

高功率光纤激光器抽运耦合技术研究进展

Research Progress of Pumping Technology for High Power Fiber Lasers

赵楚军^{1,2} 陈光辉² 慕伟² 范滇元¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
² 中国电子科技集团第二十三研究所, 上海 200437)

ZHAO Chujun^{1,2} CHEN Guanghui² MU Wei² FAN Dianyuan¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² No.23 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200437)

摘要 综述了双包层光纤激光器端面、侧面和集中抽运耦合技术,分析表明侧面抽运耦合技术比端面抽运耦合技术更有利于获得高功率输出,其中分布包层抽运耦合技术是很理想的一种侧面抽运耦合方式。阐述了高功率光纤激光器的特点并介绍了光子晶体光纤和螺旋芯光纤的抽运耦合方式。

关键词 高功率光纤激光器; 抽运技术; 双包层光纤; 光子晶体光纤; 螺旋芯光纤

Abstract End pumping, side pumping and collective pumping methods for double-clad fiber laser are introduced. Among these methods, the side pumping has many advantages over the end pumping technology for high power output. Distributed pumping method is an ideal side pumping choice. The characteristics of high power fiber lasers are given and the pumping methods for photonic crystal fiber and helical-core fiber are introduced.

Key words high power fiber laser; pumping method; double-clad fiber; photonic crystal fiber; helical-core fiber

中图分类号 TN245

1 引言

20世纪60年代, E. Snitzer等^[1]提出光纤激光器和放大器的构想,但由于当时条件的限制,发展停滞不前。随着半导体激光器抽运技术的发展,以及光纤通信蓬勃发展的需要,1987年英国南安普顿大学及美国贝尔实验室实验证明了掺铒光纤放大器(EDFA)的可行性。为了提高功

率,1988年 E. Snitzer等^[2]提出抽运光由包层进入。初期设计内包层是圆形的,但由于圆形内包层完美的对称性,使得抽运吸收效率不高。直到20世纪90年代初矩形内包层的出现,激光转换效率提高到50%,输出功率达5 W。1999年, V. Dominic等^[3]用4个45 W的半导体激光器从两端抽运,获得了110 W的单模连续激

光输出。近两年,随着高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,光纤激光器的输出功率逐步提高。IPG公司目前已经可以提供1~50 kW连续激光输出的掺铒光纤激光系统^[4],并于2006年,报道了单模连续激光输出3 kW的掺铒光纤激光器^[5]。对于单模、单偏振的连续激光输出,在采用端面透镜耦合的

条件下,英国的南安普顿大学已经有 633 W 的报道^[6];利用全光纤化系统,美国密歇根大学的研究人员联合 Nufem 公司已经取得了 405 W 的激光输出^[7]。利用光子晶体光纤,德国 Jena 大学利用单纤已经得到了 1530 W 的功率输出^[8]。在国内,华北光电技术研究所采用新型掺镱光纤,研制出平均输出功率达 1207 W 的激光器,上海光机所采用国产光纤,单纤已经实现了千瓦的连续激光输出^[9]。

同一般的激光器相比,光纤激光器在光束质量、体积、重量、效率、散热等方面均具有明显优势,广泛应用于民用工业、军事等多个领域。根据 Laser Focus World 的市场分析,国际上光纤激光占整个激光市场的份额将快速扩大,预计 2007 年达 20%,其在激光材料处理应用方面占 24%,在激光的空间和军事应用方面占 59%^[10]。

为满足更高输出功率的需求,光纤激光器仍有很多问题需要解决,如光纤的设计及工艺、抽运耦合技术、光栅谐振腔技术等,而如何高效地耦合抽运光及提高抽运功率是其核心。当前激光二极管(LD)的输出功率尚不能满足要求,因此改进抽运方式成为提高激光输出功率的最重要手段之一。

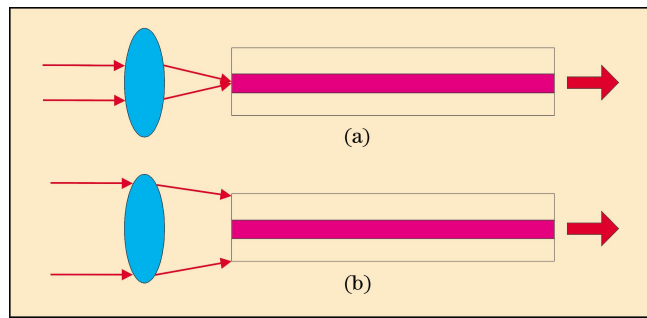


图 1 纤芯抽运(a)及包层抽运(b)示意图

2 双包层(DC)光纤

传统的光纤激光器采用的是典型芯径尺寸小于 10 μm 的普通单模掺杂光纤。这种激光器采用单纵模单横模半导体激光器作为抽运光源,对准单模掺杂光纤的纤芯,抽运纤芯中的稀土元素使之发生受激辐射,从而产生激光,如图 1(a)所示。由于只能采用抽运光注入到纤芯的抽运方式,因此其抽运功率不高,输出激光功率有限。双包层光纤是由纤芯、内包层和外包层组成,在内包层中传播的抽运光反复穿越纤芯并被纤芯掺杂介质吸收,而产生的激光则沿单模纤芯传播,如图 1(b)所示。一般来说,内包层尺寸都应大于 100 μm ,从而经耦合透镜聚焦后的焦斑为 100 μm 左右的抽运光可以有效地耦合进单模光纤中,并且内包层的数值孔径较大(一般大于 0.36),收集抽运光的

