

多芯光纤激光器选模特性及其研究进展

刘业辉 李进延

华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 纤芯激光功率密度过高,易引起非线性效应,导致激光损伤,限制光纤激光器输出功率的提高,采用多芯光纤是解决这一问题的有效方案之一。同相位超模的选择和多芯光纤的制作是影响多芯光纤激光器发展的主要因素,因此实现同相位超模运转的大模场面积多芯光纤研究成为近年来国内外研究人员关注的热点。详细介绍了当前多芯光纤选模及制造技术的研究进展,通过对比几种技术方案的可行性,展望了高功率多芯光纤激光器单模运转的发展前景。

关键词 光纤光学; 光纤激光器; 多芯光纤; 超模选择

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.050005

Mode Properties and Progress of Multi-Core Fiber Lasers

Liu Yehui Li Jinyan

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Excessively high laser power density of the fiber core causes nonlinear effect and laser damage, which limits the output power enhancement of the fiber lasers. Using the multi-core fiber is one of the most effective schemes to solve this problem. The selection of in-phase supermode and the fabrication of multi-core fiber are the key factors for limiting the progress in multi-core fiber lasers. Therefore, how to realize a multi-core fiber with a large mode area and an in-phase supermode has attracted the attention of domestic and foreign researchers in recent years. The latest progress in mode selection and fabrication technology for multi-core fibers is illustrated, and the development prospect of realizing high power single-mode multi-core fiber lasers is proposed by evaluating the feasibility of several technical solutions.

Key words fiber optics; fiber lasers; multi-core fiber; supermode selection

OCIS codes 060.2430; 060.3510; 060.2280; 140.3510

1 引言

光纤激光器因其高光束质量、高斜率效率、良好的散热性能和易于集成等优点得到迅速发展,广泛应用于光通信、生物医疗、工业加工和国防应用^[1-6]等领域,成为激光行业的发展潮流。近年来,随着激光技术的迅猛发展,激光输出功率得到了很大提高,已达到万瓦量级平均功率^[7]和兆瓦量级峰值功率^[8],但是高功率激光的输出会导致光纤功率密度过高,易引起严重的非线性效应并产生光纤损伤。1996年,Scifres^[9]提出的多芯光纤(MCF)可以很好地解决上述问题。多芯光纤在同一个包层下可以同时具有多个纤芯,所以使用多芯光纤能达到非常大的有效模场面积,提高非线性阈值,利于散热,从而提高输出功率。

收稿日期: 2015-11-23; **收到修改稿日期:** 2015-12-08; **网络出版日期:** 2016-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61575075)

作者简介: 刘业辉(1992-),男,博士研究生,主要从事新型掺稀土光纤及光纤激光器等方面的研究。

E-mail: lyh@hust.edu.cn

导师简介: 李进延(1972-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事新型光纤材料与器件、掺稀土光纤、光纤激光器、光纤放大器、光子晶体光纤等方面的研究。E-mail: lji@hust.edu.cn(通信联系人)

由于多芯光纤独到的优势特点,近年来已经有大量多芯光纤激光器的报道。本文从多芯光纤选模特性的角度出发,综述了多芯光纤激光器的发展现状,介绍了目前多芯光纤可实现的制备工艺问题,为高功率激光器的发展提供了新的有效途径。

2 多芯光纤激光器的选模方法

多芯光纤由于芯间的强耦合作用会产生超模,不同的纤芯大小及芯间距离都会产生不同类型的超模。 N 个纤芯具有 N 类超模,但只有同相位超模具有衍射极限特性,所以如何选出同相位超模来实现高功率单模运转是一个很关键的问题。

2.1 泰伯(Talbot)腔选模法

1836年,Talbot^[10]发现当一束相干光束照射周期性排列的物体时,在传输方向上存在周期性自映像,这种现象被称为Talbot效应。2000年,Wrage等^[11]用数值孔径为0.16、纤芯直径为 $8\ \mu\text{m}$ 、包层厚度为 $131\ \mu\text{m}$ 的18芯环形掺铈光纤尾端搭建了Talbot腔,如图1所示,通过移动后腔镜的位置选择不同的超模,实现了1060 nm波段的相位稳定输出,其中 Z_M 为泰伯距离。2001年,该团队在Talbot腔的基础上用微结构反射镜代替普通的平面反射镜,获得斜率效率为16%的5.5 W激光输出,使超模的选择效率得到进一步提高^[12]。2002年,该团队用数值孔径为0.16、长为1.45 mm的环形波导光纤替代Talbot腔,30 W的抽运功率最高可得到6 W的激光输出^[13]。2014年,Chen等^[14]分析了Talbot模式的竞争机制,得出了7芯和19芯多芯光纤的最佳Talbot距离,研究了不同芯子大小和纤芯距离对输出光束质量的影响,为实验的深入研究提供了理论方法。

