Laser & Optoelectronics Progress

# 高功率光纤激光器抽运耦合技术的现状和发展

# 李 杰 陈子伦 周 航 郭少锋 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要 抽运耦合技术是实现高功率光纤激光输出的关键技术之一。对国内外双包层光纤激光器所采用的各种端面抽运耦合技术和侧面抽运耦合技术进行了详细的介绍,并比较了各自的优缺点。分析表明,熔融拉锥光纤束端面抽运和 GTWave 侧面抽运方式更有利于实现高功率光纤激光输出。

关键词 激光器;高功率光纤激光器;抽运耦合技术;双包层光纤

中图分类号 O436 文献标识码 A **doi**: 10.3788/LOP49.020003

# Status and Development of Pumping Technology for High Power Fiber Lasers

Li Jie Chen Zilun Zhou Hang Guo Shaofeng Xu Xiaojun

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Pumping technology is a key factor to realize high power fiber laser. Various end-pumping technologies and side-pumping technologies, which are adopted in double-clad fiber laser at home and abroad, are introduced in detail. The advantages and disadvantages of these technologies are compared. The analysis shows that taper-fused bundle end—pumping and GTWave side-pumping are more propitious to achieve high power fiber laser.

Key words lasers; high power fiber laser; pumping technology; double-clad fiber

**OCIS codes** 140.3460; 140.3510; 140.5560; 060.2310; 060.3510

## 1 引 言

同一般的激光器相比,光纤激光器在光束质量、体积、质量、效率、散热等方面均具有明显优势[1~3],现已广泛应用于光纤通信、激光空间远距通信、工业造船、汽车制造、激光切割、金属焊接、军事国防安全、生物医疗、大型基础建设等民用工业和军事领域[4],已成为世界各国研究的热点之一。光纤激光器和放大器的构想是 Snitzer<sup>[5]</sup>在 1961 年所提出的,但由于光纤拉制工艺、光纤损耗、半导体激光器技术等方面的限制,在其后的 20 多年里光纤激光器没有得到很好的发展。1987 年,英国的南安普顿大学及美国的贝尔实验室用掺铒单模光纤实现光通信中的光放大,以此证明了掺铒光纤放大器(EDFA)的可行性[6·7]。由于当时使用的是单模光纤(SMF),无法实现高功率输出。1988 年,Snitzer 等[8]提出抽运光由包层进入的思想,以提高抽运耦合效率。但初期设想的圆形内包层因为完美的对称性导致抽运光的吸收效率低。直到 1993 年,矩形内包层的双包层光纤出现,大大提高了输出功率和效率。此后,正方形、D形、梅花形等形状的内包层也相继出现,实验表明,这些内包层形状的光纤相对于圆形内包层形状在抽运光吸收效率上有了很大提高。1994 年,Pask等[9]首先在掺镱石英光纤中实现了包层抽运技术,实验中得到了波长为 1042 nm,功率 0.5 W 的最大激光输出,斜率效率达到 80%。正是由于掺 Yb³+双包层光纤激光器具有更高的斜率效率,以及 Yb³+ 所具有的简单的能级结构、宽的吸收带和较宽的发射截面,使得人们的注意力逐渐转向掺 Yb³+ 双包层光纤激光

收稿日期: 2011-07-07; 收到修改稿日期: 2011-08-20; 网络出版日期: 2011-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(61007037)资助课题。

作者简介: 李 杰(1986—),女,博士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: lijie456525@163.com

**导师简介:** 许晓军(1973—),男,研究员,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: xu\_xiaojun@126.com

(通信联系人)

器的研究。此后,光纤激光器得到了迅猛发展,输出功率不断飙升,目前,国内外多家机构都实现了单根光纤 千瓦量级的输出功率。2004 年,南安普敦大学的 Jeong 等[10]采用双端抽运方式实现了连续激光输出功率为 1. 36 kW的掺镱大芯径(40  $\mu$ m)单模光纤激光器。IPG 公司在 2006 年报道了单模连续激光输出 3 kW 的掺 镱光纤(YDF)激光器[11];2009 年 6 月,IPG 公司宣布实现输出功率达 10 kW 的连续单模光纤激光器[12]。2006 年,中国电子科技集团公司第十一研究所利用双端抽运,实现了大芯径掺镱双包层光纤激光器超过 1. 2 kW的输出功率[13];中国科学院上海光学精密机械研究所采用国产大芯径双包层光纤,利用双端抽运获得 1. 75 kW 的连续激光输出,斜率效率为 76 %[14];2010 年,中国兵器装备研究院通过自制的 7×1 熔融拉锥 耦合器实现了超过 3 kW 的大功率光纤激光合成功率的输出[15]。

仔细分析高功率光纤激光器的发展,我们发现,要想获得更高的输出功率,光纤激光器需要突破的关键技术主要有有源光纤的设计及拉制工艺和高效抽运耦合技术等。现在大功率光纤激光器、光纤放大器主要采用的是双包层掺杂光纤,与半导体抽运激光器发出的多模抽运光束的发散角相比,其内包层直径很小,因此如何把抽运光高效地耦合到双包层光纤的内包层是获得高功率光纤激光输出的核心技术。

抽运耦合技术目前大致可分为端面抽运耦合技术和侧面抽运耦合技术。端面抽运耦合技术是从双包层光纤的一个或者两个端面将抽运光耦合到双包层光纤的内包层,常用的方式主要包括透镜端面耦合、光纤端面熔接耦合、熔融拉锥光纤束耦合等。侧面抽运耦合技术是从双包层光纤的侧面将抽运光耦合到内包层,它不占用光纤的两端,使抽运光在光纤中的分布更趋均匀,方便信号光输入输出、光纤熔接、信号测量等操作。典型的侧面抽运技术包括 V 型槽法、嵌入反射镜法、角度磨抛法、衍射光栅抽运耦合和 GTWave 技术等。

