

文章编号: 0258-7025(2007)04-0470-05

用于高功率双包层光纤激光器侧面耦合的对称夹层结构

张 帆, 王春灿, 童 治, 宁提纲, 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 提出了一种基于亚波长衍射光栅理论的介质-金属-介质的对称夹层结构, 这种结构因为没有使用诸如折射率匹配液、光学固化胶等承受不了较高温度的黏接物质, 所以可以用于大功率激光二极管阵列的侧面抽运, 尤其可用于条形半导体激光器侧面抽运双包层掺杂光纤中, 以制作各种大功率稀土离子掺杂光纤激光器, 并且其耦合效率可以达到 80% 以上。同时, 这种侧面抽运技术还支持多点抽运以及光纤两端同时激射高能激光。

关键词 激光器; 光纤激光器; 双包层光纤; 亚波长衍射光栅; 耦合效率

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Design of a Dielectric-Metal-Dielectric Sandwich Structure for Efficient Side-Coupling of High Power Double-Clad Fiber Lasers

ZHANG Fan, WANG Chun-can, TONG Zhi, NING Ti-gang, JIAN Shui-sheng

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A novel dielectric-metal-dielectric sandwich structure based on the theory of sub-wavelength diffraction grating was presented for efficient side-coupling of high power double-clad fiber (DCF) lasers. The structure design considerations and simulation results with high coupling efficiency which can be over 80% were also presented. It can be used for high power laser diodes bar to side-pump DCF lasers without any beam-shaping. Besides, this side-coupling technique was scalable by multi-point pumping with several laser diodes bars.

Key words lasers; fiber laser; double-clad fiber; sub-wavelength diffraction grating; coupling efficiency

1 引 言

稀土离子掺杂的光纤激光器和放大器作为光源具有光束质量好(基模输出)、功率密度高、散热装置简单、工作时间长、性能稳定等优点。在双包层光纤(DCF)中, 抽运光在尺寸较大的内包层中传输, 由于内包层的尺寸通常在几十到数百微米, 能够容纳数以万计的传输模式, 因而能够很好地与高功率的半导体激光器相匹配, 从而获得高的抽运功率。因此双包层光纤的这种优点能够使稀土离子掺杂的光纤激光器和放大器输出很高的平均功率和脉冲能量。利用端面抽运, 双包层掺杂光纤激光器已经获得了

上千瓦的功率输出^[1,2]。然而端面抽运虽然简单且耦合效率高(>50%), 但只能通过两个端面注入抽运光, 所以需要分光镜将信号光与抽运光复用以后注入双包层光纤的端面, 这样双包层光纤就不能同其他光纤直接熔接, 导致插入损耗增大。此外, 该方式需要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。因此, 提出光纤侧面抽运耦合技术, 如利用微型棱镜侧面耦合^[3~5], V型槽侧面抽运技术^[6,7], 嵌入式微型棱镜技术^[8]以及光纤磨抛技术^[9]。但是这些技术对工艺要求十分严格, 而且对光纤有一定程度上的损害,

收稿日期: 2006-08-30; 收到修改稿日期: 2006-11-17

基金项目: 北京交通大学科技基金(2004RC073)和北京交通大学专项研究员基金(48101)资助项目。

作者简介: 张 帆(1981—), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要从事激光器和光放大器的研究。E-mail: zwenjunf@163.com

导师简介: 简水生(1929—), 男, 江西萍乡人, 教授, 中国科学院院士, 博士生导师, 目前研究方向为光纤通信、光纤传感、光纤有源无源器件、光纤网。E-mail: ssjian@center.bjtu.edu.cn

实现起来成本高,难度大。R. Herda 等^[10]提出了一种利用二元衍射光栅进行侧面耦合的技术,这种方法是将衍射光栅放置在光纤的内包层表面,且不损害光纤的外表面,对 TM 偏振的入射光具有高达 94% 的耦合效率。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介质折射率匹配层,以达到折射率匹配和固定二元衍射光栅,所以不能够承受大功率激光二极管阵列侧面抽运时所产生的热量,二元金属衍射光栅容易脱落。因此这种方法不能用于大功率稀土光纤激光器的制作。针对这种缺点,本文提出了一种新型侧面耦合方法,可以克服上述缺点,能够用于大功率激光二极管阵列侧面抽运,并且具有将近 80% 的耦合效率。