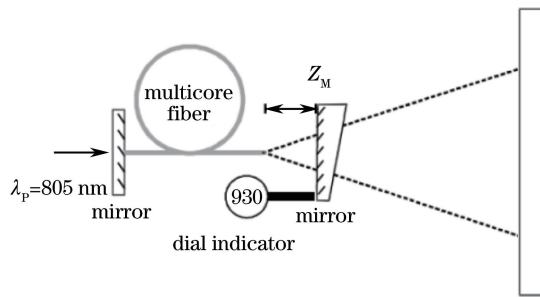


图1 泰伯腔

Fig. 1 Talbot cavity

2.2 非线性选模法

2001年,Cheo等^[15]用长为15 m、纤芯直径为 $7\ \mu\text{m}$ 、芯距为 $10.5\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为0.085的六角形等距式7芯光纤搭建激光系统,发现当抽运光功率超过一定阈值时,同相位超模出现,而其他相位模式被抑制,且测得激光斜率效率为65.2%。2003年,Bochove等^[16]从理论上分析了这种非线性效应存在的原因,发现掺铈光纤在抽运光波长为915 nm的条件下,当抽运强度变化时,掺铈纤芯的非线性折射率也会发生改变,导致光纤内部发生非线性光学效应,从而选出同相位超模,并且测试得到输出光束质量因子 M^2 为1.5。

2.3 主振荡光纤放大(MOFA)选模法

2004年,PC公司Huo等^[17]用Q调制光纤激光器产生的 M^2 接近1的激光作为种子源,对Nufern公司制造的长为5.8 m的19芯光纤进行放大,光纤截面如图2(a)、(b)所示,图2(c)为系统结构,其中AOQS为声光调Q,M为反射镜,P为功率,SM为单模。实验得到 M^2 为1.5的近衍射极限的脉冲输出,重复频率为5 kHz处的增益放大为20 dB,输出脉冲能量为0.65 mJ,平均功率为3.5 W,没有发生受激布里渊散射现象。2009年,Shalaby等^[18]用单模反馈光纤与长为75 cm、纤芯直径为 $6.3\ \mu\text{m}$ 、芯距为 $9\ \mu\text{m}$ 的7芯光纤搭建了一个反馈腔系统,获得3 dB带宽为0.13 nm。2010年,该团队又以一段长为3 m、纤芯直径为 $7\ \mu\text{m}$ 、芯距为 $10.5\ \mu\text{m}$ 的19芯光纤为增益介质,搭建了反馈腔系统,在抽运功率为17.5 W时获得最大功率为2.3 W的激光输出,且 M^2 达到1.21^[19]。2011年,该团队为探究同相位超模的干涉场分布,将种子源分束输出为相同比例的两束种子光,一束光耦合进入长度为65 cm的7芯光纤中,另一束光耦合进入长度为35 cm的相同光纤

中,实验装置如图3所示^[20],其中ISO为光隔离器,SMFF为单模反馈光纤,YDFA为掺镱光纤放大器,PC为偏振控制器,IS为成像系统,OC为输出耦合器,L为透镜, d 和 D 分别表示两MCF中心距离和其输出光束中心距离,P为偏光器。调整种子光输入到高斯光束束腰位置,使光束经过多芯光纤后同相位超模占最大的比例,束腰半径为 $12\ \mu\text{m}$ 时同相位超模占97%,最后得到的远场干涉图与模拟干涉图基本一致。同年,Kochanowicz等^[21]将纤芯直径为 $11\ \mu\text{m}$ 、芯距为 $18\ \mu\text{m}$ 、归一化频率为1.7的19芯掺镱光纤作为放大光纤,以Nufern公司制造的纤芯直径为 $20\ \mu\text{m}$ 、包层直径为 $400\ \mu\text{m}$ 的掺镱光纤作为种子源,并用同向抽运的方式进行抽运光输入,最终得到BQF(另一种光束质量因子测量方法)为0.91的激光输出。2014年,Otto等^[22]设计了一字型排列的4芯光纤,以此来研究多芯光纤模式的不稳定(MIs)问题。研究结果发现,单芯时输出功率为147 W时模式输出不稳定;4芯时,输出功率为536 W时,MIs与纤芯数成一定比例。