能力强,从而可以保证高能抽运光高效地耦合进入内包层,大大增加了光纤激光器的输出功率^[10]。

为了提高耦合效率,矩形、正方形、D 形、梅花形等形状的内包层也已经出现,如图 2 所示。实验表明,这些内包层形状的光纤相对于圆形内包层形状对抽运光的吸收效率有了很大提高。D 形内包层的吸收效率可达 80%以上;在理论上矩形内包层吸收效率可达 100%,但由于拉制工艺的限制,只能达 90%以上^[10]。

3 端面抽运

端面抽运就是把抽运光由光纤的端面耦合进双包层光纤的内包层。其技术方式较为简单,一般采用的抽运方式有以下几种。

3.1 透镜直接耦合

透镜直接端面耦合抽运是目前实验室较为常用的抽运方法。图 3 是文献[11]中实现单纤输出

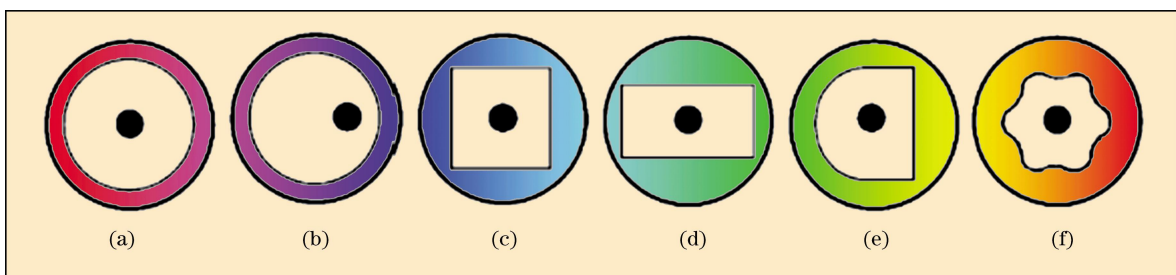


图 2 各种双包层光纤内包层形状示意图

(a) 同心圆形; (b) 偏心圆形; (c) 方形; (d) 矩形; (e) D 形; (f) 梅花形

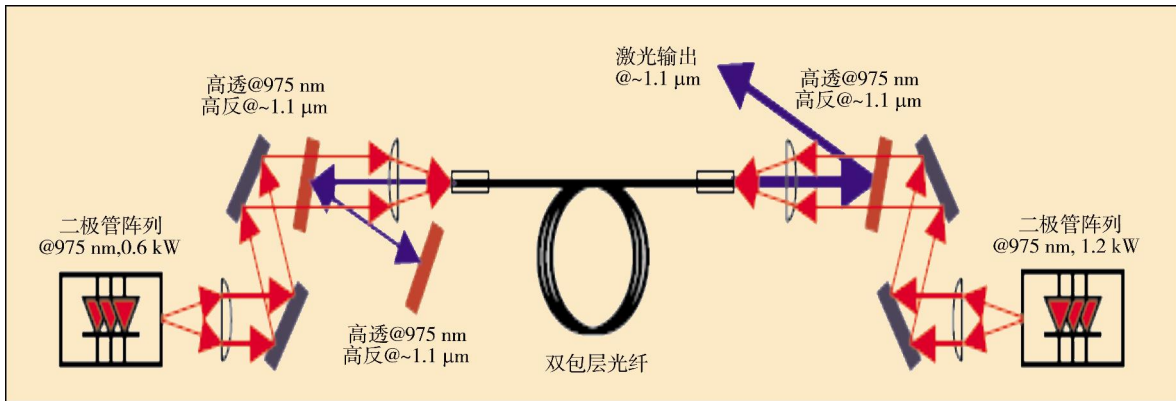


图 3 透镜端面耦合抽运示意图

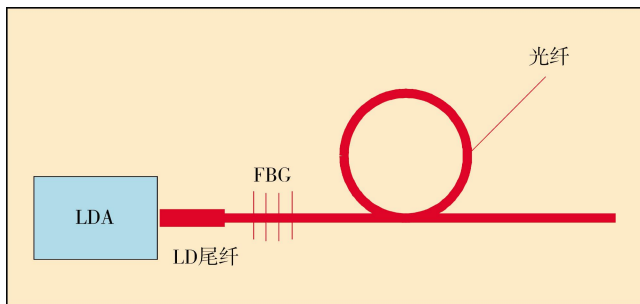


图 4 大功率 LD 尾纤与光纤端面熔接耦合示意图

1.36 kW 的实验示意图,抽运光经准直、聚焦后,经双色片耦合入有源光纤,耦合效率超过 90%。采用端面抽运的方法,可获得高功率的激光输出。但由于器件的稳定性较差,商用光纤激光器一般不采用此法。

