

大模场 Yb 石英玻璃光纤研究进展及其在大功率 光纤激光中的应用

李文涛^{1,2} 周秦岭¹ 陈丹平¹ 张光¹ 胡丽丽¹

(¹中国科学院上海光精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800)
²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 近年来,高质量大模场面积 Yb 石英玻璃光纤由于在高功率光纤激光器和放大器中的应用在国内外受到了极大关注。对近年来国际上成功应用于高功率光纤激光系统中的多种结构的大模场 Yb 石英玻璃光纤的进展情况进行介绍,并概括分析国内大模场 Yb 石英玻璃光纤的研制现状,最后展望了大模场 Yb 石英玻璃光纤的发展趋势。

关键词 光纤光学;Yb 石英玻璃光纤;大模场面积光纤;单模;高功率光纤激光器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.020005

Research Progress of Yb-Doped Large-Mode Area Silica Glass Optical Fiber and Its Application in High-Power Fiber Lasers

Li Wentao^{1,2} Zhou Qinling¹ Chen Danping¹ Zhang Guang¹ Hu Lili¹

(¹Key Laboratory of High Power Laser Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract High-quality Yb-doped large-mode area silica glass optical fiber has attracted much attention in the world over the past decade, due to its application in high-power fiber lasers and amplifiers. In this paper, several Yb-doped large-mode area silica glass optical fibers which have been successfully used in high-power laser systems are introduced. The development of Yb-doped large mode area silica glass optical fiber in China is analyzed. Finally, it is forecasted that the Yb-doped large-mode area silica glass optical fiber has wide application prospects.

Key words fiber optics; Yb-doped silica glass optical fiber; large-mode area optical fiber; single-mode; high-power fiber laser

OCIS codes 060.2270; 140.3280; 140.3510; 060.2320

1 引言

光纤的发明最初主要用于信号传递,人们研究的重点在于光纤的通信方面。1961年世界上第一台光纤激光器诞生^[1],人们开始了对光纤能量传输的研究。由于受高亮度抽运光源以及光纤制造工艺的限制,光纤激光器在最初的20多年中发展比较缓慢,并未受到广泛关注。1989年,掺铒光纤放大器(EDFA)研制成功^[2],它不仅解决了光纤通信中的信号再生放大问题,而且为光纤激光器的商业化应用提供了契机。但是随着半导体激光器的发展,光纤激光器的能量逐渐变高时,传统的通信光纤制备方法和结构已经不能满足高亮度(高光束质量和高功率)光纤激光器对光纤的要求,这就要求研究出新型结构的光纤以及新的光纤制备工艺。目前,光纤激光器输出功率的提高主要受限于两个方面:1)光纤端面的激光损伤,2)光纤中的非线性效应。为了实现高光束质量的激光输出,并且尽可能克服端面激光损伤和非线性效应这两个因素对功率提

收稿日期: 2012-09-25; 收到修改稿日期: 2012-10-19; 网络出版日期: 2012-01-11

作者简介: 李文涛(1987—),男,硕士研究生,主要从事新型结构光纤方面的研究。E-mail: wentaoxp@126.com

导师简介: 周秦岭(1975—),女,副研究员,主要从事微结构光纤设计与光传输特性等方面的研究。

E-mail: d-chen@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

高带来的限制,在设计和选用光纤时,应尽量减小掺杂纤芯数值孔径(NA),并相应地增大纤芯直径,从而使得基横模 LP_{01} 的模场直径变大。这种通过降低 NA 实现大纤芯直径光纤的技术被称为大模场面积光纤(LMAF)技术。

当前,制备大模场面积石英光纤主要有两种方式,其中之一是采用传统的“改进型化学气相沉积法”(MCVD),技术上可实现的最小 NA 为 0.05~0.06,但对应最大的单模纤芯直径不超过 35 μm 。MCVD 装置适合信号光纤的制备,而高功率激光器属于能量光纤,随着光纤激光器的发展,MCVD 的局限性就突显出来了。要保证光纤激光器在高功率工作时的模场稳定,对于光纤的结构和折射率匹配也有着非常高的要求,MCVD 方法制备这种光纤的技术难度很高。另一种是近年出现的光子晶体光纤(PCF,又称微结构光纤),由于光纤截面有着周期性的折射率分布,并且具有结构灵活性和折射率可调节性,目前被认为是实现大模场单模光纤最有效的方法,这种光纤也是激光光纤研究中最活跃的领域。PCF 在保持单模的前提下,可以进一步增加纤芯面积。纤芯面积的增大,一方面提高了激光损伤和非线性效应的阈值,同时还使得光纤的储能增加,有利于提高脉冲能量;另一方面,纤芯和内包层横截面积之比也大大增加,提高了光纤对抽运能量吸收的效率,这样就可以采用较短的光纤实现高功率激光输出,这也有利于克服非线性效应对输出功率提高的限制。

本文将着重对掺 Yb 大模场石英玻璃光纤的结构、性能进行介绍。

2 应用于高功率光纤激光系统中的大模场掺 Yb 石英玻璃光纤

高功率光纤激光器和放大器可以分为连续激光器和脉冲激光器。根据激光脉冲性能的不同,可分为高脉冲能量激光器和高平均功率激光器。表 1 列出光纤激光实验中所采用的光束质量接近衍射极限、激光参数相近的一些大模场掺 Yb 石英玻璃光纤。

表 1 高功率连续波光纤激光器

Table 1 High-power continuous-wave fiber lasers

Fiber	Diameter / μm	MFD / μm	NA	Output power / W	Laser type	M^2	Rear	References
DCF		9	0.3	110	Oscillator	1.7	1999	[3]
DCF	24.5	20	0.086	500	Oscillator	<1.5	2003	[4]
DCF	20		0.06	810	Oscillator	1.27	2004	[5]
DCF	40	34	<0.05	1360	Oscillator	1.4	2004	[6]
DCF	50		<0.06	2100	Oscillator	<1.2	2009	[7]
DCF				5000	MOPA	1.2	2008	[8]
DCF	30	29.86		10000	MOPA		2009	[9]
PCF		33	0.05	2100	MOPA	3.5	2011	[10]
DCF	50			4000	Oscillator	5 mm·mrad	2012	[11]