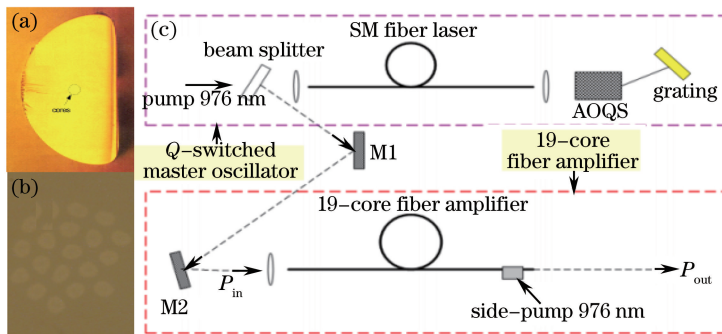


图2 (a) D形 Nufern 光纤截面图; (b) 19 芯光纤芯子结构; (c) MOFA 实验装置图

Fig. 2 (a) Cross section of D-shape Nufern fiber; (b) configuration of cores in 19-core fiber; (c) experimental setup of MOFA

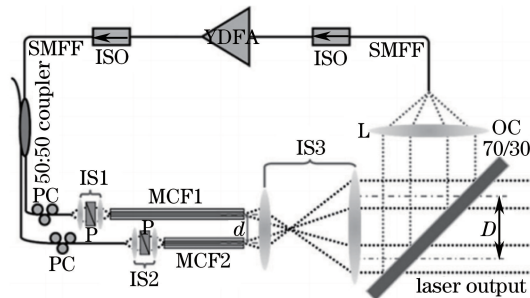


图3 两束多芯光纤相干实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of interferometry of two multi-core optical fibers

2.4 自傅里叶腔选模法

2005年,Corcoran等^[23]用7根独立输出的光纤激光构成自傅里叶腔,得到稳定的相位锁模激光,输出光束的远场边缘可见度达到0.87,激光耦合率为0.73,最大输出功率达到0.4 W。2007年,Bochove等^[24]对自傅里叶腔进行了理论和实验验证,发现通过设置搭建的自傅里叶腔参数,可以改变每种超模所占的比例,而且得到的基模增益比高阶模增益高30 dB,验证了该选模方式的有效性。

2.5 光纤结构选模法

2005年,Cooper等^[25]设计了一种带状结构10芯光纤,如图4(a)所示,掺镱纤芯 x 方向大小为 $20\ \mu\text{m}$, y 方向为 $23\ \mu\text{m}$,用976 nm激光二极管进行抽运,长度为2.1 m的光纤最大输出功率可达到320 W,单个芯在 x 方向上获得的 M^2 为1.8, y 方向 M^2 为2.3,斜率效率为62%。2007年,Zhu等^[26]报道了一种具有双折射且输出同相位超模的相位锁模多芯光纤激光器,该多芯光纤由12芯矩形排列纤芯组成,光纤端面如图4(b)所示,纤芯直径为 $8.5\ \mu\text{m}$ 、芯距为 $8\ \mu\text{m}$,最大输出功率为2.6 W,斜率效率达到10%,在744 MHz输出脉冲两边有对称的624 MHz和864 MHz脉冲,测出双折射率系数 $\Delta\gamma$ 约为 $4 \times 10^{-6}\ \mu\text{m}^{-1}$ 。2009年,Vogel等^[27]报道了一种大模场单模运转多芯光纤,该光纤纤芯直径为 $2\ \mu\text{m}$ 、芯距为 $5.5\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为0.108,是包层直径为 $250\ \mu\text{m}$ 的19芯光纤,有效模场面积为 $465\ \mu\text{m}^2$,测得 x 方向和 y 方向的 M^2 都为1.02。2011年,Wang等^[28]设计了一种可以直接得到同相位超模的多芯光纤结构,如图4(c)所示,其中 d_s 为椭圆芯短轴长