3.2 光纤端面熔接耦合

将一段对抽运光高透,对激光波长高反的光纤光栅,熔接在双包层光纤的一端(FBG),然后与带尾纤输出的大功率 LD 阵列(LDA)熔接起来,即构成了全光纤双包层光纤激光器,如图 4 所示。其结构牢固,输出功率一般为数瓦至数十瓦,可作商用激光器。然而作为抽运源的大功率 LD 列阵须用半导体制冷,所发出的激光需经过光束整形、准直、非球面镜聚焦耦合到光纤中,因此整机比较复

杂,成本较高^[12]。

3.3 多个小功率 LD 端面耦合抽运

为了克服必须对抽运源进行半导体制冷的问题,人们探索使用一种将许多个小功率尾纤输出 LD 端面抽运的方法。把几十根尾纤拧在一起熔融拉锥,然后在锥体的中间切断,再熔接到多模光纤上,然后采用上述端面耦合抽

运方式,如图 5 所示。光纤熔融拉锥的耦合效率可达 85%以上。由于采用了小功率 LD,无需半导体制冷,只需简单风冷,可制成体积小、重量轻、结构坚固、稳定性能好的光纤激光器。该方法非常有利于抽运光功率的扩展,美国 IPG 公司采用这种抽运技术,已有输出几百瓦功率的产品^[4,13]。

4 侧面抽运

目前最具代表性的侧面抽运技术有 V 形槽法^[13]、微棱镜侧面耦合法^[13]、内嵌反射镜侧面耦合法^[13]、光纤侧面胶合抽运耦合法^[13]、光纤侧面熔接法^[13]、二元衍射光栅法^[14]、熔锥侧面耦合法^[15]、分布式包层抽运法等。

4.1 改进的 V 形槽侧面抽运技术

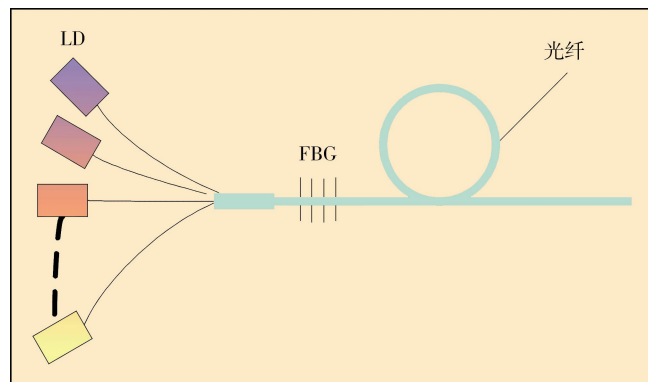


图 5 多个小功率 LD 光纤耦合端面抽运示意图

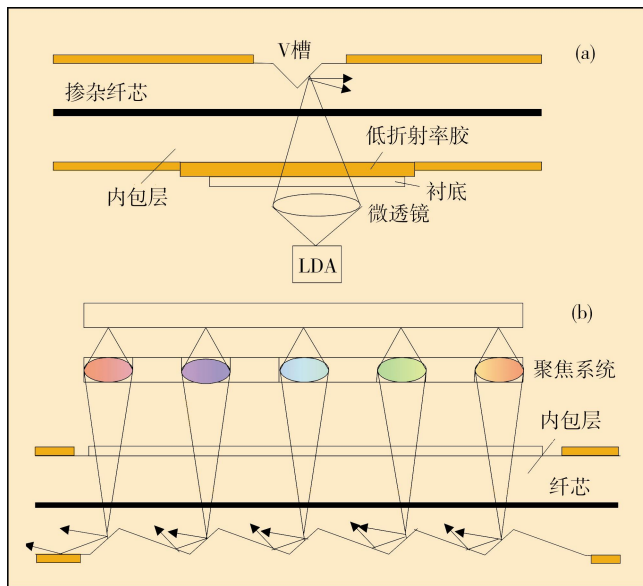


图 6 V 形槽(a)及改进 V 形槽(b)侧面抽运示意图

V 形槽是一种应用较为广泛的侧面抽运方法，其基本结构如图 6(a)所示。首先，将双包层光纤的外包层去除一段，在裸露的内包层上刻蚀一个 V 形槽，槽的表面磨抛成光学平面，槽的深度不伤及纤芯，抽运光经微透镜聚焦于 V 形槽的一边侧面并全反射进入内包层，实施对掺杂纤芯的抽运^[16,17]。

如果利用多个直角 V 槽同时进行抽运，抽运光有可能在内外包层界面处或 V 形槽的反射面处因不再满足全反射而造成损耗。为此，K.J.Snell 等^[18]提出了改进的 V 形槽抽运技术，如图 6(b)所示。通过适当设计，抽运光不会发生泄漏。该方法有很好的功率扩展能力，通过增加光纤长度，在多段刻槽，可获得超过 1 kW 的激光输出。