2 理论分析

2.1 新型侧面抽运结构的设计与制作

图 1 为基于介质-金属-介质的对称夹层结构进行侧面耦合双包层光纤的实验示意图。这种耦合方法的主要思想是:激光二极管阵列经过柱透镜准直后,垂直于双包层掺杂光纤的内表面射入。由于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(SiO₂)。这样光纤的内包层、金的薄膜层以及 SiO₂ 层就构成了一个介质-金属-介质的夹层结构,并且由于所镀的金属金薄膜的宽度小于半导体激光器的入射波长,所以实际上就在光纤的内包层上形成了一个介质-金属-介质结构的亚波长光栅。入射的抽运光在介质与金属的界面发生前向衍射和后向衍射。如果+1和-1阶衍射波的角度满足 $\theta > \theta_{\text{TIF}}$ (其中 θ_{TIF} 为在双包层光纤的包层中全内反射的临界角),则经过金属光栅衍射后的抽运光就被束缚在双包层光纤内部一直传输下去。所以+1和-1阶衍射波的衍射效率即是激光二极管阵列抽运掺杂双包层

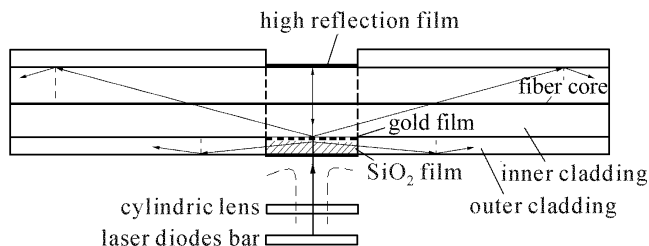


图 1 基于介质-金属-介质的对称夹层结构进行侧面耦合双包层光纤的实验示意图

Fig. 1 Experimental setup of a dielectric-metal-dielectric sandwich structure for side-coupling double-clad fiber lasers

光纤的耦合效率。因为内包层折射率与 SiO₂ 的折射率相近,所以这种介质-金属-介质结构是一个对称的夹层结构,这样+1和-1阶前向衍射波的衍射角与后向衍射波的衍射角相同,当其中一个满足了全反射条件后,如图 1 所示,+1和-1阶前向和后向衍射波就可以都被束缚在光纤中传输。为了提高耦合效率,在双包层光纤的两端镀上高反膜,它可以使 0 阶前向衍射波反射后再次经过亚波长光栅实现第二次衍射。经过四次衍射(即入射抽运光来回往返两次)后,抽运光的总耦合效率可以达到 80% 以上。

2.2 新型抽运结构的理论分析

图 2 为介质-金属-介质对称夹层结构示意图。因为入射抽运光的波长与金属光栅的周期可比拟,所以标量衍射理论不再适用,必须利用严格的矢量衍射理论进行分析^[11]。在严格的矢量衍射理论中,介质折射率函数和周期结构中的电磁场被分别展开为傅里叶序列和布尔赫波模式,从而将边界值问题简化为特征值问题。

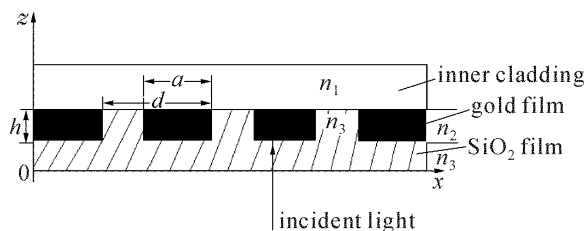


图 2 介质-金属-介质对称夹层结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dielectric-metal-dielectric sandwich structure

图 2 对应于图 1 中用于侧面耦合的亚波长衍射光栅区域。它由一个周期调制的金薄膜组成,薄膜层的周期为 d ,厚度为 h 。该结构处于两个均匀媒质(区域 1 和 3)之间。其中一个的折射率与双包层光纤的内包层折射率相同($n_1 = 1.453$),另一个是介质二氧化硅的折射率 $n_3 = n_{\text{SiO}_2} = 1.45$ 。这里当考虑 TE 偏振模的衍射时,根据麦克斯韦(Maxwell)方程

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_y(x,z) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} E_y(x,z) + k^2 n_j^2 E_y(x,z) = 0, \quad (1)$$