度, d_L 为椭圆芯轴长度, $2d$ 为有源芯直径, $2b$ 为无源芯直径, r_{clad} 为包层半径, Λ_1 为有源芯芯间距, Λ_2 为有源芯与无源芯芯间距, 利用对称的两个无源芯中的椭圆空气孔产生双折射, 对多芯光纤产生的超模进行选择, 可以得到 M^2 接近于 1 的 x 方向偏振的同相位超模输出。2013 年, Prudenzano 等^[29] 设计了纤芯直径为 $2 \mu\text{m}$ 的 19 芯单模光纤, 数值孔径为 0.04、有效模场面积为 $703 \mu\text{m}^2$ 、腔长为 15 m 时得到斜率效率为 81%、输出 M^2 为 1.05、最高输出亮度为 $32 \text{ GW} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ 的激光。

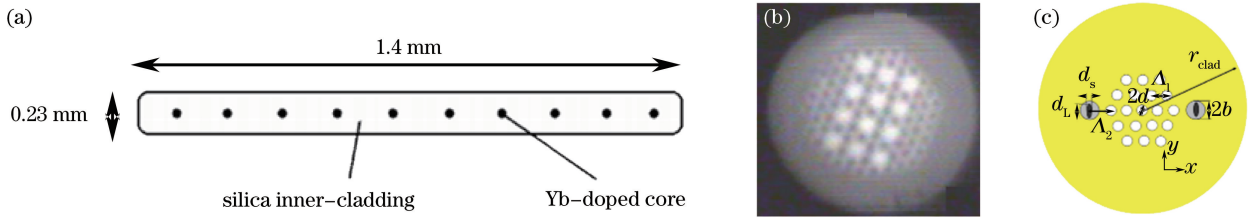


图 4 (a) 10 芯带状光纤; (b) 12 芯矩形排列光纤; (c) 含两个无源芯椭圆空气孔的 19 芯光纤

Fig. 4 (a) 10-core ribbon fiber; (b) 12-core rectangularly arranged fiber;

(c) 19-core fiber with two passive cores in elliptical air holes

2.6 光波导选模法

2006 年, Yuan 等^[30] 将单芯单模光纤与多芯单模光纤熔接后拉锥, 拉锥长度为 18 mm, 锥腰直径为 $5 \mu\text{m}$, 纤芯直径从 $3.7 \mu\text{m}$ 减小至 $0.15 \mu\text{m}$, 拉锥前后多芯光纤的输出功率由 0.04 W 上升至 0.48 W, 增大了 11 倍。同年, Li 等^[31] 报道了一种全光纤选模结构, 如图 5 所示, 在长为 10 cm 的 19 芯光纤两端分别熔接 1.7 mm、0.5 mm 的无源光纤, 得到功率为 6 W、近衍射极限远场发散角为 0.04 rad 的激光输出, 在光谱峰值 50% 处的输出光谱为 3 dB, 线宽为 0.2 nm。2007 年, 该团队对 37 芯多芯光纤进行同样的实验, 发现在熔接同样长度的无源光纤时也可得到近衍射极限的光场^[32]。同年, 该团队通过优化实验结构获得斜率效率为 14%、最高输出功率达 11 W 的实验结果^[33]。2008 年, Wang 等^[34] 设计了一种单模微结构光纤, 由两种不同尺寸的空气孔构成, 通过改变空气孔的尺寸和间距, 可以选出掺镱多芯光纤中的同相位超模, 通过模拟获得在抽运光功率为 600 W 的条件下功率为 460 W 的激光输出, 其中同相位超模的比例占 95.6%。2011 年, Zhang 等^[35] 用圆环 3 芯、6 芯、同心 4 芯、7 芯分布的多芯光纤探究不同多芯光纤与单模光纤的 Talbot 距离 (即可以选出同相位超模的光纤出射端面与反射面的距离) 的同相位超模选择问题, 发现与 Talbot 选模法相比, 单模光纤选模法能更好地选出同相位超模。

