

## 变纤芯直径掺镱光纤激光器:现状与趋势

王小林<sup>1,2,3\*</sup>, 文榆钧<sup>1</sup>, 张汉伟<sup>1,2,3</sup>, 奚小明<sup>1,2,3</sup>, 史尘<sup>1,2,3</sup>, 杨保来<sup>1,2,3</sup>,  
王鹏<sup>1,2,3</sup>, 潘志勇<sup>1,2,3\*\*</sup>, 王泽锋<sup>1,2,3</sup>, 许晓军<sup>1,2,3</sup>, 陈金宝<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>3</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 为了抑制高功率光纤激光器中的非线性效应, 纤芯直径沿着长度方向变化的增益光纤(简称变纤芯直径增益光纤)常被作为激光器的增益介质。变纤芯直径增益光纤主要包括单锥形光纤、纺锤形光纤和马鞍形光纤等, 该类光纤同时具有光束质量保持和模式不稳定效应抑制的能力, 在高功率光纤激光器中有着广泛的应用前景。近年来, 利用单锥形光纤已经实现了峰值功率为 97 MW 的飞秒脉冲激光, 利用纺锤形光纤已经实现了功率为 5 kW 的连续激光。介绍了变纤芯直径增益光纤的优点和制作方法, 对变纤芯掺镱单频/窄线宽光纤激光器、脉冲光纤激光器和高功率连续宽谱光纤激光器的发展现状进行了详细介绍, 分析了变纤芯直径掺镱光纤激光器的发展趋势及其支撑万瓦级高功率连续激光输出的可行性。研究结果为高功率光纤激光器的发展提供了参考。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 变纤芯直径光纤; 非线性效应; 模式不稳定效应

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2100001

## 1 引言

高功率掺镱光纤激光器在工业加工、材料处理、国防科研等各个领域都有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。在光纤激光器功率提升过程中, 包括受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)在内的非线性效应和模式不稳定(TMI)效应是最主要的限制因素<sup>[4-6]</sup>。为了抑制非线性效应和 TMI 效应, 除了对激光器结构(如泵浦波长、泵浦方式、种子功率等)进行优化外, 研究人员重点对增益光纤的特性进行优化, 一方面对增益光纤横截面参数, 如纤芯直径、纤芯/包层几何形态、纤芯掺杂区域、纤芯折射率分布等进行优化, 另一方面对增益光纤的纵向参数进行优化, 其中最为常见的就是纤芯直径沿着长度方向变化的增益光纤(简称变纤芯直径增益光纤)。在纤芯/包层几何形态控制中, 大模场面积光子晶体光纤、手性耦合纤芯(3C)光纤是除了普通阶跃折射率光纤之外应用较为广泛的两种光纤。其中, 大模场面积光子晶体光纤具有单模模场面积大、泵浦吸收系数高等优点, 可以通过结构设计实现特殊波长的产生和抑制, 在高功率激光器尤其是脉冲激光器中有着广泛的应用, 但与其结构匹配的无源器件尚不太成熟, 目前主要用于空间结构的光纤激光器中。3C 光纤

通过外围螺旋的纤芯滤除激光中的高阶模式, 能够实现较大模场的单模激光输出, 目前已经实现输出功率大于 2 kW 的光纤激光器, 在高功率光纤激光器中有着非常诱人的应用前景。由于 3C 光纤需要特殊的制备工艺, 目前国际上只有少数几个单位开展了研究, 大规模的工业化推广有待制备工艺的完善和匹配无源器件的发展。在诸多变纤芯直径光纤中, 单锥形光纤作为常见的一种, 在光纤激光领域的早期被提出主要是为了滤除模式<sup>[7]</sup>、提高非线性阈值<sup>[8]</sup>。锥形增益光纤在高功率激光领域中主要是被用于解决泵浦源亮度问题<sup>[9]</sup>, 之后主要被应用于脉冲激光领域<sup>[10-12]</sup>。随着研究的深入, 研究人员发现单锥形增益光纤具有良好的光束质量保持特性<sup>[13-14]</sup>、一定的模式不稳定抑制效果<sup>[15-16]</sup>和放大器自发辐射(ASE)抑制效果<sup>[17]</sup>。近年来, 随着光纤制作工艺的成熟和连续激光的发展, 基于普通单锥形光纤演变而来的纺锤形光纤、马鞍形光纤也得到了广泛的研究。本文将单锥形光纤、纺锤形光纤、马鞍形光纤统称为变纤芯直径光纤。

需要指出的是, 与传统的锥形光纤不同, 本文提到的变纤芯直径增益光纤是纤芯变化长度在米量级以上的掺稀土离子增益光纤。普通的锥形传能光纤有两类, 一种是锥区长度在 10 cm 以内的短锥形光纤, 一般是通

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2022-01-05; 录用日期: 2022-03-08

基金项目: 长沙市杰出创新青年培养计划(kq2106008)、国家自然科学基金(61735007)

通信作者: \*chinaphotonics@163.com; \*\*panzyl168@163.com

过采用拉锥机对普通的纤芯直径均匀的传能光纤进行短距离拉锥来实现制作的;另一类是锥区长度大于 10 cm 以上的长锥形光纤,一般是通过预制棒制作或拉丝设备控制来实现。目前,国内外研究单位对短锥传能光纤的研究较多。基于拉锥技术,可研制合束器<sup>[18-21]</sup>、耦合器<sup>[22]</sup>、锥形光纤光栅<sup>[23-25]</sup>等无源器件。通过拉锥来减小光纤直径,可实现低的非线性阈值,因此锥形传能光纤在激光器的谐波产生<sup>[26]</sup>、激光波长调谐<sup>[27-28]</sup>、多波长激光<sup>[29-31]</sup>、光学频率梳<sup>[32-34]</sup>、超连续谱产生<sup>[35-38]</sup>、脉冲压缩<sup>[39]</sup>等领域有着非常广泛的应用。锥形光纤的纤芯直径沿着长度方向的变化带来了传统光纤所不具备的诸多优点,还使得锥形光纤在非激光器的其他领域如光束耦合<sup>[40-43]</sup>、波长开关<sup>[44-45]</sup>、光学成像<sup>[46-48]</sup>、模式控制<sup>[49-52]</sup>、激光传感<sup>[53-58]</sup>、激光通信<sup>[59-62]</sup>、激光医疗<sup>[63-64]</sup>、激光光镊<sup>[65-68]</sup>等中都有着非常广泛的应用。

本文的研究对象是变纤芯直径增益光纤激光器,重点是基于掺镱离子的变纤芯直径增益光纤激光器。首先对变纤芯直径掺镱光纤的主要优点与制作方法进行简单介绍,然后详细介绍了变纤芯直径掺镱单频/窄线宽光纤激光器、脉冲光纤激光器和高功率连续宽谱光纤激光器的发展现状,最后分析了变纤芯直径掺镱光纤激光器的发展趋势和变纤芯直径增益光纤支撑万

瓦级高功率连续激光输出的可行性。

## 2 变纤芯直径增益光纤的主要优点与制作方法

### 2.1 几种变纤芯直径增益光纤的简介

在本文中,变纤芯直径增益光纤<sup>[69-71]</sup>主要包括单锥形、纺锤形、马鞍形三类,其结构如图 1 所示。在高功率光纤激光器中,一般采用双包层增益光纤,因此各个光纤的横截面一般都包括纤芯、内包层和涂覆层三个部分。与一般光纤不同,增益光纤的纤芯、内包层都沿着光纤长度方向变化:沿着光纤长度方向,单锥形光纤(TF)包括小芯径区域(S)、渐变拉锥区域(T)和大纤芯区域(L);纺锤形光纤(SPF)包括左右两个小芯径区域 S1 和 S2、中间的大纤芯区域 L 及连接 S1 和 L、连接 S2 和 L 区域的渐变拉锥区域 T1 和 T2;马鞍形光纤(SAF)包括左右两个大芯径区域 L1 和 L2、最中间的小纤芯区域 S 及连接 L1 和 S、连接 L2 和 S 区域的渐变拉锥区域 T1 和 T2。如图 1 所示,光纤内包层直径与纤芯直径均随着光纤长度的增加呈等比例变化,可称之为芯包比恒定的变纤芯直径光纤。还有一类变纤芯直径光纤,只有纤芯直径沿着光纤长度方向变化,内包层直径沿着光纤长度方向恒定不变<sup>[72]</sup>。

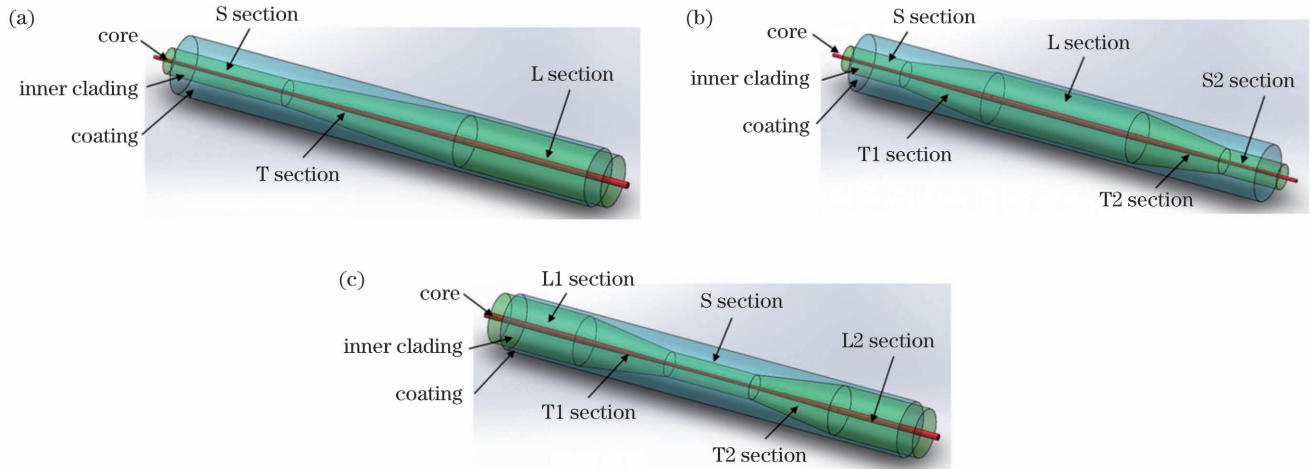


图 1 变纤芯直径光纤的结构示意图。(a)单锥形光纤;(b)纺锤形光纤;(c)马鞍形光纤

Fig. 1 Structural diagrams of fiber with variable core diameter. (a) Single-tapered fiber; (b) spindle-shaped fiber; (c) saddle-shaped fiber

### 2.2 变纤芯直径增益光纤的主要优点

与常规的纤芯直径不变的增益光纤相比,尽管变纤芯直径光纤只是纤芯直径沿着光纤长度方向变化,但是将其应用于高功率光纤激光中,会带来诸多的优点。

1) 高非线性效应阈值。首先,变纤芯直径增益光纤中大纤芯直径端的引入能够提升增益光纤的有效模场面积,从而提高 SRS 和 SBS 阈值<sup>[73-74]</sup>;其次,对于单频激光,由于不同纤芯直径光纤的布里渊频移不同,如图 2 所示,采用变纤芯直径光纤可以展宽 SBS 增益谱,提高单频激光输出功率<sup>[8]</sup>。

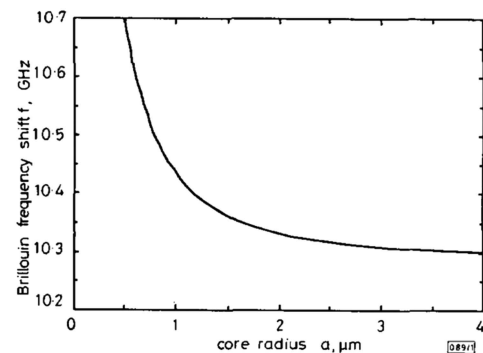


图 2 不同芯直径光纤的布里渊频移<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Brillouin frequency shifts for fibers with different core diameters<sup>[8]</sup>

2) 高模式不稳定阈值和良好的光束质量保持特性。首先,变纤芯直径光纤的小纤芯直径区域支持模式少,通过弯曲来抑制高阶模式传播,进而有效抑制模式不稳定效应,提高激光器输出功率<sup>[15-16]</sup>;其次,大尺度范围内的光纤直径变化本质是模场匹配器,可以有效保持激光良好的光束质量特性<sup>[13-14]</sup>;最后,纤芯直径沿着增益光纤长度方向变化,导致光纤中基模与高阶模式的传播常数之差在不同位置不同,当光纤直径从 10  $\mu\text{m}$  变化到 100  $\mu\text{m}$  时,LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>02</sub> 模的传播常数之差可以达到 2 个量级,如图 3 所示。因此,采用变纤芯直径增益光纤可以降低横模之间的干涉,保持良好的光束质量,提高模式不稳定阈值<sup>[75]</sup>。

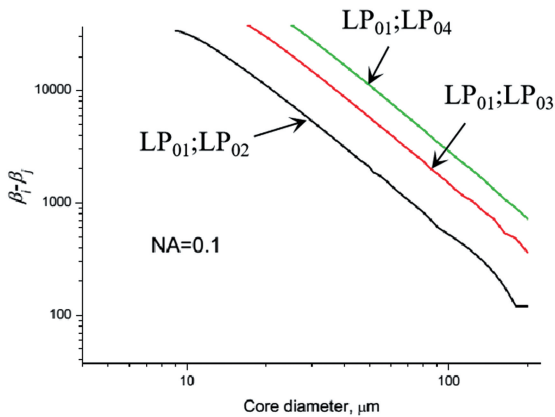


图 3 不同芯直径光纤中各个模式的传播常数之差<sup>[75]</sup>  
Fig. 3 Differences in propagation constants for different modes in fibers with different core diameters<sup>[75]</sup>

3) 较强的放大自发辐射 (ASE) 抑制能力。以单锥光纤放大器为例,激光在其中的放大是非互易的,依赖于光束传输方向的激光。正常情况下,激光从小纤芯直径  $d_2$  端 (简称小端) 向大纤芯直径  $d_1$  端 (简称大端) 传输和放大,而 ASE 以后向传输为主,从光纤的大端传输到小端,大端的自发辐射最初是在角度  $\alpha$  ( $NA/T < \alpha < NA$ , 其中  $T$  为光纤纤芯拉锥比例,  $NA$  为光纤数值孔径) 下发生的, ASE 从大端经较短传输距离后,从纤芯泄露到包层中,如图 4 所示<sup>[14,76-77]</sup>。因此,变纤芯直径光纤可以有效抑制 ASE,特别有利于低重复频率脉冲激光的产生。利用该光纤,研究人员在连续波泵浦情况下,实现了重复频率为 5 Hz、脉宽为 64 ns、脉冲能量为 1.6 mJ、峰

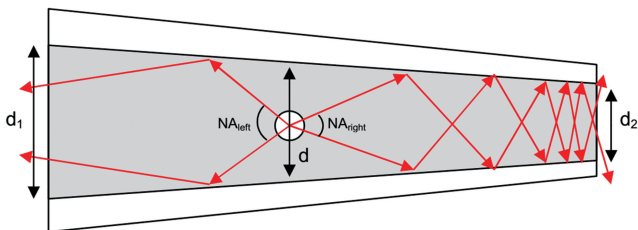


图 4 锥形增益光纤中大角度 ASE 的传播轨迹<sup>[77]</sup>  
Fig. 4 Ray traces of large angle ASE in tapered gain fiber<sup>[77]</sup>

值功率为 24.3 kW 的极低重复频率调 Q 脉冲激光输出<sup>[17]</sup>。

### 2.3 变纤芯直径增益光纤的制作工艺简介

短锥形光纤是通过拉锥机对纤芯直径均匀的光纤进行拉锥来实现制作的。不同于短锥形光纤,变纤芯直径增益光纤由于在长度方向上的纤芯变化尺度较大,一般拉锥设备的行程在 1 m 以下<sup>[78]</sup>,难以满足要求,其制作一般需要通过光纤预制棒或光纤拉丝来完成。

#### 2.3.1 预制棒形态控制法

预制棒形态控制法可以用于制作纤芯直径变化、包层直径不变的增益光纤<sup>[79]</sup>。该方法的基本步骤如图 5 所示。第一步,利用常规的预制棒制作方法 [包括改进化学气相沉积 (MCVD)、表面等离子体化学气相沉积 (SPCVD) 等] 制作常规的纤芯直径均匀的光纤预制棒,如图 5(a) 所示。第二步,对制备好的预制棒进行预拉锥,得到具有多个锥区的预制棒,如图 5(b) 所示。第三步,对预制棒表面进行打磨抛光处理,使得不同长度位置处的预制棒内包层的直径相同,如图 5(c) 所示。第四步,对抛光后的预制棒进行套管处理,得到合适纤芯包层比例的光纤预制棒,如图 5(d) 所示,至此完成了不同长度、不同锥区预制棒的制作。在实际制作过程中,可能需要根据实际要求重复第二到第四步。第五步,利用拉丝塔按一定的速度对光纤预制棒进行均匀拉丝,在拉丝过程中对光纤进行涂覆,得到图 5(e) 所示的变纤芯直径增益光纤。

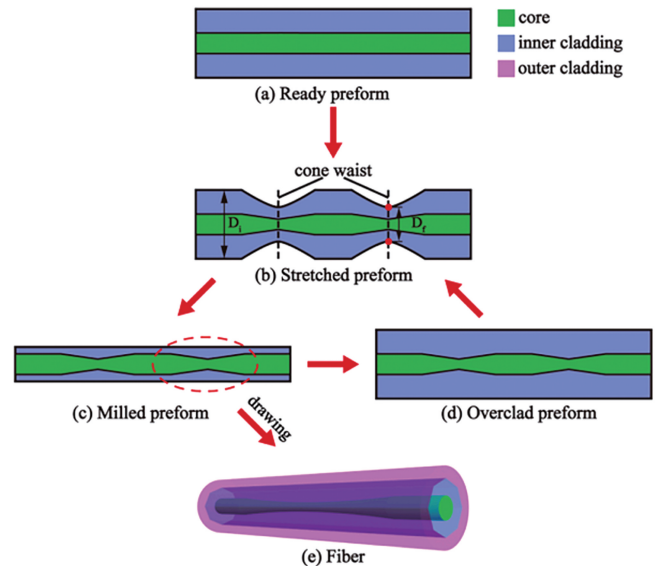


图 5 基于预制棒形态控制法制作变纤芯直径光纤的步骤<sup>[79]</sup>  
Fig. 5 Steps for preparation of fiber with variable core diameter based on preform shape control<sup>[79]</sup>

