

文章编号: 0253-2239(2009)04-0974-06

双包层光纤激光器微棱镜反射式侧面耦合的新技术

王大拯 王勇刚 刘素平 马晓宇

(中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083)

摘要 提出了一种双包层光纤激光器侧面耦合技术——微棱镜反射式侧面耦合技术,能高效且方便地将半导体激光器,特别是高功率半导体激光器阵列和叠层的抽运光耦合进双包层光纤中。该技术具有结构简单、加工难度小、抽运效率高、对光纤本身无损伤等特点,更重要的是该技术非常适合半导体激光器阵列的多点抽运。详细阐述了微棱镜反射式耦合技术的基本原理和具体使用方法,理论计算所得耦合效率超过 90%,并进行了初步的实验研究,得到了超过 50%的耦合效率。通过分析,对光源和棱镜具体尺寸参数提出了具体要求,并指出了其应用范围。

关键词 光纤激光器; 侧面耦合; 微棱镜; 双包层; 半导体激光器

中图分类号 TN235 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.0974

New Reflecting Side-Pumped method of Double-Clad Fiber Laser by Micro-prism

Wang Dazheng Wang Yonggang Liu Suping Ma Xiaoyu

(National Engineering Research Center for Optoelectronics Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract A new method for side pumping of double-clad fiber lasers through reflection of micro-prism is described, which can pump the light sources from LDs, especially LD arrays, into double-clad fibers easily and effectively. Advantages of this technique include no destruction of inner-cladding, high pumping efficiency, simplicity, low cost, easy industrialization and so on. The mechanism and the application method are introduced and the theoretical coupling efficiency is given (up to 90%). Then primary experiment is made to verify the method and 50% coupling efficiency is gotten. The parameters of the prism and the applied areas is analged.

Key words fiber laser; side pumping; micro-prism; double-clad; laser diode

1 引言

双包层光纤激光器的出现为光放大和光转换提供了有效的途径,目前已经可以提供上万瓦的输出功率,波长基本覆盖了整个近红外区,在通讯、医疗、图像处理、材料加工、军事等广泛的领域发挥着越来越重要的作用。双包层光纤激光器最重要的技术之一就是抽运光高效地耦合到双包层光纤的内包层中,采用端面抽运可以很容易的达到这一目的。但是,端面抽运的缺点也很明显,一方面,抽运占用了

端面,给信号光的输入和输出,以及信号的调制都带来不便,特别是对于光纤放大器尤为不利;另一方面,光纤端面的面积有限,这制约了抽运到光纤中的最大功率,如果一味地增大内包层截面积,必然会以增加光纤长度或者降低转换效率为代价。侧面耦合技术的出现有效地解决了上述端面抽运所遇到的问题。目前,侧面耦合技术主要包括:V形槽耦合技术^[1],角度磨抛耦合技术^[2~5],嵌入式反射镜耦合技术^[6],衍射光栅耦合技术^[7~8],尾纤侧面粘合技

收稿日期: 2008-07-03; 收到修改稿日期: 2008-09-19

作者简介: 王大拯(1981-),男,博士研究生,主要从事光纤激光器和放大器方面的研究。E-mail: dzhwang@163.com

导师简介: 马晓宇(1966-),男,研究员,博士生导师,主要从事半导体光电子器件的 MOCVD 外延生长及大功率半导体激光器(阵列)及其组件、光纤激光器、固体激光器、通信用高速激光器、存储用激光器等方面的研究。E-mail: maxy@semi.ac.cn

术^[9],以及微棱镜耦合技术^[10~11]等。然而侧面耦合也不可避免的存在问题:几乎所有的侧面耦合技术都需要精密的光学或机械微加工手段配合,除此之外,V形槽技术和嵌入式反射镜技术对光纤内包层带来了严重的损害,大大降低了其机械强度,微棱镜侧面耦合技术不太适用于半导体激光器阵列抽运等等。