本文对各种抽运耦合技术进行详细介绍,根据抽运技术的评价标准,对这些抽运方式进行优缺点的比较,重点分析比较了熔融拉锥光纤束耦合和 GTWave 技术,为进一步改进光纤激光器抽运耦合技术提供参考。

### 2 端面抽运

### 2.1 透镜端面耦合

透镜端面耦合是将抽运光通过准直聚焦透镜组耦合到双包层光纤的内包层 $^{[10,16\sim21]}$ ,如图 1 所示。光纤两个切割端面与光纤轴垂直并且无涂覆,激光谐振腔由光纤一端对抽运光高透(HT)、对信号光高反(HR)的双色片和光纤的另一端面构成,该端面有 4%的反射率。信号光与抽运光的分离通过另一个双色片来实现。2009 年,Jeong 等 $^{[21]}$ 使用双端透镜抽运实现了单根光纤超过 2.1 kW 的激光输出,斜率效率达到 74%,光束质量因子  $M^2=1$ .2。这种方式通过空间耦合器件来实现抽运光的耦合,需要非常精确的调节,系统稳定性不高,扩展能力差。

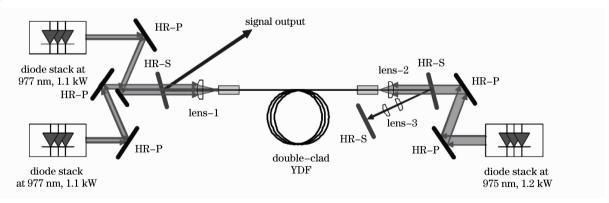


图 1 透镜端面抽运耦合技术示意图

Fig. 1 Sketch map of lens end-pumping technology

#### 2.2 光纤端面熔接耦合

光纤端面熔接抽运耦合如图 2 所示,它是将一个对抽运光高透、对激光波长高反的光纤光栅分别与双包层光纤一端和大功率激光二极管(LD)的输出尾纤相熔接,此光纤光栅与双包层光纤另一个端面构成全光纤

激光器谐振腔[<sup>22~25]</sup>。2009 年,Feng 等<sup>[25]</sup>用此方法实现了 153 W 的激光输出,斜率效率为 85%。这种方式 简单,但是扩展能力较差。

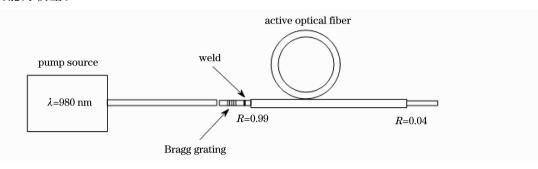


图 2 光纤端面熔接抽运耦合示意图

Fig. 2 Sketch map of fiber end fusion pumping technology

#### 2.3 熔融拉锥光纤束耦合

熔融拉锥光纤束(TFB)耦合示意图如图 3 所示,它是 将一束光纤剥去涂覆层,然后缠绕在一起,在高温中加热 使之熔化,同时向光纤两端拉伸光纤束,光纤熔融区成为 锥形过渡段。从锥腰切断后,将锥区输出端与双包层光 纤熔接 $[26\sim30]$ 。如果这一束光纤都是抽运光纤,则构成 N×1 抽运合束器;若是一束抽运光纤对称排列在一根信 号光纤周围熔融拉锥,则构成 $(N+1)\times 1$  耦合器。



图 3 熔融拉锥光纤束端面抽运耦合示意图 Fig. 3 Sketch map of taper-fused fiber bundles end-pumping technology

熔融拉锥光纤合束器的优点是能够将多束抽运光高效地耦合到一根光纤。但是在光纤合束器的设计和 制作过程中,为了得到较低的损耗,必须满足

$$\sqrt{N}D_{i}NA_{i} \leqslant D_{o}NA_{o}, \tag{1}$$

式中 N 为光纤合束器中的光纤数目; $D_i$ , $NA_i$  分别为输入光纤的直径和最大数值孔径; $D_o$ , $NA_o$  分别为输出 光纤的直径和数值孔径。

为了减少光纤束中光纤之间的空隙,光纤束要紧密排列在一起,熔锥后横截面为圆形,这样熔锥光纤束 能够与输出光纤很好地熔接。而且如果是(N+1)×1 合東器,则一定要求抽运光纤围绕着中心的信号光纤 对称排列。

目前输出功率超过千瓦量级的光纤激光器大多采用这种方式。2007年,加拿大 ITF 实验室论证了熔融 拉锥合束器可以承受千瓦量级的输出功率,如图 4 所示[31~33]。2006 年,IPG 公司基于 TFB 方式实现了 3 kW的功率输出[11]。2010年,中国兵器装备研究院采用7路光纤熔融拉锥,实现了3434 W的激光合成输 出,其效率为81.7%,拉锥耦合器单臂最大可承受功率达633 W[15]。

清华大学研究人员在此方式的基础上提出分布式包层抽运技术,如图 5 所示[34~36]。它包括一个激光振 荡级和两个放大级。激光振荡级包括增益光纤、一个 7×1 合束器和一对光纤布拉格光栅(FBG)。放大级包