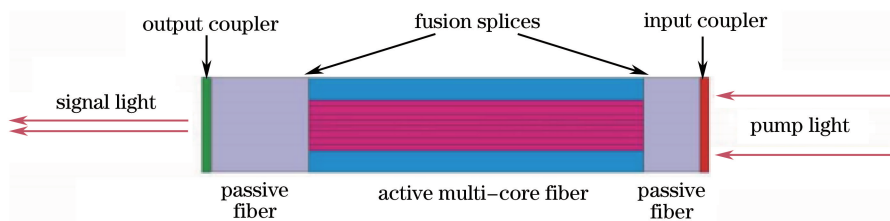


图 5 多芯光纤两端熔接无源光纤的结构

Fig. 5 Structure of multi-core fiber with both ends spliced to passive fibers

2.7 光器件选模法

2006 年, Kurkov 等^[36] 用纤芯直径为 $50 \mu\text{m}$ 的多模光纤, 波长为 1054 nm 的布拉格光栅作为反射镜来构建光纤激光器, 增益纤芯是用研磨法制成的直径为 $6 \mu\text{m}$ 、纤芯距为 $28 \mu\text{m}$ 的 4 芯光纤, 得到斜率效率为 55% 的激光输出。2008 年, Kurkov 等^[37] 在之前实验的基础上通过多模光纤和多芯光纤之间涂胶的方式发现光栅对 4 个芯子的模式皆可调制, 在长度为 10 cm、弯曲半径为 5 m 的光纤中发现有很明显的弯曲选模效应, 70% 的功率从一个芯传输到另一个芯。2010 年, Paurisse 等^[38] 用数字全息波前技术控制 19 芯掺镱光纤放大器, 对重复频率为 40 kHz、波长为 1064 nm、脉宽为 800 ps 的激光进行放大, 获得 23 dB 的增益。2011 年, Schulze 等^[39] 用计算全息技术将纤芯直径为 $2 \mu\text{m}$ 、芯距为 $5.5 \mu\text{m}$ 的 19 芯无源多芯光纤产生的超模模式进行分解, 当抽运光波长为 633 nm 时分解出 10 个模式, 波长为 1064 nm 时可探测到 3 个模式, 其中

一个模式占 90% 以上功率,即为单模传输。同年,Zhang 等^[40]将两个双色片置于多芯光纤两端构成光学谐振腔,如图 6 所示,其中 OL 为物镜,前双色片为高反射率(HR)(适用光波长为 1045~1065 nm)和高透射率(适用光波长为 808 nm)材质,后双色片为部分反射(适用光波长为 1055 nm)材质,纤芯采用掺铒磷酸盐作为增益介质,3 芯光纤在长度为 8.5 cm、发射波长为 1055 nm 时实现稳定的相位锁模,最大输出功率达到 20 mW。2014 年,Jollivet 等^[41]用一个可被温度调节的标准光纤布拉格光栅与长度为 0.9 m 的 7 芯光纤进行熔接,得到两个波长的激光输出,通过计算全息技术将这两个波长模式进行分解,发现这两个波长对同相位超模的贡献基本一致。之后,该团队又在该结构多芯光纤尾端熔接另一个标准光纤布拉格光栅,实验装置如图 7 所示,其中 MMLD 为多模激光二极管,MMF 为多模光纤,PC 为抽运合束器,SMF 为单模光纤,LR 为低反射率,FBG 为光纤布拉格光栅,其传输的同相位超模 SM_1 和 SM_6 发生周期性超模干涉,超模干涉周期为 1.1 nm,输出的激光波长为 1031.28 nm,脉宽为 52 ps^[42]。2014 年,Jollivet 等^[43]用纤芯直径为 5.9 μm 、芯距为 9.3 μm 、长度为 0.9 m 的 7 芯光纤搭建相同激光器平台,对多芯光纤施加压力和弯曲光纤,发现这两种方法都会造成模式的重新分布。