4.2 狭缝侧面抽运技术

采用 V 形槽抽运时，V 形槽段一般要用光学胶固定，由于 V 形槽和抽运源位于光纤两侧，抽运光要经过光纤进行抽运，对光

学胶的光学和力学性能要求很高。另外，V 形槽和抽运源位于光纤两侧，距离较远，抽运源和微透镜的定位精度有限。最近 L. Goldberg 等^[19]提出了狭缝侧面抽运的方法，如图 7 所示。这种方法由于狭缝和抽运源位于光纤同侧，采用光学胶固定但要求降低，而且抽运源与狭缝距离短，易于抽运。通过适当设计，这种方法可以实现无透镜耦合，而且可以实现多狭缝同时抽运。

4.3 角度磨抛侧面抽运耦合

在双包层光纤一段剥去涂敷层和外包层，将内包层沿纵向进行磨抛，得到小段用于抽运耦合的平面，然后将端面按一定角度

磨抛好的抽运光纤的纤芯相对该平面紧密贴合并用折射率相近的光学胶固定。抽运光从双包层光纤的侧面以较大的入射角进入内包层，在内包层中发生全反射得以传输，并抽运掺杂的纤芯。通常该侧面抽运耦合技术要求抽运光纤端面的磨抛角较小(约 10°)，这对光纤端面磨抛工艺提出了很高的要求^[15]。

采用这种方法的优点是可以获得高的耦合效率，已有报道这种方法的耦合效率达 90%，耦合功率在毫瓦量级^[20-22]。这种方法可进行多点抽运，清华大学巩马理小组采用 3 根多模光纤在侧面同时抽运(如图 8 所示)^[23]。实验中采用了 D 型内包层光纤，内包层截面尺寸为 350/400 μm，数值孔径 0.37，纤芯直径 12 μm，双包层光纤长 38 m，多模抽运光纤直径 200/240 μm，数值孔径 0.11，抽运光纤粘合材料的折射率为 1.47，反射镜对 1.05~1.15 μm 信号光的反射率 99.5%，3 台 LD 抽运功率均为 1.5 W，抽运光波长 0.98 μm，在光纤的输出端得到 1.38 W 的输出激光，斜率效率为 48.9%。实验结果表明，提高耦合效率的一个有效方法是增加多模光纤间的距离以利于抽运光的吸收^[23]。不过这种方法由于光学胶所能承受的功率密度有限，功率提升受

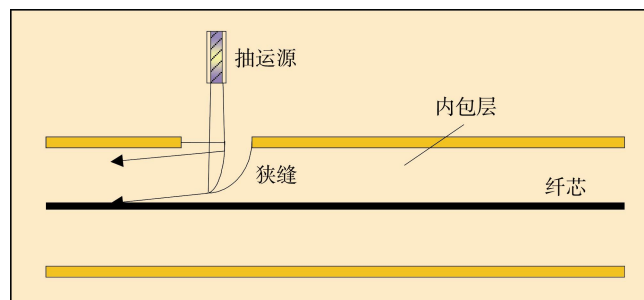


图 7 狭缝侧面抽运示意图

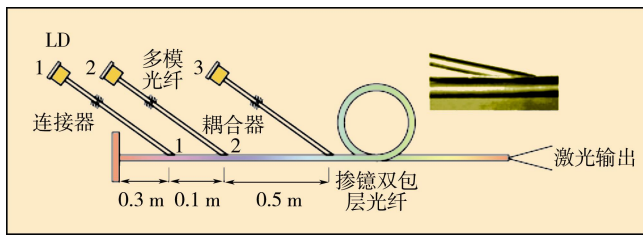


图 8 三根多模光纤同时侧面抽运示意图

到限制。

4.4 分布式包层抽运技术

最近巩马理小组提出了分布式包层抽运技术,所用光纤激光器抽运耦合方式示意图,如图 9 所示^[24]。多段侧抽运光纤以串联方式熔接起来,每段侧抽运光纤包括熔融光纤束、大模面积的双包层光纤和 LD 阵列组成。抽运光通过熔融光纤束进入增益光纤。熔融光纤束由多个大芯径的抽运

分布应该与增益光纤匹配。为了避免抽运光泄漏,增益光纤应该足够长,以有效吸收抽运功率^[24]。

这种抽运方式制作简单,效率高,易于实现全光纤化,对高亮的抽运源要求降低。在掺杂石英光纤未达到破坏阈值前,通过串联更多侧抽运光纤易实现功率扩展。而且,随着功率的提高,光束质量不会下降。对这种结构的光纤激光器进行了理论模拟,结果

式,但还有很多问题值得研究,比如如何降低熔接处的附加损耗,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。

