 15° 。当然也可以根据具体情况而选择其它合适的角度。光束入射面 σ_1 为 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ 。其选择理由是与内包层的尺寸匹配。相

出激光二极管发散度的要求),所有光线分两种情况入射到光纤内外包层的界面上,一种是被 σ_3 面反射到内外包层界面上,另一种情况是经棱镜直接入射到界面上。能够在光纤轴向传播的光线入射角 ϕ 必须大于全反射临界角 ϕ_c 。

应地,直角三角形斜边 L 的长度为 $960 \mu\text{m}$ 。

1.2 激光二极管与棱镜的相对放置方式

根据棱镜尺寸,为了达到最佳配合,选择带尾纤的激光二极管,且其尾纤直径 $D = 250 \mu\text{m}$,此尺寸便于与 σ_1 面对准。同时,尾纤数值孔径 $NA = 0.2$ 。当入射光垂直入射到 σ_1 面时,光束将直接入射到内外包层界面上,此时入射角 ϕ 最大,

$$\phi_{\max} = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 15^\circ = 75^\circ, \quad (2)$$

而入射角 ϕ 最小的情况发生于当光束从尾纤中出射,以最大发散角 $\arcsin(0.2)$ 入射到 σ_1 面上时,此时光束将直接入射到内外包层的界面上或者经过 σ_2 反射到内外包层的界面上。如图 1 所示,用 θ 表示抽运光束入射进棱镜后的折射角。则 $\phi = 90^\circ - 15^\circ - \theta$ 。因为 $1.45 \sin(\theta) = 0.2$, $\theta = 8^\circ$ 。所以:

$$\phi_{\min} = 90^\circ - 15^\circ - \theta = 67^\circ. \quad (3)$$

计算结果表明,在内外包层界面上的入射角 ϕ 在 $67^\circ \sim 75^\circ$ 之间,大于全反射角 ϕ_c 。因此,光束能被限制在内包层中并沿光纤轴向向前传播。

以上讨论中没有考虑界面上的损耗。由于棱镜-粘合剂-内包层之间的折射率差在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 之间,因此,三者间的界面反射率很小,可以忽略界面上的损耗。在 σ_1 面上,由于空气和棱镜的折射率差较大,会产生一定的损耗,计算结果小于 4%。另外,少部分光会被内外包层界面反射到棱镜的 σ_2 面上,光线再被棱镜反射到内外包层界面上时,入射角 ϕ 已不再满足全反射条件而出射,形成损耗大约为 3%。这样,总的耦合效率可以达到 90% 以上。

2 分析与讨论

1) 带尾纤的激光二极管确保了出射的抽运光

为圆对称,各个方向上的光束宽度和发散角都相同。本技术对于带尾纤的激光二极管,要求尾纤的直径 D 与数值孔径 NA 的反正弦值的乘积(即拉格朗日不变量)小于一个特定的值。该值由光纤内外包层界面的全反射角 ϕ_c 、直角三角形 π_1 的较小锐角 α 及入射面 σ_1 的边长 a 、棱镜的折射率 n_p 决定,为:

$$a \times \arcsin[n_p \sin(90^\circ - \phi_c - \alpha)]$$

对于上面的例子,即 $a = 250 \mu\text{m}$, $\phi_c = 65.5^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $n_p = 1.45$,要求:

$$D \times \arcsin(NA) \leq 250 \arcsin[1.45 \sin(90^\circ - 65.5^\circ - 15^\circ)] = 3461 (\mu\text{m} \cdot \text{deg}), \quad (4)$$

本技术对于不带尾纤的激光二极管阵列也同样适用,但不带尾纤的激光二极管阵列的出射光束是椭圆形光斑,在垂直于 p-n 结和平行于 p-n 结的方向上的光束宽度和光束发散角大小不相同,要求在垂直结面的 y 方向和平行结面的 x 方向上的光束线宽 d 与发散角 θ 乘积(拉格朗日不变量)都要小于这个特定值。如果不能满足这个条件,耦合效率就会下降。一般的大功率激光二极管阵列,平行于结面方向上的光束线宽与发散角乘积约为垂直结面方向上的光束线宽与发散角乘积的 1700 倍,平行结面上的光束线宽与发散角乘积远大于所要求的值而垂直结面上的光束线宽与发散角乘积远小于所要求的值。通过光束整形,可以使这两个方向上的光束线宽。发散角乘积相近并且都小于或接近于所要求的值^[11,12],从而提高耦合效率。

