

文章编号: 0258-7025(2009)03-0718-05

双包层光纤梯形微棱镜侧面耦合技术

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 提出了一种新型的双包层光纤激光器侧面耦合技术——梯形微棱镜侧面耦合技术, 能高效且方便地将激光二极管, 特别是高功率激光二极管阵列抽运光耦合进双包层光纤中。该技术采用一个与双包层光纤内包层折射率相同的材料加工而成的具有特殊角度的梯形棱柱, 其中一个表面镀以特定角度的高反射率光学薄膜, 通过梯形微棱镜该镀膜表面的反射, 将抽运光耦合到内包层中。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%。通过计算对激光二极管抽运源的线宽、发散角以及梯形微棱镜的具体参数进行了分析, 并对该技术的适用范围, 包括激光二极管、尾纤输出的激光二极管、激光二极管阵列、各种形状内包层结构等做了进一步讨论。

关键词 光纤激光器; 侧面耦合; 微棱镜; 双包层; 激光二极管

中图分类号 TN235 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0718

A Side-Pumping Method of Double-Clad Fiber by Trapezoidal 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 We describe a new method for side pumping of double-clad fiber lasers through trapezoidal micro-prism, which can pump the light sources from laser diodes, especially laser diode arrays, into double-clad fibers easily and effectively. We use a unique-designed trapezoidal micro-prism with the same refractive index as the inner cladding of double-clad fiber. The pump light can be coupled into the inner cladding of double-clad fiber via reflection of the coated side of the trapezoidal micro-prism. 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 is first introduced and the theoretical coupling efficiency was given (up to 90%). We analyze the parameters of the trapezoidal micro-prism and the light sources including line width, angle of divergence, etc.. Then we make a further discussion of its applied areas including laser diode, pigtailed laser diode, laser diode arrays, different shape of inner cladding, etc.

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

1 引言

20 世纪 60 年代, E. Snitzer 等^[1]提出了光纤激光器和放大器的概念, 开创了激光家族的一个新的领域。光纤激光器及放大器具有效率高、体积小、寿命长、性能稳定、光束质量好等优点, 在光纤通信、

工业制造、医疗美容、航空航天等领域都有着广泛的应用前景。然而, 由于传统的光纤截面尺寸很小, 不利于抽运光的注入, 这也成为制约光纤激光器和放大器发展的关键问题之一。1988 年 E. Snitzer 等提出双包层光纤^[2]的构想, 有效地解决了这一问

收稿日期: 2008-08-11; 收到修改稿日期: 2008-10-28

作者简介: 王大拯(1981 年), 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 年), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体光电子器件的 MOCVD 外延生长及大功率激光二极管(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

题,从此基于包层抽运技术的光纤激光器和放大器得到了快速的发展。

双包层光纤与常规的光纤不同,它是由掺杂纤芯、内包层、外包层和涂覆层四部分构成。常规光纤的抽运光和激光都在纤芯中传输,而双包层光纤中抽运光在内包层中传输,激光在纤芯中传输。抽运光通过在内包层和外包层界面来回反射,多次穿过纤芯被掺杂离子吸收,实现激光输出或放大。常用的抽运光注入方式主要有两种:端面抽运和侧面抽运。端面抽运方式简便易行,可以非常容易地得到激光输出。然而这种抽运方式有显著的缺点:光纤端面的面积有限,这会制约抽运到光纤中的最大功率,另外,抽运占用光纤端面,就为加载信号光、调制以及与其他光纤设备连接带来很大的不便。侧面抽运的出现有效地解决了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^[3]、角度磨抛耦合技术^[4~6]、嵌入式反射镜耦合技术^[7]、衍射光栅耦合技术^[8]、尾纤侧面粘合技术^[9]以及微棱镜耦合技术^[10,11]等。然而侧面抽运也存在不可避免的问题,例如,V形槽技术和嵌入式反射镜技术工艺复杂,精度要求很高,而且对光纤内包层带来了严重的损害,大大降低了其机械强度等等。

本文中,在借鉴现有的微棱镜侧面耦合技术^[10,11]的基础上,提出了一种双包层光纤激光器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V形槽和嵌入式反射镜耦合方式的缺点,非常适合多点抽