本文提出了一种双包层光纤激光器侧面耦合的新方法——微棱镜反射式侧面耦合技术。抽运光通过微棱镜内侧面的反射耦合进双包层光纤的内包层,这种方法不但具有很高的耦合效率,而且有效地克服了上述其它几种耦合方式的缺点。需要强调的是,这种方法可能是迄今唯一一种可以适用于半导体激光器叠层抽运的新方法。另外,该方法还具有对内包层无损伤、抽运效率高、适合多点抽运、结构简单紧凑、易于加工调试、封装简便、成本低廉容易实现产业化等诸多优点。

2 基本原理

微棱镜是一个采用与双包层光纤内包层相同的折射率材料加工而成的具有特殊尺寸的直角三棱柱,如图 1(a)所示。其棱长 b 与半导体激光器阵列

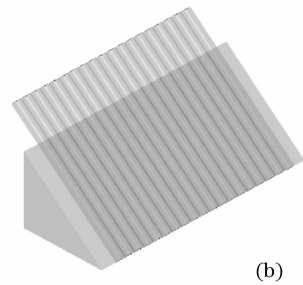
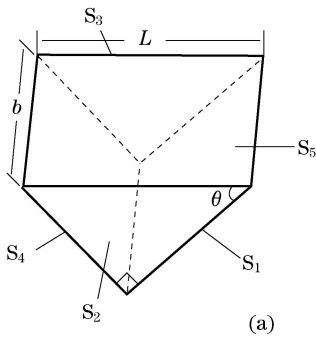


图 1 微棱镜示意图。(a) 微棱镜结构;(b) 微棱镜与光纤紧贴

Fig.1 Scheme of micro-prism. (a) basic structure; (b) attached to fibers

3 参数选择

为了阐述微型棱镜耦合技术原理,选择内包层截面为 $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ 的正方形的双包层光纤为例(对于其它尺寸的内包层,只需略微改变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 $n_i = 1.45$,数值孔径 NA 为 0.6 ,外包层折射率 $n_o = 1.32$ 。因此,其临界全反射角:

$$\varphi_b = \arccos(0.6/1.45) = 65.5^\circ$$

3.1 S_1 和 S_5 面之间夹角 θ 的选择

考虑到经压缩后快轴方向光束的发散性, S_1 面和 S_5 面之间夹角 θ 的选择需要权衡:1) 如果 θ 太

长度一致(为 $11\ \text{mm}$)。 S_2 和 S_3 是全等且相互平行的两个直角三角形,对应的角度分别为 50° , 40° 和 90° (本技术主要的指标是控制 S_1 和 S_5 面的夹角 θ 的大小,以及直角三角形斜边长度,对其他角度和边长的要求不高,这里设计成直角三角形是为了加工和镀膜的方便)。 S_1 、 S_4 和 S_5 是矩形。其中, S_1 面蒸镀对 40° 角入射的抽运光具有高反射率的光学薄膜。 S_5 面与剥除了一小段外包层的双包层光纤内包层紧密贴在一起(本文所用双包层光纤的外包层为聚酯材料,通过化学腐蚀方法可以方便的将外包层去除),两者之间用光学折射率匹配胶填充并粘合。所用的匹配胶折射率应该与微棱镜和内包层的折射率相匹配。图 1(b)展示了完成后的示意图。从半导体激光器出来的激光经过快轴压缩,垂直进入双包层光纤的内包层,进行粗略的慢轴准直,近似平行光或略汇聚光透过折射率匹配胶,通过 S_5 面进入三棱柱。光线在 S_1 面全反射,反射光再次通过 S_5 ,透过折射率匹配胶,进入内包层。在满足布儒斯特角的情况下,光线将在内包层与外包层之间的界面发生全反射,并继续在内包层中传输,为光纤提供抽运。