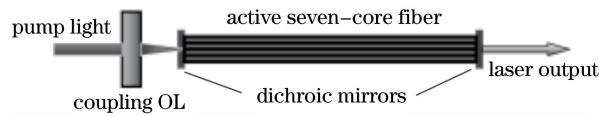


图 6 双色镜选模结构

Fig. 6 Mode selection in dichroic mirrors

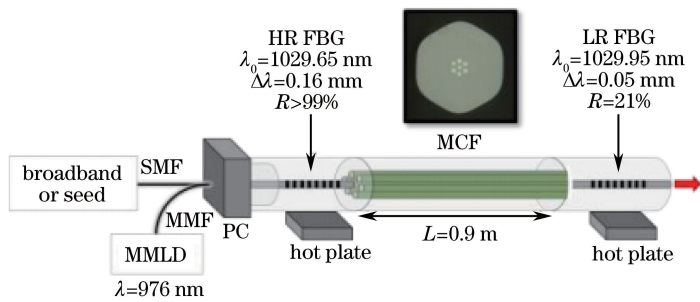


图 7 匹配光纤布拉格光栅中的选模结构

Fig. 7 Super mode selection in a pair of matched fiber Bragg gratings

3 多芯光纤制备工艺

目前多芯光纤制作技术主要有研磨法^[44]、打孔-套管法^[45]、拉-排-拉堆叠法等。研磨法主要是对已有的光纤预制棒包层进行研磨,然后将多个研磨好的预制棒拼接起来进行拉丝。该方法比较适合 4 芯及 2 芯光纤预制棒的制作,不太适合其他芯特别是中心有芯的预制棒,且对研磨的精度要求比较高。打孔-套管法是用铸造或打孔的方法制作出芯子的卡槽,然后将稀土掺杂芯子填充进去,该方法费用较高且工艺精度要求高。拉-排-拉堆叠法是仿照光子晶体光纤的制作方法,应用比较广泛,先将芯包比(光纤纤芯直径与光纤包层直径的比值)大的光纤预制棒拉成较细的实心预制棒,然后将这些细棒按设计要求排列好,最后套管拉丝。

以上制备方法的一个关键共同点在于都需要制作大芯包比的光纤预制棒,对此问题有相关的报道,主要是应用改进的化学气相沉积(MCVD)在线掺杂方法^[46]、粉末烧结压制法^[47]、多孔玻璃法^[48]和 MCVD 掺杂法^[49]制作大芯包比的光纤预制棒。其中后三者比较容易制作大芯径的掺杂芯子,但是粉末烧结压制法对设备要求比较高,用多孔玻璃法制作的光纤背景损耗比较大,而 MCVD 掺杂法制作的预制棒前后均匀性有待提高。MCVD 在线掺杂法虽然不能制作直径较大的芯棒,但是该方法具有均匀性好且简单易行的优点。多芯光纤制备前的仿真以及制备后与普通光纤的熔接也是一个需要考虑的问题^[50-51]。

4 结束语

对比以上几种选模方法可以看出, Talbot 选模法、非线性选模法提出较早, 但是对腔的控制精度要求较高, 难以单模输出。自傅里叶腔选模法虽然可以改变各超模所占比例, 但不能获得高质量光束。光器件选模法由于在光纤上熔接各种光栅、双色片等光器件, 可以选出超模中的强势模, 但是也不能从根本上选出同相位超模。MOFA 种子放大法可以得到高质量光束输出且输出模式稳定, 但是其空间结构不利于未来高功率激光器的集成与应用。光波导选模法易于选出同相位超模且耦合效率及输出光束质量可达到比较高的程度, 选择的方式也比较多, 譬如单模光纤、白光纤和微结构光纤等, 唯一的不足之处是其最佳长度不易确定。光纤结构选模法需要复杂的光纤制备过程, 但是由于其良好的模式选择特性, 可以得到近衍射极限的光场输出, 是目前发展多芯光纤激光器最具前景的方法之一。此外, 通过研究多芯光纤中的模式增益和损耗机制, 将各种选模方式有效结合起来, 同时提升多芯光纤制备工艺, 相信能有更好的实验效果, 为高功率多芯光纤激光器的发展提供新的有效途径。