#### 2.3.2 变速拉丝法

变速拉丝法是实现纤芯包层比同时变化的变纤芯直径增益光纤最为简单和有效的一种方法。在预制棒

纤芯和包层直径一定的情况下,拉丝得到的光纤包层直径( $d$ )与拉丝速度  $v_T$  呈反比关系:

$$d(z, t) = \frac{K}{v_T(z, t)}, \quad (1)$$

式中: $K$  为与拉丝塔相关的比例系数; $z$  为拉制光纤长度; $t$  为拉制时间。变速拉丝法的步骤如图 6 所示。第一步,利用常规的工艺制造套管的预制棒,通过预制棒的纤芯和套管直径来决定光纤的纤芯/包层直径比例;第二步,将预制棒置于拉丝塔上,通过控制拉丝速度实现光纤纤芯和包层直径的控制。如图 6 所示,对于纺锤形光纤的 5 个区域,分别采用不同的拉丝速度,其中小纤芯区域速度为  $v_1$ ,大纤芯区域速度为  $v_3$ ,渐变区域速度为  $v_{(1-3)}(t)$  和  $v_{(3-1)}(t)$ ,满足:

$$\begin{cases} v_1 = \frac{d_{L3}}{d_{S1}} \\ v_3 = \frac{d_{S1}}{d_{L3}} \\ v_{(1-3)}(0) = v_1 \\ v_{(1-3)}(T_1) = v_3 \\ v_{(3-1)}(0) = v_3 \\ v_{(3-1)}(T_2) = v_1 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $d_{S1}$  和  $d_{L3}$  分别为小纤芯区域和大纤芯区域直径; $T_1$ 、 $T_2$  为变纤芯区域的长度。第三步,在拉丝过程中,对增益光纤进行涂覆处理,得到纤芯与包层比例恒定的增益光纤。在一般涂覆设备中,由于涂覆直径不可变更,因此增益光纤不同位置处的涂覆厚度不同,光纤的外径在整个光纤长度方向上基本是相同的。

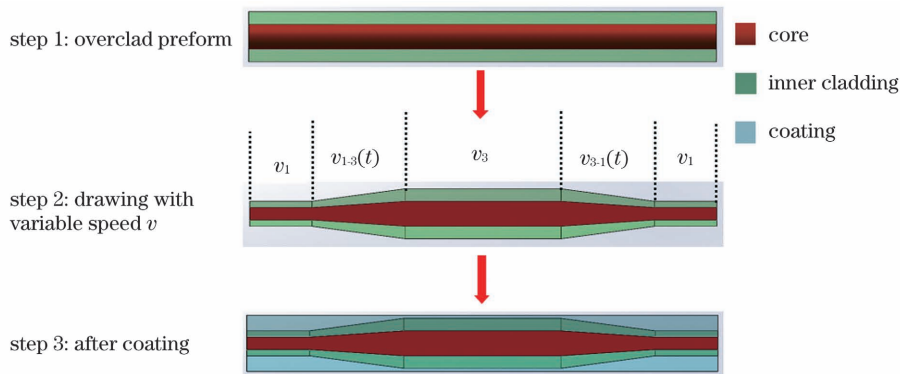


图 6 基于变速拉丝法制作变纤芯直径增益光纤的步骤

Fig. 6 Steps for preparation of gain fiber with variable core diameter based on drawing with variable speed

### 2.3.3 预制棒形态控制与变速拉丝结合法

实际上,无论是预制棒形态控制还是变速拉丝法,本身都需要经历预制棒制作和光纤拉制两个过程。如果将两种方法结合,还可以实现更多不同形态变纤芯直径光纤的制作。如图 7 所示,第一步,首先对套管后的预制棒进行打磨,获得纤芯直径恒定变化、包层变化

的预制棒;第二步,对预制棒进行变速拉丝处理,控制拉丝速度使得拉丝过程中包层直径恒定不变,纤芯直径变化;第三步,在拉丝过程中,对增益光纤进行涂覆,得到包层直径恒定的变纤芯直径增益光纤。如果在第二步中,采用恒定速度进行拉丝,还可以获得相关文献中提及的纤芯直径不变、包层直径变化的光纤<sup>[80-81]</sup>。

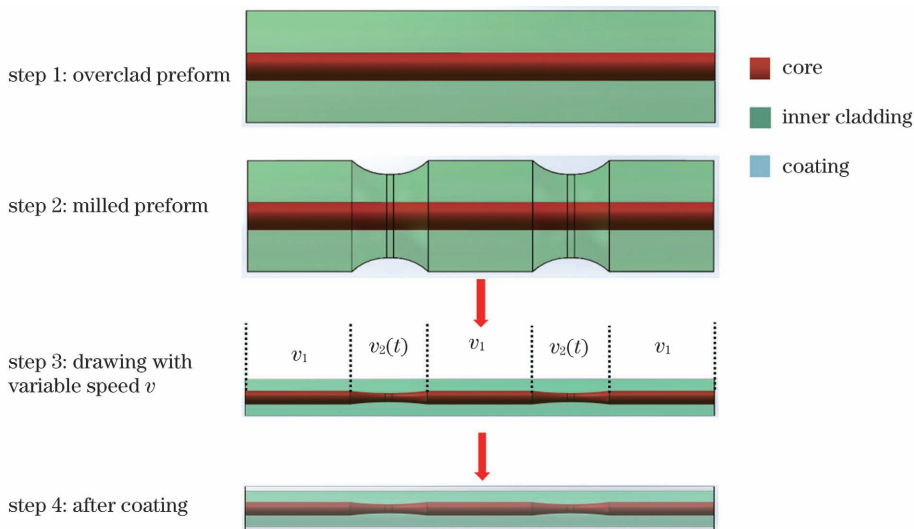


图 7 基于预制棒形态控制法与变速拉丝法结合制作变纤芯直径增益光纤的步骤

Fig. 7 Steps for preparation of gain fiber with variable core diameter based on preform shape control and drawing with variable speed

### 3 变纤芯直径掺镱光纤激光器的研究现状

变纤芯直径传能光纤最早被用于抑制通信系统中的 SBS 等非线性效应。早在 1995 年,日本 NTT 公司接入网系统实验室就提出了采用纤芯直径渐变的光纤抑制单频光纤激光传输过程中的 SBS 效应<sup>[8]</sup>。理论上,考虑到 SBS 的布里渊频移与光纤直径相关,锥形光纤纤芯直径沿着光纤长度方向变化,不同位置处的布里渊频移不同,如图 2 所示。随着光纤直径的增加,布里渊频移减小,这会导致 SBS 的增益谱展宽,从而提高 SBS 阈值。实验上,首先利用气相轴向沉积(VCD)技术制作了长度为 320 mm,直径从 30 mm 变化到 23 mm 的预制棒,然后通过拉丝塔拉制成长度为 14 km,包层直径为

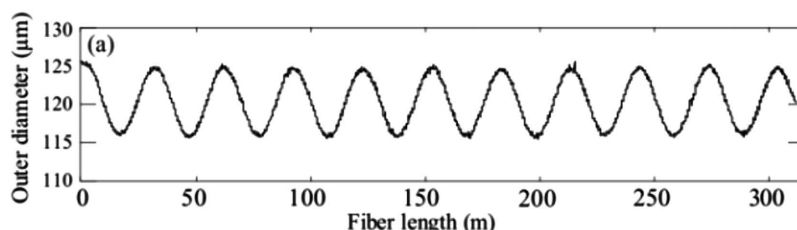


图 8 包层直径随光纤长度的变化曲线<sup>[82]</sup>

Fig. 8 Cladding diameter versus fiber length<sup>[82]</sup>

此后,变纤芯直径传能光纤在通信领域得到较多应用<sup>[59-62]</sup>。下面重点介绍变纤芯直径增益光纤在单频/窄线宽、脉冲激光、宽谱高功率光纤激光器等领域的研究现状。

#### 3.1 变纤芯直径单频/窄线宽光纤激光器的研究现状

变纤芯直径增益光纤可以有效地抑制 SBS 效应,使得其在单频和窄线宽光纤放大器中得到了越来越多的应用。在单频/窄线宽光纤激光器领域,目前主要采用单锥形增益光纤作为放大器的增益介质来提升 SBS 阈值,典型研究结果如表 1 所示。

实际上,早在 2008 年,芬兰坦佩雷理工大学(TUT)光电子研究中心和俄罗斯科学院(RAS)光纤光学研究中心的研究人员合作研制出第一个单锥形掺镱光纤后,就将其应用于单频光纤放大器中,实现了输出功率为 10 W 的近衍射极限激光输出<sup>[77]</sup>。研究人员将长度为 10.5 m、纤芯/内包层/外包层直径为 27  $\mu\text{m}$ /834  $\mu\text{m}$ /890  $\mu\text{m}$  的双包层光纤拉锥 4.8 倍,利用该光纤对线宽为 100 kHz 的单频激光进行放大,将 30 mW 单频种子激光放大到 10 W,放大器斜率效率为 80%。

2013 年,俄罗斯科学院与芬兰坦佩雷理工大学研究人员报道了采用长锥形掺镱光纤实现的 160 W 单频光纤激光器<sup>[83-84]</sup>。研究人员首先研制了长度为 18 m、小端纤芯/包层直径为 7.5  $\mu\text{m}$ /120  $\mu\text{m}$ 、大端纤芯/包层直径为 44  $\mu\text{m}$ /700  $\mu\text{m}$  的长锥形光纤,纤芯数值孔径为 0.11;然后将该光纤用作单频放大器的主放

125  $\mu\text{m}$  的锥形光纤。对该光纤的布里渊频移进行测试,得到在 1550 nm 波段处的布里渊频移为 10.310 ~ 10.359 GHz,频移差为 49 MHz。对有效面积和有效相互作用长度之比相同的光纤进行对比实验,在相同的情况下得到该锥形光纤的 SBS 阈值为 11.8 mW,普通色散频移光纤的 SBS 阈值为 3.9 mW,普通纯石英光纤频移为 4.2 mW,色散非频移光纤的 SBS 阈值为 5.2 mW。与常规光纤相比,该锥形光纤将 SBS 阈值提升了至少 2 倍,验证了锥形光纤抑制 SBS 的有效性。

2011 年,研究人员提出采用纤芯直径周期变化的光子晶体光纤抑制 SBS<sup>[82]</sup>。他们设计的光纤内包层直径随着光纤长度的变化如图 8 所示,由于增益光纤纤芯直径周期变化, SBS 增益谱得到展宽,最终常规光纤的 SBS 阈值提升了 7 dB。

增益光纤,最终获得输出功率为 160 W 的单频激光,光光效率为 61.4%,激光线宽为 3 MHz,光束质量为  $M_x^2 = 1.05$ ,  $M_y^2 = 1.2$ ,在最高功率时,没有出现 SBS 现象。

2016 年,本课题组对中国电子科技集团第 23 研究所制作的双包层锥形光纤与常规纤芯/包层直径为 20  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$  的光纤在放大器中的 SBS 阈值特性进行了对比研究,其输出特性如图 9 所示。当使用长度为 7 m、小端纤芯/包层直径为 20  $\mu\text{m}$ /237.1  $\mu\text{m}$ 、大端纤芯/包层直径为 46.9  $\mu\text{m}$ /579.9  $\mu\text{m}$  的锥形光纤时,获得了输出功率为 53 W、光束质量( $M^2$ )为 1.25 的单频光纤激光输出<sup>[85]</sup>;当使用常规纤芯/包层直径为 20  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$  的光纤时,单频放大器的 SBS 阈值为 19.2 W。结果表明,采用锥形光纤时放大器的 SBS 阈值是采用常规 20  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$  光纤时 SBS 阈值的 2.7 倍。本课题组制备了国际上第一个基于锥形光纤的全光纤结构单频光纤放大器,有效验证了锥形光纤的 SBS 抑制效果和光束质量保持能力。

此后,基于锥形掺镱光纤的单频和窄线宽光纤激光得到了越来越多的关注。2017 年,研究人员采用长度为 2.5 m、纤芯直径为 9 ~ 22  $\mu\text{m}$  的锥形掺镱光纤,实现了 120 W 的单模单频激光输出,线宽小于 30 kHz,光束质量  $M^2$  为 1.1<sup>[86]</sup>;2018 年,他们又将锥形光纤的纤芯直径扩大到 50  $\mu\text{m}$ ,从而将单频激光的输出功率提升到 200 W<sup>[87]</sup>。2018 年,芬兰坦佩雷理工大学与俄罗斯科学院研究人员合作,采用锥形保偏

表 1 基于单锥形增益光纤的单频/窄线宽光纤激光器的典型研究结果

Table 1 Typical research results of single frequency/narrow linewidth fiber laser based on single-tapered gain fiber

Year	Fiber parameter				Power	Linewidth	Beam quality	Reference
	Fiber core/cladding diameter at small end	Fiber core/cladding diameter at large end	NA	Fiber length				
2008	$\sim 5.6 \mu\text{m} / 174 \mu\text{m}$	$27 \mu\text{m} / 834 \mu\text{m}$	0.15(in core)	10.5 m	10 W	100 kHz	$M^2 \approx 1.07$	[77]
2013	$7.5 \mu\text{m} / 120 \mu\text{m}$	$44 \mu\text{m} / 700 \mu\text{m}$	0.11(in core)/ 0.40 (in cladding)	18 m	160 W	3 MHz	$M_x^2 = 1.05$ $M_y^2 = 1.20$	[83-84]
2016	$20 \mu\text{m} / 237.1 \mu\text{m}$	$46.9 \mu\text{m} / 579.9 \mu\text{m}$	0.06( in core)	7 m	53 W	20 kHz	$M_x^2 = 1.25$ $M_y^2 = 1.20$	[85]
2017	9–22 $\mu\text{m}$ (fiber core diameter)			2.5 m	120 W	<30 kHz	$M^2 \approx 1.1$	[86]
2018	50–400 $\mu\text{m}$ (fiber cladding diameter)			2.7 m	200 W	<30 kHz	$M^2 \approx 1.2$	[87]
2018	$13 \mu\text{m} / 110 \mu\text{m}$	$96 \mu\text{m} / 792 \mu\text{m}$			70 W	8 kHz	$M_x^2 = 1.03$ $M_y^2 = 1.08$	[88]
2018	$20 \mu\text{m} / 237.1 \mu\text{m}$	$46.9 \mu\text{m} / 579.9 \mu\text{m}$	0.06 (in core)	7.2 m	260 W	2 GHz	$M^2 \approx 2.27$	[89]
2020	$36.1 \mu\text{m} / 249.3 \mu\text{m}$	$57.8 \mu\text{m} / 397.3 \mu\text{m}$	0.064 (in core)	1.27 m	550 W	$\sim 20$ kHz	$M^2 \approx 1.47$	[90-91]
2021	$30.3 \mu\text{m} / 245 \mu\text{m}$	$49.3 \mu\text{m} / 404 \mu\text{m}$	0.06 (in core)	2.2 m	400 W	–	$M^2 \approx 1.29$	[92]

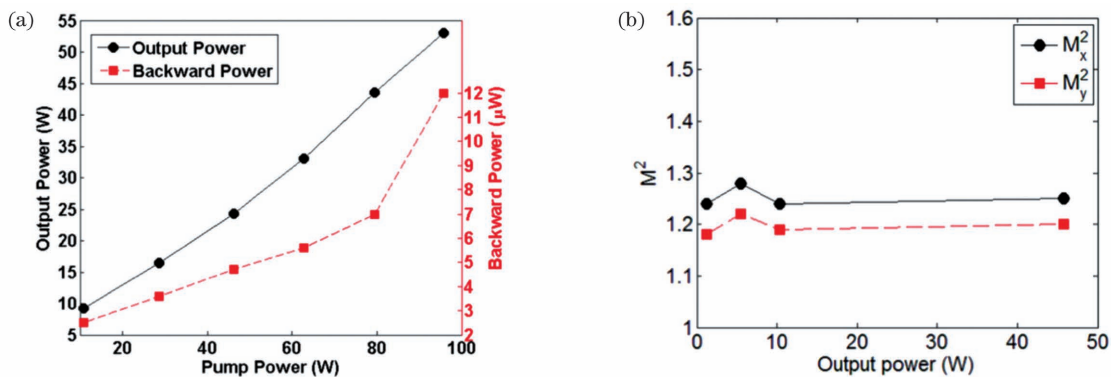


图 9 锥形掺镱全光纤单频放大器的实验结果<sup>[85]</sup>。(a)输出功率与回光功率随泵浦功率的变化；(b)不同功率下的光束质量  
Fig. 9 Experimental results of tapered Yb-doped all-fiber single frequency amplifier<sup>[85]</sup>. (a) Output power and backward power versus pump power; (b) beam quality at each output power

掺镱光纤在 1033 nm 波段实现了输出功率为 70 W 的单频光纤激光<sup>[88]</sup>。2018 年,国防科技大学黄龙等<sup>[89]</sup>采用锥形掺镱光纤实现了输出功率为 260 W、线宽为 2 GHz 的窄线宽激光;2020 年,国防科技大学采用商用锥形掺镱光纤在 1030 nm 波段实现了功率为 550 W 的全光纤单频光纤激光器<sup>[90-91]</sup>。2021 年,国防科技大学研究人员采用自制的锥形掺镱光纤在 1064 nm 波段实现了功率为 400 W 的全光纤单频光纤激光器<sup>[92]</sup>。

### 3.2 变纤芯直径脉冲光纤激光器的研究现状

变纤芯直径增益光纤可以有效抑制包括 SRS、四波混频(FWM)在内的各种非线性效应,提高传统的纤芯直径均匀的光纤激光器产生的脉冲激光的峰值功率。因此,在脉冲光纤激光领域,主要是通过采用长锥形增益光纤作为放大器的增益介质来获得高功率