小,光线经透镜反射后入射到光纤中的角度太小就容易引起透射损耗;2) 如果 θ 太大,以较大入射角入射到 S_1 的光线可能根本无法进入光纤。

假设光束发散角为 2ψ ,光纤内包层全反射角(布儒斯特角)为 φ_b ,如图 2 所示,则有:

对于右侧以 ψ 出射的光线,光束经棱镜反射进入光纤内包层的入射角为 φ_1 , $\theta = \alpha - (90^\circ - \varphi_1)$, α 为反射光线和 S_1 面的夹角,而 $\alpha = [180^\circ - (\varphi_1 - \psi)]/2$,因此,

$$\begin{aligned} \theta &= [180^\circ - (\varphi_1 - \psi)]/2 - \\ & (90^\circ - \varphi_1) = (\varphi_1 + \psi)/2. \end{aligned} \quad (1)$$

若经棱镜的反射光线以小于 φ_b 入射双包层光纤内包层, 则会有光泄露。因此为了避免泄露, 必须使 $\varphi_1 > \varphi_b$, 因此要求 $\theta > (\varphi_b + \varphi)/2$ 。

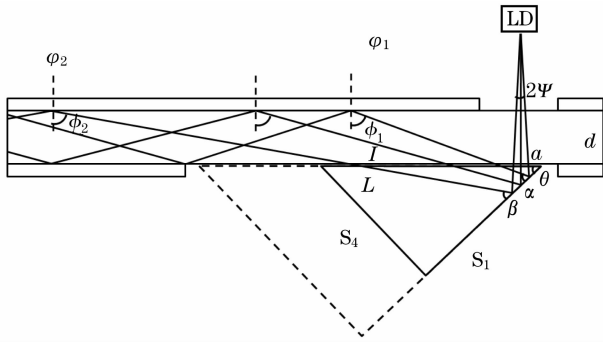


图2 微棱镜反射式侧面抽运方法图解

Fig. 2 Scheme for reflecting side-pumped method with micro-prism

另外, 对于左侧以 ψ 出射的光线, 光束经棱镜反射进入光纤内包层的入射角为 φ_2 , $\theta = \beta - (90^\circ - \varphi_2)$, β 为反射光线和 S_1 面的夹角, 而 $\beta = (180^\circ - \varphi_2 - \psi)/2$, 因此,

$$\theta = (180^\circ - \varphi_2 - \psi)/2 - (90^\circ - \varphi_2) = (\varphi_2 - \psi)/2 \quad (2)$$

经棱镜的反射光线以 φ_2 入射双包层光纤内包层, 必须要使 $\varphi_2 < 90^\circ$, 因此要求 $\theta < (90^\circ - \psi)/2$ 。

综上所述, S_1 与 S_5 两个斜面夹角 θ 的范围应该是: $(\varphi_b + \psi)/2 < \theta < (90^\circ - \psi)/2$ 。上文提到的光纤参数为例, θ 的范围为 $(66^\circ + \psi)/2 < \theta < (90^\circ - \psi)/2$, 即 $33^\circ + \psi/2 < \theta < 45^\circ - \psi/2$ 。可以看出, 对于光束发散角的要求 $33^\circ + \psi/2 < 45^\circ - \psi/2$, 即 $2\psi < 24^\circ$ 。这样的发散角要求在实际操作中是非常容易实现的。事实上, 采用直径 $400 \mu\text{m}$ 的普通光纤作为柱透镜对半导体激光器阵列进行快轴压缩的效果可以使 $2\psi < 1^\circ$, 而如果使用精密光学加工的微透镜进行快轴压缩可以得到 $2\psi < 0.2^\circ$ 的近平行光。

在理想状态下, 假设光束为平行光, 即 $2\psi = 0^\circ$, 此时 $33^\circ < \theta < 45^\circ$ 。可见, 对于 S_1 和 S_5 之间夹角具有 12° 的选择范围, 角度的不敏感性大大方便了器件加工和实验操作。在实际操作中, 为了棱镜加工的方便尽量避免粘合界面的损耗, 应该尽量使 θ 小一些。