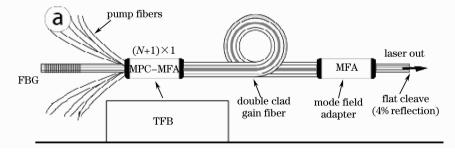


图 4 由熔锥光纤合束器构成的光纤激光器示意图

Fig. 4 Sketch map of a fiber laser with taper-fused fiber combiner

括增益光纤和一个 $(6+1)\times1$  合東器,不同的级之间以串联方式熔接起来。抽运光通过合東器进入增益光纤。为了避免抽运光泄漏,增益光纤应该足够长,以有效吸收抽运光<sup>[35]</sup>。这种抽运方式制作简单,效率高,易于实现全光纤化,降低了对抽运源的高亮度要求,很容易通过串联实现功率扩展,并且,随着功率的提高,光束质量没有明显下降。2011 年,他们用此方式实现了 1.1 kW 的激光输出功率,其光-光转换效率为66.5%<sup>[35]</sup>。但是,如何降低熔接处的附加损耗,解决包层中的传输功率泄漏问题,高效、低损耗定向耦合器的封装问题等亟待突破。

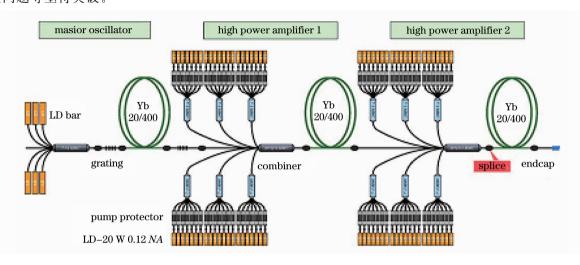


图 5 分布式包层抽运示意图

Fig. 5 Sketch map of distributed cladding pumping technology

IPG 公司在 TFB 方法的基础上已经成功得到 50 kW的多模输出,采用的方法是通过光纤合束器将多个单模(SM)光纤激光器合并输出,其输出光纤直径为 200  $\mu$ m,如图 6 所示。这是目前得到的功率最高的多模激光输出,但是其光束质量非常差, $M^2=30^{[37]}$ 。合束器本身限制了功率的进一步提升。因为所有单模光纤激光器的功率全部集中在合束器上,即使很小的缺陷也会导致较大的功率损失,从而在体积相对较小的光纤上产生严重的热负荷。因此降低合束器损耗和热管理对高功率多模光纤激光器的设计至关重要。

#### 2.4 大芯径光纤端面耦合

在 $(N+1)\times 1$  合東器中,中间的信号光纤是单模光纤,纤芯模场直径最大为 9  $\mu$ m。在此基础上,ITF 提出了一种大芯径光纤端面耦合方法[38,39],如图 7 所示。其中信号光纤是一根能够支持少数模式的光纤(FMF),其纤芯模场直径一般为 30~50  $\mu$ m。抽运光纤对称地排列在信号光纤周围,将所有光纤的涂覆层剥除后在高温中加热熔融,再与一根大芯径双包层光纤(LACDCF)熔接,其纤芯模场直径一般为 50  $\mu$ m。在加热过程中,信号光纤纤芯中掺杂离子会扩散到内包层中,从而增加纤芯的大小和模式。当信号光纤纤芯的模场直径与即将要熔接的双包层光纤纤芯的模场直径相等时,停止加热。此时信号光纤与 LACDCF 的模式匹配,能够保证单模传输

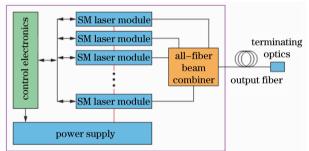


图 6 高功率多模激光器结构图

Fig. 6 High-power multimode laser configuration

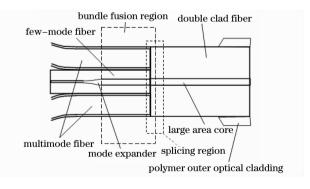


图 7 大芯径光纤端面耦合示意图

Fig. 7 Sketch map of large core fiber end-pumping technology

时信号光纤与 LACDCF 的模式匹配,能够保证单模传输。最后将光纤熔融束与 LACDCF 相熔接。需要注意的是,多模光纤在熔接前要先拉锥,这样才能与 LACDCF 实现直径匹配。并且在拉锥多模光纤时,不应超

(2)

过最大拉锥比率R,

$$R=
ho_{\scriptscriptstyle 0}/
ho_{\scriptscriptstyle \mathrm{i}}=NA_{\scriptscriptstyle \mathrm{MM}}/NA_{\scriptscriptstyle \mathrm{DCF}}$$
 ,

式中 $\rho_0$  是多模光纤拉锥后的直径, $\rho_i$  是多模光纤的初始直径, $NA_{MM}$  是多模光纤的数值孔径, $NA_{DCF}$  是 LACDCF 内包层的数值孔径。这种方式需要通过近场测量装置对 LACDCF 入射端进行监测,使得信号光纤和 LACDCF 纤芯精确对准。

### 3 侧面抽运

#### 3.1 V型槽法

V形槽基本结构如图 8 所示[40~44]。首先,剥除一段双包层光纤的涂覆层,通过机械技术在裸露的内包层上刻蚀一个 V形槽,槽的表面光学平滑,槽的深度不伤及纤芯。抽运光经微透镜聚焦于 V形槽一侧面并反射进入双包层光纤内包层进行抽运。该方法有很好的功率扩展能力,Cheng等[45]采用盘形光纤激光器(图 9),用 10 个 LD 抽运,最终获得 240 W 的功率输出。2004 年,Snell[43]使用改进的 V 形槽法获得了超过 1 kW 的激光输出。由于 V 型槽对内包层造成损伤,会影响到抽运光的传输,多点抽运会增加抽运光的损耗,在高功率情况下,功率提升能力有限。另外,此方法的耦合效率对 V 型槽、微透镜和 LD 之间的相对位置非常敏感,对调整精度的要求很高。