参 考 文 献

- 1 J Limpert, T Schreiber, T Clausnitzer, *et al.*. High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2002, 10(14): 628-638.
- 2 A Hideur, T Chartier, CÖzkul, *et al.*. All-fiber tunable ytterbium-doped double-clad fiber ring laser[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(14): 1054-1056.
- 3 O G Okhotnikov, L Gomes, N Xiang, *et al.*. Mode-locked ytterbium fiber laser tunable in the 980-1070 nm spectral range[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(17): 1522-1524.
- 4 R Selves, J K Sahu, L B Fu L B, *et al.*. High-power, low-noise, Yb-doped, cladding-pumped, three-level fiber sources at 980 nm[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(13): 1093-1095.
- 5 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. 1.5 kW near single-mode all-fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0702001.
代守军, 何 兵, 周 军, 等. 1.5 kW 近单模全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0702001.
- 6 Zhao Nan, Li Jinyan. Progress of single mode propagation technology in large mode area fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030002.
赵 楠, 李进延. 大模场面积光纤单模运转实现方法的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 030002.
- 7 M O' Connor, V Gapontsev, V Fomin, *et al.*. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW [C]. *CLEO*, 2009: CThA3.
- 8 K C Hou, M Y Cheng, A Galvanauskas, *et al.*. Multi-MW peak power scaling of single-transverse mode pulses using 80 μm core Yb-doped LMA fibers[C]. *ASSP*, 2006: MF5.
- 9 D R Scifres. Multiple core fiber laser and optical amplifier: U.S. Patent 5566196[P]. 1996.
- 10 H F Talbot. Facts relating to optical science[J]. *Phillo Mag*, 1834, 4(20): 112-114.
- 11 M Wrage, P Glas, D Fischer, *et al.*. Phase locking in a multicore fiber laser by means of a Talbot resonator[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(19): 1436-1438.
- 12 M Wrage, P Glas, M Leitner, *et al.*. Combined phase locking and beam shaping of a multicore fiber laser by structure mirrors[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(13): 980-982.
- 13 M Wrage, P Glas, D Fischer, *et al.*. Phase-locking of a multicore fiber laser by wave propagation through an annular waveguide[J]. *Opt Commun*, 2002, 205(4-6): 367-375.
- 14 D Chen, H T Zhang, J Hao, *et al.*. Numerical analysis of mode competition and selection in Yb-doped multicore fiber lasers[C]. *SPIE*, 2014, 9285: 928508.
- 15 P K Cheo, A Liu, G G King. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array[J]. *IEEE, Photonics Technol Lett*, 2001, 13(5): 439-441.
- 16 E J Bochove, P K Cheo, G G King. Self-organization in a multicore fiber laser array[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(14): 1200-1202.
- 17 Y M Huo, P K Chen, G G King. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2004, 12(25): 6230-6239.

- 18 B M Shalaby, V Kermene, D Pagnoux, *et al.*. Quasi-Gaussian beam from a multicore fibre laser by phase locking of supermodes[J]. Appl Phys B, 2009, 97(3): 599-605.
- 19 B M Shalaby, V Kermene, D Pagnoux, *et al.*. 19-core Yb-fiber laser with mode selection for improved beam brightness [J]. Appl Phys B, 2010, 100(4): 859-864.
- 20 B M Shalaby, V Kermene, D Pagnoux, *et al.*. Phase-locked supermode emissions from a dual multicore fiber laser[J]. Appl Phys B, 2011, 105(2): 213-217.
- 21 M Kochanowicz, D Dorosz, A Zając. Phase-locking of 19-core Yb³⁺-doped optical fiber[J]. Bull Pol AcadSci Tech Sci, 2011, 59(4): 371-379.
- 22 H Otto, A Klenke, C Jauregui, *et al.*. Scaling the mode instability threshold with multicore fibers[J]. Opt Lett, 2014, 29(9): 2680-2683.
- 23 C J Corcoran, F Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(20): 201118.
- 24 E J Bochove, C J Corcoran. In-phase supermode selection in a multicore fiber laser array by means of a self-Fourier external cavity[J]. Appl Opt, 2007, 46(22): 5009-5018.
- 25 L J Cooper, P Wang, R B Williams, *et al.*. High-power Yb-doped multicore ribbon fiber laser[J]. Opt Lett, 2005, 30(21): 2906-2908.
- 26 X Zhu, A Schülzgen, L Li, *et al.*. Birefringent in-phase supermode operation of a multicore microstructure fiber laser [J]. Opt Express, 2007, 15(16): 10340-10345.
- 27 M M Vogel, M Abdou-Ahmed, A Voss, *et al.*. Very-large-mode-area, single-mode multicore fiber[J]. Opt Lett, 34(18): 2876-2878.
- 28 C C Wang, L X Gong, J L Li, *et al.*. Single-polarization in-phase supermode operation in multicore fiber laser[J]. Opt Commun, 2011, 284(18): 4215-4219.
- 29 F Prudeniano, L Mescia, A D Tommaso, *et al.*. Design and refinement of rare earth doped multicore fiber lasers[J]. Opt Materials, 2013, 35(11): 1941-1946.
- 30 L B Yuan, Z H Liu, J Yang. Coupling characteristics between single-core fiber and multicore fiber[J]. Opt Lett, 2006, 31(22): 3237-3239.
- 31 L Li, A Schülzgen, S Chen, *et al.*. Phase locking and in-phase supermode selection in monolithic multicore fiber lasers [J]. Opt Lett, 2006, 31(17): 2577-2579.
- 32 L Li, A Schulzgen, V L Temyanko, *et al.*. An all-fiber approach for in-phase supermode phase-locked operation of multicore fiber lasers[C]. SPIE, 2007, 6453: 64531K.
- 33 L Li, A Schulzgen, H Li, *et al.*. Phase-locked multicore all-fiber lasers: Modeling and experimental investigation[J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(8): 1721-1728.
- 34 C C Wang, F Zhang, C Liu, *et al.*. Microstructured optical fiber for in-phase mode selection in multicore fiber lasers[J]. Opt Express, 2008, 16(8): 5505-5515.
- 35 X L Zhang, X Y Zhang, Q P Wang, *et al.*. In-phase supermode selection in ring-type and concentric-type multicore fiber using large-mode-area single-mode fiber[J]. J Opt Soc Am A, 2011, 28(5): 924-933.
- 36 A S Kurkov, V M Paramonov, E M Dianov, *et al.*. Fiber laser based on 4-core Yb-doped fiber and multimode Bragg grating[J]. Laser Phys Lett, 2006, 3(9): 441-444.
- 37 A S Kurkov, S A Babin, I A Lobach, *et al.*. Mechanism of mode coupling in multicore fiber lasers[J]. Opt Lett, 2008, 33(1): 61-63.
- 38 M Paurisse, M Hanna, F Druon, *et al.*. Wavefront control of a multicore ytterbium-doped pulse fiber amplifier by digital holography[J]. Opt Lett, 2010, 35(9): 1428-1430.
- 39 C Schulze, O A Schmidt, D Flamm, *et al.*. Modal analysis of beams emerging from a multi-core fiber using computer-generated holograms[C]. SPIE, 2011, 7914: 79142H.
- 40 G Zhang, Q Zhang, Y L Shen, *et al.*. Phase locking of a compact Nd-doped phosphate multicore fiber laser[J]. Laser Phys, 2011, 21(2): 410-413.
- 41 C Jollivet, D Flamm, M Duparré, *et al.*. Supermode decomposition during operation of a 7-core fiber laser[C]. Advanced Photonics, 2014: JM5A.12.