脉冲激光。自从 2008 年第一个真正意义的长锥形增益光纤研制成功后<sup>[77]</sup>,长锥形增益光纤在脉冲激光中得到了广泛的应用,尤其是近几年来,在光纤形态、输出功率、偏振特性等方面都得到了广泛的研究。这里分别对基于锥形光纤的非线偏振激光、线偏振激光、单频/窄线宽脉冲激光器的典型结果进行了介绍。

#### 3.2.1 基于锥形增益光纤的非线偏振脉冲光纤激光

由于良好的非线性效应抑制效果和光束质量保持特性,锥形增益光纤首先被用于提升非线偏振脉冲激光的功率。基于锥形增益光纤的非线偏振脉冲光纤激光的典型研究结果如表 2 所示。

从表 2 可知,采用锥形增益光纤的非线偏振光纤激光器不仅能够提高功率,还能够实现衍射极限的光束质量。经过十多年的发展,非线偏振脉冲激光的峰值功率从 2008 年的 25 kW 提升到 2021 年的 97 MW;

表2 基于锥形增益光纤的高功率非线性偏振脉冲光纤激光器典型研究结果

Table 2 Typical research results of high power non-linearly-polarized pulsed fiber laser based on tapered gain fiber

Year	Fiber parameter				Output parameter				Beam quality	Reference	
	Fiber core /cladding diameter at small end	Fiber core /cladding diameter at large end	NA	Fiber length	Wavelength	Repetition frequency	Pulse width	Pulse energy			Average/peak power
2008	~5.6 $\mu\text{m}$ /174 $\mu\text{m}$	27 $\mu\text{m}$ /834 $\mu\text{m}$	0.15	10.5 m	1063 nm	100 MHz	4 ps		10.7 W/25 kW	$M^2 \approx 1.07$	[77]
2010	~15 $\mu\text{m}$ /160 $\mu\text{m}$	~83 $\mu\text{m}$ /880 $\mu\text{m}$	0.11 (in core)/ 0.22 (in cladding)	6.3 m	1065 nm	5 Hz	64 ns	1.6 mJ	24.3 kW (peak power)	$M^2 \approx 2.7$	[12, 17]
2014	~9 $\mu\text{m}$ /145 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$ /800 $\mu\text{m}$		4 m	1038 nm		6 ps	2.5 $\mu\text{J}$	60 W/0.4 MW 2.5 MW after compression (peak power)	-	[11]
2015	10 $\mu\text{m}$ /80 $\mu\text{m}$	45 $\mu\text{m}$ /430 $\mu\text{m}$		2.1 m	1040 nm	1 MHz	130 fs			-	[93]
2016	25 $\mu\text{m}$ /250 $\mu\text{m}$	60 $\mu\text{m}$ /600 $\mu\text{m}$		2 m	1064 nm	10 kHz	3 ns	1 mJ	10.2 W/340 kW	$M^2 \approx 1.07$	[94]
2016	13 $\mu\text{m}$ (core diameter)	100 $\mu\text{m}$ (core diameter)	0.11 (in core)	6 m	1040 nm	10 kHz	60 ps	280 $\mu\text{J}$	5 MW (peak power)	$M^2 \approx 1.22$	[75, 95]
2017	35 $\mu\text{m}$ /250 $\mu\text{m}$	56 $\mu\text{m}$ /400 $\mu\text{m}$	0.07	2.8 m	1064 nm			50 $\mu\text{J}$	1.5 MW (peak power)	$M^2 < 1.2$	[96]
2017	6.9 $\mu\text{m}$ /29 $\mu\text{m}$	45 $\mu\text{m}$ /190 $\mu\text{m}$		68 cm	1030 nm	20 kHz	2 ns	0.57 mJ	11.4 W/167 kW	$M^2 < 2.6$	[97]
2017	6.5 $\mu\text{m}$ /53 $\mu\text{m}$	56 $\mu\text{m}$ /460 $\mu\text{m}$		60 cm	1030 nm	20 kHz	2 ns	0.5 mJ	10 W/230 kW	$M^2 \approx 3.3$	[10]
2017	~10 $\mu\text{m}$ /72.5 $\mu\text{m}$	62 $\mu\text{m}$ /450 $\mu\text{m}$	0.28	2 m	1064 nm	1 MHz	8 ps		0.76 MW/22 MW after compression	-	[98]
2017	18 $\mu\text{m}$ /145 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$ /800 $\mu\text{m}$		4 m		20 MHz	60 ps	0.3 mJ	5 MW (peak power)	$M^2 \approx 1.08$	[99]
2017	20 $\mu\text{m}$ (core diameter)	67 $\mu\text{m}$ (core diameter)	0.095 (in core)	2.2 m	1064 nm	1 MHz	7 ps		1.5 MW (peak power)	-	[100]
2017	13.2 $\mu\text{m}$ /110 $\mu\text{m}$	96 $\mu\text{m}$ /792 $\mu\text{m}$			1030 nm	20 MHz, 20 kHz	80 ps, 60 ps	0.3 mJ	70 W (average power)	-	[101]
2018	22.5 $\mu\text{m}$ /90 $\mu\text{m}$	86 $\mu\text{m}$ /350 $\mu\text{m}$	~0.3 (in cladding)	2.5 m	1550 nm	5 kHz	2 ns	0.25 mJ	19 W/107 kW	$M^2 < 1.27$	[102]
2018	12 $\mu\text{m}$ /53 $\mu\text{m}$	45 $\mu\text{m}$ /200 $\mu\text{m}$	0.09 (in core)/ 0.19 (in cladding)	50 cm	1030 nm	20 kHz	2 ns	0.78 mJ	15.5 W/375 kW	$M^2 < 1.7$	[103]

续表

Year	Fiber parameter				Output parameter				Beam quality	Reference	
	Fiber core /cladding diameter at small end	Fiber core /cladding diameter at large end	NA	Fiber length	Wavelength	Repetition frequency	Pulse width	Pulse energy			Average/peak power
2018	13.3 μm/110 μm	96 μm/792 μm	0.11 (in core)	~3.6 m	1040 nm	1 MHz	90 ps	28 μJ	28 W/292 kW	$M^2 \approx 1.09$	[104]
2019	35 μm/280 μm	100 μm/800 μm	0.1 (in core)	~3.4 m	1035 nm	14.8 MHz	50 ps		55 W(average power)	$M^2 < 1.18$	[105]
2019	36 μm/250 μm	58 μm/560 μm	0.064(in core)/ 0.5(in cladding)	0.74 m		80 kHz	3.8 ns	110 μJ	8.8 W/30 kW	$M^2 \approx 1.2$	[106]
2019	8.6 μm/73 μm	65 μm/550 μm	0.09 (in core)	2.7 m	1064 nm	10 MHz	8 ps		44 W/550 kW	$M^2 \approx 1.26$	[107]
2019	22 μm/75 μm	75 μm/256 μm	0.3 (in cladding)	3.2 m	1560 nm	100 kHz	500 fs	10 μJ	10 MW after compression (peak power)	-	[108]
2019	7.2 μm/57 μm	43 μm/344 μm	0.28 (in cladding)	~3 m	1064 nm	10 MHz	12.2 ps		71 W/820 kW	$M^2 < 1.17$	[109]
2020	10 μm/100 μm	50 μm/100 μm	0.09(in core)/ 0.28(in cladding)	2.5 m	1040 nm	100 kHz	48.8 ps	65 μJ	7.5 W/1.26 MW	$M^2 \approx 1.3$	[110]
2020	8.5 μm/35.7 μm	52 μm/226.8 μm	0.088(in core)	4 cm	1030 nm	250 kHz	28 ps		2.3 MW (peak power)	$M^2 \approx 1.3$	[111]
2021	10 μm/80 μm	~45 μm/435 μm	0.09(in core)/ 0.28(in cladding)	~2.6 m	1036 nm	250 kHz	412 fs	40 μJ	97 MW after compression (peak power)	Diffraction limited	[112]
2021	10 μm/70 μm	59 μm/432 μm		2.5 m	1053 nm	5 kHz	3 ns		170 kW (peak power)	$M^2 \approx 1.11$	[113]
2021	10 μm/100 μm	50 μm/500 μm		3 m	1064 nm	10 MHz	50 ps	9 μJ	150 W/170 kW	$M^2 \approx 1.19$	[114]



在整个发展历程中,绝大部分激光器的光束质量  $M^2$  都在 1.3 以下。在脉冲激光领域中,研究者主要利用长锥形光纤实现高功率激光输出和利用短锥形光纤进行模式匹配或模式滤波,进而实现高光束质量激光输出,下面对这两种应用的典型结果进行介绍。

### 3.2.1.1 利用长锥形增益光纤直接实现高功率激光输出

2008年,芬兰坦佩雷理工大学光电子研究中心和俄罗斯科学院光纤光学研究中心的研究人员合作研制出第一个长锥形掺镱光纤,将其用于皮秒脉冲放大,在 1063 nm 波段,获得了重复频率为 100 MHz、脉宽为 4 ps、平均功率为 10.7 W、峰值功率为 25 kW 的激光输出<sup>[77]</sup>。他们还分别实现了 84 W 的连续激光和 72 W 的超荧光输出,无论是连续激光还是脉冲激光,在采用大端泵浦注入、大端激光输出的条件下,激光器的光束质量都在 1.07 左右,首次验证了锥形光纤良好的光束质量保持特性。

此后,基于锥形增益光纤的脉冲激光得到了广泛的研究,峰值功率迅速提升。2010年,芬兰坦佩雷理工大学基于锥形双包层掺杂光纤,在重复频率为 1 Hz~150 kHz 的范围内都得到了调 Q 脉冲激光输出<sup>[12]</sup>;在重复频率为 5 Hz 时脉冲能量可达 1.6 mJ,验证了锥形光纤在低重复频率脉冲激光器中良好的 ASE 抑制效果<sup>[17]</sup>。2014年,芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯科学院研究人员采用锥形光纤实现了脉宽为 6 ps、峰值功率为 0.4 MW 的脉冲输出<sup>[11]</sup>。2015年,俄罗斯科学院研究人员首次利用锥形光纤和脉冲压缩方法,获得了峰值功率超过 1 MW 的飞秒脉冲输出。他们首先利用锥形光纤放大器获得脉宽为 7 ps、峰值功率为 100 kW 的激光,然后采用光栅对脉冲进行压缩,获得脉宽为 130 fs、峰值功率为 2.5 MW 的高峰值功率激光<sup>[93]</sup>。2016年,芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯科学院采用输出纤芯直径为 100  $\mu\text{m}$  的锥形掺镱光纤,实现了脉宽为 60 ps、峰值功率为 5 MW,光束质量  $M^2$  为 1.22 激光<sup>[75]</sup>。2017年,俄罗斯科学院采用纤芯/内包层直径从 10  $\mu\text{m}$ /72.5  $\mu\text{m}$  变化到 62  $\mu\text{m}$ /450  $\mu\text{m}$  的锥形增益光纤,在 1064 nm 波段实现了脉宽为 8 ps、峰值功率为 0.76 MW 的脉冲激光输出,经过脉冲压缩后获得脉宽为 315 fs、峰值功率为 22 MW 的飞秒脉冲激光<sup>[98]</sup>。

与此同时,锥形光纤也得到了产业公司的关注。2017年,加拿大 INO 公司 Roy 等<sup>[96]</sup>报道了一种纤芯部分掺杂的保偏掺镱大模场锥形光纤,该锥形光纤总长度为 2.8 m,其中锥区长度为 0.7 m,纤芯数值孔径为 0.07,小端纤芯/包层直径为 35  $\mu\text{m}$ /250  $\mu\text{m}$ ,大端纤芯/包层直径为 56  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$ 。将该光纤用于脉冲放大,获得了峰值功率为 1.5 MW 的皮秒脉冲。2017年,芬兰 Ampliconyx 公司、芬兰坦佩雷大学和俄罗斯科学院合作采用长度为 4 m、输入端纤芯/包层直

径为 18  $\mu\text{m}$ /145  $\mu\text{m}$ 、输出端纤芯/包层直径为 100  $\mu\text{m}$ /800  $\mu\text{m}$  的锥形光纤,实现了重复频率为 20 MHz、脉宽为 60 ps、峰值功率为 5 MW、光束质量  $M^2$  为 1.08 的皮秒脉冲激光<sup>[99]</sup>。

2018年,俄罗斯科学院研究人员研制了锥形掺钕双包层光纤,该光纤长度为 2.5 m,小端纤芯/包层直径为 22.5  $\mu\text{m}$ /90  $\mu\text{m}$ ,大端纤芯/包层直径为 86  $\mu\text{m}$ /350  $\mu\text{m}$ 。利用该光纤实现了中心波为 1550 nm、重复频率为 5 kHz、脉宽为 2 ns、峰值功率为 107 kW、光束质量  $M^2 < 1.27$  的纳秒脉冲激光<sup>[102]</sup>。2019年,他们基于长度为 3.2 m、纤芯/内包层直径从 22  $\mu\text{m}$ /75  $\mu\text{m}$  变化到 75  $\mu\text{m}$ /256  $\mu\text{m}$  的锥形掺钕光纤,结合脉冲压缩技术,实现了脉宽为 500 fs、峰值功率为 10 MW 的飞秒激光<sup>[108]</sup>。

2021年,法国 Keopsys 公司报道了峰值功率达 97 MW 的锥形掺镱全光纤飞秒激光器<sup>[112]</sup>。实验中,光纤长度为 2.6 m,纤芯/内包层直径从 10  $\mu\text{m}$ /80  $\mu\text{m}$  变化到 45  $\mu\text{m}$ /435  $\mu\text{m}$ ,纤芯/内包层数值孔径为 0.09/0.28。他们将光纤作为皮秒放大器的主放增益光纤,同时利用光栅对输出脉冲进行压缩,实验结构如图 10 所示。在脉冲压缩光栅之前,锥形光纤放大器直接输出重复频率为 250 kHz、脉宽为 400 ps、峰值功率为 124 kW 的脉冲;利用光栅进行脉冲压缩后,输出脉宽为 412 fs,峰值功率为 97 MW,这是当前报道的基于锥形光纤飞秒激光的最高峰值功率,且输出激光光束质量达到了近衍射极限。

### 3.2.1.2 利用短锥形增益光纤模式匹配实现高光束质量激光输出

除了常规具有较长过渡区域的长锥形增益光纤之外,德国莱布尼茨光子技术研究所(IPHT)通过对大纤芯直径掺镱光纤进行短距离拉锥,实现了模式过渡,同时提高了激光器的非线性阈值和光束质量。2017年,IPHT 的 Zhu 等<sup>[97]</sup>采用输入端纤芯/内包层直径为 6.9  $\mu\text{m}$ /29  $\mu\text{m}$ 、输出端纤芯内包层直径为 45  $\mu\text{m}$ /190  $\mu\text{m}$  的锥形掺镱光纤,实现了峰值功率为 167 kW 的纳秒脉冲,光束质量  $M^2$  为 2.1~2.6,当使用长度基本相同的常规的纤芯直径均匀的掺镱光纤时,激光器输出光束质量  $M^2$  为 3.5。结果表明,采用锥形掺镱光纤能够有效提升激光光束质量。同年,他们研制了输入纤芯/内包层直径为 6.5  $\mu\text{m}$ /53  $\mu\text{m}$ 、输出纤芯/内包层直径为 56  $\mu\text{m}$ /460  $\mu\text{m}$  的锥形掺镱光纤,并与纤芯/内包层直径为 56  $\mu\text{m}$ /460  $\mu\text{m}$  的纤芯直径均匀的掺镱光纤进行对比。结果表明,使用纤芯直径均匀的掺镱光纤能够获得峰值功率为 540 kW 的纳秒脉冲输出,其光束质量较差, $M^2$  在 10 左右;采用锥形掺镱光纤能够获得峰值功率为 230 kW 的纳秒脉冲输出,但是光束质量得到极大的提升, $M^2$  在 3.3 左右<sup>[10]</sup>。2018年,他们改进了锥形掺镱光纤的尺寸,采用输入纤芯/内包层直径为 12  $\mu\text{m}$ /53  $\mu\text{m}$ 、输出纤芯/

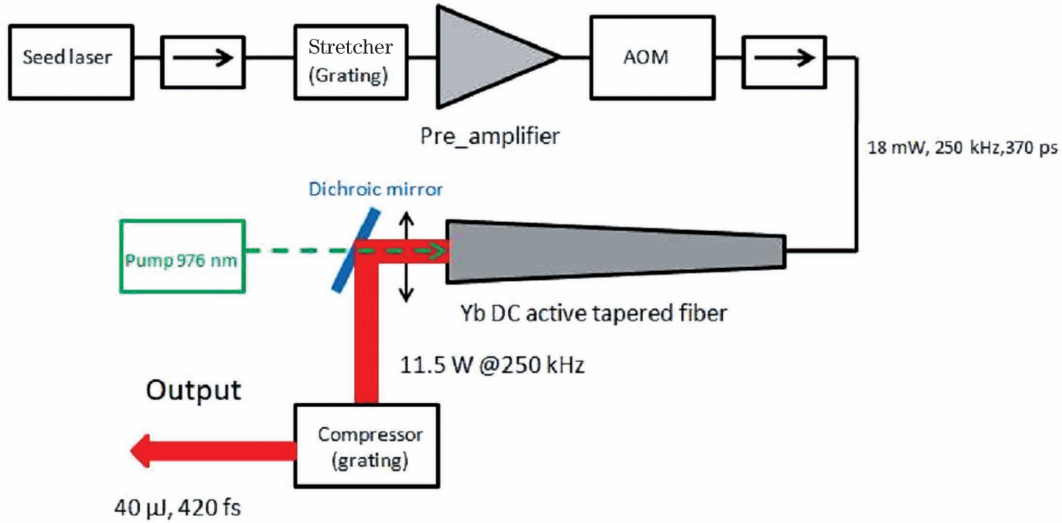


图 10 基于锥形光纤的飞秒脉冲激光系统<sup>[112]</sup>

Fig. 10 Femtosecond pulsed laser system based on tapered fiber<sup>[112]</sup>

内包层直径为  $45\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}$  的锥形掺镱光纤, 获得脉宽为  $2\ \text{ns}$ 、峰值功率为  $375\ \text{kW}$  的激光输出, 最高功率时激光光束质量  $M^2$  提升为  $1.5$  左右, 如图 11 所示<sup>[103]</sup>。2020 年, 他们又采用纤芯/内包层直径从  $8.5\ \mu\text{m}/35.7\ \mu\text{m}$  变化到  $52\ \mu\text{m}/226.8\ \mu\text{m}$  的锥形光纤, 进一步提升了脉冲激光的峰值功率和光束质量, 实现了峰值功率为  $2.3\ \text{MW}$ , 光束质量  $M^2$  约为  $1.3$  的近衍射高峰值功率激光输出<sup>[111]</sup>。