运。另外,该方法还具有对内包层无损伤、抽运效率高、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

梯形微棱镜结构如图1(a)所示,微棱镜是一个采用与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梯形棱柱。其棱长 b 当用作单管抽运时与单管发光区宽度一致(约 $500\ \mu\text{m}$),当用作激光二极管阵列抽运时应与阵列长度一致(约 $11\ \text{mm}$)。 S_5 和 S_6 是全等且相互平行的两个梯形,对应的角度分别为 130° 、 50° 、 10° 和 170° (所有角度参数都可以根据不同的光纤进行略微改变,在此所列角度参数仅供参考)。 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 是矩形。其中, S_1 面与 S_3 面相互平行, S_1 面是抽运光的入射面, S_2 面蒸镀对抽运光角度为 50° 的高反射率光学薄膜。 S_3 面与剥除一小段外包层的双包层光纤的内包层紧密贴在一起(双包层光纤的外包层通常为有机材料,采用化学腐蚀可以方便地将外包层去除),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。从激光二极管出来的激光经过快轴压缩(放置光纤柱透镜),垂直于 S_1 面入射梯形微棱镜,经过 S_2 面全反射进入双包层光纤的内包层。在满足布鲁斯特角的情况下,光线将不会进入外包层,而会继续在内包层中传输,为光纤提供抽运。

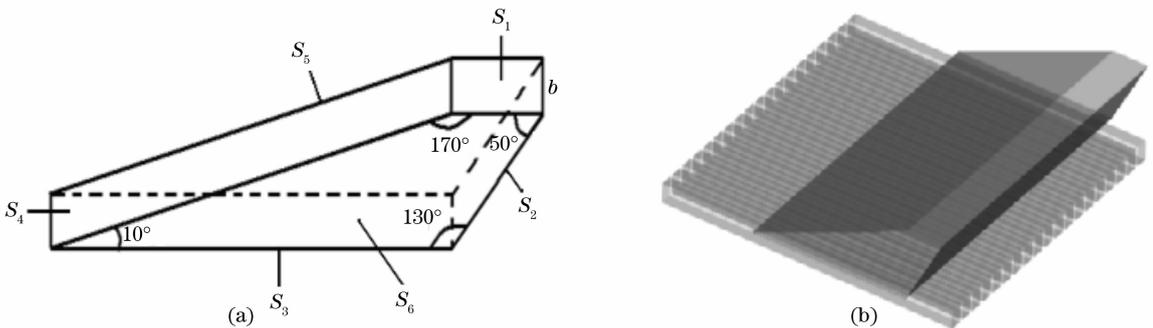


图1 梯形微棱镜示意图。(a)微棱镜结构;(b)微棱镜与光纤紧贴

Fig. 1 Scheme of trapezoidal 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,选择以双包层光纤的内包层横截面为正方形为例(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,

其原理和方法与此处叙述一致),其折射率 $n_1 = 1.45$,数值孔径 $NA = 0.5$,外包层折射率 $n_o = 1.36$ 。因此,其临界全反射角:

$$\varphi_b = \arccos(0.5/1.45) = 70^\circ \quad (1)$$

2.1 理想的平行光入射情况

首先考虑最简单的平行光入射时的情况,如图2所示, S_1 面宽度为 a , S_2 面与双包层光纤的夹角为 α ,与 S_1 面宽度相同平行光垂直于 S_1 面入射,此时该光束的两条边缘光线 l_1 、 l_2 分别在 S_2 面两端反射进入双包层光纤。

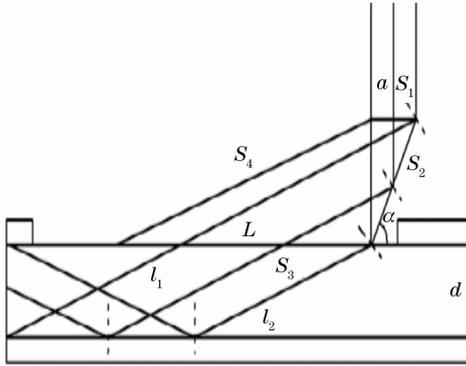


图2 平行光入射时梯形微棱镜耦合方法图解

Fig. 2 Scheme of side-pumping method with trapezoidal micro-prism when pumped with parallel light