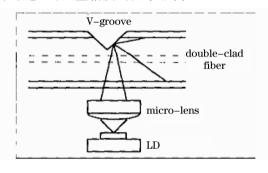


图 8 V 形槽侧面抽运耦合示意图
Fig. 8 Sketch map of V-groove side-pumping technology

### 3.2 嵌入反射镜侧面抽运耦合

嵌入反射镜侧面抽运耦合方式是在 V 型槽刻蚀方式上的改进,其原理如图 10 所示[46]。首先剥除一段双包层光纤的外包层,然后在内包层上刻蚀出一个凹槽,凹槽可以是任意合适的形状,只要它能够提供足够大的角度接收抽运光入射进内包层。凹槽的大小要能够容纳反射镜,还要保证不会破坏纤芯。反射镜是一个等腰直角三角体,但其斜边是一个镀有高反射膜的凸面作为反射面,反射面设计成一定的曲率来减小抽运光的发散;为了减小抽运光的反馈,镜上的入射面镀了一层增透膜。反射镜通过光学环氧胶在与光纤内包层粘接固定,同时也作为折射率匹配介质用来降低界面的反射损耗。

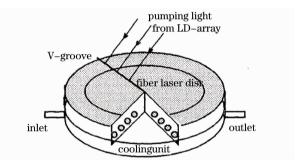


图 9 基于 V 形槽结构的 LD 阵列侧面 抽运盘形光纤激光器示意图

Fig. 9 Basic design of LD-array side-pumped disk fiber lasers in V-groove configuration

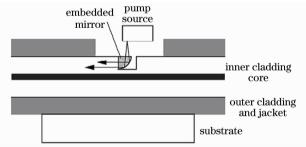


图 10 嵌入镜片耦合法示意图 Fig. 10 Sketch map of embedded mirror side-pumping technology

Koplow 等<sup>[46]</sup>利用此方式获得了 5.2 W(1064 nm)和 2.6 W(1550 nm)的光纤激光输出,最大耦合效率 约为 80%。这种方式可扩展性较强,适用于 LD 阵列,将光纤盘绕或并排,同时在光纤上刻蚀凹槽,再将反射 镜放置在凹槽阵列上。该方案不需要精确对准,减小了对准失调带来的耦合损耗,光学胶的使用不需要凹槽 表面光学平滑。但这种方式对光纤内包层带来损伤,此外光学胶的耐热问题依旧存在。

### 3.3 角度磨抛侧面抽运耦合

角度磨抛侧面抽运耦合方式如图 11 所示,将多模光纤一端按一定角度  $\alpha$  磨抛,通过折射率匹配液将其与剥去涂覆层的双包层光纤内包层平面紧密贴合并用折射率相近的光学胶固定。抽运光从多模光纤直接耦合进入双包层光纤内包层,并抽运掺杂的纤芯。磨抛角度  $\alpha$  对抽运耦合效率有较大的影响,若  $\alpha$  太大,抽运光进入双包层光纤内包层后不满足全内反射的条件,导致耦合效率降低;若  $\alpha$  太小,抽运光纤和双包层光纤内包层的接触面积过大,也会降低耦合效率。通常  $\alpha$  约为  $10^{\circ [47\sim 50]}$ 。

2003 年,清华大学研究人员利用三根多模抽运光纤角度磨抛侧面耦合的方法获得了 1.38 W 的功率输出,实现了多点抽运耦合 [50]。2011 年,他们利用  $7\times1$  合束器将抽运光注入到传能光纤,再用角度磨抛方法侧面抽运双包层光纤,最终得到了 102.5 W 的功率输出,斜率效率为  $77.1\%^{[51]}$ ,如图 12 所示。这种方法的优点是可以获得高的耦合效率,已有报道的最高耦合效率达到  $90\%^{[49]}$ 。不过这种方式依然会对光纤内包层造成损伤,并且同样由于光学胶的耐热问题,功率提升受到限制。

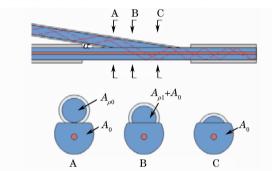


图 11 角度磨拋侧面抽运示意图 Fig. 11 Sketch map of angle-polished side-pumping technology

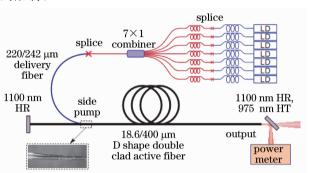


图 12 角度磨拋侧面抽运耦合结构激光器示意图 Fig. 12 Schematic of the laser with fused angle-polished side-pumping configuration

### 3.4 衍射光栅侧面抽运耦合

衍射光栅侧面抽运耦合是抽运光通过双包层光纤内包层表面附加反射型或透射型衍射光栅的衍射作用 耦合入光纤内包层,其结构如图 13 所示<sup>[52]</sup>。将光栅用折射率匹配光学胶固定在光纤内包层上,抽运光从光 纤另一侧入射,其十1 阶和一l 阶衍射光进入内包层中传输。十1 阶和一1 阶衍射光在内包层中必须满足全 反射条件,因此要适当选取光栅的折射率、条纹深度和宽度。

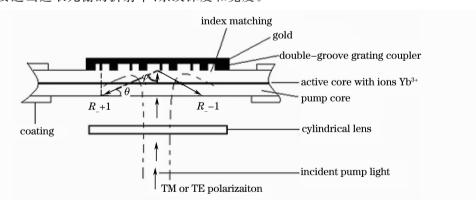


图 13 衍射光栅侧面抽运耦合示意图

Fig. 13 Sketch map of diffraction grating side-pumping technology

2003年,Herda等[52]利用两个光栅侧面抽运得到了 1.2 W 的激光输出,耦合效率为 57%[52]。Zhang 等[53]对此结构提出了改进,在双包层光纤表面以一定周期镀上一定厚度的金薄膜,并在其上覆盖一层二氧化硅薄膜。因为二氧化硅的折射率与光纤的内包层折射率接近,这样就构成了一个对称的介质-金属-介质的夹层结构。在光纤内包层的另一侧镀上高反膜,使得零级衍射光在光栅的作用下二次衍射,大大提高了抽运耦合效率。此后,他们又提出了双光栅侧面耦合方式,这种方式包括一个金属反射光栅和一个介质透射光