3.2 直角三角形斜边长度 L 的选择

抽运光束的宽度和发散性也对棱镜直角三角形斜边长度 L 的选择有一定的要求, 1) 过长则会使一部分进入光纤中的光又再次回到棱镜中, 造成损耗。2) 过短则会有可能使部分经过 S_1 面反射的光线无

法进入到光纤中。

根据上述分析可得:

假设光束通过光纤从距离三角形 40° 角顶点为 a 的地方入射, 经过三棱柱 S_1 面反射, 再次进入光纤内传输。由于与光束反射后的发散相比光束反射前的发散可以忽略, 因此我们可以认为, 光束是从 S_1 面上, 距三角形顶点为 $a/\cos\theta$ 的小面元 σ 出射的, 光束的发散角为 2ψ , 最外侧的光线分别以入射角 φ_1 和 φ_2 入射光纤。双包层光纤内包层截面边长为 d , 三角形的长边长为 $L = l + a$ (l 为光束在三角形长边上的入射点到 50° 角顶点的距离)。如图 2 则有:

上方的光线经光纤全反射后不能够再次进入棱镜, 因此, $L < a \tan\theta \tan\varphi_1 + 2d \tan\varphi_1$;

下方的光纤必须能够从 S_5 面全部出射, 因此, $L > a \tan\theta \tan\varphi_2$ 。

因此有 $a \tan\theta \tan\varphi_2 < L < a \tan\theta \tan\varphi_1 + 2d \tan\varphi_1$, 代入(1)式、(2)式得

$$a \tan\theta \tan(2\theta + \psi) < L < a \tan\theta \tan \cdot (2\theta - \psi) + 2d \tan(2\theta - \psi) \quad (3)$$

因此需要满足条件:

$a \tan\theta \tan(2\theta + \psi) < a \tan\theta \tan(2\theta - \psi) + 2d \tan(2\theta - \psi)$, 才能够使得光线全部能够进入光纤传输。

在理想情况下, 发散角近似为零时, $a \tan\theta \tan 2\theta < L < a \tan\theta \tan 2\theta + 2d \tan 2\theta$ 。

以上文提到的光纤参数为例, $d = 400 \mu\text{m}$, $\theta = 40^\circ$, $a = 1000 \mu\text{m}$, 得到三角形的边长度 L 的取值范围 $4758 \mu\text{m} < L < (4758 + 4537) \mu\text{m}$, 即 $4.758 \text{ mm} < L < 9.295 \text{ mm}$ 。

在考虑有发散角的情况, 以上述参数为例, $\psi = 3^\circ$ 时, 依然可以使得 $6.833 \text{ mm} < L < 7.100 \text{ mm}$ 。

综上所述, 即使在光束质量不高的情况下, 该结构依然可以满足高效耦合的需要, 而且加工精度都在 mm 量级, 工艺难度低, 非常容易实现。这也是本技术与其他微棱镜耦合技术相比的优势之一。

以上讨论中没有考虑界面上的损耗, 由于棱镜、匹配胶和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, 计算结果表明不超过 5% 。在光束第一次垂直入射光纤时, 有 4% 的非涅耳反射, 在 S_1 面反射时有小于 1% 的反射损耗。这样总的耦合效率可以达到 90% 以上。

4 实验设计及实验结果

为检验该方法的可行性, 我们设计了如下实验:

微棱镜选用了折射率 $n=1.4496$ 的石英玻璃加工制作而成,尺寸分别为棱长 13 mm,三角形端面各角度分别为 90° 、 40° 和 50° ,其中斜边长为 7 mm,所有表面均抛光,光洁度为 4 级。我们用专业膜系设计软件设计了以 SiO_2 和 Al_2O_3 为组分的 9 层膜系结构,对 40° 角斜入射的 976 nm 波段的抽运光具有 99.5% 的反射率。采用 ZZSX-500 型电子束真空镀膜机镀膜后实测,发现对 40° 角斜入射的 976 nm 波段的抽运光的反射率下降到 91%,有效反射面积为 $11\text{ mm}\times 5.4\text{ mm}$ 的矩形。实验用的双包层光纤内包层为 D 形, $d=350/400\ \mu\text{m}$, $n_i=1.45$, NA 为 0.37,纤芯 $20\ \mu\text{m}$,外包层为聚酯材料, $d=450\ \mu\text{m}$, $n_o=1.4020$ 。用光纤切割刀截取 19 段双包层光纤,每段长度分别为 20 cm。用煮沸的浓硫酸分别腐蚀掉每段双包层的一端约 4 cm 的外包层,并处理洁净。用 MICROACE-3 型陶瓷划片机在陶瓷片上划

出 19 个凹槽,槽深 $300\ \mu\text{m}$,槽宽 $300\ \mu\text{m}$,周期为 $500\ \mu\text{m}$,分别对应了半导体激光器列阵的 19 个发光单元。把处理过的 19 段去掉外包层的双包层光纤整齐地并排放置在陶瓷片的对应凹槽内,使内包层 D 形的平面全部向上并处于同一平面,并用紫外胶在适当位置将其固定。我们采用双组分折射率匹配胶,在 975 nm 波段的折射率 $n=1.46$,将其充分混合并均匀涂抹在微棱镜的 S_5 面上,然后与双包层光纤裸露出的内包层的平面部分紧密粘合在一起,如图 3(a) 所示。抽运源为 976 nm 半导体激光器列阵,用 LIMO 公司的快慢轴压缩准直透镜进行光束压缩,快轴发散角为 0.5° 。然后将其各个发光单元与 19 根光纤一一对准,尽量使光纤垂直入射每一根双包层光纤。精确调整半导体激光器列阵的位置和入射角度,使得双包层光纤的输出功率最大。

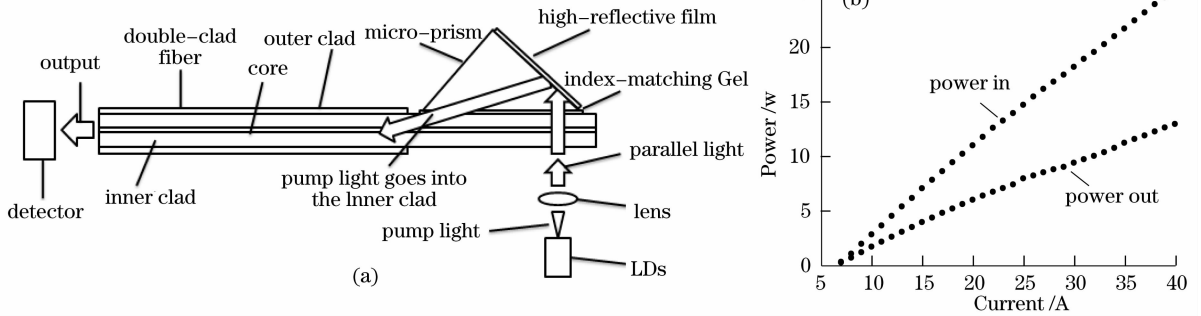


图 3 微棱镜示意图。(a) 实验设计; (b) 实验结果

Fig. 3 Scheme of micro-prism. (a) experimental design; (b) experimental result

实验数据如图 3(b) 所示,在抽运功率为 25.3 W 时,在双包层光纤末端得到了 12.9 W 的输出功率,耦合效率超过了 50%。实验结果表明,微棱镜反射式侧面耦合技术是一种完全实用的新的双包层激光器侧面抽运方式。由于高反射率薄膜的镀膜质量不高,所用的光纤、微棱镜和折射率匹配胶的折射率并不完全匹配,加上快慢轴压缩准直透镜并不能完全将半导体激光器列阵的每一个发光单元在近场区分开,因此,不能保证每一个发光单元的激光高效准确地进入对应的双包层光纤中,因此实验结果和理论分析存在一定差距,若改进实验条件,耦合效率有望进一步提高。