### 3.2.2 基于锥形增益光纤的线偏振脉冲光纤激光

在非保偏锥形光纤技术基本成熟后, 为了实现高功率的线偏振激光, 研究人员研究了基于线偏振特性的锥形增益光纤激光器, 典型结果如表 3 所示, 其中 PER 表示消光比, DOP 为偏振度。

#### 3.2.2.1 基于熊猫保偏锥形增益光纤的线偏振脉冲激光

2017 年, 俄罗斯科学院研究人员进行了保偏锥形光纤的研制<sup>[100-101, 104]</sup>, 首先对该类光纤的后向散射和偏振拍长进行了研究<sup>[104]</sup>, 然后将该类光纤用于保偏皮秒脉冲放大, 先后获得了脉宽为  $60\ \text{ps}$ 、脉冲能量为  $0.3\ \text{mJ}$ <sup>[101]</sup> 的脉冲激光和脉宽为  $7\ \text{ps}$ 、峰值功率为

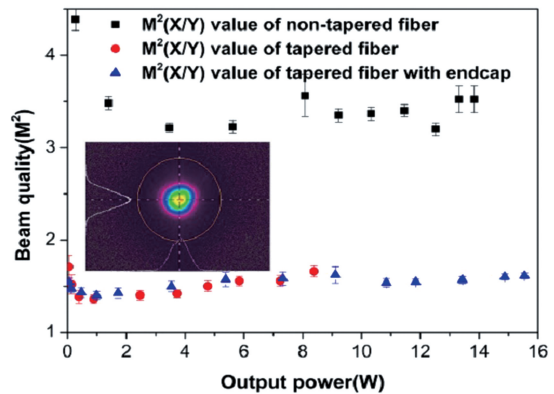


图 11 采用纤芯直径均匀的掺镱光纤和锥形掺镱光纤时激光器的光束质量<sup>[103]</sup>

Fig. 11 Laser beam quality using non-tapered Yb-doped fiber or tapered Yb-doped fiber<sup>[103]</sup>

$1.5\ \text{MW}$  的脉冲激光<sup>[100]</sup>。2018 年, 研究人员研制了纤芯/包层直径从  $13.3\ \mu\text{m}/110\ \mu\text{m}$  增加到  $96\ \mu\text{m}/792\ \mu\text{m}$  的大模场保偏锥形掺镱光纤, 如图 12 所示<sup>[104]</sup>。利用该光纤获得了峰值功率为  $292\ \text{kW}$  的皮秒脉冲, 当输出端的纤芯直径达到  $96\ \mu\text{m}$  时, 激光仍能够保持近衍射极限的光束质量 ( $M^2$  约为  $1.09$ )。

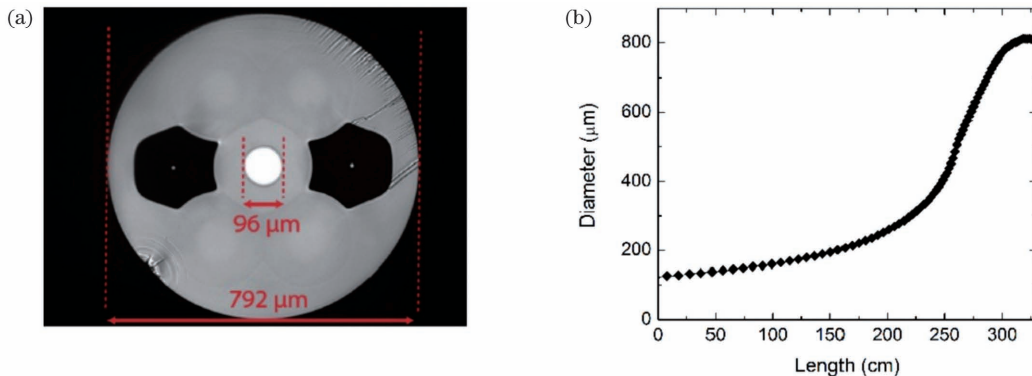


图 12 熊猫保偏光纤特征<sup>[104]</sup>。(a)熊猫保偏锥形掺镱光纤的截面图;(b)光纤包层直径随光纤长度的变化

Fig. 12 Characteristics of panda-type polarization-maintaining tapered Yb-doped fiber; (b) fiber cladding diameter versus fiber length

表 3 基于线偏振变芯直径光纤的高功率脉冲冲光纤激光器的典型研究结果  
Table 3 Typical research results of high power pulsed fiber laser based on linearly-polarized fiber with variable core diameter

Year	Fiber parameter			Output parameter							Beam quality	Reference
	Fiber core /cladding diameter at small end	Fiber core /cladding diameter at large end	NA	Fiber length	Wavelength	Repetition frequency	Pulse width	Pulse energy	Average/peak power	PER or DOP		
2017	20 $\mu\text{m}$ (core diameter)	67 $\mu\text{m}$ (core diameter)	0.095 (in core)	2.2 m	1064 nm	1 MHz	7 ps		1.5 MW (peak power)		-	[100]
2017	13.2 $\mu\text{m}$ / 110 $\mu\text{m}$	96 $\mu\text{m}$ / 792 $\mu\text{m}$			1030 nm	20 MHz, 20 kHz	80 ps, 60 ps	0.3 mJ	70 W (average power)		-	[101]
2018	13.3 $\mu\text{m}$ / 110 $\mu\text{m}$	96 $\mu\text{m}$ / 792 $\mu\text{m}$	$\sim$ 0.11 (in core)	$\sim$ 3.6 m	1040 nm	1 MHz	90 ps	28 $\mu\text{J}$	28 W/ 292 kW		$M^2 \approx 1.09$	[104]
2019	35 $\mu\text{m}$ / 280 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$ / 800 $\mu\text{m}$	0.1 (in core)	$\sim$ 3.4 m	1035 nm	14.8 MHz	50 ps		55 W (average power)		$M^2 < 1.18$	[105]
2019	17 $\mu\text{m}$ / 170 $\mu\text{m}$	49 $\mu\text{m}$ / 490 $\mu\text{m}$	0.08 (in core)	1.2 m	1053 nm	10 kHz	130 ns	288 $\mu\text{J}$ , 524 $\mu\text{J}$	(peak power), 4 kW (peak power)		$M^2 < 1.08$	[115]
2019	7.2 $\mu\text{m}$ / 57 $\mu\text{m}$	43 $\mu\text{m}$ / 344 $\mu\text{m}$	0.28 (in cladding)	$\sim$ 3 m	1064 nm	10 MHz	12.2 ps		71 W/ 820 kW		$M^2 < 1.17$	[109]
2020	15 $\mu\text{m}$ / 120 $\mu\text{m}$	35 $\mu\text{m}$ / 285 $\mu\text{m}$		2.8 m	1035 nm	14.8 MHz	50 ps		72.5 W (average power)	PER > 17 dB	$M^2 \leq 1.18$	[116]
2021	15 $\mu\text{m}$ / 120 $\mu\text{m}$	35 $\mu\text{m}$ / 285 $\mu\text{m}$		3 m	1040 nm	20 MHz	50 ps	2.5 $\mu\text{J}$	50 W/ 47 kW	DOP of 98%	$M^2 \leq 1.18$	[117]
2021	8 $\mu\text{m}$ / 90 $\mu\text{m}$	44 $\mu\text{m}$ / 486 $\mu\text{m}$	0.1 (in core)/ 0.4 (in cladding)	6.7 m	1062 nm	100 MHz	95 ps		64 W (average power)	DOP of 95%	$M^2 \leq 1.2$	[118]
2021	9.5 $\mu\text{m}$ / 68 $\mu\text{m}$	46 $\mu\text{m}$ / 330 $\mu\text{m}$	0.095 (in core)/ 0.26 (in cladding)	2.45 m	1064 nm	9.2 MHz	22 ps		150 W/ 0.74 MW	PER of 13.5 dB	$M^2 \leq 1.14$	[73, 119]
2021	36 $\mu\text{m}$ / 250 $\mu\text{m}$	58 $\mu\text{m}$ / 400 $\mu\text{m}$	0.064 (in core)/ 0.5 (in cladding)	1.27 m	1064 nm	80 kHz	3.8 ns	110 $\mu\text{J}$	8.8 W/ 30 kW	PER of 16 dB	$M^2 \approx 1.2$	[120]

2020 年, Petrov 等<sup>[110]</sup>采用长度为 2.5 m、纤芯/外包层直径从 10  $\mu\text{m}$ /100  $\mu\text{m}$  增加到 50  $\mu\text{m}$ /100  $\mu\text{m}$  的锥形保偏掺镱光纤, 实现了中心波长为 1040 nm, 脉宽为 48.8 ps, 重复频率为 100 kHz、峰值功率为

1.26 MW 和重复频率为 34 MHz、平均功率为 200 W 的线偏振脉冲激光输出。当平均功率为 200 W 时, 消光比为 14.1 dB, 光束质量  $M^2$  约为 1.3。不同功率时输出激光的消光比和光束质量特性如图 13 所示。

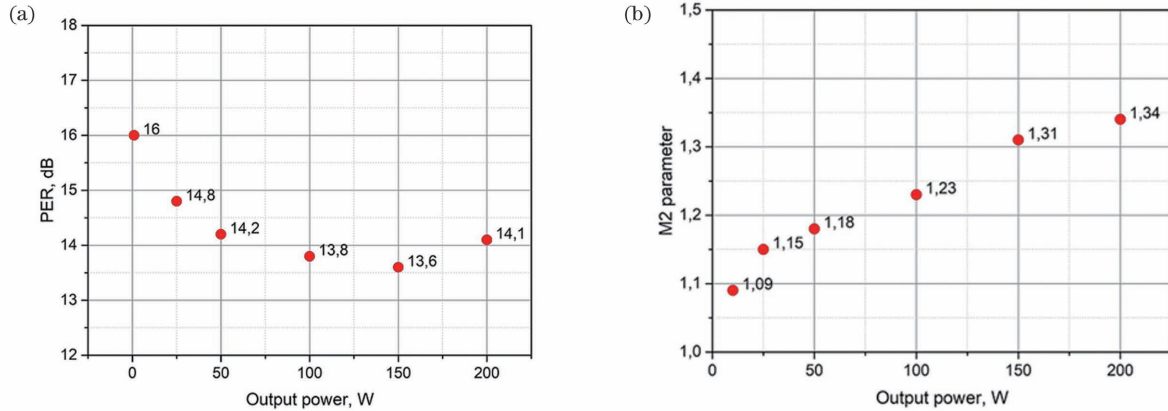


图 13 线偏振激光输出特性<sup>[110]</sup>。(a)不同输出功率时的消光比; (b)不同输出功率时的光束质量

Fig. 13 Output characteristics of linearly polarized laser<sup>[110]</sup>. (a) Extinction ratios at different output powers; (b) beam qualities at different output powers

2021 年, Bobkov 等<sup>[73,119]</sup>将线偏振脉冲激光的峰值功率进一步提升。他们采用纤芯/内包层直径从 10  $\mu\text{m}$ /80  $\mu\text{m}$  变化到 40  $\mu\text{m}$ /320  $\mu\text{m}$  的熊猫保偏锥形光纤作为放大器的增益介质, 实现了重复频率为 9.2 MHz、脉宽为 22 ps、平均功率为 150 W、峰值功率为 0.74 MW、消光比为 13.5 dB、光束质量  $M^2$  小于 1.2 的高峰值功率线偏振皮秒脉冲激光。

### 3.2.2.2 基于旋转锥形增益光纤的线偏振脉冲激光

2019 年前后, 芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯科学院研究人员首次提出了旋转锥形双包层掺镱光纤的概

念<sup>[105]</sup>。在拉制锥形光纤的过程中, 按照一定的速度旋转光纤预制棒, 可以得到周期为数毫米的旋转周期锥形光纤, 如图 14 所示, 该光纤的小端纤芯/内包层直径为 35  $\mu\text{m}$ /280  $\mu\text{m}$ , 大端纤芯/内包层直径为 100  $\mu\text{m}$ /800  $\mu\text{m}$ , 纤芯数值孔径为 0.1。利用该光纤实现了中心波长为 1035 nm、重复频率为 4.8 MHz、脉宽为 50 ps、平均功率为 55 W 的线偏振激光输出, 激光的消光比为 15 dB, 光束质量  $M^2$  小于 1.18。首次验证了旋转锥形掺镱光纤能够获得高消光比的线偏振激光输出。

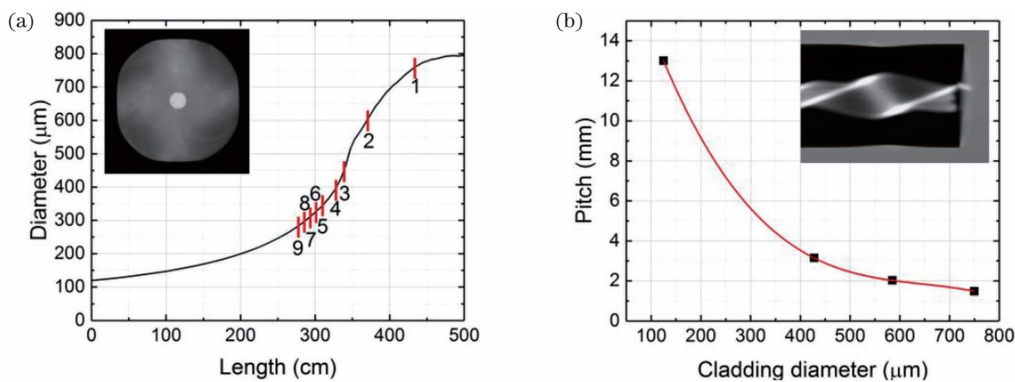


图 14 旋转锥形掺镱光纤的特性<sup>[105]</sup>。(a)旋转锥形掺镱光纤的包层直径变化曲线, 插图光纤端面; (b)旋转周期与包层直径的关系, 插图旋转锥形光纤的侧视图

Fig. 14 Characteristics of spun tapered Yb-doped fiber<sup>[105]</sup>. (a) Cladding diameter of spun tapered Yb-doped fiber versus length with fiber end face shown in inset; (b) spun pitch versus cladding diameter with side view of spun tapered fiber shown in inset

2020 年, 芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯科学院研究人员研制了光纤长度为 2.8 m、纤芯/外包层直径从 15  $\mu\text{m}$ /120  $\mu\text{m}$  变化到 35  $\mu\text{m}$ /285  $\mu\text{m}$ 、旋转周期从 13 mm 变化到 6 mm 的旋转锥形掺镱双包层光纤<sup>[116]</sup>。他们对比了旋转锥形双包层掺镱光纤、熊猫保偏锥形双包层掺镱光纤、普通非保偏锥形双包层掺

镱光纤的消光比特性。发现旋转锥形掺镱光纤的消光比保持特性最好, 在不同泵浦功率情况下, 消光比大多在 16 dB 以上; 熊猫保偏锥形掺镱双包层光纤的消光比随泵浦功率的变化较大, 且均小于 16 dB。利用该旋转锥形掺镱光纤进行脉冲放大, 实现了中心波长为 1035 nm、重复频率为 14.8 MHz、脉宽为 50 ps、平均

功率为 72.5 W、消光比 > 17 dB 的线偏振皮秒脉冲激光输出<sup>[116]</sup>。

2021 年,芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯圣彼得堡国立理工大学利用纤芯/外包层直径从 15  $\mu\text{m}$ /120  $\mu\text{m}$  增加到 35  $\mu\text{m}$ /285  $\mu\text{m}$  的旋转锥形掺镱双包层光纤,实现了平均功率为 50 W、峰值功率为 47 kW、偏振度为 98% 的线偏振脉冲激光,光束质量  $M_x^2 = 1.18$ ,  $M_y^2 = 1.10$ <sup>[117]</sup>。同年,他们采用纤芯/外包层直

径从 8  $\mu\text{m}$ /90  $\mu\text{m}$  变化到 44  $\mu\text{m}$ /486  $\mu\text{m}$  的旋转锥形掺镱双包层光纤,实现了脉宽为 95 ps、平均功率为 64 W、偏振度为 95% 的线偏振脉冲激光<sup>[118]</sup>。

### 3.2.3 基于保偏锥形增益光纤的单频/窄线宽脉冲光纤激光

由于锥形增益光纤在非线形效应抑制方面的优势,近年来,其在单频/窄线宽脉冲放大方面也逐渐得到应用,比较典型的研究结果如表 4 所示。

表 4 变纤芯直径高功率单频/窄线宽脉冲光纤激光器的典型研究结果

Table 4 Typical research results of high power single-frequency/narrow linewidth pulsed fiber laser with variable fiber core diameter

Year	Fiber parameter				Fiber length	Beam quality
	Fiber core/cladding diameter at small end	Fiber core/cladding diameter at large end	NA			
2019	36 $\mu\text{m}$ /250 $\mu\text{m}$	58 $\mu\text{m}$ /560 $\mu\text{m}$	0.064(in core)/ 0.5(in cladding)		0.74 m	$M^2 \approx 1.2$
2019	17 $\mu\text{m}$ /170 $\mu\text{m}$	49 $\mu\text{m}$ /490 $\mu\text{m}$	0.08( in core)		1.2 m	$M^2 < 1.08$
2021	10 $\mu\text{m}$ /70 $\mu\text{m}$	59 $\mu\text{m}$ /432 $\mu\text{m}$			2.5 m	$M^2 \approx 1.11$