5 集中抽运

为了大幅度提高光纤激光器的输出功率,人们设想把几百瓦乃至上千瓦的大功率二极管多模激光耦合进大波导内集中于其中的掺杂纤芯进行抽运^[25]。光纤集中抽运的波导可做成板状、条状、柱面状、管状等形状,即所谓任意形状光纤激光器。这些形状的光波导使大功率半导体激光二极管阵列直接用于抽运,极大地提高了耦合效率,有利于大幅度提升光纤激光器的输出功率,但其制作工艺比较复杂^[25]。目前,日本已

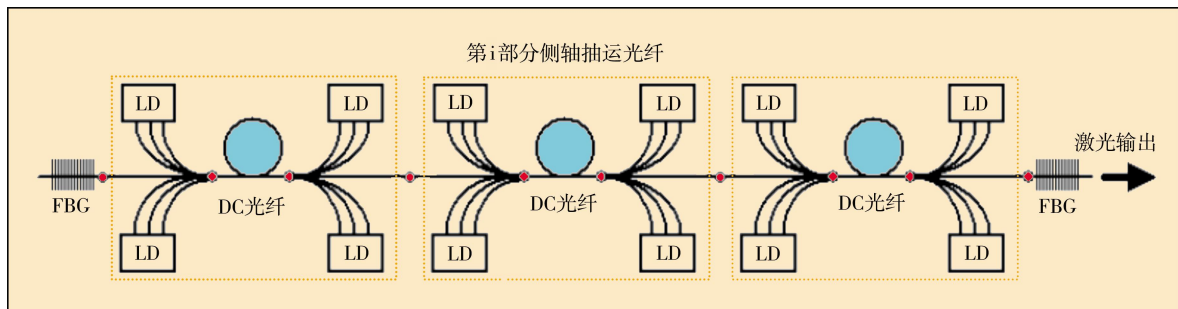


图 9 分布式包层抽运耦合示意图

光纤和中心的信号光纤组成,信号光纤未掺杂,其芯径和折射率

表明:分布式包层抽运构型的光纤激光器转换效率高;插入损耗增加引起的激光阈值增加不大;熔接引入的背反射抑制了放大自发辐射,激光器更易激射。由于采取了分布抽运方式,激光器的温度分布更均匀^[24]。因此分布式包层抽运是一种很理想的抽运耦合方

将集中抽运光纤激光器商品化,实现了超过 1000 W 的激光输出,图 10 为盘状光纤激光器示意图^[26]。

6 各种抽运方法的比较

在实际工作中,合理的抽运方案主要基于耦合效率、系统稳定性、结构紧凑度、复杂度、扩展性等因素,其中耦合效率是主因,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

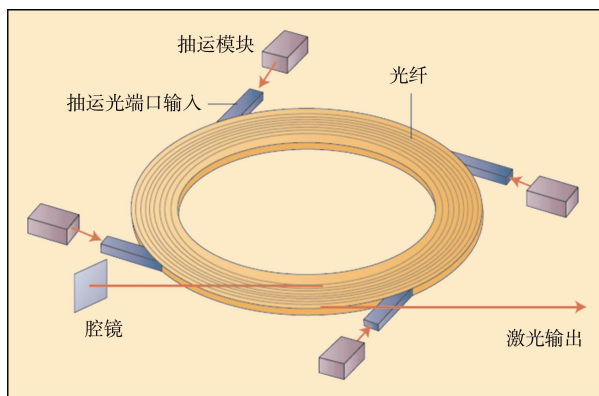


图 10 盘状激光器示意图

表 1 各种抽运耦合方式参数对比

抽运耦合方法		耦合效率	系统稳定性	结构紧凑度	复杂度	扩展性
端面抽运耦合	透镜直接耦合	≈90% ^[11]	较差	较差	高	不好
	光纤端面熔接耦合	>90% ^[12]	好	高	较高	不好
	多个小功率 LD 端面耦合抽运	>85% ^[13]	好	高	较高	不好
侧面抽运耦合	V形槽侧面抽运技术	≈90% ^[18]	较好	较低	高	较好
	狭缝侧面抽运技术	>90% ^[19]	好	较高	高	较好
	角度磨抛侧面抽运耦合	90% ^[20]	较好	较低	较高	较好
	熔锥侧面抽运耦合	≈80% ^[15]	好	高	高	好
	嵌入镜抽运耦合	≈80% ^[27]	较好	较高	高	较好
	二元衍射光栅法	>57% ^[28]	较好	较低	高	较好
	分布式包层抽运技术	高 ^[24]	好	高	高	好
集中抽运	盘状激光器	>97% ^[25]	好	高	高	较好

化；在产品的生产和封装中需要考虑结构紧凑度；复杂度是指需要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。

端面抽运比较简单，其缺点表现在：1) 抽运端面面积很小，可以注入的抽运光能量有限，若提高功率，必须增大包层尺寸；2) 光纤端面用来进行端面抽运耦合，因此，无法与其它功能器件熔接；3) 功率可扩展性不好。而侧面抽运恰好可以解决上述问题，抽运光在光纤中分布更趋均匀，热分布亦如此；光纤的两端面空闲，方便信号的输入输出、熔接等工作；功率的提高通过增加 LD 的数量即可实现。鉴于此，光纤侧面抽运耦合技术更有发展前途，其中，分布侧面抽运技术是很理想的一种抽运方式。同时，集中抽运应用前景比较好，它通过级联可以实现功率扩展，但工艺很复杂。