先来考察 α 角, α 的大小直接关系到抽运光进入光纤后能否在内包层中进行全反射,因此必须满足1)经 S_2 面反射后的光线能够进入光纤中,2)进入到光纤中的光线在光纤下部的入射角大于 φ_b ,因此需要满足 $45^\circ < \alpha$,且 $180^\circ - 2\alpha > \varphi_b$,即有 $45^\circ < \alpha < 90^\circ - \varphi_b/2$ 。

对根据(1)式,有

$$45^\circ < \alpha < 55^\circ. \quad (2)$$

其次,梯形的下底边长 L 需要权衡: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_2 面反射的光线又再次经过 S_4 面反射进入,因不满足光纤内包层全反射条件而直接透射。

边缘光线 l_1 与光纤的上部的交点到 α 角顶点的距离 X_{\min} 与光束宽度 a 和角 α 有如下关系:

$$(a/\cos \alpha)/\sin(2\alpha - 90^\circ) = X_{\min}/\sin(90^\circ - \alpha),$$

即

$$\begin{aligned} X_{\min} &= a\sin(90^\circ - \alpha)/\cos \alpha \sin(2\alpha - 90^\circ) \\ &= a/\sin(2\alpha - 90^\circ). \end{aligned} \quad (3)$$

边缘光线 l_2 经光纤下部反射后与光纤上部的交点到 α 角顶点的距离 X_{\max} 与光纤宽度 d 和角 α 有如下关系:

$$X_{\max} = 2d/\tan(2\alpha - 90^\circ), \quad (4)$$

因为需要满足条件 $X_{\min} < L < X_{\max}$,即

$$a/\sin(2\alpha - 90^\circ) < L < 2d/\tan(2\alpha - 90^\circ). \quad (5)$$

显然需要 $a/\sin(2\alpha - 90^\circ) < 2d/\tan(2\alpha - 90^\circ)$,即 $a < 2d\cos(2\alpha - 90^\circ)$ 成立。

以现有的光线参数为例, $d = 400 \mu\text{m}$, $\alpha = 50^\circ$,则有 $a < 788 \mu\text{m}$,为了使尽可能多的平行光耦合进光纤,因此由(5)式或得 $L \approx 4.537 \text{ mm}$ 。

2.2 发散光入射情况

如果入射光束为发散光,如图3所示,假设光源 S 的发散角为 2ψ , S_2 面与双包层光纤的夹角为 α ,这样非垂直入射 S_1 面的光线将在 S_1 面发生折射,随后在 S_2 面发生反射进入光纤。做光源关于 S_2 面的镜像,这样进入光纤中的光可以认为是由 S' 发出,在 S'_1 面入射的。

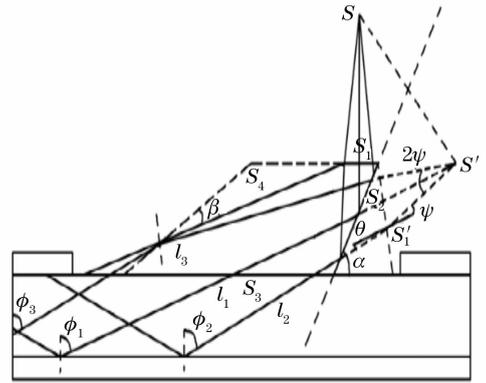


图3 发散光入射时梯形微棱镜耦合方法图解

Fig. 3 Scheme of side-pumping method with trapezoidal micro-prism when pumped with diverging light

在这个系统中有三条光线需要考虑,其中 l_1 为垂直于 S'_1 面入射的光线,这条光线进入微棱镜后不改变方向地入射到光纤中,并在光纤下部全反射,需要满足全反射条件 $\varphi_1 > \varphi_b$,

$$\varphi_1 = 90^\circ - [\alpha - (90^\circ - \alpha)] = 180^\circ - 2\alpha, \quad (6)$$

即有 $180^\circ - 2\alpha > 70^\circ$,计算得 $\alpha < 55^\circ$,所以对于垂直入射 S'_1 面的光线,需要满足 $45^\circ < \alpha < 55^\circ$ 。

对于非垂直入射 S'_1 面的光线,我们考虑两条边缘光线 l_2 、 l_3 ,这两条光线由空气进入微棱镜,折射角 θ 满足条件 $\sin \psi = n\sin \theta$,即 $\theta = \arcsin(\sin \psi/n)$,下方光线 l_2 在光纤下部的入射角为 φ_2 :