DCF; double cladding fiber; MOPA; master oscillator power amplifier; MFD; mode-field diameter

从表 1 可以看出,对比近几年关于双包层光纤(DCF)和 2011 年的 PCF 输出光功率,表明在高功率连续光纤激光器中,主要采用 DCF 和棒状 PCF。2004 年光纤激光输出功率超过千瓦量级,并且 2004 年以后高功率激光输出对应光纤芯径都超过 30 μm ,光纤数值孔径约为 0.06。

表 2 高平均功率脉冲光纤激光器

Table 2 High-average-power pulsed fiber lasers

Fiber	Diameter / μm	MFD / μm	Average power / W	Pulse energy / μJ	Pulse width / ps	Repetition frequency / MHz	Laser type	M^2	Year	Reference
DCF	30		43.2		10	80	MOPA	1.3	2001	[12]
PCF	40	35	48		10	80	MOPA	1.2	2004	[13]
PCF	40	35	131	1.8	0.2	73	Oscillator	1.2	2005	[14]
LCF	47		98	2	15	48	MOPA		2009	[15]
DCF	30		96		16	478	MOPA	1.5	2009	[16]
DCF		27	830	10.6	0.6	78	CPA	1.4	2010	[17]
PCF		62	294		0.8	4	CPA	1.4	2011	[18]

LCF; leakage channeled fiber; CPA; chirped pulse amplification

表 2 主要列举了重复频率在兆赫兹量级、脉冲宽度在皮秒量级的光纤激光器。在这些高平均功率脉冲激光器中主要采用大芯径的 DCF、棒状 PCF、泄漏通道光纤(LCF)等,光纤芯径大于 $30\ \mu\text{m}$ 。

表 3 主要列举了重复频率在千赫兹量级、脉冲宽度纳秒量级的光纤激光器。在这些高脉冲能量光纤激光器中,采用的光纤包括 PCF、棒状 PCF、LCF 和带隙型 PCF,最大芯径达到 $135\ \mu\text{m}$ 。

表 3 高能量脉冲光纤激光器

Table 3 High-energy pulsed fiber lasers

Fiber	Diameter / μm	Average power /W	Pulse energy /mJ	Pulse width /ns	Repetition frequency /kHz	Laser type	M^2	Year	References
DCF	25	2.2	0.25	0.8	8.5	MOPA	1.08	2002	[19]
PCF	40	9.5	0.7	0.45	13.4	MOPA	1.05	2005	[20]
PCF	100	42	4.3	1	9.6	MOPA	1.3	2006	[21]
LCF	53	15	0.6	0.6	25	MOPA	1.1	2009	[22]
CCC	35	114	1.14	10	100	MOPA	1.07	2009	[23]
PCF	100	55	1.1	1	50	MOPA	1.1	2010	[24]
PBGG	85	104	2	21	100	Oscillator	1.2	2011	[25]
PCF	135	130	26	50	5	MOPA	FM	2012	[26]

CCC: chirally coupled core fiber; PBGF: photonic band-gap fiber; FM: fundamental mode

综合表 1~3 的研究结果看,为了提高光纤激光系统的输出功率,通常会采用大芯径光纤。从表 1 和表 2 看,高平均功率输出的光纤激光器基本都采用双包层结构,包层结构光纤在高功率连续光纤激光系统中得到了较好的应用,双包层结构的光纤激光器很容易就达到千瓦甚至万瓦级的高平均功率输出。而新型大芯径微结构光纤,如棒状 PCF、LCF、螺旋耦合芯(CCC)光纤以及带隙型 PCF 在脉冲激光系统中应用较多。结合表 2 和表 3 对于高峰值功率和高能量脉冲激光,采用 PCF 结构光纤可以将纤芯做得很大,模场面积相应变大,更加适合高功率密度的脉冲激光。下面将对几种大模场掺 Yb 石英玻璃光纤进行介绍。

3 大模场掺 Yb 石英玻璃光纤的分类

根据结构形式不同,大模场掺 Yb 石英玻璃光纤可以分为包层结构光纤和微结构光纤以及其他新型光纤如多芯光纤等。

3.1 包层光纤

大芯径包层光纤包括传统的双包层光纤和超大芯径包层光纤。

3.1.1 双包层光纤

双包层 Yb 石英玻璃光纤^[27]主要包括纤芯、内包层、外包层和保护层。纤芯通常为圆形 Yb 掺杂石英玻璃,直径一般为 $20\sim 40\ \mu\text{m}$,数值孔径最低可以做到 0.06 左右,这也是该方法的工艺极限。内包层通常为纯石英玻璃,形状有圆形、方形、长方形、D 型、六角形和非稳腔结构等,直径通常为几百微米,数值孔径在 0.4~0.6 之间。和传统的单模光纤相比,大尺寸的内包层不仅增大了接收抽运光的面积,降低了单位面积上的功率密度,提高了抽运破坏阈值,而且大数值孔径有利于接收更多的抽运光,提高抽运光耦合效率。另外,双包层光纤纤芯的吸收系数与内包层和纤芯截面积之比有关,包层越厚,吸收系数越小。外包层通常为低折射率的软聚合物,外轮廓为圆形。保护层一般为硬聚合物。随着光纤技术的发展,大模场双包层光纤的结构越来越趋于标准化,并与半导体激光器尾纤参数相匹配,以尽可能提高抽运耦合效率。

大模场双包层掺 Yb 石英玻璃光纤通常采 MCVD 和溶液掺杂方法来制备,但是很难获得折射率和稀土离子均匀分布、与内包层折射率差足够低的大尺寸纤芯。从早期报道的文献看,大芯径双包层光纤纤芯中央有一个很深的折射率凹陷或起伏,如图 1 所示^[26,27]。这是由于烧结过程中物料挥发引起的。这个折射率凹陷不仅容易产生圆环型光场分布,而且即使是高斯型基模场分布,也很难滤除其中的高阶模。纤芯区折射率起伏对于大模场高功率激光的模式稳定性也会产生很大影响,不利于获得稳定的具有衍射极限的激光输出。随着光纤制备工艺的提高,如今高功率激光系统中所采用的大模场光纤已基本克服了纤芯中央折射率凹陷的问题^[10]。