式中 E_y 为 TE 偏振时的电场分量, $\beta = kn_j$ 为各层的传播常数, $j = 1$ 或 3 , $k = 2\pi/\lambda$ 为自由空间的波数。首先考虑区域 1 和区域 3,总场可以表示为: $U_{\text{total}} = U_1 + U_R$, U_1 代表入射场, U_R 表示后向衍射场。在区域 3 中, U_T 表示前向衍射场(这里的 U 代表(1)式中出现的电场分量,即对 TE 偏振, $U = E_y$)。所以 U_1 , U_R , U_T 分别表示为

$$U_{I(x,z)} = \exp[ikn_1(x\sin\theta + z\cos\theta)], \quad (2)$$

$$U_{R(x,z)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m \exp[i(\alpha_m x - r_m z)], \quad (3)$$

$$U_{T(x,z)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m \exp\{i[\alpha_m x + t_m(z-h)]\}, \quad (4)$$

式中 θ 为入射角, R_m, T_m 分别为第 m 阶后向衍射波和前向衍射波的幅值。这里定义 $\alpha_m = kn_1 \sin\theta_m$, 其中 θ_m 为第 m 阶后向衍射波的衍射角。 t_m 和 r_m 有相似的表达式, 只是将 n_1 换作 n_3 。 t_m 和 r_m 的实部代表均匀的平面波, 虚部对应于损耗波

$$\alpha_m = \alpha_0 + 2\pi m/d, \quad (5)$$

$$\alpha_0 = kn_1 \sin\theta, \quad (6)$$

$$r_m = \begin{cases} [(kn_1)^2 - \alpha_m]^2 & |\alpha_m| \leq kn_1 \\ i[\alpha_m - (kn_1)^2]^{1/2} & |\alpha_m| > kn_1 \end{cases}, \quad (7)$$

然后考虑区域 2 (即折射率调制区)。TE 模介质折射率函数 ϵ_r 用傅里叶级数展开为

$$\epsilon_r(x) = n_2(x)^2 = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \epsilon_p \exp(i2\pi px/d), \quad (8)$$

式中 p 为相应的级数, ϵ_p 为对应级数的傅里叶系数。如果设 $E_{y(x,z)} = X_{(x)}Z_{(z)}$, 利用(1)式, 关于 $X_{(x)}$ 和 $Z_{(z)}$ 的方程可以分别写成

$$\frac{d^2}{dx^2} X_{(x)} + [k^2 \epsilon_r(x) - \gamma^2] X_{(x)} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} Z_{(z)} + \gamma^2 Z_{(z)} = 0, \quad (10)$$

式中 γ^2 是分离变量常数。设 $X_{(x)}$ 和 $Z_{(z)}$ 的解分别为

$$Z_{(z)} = a \exp(i\gamma z) + b \exp[-i\gamma(z-h)], \quad (11)$$

$$X_{(x)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} P_m \exp(i\alpha_m x), \quad (12)$$

式中 a, b 为常系数, P_m 为假设的假周期解的幅值系数。

将(8), (12)式代入(9)式, 可得

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} (k^2 \epsilon_{l-m} - \alpha_m^2 \delta_{lm}) P_m = \gamma^2 P_l, \quad (13)$$

式中 δ_{lm} 为狄拉克函数, γ 和 P 分别为方程的特征值和特征向量。该特征值方程可以利用数值方法解得

$$E_{y(x,z)} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{ln} \exp(i\alpha_l x) \{ a_n \exp(i\gamma_n z) + b_n \exp[-i\gamma_n(z-h)] \}, \quad (14)$$

在图 2 的区域 1, 2, 3 的 $z=0$ 和 $z=h$ 处应用边界条件, 可得 TE 偏振时的耦合方程为

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^{\infty} (r_l + \gamma_m) P_{lm} a_m + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} (r_l - \gamma_m) \exp(i\gamma_m h) P_{lm} b_m = 2r_l \delta_{l0}, \quad (15) \\ & \sum_{m=1}^{\infty} (t_l - \gamma_m) \exp(i\gamma_m h) P_{lm} a_m + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} (t_l + \gamma_m) P_{lm} b_m = 0, \quad (16) \end{aligned}$$