- 42 C Jollivet, A Mafi, D Flamm, *et al.*. Mode-resolved gain analysis of a 7-core fiber laser based on multi-supermode interference[C]. *Adv Photonics*, 2014: SoW2B.2.
- 43 C Jollivet, A Mafi, D Flamm, *et al.*. Mode-resolved gain analysis and lasing in multi-supermode multi-core fiber laser [J]. *Opt Express*, 2014, 22(24): 30377-30386.
- 44 J F Bourhis, R Meilleur, P Nouchi, *et al.*. Manufacturing and characterization of multicore fibers[C]. *Proc IWCS*, 1997: 584-589.
- 45 T L Cheng, Z C Duan, W Q Gao, *et al.*. A novel seven-core multicore tellurite fiber[J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(11): 1793-1796.
- 46 A S Webb, A J Boyland, R J Standish, *et al.*. MCVD in-situ solution doping process for the fabrication of complex design large core rare-earth doped fibers[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2010, 356(18-19): 848-851.
- 47 A Benoit, R Dauliat, K Schuster, *et al.*. Optical fiber microstructuration for strengthening single-mode laser operation in high power regime[J]. *Opt Eng*, 2014, 53(7): 071817.
- 48 Y B Chu, Y Yang, L Liao, *et al.*. Enhanced green upconversion luminescence in $\text{Yb}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ -codoped silica fiber based on glass phase-separated method[J]. *Appl Phys A*, 2015, 120(4): 1315-1322.
- 49 A J Boyland, A S Webb, S Yoo, *et al.*. Optical fiber fabrication using novel gas-phase deposition technique [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(6): 912-915.
- 50 Yang Fang, Tang Ming, Li Borui, *et al.*. Design and optimization of multi-core fibers with low crosstalk and large effective area[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106005.
杨芳, 唐明, 李博睿, 等. 低串扰大模场面积多芯光纤的设计与优化[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106005.
- 51 Zhang Chengdong, Zhou Xuanfeng, Chen Zilun, *et al.*. Low loss fusion splicing for seven-core photonic crystal fiber by selected air hole collapse technique[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1005004.
张成栋, 周旋风, 陈子伦, 等. 选择性新空气孔塌缩技术实现七芯光子晶体光纤低损耗熔接[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1005004.