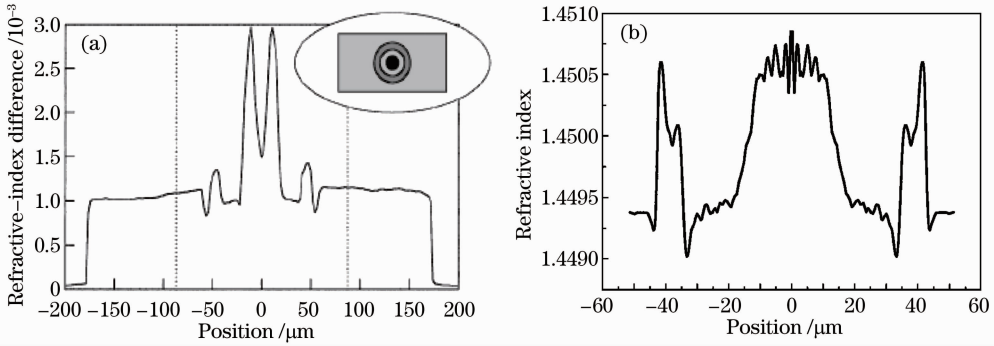


图1 双包层光纤截面折射率分布图。(a)文献[28];(b)文献[29]

Fig. 1 Refractive-index profile of the DCF cross section. (a) Ref. [28]; (b) Ref. [29]

利用传统的 MCVD 方法,很难获得稀土离子掺杂均匀、纤芯区折射率起伏在 10^{-4} 量级和数值孔径低于 0.06、芯径大于 $30 \mu\text{m}$ 的双包层光纤。从稀土离子掺杂浓度上看,掺杂浓度越高,越容易引起光致暗化效应。激光增益与翻转粒子数成正比,因而与稀土离子数也成正比。为了获得足够高的增益,在适当的掺杂浓度下,纤芯径越大,掺杂量越多,越容易实现高功率激光输出。为了获得芯径更大、可满足更高功率和高光束质量光纤激光技术发展需求的掺 Yb 光纤,需要在光纤制造工艺和光纤制作方法上探索新的途径。

为了克服 MCVD 方法在 Yb 掺杂大模场光纤制备上的局限性,近年来德国的 Heraeus 公司研究出用粉末烧结法制备 Yb 掺杂石英玻璃的方法,并成功用于超大模场石英光纤的研制^[30]。

3.1.2 超大芯径包层光纤

超大芯径包层光纤是指光纤芯径在 $35 \sim 100 \mu\text{m}$ 的包层光纤,光纤外径超过 1 mm ,主要用于高功率光纤激光系统。超大芯径纤芯在保证足够高增益的情况下,一方面可以降低 Yb 离子掺杂浓度,减少由量子亏损引起的热效应,另一方面,低浓度 Yb 掺杂也有利于避免光致暗化效应的发生。在高功率 Yb 光纤激光系统中得到成功应用的超大模场多包层光纤由德国 Heraeus 公司研制,光纤截面图如图 2(a)所示^[30]。图中光纤分成四层结构,其中 1 为纤芯,2 为未掺杂的 F300 熔石英玻璃作为内包层,3 为掺 F 的石英玻璃,4 为光纤保护套。芯层采用掺 Yb 石英玻璃纳米颗粒烧结形成。它克服了传统 MCVD 法中芯区 Yb 离子掺杂均匀性和折射率控制精度的局限性的影响。低羟基含量的 F300 熔石英玻璃管作为内包层,并将 F300 加工成 4 个非规则的 4D 形消除螺旋光。最后,在 F300 外面通过等离子体外沉积法沉积低折射率的圆形掺 F 石英玻璃外包层。低折射率石英玻璃外包层除了可以增大抽运包层的数值孔径(NA 为 0.27),提高对抽运光的吸收效率,在高功率激光系统中还可以承受更高的热容,增强激光输出稳定性。和传统的 MCVD 方法制得的大芯径光纤相比,利用粉末烧结法制备掺 Yb 石英棒作为纤芯,不仅纤芯尺寸可以控制在 $30 \sim 100 \mu\text{m}$,而且 Yb 分布均匀,折射率起伏控制在 10^{-4} 量级[如图 2(b)所示]^[31],有助于实现高功率高光束质量光纤激光。目前利用这种光纤采用半导体激光器直接抽运单根光纤已经获得了 4000 W 连续激光输出,光束发散角 $5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

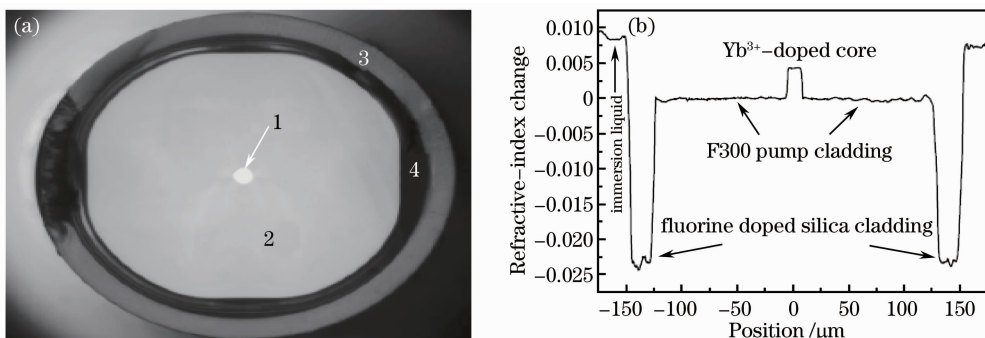


图2 (a)光纤截面图^[30]; (b)折射率分布图^[31]