定义第 m 阶前向和后向衍射波的衍射效率为^[11]

$$\eta_{R,m} = R(r_m/r_0) |R_m|^2, \quad (17)$$

$$\eta_{T,m} = CR(t_m/r_0) |T_m|^2, \quad (18)$$

TE 偏振模时, $C=1$ 。利用(17), (18)式, 可以获取利用亚波长衍射光栅侧面耦合双包层光纤的耦合效率。

3 数值结果与讨论

计算图 2 中的介质-金属-介质结构对 +1 和 -1 阶的前向和后向衍射波的衍射效率 (即侧面耦合双包层光纤的耦合效率), 采用的参数与文献[10]中的相同。双包层光纤的芯径为 125 μm , 数值孔径为 0.38, 内包层的折射率为 1.453, 外包层为 1.402。当抽运波长为 976 nm 时对应的全反射角为 75° , 在该波长和全反射角的条件下, 根据光栅方程所需要的光栅周期在 673~697 nm 之间。金属金在此波长下的复折射率为 $0.09 + 6.12i$, 以及 SiO_2 的折射率为 1.45。所以光栅的周期选为 683 nm 以满足全反射, 并且假设抽运光是垂直于光纤的侧面正入射的。

3.1 新型抽运结构对入射 TE 偏振波的衍射效率

由图 3, 4 可知, 金薄膜的两个结构参数: 薄膜线宽 a_0 和薄膜厚度 h , 在光栅周期 d 和入射抽运光的波长 λ 一定时, 决定了 +1 和 -1 阶前向和后向衍射波的衍射效率 (即抽运光的耦合效率 η)。图 3 和图 4 分别是当 a_0 或是 h 取一定值时, +1 和 -1 阶前向和后向衍射波的总衍射效率, 随另一个参量的变化而变化的情况。两个图都证明了在选取了合适的 a_0 和 h 后, +1 和 -1 阶总的衍射效率可以达到 40%。金薄膜层上镀上的是 SiO_2 层 (其折射率为 1.45), 与双

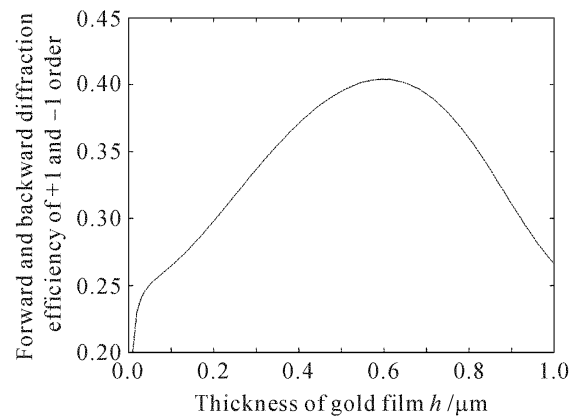


图 3 当金薄膜的线宽 $a_0 = 0.38 \mu\text{m}$ 时, +1 和 -1 阶前向和后向衍射效率与金薄膜厚度 h 的关系 (TE 模)

Fig. 3 Forward and backward diffraction efficiency of +1 and -1 order versus thickness of gold film at the film line-width $a_0 = 0.38 \mu\text{m}$ (TE-polarization)

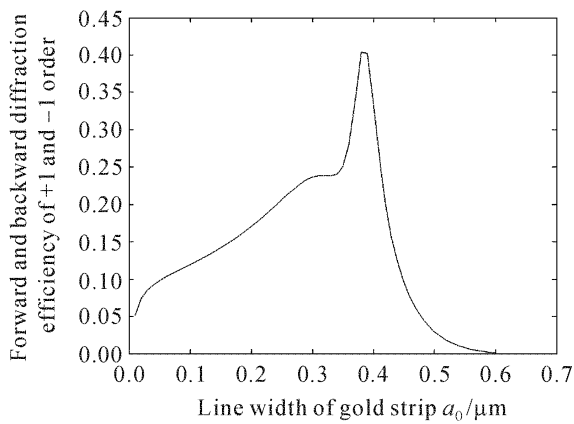


图4 当金薄膜厚度 $h = 0.6 \mu\text{m}$ 时, +1 和 -1 阶前向和后向衍射效率与金薄膜的线宽 a_0 的关系 (TE 模)

Fig. 4 Forward and backward diffraction efficiency of +1 and -1 order versus line-width a_0 of gold film at the film thickness $h = 0.6 \mu\text{m}$ (TE-polarization)

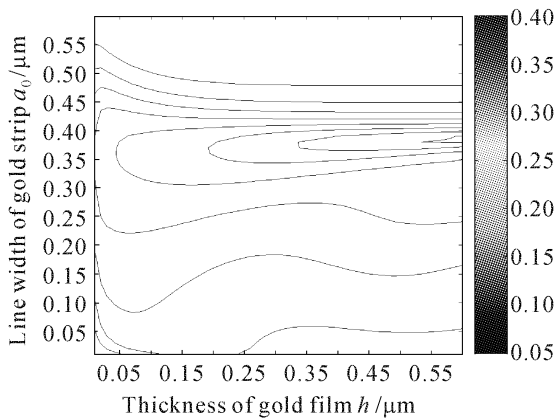


图5 +1 和 -1 阶前向和后向衍射效率与金薄膜的线宽 a_0 和厚度 h 的对应变化关系 (TE 模)