Output parameter							Reference
Wavelength	Linewidth	Repetition frequency	Pulse width	Pulse energy	Average/peak power	PER	
	282.1 MHz	80 kHz	3.8 ns	110 $\mu\text{J}$	8.8 W/30 kW	16 dB	[106,120]
1053 nm	10 MHz	10 kHz	130 ns	288 $\mu\text{J}$	2.2 kW (peak power)	18.7 dB	[115]
1053 nm	167 pm	5 kHz	3 ns		170 kW (peak power)		[113]

2019 年,芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯科学院的研究人员采用锥形掺镱保偏双包层光纤放大器,实现了线宽为 10 MHz、脉宽为 130 ns 的窄线宽纳秒脉冲激光<sup>[115]</sup>。实验中使用的锥形掺镱光纤长度为 1.2 m,小端纤芯/内包层直径为 17  $\mu\text{m}$ /170  $\mu\text{m}$ ,大端纤芯/内包层直径为 49  $\mu\text{m}$ /490  $\mu\text{m}$ ,纤芯数值孔径为 0.08。实验获得了线宽小于 10 MHz、输出重复频率为 10 kHz、脉宽为 130 ns、峰值功率为 2.2 kW、消光比为 18.7 dB、光束质量  $M^2$  不大于 1.08 的单频保偏脉冲激光。

2021 年,法国阿基坦科学技术研究中心(CIAE)报道了基于掺镱锥形光纤放大器产生的大脉冲能量、窄线宽的纳秒脉冲激光<sup>[113]</sup>。他们研发了两种锥形掺镱光纤,其中一种光纤的纤芯/内包层直径从 10  $\mu\text{m}$ /70  $\mu\text{m}$  变化到 59  $\mu\text{m}$ /432  $\mu\text{m}$ 。利用该光纤,当脉宽为 10 ns 时,实现了线宽为 167 pm、脉宽为 10 ns、单脉冲能量为 1.25 mJ、峰值功率为 125 kW、光束质量  $M^2 = 1.1$  的窄线宽纳秒脉冲;当脉宽为 3 ns 时,实现了峰值功率为 170 kW 的激光输出。

### 3.3 变纤芯直径宽谱连续光纤激光器的研究现状

变纤芯直径增益光纤在光纤激光器中的应用最早是受到了变纤芯直径传能光纤应用的启发。早在 1999 年,南安普敦大学利用变纤芯直径的马鞍形传能

光纤进行模式选择,将常规光纤激光器的光束质量  $M^2$  从 2.6 提升到 1.4<sup>[52]</sup>。实验中的激光器结构和马鞍形传能光纤结构如图 15 所示。在激光器中,当无马鞍形光纤滤波时,输出功率为 11 W,效率为 85%,光束质量  $M^2$  为 2.6;在激光谐振腔内增加长度为 3 cm、纤芯数值孔径为 0.15、小端和大端纤芯/内包层直径分别为 5.25  $\mu\text{m}$ /70  $\mu\text{m}$  和 15  $\mu\text{m}$ /200  $\mu\text{m}$  的马鞍形光纤后,输出功率为 9 W,效率为 65%,光束质量  $M^2$  为 1.4。该实验验证了变纤芯直径光纤能够有效提升激光器光束质量。

2008 年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Li 等<sup>[7]</sup>也报道了采用马鞍形传能光纤提高光纤激光器光束质量的实验。首先采用光纤纤芯直径为 43  $\mu\text{m}$ 、纤芯数值孔径为 0.08 的纤芯直径均匀的光纤进行实验,获得输出激光功率为 77.9 W、光束质量  $M^2$  为 3.08;为了提高光束质量,在与输出端一定距离位置处增加一个长度为 20 mm、最小纤芯直径为 9  $\mu\text{m}$ 、最大纤芯直径为 43  $\mu\text{m}$  的马鞍形光纤对激光器进行滤波,使用该光纤后,在相同泵浦功率情况下,输出激光功率为 54.6 W,光束质量  $M^2$  为 1.14。该实验表明,尽管激光器的功率降低了 30%,但是亮度提升了 5.28 倍。增加马鞍形光纤前后光纤激光器输出的远场光斑特性如图 16 所示。

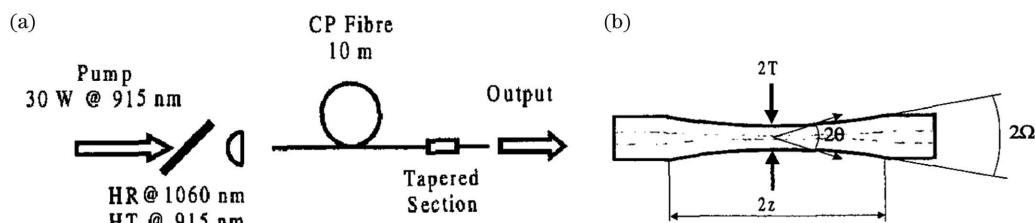


图 15 基于马鞍形光纤的激光器结构<sup>[52]</sup>。(a)激光器结构示意图；(b)马鞍形光纤的结构示意图

Fig. 15 Structural diagrams of laser based on saddle-shaped fiber<sup>[52]</sup>. (a) Structural diagram of laser; (b) structural diagram of saddle-shaped fiber

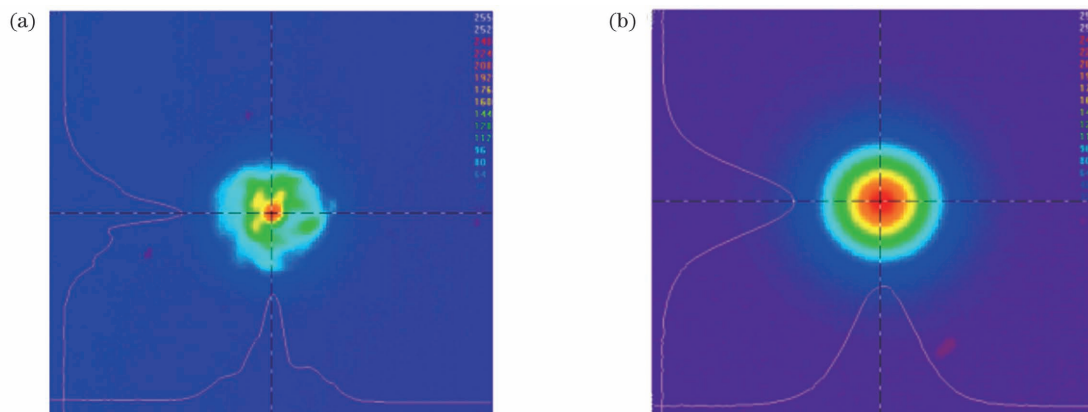


图 16 不同条件下光纤激光器的输出光斑形态<sup>[7]</sup>。(a)无马鞍形光纤；(b)有马鞍形光纤

Fig. 16 Output spot morphologies of fiber laser under different conditions<sup>[7]</sup>. (a) Without saddle-shaped fiber; (b) with saddle-shaped fiber

前面所述激光器本质上是使用变纤芯传能光纤对激光器进行滤波,不产生增益。这些早期的实验验证了变纤芯直径光纤对光束质量的提升作用。此后,在连续激光器中,单锥形、纺锤形、马鞍形三类变纤芯直径掺镱光纤先后都得到了广泛的应用。下面分别对基于单锥形增益光纤、纺锤形增益光纤和马鞍形增益光纤的激光器的研究现状进行介绍。

### 3.3.1 基于单锥形掺镱光纤的高功率连续激光器的研究现状

基于单锥形增益光纤的高功率连续激光器的典型研究结果如表 5 所示。

#### 3.3.1.1 国外单锥形掺镱光纤高功率连续激光器的研究现状

真正意义的变纤芯直径增益光纤是在 2008 年由芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯科学院合作研制的,并首次实现了 84 W 的平均功率输出<sup>[77]</sup>。同年,芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯科学院的 Filippov 等<sup>[9]</sup>报道了基于单锥形掺镱光纤和低亮度泵浦源的 212 W 单模光纤激光器。激光器中使用的锥形光纤长度为 12 m,小端纤芯/内包层直径为  $6.5 \mu\text{m}/200 \mu\text{m}$ ,大端纤芯/内包层直径为  $27 \mu\text{m}/834 \mu\text{m}$ ,纤芯/内包层数值孔径为 0.114/0.21。实验获得的输出激光功率为 212 W、光束质量  $M^2$  为 1.04。首次将锥形增益光纤激光器的输出功率提升到 200 W 以上。

此后,变纤芯直径增益光纤激光器的输出功率逐

步提升。2009 年,芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯科学院采用单锥形增益光纤实现了 600 W 的功率输出,在输出纤芯直径达到  $65 \mu\text{m}$  时,光束质量  $M^2$  可达 1.08<sup>[14,121]</sup>。2010 年,他们将单锥形增益光纤激光器的功率提升到 750 W,在输出纤芯直径为  $51.6 \mu\text{m}$  时,光束质量可达 1.7<sup>[76,122]</sup>。2012 年,芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯科学院对在纵向上有不同形状分布的锥形增益光纤进行了理论和实验的对比研究,建立了光纤内部功率分布的理论模型,并对激光器效率、光谱、光束质量、自脉冲特性进行了实验研究和对比<sup>[129]</sup>。结果表明,使用锥形增益光纤后激光器具有更高的效率、更高的吸收系数和更高的非线性阈值,对泵浦源亮度要求更低。2017 年,加拿大 INO 公司利用自研的光纤,实现了功率为 100 W 的近衍射极限单模激光输出<sup>[96]</sup>。

#### 3.3.1.2 国内单锥形掺镱光纤高功率连续激光器的研究现状

2015 年前后,国内也开展了基于变纤芯直径增益光纤的高功率连续激光器的研究。2016 年,本课题组建立了锥形掺镱光纤模式演化的理论模型,利用该模型对锥形光纤放大器进行仿真,结果表明,锥形光纤能够有效保持良好的光束质量<sup>[13]</sup>。2017 年,本课题组建立长锥形掺镱光纤中的受激拉曼散射理论模型,并基于该模型进行仿真,结果表明,采用锥形掺镱光纤可以较好地抑制非线性效应,提高 SRS 阈值<sup>[74]</sup>。2017 年,

表 5 基于单锥形增益光纤的宽谱高功率光纤激光器的典型研究结果

Table 5 Typical research results of wide-spectrum high power fiber laser based on single-tapered gain fiber

Year	Fiber parameter				Power	Beam quality	Reference
	Fiber core/cladding diameter at small end	Fiber core/cladding diameter at large end	NA	Fiber length			
2008	~5.6 $\mu\text{m}$ /174 $\mu\text{m}$	27 $\mu\text{m}$ /834 $\mu\text{m}$	0.15(in core)	10.5 m	84 W	$M^2 \approx 1.07$	[77]
2008	6.5 $\mu\text{m}$ /200 $\mu\text{m}$	27 $\mu\text{m}$ /834 $\mu\text{m}$	0.114(in core)/ 0.21(in cladding)	12 m	212 W	$M^2 = 1.04$	[9]
2009	10.8 $\mu\text{m}$ /145 $\mu\text{m}$	65 $\mu\text{m}$ /835 $\mu\text{m}$	0.07(in core)/ 0.22(in cladding)	24 m	600 W	$M^2 = 1.08$	[14,121]
2010	~17.7 $\mu\text{m}$ /320 $\mu\text{m}$	~51.6 $\mu\text{m}$ /930 $\mu\text{m}$	0.11(in core)/ 0.22(in cladding)	23.5 m	750 W	$M^2 = 1.7$	[76,122]
2012	~7.5 $\mu\text{m}$ /120 $\mu\text{m}$	44 $\mu\text{m}$ /700 $\mu\text{m}$	0.11(in core)/ 0.4(in cladding)	18 m	110 W	$M^2 \approx 1.06$	[123]
2017	35 $\mu\text{m}$ /250 $\mu\text{m}$	56 $\mu\text{m}$ /400 $\mu\text{m}$	0.07(in core)	2.8 m	100 W	$M^2 \approx 1.15$	[96]
2017	21.2 $\mu\text{m}$ /417.3 $\mu\text{m}$	30.4 $\mu\text{m}$ /609.6 $\mu\text{m}$	0.06(in core)/ 0.46(in cladding)	33 m	1470 W	$M^2 \approx 1.8$	[124-125]
2018	20 $\mu\text{m}$ /400 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$ /600 $\mu\text{m}$	0.06(in core)/ 0.46(in cladding)	33 m	260 W	Fundamental mode	[126]
2019	~20 $\mu\text{m}$ /400 $\mu\text{m}$	~30 $\mu\text{m}$ /600 $\mu\text{m}$	0.065(in core)	~33 m	1700 W	$M^2 = 2.1$	[127]
2019	~20 $\mu\text{m}$ /400 $\mu\text{m}$	~30 $\mu\text{m}$ /600 $\mu\text{m}$	0.065(in core)/ 0.46(in cladding)	~22 m	2170 W	$M^2 \approx 2.2$	[16]
2020	31.2 $\mu\text{m}$ /400 $\mu\text{m}$	52.5 $\mu\text{m}$ /400 $\mu\text{m}$	0.065(in core)	7 m	364 W	$M^2 = 1.63$	[79,128]

本课题组建立锥形掺镱光纤放大器的模式不稳定效应理论模型,并进行了详细的理论研究<sup>[124]</sup>。2018年,本课题组与电子科技集团第23研究所合作,研制了长度为33 m、纤芯/内包层直径从21.2  $\mu\text{m}$ /417.3  $\mu\text{m}$ 增加到30.4  $\mu\text{m}$ /609.6  $\mu\text{m}$ 、纤芯/内包层数值孔径为0.06/0.46的单锥形掺镱光纤;利用该光纤作为放大器的增益介质,实现了1470 W的近单模激光输出,光束质量 $M^2$ 为1.8,输出功率特性和光斑形态如图17所示<sup>[125]</sup>。单锥形增益光纤激光器的输出功率首次突破1 kW。

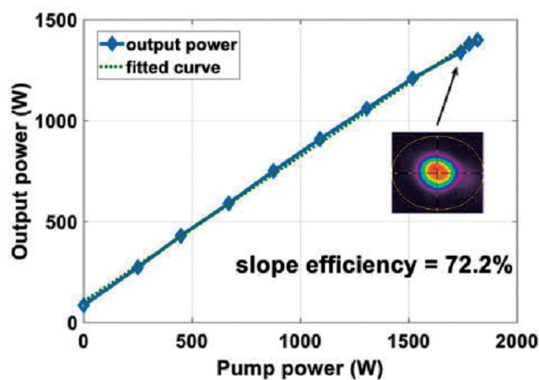


图 17 输出功率随泵浦功率的变化,插图为输出功率为 1.39 kW 时的光斑形态<sup>[125]</sup>

Fig. 17 Output power versus pump power with beam pattern at 1.39 kW output power shown in inset<sup>[125]</sup>

2018年,本课题组采用锥形光纤实现了全光纤结构的光纤激光振荡器<sup>[126]</sup>。掺镱双包层光纤的长度约为33 m,小端纤芯/内包层直径为20  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$ ,大端纤芯/内包层直径为30  $\mu\text{m}$ /600  $\mu\text{m}$ ,纤芯数值孔径为0.065。采用915 nm激光进行前向泵浦,当泵浦功率为462 W时,输出功率为260 W。2019年,本课题组首次对该锥形光纤振荡器在不同泵浦情况下的TMI阈值特性进行对比研究。同年,本课题组对等效纤芯直径基本相等的普通纤芯直径均匀的掺镱光纤和锥形掺镱光纤在高功率放大器中的光束质量特性进行对比研究<sup>[16]</sup>。实验中,采用前向泵浦的一级振荡放大器结构,主放大器分别采用纤芯/内包层直径为25  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$ 的纤芯直径均匀的掺镱光纤和纤芯/内包层直径从20  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$ 增加到30  $\mu\text{m}$ /600  $\mu\text{m}$ 的锥形掺镱光纤。结果表明,采用纤芯直径均匀的光纤时,在激光输出功率大于1000 W的条件下,光束质量 $M^2$ 迅速恶化,当输出功率为1500 W时 $M^2$ 为3.2左右,如图18(a)所示;采用锥形光纤时,在输出功率为1200~1980 W的条件下,激光器光束质量 $M^2$ 都保持在2.1左右,在最高功率为2170 W的条件下,光束质量 $M^2$ 也保持在2.2左右,如图18(b)所示。实验初步验证了单锥形掺镱光纤比普通纤芯直径均匀的掺镱光纤有着更好的光束质量保持特性。



图 18 不同光纤放大器下的光束质量与输出功率的关系<sup>[16]</sup>。(a) 纤芯直径均匀的光纤; (b) 单锥形光纤  
 Fig. 18 Beam quality versus output power for different fiber amplifiers<sup>[16]</sup>. (a) Based on uniform core fiber; (b) based on tapered fiber

2020 年, 华中科技大学李进延团队基于预制棒形态控制法, 研制了包层直径恒定、纤芯直径渐变的掺镱光纤<sup>[128]</sup>。该光纤长度为 7 m, 内包层直径为 400  $\mu\text{m}$ , 两端的纤芯直径分别为 31.2  $\mu\text{m}$  和 52.5  $\mu\text{m}$ , 纤芯数

值孔径为 0.065, 如图 19 所示。利用该光纤搭建放大器, 获得了 364 W 输出, 激光光束质量  $M^2$  为 1.63, 激光器效率为 71.1%。