Fig. 2 (a) Fiber cross section^[30]; (b) refractive-index profile^[31]

3.2 大模场 Yb 微结构光纤

由于大芯径包层结构光纤在实现单模激光方面具有自身的不足,为了获得高光束质量,不可避免地要采取额外的选模、滤模机制,这些机制破坏了传统光纤激光器固有的简单、便捷和一体化的特性。微结构光纤是近年来发展起来的新型光纤结构,通过光纤结构设计,弥补了传统光纤结构的不足,也成为近年来大芯径掺 Yb 石英玻璃光纤研制的热点。

微结构光纤主要的结构特征是光纤截面上包括多层波长量级的空气微孔,这些微孔贯穿于整个光纤长度上。中心区域空气微孔的缺失构成光纤纤芯。大芯径 Yb 微结构光纤中,中心区域一般为掺 Yb 的石英玻璃。包层空气孔还可以被掺 F 或掺 Ge 石英玻璃替代,就构成了全固态 Yb 微结构光纤。通过调节包层低折射率区域的大小、间隔周期、排列方式以及 Yb 掺杂区域的大小、折射率等,可以获得单模大模场光纤。

用于高功率光纤激光系统的大模场掺 Yb 微结构光纤主要有棒状 LCF、CCC 光纤和带隙型 PCF。

3.2.1 棒状光子晶体光纤

外径达毫米量级的大芯径 PCF 通常被称为棒状 PCF。众所周知,PCF 的波导性能调节自由度比较大,通过控制光纤截面上空气孔的大小、间隔周期、排列方式、层数以及将空气替换为其他基质材料(如高折射率或低折射率玻璃),或者将中心的缺陷换为稀土掺杂玻璃、低折射率玻璃等,都可以获得传统光纤无法获得的一些独特性能。大芯径稀土掺杂棒状 PCF 主要用于高功率激光系统中,通常为石英玻璃基质,纤芯部分为稀土掺杂石英玻璃。图 3 中给出了近几年来得到成功应用的几种棒状 PCF 的截面图。从这几种光纤结构看,纤芯区轮廓由最初的三角形转变到六边形,而六边形结构中纤芯由多层孔缺失转变到单个空气孔缺失,这些结构的变化,不仅使模面积增大,而且在高功率下模式稳定性更好,更容易实现单模激光输出。为了实现高功率激光,棒状 PCF 通常采用双包层的结构形式,即高 NA 的大空气孔区域为外包层,低 NA 的小空气孔区为内包层。和稀土掺杂大芯径 DCF 相比,棒状 PCF 的优点是容易获得单模大模面积,缺点是制作工艺复杂,很难获得理想结构的低基质损耗的光纤,另外外包层空气孔结构也不利于由抽运吸收导致的热容及时扩散,而热管理是高功率激光系统中需要解决的重要问题,它将决定光纤激光器的输出功率和模式特性。由于空气孔的存在,因此与传统光纤低损耗熔接也非常关键。但是目前 PCF 的研究还处于发展阶段,光纤的结构和性能都在逐步的改善中,随着进一步的研究,最后必将解决这一系列的问题。

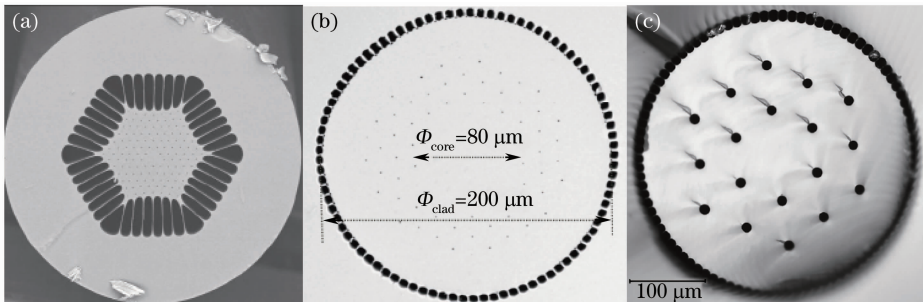


图 3 棒状光子晶体光纤截面图。(a)文献[32];(b)文献[33];(c)文献[34]

Fig. 3 Cross section of the rod PCF. (a) Ref. [32]; (b) Ref. [33]; (c) Ref. [34]

3.2.2 泄漏通道光纤

LCF 的截面结构图如图 4 所示。图 4(a)为非保偏掺 Yb 光纤,图 4(b)为保偏掺 Yb 光纤。LCF 通常采用堆积-拉丝方法制作。在图 4(a)所示光纤截面上中心为纤芯区,外边两层(或几层)大直径低折射率的圆形区域(少量掺 F)环绕在纤芯外形成内包层,六边形的高掺 F 石英玻璃层包覆在内包层外构成抽运层。抽运层外为涂覆层。保偏光纤与非保偏光纤结构类似,差别之处在于内包层区第一层中的两个掺 F 玻璃微区被更低折射率的材料替代,产生应力双折射。LCF 通过全内反射机理导

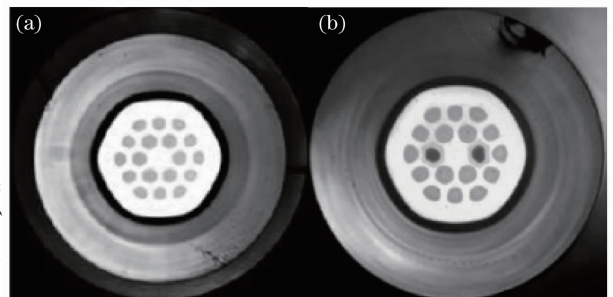


图 4 泄漏通道光纤截面图。(a)文献[35];(b)文献[36]

Fig. 4 Cross section of LCF. (a) Ref. [35]; (b) Ref. [36]