Fig. 5 Forward and backward diffraction efficiency of +1 and -1 order versus thickness h and line-width a_0 of gold film (TE-polarization)

包层光纤的内包层折射率(1.453)十分相近,所以这种侧面抽运结构是一个对称的介质-金属-介质夹层结构。由于在内包层的另一端镀上了高反膜,这样近 60% 的 0 阶前向衍射波在被高反膜反射回来,射向亚波长衍射光栅后,再一次发生衍射,其+1和-1阶前后向总的衍射效率与第一次的基本一致。这样,抽运光每一次经过亚波长衍射光栅时都会有 40% 的抽运光被耦合进双包层掺杂光纤的包层里,并在其中以全反射的方式传输。因此,只需要来回反射两次,就能使 80% 以上的人射抽运光耦合进光纤里。如图 5 所示,当 $a_0 = 0.38 \mu\text{m}$, $h = 0.6 \mu\text{m}$ 时,+1 和 -1 阶前向和后向衍射波的总衍射效率达到最大值 40.386%,并且对于 a_0 有 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的冗余度,当 h 在 $0.55 \sim 0.60 \mu\text{m}$ 范围内时,总衍射效率均

可以维持在 40% 左右,这样的特性也给镀金属薄膜的制作工艺降低了难度。

3.2 新型抽运结构对入射 TM 偏振波的衍射效率

经过计算发现,当入射抽运光为 TM 模时,这种基于亚波长衍射光栅理论的介质-金属-介质的对称夹层结构的衍射效率更高,如图 6,7,8 所示。通过选取金属薄膜最优的线宽 a_0 和厚度 h ,第一次通过对称夹层的耦合结构时就可以有高达 70.92% 的抽运光被耦合进光纤的内包层中,并由于+1和-1阶前向和后向衍射波的衍射角都满足全反射,所以能够一直被约束在内包层里传输。因此,只需要反射一次后(即再次经过对称夹层的耦合结构进行一次衍射),就能使 91% 以上的人射抽运光耦合进光纤里。如果考虑到实际工艺加工,对于入射抽运光为 TM 模时也可以不需要镀高反膜,就可以有近

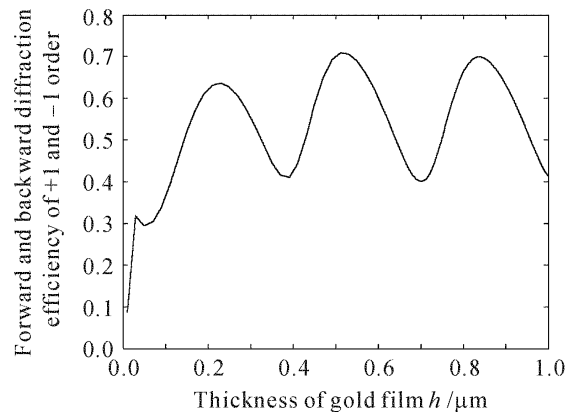


图6 当金薄膜的线宽 $a_0 = 0.21 \mu\text{m}$ 时,+1 和 -1 阶前向和后向衍射效率与金薄膜厚度 h 的关系 (TM 模)

Fig. 6 Forward and backward diffraction efficiency of +1 and -1 order versus thickness of gold film at the film line-width $a_0 = 0.21 \mu\text{m}$ (TM-polarization)

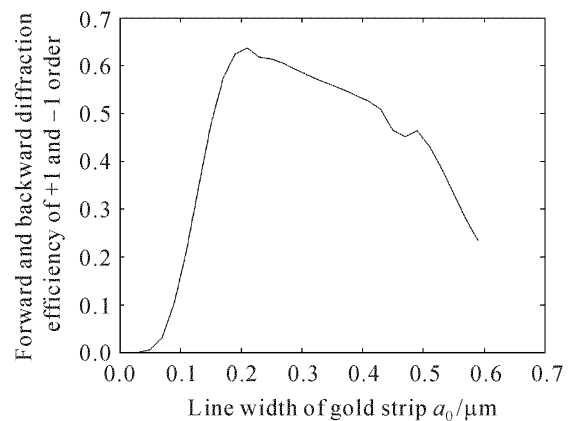


图7 当金薄膜厚度 $h = 0.23 \mu\text{m}$ 时,+1 和 -1 阶前向和后向衍射效率与金薄膜的线宽 a_0 的关系 (TM 模)