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \theta = 180^\circ - 2\alpha - \theta, \quad (7)$$

要使 l_2 满足全反射条件,则需要 $\varphi_2 > \varphi_b$,即 $D = 125 \mu\text{m}$ 。

对于上方的光线 l_3 ,在进入 S'_1 面后,会被 S_4 面反射,再进入光纤。设 S_4 面与光线 l_1 的夹角为 β ,则 l_3 在光纤下部的入射角

$$\varphi_3 = \varphi_1 + \theta - 2\theta - 2\beta = 180^\circ - 2\alpha - \theta - 2\beta. \quad (8)$$

满足全反射条件时要求 $\varphi_3 > \varphi_b$, 即 $180^\circ - 2\alpha - \theta - 2\beta > \varphi_b$ 。为了尽可能提高耦合系统效率, 可以使 $\beta = 0^\circ$, 即使 S_4 面与 S'_1 面垂直, 这样一来

$$\varphi_3 = \varphi_1 + \theta - 2\theta = \varphi_1 - \theta = \varphi_2, \quad (9)$$

可以看出, l_1 上方凡是被 S_4 面反射的光线都会在 l_1 下方找到一条与之平行的光线, 这两条光线在光纤下部的入射角相同。这样一来, 问题得到简化, 由于 $\varphi_3 = \varphi_2 < \varphi_1$, 因此只需要满足条件

$$180^\circ - 2\alpha - \arcsin(\sin \psi/n) > \varphi_b, \quad (10)$$

所有的光线将全部可以耦合进光纤中, 可以看出对于选定折射率的光纤, 可以通过优化 α 角来从一定程度上解决发散光入射的问题。以文中所举参数为例, $n_1 = 1.45$, $\alpha = 50^\circ$, $\varphi_b = 70^\circ$, 则 $\psi < 15^\circ$, 即发散角 $2\psi < 30^\circ$ 的光束都可以满足条件。

对于汇聚光入射的情况, 依然可以采用 2.2 节的镜像光源的模型和方法, 在此不再展开讨论。

2.1 和 2.2 节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 3%。在光束第一次垂直入射光纤时, 有 4% 的非涅耳反射, 在 S_2 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。

根据以上理论进行了初步实验, 采用 40 W 的 808 nm 半导体激光器阵列作为抽运源, 长度为 20 cm 的圆形内包层双包层光纤, $n = 1.4496$, $NA = 0.46$, $d = 400 \mu\text{m}$, 在抽运功率为 35 W 时得到了近 18 W 的激光输出, 效率超过了 50%, 鉴于所用几种材料折射率不十分匹配、梯形微棱镜光洁度仅为 4 级、镀膜质量不高、圆形内包层不宜被匹配胶填充从而导致耦合效率下降等原因, 如果改善实验条件, 耦合效率将会进一步提高。

3 分析与讨论

3.1 不带尾纤的激光二极管

本技术最适用于不带尾纤的半导体激光二极管, 这样的泵源在快轴方向和慢轴方向的光束宽度和发散角不相同, 远场光斑呈椭圆形, 根据文献 [9], 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_3 和 S_4 面的夹角 γ 、光纤的直径 d 、棱镜的折射率 n

决定, 为

$$d \times \arcsin[n \sin(90^\circ - \varphi_b - \gamma)] \quad (11)$$

若 $d = 400 \mu\text{m}$, $\theta = 40^\circ$, $\varphi_b = 70^\circ$, $\gamma = 2\alpha - 90^\circ = 10^\circ$, $n = 1.45$, 要求

$$\delta_{x,y} \times \omega_{x,y} < 400 \times \arcsin[1.45 \times \sin(90^\circ - 70^\circ - 10^\circ)] \\ = 5833 (\mu\text{m} \cdot \text{deg}). \quad (12)$$

通过光束整形, 可以得到快轴方向发散角小于 0.2° , 慢轴发散角小于 1° 的较高质量光束, 完全满足对光束质量的要求, 因此可以确保该系统具有很高的耦合效率。

3.2 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。对于 $D = 125 \mu\text{m}$ 的尾纤, 对其数值孔径的要求 $NA < 0.73$, 对于 $D = 200 \mu\text{m}$ 的尾纤, 对其数值孔径的要求 $NA < 0.49$, 一般的尾纤都完全可以满足要求。