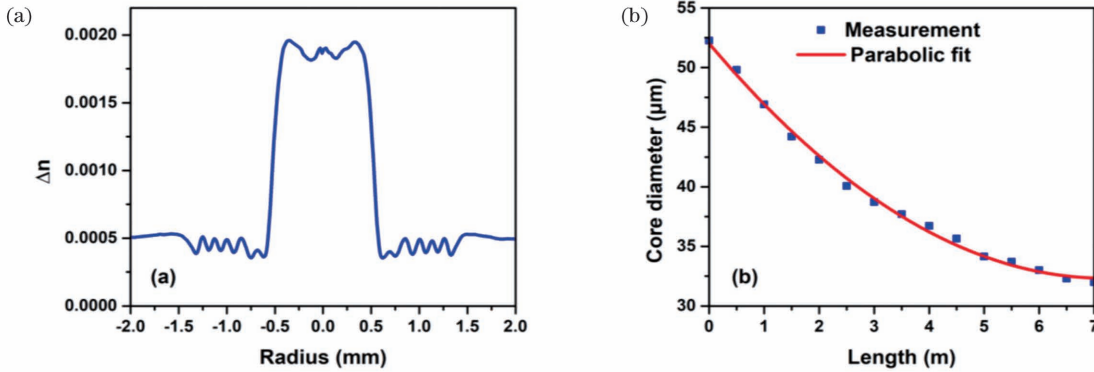


图 19 纤芯直径渐变的掺镱光纤特征<sup>[128]</sup>。(a) 掺镱光纤预制棒的折射率分布; (b) 纤芯直径随增益光纤长度的变化  
 Fig. 19 Characteristics of Yb-doped fiber with variable core diameter<sup>[128]</sup>. (a) Refractive index profile of Yb-doped fiber preform; (b) core diameter versus gain fiber length

2020 年, 华中科技大学在之前研制的包层直径恒定、纤芯直径渐变的锥形增益光纤的基础上<sup>[128]</sup>, 对分别以掺镱光纤小端和大端作为放大器输出端时的功率

和光束质量特性进行了对比<sup>[79]</sup>, 如图 20 所示。在小端输出情况下, 当泵浦功率为 518 W 时, 输出功率为 339 W, 效率为 65.47%, 对应的光束质量  $M_x^2 =$

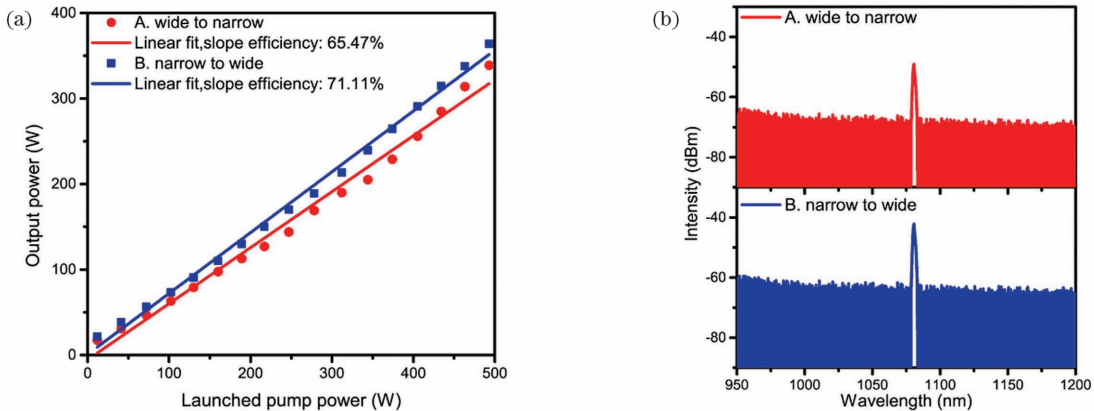


图 20 锥形光纤放大器输出特性<sup>[79]</sup>。(a) 大端和小端作为放大器输出端时的激光器功率和效率; (b) 大端和小端作为放大器输出端时的激光器光谱<sup>[79]</sup>

Fig. 20 Output characteristics of tapered fiber amplifier<sup>[79]</sup>. (a) Powers and efficiencies of laser when large end and small end are output of amplifier; (b) spectra of laser when large end and small end are output of amplifier



1.415,  $M_y^2 = 1.495$ ; 在大端输出情况下, 在相同泵浦功率下, 输出功率为 364 W, 效率为 71.11%, 光束质量  $M_x^2 = 1.619, M_y^2 = 1.641$ ; 采用普通纤芯直径为  $52 \mu\text{m}$  的均匀光纤时, 输出光束质量  $M_x^2 = 2.581, M_y^2 = 2.396$ 。结果表明, 采用小端作为放大器输出端时, 激光器的效率降低, 但光束质量提升。

### 3.3.2 基于纺锤形和马鞍形掺镱光纤的高功率连续激光器的研究现状

考虑到普通单锥形光纤在高功率时的 TMI 阈值较低, 课题组提出将纺锤形和马鞍形增益光纤用于高功率振荡器的方案<sup>[69-71]</sup>。其中, 纺锤形光纤两端区域的纤芯直径较小, 支持模式较少, 结合光纤弯曲, 可以有效抑制 TMI; 中间纤芯直径较大, 可以在一定程度上抑制非线性效应。该方案有望成为实现高功率激光输出的有效技术方案。近年来, 纺锤形和马鞍形增益

光纤激光器得到了较快的发展, 功率迅速突破了 5 kW, 典型研究结果如表 6 所示。

### 3.3.2.1 纺锤形掺镱光纤高功率连续激光器的研究现状

2020 年, 本课题组与电子科技集团第 23 所合作, 基于变速拉丝法研发了首个纺锤形双包层掺镱光纤。该纺锤形光纤总长度为 31 m, 分为 5 个区域, 如图 21(a)所示。小纤芯区域①和⑤位于两端, 长度均为 3.5 m, 纤芯/内包层直径为  $20 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ ; 大芯径区域③的光纤长度均为 6 m、纤芯/内包层直径为  $30 \mu\text{m}/600 \mu\text{m}$ ; 变纤芯区域②和④长度各为 9 m, 纤芯/内包层直径为  $0.066 \mu\text{m}/0.46 \mu\text{m}$ <sup>[130]</sup>。采用 976 nm 泵浦源泵浦该纺锤形增益光纤, 实现了输出功率为 1836 W、光束质量  $M^2$  为 1.65 的近单模激光输出, 如图 21(b)所示。

表 6 基于纺锤形和马鞍形增益光纤的宽谱高功率光纤激光器的典型研究结果

Table 6 Typical research results of wide-spectrum high power fiber lasers based on spindle-shaped and saddle-shaped gain fibers

Year	Fiber parameter					Power	Beam quality	Reference
	Fiber type	Fiber core/cladding diameter at small end	Fiber core/cladding diameter in middle	Fiber core/cladding diameter at large end	Fiber length			
2020	SPF	$20 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	$30 \mu\text{m}/600 \mu\text{m}$	$20 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	31 m	1836 W	$M^2 \approx 1.65$	[130]
2020	SPF	$24.08 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	$31 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	$23.36 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	25 m	2023 W	$M^2 \approx 1.65$	[131]
2020	SPF	$24.08 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	$31 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	$23.36 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	25 m	3420 W	$M^2 \approx 1.7$	[72,132]
2020	SPF	$20 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	$30 \mu\text{m}/600 \mu\text{m}$	$20 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	30.5 m	3004 W	$M^2 \approx 1.3$	[15,133]
2021	SPF	$22 \mu\text{m}/413 \mu\text{m}$	$32 \mu\text{m}/600 \mu\text{m}$	$22 \mu\text{m}/413 \mu\text{m}$	21 m	4000 W	$M^2 \approx 1.33$	[134]
2021	SPF	$27 \mu\text{m}/410 \mu\text{m}$	$39.5 \mu\text{m}/410 \mu\text{m}$	$27 \mu\text{m}/410 \mu\text{m}$	21 m	5008 W	$M^2 \approx 1.9$	[135]
2020	SAF	$30.77 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	$23.28 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	$30.77 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	22.8 m	1300 W	$M^2 \approx 2.0$	[136]

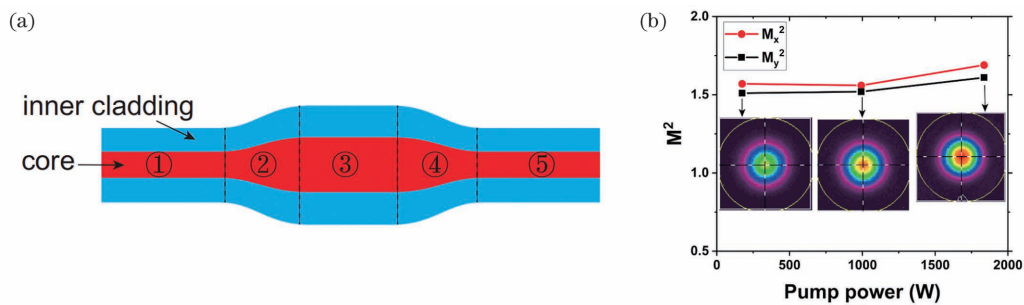


图 21 纺锤形光纤形态与输出特性<sup>[130]</sup>。(a)纺锤形增益光纤形态; (b)不同功率时的光束质量特性

Fig. 21 Structure and output characteristic of spindle-shaped fiber<sup>[130]</sup>. (a) Profile of spindle-shaped gain fiber; (b) beam quality characteristics under different powers

2020 年, 本课题组与电子科技集团第 23 所合作, 对纺锤形双包层掺镱光纤进行改进, 改进后的纺锤形光纤的纤芯/包层直径随长度的变化如图 22(a)所示。基于该光纤优化激光振荡器的设计和前后向泵浦功率比例, 实现了 3004 W 的近衍射极限 ( $M^2 \sim 1.3$ ) 激光输出, 如图 22(b)所示<sup>[15]</sup>。

2020 年, 本课题组与华中科技大学合作, 采用预制棒形态控制法制作了包层均匀、纤芯为纺锤形的掺镱光纤, 光纤总长度为 25 m, 包层直径为  $400 \mu\text{m}$ , 纤芯直径从  $24.08 \mu\text{m}$  先增加到  $31 \mu\text{m}$ 、后减小到

$23.36 \mu\text{m}$ , 纤芯数值孔径约为 0.065。采用该光纤搭建放大器, 实现了 2023 W 的激光输出<sup>[131]</sup>。实验中, 后向泵浦时 TMI 阈值在 1980 W 左右, 对应的光束质量  $M^2 \sim 1.4$ , 当功率提升到 2023 W 时, 有轻微的 TMI 现象, 光束质量退化到  $M^2 \sim 1.67$ 。2021 年, 采用上述包层均匀、纤芯为纺锤形的掺镱光纤搭建全光纤振荡器, 实现了 3.42 kW 的高功率激光输出<sup>[132]</sup>。在输出功率为 3000 W 时, 没有出现动态 TMI, 光束质量约为 1.7; 在输出功率为 3022 W 时, 开始出现 TMI 迹象, 光束质量开始退化; 在最高功率为 3.42 kW 时, 光束

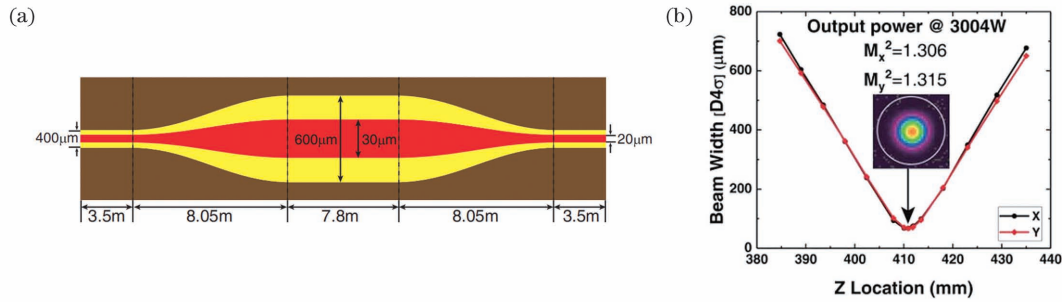


图 22 纺锤形掺镱光纤形态与输出特性<sup>[15]</sup>。(a)纺锤形掺镱光纤的纤芯/内包层直径随光纤长度的变化；(b)输出功率为 3004 W 时的光束质量与光斑形态

Fig. 22 Structure and output characteristics of spindle-shaped Yb-doped fiber<sup>[15]</sup>. (a) Fiber core/cladding diameter of spindle-shaped Yb-doped fiber versus fiber length; (b) beam quality and beam profile at 3004 W output power

质量为 1.9。

2021 年,国防科技大学采用自行研制的纺锤形掺镱光纤,实现了 4 kW 近单模光纤放大器<sup>[134]</sup>。实验中,光纤长度为 21 m,小端纤芯/内包层直径为 22 μm/413 μm,大端纤芯/内包层直径为 32 μm/

600 μm,光纤直径随着长度的变化如图 23(a)所示。采用 976 nm 激光进行双向泵浦,在总泵浦功率为 4.77 kW(前向泵浦功率为 1.31 kW,后向泵浦功率为 3.44 kW)时,输出功率为 4006 W,效率为 83%,光束质量  $M^2$  为 1.33,如图 23(b)所示。

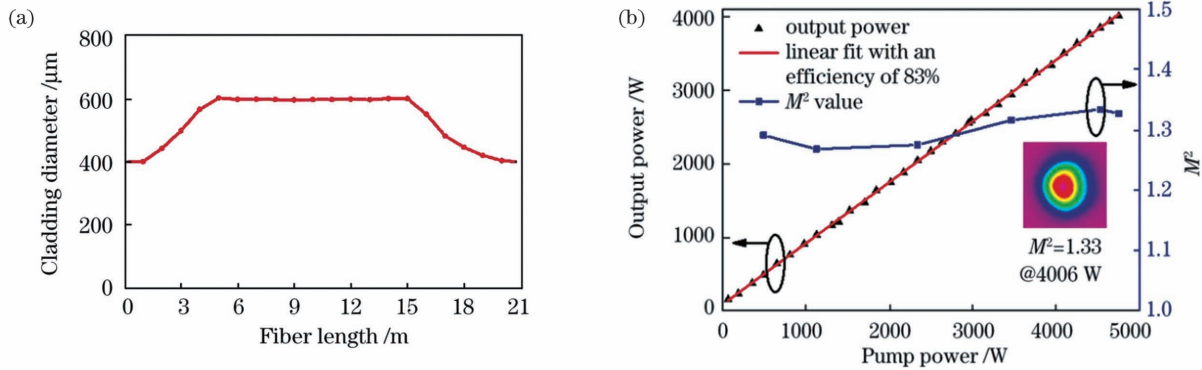


图 23 纺锤形掺镱光纤形态与输出特性<sup>[134]</sup>。(a)纺锤形掺镱光纤的包层直径随光纤长度的变化；(b)输出功率和光束质量随泵浦功率的变化,插图为输出功率为 4006 W 时的光斑特性

Fig. 23 Structure and output characteristics of spindle-shaped Yb-doped fiber<sup>[134]</sup>. (a) Cladding diameter of spindle-shaped Yb-doped fiber versus fiber length; (b) output power and beam quality versus pump power with beam profile at 4006 W output power shown in inset

2021 年,利用国防科技大学自行研制的纺锤形光纤,实现了功率为 5 kW 的激光输出<sup>[135]</sup>。纺锤形光纤总长度为 20.9 m,其中小纤芯直径区域 S1 和 S5 的纤芯直径为 27 μm、长度分别约为 0.7 m 和 1.2 m;大纤

芯直径区域 S3 的纤芯直径为 39.55 μm、长度约为 6 m;变纤芯直径区域 S2 和 S4 的长度分别约为 6 m 和 7 m,如图 24(a)所示。在最高泵浦功率为 7338 W 时,输出功率为 5008 W,光光效率为 66.6%,如

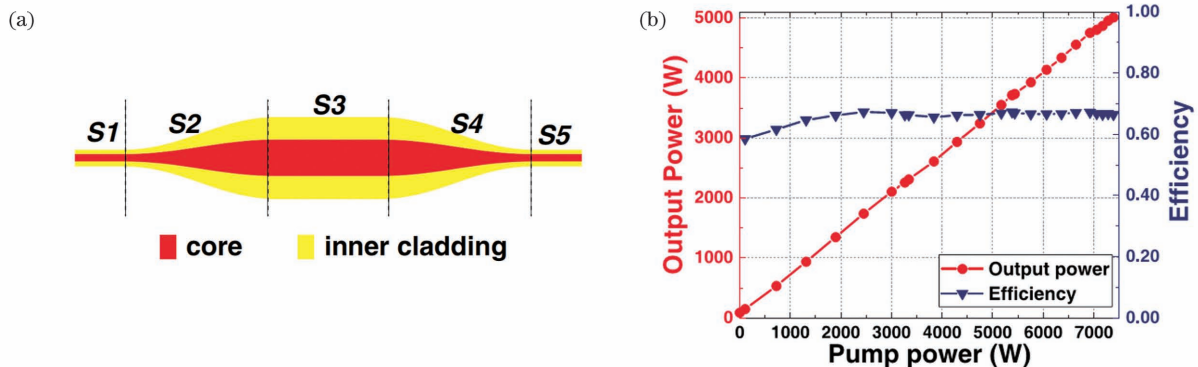


图 24 纺锤形掺镱光纤形态与输出特性<sup>[135]</sup>。(a)纺锤形掺镱光纤的纤芯直径和包层直径随光纤长度的变化示意图；(b)输出功率和效率随泵浦功率的变化

Fig. 24 Structure and output characteristics of spindle-shaped Yb-doped fiber<sup>[135]</sup>. (a) Schematic of core diameter and cladding diameter of spindle-shaped Yb-doped fiber versus fiber length; (b) output power and efficiency versus pump power