7 其他高功率光纤激光器的抽运

输出功率和光束质量是衡量

光纤激光器性能的两个重要指标。但光纤激光器相对于固体激光器来说，本身存在不足。例如光纤激光器脉冲能量相对较低，受激拉曼散射、受激布里渊散射和自相位调制等非线性过程限制了其脉冲能量和峰值功率^[29]。为了克服这些不足，必须增大光纤芯径，但如何同时保持单模运行仍需进一步研究和技术优化。目前在高功率领域中，双包层光纤应用最为广泛，除此以外，许多新型的光纤更有望实现高功率、高质量的激光输出，而这些光纤的有

效抽运也值得探讨。

6.1 光子晶体光纤的抽运

光子晶体光纤(PCF)的出现极大促进了高功率光纤激光器的发展^[30-33]。PCF设计灵活，而且几乎能支持所有波长上的单横模传输。在大功率光纤激光器的使用上，掺稀土元素 PCF 还易于实现大模面积、双包层结构和大数值孔径 (>0.9) 的设计，如图 11 所示。这不仅能提高对抽运光的耦合和吸收，还能通过减小光纤的长度来减小再吸收的影响并增加光纤激光器的调谐范围。2005 年，

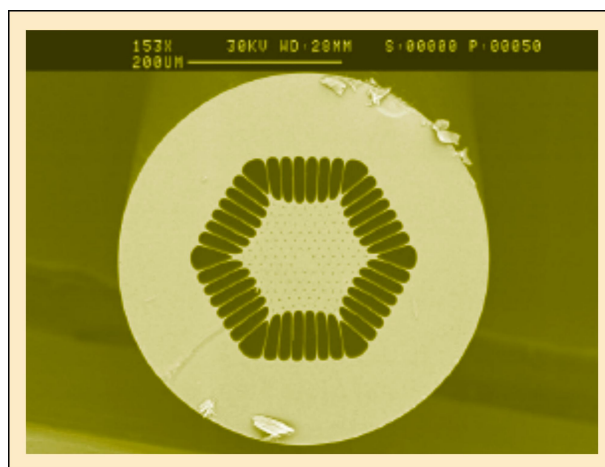


图 11 光子晶体光纤端面的电子扫描显微镜

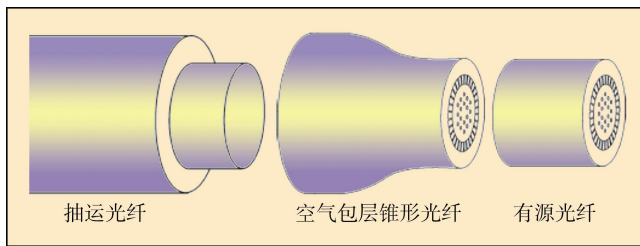


图 12 锥形光纤耦合技术

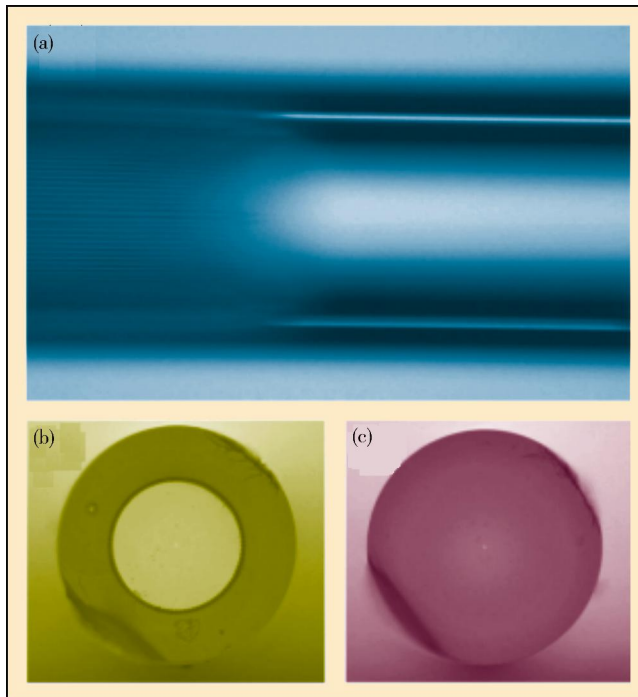


图 13 (a) 光子晶体光纤中塌缩区域和未塌缩区域的过渡部分; (b) 未塌缩区域的端面图; (c) 塌缩区域的端面图

德国 Jena 大学的研究人员用双包层 PCF 实现了 1530 W 的功率输出^[8]。最近报道称,双包层 PCF 的芯径可做到 60 μm ,且仍能保持单模,输出功率每米可达 550 W,斜率效率为 78%;若对光纤进行滤波,双包层 PCF 芯径可达到 100 μm ,此时功率就更高^[32]。