3.3 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, 用折射率匹配胶与梯形微棱镜粘合固定。将激光二极管阵列条光束压缩后, 使发光单元和光纤一一对应。光束垂直入射棱镜 S_1 面, 经棱镜的 S_2 面反射进入到光纤中, 从而可以达到单阵列, 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。

3.4 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, 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。

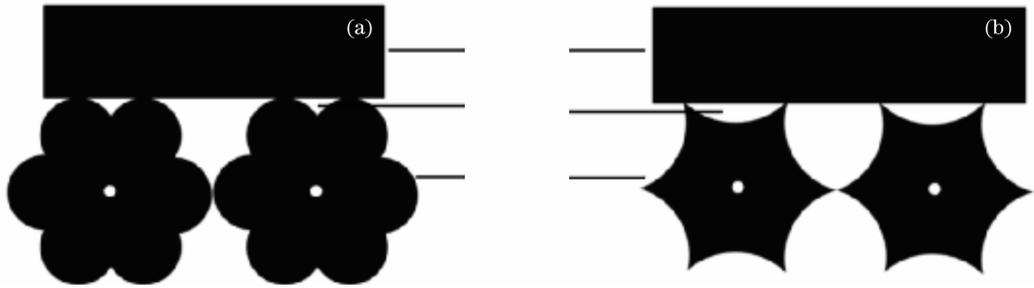


图4 特殊形状内包层与微棱镜的耦合方式图解。(a)梅花形；(b)反梅花形

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

3.5 发散角与耦合效率的相互关系

经计算发现,这种耦合技术对激光二极管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 30° 以内,或者平行光束以小于 15° 的角度入射时,耦合效率变化不大,当光束发散角超过 30° 时,或者平行光束以超过 15° 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。

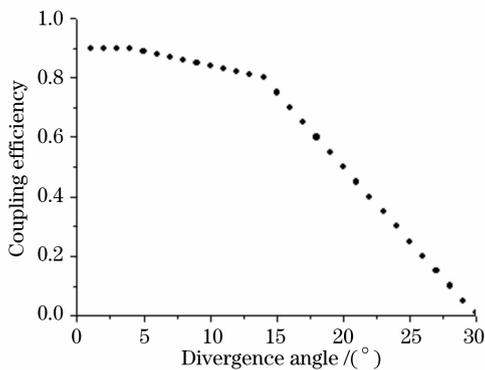


图5 耦合效率与角度容许度关系

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

4 结 论

梯形微棱镜侧面耦合技术能够有效地将激光二极管的抽运光耦合进双包层光纤,在理论上具有高达90%的耦合效率。它对泵源光束质量要求很低,发散角在 30° 以内的光束都可以高效耦合,普通激光二极管经光束压缩后都能满足需要。它非常适合于大功率激光器及其阵列的多点抽运,可以将万瓦

级的大功率抽运光耦合进光纤,实现光纤激光器及放大器的大功率输出。另外,这种耦合方式对光纤本身没有损伤、结构简单紧凑、成本低廉、易于加工,非常适合产业化生产,具有可观的商业化前景。

参 考 文 献

- 1 E. Snitzer. Optical maser action of Nd^{3+} in a barium grown glass [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, **7**(12): 444~446
 - 2 E. Snitzer, P. H. Hakimi, F. Tumminelli *et al.*. Double-clad offset core Nd fiber laser[C]. *Digest of Conference on Optical Fibre Sensors*, Washington DC: Optical Society of America, 1988, Postdeadline paper PD5
 - 3 L. Goldberg, B. Cole, E. Snitzer. V-groove side-pumped 1.5 μm fibre amplifier[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**: 2127~2129
 - 4 F. Hakimi, H. Hakimi. A new side coupling method for double clad fiber amplifiers[C]. *CLEO, USA*, 2001
 - 5 J. Q. Xu, J. H. Lu, J. R. Lu, K. Ueda. Side-pumping of double-clad fiber laser with a non-fusional fiber coupler[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4594**: 271~276
 - 6 P. Ou, P. Yan, M. L. Gong, W. L. Wei. Multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**: 285~287
 - 7 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)
 - 8 Herda R, Liem A, Schnabel B *et al.*. Efficient side-pumping of fibre lasers using binary gold diffraction gratings[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(3): 276~277
 - 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 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合法的耦合效率分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 597~600