光,通过调整内包层中低折射率区域的大小、间隔周期以及与背底玻璃的折射率差,使纤芯区高阶模通过共振效应耦合到包层区域,纤芯区域只有基模以低损耗方式传播。和棒状 PCF 相比,PCF 的优势在于在获得单模大芯径传输的同时仍具有优良的弯曲特性,其全固态结构容易与传统光纤熔接,利于系统集成,而缺点主要是制作难度比较大,很难获得设计要求的光纤。

3.2.3 螺旋耦合芯光纤

对于传统的大芯径包层结构光纤,由于纤芯中仍含有少量的高阶模,为了获得单模激光输出,就需要采用一些特殊的激光腔结构或选择性激发基模。这些复杂的选模机制破坏了传统低功率光纤激光器结构紧凑、体积小的优点。美国密执安大学与 Nufern 公司合作在 2008 年研制了一种新型掺 Yb 的螺旋耦合芯光纤即 CCC 光纤,简称 3C 光纤^[37]。这种全固态光纤依靠自身的波导结构进行选模,实现大芯径单模激光传输,不需要额外的选模机制。这不仅解决了与其他光纤元器件的耦合、熔接问题,而且满足了高功率光纤激光器对大模场有源光纤的要求。CCC 光纤的结构如图 5 所示。

CCC 光纤截面内包括一根掺 Yb 的有源光纤和至少一根无源光纤,无源光纤以螺旋形式缠绕在有源光纤外边,在有源与无源光纤外用低折射率有机涂覆层做光纤包层。Yb CCC 石英玻璃光纤中的有源光纤为大芯径多模光纤,为了滤掉其中的高阶模实现单横模传输,需要合理控制螺旋缠绕的无源光纤在有源直光纤上的缠绕周期、有源与无源光纤芯间的距离、有源光纤与无源光纤的芯径、数值孔径以及与有机涂覆层间的数值孔径等,通过准相位匹配选择性地将有源光纤纤芯中的高阶模耦合到螺旋形缠绕的无源光纤中。有源光纤纤芯区只有基模低损耗传输。理论研究表明 CCC 光纤在光纤芯径 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 时仍可实现单模。对于掺 Yb CCC 石英玻璃光纤,其显著优点是容易与现有的光纤元器件熔接,实现光纤一体化高功率激光。掺 Yb CCC 石英玻璃光纤是近几年才发展起来的一种新型大芯径有源光纤,理论和实验研究还在探索之中。另外,制作工艺相对而言也比较复杂。掺 Yb CCC 石英玻璃光纤在高功率激光系统中的成功应用也正吸引着越来越多研究机构的关注。

3.2.4 带隙型光子晶体光纤

掺 Yb 带隙型 PCF(或 PBGF)是依靠包层光子带隙导光的一种新型光纤结构。和普通 PCF 不同的是,部分包层空气孔内壁包含一层掺锗石英玻璃层,如图 6(a)中有亮环的区域,或包层中的空气孔被掺锗石英玻璃棒代替,如图 6(b)的白色区域,纤芯区为掺 Yb 石英玻璃。包层结构形成的光子能带与波导结构对纤芯区传导的光波具有一定的导光和滤波作用,只有特定波段的光波才能沿纤芯区传播。对于掺 Yb 带隙型石英玻璃 PCF,精确控制光纤截面上不同区域的折射率配比和精度以及沿光纤轴向的均匀性控制是关键。目前获得高功率激光输出的掺 Yb 带隙型石英玻璃 PCF 均由丹麦 NKT 公司制作^[25,39]。

未来光纤激光器的发展挑战在于在满足高功率平均功率的同时具有高能量的脉冲激光输出。目前,限制大模场光纤(包括阶跃型光纤和 PCF)发展的因素在于其模场的稳定性^[40],模场的不稳定导致输出光束的波动。但是新型光纤结构的设计可以克服这一问题。其中,最有前景的方法就是大周期微结构光纤(LPG)^[41,42],已有相关文献数据证明该方法的可行性。这表明 PCF 在模场方面有更大的应用前景。

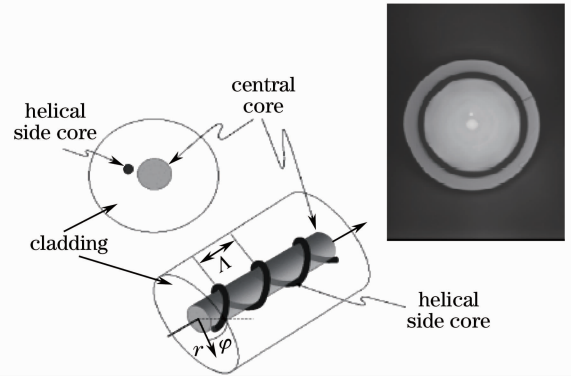


图 5 掺 Yb 的 CCC 结构光纤结构图^[38]

Fig. 5 Structure of Yb-doped CCC fiber^[38]

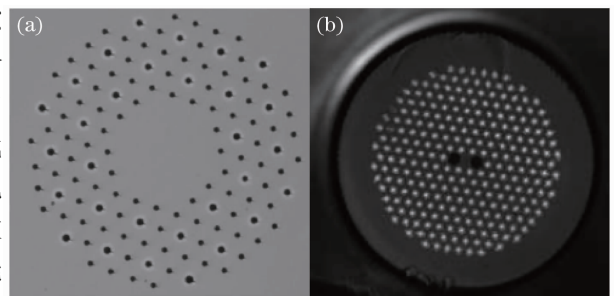


图 6 带隙型光子晶体光纤截面图。(a)文献[25];

(b)文献[39]

Fig. 6 Cross section of PBGF. (a) Ref. [25];

(b) Ref. [39]

4 其他大模场光纤

4.1 多芯光纤

多芯光纤就是在一个共用的内包层中嵌埋很多根掺杂的单模纤芯,抽运光同时对所有的掺杂纤芯进行抽运,在光纤输出端就能获得多路光纤激光。多芯光纤可以增大光纤的有效模场面积,提高非线性阈值。中国科学院上海光学精密机械研究所结合管棒法和堆叠法制备了双芯结构、三芯结构和七芯结构的光纤。利用堆积法制作出 ND 掺杂的磷酸盐玻璃双芯光纤(TCF)。结合管棒法,设计出一种能够任意调节芯径与芯间距比例的制备方法,激光最大输出功率达到 52 mW,对应的斜率效率为 27.1%^[43];七芯光纤实现了 60 mW 的激光输出,实验观察到光纤的有效模场面积明显提高^[44]。