栅,这两个光栅分别位于双包层光纤的上下表面。经理论分析,双光栅侧面抽运方式最大的抽运耦合效率可达  $94.2\%^{[54,55]}$ 。衍射光栅侧面抽运方法可扩展性强,耦合效率高。这种方法虽然不会对双包层光纤造成损伤,但对光栅的制作工艺要求较高。

### 3.5 GTWave 抽运技术

GTWave 技术是由南安普顿 ORC 实验室所提出的<sup>[56,57]</sup>。这种方法是由一根掺杂信号光纤和至少一根多模抽运光纤彼此光学接触组成,并且由同一种低折射率聚合物包层所涂覆,如图 14 所示。GTWave 是一种独特的抽运耦合结构,与 TFB 抽运方式不同的是,抽运光沿着光纤轴向逐渐耦合到信号光纤<sup>[56~61]</sup>。这种方式需要一定的长度实现抽运光的耦合,但不需要光纤外径很大或者数值孔径足够高。这种结构是沿光纤长度的侧面耦合而不是单点耦合,没有发生光纤损伤或形变,提高了抽运吸收效率,可以实现很高的功率控制。此外,这种方法不需要为了提高耦合效率而设计特殊的几何排布来防止抽运光通过抽运光纤泄漏,降低了多余的抽运损耗。

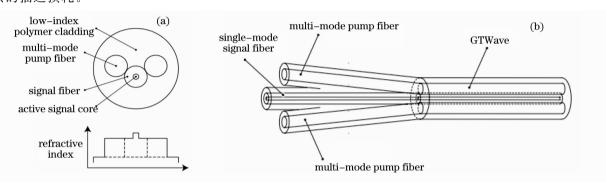


图 14 (a) GTWave 横截面排列和折射率分布示意图; (b) GTWave 侧面示意图 Fig. 14 (a) Cross-section and refractive index profile of GTWave; (b) side view of GTWave

GTWave 的制作过程比较复杂,如图 15 所示。先准备一束光纤预制棒,将这些预制棒以一定的排列方式固定在光纤拉丝塔上,以一定的拉伸速度和拉力同时拉伸这束光纤预制棒,其拉伸速度和拉力大小要能够使得两根相邻光纤互相接触,使光能穿透到相邻光纤中。虽然目前单根光纤拉制技术很成熟,但是多根光纤的同时拉制对光纤拉制工艺及控制条件提出了一定的挑战。

GTWave 有多根抽运光纤作为抽运注入源,可以提高功率,同时,它还有一根信号输出端可以自由地熔接,因此可以将多个 GTWave 进行级联,构成主振荡功率放大(MOPA)结构。这种方式也可以有效地提升功率,已经商品化。目前 SPI 公司的 CW/M 产品已经可以实现

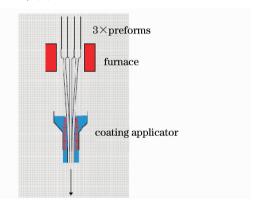


图 15 GTWave 制作方法示意图 Fig. 15 Fabrication scheme of GTWave

超过 400 W 的连续激光输出,实验室功率输出则已超过  $500 \text{ W}^{[62]}$ ; redEnergy<sup>TM</sup>产品脉冲输出能量为 0.8 mJ,峰值功率超过 15 kW,重复速率为  $25 \text{ kHz}^{[63,64]}$ 。

IPG公司宣布已经成功获得 10 kW 的单根单模光纤激光输出,其结构如图 16 所示<sup>[37]</sup>。它采用了 MOPA 结构,在 1070 nm 波长处获得近衍射极限的激光输出<sup>[65]</sup>。在放大级,抽运光通过单模-多模合束器将一束波长为 1018 nm 的单模激光合束并由一根多模光纤输出,然后通过侧面抽运方式,将多模光纤中的抽运光沿着光纤方向逐渐耦合到掺镱光纤中,如图 17 所示<sup>[59~61]</sup>。这说明,IPG公司的 10 kW 光纤激光器采用了 GTWave 抽运技术。

# 4 不同抽运耦合方式的性能比较

评价抽运耦合方式的标准主要包括耦合效率、系统稳定性、结构紧凑度、复杂度、可扩展性等因素。其中耦

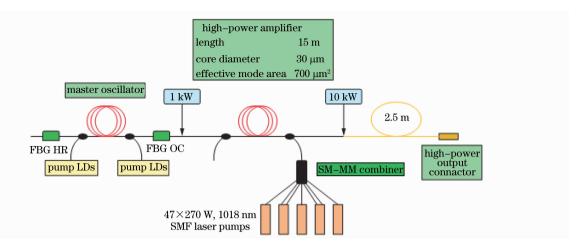


图 16 10 kW 单模光纤激光器结构示意图

Fig. 16 10 kW single-mode fiber laser configuration

合效率是主因,它直接决定激光器的输出功率和能量利用率;系统稳定性主要涉及到光学系统的热力学性能变化;在产品的生产和封装中需要考虑结构紧凑度;复杂度是指所需组件的数目及抽运耦合调节过程的难易程度;可扩展性则反映了其功率扩展能力。表1列举了各种抽运耦合方式的优缺点及文献公开报道的最高输出功率。

从表1可以看出,1)侧面抽运耦合方式在扩展能力方面要优于端面抽运耦合方式,这是因为侧面抽运耦合"解放"了信号光纤的两个端面,不会对信号光的传输路径造成阻碍,能够实现沿光纤长度上的多点分布抽运,从而实现更高功率的抽运耦合。2)在系统稳定性和紧凑度方面,