由于空气孔的存在,有效抽运是提高 PCF 功率的决定因素。常用方法是端面抽运,采用透镜直接耦合,方法类似于双包层光纤抽运,但耦合效率低,不稳定。2005 年,Limpert 等^[34]研究了基于

PCF 的锥形光纤耦合技术,并实验验证了其可行性,其耦合原理如图 12 所示。他们通过拉锥技术将 PCF 拉制成锥形光纤,其两端分别与抽运 LD 尾纤和有源光纤直接熔接起来,耦合效率高达

94%。

对于侧面抽运,丹麦晶体光纤公司的研究人员使用掺 Yb^{3+} 的双包层 PCF 进行实验。首先利用熔接机(或 CO_2 激光器)通过局域加热使一段 PCF 的包层空气孔塌缩,如图 13 所示^[35],然后再用常用的双包层光纤侧面耦合方式进行抽运,实验发现耦合效率超过了 90%,激光器的斜率效率高达 81%。

6.2 螺旋芯光纤的抽运

螺旋芯光纤最近在高功率光纤激光器方面显示了其潜在优势。这种光纤的纤芯离心螺旋,如图 14 所示,其中 P 为螺旋间距, Q 为离心距离, n_{co} 为纤芯折射率, n_{c} 为包层折射率, a 为纤芯半径。由于纤芯离心,有助于提高抽运效率,螺旋的纤芯通过适当设计可以有效抑制高阶模传输。最近,英国南安普顿大学已经用此种光纤成功进行了实验,实验中螺旋芯光纤芯径为 30 μm ,数值孔径为 0.087。在 976 nm、92.6 W 抽运功率的条件下,得到 60.4 W 的输出功率,光束质量因子 $M^2 < 1.4$,斜率效率~84%^[36]。依照理论计算,假定基模损耗为 1 dB/m,而模式分辨能力大于 5 dB/m 即可实现滤波,光纤芯径至少可以达到 100 μm ,其功率提升空间很大^[37-38]。

目前螺旋芯光纤一般采用端面抽运,如图 15 所示。纤芯是螺

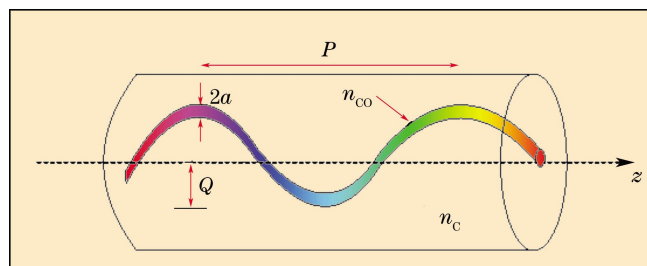


图 14 螺旋芯光纤示意图

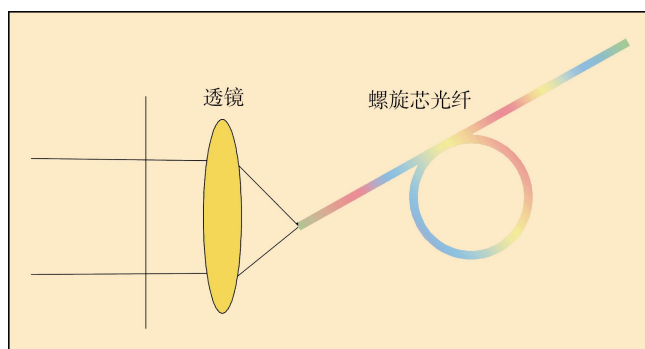


图 15 螺旋芯光纤的端面抽运

旋的,所以在抽运时,抽运光要以一定角度入射以避免大的抽运损耗。现在尚无螺旋芯光纤侧面抽运的报道。

7 结论

光纤激光器是新型激光器发

展的典型代表,其体积小、重量轻、散热性能好,而且光束质量接近于衍射极限。经过比较,使用侧面抽运技术可以获得较高的耦合效率、大功率输出和相对较低的失调灵敏度,其中,分布包层抽运耦合技术是一种很理想的抽运方

式。关于抽运光在光纤内的传输理论,目前还不够完整和精确,有待进一步研究。伴随着新型光纤的设计与工艺水平的提高,光学谐振腔技术的改进以及相关理论研究的进一步深入,光纤激光器将实现更加简单、高效的高功率输出。