Fig. 7 Forward and backward diffraction efficiency of +1 and -1 order versus line-width a_0 of gold film at the film thickness $h = 0.23 \mu\text{m}$ (TM-polarization)

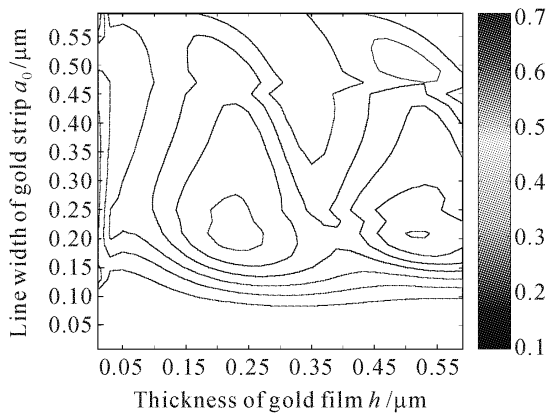


图8 +1和-1阶前向和后向衍射效率与金属金薄膜的线宽 a_0 和厚度 h 的对应变化关系(TM模)

Fig. 8 Forward and backward diffraction efficiency of +1 and -1 order versus thickness h and line-width a_0 of gold film (TM-polarization)

71%的耦合效率。由于这种新的侧面抽运结构采用的是镀膜技术,而不是如文献[10]中所采用的二元光学元件的加工技术,所以在制作成本和制作难度上都有明显的优势,而且因为没有使用诸如折射率匹配液、光学固化胶等承受不了较高温度的黏接物质,所以可以用于大功率激光二极管阵列的侧面抽运中,尤其是用于图1中所示的条形半导体激光器侧面抽运双包层掺杂光纤,以制作大功率稀土光纤激光器。同时,这种侧面抽运技术还支持多点抽运以及光纤两端同时激射高能激光。

4 结 论

基于亚波长衍射光栅理论提出了一种新的侧面抽运结构,这种结构相比于以往的侧面抽运结构有以下几点优势:1)不破坏光纤的结构,仅仅只是将外包层剥除约1 cm(单个条形激光二极管阵列发射端面的长度);2)由于只涉及镀膜技术,所以制作成本和制作难度较低;3)这种介质-金属-介质夹层结构可以承受较高的温度,所以可以被用于大功率半导体激光器的侧面抽运以及多点抽运;4)适用于发

射端面的长宽比极其不对称的条形激光二极管阵列的侧面耦合,因为这种结构不需要对其发射的长宽比极其不对称的光束进行光束整形;5)对TM模的耦合效率高达91%以上,而TE模的耦合效率也可以达到80%以上。

参 考 文 献

- 1 V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14):1158~1160
- 2 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25):6088~6092
- 3 Zhang Chunwei, Xiang Shiqing, Wang Chang'an. Coupling efficiency analysis for the micro-prism sided-coupling method of double-cladding fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):597~600
张春伟,向世清,王常安. 双包层光纤抽运光的微型棱镜侧面耦合效率分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):597~600
- 4 Wang Chang'an, Xiang Shiqing, Lu Yutian *et al.*. New side-pumped technology of coupling LD pumping light into double-cladding fiber by micro-prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10):1259~1262
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
- 5 Shi Peng, Li Xiaoli, Zhang Guifen *et al.*. Micro-prism stack beam shaper for high power laser diode array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(11):1544~1547
石鹏,李小莉,张贵芬等. 大功率激光二极管的薄片棱镜堆光束整形和光纤耦合输出[J]. *光学学报*, 2000, **20**(11):1544~1547
- 6 D. J. Ripin, L. Goldberg. High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded V-grooves [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(25):2204~2205
- 7 L. Goldberg, B. Cole, E. Snitsee. V-groove side-pumped 1.5 μm fibre amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(25):2127~2129
- 8 Jeffrey P. Koplow, Sean W. Moore, David A. V. Kliner. A new method for side pumping of double-clad fiber sources [J]. *J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(4):529~540
- 9 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**(6):389~395
- 10 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
- 11 J. Turunen, F. Wyrowski. *Micro-Optics: Elements, Systems and Applications* [M]. London HERZIC. H. P. 1997 Chap. 2, 31~52