图 24(b)所示。输出功率为 5 kW 时,光束质量  $M^2$  为 1.9,输出激光光谱中不存在任何 SRS。

### 3.3.2.2 马鞍形掺镱光纤高功率连续激光器的研究现状

除了普通单锥形光纤和纺锤形光纤外,本课题组与华中科技大学合作,还对马鞍形掺镱光纤激光器进

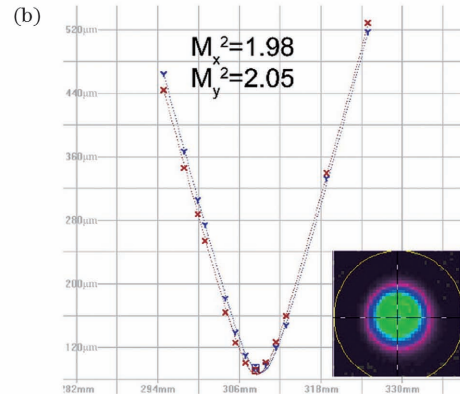
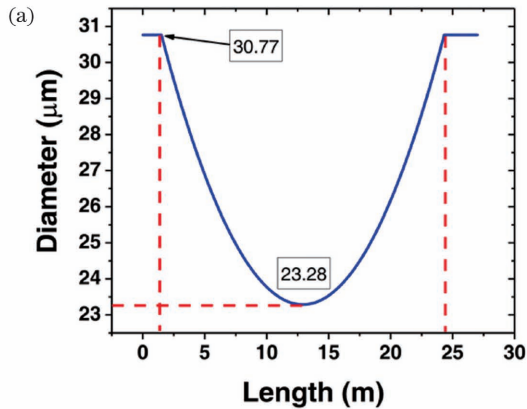


图 25 马鞍形掺镱光纤形态与输出特性<sup>[136]</sup>。(a)马鞍形光纤纤芯直径随长度的变化;(b)输出功率为 1312 W 时的光束质量与光斑形态

Fig. 25 Structure and output characteristic of saddle-shaped Yb-doped fiber<sup>[136]</sup>. (a) Core diameter of saddle-shaped fiber versus length; (b) beam quality and beam profile at 1312 W output power

## 3.4 变纤芯直径光纤在高功率激光器中的其他应用

### 3.4.1 基于单锥形传能光纤的随机激光器

单锥形光纤能增强瑞利散射并提升 SRS 阈值<sup>[137]</sup>,有利于随机激光输出功率的提高,因此单锥形传能光纤在随机激光领域中也得到了越来越多的关注。

2016 年,加拿大渥太华大学研究人员采用 5 km 的锥形光纤实现了单端泵浦的窄线宽布里渊随机光纤激光器<sup>[137]</sup>。锥形传能光纤采用拉丝法制作,光纤长度为 5 km,输入和输出端模场直径分别为 5  $\mu\text{m}$  和 7  $\mu\text{m}$ ,对应的色散分别为 7.7 ps/(nm·km)和 0.3 ps/(nm·km)。利用该光纤搭建随机激光器,实现了功率为 1 mW、3 dB 线宽为 1.17 kHz 的窄线宽光纤激光输出。2016 年,本课题组报道了采用长锥形传能光纤的高功率随机光纤激光器<sup>[138]</sup>。实验中,利用长度为 1 km 的长锥形光纤搭建了半开腔的随机光纤激光器,锥形光纤的纤芯直径从 8  $\mu\text{m}$  变化到 20  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.12;当 1120 nm 激光泵浦功率为 42 W 时,在输出波长 1173 nm 处实现了 26.5 W 的随机激光输出,各阶斯托克斯光和残留泵浦光的变化如图 26 所示。

2017 年,国防科技大学 Lou 等<sup>[139]</sup>采用长度为 1 km、纤芯直径从 8  $\mu\text{m}$  变化到 20  $\mu\text{m}$  的长锥形传能光纤搭建了拉曼随机光纤激光器,获得的第一阶(1120 nm)、第二阶(1173 nm)和第三阶(1237 nm) Stokes 波的最高输出功率分别为 16.4,35.4,40.1 W。2018 年,本课题组 Zhang 等<sup>[140]</sup>采用长度为 115 m、纤芯直径从 20  $\mu\text{m}$  变化到 18.44  $\mu\text{m}$  的锥形光纤搭建了半开腔的随机激光器,在 1120 nm 波段处获得了光谱纯度高达 94%、输出功率为 491 W 的高功率随机光纤激光。

行了探索研究<sup>[136]</sup>。华中科技大学研制的包层恒定、纤芯为马鞍形的掺镱光纤总长度为 22.8 m,光纤内包层直径为 400  $\mu\text{m}$ ,两端最大纤芯直径为 30.77  $\mu\text{m}$ ,中间最小纤芯直径为 23.28  $\mu\text{m}$ ,如图 25(a)所示。利用该光纤搭建全光纤振荡器,实现了功率为 1312 W、光束质量  $M^2$  为 2.0 的激光输出,如图 25(b)所示。

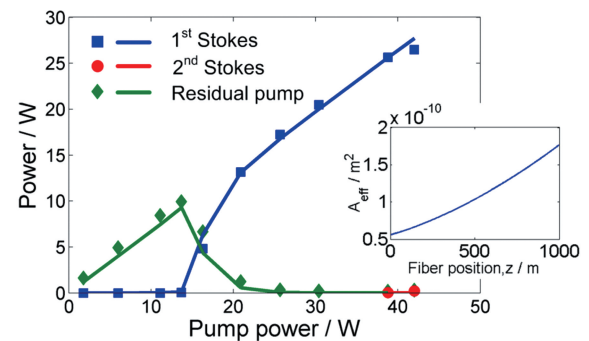


图 26 基于锥形光纤的随机光纤激光器的各阶斯托克斯光和残留泵浦光功率,插图为有效模场面积随光纤长度的变化<sup>[138]</sup>

Fig. 26 Powers of each order Stokes light and residual pump light of random fiber laser based on tapered fiber with dependence of effective mode field area on fiber length shown in inset<sup>[138]</sup>

### 3.4.2 基于单锥形光纤的特殊波长激光产生

考虑到锥形光纤在 ASE 抑制、光束质量保持和峰值功率提升等方面的优势,研究人员不仅将其应用于常规方法难以实现的特殊波长光纤激光器中,还将其应用于基于非线性频率变换的变频激光器中。

#### 3.4.2.1 基于单锥形增益光纤的 976 nm 激光产生

2014 年,Leich 等<sup>[141-142]</sup>采用长度为 0.95 m,小端纤芯/包层直径为 15  $\mu\text{m}$ /118  $\mu\text{m}$ ,大端纤芯/包层直径为 126  $\mu\text{m}$ /1000  $\mu\text{m}$  的掺镱锥形光纤作为振荡器的增益介质,当 915 nm 泵浦功率为 32 W 时,在 976 nm 波段处获得了 10 W 的高功率单模激光输出。实验结构如图 27 所示。

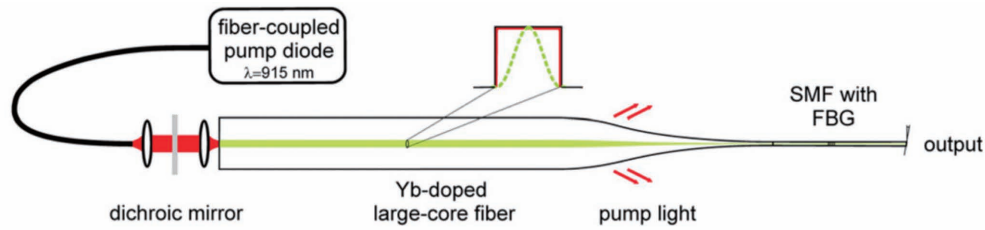


图 27 基于锥形光纤的 976 nm 光纤激光器原理图<sup>[141]</sup>

Fig. 27 Principle diagram of 976 nm fiber laser based on tapered fiber<sup>[141]</sup>

### 3.4.2.2 基于单锥形增益光纤的二倍频、三倍频绿光和紫光产生

除了产生特殊波长激光外,锥形增益光纤在变频激光产生方面的应用在近两年也得到了关注。2020 年,芬兰坦佩雷大学和俄罗斯科学院研究人员采用锥形光纤放大器实现了绿皮秒窄线宽光纤激光器,实验结构如图 28 所示<sup>[143]</sup>。在光纤放大器中,锥形增益光纤的长度为 4 m,纤芯/内包层直径从 12.5 μm/125 μm 变化到 41 μm/410 μm。光纤放大器在 1064 nm 波段处输出了

平均功率为 33 W、重复频率为 1 MHz、单脉冲能量为 33 μJ、峰值功率为 441.2 kW 的激光。然后利用该激光通过非线性晶体进行倍频,在 532 nm 波段处实现了平均功率为 12 W、脉宽为 77 ps、峰值功率为 146.4 kW 的绿光激光输出。2021 年,他们采用长度为 3 m、纤芯/内包层直径从 10 μm/100 μm 变化到 50 μm/500 μm 的光纤,首先获得了平均功率为 150 W、脉宽为 50 ps、光束质量为 1.19 的 1064 nm 激光,然后通过变频获得了平均功率为 30 W 的 532 nm 绿光输出<sup>[114]</sup>。

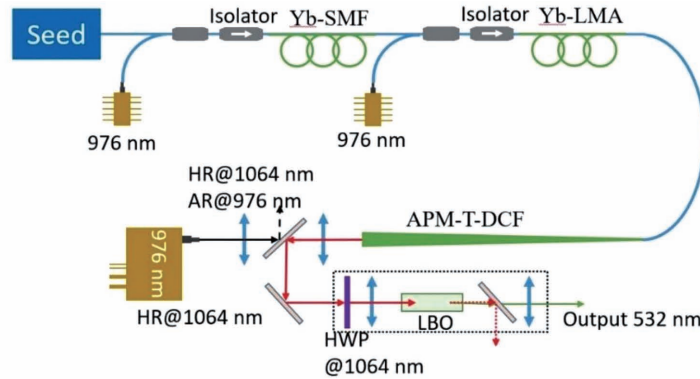


图 28 基于锥形光纤的 1064 nm 光纤放大器和二次谐波变频激光器的实验结构<sup>[143]</sup>

Fig. 28 Experimental setup of 1064 nm fiber amplifier and second harmonic frequency variable laser based on tapered fiber<sup>[143]</sup>

2020 年,加拿大 INO 公司也报道了基于大模场锥形光纤的高功率绿光和紫外激光产生<sup>[144]</sup>。他们使用本公司标准的锥形光纤产品,首先获得了中心波长为 1064 nm、平均功率为 200 W、重复频率为 200 kHz、脉宽

为 2.4 ns、消光比为 18 dB、光束质量  $M^2 = 1.2$  的激光。然后对该激光进行二倍频和三倍频处理,获得了平均功率分别为 100 W 和 50 W 的 532 nm 绿光和 355 nm 紫外光,其中紫外光的光束质量  $M^2$  小于 1.3,如图 29 所示。

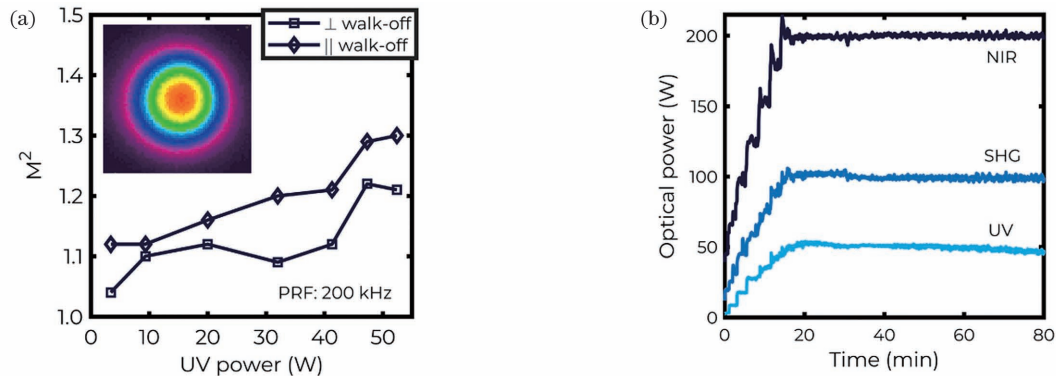


图 29 基于大模场锥形光纤的激光放大器输出特性<sup>[144]</sup>。(a) 不同平均功率时紫外光的光束质量; (b) 1064 nm 近红外(NIR)光、二次谐波产生(SHG)532 nm 绿光和 355 nm 紫外(UV)光的功率随时间的变化

Fig. 29 Output characteristics of laser amplifier based on large mode tapered fiber<sup>[144]</sup>. (a) Beam quality of UV light at different average powers; (b) powers of 1064 nm near-infrared (NIR) light, second harmonic generation (SHG) 532 nm green light, and 355 nm ultraviolet (UV) light versus time

### 3.4.3 基于锥形棒状晶体的高功率固体激光器

锥形的概念不仅在光纤激光领域得到了广泛的应用,在普通固体激光器中也得到了越来越多的关注。2016 年,俄罗斯科学院应用物理研究所 Kuznetsov 等<sup>[145]</sup>采用锥形棒状 Yb:YAG 晶体作为增益介质,实

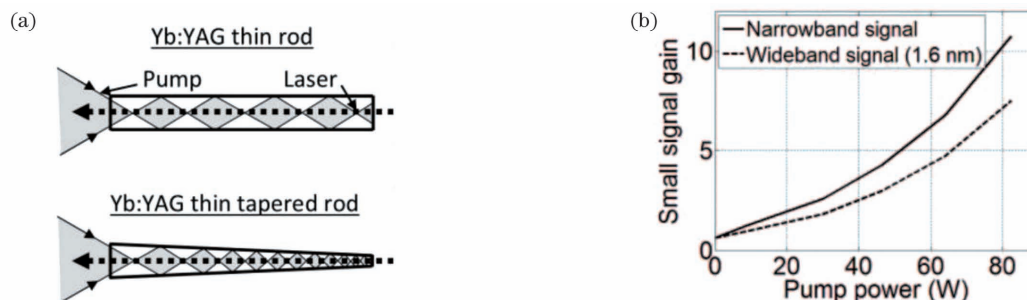


图 30 Yb:YAG 晶体形态与输出特性<sup>[145]</sup>。(a)锥形棒状 Yb:YAG 晶体和普通棒状 Yb:YAG 晶体示意图;(b)1030 nm 宽谱和窄谱激光小信号在 Yb:YAG 晶体中的增益

Fig. 30 Structure and output characteristics of Yb:YAG crystal<sup>[145]</sup>. (a) Schematics of thin-rod and thin-tapered-rod Yb:YAG crystals; (b) gain of narrowband or wideband small signal at 1030 nm in Yb:YAG crystal

2017 年,俄罗斯科学院应用物理研究所 Kuznetsov 等<sup>[146]</sup>对比研究了普通棒状与锥形棒状 Yb:YAG 晶体激光器在小信号增益和散热方面的差异,如图 31 所示。实验研制的锥形晶体棒长为 3 cm,大端直径为 1 mm,小端直径为 0.3 mm;普通晶体棒长为 3 cm,直径为 1 mm。在采用普通晶体棒作为增益介质的情况下,当泵浦功率为 110 W 时出现了明显的热效应;在采用锥形晶体棒作为增益介质的情况下,当泵浦功率为 130 W 时,光束质量一直保持良好的,表明锥形晶体棒受热效应的影响更小。测试不同泵浦功率情况下的小信号增益特性,发现锥形晶体棒的小信号增益要明显大于普通晶体棒。

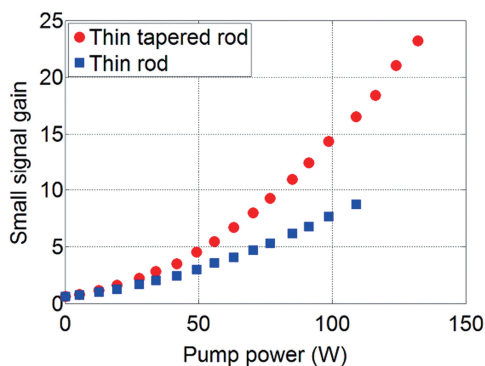


图 31 锥棒状 Yb:YAG 晶体和普通棒状 Yb:YAG 晶体中的小信号增益<sup>[146]</sup>

Fig. 31 Small signal gain in thin-rod or thin-tapered-rod Yb:YAG crystal<sup>[146]</sup>

2020 年,俄罗斯科学院应用物理研究所的 Chizhov 等<sup>[147]</sup>对比研究了普通棒状 Yb:YAG 晶体和锥形棒状 Yb:YAG 晶体在放大器中的应用结果。普通棒长为 3 cm,直径为 1 mm;锥形棒长为 3 cm,小端

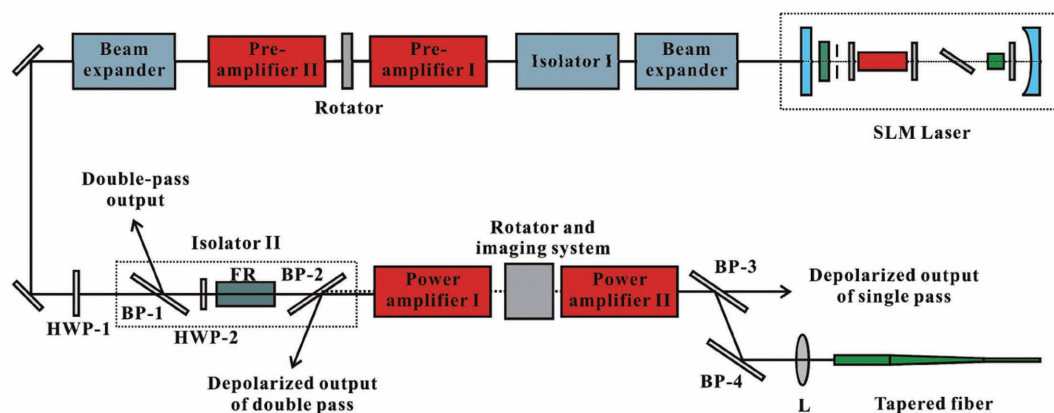
现了平均功率为 15 W 的皮秒脉冲激光。实验中研制的锥形 Yb:YAG 晶体棒长为 3 cm,大端直径为 1.2 mm,小端直径为 0.6 mm,如图 30(a)所示。泵浦光从大端注入,激光从大端输出。在泵浦功率为 80 W 时,获得了平均输出功率为 15 W 的皮秒脉冲激光。

直径为 0.3 mm,大端直径为 0.8 mm。利用普通棒时,在种子功率为 23.5 W 时获得了 60 W 的激光输出,利用锥形棒在种子功率为 17 W 时获得了 80 W 的激光输出。