2) 当抽运光源的功率很大时(如输出功率为几十瓦的激光二极管阵列),抽运光束会对折射率匹配胶产生损伤。对于这种情况,可将微型棱镜的 π_1 、 π_2 、 σ_2 三个面镀上高反射率的金属膜。分别将双包层光纤和微型棱镜固定,且使 σ_3 面紧贴光纤内包层,最后将它们一起浸在折射率匹配液中即可。

3) 当光纤内包层不是理想的方形截面时,由于棱镜-粘合剂-内包层三者的折射率近似相等,它们之间的界面影响很小。同时,由于一般情况下内包层偏离方形截面不太严重。所以对耦合效率的影响可以忽略。当内包层截面是其它形状时,如果内外包层的界面至少有一个是平面,如 D 形内包层、六边形内包层以及跑道形内包层截面的光纤,就可选择棱镜直接贴于该平面,此时耦合情况与方形截面相同。对于其它的内包层截面,如图 3 所示的梅花瓣形,将棱镜的入射面 σ_1 的边长 a 定为相邻两个花

瓣公切线的切点间距离,并且选择折射率匹配的粘合剂以减少界面影响,也可以采用这种耦合方案。只是在具体操作时,如将棱镜粘合到内包层上会比前几种情况困难一些,进而影响到耦合效率。

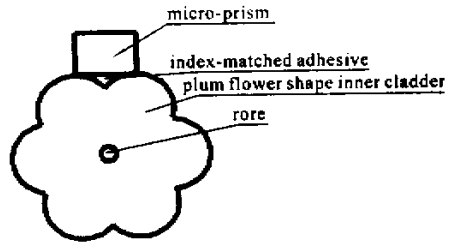


Fig. 3 Scheme of coupling LD pumping light into mume-flower shape inner cladding DCF by micro-prism

关于光线进入内包层后如何与纤芯有效耦合,将另文详细讨论,本文仅指出矩形方案有很高的效率,不低于 V 形槽方法。

4) 经过计算,发现这种耦合技术的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。对于本文中的例子,当校准误差为 $10 \mu\text{m}$ 时,耦合效率下降不到 5%。棱镜的角度误差在 30° 以内时,对耦合效率几乎不产生影响。当抽运光相对于入射面不是垂直入射,而是存在一定的倾角时,在图 1 中,在垂直于图形所在面的方向上发生倾斜时,角度在很大范围内变化都不会对耦合效率产生大的影响,故可忽略。在图形所在面内发生倾斜时,其角度变化对耦合效率的影响如图 4 所示。

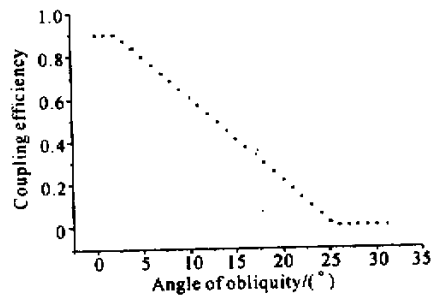


Fig. 4 Coupling efficiency vs the injection angle that respect to the axis which perpendicular to σ_1 and vary in the paper plane of Fig. 1

3 优点

在许多应用中,要求光纤激光器有高的输出功率(十瓦甚至几十瓦),这就要求几十瓦甚至上百瓦的抽运功率。目前国内研制的激光二极管阵列功率一般不高,在这种条件下,可以利用微型棱镜耦合技