作者简介:赵楚军(1979~),男,内蒙古人,中科院上海光机所博士研究生,主要从事光纤激光器、放大器 and 光波导理论的研究。

E-mail: c_j_zhao@yahoo.com.cn

导师简介:范滇元(1939~),男,江苏人,中科院上海光机所研究员,中国工程院院士,从事大型激光装置的研制及应用。

E-mail: fandy@smmail.cn

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 V. Dominic, S. McCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fiber laser[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14):1158-1160
- 4 Burbach. German materials research institute, BAM[Z]. <http://www.ipgphotonics.com/>
- 5 V. Fomin, A. Mashkin, M. Abramov *et al.*. 3kW Yb fibre lasers with a single-mode output [R]. *3rd International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications*, 2006, session HPFL-3
- 6 Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Single-mode plane-polarized ytterbium-doped large-core fiber laser with 633-W continuous-wave output power[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9):955-957
- 7 C. H. Liu, A. Galvanauskas, V. Khitrov *et al.*. High-power single-polarization and single transverse-mode fiber laser with an all-fiber cavity and fiber-grating stabilized spectrum[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **31**(1):17-19
- 8 G. Bonati, H. Voelckel, T. Gabler *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [R]. Photonics West, San Jose, Late Breaking Developments, 2005, Session 5709-2a
- 9 周军, 楼祺洪, 朱健强 等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1119-1120
- 10 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
- 11 Y. Jeong, J. Sahu, D. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(25):6088-6092
- 12 A. S. Kurkov, V. I. Karpov, A. Y. Laptev *et al.*. Highly efficient cladding-pumped fibre laser based on an ytterbium-doped optical fibre and a fibre Bragg grating[J]. *Quant. Electron.*, 1999, **29**(6):516-517
- 13 吴中林, 楼祺洪, 周军 等. 光纤激光器的抽运方法研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(4):30-33
- 14 王凤蕊, 李明中, 陈吉欣 等. 双包层光纤激光器的抽运技术研究新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(10):26-28
- 15 韦文楼, 欧攀, 闫平 等. 双包层光纤的侧面抽运耦合技术[J]. *激光技术*, 2004, **28**(2):116-120

- 16 L. Goldberg, D. J. Ripb, E. Snitzer *et al.*. V-groove side pumped 1.5 μm fiber amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(25): 2127~2129
- 17 L. Goldberg. Method and apparatus for side pumping an optical fiber[P]. U S Patent, 5854865, 1998
- 18 K. J. Snell. Multiple emitter side pumping method and apparatus for fiber lasers[P]. U S Patent, 6801550, 2004
- 19 L. Goldberg, M. M. Christopher. Method and apparatus for coupling light into a waveguide using a slit [P]. U S Patent, 6975792, 2005
- 20 J. Q. Xu, J. H. Lu, G. Kumar *et al.*. A non-fused fiber coupler for side-pumping of double-clad fiber lasers [J]. *Opt. Comm.*, 2003, **220**(4~6):389~395
- 21 F. Hakimi, H. Hakimi. A new side coupling method for double clad fiber amplifiers[C]. CLEO, USA, 2001
- 22 F. Hakimi, H. Hakimi. Side pumped optical amplifiers and lasers[P]. U S Patent, 6370297, 2002
- 23 P. Ou, P. Yan, M. L. Gong *et al.*. Studies of pump light leakage out of couplers for multicoupler side-pumped Yb-doped double-clad fiber lasers [J]. *Opt. Comm.*, 2004, 239(4~6):421~428
- 24 P. Yan, M. L. Gong, C. Li *et al.*. Distributed pumping multifiber series fiber laser[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(7):2699~2706
- 25 K. Ueda, A. Liu. Future of high-power fiber lasers[J]. *Laser Phys.*, 1998, **8**(3):774~781
- 26 Hamamatsu Photonics K. K. The fiber disk laser explained [J]. *Nature Photonics*, 2006, Volume sample(Issue sample):14~15
- 27 J. P. Koplow, S. W. Moore, D. A. V. Kliner. A new method for side pumping of double-clad fiber sources [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2003, **39**(4):529~540
- 28 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
- 29 L. Zenteno. High-power double-clad fiber lasers[J]. *J. Lightw. Technol.*, 1993, **11**(9):1435~1446
- 30 J. C. Knight, T. A. Birks, R. F. Cregan *et al.*. Large mode area photonic crystal fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1347~1348
- 31 T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fibre [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22** (13):961~963
- 32 J. Limpert, O. Schmidt, J. Rothhardt *et al.*. Extended single-mode photonic crystal fiber lasers [J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14** (7):2715~2720
- 33 J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte *et al.*. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(7):818~823
- 34 K. P. Hansen, J. Broeng, P. M. W. Skovgaard *et al.*. High-power photonic crystal fiber lasers: Design, handling and Subassemblies[C]. *SPIE*, 2005, **5709**:273~283
- 35 J. J. Larsen, G. Vienne. Side pumping of double-clad photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5):436~438
- 36 P. Wang, L. J. Cooper, J. K. Sahu *et al.*. Efficient single-mode operation of a cladding-pumped ytterbium-doped helical-core fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2):226~228
- 37 Z. Jiang, J. R. Marciante. Mode-area scaling of helical-core, dual-clad fiber lasers and amplifiers using an improved bend-loss model [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(10):2051~2058
- 38 C. J. Zhao, D. Y. Fan, R. W. Peng *et al.*. Core size scaling of helical-core optical fibres[J]. *Chin. Phy. Lett.*, 2006, **23**(10): 2793~2795