5 分析与讨论

5.1 不带尾纤的激光二极管

不带尾纤的半导体激光二极管,出射光束是椭圆形光斑,在垂直于 p-n 结的快轴方向和平行于 p-n

结的慢轴方向上的光束宽度和发散角不相同,要求在快轴方向 x 和慢轴方向 y 的光束线宽 δ 与发散角 ω 的乘积(拉格朗日不变量)都要小于一个特定值,该值由光纤内外包层界面的全反射角 φ_b 、 S_5 和 S_4 面的夹角 γ 、双包层光纤内包层截面边长 d 、棱镜的折射率 n 决定,为 $d \times \arcsin[n \times \sin(90^\circ - \varphi_b - \gamma)]$ 。对于上面的例子,即,内包层截面边长 $d=400\ \mu\text{m}$, $\theta=40^\circ$, $\varphi_b=65.5^\circ$, $\gamma=15^\circ$, $n=1.45$,要求:

$$\delta_{x,y} \times \omega_{x,y} < 400 \times \arcsin[1.45 \times \sin(90^\circ - 65.5^\circ - 15^\circ)] = 5538 [\mu\text{m} \cdot (^\circ)].$$

由半导体激光器出射的抽运光通过光束压缩,可以得到快轴发散角小于 0.5° ,快轴线宽小于 $400\ \mu\text{m}$,慢轴发散角小于 2° ,慢轴线宽小于 $150\ \mu\text{m}$ 的较高质量光束,从而使两个方向上的光束线宽与发散角的乘积都小于所要求的值,提高耦合效率。

5.2 带尾纤的激光二极管

本技术同样适用于带尾纤的激光二极管,尾纤

的出射激光是标准的圆对称,各个方向上的光束宽度和发散角都相同。对于带尾纤的激光二极管,同样要求其尾纤直径 D 与其数值孔径 NA 反正弦值的乘积 $D \times \arcsin(NA)$ (拉格朗日不变量) 小于这个特定的值。如果不能满足这个条件,耦合效率就会下降。

5.3 激光二极管阵列

可以直接用不带尾纤的激光二极管阵列对双包层激光器进行抽运是本技术的一大优势。只需要将光纤绕好,去掉每一环光纤同一位置的一小段外包层,将其保持适当的距离平行并排,用折射率匹配胶与三棱镜粘合固定,如图 1(b)所示。将半导体激光器阵列进行光束整形后,使发光单元和光纤一一对应。光束垂直入射光纤,经棱镜的反射面反射,最后进入到光纤中传输,从而可以达到单个半导体激光

器阵列多点抽运的效果。采用带尾纤的激光二极管阵列,也可以达到同样的目的。

另外,采用该方法还可以进行大功率半导体激光器叠层的直接侧面抽运,将由另文详述。

5.4 不同形状内包层的影响

当光纤内包层不是理想的方形或矩形截面时,会对耦合效率有一定的影响。但通过合适的选择和调整,可以使这种影响降到最低甚至可以忽略。比如,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和矩形截面的效果近似。对于其他形状的内包层截面,比如梅花形或反梅花形截面的内包层,我们可以选择使其涂覆了匹配胶后可以形成平面的位置,使棱镜贴于该平面,如图 4 所示。

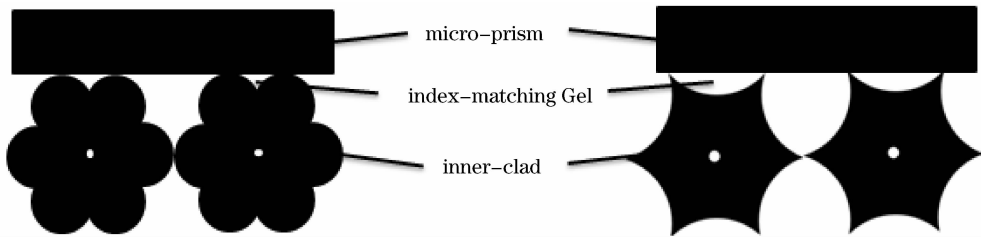


图 4 特殊形状内包层与微棱镜的耦合方式图解。(a) 梅花形; (b) 反梅花形

Fig. 4 Scheme for coupling methods of different shape inner-cladding. (a) quincunx; (b) anti-quincunx