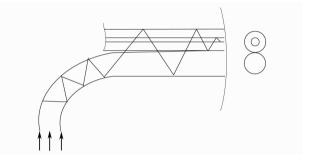


图 17 10 kW 单模光纤激光器的侧面抽运方式示意图 Fig. 17 Schematic of the side-pumping arrangement of 10 kW single-mode fiber laser

全光纤结构要优于非全光纤结构。这是因为像透镜、光栅或光学折射率匹配胶等附加器件和材料的引入,不仅对操作带来一定的要求,而且其本身的耐热问题对功率提升有很大限制。3) V 型槽法、嵌入镜片法和角度磨抛法会对光纤内包层造成损伤,不利于它们在大功率光纤激光器中的应用。4) 抽运光是沿光纤轴向长度耦合注入的方式(如 GTWave)要优于单点注入方式(如透镜耦合、V 型槽法和熔融拉锥抽运耦合等)。这是因为后者入射功率集中,由此产生的热负荷较高,光纤入射点容易受到损伤,降低了抽运耦合效率。

从表1中还可以看到,目前实现千瓦量级功率输出的抽运方式有透镜端面抽运耦合、V 形槽法、光纤束熔融拉锥端面耦合和 GTwave 技术。当功率进一步提高时,透镜端面抽运耦合和 V 形槽法由于引入了附加器件不再是全光纤结构或光纤内包层被损伤,不能满足万瓦以上量级的高功率光纤激光输出。熔融拉锥光纤束端面耦合和 GTWave 技术这两种方式都是全光纤结构,结构简单紧凑,稳定性好,可扩展能力强,大功率光纤激光器在这两种方式的基础上采用 MOPA 结构,功率提升有很大潜力[35,64,667,67]。近年来 TFB 合束器已经商品化并应用在光纤激光器中,但其缺点是抽运入射点最大数目受到两个端面的限制,光纤入射端的抽运功率密度较高,很容易导致光纤端面热负荷严重使光纤端面受到损伤从而影响了输出功率,这种情况在高功率情况下会更加突出,因此需要额外的冷却装置降低对光纤的损伤。此外,TFB 方式是将多束光纤进行拉锥熔融合束在一起,光纤束在高温拉锥下所受应力不均匀会产生一定的形变,随着抽运光纤路数的增多,其控制难度会增加。目前基于这种方式的光纤激光器已经实现了 50 kW 的输出功率,但是其光束质量非常差,光纤端面热负荷和拉锥光纤中产生的形变是必须要解决的两大难题。GTWave 的优势就是抽运光纤和信号光纤是光学接触,没有对光纤进行破坏或产生形变,信号光和抽运光相互独立,抽运光沿光纤轴向逐渐耦合到信号光纤中去,即便是在高功率应用中,也不会产生严重的热负荷。值得一提的是,基于GTWave 技术的光纤激光器结合了 10 kW 量级的高功率输出、近乎完美的光束质量、封装紧密、良好的系统可靠性、高效性和耐用性等优势,在战略定向能应用方面拥有一定的市场,前景非常诱人[65]。

#### 表 1 各种抽运耦合方式的对比

Table 1 Comparison of various pumping technologies

Pumping technology		Advantages	Disadvantages	Maximum power
End-pumping technologies	Lens end-pumping technology	Simple; efficient	Accurate adjustment; poor stability and scalability; low heatproof lens	2.1 kW [21]
	Fiber end fusion pumping technology	All-fiber configuration; simple; compact; steady	Poor scalability	153 W <sup>[25]</sup>
	Taper-fused fiber bundle end-pumping technology	All-fiber configuration; small; light; rugged	High power density and high thermal load on the input end	50 kW (multimode) [37]
	Large-core fiber end-pumping technology	Compact; efficient; steady	Precise alignment; complicated; poor scalability; real-time monitor	*
Side-pumping technologies	V-groove side-pumping technology	Scalable; efficient	Susceptible to injure fiber; accurate position; optical smooth surface; high input power density	$1 \text{ kW}^{[43]}$
	Embedded mirror side-pumping technology	Unnecessary for smooth surface and precise alignment; scalable	Susceptible to injure fiber; low heatproof glue	5.2 <b>W</b> <sup>[46]</sup>
	Angle-polished side-pumping technology	Scalable; efficient	Accurate position; susceptible to injure fiber; low heatproof glue	102.5 W <sup>[51]</sup>
	Diffraction grating side-pumping technology	Scalable; efficient	Complicated; low heatproof glue	1.2 W <sup>[52]</sup>
	GTWave technology	Scalable; uniform  power distribution;  compact; reliable	Complicated processes and equipments	10 kW (single-mode) <sup>[37,6</sup>

<sup>\*</sup> The introduction of this technology is from the patents [38,39], and no experimental data have been published yet.

# 5 结束语

光纤激光器是新型激光器发展的代表。选择良好的抽运方式对提高光纤激光器的各项性能指标具有重要的意义。本文分别对国内外具有代表性的双包层光纤的端面抽运耦合和侧面抽运耦合技术方案做了详细介绍。经过分析比较发现,熔融拉锥光纤束和GTWave这两种全光纤抽运耦合方式紧凑度高,稳定性好,便于封装和制造,越来越多地应用在高功率光纤激光器上。相信在不久的将来,随着光纤制作工艺的改进,抽运技术的不断更新,双包层光纤激光器将会变得更加简单、高效。

### 参考文献

1 Yao Jianquan, Ren Guangjun, Zhang Qiang et al.. Yb doped double clad fiber laser and pump coupling technology[J]. Laser Journal, 2006, 27(5): 1~4