4.2 螺旋芯光纤

螺旋芯光纤是在光纤拉制时将纤芯拉制成螺旋状。预制棒拉制光纤的同时沿中心轴均匀旋转预制棒,旋转速度决定螺旋芯的螺距。2003 年 Soh 等^[45]对这种光纤进行了模式损耗计算。同年,南安普顿大学报道了使用螺旋结构光纤 2.2 W 抽运产生 350 mW 的单模输出,光束质量 $M^2 < 1.1$,直径 26 μm ,螺距 5.2 mm,内包层 400 μm ^[46]。2006 年同样的结构实现了 60.4 W 单模输出^[25]。

5 国内大模场光纤研制发展现状

近年来,国内在高功率大模场光纤方面也开展了很多实验研究,涉及的光纤包括大芯径 DCF 和棒状 PCF。2009 年,中国科学院上海光学精密机械研究所利用烽火科技有限公司的 DCF 获得 1750 W 的连续激光,这是利用国产光纤获得的最大连续激光功率,其中光纤芯径 43 μm ,内包层尺寸 600 $\mu\text{m} \times 650 \mu\text{m}$ ^[47]。2011 年,清华大学用电子科技集团公司第 46 所制备的芯径 95 μm D 型结构 DCF 通过一级放大获得了脉冲能量 12 mJ、脉冲宽度 11 ns、重复频率 10 Hz 和带宽 0.1 nm 的激光,这是目前利用国产光纤获得的最大脉冲能量^[48]。所用光纤如图 7 所示,纤芯数值孔径 0.08,内包层数值孔径 0.5,D 型内包层的尺寸为 560 $\mu\text{m} \times 630 \mu\text{m}$ 。2011 年,国防科学技术大学采用电子科技集团公司第 23 所研制的双包层光纤在 1018 nm 波段获得了 10.1 W 的全光纤激光^[49]。

在掺 Yb PCF 方面,光电科技集团公司第 46 所和第 23 所、烽火科技有限公司、华中科技大学、燕山大学和中国科学院上海光学精密机械研究所等都开展了相应的研制与激光实验研究,但在激光输出方面效果并不理想。图 8 给出了几种国产的掺 Yb PCF 结构。从图中可以看出,国产微结构大模场光纤与国外的光纤还有很大的差距,表现在光纤空气孔包层结构、纤芯与包层区的截面积比例、纤芯与包层纯石英玻璃的折射率匹配等方面。这些光纤激光实验效果不佳,主要是光纤的本征损耗、掺 Yb 石英玻璃纤芯质量差、与包层的折射率不匹配等关键因素影响了激光输出。掺 Yb 石英玻璃棒目前还没有实现商品化,国内基本还是采用传统的通信光纤制备工艺,还无法获得大尺寸、掺杂均匀以及无石英玻璃包层的纯 Yb 石英玻璃棒,这无疑也增大了大模场掺 Yb 石英玻璃微结构光纤制备的难度。目前,中国科学院上海光学精密机械研究所在用溶胶-凝胶方法和燕山大学在用熔融方法尝试制备 Yb 石英玻璃芯棒,取得了一些结果。中国科学院上海光学精密机械研究所采用溶胶-凝胶方法制备出 Yb 掺杂的石英玻璃棒,通过堆积法制备出预制棒,拉制出纤芯直径 43 μm ,内包层直径 347 μm 的 PCF,光纤在 970 nm 处吸收系数为 9 dB/m,激光实验中产生 32 W 的激光输出,激光斜率效率约 49%,平均光束质量因子 M^2 为 7.47^[50,51]。

显然,这些结果离实用化还有很大的距离,如果要在光纤制备工艺上取得突破,还必须开展新的制备设备的研制工作,例如无套管沉积工艺设备、烧结成棒工艺设备等。

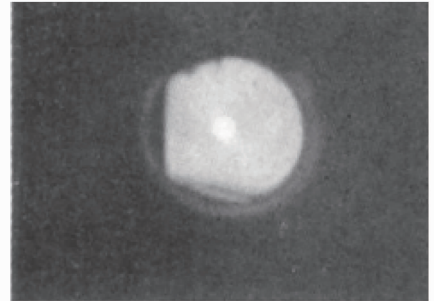


图 7 国产大芯径掺 Yb 双包层石英玻璃光纤截面图^[48]

Fig. 7 Cross section of domestic large-core Yb-doped double cladding silica glass fiber^[48]

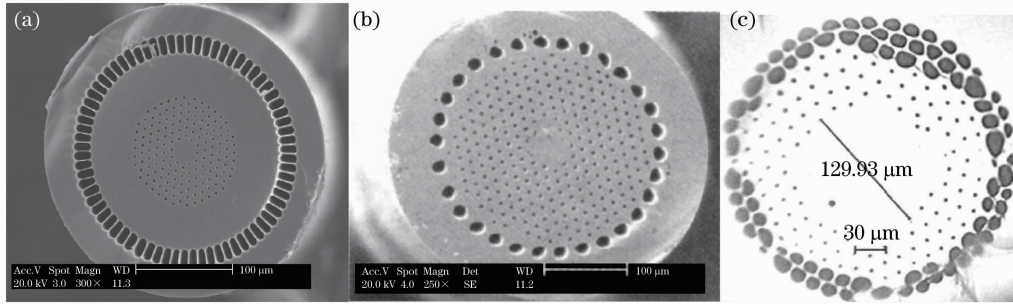


图 8 国产大芯径棒状掺 Yb 石英玻璃微结构光纤截面图。(a)文献[48];(b)文献[49];(c)文献[50]