5.5 发散角与耦合效率的相互关系

经计算发现,这种耦合技术对半导体激光器抽运源的光束发散角、以及入射倾角有比较大的容许度,当光束发散角在 6° 以内,或者平行光束以小于 3° 的角度入射时,耦合效率基本不变,当光束发散角超过 24° 时,或者平行光束以超过 12° 的角度入射时,耦合效率才会有较大幅度的下降,如图 5 所示。

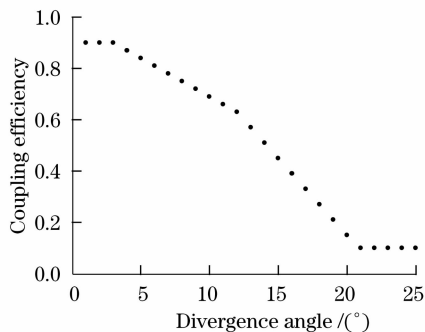


图 5 耦合效率与角度容许度关系

Fig. 5 Scheme for relationship between divergence angle and coupling efficiency

6 结 论

微棱镜反射式侧面耦合技术是一种能有效地将半导体激光器的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,一般的大功率半导体激光器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非常方便地实现半导体激光器阵列和叠层的多点抽运(另文详述),从而将千瓦至万瓦级的大功率抽运光耦合进光纤,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或设备熔接进行信号光处理。微棱镜反射式侧面耦合技术对光纤本身几乎没有损伤,具有结构简单、易于加工、成本低廉适合产业化的特点,是一种较为理想的双包层光纤耦合技术。

参 考 文 献

- 1 L. Goldberg, B. Cole, E. Snitzer. V-groove side-pumped 1.5 μm fibre amplifier[L]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**: 2127 ~ 2129

- 2 F. Hakimi, H. Hakimi. A new side coupling method for double clad fiber amplifiers[C]. *CLEO, USA*, 2001
- 3 J. Q. Xu, J. H. Lu, J. R. Lu *et al.*. Side-pumping of double-clad fiber laser with a non-fusional fiber coupler[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4594**:271~276
- 4 P. Ou, P. Yan, M. L. Gong *et al.*. Multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser[L]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**:285~287
- 5 Ou Pan, Yan Ping, Wei Wenlou *et al.*. Side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1240~1244
欧攀,闫平,韦文楼等.侧面抽运的Yb双色层光纤激光器[J].*光学学报*,2004,**24**(9): 1240~1244
- 6 Jeffrey P. Koplow, Sean W. Moore, Dahv A. V. Kliner. A new method for side pumping of double-clad fiber sources[J]. *IEEE J. Quant Electron*, 2003, **39**:(4)
- 7 Herda R, Liem A, Schnabel B *et al.*. Efficient side-pumping of fibre lasers using binary gold diffraction gratings[L]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(3):276~277
- 8 Zhang Fan, Wang Chuncan, Tong Zhi *et al.*. A new structure of gold diffraction grating for efficient side-coupling of double-clad fiber laser[J].*Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11):1447~1452
- 9 Wang Dazheng, Feng Xiaoming, Wang Yonggang *et al.*. A new technique for side pumping of double-clad fiber lasers[C]. *AOE, China*, 2007:436~438
- 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[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**(12):99~104
- 11 C. W. Zhang, S. Q. Xiang, C. A. Wang. Coupling efficiency analysis for the micro-prism sided-coupling method of double-cladding fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(7):597~600