姚建铨,任广军,张 强 等. 掺镱双包层光纤激光器及其泵浦耦合技术[J]. 激光杂志, 2006, 27(5):  $1\sim4$ 

2 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhou Jianqiang et al.. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 135~138

楼祺洪,周 军,朱健强等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程,2006,35(2):135~138

3 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhang Haibo et al.. Recent progress of large core fiber lasers[J]. Chinese J. Lasers, 2010, 37(9): 2235~2241

楼祺洪,周 军,张海波等. 大芯径光纤激光器的新进展[J]. 中国激光,2010,37(9):2235~2241

- 4 光纤激光时代来临——光纤激光器-第三代激光器的代表[OL]. http://www.laserfocusworld.com.cn/DeMT.asp? id= 152,2010009-09
- 5 E. Snitzer. Optical maser action of Nd3+ in a barium crown glass[J]. Phys. Rev. Lett., 1961, 7(12): 444~446
- 6 R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey et al.. Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm[J]. Electron. Lett., 1987, 23(19): 1026~1028
- 7 E. Desurvire, J. R. Simpson, P. C. Becker. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier[J]. Opt. Lett., 1987, 12(11): 888~890
- 8 E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi *et al.*. Double-clad, offset core Nd fiber laser[C]. OSA Technical Digest of Optical Fiber Sensors, 1988, 2; PD5
- 9 H. M. Pask, J. L. Archambault, D. C. Hanna et al.. Operation of cladding-pumped Yb<sup>3+</sup> doped silica fibre lasers in 1 μm region[J]. Electron. Lett., 1994, **30**(11): 863~865
- 10 Y. Jeong, J. Sahu, D. 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
- 11 V. Fomin, A. Mashkin, M. Abramov *et al.*. 3 kW Yb fibre lasers with a single-mode output[C]. International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications, 2006
- 12 光纤激光器的输出功率日益提升[OL]. http://www.laserfocusworld.com.cn/DeTC.asp? id=25, 2010-07-23
- 13 Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen et al.. High power fiber laser output power exceeds 1. 2 kW[J]. Chinese J. Lasers, 2006, 33(10): 1359
  - 赵 鸿,周寿桓,朱 辰等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2 kW[J]. 中国激光,2006,33(10):1359
- 14 Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao et al.. 1.75 kW fiber laser with homemade Yb-doped double cladding fiber[J]. Chinese J. Lasers, 2009, 36(5): 1277
  - 楼祺洪,何 兵,薛宇豪 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. 中国激光,2009,36(5):1277
- 15 Li Wei, Chen Xi, Wu Zichun et al.. Combining power of high power fiber laser exceeds 3 kW[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(2): 242
  - 李 伟, 陈 曦, 武子淳 等. 大功率光纤激光合成功率突破 3 kW[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(2): 242
- 16 Y. Jeong, J. K. Sahu, R. B. Williams *et al.*. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 272 W output power [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(13): 977~978
- 17 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 610 W of near diffraction-limited output power[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(24): 1527~1528
- 18 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW continuous-wave output power[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(8): 470~472
- 19 J. Limpert, A. Liem, H. Zellmer. 500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(8): 645~647
- 20 D. Jaque, J. C. Lagomacini, C. Jacinto *et al.*. Continuous-wave diode-pumped Yb: glass laser with near 90% slope efficiency[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(12): 121101
- 21 Y. Jeong, A. J. Boyland, J. K. Sahu *et al.*. Multi-kilowatt single-mode ytterbium-doped large-core fiber laser[J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2009, **13**(4): 416~422
- 22 A. S. Kurkov, V. I. Karpov, A. Yu Laptev *et al.*. Highly efficient cladding-pumped fibre laser based on an ytterbium-doped optical fibre and a fibre Bragg grating[J]. *Quantum Electron.*, 1999, **29**(6): 516~517
- 23 Réal Vallée, Erik Bélanger, Bernard Déry *et al.*. Highly efficient and high-power Raman fiber laser based on broadband chirped fiber Bragg gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 5039~5043
- 24 A. S. Kurkov, D. A. Grukh, O. I. Medvedkov *et al.*. Ytterbium-doped fibre laser with a Bragg grating reflector written in a multimode fibre [J]. *Quantum Electron.*, 2005, **35**(4): 339∼340
- 25 Yan Feng, Luke R. Taylor, Domenico Bonaccini Calia. 150 W highly-efficient Raman fiber laser[J]. Opt. Express, 2009, 17(26): 23678~23683
- 26 D. J. DiGiovanni. Tapered Fiber Bundles for Coupling Light Into and Out of Cladding Pumped Fiber Devices [P]. US Patent 5,864,644, 1999
- 27 B. G. Fidric. Optical Couplers for Multimode Fibers[P]. US Patent 6,434,302 B1, 2002
- 28 A. Kosterin, V. Temyanko, M. Fallahi *et al.*. Tapered fiber bundles for combining high-power diode lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(19): 3893~3900
- 29 Y. Shamir, Y. Sintov, M. Shtaif. Beam quality analysis and optimization in an adiabatic low mode tapered fiber beam