Fig. 8 Cross section of domestic large-core Yb-doped silica glass rod PCF. (a) Ref. [48]; (b) Ref. [49]; (c) Ref. [50]

6 结束语

相比国际上高功率大模场掺 Yb 石英玻璃光纤的发展,国内在光纤研制方面还有较大差距,主要表现在以下几个方面:

首先,高质量的掺杂 Yb 石英玻璃棒是大芯径光纤制备的关键,由于多种因素限制,特别是在制备设备的限制,目前国内在高质量掺 Yb 芯棒制备方面还没有实现实质性的突破,这也是限制大模场掺 Yb 石英玻璃光纤质量提高的主要因素。

其次,大芯径掺 Yb 石英玻璃光纤结构设计与光纤制备以及激光器性能从研究到产品不能形成有机的联动反馈机制,因此新型光纤研制进展比较缓慢。现在不同类型的大芯径掺 Yb 石英玻璃光纤被国际上几家研究机构和公司,如 IPG、SPI、IMRA 公司等垄断,包括光纤结构设计、光纤制备以及激光性能研究等。这也是我国高功率光纤激光技术发展的方向。

未来深入研究大芯径掺 Yb 石英玻璃光纤首先应该研究其结构与性能,研制新型、制作工艺简单、具有自身选模滤模特性、易于实现光纤一体化的大模场全固态光纤,同时以光纤光栅、PCF 等为基础研究新型激光器件,为光纤激光器的研究开辟新思路。此外,还可基于石英玻璃利用掺 F、Ge 等调节折射率进行匹配,制作微结构光纤,尤其是带隙型的 PCF,利用带隙型光纤的一些新型的特征进项研究,如超连续光谱产生、光纤光栅等。

参 考 文 献

- 1 E. Snitzer. Optical maser action in Nd^{3+} in a barium crown glass[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, **7**(12): 444~449
- 2 M. Nakazawa, Y. Kimura, K. Suzuki. Efficient Er^{3+} -doped optical fiber amplifier pumped by a 1.48 μm InGaAsP laser diode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(4): 295~297
- 3 V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*: 110 W fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14): 1158~1160
- 4 I. Limpert, A. Liem, H. Zellmer *et al.*: 500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(8): 645~647
- 5 C. H. Liu, B. Ehlers, F. Doerfel *et al.*: 810 W continuous-wave and single transverse-mode fibre laser using 20 μm core Yb-doped double-clad fibre[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(23): 1471~1472
- 6 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
- 7 Yoonchan Jeong, Alexander J. Boyland, Jayanta K. Sahu *et al.*: Multi-kilowatt single-mode ytterbium-doped large-core fiber laser[J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2009, **13**(4): 416~422
- 8 J. Wallace. 5 kW single-Mode Fiber Laser is Cutting-Edge in More Ways than One[OL]. <http://www.laserfocusworld.com/articles/2009/03/5-kw-single-mode-fiber-laser-is-cutting-edge-in-more-ways-than-one.html>, March 11, 2009
- 9 IPG Photonics Corp.: Single-Mode Fiber Laser Produces Bright, 10 kW Output[OL]. <http://news.thomasnet.com/fullstor/single-mode-fiber-laser-produces-bright-10-kw-output-562108>, June 17, 2009
- 10 Christian Wirth, Oliver Schmidt, Igor Tsybin *et al.*: High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(16): 3118~3120
- 11 Andreas Langner, Mario Sucha, Gerhard Schötz *et al.*: Multi-kW single fiber laser based on an extra large mode area fiber

- design[C]. *SPIE*, 2012, **8237**: 82370F
- 12 J. Limpert, A. Liem, T. Gabler *et al.*. High-average-power picosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(23): 1849~1851
- 13 J. Limpert, A. Liem, M. Reich *et al.*. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **12**(7): 1313~1316
- 14 F. Röser, J. Rothhard, B. Ortac *et al.*. 131 W 220 fs fiber laser system[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20): 2754~2756
- 15 Libin Fu, Andrius Marcinkevicius, Hugh A. McKay *et al.*. All-glass leakage channel fibers with fluorine-doped silica pump cladding[C]. CLEO/IQEC, 2009, CThR4
- 16 Sheng-Ping Chen, Hong-Wei Chen, Jing Hou *et al.*. 100 W all fiber picosecond MOPA laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 24008~24012
- 17 Tino Eidam, Stefan Hanf, Enrico Seise *et al.*. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(2): 94~96
- 18 Fabian Stutzki, Florian Jansen, Tino Eidam *et al.*. High average power large-pitch fiber amplifier with robust single-mode operation[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(5): 689~691
- 19 Fabio Di Teodoro, Jeffrey P. Koplou, Sean W. Moore *et al.*. Diffraction-limited, 300-kW peak-power pulses from a coiled multimode fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(7): 518~520
- 20 Fabio Di Teodoro, Christopher D. Brooks. Multistage Yb-doped fiber amplifier generating megawatt peak-power, subnanosecond pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3299~3301
- 21 Christopher D. Brooks, Fabio Di Teodoro. Multi-megawatt peak-power single-transverse-mode operation of a 100 μm core diameter, Yb-doped rod-like photonic crystal fiber amplifier[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(11): 111119
- 22 Liang Dong, Hugh A. McKay, Andrius Marcinkevicius *et al.*. Extending effective area of fundamental mode in optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(11): 1565~1570
- 23 Chi-Hung Liu, Shenghong Huang, Cheng Zhu *et al.*. High energy and high power pulsed chirally-coupled core fiber laser system[C]. ASSP, 2009, MD2
- 24 Fabio Di Teodoro, Michael K. Hemmat, Joseph Morais *et al.*. High peak power operation of a 100 μm -core, Yb-doped rod-type photonic crystal fiber amplifier[C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 758006
- 25 Marko Laurila, Julien Saby, Thomas T. Alkeskjold *et al.*. Q-switching and efficient harmonic generation from a single-mode LMA photonic bandgap rod fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(11): 10824~10833
- 26 Florian Jansen, Fabian Stutzki, Andreas Liem *et al.*. High power Q-switched fiber laser system delivering 22 mJ pulse energy with excellent beam quality[C]. AASSP, 2012, AT1A.4
- 27 Gan Fuxi, Xu Lei, Chen Wei. Photonic Glasses and Their Applications[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2011. 209~213
- 干福熹, 徐雷, 陈伟编. 光子学玻璃及应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011. 209~213
- 28 J. A. Alvarez-Chavez, H. L. Offerhaus, J. Nilsson *et al.*. High-energy, high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 37~39
- 29 J. Limpert, A. Liem, T. Gabler *et al.*. High-average-power picosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(23): 1849~1852
- 30 Andreas Langner, Mario Sucha, Gerhard Schötza *et al.*. New developments in high power fiber lasers based on alternative materials[C]. *SPIE*, 2011, **7914**: 79141U
- 31 Martin Leich, Florian Just, Andreas Langner *et al.*. Highly efficient Yb-doped silica fibers prepared by powder sinter technology[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(9): 1557~1559
- 32 J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte *et al.*. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(7): 818~823
- 33 Johan Boulet, Yoann Zaouter, François Salin *et al.*. 94-W Ytterbium-doped single-mode rod-type photonic crystal fiber operating at 977 nm[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719504
- 34 Florian Jansen, Fabian Stutzki, Tino Eidam *et al.*. Yb-doped large pitch fiber with 105 μm mode field diameter[C]. OFC/NFOEC, 2011, OTuC5
- 35 Liang Dong, Hugh A. McKay, Libin Fu *et al.*. Ytterbium-doped all glass leakage channel fibers with highly fluorine-doped silica pump cladding[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11): 8962~8969
- 36 Libin Fu, Hugh A. McKay, Shigeru Suzuki *et al.*. All-glass PM leakage channel fibers with up to 80 μm core diameters for high gain and high peak power fiber amplifiers[C]. ASSP, 2009, MF3