术实现多点耦合,将多个激光二极管抽运光注入到双包层光纤中,实现光纤激光器的高功率输出。以光通信中的分布式拉曼放大所需的抽运光源——拉曼光纤激光器为例,它需要双包层光纤激光器的输出功率在 10W 左右。利用本技术,就可以采用国产的激光二极管阵列作为抽运光源,而不需要进口的高功率激光二极管阵列,这样可以降低成本,提高产品的市场竞争力。当然,多点抽运也有一定的弱点,即增加了系统的复杂度。但是,权衡各种情况,至少提出了一种完全可能利用本技术在国内条件下实现大功率光纤激光器输出。

结论 微型棱镜耦合技术是一种能有效地将激光二极管抽运光耦合进双包层光纤的新型耦合技术。理论计算表明其耦合效率可以达到 90% 以上。它对光源的光束质量要求较低,一般的大功率激光二极管阵列经过光束整形都能满足要求。这种侧面耦合方案还可以实现多点抽运(另文详述),从而将大功率的抽运光耦合进光纤,实现光纤激光器的高功率输出。另外,这种耦合技术还能将双包层光纤的两端解放出来同其它光纤熔接,减小信号光的损耗。微型棱镜耦合技术对光纤本身几乎没有损伤,而且易于加工,表明它是一种较为理想的双包层光纤耦合技术。

参 考 文 献

- [1] Kukov A S, Laptsev A Y, Dianov E M *et al.*. Yb³⁺-doped double-clad fibers and lasers. *Proc. SPIE*, 2000, **4083**: 118~126
- [2] Sandrock T, Scheife H, Heumann E *et al.*. High-power

- continuous-wave upconversion fiber laser at room temperature. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 808~810
- [3] Po H, Cao J D, Laliberte B M *et al.*. High power endodymium-doped single transverse mode fiber laser. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(17): 1500~1501
- [4] Pask H M, Archambault J L, Hanna D C *et al.*. Operation of cladding-pumped Yb³⁺-doped silica fibre lasers in 1 μm region. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(11): 863~865
- [5] Zellmer H, Willamowski U, Tunnermann A *et al.*. High-power CW neodymium-doped fiber laser operation at 9.2 W with high beam quality. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6): 578~580
- [6] Ripin D J, Goldberg L. High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded V-grooves. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(25): 2204~2205
- [7] Goldberg L, Koplow J P, Moeller R P *et al.*. High-power superfluorescent source with a side-pumped Yb-doped double-cladding fiber. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(13): 1037~1039
- [8] Goldber L, Koplow J P, Kliner D A V. High efficient 4-W Yb-doped fiber amplifier pumped by a broad-striped laser diode. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10): 673~675
- [9] Li Cheng, Song Jie, Kim Nam Seong *et al.*. Diode-pumped fiber high-power fiber laser and applications. *Proc. SPIE*, 1997, **3862**: 246~253
- [10] Weber T, Luthy W, Weber H P *et al.*. A longitude and side pumped single transverse mode double-clad fiber laser with a special silicone coating. *Opt. Commun.*, 1995, **115**(1, 2): 99~104
- [11] Ehlers B, Du K, Baumann M *et al.*. Bean shaping and fiber coupling of high power diode laser arrays. *Proc. SPIE*, 1997, **3097**: 639~644
- [12] Shi Peng, Li Xiaoli, Zhang Guifen *et al.*. Micro-prism stack beam shaper for high power laser diode array. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(11): 1544~1547 (in Chinese)

New Side-Pumped Technology of Coupling LD Pumping Light into Double-Cladding Fiber by Micro-Prism

Wang Chang'an Xiang Shiqing Lu Yutian Zhang Chunwei

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

(Received 17 September 2001; revised 12 November 2001)

Abstract: In this paper, we present a new kind of coupling technology which use amicro-prism to sided coupling LD pumping energy into double cladding fiberefficiently. The mechanism and the application method was first introduced, then the theoretical coupling efficiency was given (about 90%). Finally, therequire-ment on the LD source and the application limit of this technolog was givenbased on the analysis.

Key word: laser diode; double-cladding fiber; dide pumping; micro-prism