- combiner[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2010, 27(12): 2669~2676
- 30 A. Wetter, M. Faucher, M. Lovelady et al.. Tapered fused-bundle splitter capable of 1 kW CW operation[C]. SPIE, 2007, 6453; 645301
- 31 F. Mathieu, Benoit Sevigny, Roger Perreault *et al.*. All-fiber 32×1 pump combiner with high isolation for high power fiber laser[C], CLEO/QELS, 2008, CMA5
- 32 A. Wetter. Optical Fiber Component Package for High Power Dissipation [P]. US Patent 7,373,070 B2, 2008
- 33 Marc F. Gonthier, Vachon Garneau. Multimode Fiber Outer Cladding Coupler for Multi-Clad Fibers [P]. US Patent 7,933,479 B2, 2011
- 34 Ping Yan, Shupeng Yin, Mali Gong. 175-W continuous-wave master oscillator power amplifier structure ytterbium-doped all-fiber laser[J]. Chin. Opt. Lett., 2008, 6(8): 580~582
- 35 P. Yan, M. Gong. 1.1 kW ytterbium monolithic fiber laser with assembled end-pump scheme to couple high brightness single emitters[J]. *IEEE Photon. Techol. Lett.*, 2010, **23**(11): 697~699
- 36 S. Yin, P. Yan, M. Gong. End-pumped 300 W continuous-wave ytterbium-doped all-fiber laser with master oscillator multi-stage power amplifiers configuration [J]. Opt. Express, 2008, 16(22): 17864~17869
- 37 Hagop Injeyan, Gregory Goodno. High-Power Laser Handbook M New York; McGraw-Hill, 2011. 520∼526
- 38 F. Gonthier. Optical Coupler Comprising Multimode Fibers and Method of Making the Same [P]. US Patent 2005/0,094,952 A1, 2005
- 39 F. Gonthier. Optical Coupler Comprising Multimode Fibers and Method of Making the Same[P]. US Patent 7,046,875 B2, 2006
- 40 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
- 41 L. Goldberg, D. J. Ripin. High-efficiency side-coupling of light into double-cladding fibers using imbedded V-grooves[C]. Optical Fiber Communications 1996, 1996, 91~92
- 42 J. P. Koplow, Lew Goldberg, A. V. Dahv et al., Compact 1-W Yb-doped double-cladding fiber amplifier using V-groove side-pumping[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1998, 10(6): 793~795
- 43 K. J. Snell. Multiple Emitter Side Pumping Method and Apparatus for Fiber Lasers [P]. US Patent 6,801,550 B1, 2004
- 44 L. Goldberg, B. Cole, E. Snitzer. V-groove side-pumped 1.5 μm fiber amplifier[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(25): 2127 ~2129
- 45 Li Cheng, Shen Deyuan, Song Jie *et al.*. Analysis of high-power double-clad fiber lasers side-pumped by multiple diode-lasers in V-groove configuration[C]. The Pacifice Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 1999, 3: 805~806
- 46 J. P. Koplow, S. W. Moore, D. A. Kliner. A new method for side pumping of double-clad fiber sources[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(4): 529~540
- 47 F. Hakimi, H. Hakimi, Side Pumped Optical Amplifiers and Lasers PJ. US Patent 6,370,297 B1, 2002
- 48 P. Ou, P. Yan, M. Gong *et al.*. Studies of pump light leakage out of couplers for multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fiber lasers[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **239**(4): 421~428
- 49 J. Xu, J. Lu, G. Kumar et al.. A non-fused fiber coupler for side-pumping of double-clad fiber lasers[J]. Opt. Commun., 2003, 220(4): 389~395
- 50 Pan Ou, Ping Yan, Mali Gong et al.. Multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser[J]. Chin. Opt. Lett., 2004, 2(5): 285~287
- 51 Q. Xiao, P. Yan, S. Yin et al., 100 W ytterbium-doped monolithic fiber laser with fused angle-polished side-pumping configuration [J]. Laser Phys. Lett., 2011, 8(2): 125~129
- 52 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
- 53 F. Zhang, C. Wang, R. Geng et al.. Novel grating couplers for diode-bars multi-point side-pumping double-clad fiber[J]. Opt. Commun., 2007, 279(2): 346~355
- 54 F. Zhang, C. Wang, T. Ning et al.. Asymmetric dual-side-grating coupler for high power side-pumping [J]. Opt. Commun., 2008, 281(10): 2883~2892
- 55 F. Zhang, B. Yuan, C. Wang et al.. Side pumping scheme with a dual-sided grating coupler[J]. J. Opt., 2010, 12(1): 015501
- 56 A. B. Grudinin, D. N. Payne, P. W. Turner *et al.*. Multi-Fiber Arrangements for High Power Fiber Lasers and Amplifiers[P]. US Patent 6,826,335 B1, 2004

- 57 A. B. Grudinin, D. N. Payne, P. W. Turner *et al.*. Multi-Fiber Arrangement for High Power Fiber Lasers and Amplifiers[P]. US Patent 7,221,822 B2, 2007
- 58 P. Dupriez. Advanced High Power Pulsed Fiber Laser Systems and Their Applications [D]. Southampton: University of Southampton, 2007. 18~19
- 59 V. P. Gapontsev, V. Fomin, N. Platonov. Powerful Fiber Laser System [P]. US Patent 7,593,435 B2, 2009
- 60 V. P. Gapontsev. Powerful Fiber Laser System[P]. US Patent 2009/0,092,157 A1, 2009
- 61 V. P. Gapontsev, V. Fomin, N. Platonov. Powerful Fiber Laser System[P]. US Patent 2010/0,002,730 A1, 2010
- 62 J. Yoonchan, J. Nilsson, K. Sahu et al.. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2007, 13(3): 546~551
- 63 R. Horley, S. Norman, M. Zervas. Progress and development in fiber laser technology[C]. SPIE, 2007, 6738: 67380K
- 64 J. N. Maran, Y. Jeong, S. Yoo *et al.*. Progress in high-power single frequency master oscillator power amplifier [C]. SPIE, 2008, 7099: 70990X
- 65 IPG Tests First 10 kW Singlemode Production Laser [OL]. http://optics.org/article/39511, 2009-06-17
- 66 S. Norman, M. Zervas, A. Appleyard *et al.*. Latest development of high power fiber lasers in SPI[C]. SPIE, 2004, 5335: 229~230
- 67 V. Gapontsev, D. Gapontsev, N. Platonov *et al.*. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2005, 508