- 37 Doug Guertin, Nick Jacobsen, Kanishka Tankala *et al.*. 33 μm core effectively single-mode chirally-coupled-core fiber laser at 1064 nm[C]. OFC, 2008, OWU2
- 38 Michelle L. Stock, Chi-Hung Liu, Andrey Kuznetsov *et al.*. Polarized, 100 kW peak power, high brightness nanosecond lasers based on 3C optical fiber[C]. SPIE, 2011, **7914**: 79140U
- 39 Christina B. Olausson, Akira Shirakawa, Meishin Chen *et al.*. 167 W, 1178 nm ytterbium-doped photonic bandgap fiber amplifier with power scalability[C]. CLEO/QELS, 2010, CTuC2
- 40 Tino Eidam, Steffen Hädrich, Florian Jansen *et al.*. Preferential gain photonic-crystal fiber for mode stabilization at high average powers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(9): 8656~8661
- 41 Fabian Stutzki, Florian Jansen, Tino Eidam *et al.*. Robust single-mode high average power very large mode area fiber amplifiers[C]. ASSP, 2011, AMB11
- 42 Florian Jansen, Fabian Stutzki, Hans-Jürgen Otto *et al.*. The influence of index-depressions in core-pumped Yb-doped large pitch fibers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 26834~26842
- 43 Zhang Guang, Li Kefeng, Hu Lili *et al.*. Self-phase-locking action in a phosphate twin-core fiber and its fabrication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0102002
张光, 李科峰, 胡丽丽等. 磷酸盐双芯光纤的制作和自锁相激光输出[J]. 中国激光, 2012, **39**(1): 0102002
- 44 Zhang Guang. Fabrication and Lasing Performance of Phosphate Glass Microstructured Fiber[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012. 94~96
张光. 磷酸盐玻璃微结构光纤制备及激光性能研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2012. 94~96
- 45 D. B. S. Soh, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Geometrical factor modification of helical-core fiber radiation loss formula[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **222**(4-6): 235~242
- 46 P. Wang, L. J. Cooper, W. A. Clarkson *et al.*. Helical-core Yb-doped fibre laser[C]. CLEO/Europe 2003, 2003. 612~612
- 47 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
- 48 Pan Rong, Wang Dongbo, Ning Ding *et al.*. Research and fabrication of large mode area fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(6): 632~634
潘蓉, 王东波, 宁鼎等. 超大模场双包层光纤的制备与性能测试[J]. 激光与红外, 2010, **40**(6): 632~634
- 49 肖虎, 周朴, 王小林等. 基于国产双包层掺镱光纤的 1018 nm 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 199
- 50 Shaojun Liu, Haiyuan Li, Yongxing Tang *et al.*. Fabrication and spectroscopic properties of Yb³⁺-doped silica glasses using the sol-gel method[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(8): 81601
- 51 Liu Shaojun. Investigation on Fabrication and Spectroscopic Properties of Yb³⁺-Doped Silica Glass and PCF Fiber by Sol-Gel Method[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012. 51~54
刘少俊. 溶胶-凝胶法制备掺镱石英玻璃和光子晶体光纤的研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究, 2012. 51~54
- 52 Wei Chen, Shiyu Li, Peixiang Lu *et al.*. High performance large mode-area ytterbium-doped photonic crystal fiber for fiber lasers[J]. *J. Phys.: Conference Series*, 2011, **276**(1): 012002
- 53 Pan Rong, Ning Ding, Liu Xiaodong *et al.*. Fabrication and performance testing of large-mode area Yb-doped photonic crystal fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(10): 1080~1082
潘蓉, 宁鼎, 刘笑东等. 大模面积掺镱光子晶体光纤的制备与性能测试[J]. 激光与红外, 2010, **40**(10): 1080~1082
- 54 Zhao Xingtao, Zheng Yi, Liu Xiaoxu *et al.*. Fabrication of Yb³⁺-doped photonic crystal fiber by nonchemical vapor-deposition process[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(9): 1301~1303
赵兴涛, 郑义, 刘晓旭等. 利用非化学汽相沉积法制备掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤的研究[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(9): 1301~1303