### 3.4.4 单锥形传能光纤在高功率激光器中的其他应用

除了在低功率激光器中的应用外,短锥形传能光纤还可以在高功率激光器中起到光束耦合、相位共轭、模场匹配和脉冲压缩等作用。

2009 年,研究者利用输入端直径为 4 mm、输出端直径为 600  $\mu\text{m}$  的锥形光纤,将重复频率为 20 Hz、脉宽为 8 ns、单脉冲能量为 120 mJ、峰值功率为 15 MW 的激光耦合到直径为 600  $\mu\text{m}$  的光纤中,耦合效率为 95.53%,输出光纤的端面功率密度可达 4.42  $\text{GW}/\text{cm}^2$ <sup>[148]</sup>。2012 年,中国工程物理研究院与浙江大学合作,以输入纤芯直径为 1 mm、输出纤芯直径为 0.4 mm 的锥形光纤作为相位共轭镜对 Nd:YAG 晶体产生的激光进行反射,如图 32 所示。当入射到锥形光纤中的脉冲能量为 22 mJ、脉宽为 15 ns 时,反射光束经过两次放大后,脉冲能量达到 40 mJ,光束质量因子  $M^2$  由普通反射镜时的 5 减小到 2.5,光束质量提升<sup>[149]</sup>。2013 年,Moore 等<sup>[150]</sup>利用长度为 2.5 cm、数值孔径为 0.07 的锥形光纤,实现了纤芯直径为 20  $\mu\text{m}$  的增益光纤和纤芯直径为 6  $\mu\text{m}$  可饱和吸收光纤的模场匹配,获得了平均功率为 40 W、单脉冲能量为 60  $\mu\text{J}$ 、光束质量  $M^2$  约为 1.2 的近单模脉冲激光输出。2018 年,印度鲁尔基理工学院研究人员用长度为 35 cm、拉锥比为 0.61~0.65 的锥形光纤进行脉冲压缩,将输入脉宽为 250 fs、峰值功率为 100 kW 的脉冲压缩到脉宽为 13 fs、峰值功率为 920 kW 的超短脉冲<sup>[151]</sup>。

图 32 基于锥形光纤的 Nd:YAG 放大器原理图<sup>[151]</sup>Fig. 32 Principle diagram of Nd:YAG amplifier based on tapered fiber<sup>[151]</sup>

## 4 变纤芯直径掺镱光纤激光器的发展趋势与高功率技术方案

### 4.1 变纤芯直径掺镱光纤激光器的发展趋势

#### 4.1.1 激光波长从常规波长向特殊波长方向拓展

早期,变纤芯直径增益光纤激光器主要应用于常规波段(1030~1080 nm)的掺镱光纤振荡器和放大器领域中。近年来,变纤芯直径光纤激光器已经从常规波段拓展到 980 nm 等特殊波段,实现了严格单模的 10 W 量级 980 nm 激光<sup>[141-142]</sup>;同时,在产生近红外波段脉冲光纤激光后,通过非线性频率变换,实现了 532 nm 绿光、355 nm 紫外光等非常规波段激光输出<sup>[143-144]</sup>。除了常规结构的光纤激光器外,研究人员将变纤芯直径光纤逐步应用于随机光纤激光器、拉曼激光器、ASE 光源等特殊结构激光器中,产生了拉曼随机激光、拉曼波段激光和宽谱 ASE 光源<sup>[77,137-139]</sup>。

#### 4.1.2 激光偏振特性从非线性偏振拓展到线偏振

变纤芯直径掺镱光纤最初以单锥形光纤为主,通过大端泵浦提高泵浦功率,通过小端小纤芯损耗高阶模以保证光束质量,主要被应用于非线性偏振的高峰值功率的空间结构脉冲激光器中<sup>[11-12,150]</sup>。随着变纤芯直径光纤工艺的发展,最初的非线性偏振激光器逐渐发展为线偏振激光器。2017 年,俄罗斯科学院研究人员研制了保偏锥形掺镱光纤,并将其应用到高峰值功率脉冲激光器中,实现了脉宽为 7 ps、峰值功率为 1.5 MW 的脉冲激光<sup>[100-101,104]</sup>。2019 年,俄罗斯科学院研究人员使用旋转锥形掺镱光纤替代保偏锥形掺镱光纤<sup>[116]</sup>,对比了旋转锥形双包层光纤、熊猫保偏锥形双包层光纤、普通非保偏锥形双包层光纤的消光比特性。结果表明,旋转锥形光纤的消光比保持特性最好,在不同泵浦功率情况下,消光比大多都在 16 dB 以上。此后,基于保偏锥形光纤和旋转锥形光纤的连续、脉冲和窄线宽光纤激光器得到了迅速发展<sup>[73,104,109,115-120]</sup>。

国外的多家公司先后推出了线偏振掺镱锥形光纤和激光器产品。比如,法国 Ampliconyx 公司的 TGModule A-PM 型号单模高功率光纤激光器产品,

就采用了纤芯/内包层直径从 9  $\mu\text{m}$ /48  $\mu\text{m}$  变化到 75  $\mu\text{m}$ /380  $\mu\text{m}$  的保偏锥形掺镱光纤<sup>[152]</sup>。加拿大 INO 公司推出了型号为 Yb-MCOF-35/250-56/400-07-2.2-T0.7-PM 的保偏锥形掺镱光纤<sup>[153]</sup>,该光纤在脉冲和线偏振光纤激光器中得到了应用<sup>[90-91,96,154]</sup>。

#### 4.1.3 光纤结构从单锥形光纤拓展到纺锤形、马鞍形等新型光纤

普通单锥形光纤的纤芯直径随着光纤长度的增加而增加,能够有效抑制 SBS、SRS 等非线性效应,实现高峰值功率激光输出。但是,随着激光功率的提升,TMI 则成为普通单锥形光纤提升激光功率的限制因素。为了兼顾非线性效应和 TMI 效应,实现高功率连续激光输出,纺锤形(尤其是非对称的纺锤形)和马鞍形增益光纤可能会成为突破传统的纤芯直径均匀的增益光纤的功率极限,实现更高功率激光输出的核心器件。2020 年以来,本课题组基于纺锤形光纤先后实现了 3 kW 和 5 kW 全光纤激光输出<sup>[15,135]</sup>。但是,当前的纺锤形光纤基本是对称结构,非线性抑制能力受限,要实现更高功率的激光输出,还需要优化、设计各个区域的纤芯直径和长度,研制非对称的纺锤形增益光纤。

#### 4.1.4 变直径的概念从纤芯拓展到包层

有了纤芯直径变化的光纤,人们自然也会想到纤芯直径不变、包层直径变化的光纤。2015 年,中国工程物理研究院的 Huang 等<sup>[81]</sup>设计了可实现掺镱光纤放大器热沉均匀的纤芯直径均匀的内包层为锥形的光纤,对比仿真了纤芯直径恒定的商用 20  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$  光纤和纤芯直径为 20  $\mu\text{m}$ 、内包层直径从 88  $\mu\text{m}$  变化到 880  $\mu\text{m}$  的包层锥形光纤,仿真结果表明,在正向和反向泵浦情况下,内包层直径呈线性变化的掺镱光纤放大器具有更平滑的热负荷和更低的最大热负荷。2016 年,他们又对可用于高功率级联泵浦的包层直径从 125  $\mu\text{m}$  变化到 250  $\mu\text{m}$ 、纤芯直径为 30  $\mu\text{m}$  的锥形光纤进行仿真,结果表明,采用内包层锥形光纤,可以有效减低最高温度负荷,使光纤热负荷均匀化<sup>[80]</sup>。尽管当前关于包层直径无变化的光纤研究鲜有报道,但是在理论上,可首先采用预制棒形态控制法制作包层

直径沿着长度方向变化的预制棒,然后对其进行匀速拉锥,实现该类光纤的研制。可以预期,该类光纤在高功率脉冲激光器中也会有越来越多的应用。

#### 4.2 基于变纤芯直径光纤的 10 kW 级近单模光纤放大器

在宽谱高功率连续光纤激光器中, SRS 和 TMI 是影响光纤激光输出功率的两个限制因素。为了抑制非线性效应,变纤芯直径掺镱光纤是一个非常有效的选择,在相关文献<sup>[6]</sup>中,研究者基于变纤芯直径增益光纤提出了 10 kW 级近单模光纤振荡器结构。他们基于变纤芯直径掺镱光纤,给出了 10 kW 甚至更高功率

的近单模( $M^2 < 2$ )光纤放大器结构。图 33 所示为一级放大的主振荡功率放大(MOPA)结构。种子激光(Seed)经过倾斜光栅(TFBG),将其中的拉曼波段滤除,然后进入放大器中。放大器采用双向泵浦方式,前后向合束器各有多个泵浦臂,每个泵浦臂都与泵浦源连接。泵浦源可以是亮度较低、输出波长处于增益光纤较低吸收波段的光纤耦合半导体激光器(LD)或光纤激光器(FL)。增益光纤采用变纤芯直径掺镱光纤,可以是单锥形掺镱光纤(TYDF)、纺锤形掺镱光纤(SPYDF)、马鞍形掺镱光纤(SAYDF)。采用锥形光纤制作的光纤端帽抑制输出激光的非线性效应,提高输出功率。

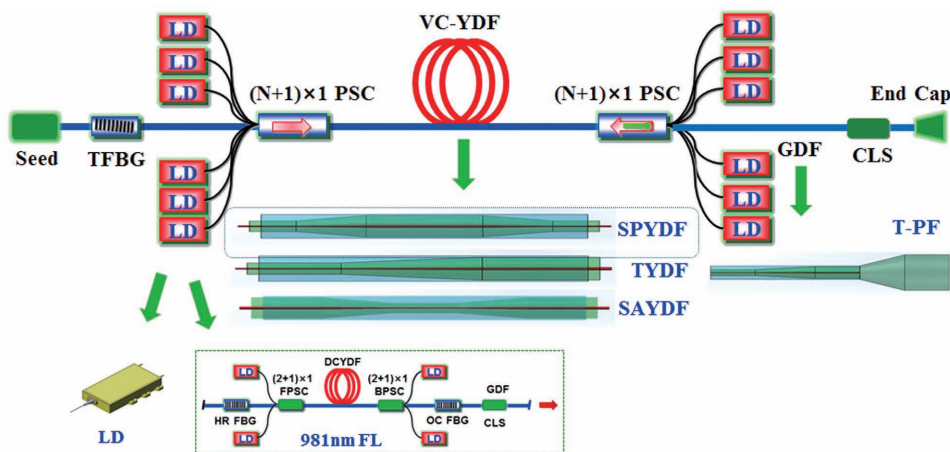


图 33 基于变纤芯直径光纤的 10 kW 级近单模光纤放大器结构<sup>[6]</sup>

Fig. 33 Structural diagram of 10 kW-level near-single-mode fiber amplifier based on fiber with variable core diameter<sup>[6]</sup>

该方案综合运用了多种新器件和技术手段抑制 SRS 和 TMI 效应,提高了激光输出功率。1) 采用高亮度、输出波长处于增益光纤较低吸收波段的 LD,在提高激光效率的同时提升了光纤振荡器的模式不稳定阈值。比如,根据本课题组相关研究,采用 981 nm 的稳波长光纤泵浦源,能够有效提高光纤激光器的 TMI 阈值<sup>[155]</sup>。目前本课题组基于该泵浦源,在普通的纤芯直径均匀的光纤中已经获得了 6 kW 的近单模( $M^2 \sim 1.3$ )激光输出<sup>[156]</sup>。

2) 采用低 NA、部分掺杂的变纤芯直径增益光纤,兼顾 SRS 和 TMI 阈值的提升。当前纺锤形增益光纤的 SRS 抑制能力已经得到验证,本课题组采用长度为 30.5 m、纤芯直径为 20  $\mu\text{m}$ -30  $\mu\text{m}$ -20  $\mu\text{m}$  的纺锤形增益光纤<sup>[15]</sup>与长度为 19 m、直径为 20  $\mu\text{m}$  的纤芯直径均匀的光纤<sup>[157]</sup>,搭建了 3 kW 振荡器,发现二者的光束质量基本一致,但是纺锤形光纤的 SRS 抑制能力比纤芯直径均匀的光纤高 5 dB 左右。对于光纤选型,我们认为非对称结构的纺锤形光纤,即输入端直径最小、中间直径最大、输出端直径较大的光纤,在兼顾 SRS 和 TMI 抑制方面的优势比较明显。需要指出的是,在实际光纤设计中,应优化选择低 NA、部分掺杂和变纤芯直径。针对光纤纤芯直径在各个区域的变化,需要进行精细的理论和实验优化。

此外,采用锥形光纤制作光纤端帽,也能在提升光

纤激光受激拉曼散射阈值的同时保证激光的光束质量。

综合而言,采用新型泵浦源可以提高 TMI 阈值,采用变纤芯直径增益光纤可在提高 SRS 阈值的同时兼顾 TMI 抑制。两种技术手段共同运用,有望将近单模光纤放大器的输出功率提升到 10 kW 乃至以上。

## 5 结束语

变纤芯直径掺镱光纤具有高非线性效应阈值、高模式不稳定阈值、良好的光束质量保持特性、天然的 ASE 抑制能力。近年来在高光束质量脉冲激光、单频激光、窄线宽激光、高功率连续激光等方面都得到了越来越多的研究和应用。采用商用保偏锥形掺镱光纤,已经实现了输出功率为 550 W 的单频光纤激光;采用锥形掺镱光纤,结合脉冲压缩技术,实现了峰值功率达到 22 MW 的飞秒脉冲激光;采用线偏振锥形掺镱光纤,实现了平均功率为 150 W、峰值功率为 0.74 MW、消光比为 13.5 dB 的线偏振脉冲激光;采用纺锤形掺镱光纤,实现了功率大于 5 kW 的连续激光输出。随着技术的发展,变纤芯直径掺镱光纤激光器的输出激光波长从常规波长向特殊波长方向拓展,激光偏振特性从非线偏振向线偏振方向拓展,光纤结构从单锥形光纤拓展为纺锤形、马鞍形等新型光纤,变直径的概念从纤芯拓展到包层。随着研究的深入,变纤芯直径掺镱光纤将在光纤激光各个领域中大放异彩。目前,国

外多家单位已掌握了保偏和非保偏变纤芯直径掺镱光纤的制作工艺,并推出了部分产品;国内相关研究在2016年前后起步,多家单位也初步掌握了非保偏变纤芯直径掺镱光纤的制作工艺。由于工艺的进步和高功率激光需求的牵引,变纤芯直径掺镱光纤近年来逐步从实验室走向市场,极大推动了高功率光纤激光的发展。基于变纤芯直径掺镱光纤,结合新型泵浦源等技术,有望在不久的将来实现输出功率大于10 kW、 $M^2 < 2$ 且可长时间稳定工作的工业级近单模光纤激光器。

### 参 考 文 献

- [1] Hecht J. High-power fiber lasers [J]. *Optics and Photonics News*, 2018, 29(10): 30-37.
- [2] 徐博, 殷先印, 祖成奎, 等. 封接玻璃预制件的激光选择性烧结制备技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011416. Xu B, Yin X Y, Zu C K, et al. Preparation of sealing glass preforms by selective laser sintering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011416.
- [3] 段沐森, 吴凡, 刘瑞雪. 激光增材制造技术在眼科中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011406. Duan M S, Wu F, Liu R X. Application of laser additive manufacturing technology in ophthalmology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011406.
- [4] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [5] Zervas M N. High power ytterbium-doped fiber lasers: fundamentals and applications [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2014, 28(12): 1442009.
- [6] 王小林, 张汉伟, 杨保来, 等. 高功率掺镱光纤振荡器: 研究现状与发展趋势 [J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401004. Wang X L, Zhang H W, Yang B L, et al. High-power ytterbium-doped fiber laser oscillator: current situation and future developments [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401004.
- [7] Li L B, Lou Q H, Zhou J, et al. High power single transverse mode operation of a tapered large-mode-area fiber laser [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(4): 655-657.
- [8] Shiraki K, Ohashi M, Tateda M. Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fibre by changing the core radius [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(8): 668-669.
- [9] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. Single-mode 212 W tapered fiber laser pumped by a low-brightness source [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(13): 1416-1418.
- [10] Zhu Y, Eschrich T, Leich M, et al.  $\text{Yb}^{3+}$ -doped rod-type amplifiers with local adiabatic tapers for peak power scaling and beam quality improvement [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(10): 105103.
- [11] Gumenyuk R, Filippov V, Vorotinskii A, et al. All-fiber, high-power, picosecond Yb double clad tapered fiber amplifier [C]// 2014 International Conference Laser Optics, June 30-July 4, 2014, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2014.
- [12] Kerttula J, Filippov V, Chamorovskii Y, et al. Actively Q-switched 1.6-mJ tapered double-clad ytterbium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18543-18549.
- [13] Shi C, Wang X L, Zhou P, et al. Theoretical study of mode evolution in active long tapered multimode fiber [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19473-19490.
- [14] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. 600 W power scalable single transverse mode tapered double-clad fiber laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1203-1214.
- [15] Zeng L F, Xi X M, Ye Y, et al. Near-single-mode 3 kW monolithic fiber oscillator based on a longitudinally spindle-shaped Yb-doped fiber [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(20): 5792-5795.
- [16] Ye Y, Xi X M, Shi C, et al. Comparative study on transverse mode instability of fiber amplifiers based on long tapered fiber and conventional uniform fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(8): 085109.
- [17] Filippov V, Kerttula J, Chamorovskii Y, et al. Actively Q-switched ytterbium tapered fiber laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7914: 79141Y.
- [18] Zhang H, Lei C M, Li Z X, et al.  $19 \times 1$  high power pump combiner with large input core diameter [J]. *Laser Physics*, 2021, 31(3): 035105.
- [19] Tan Q R, Ge T W, Zhang X X, et al. Cascaded combiners for a high power CW fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2016, 26(2): 025102.
- [20] Liu K, Zhao C, Yang Y F, et al. Low beam quality degradation, high-efficiency pump and signal combiner by built-in mode field adapter [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2804-2809.
- [21] Liu Y L, Liu K, Yang Y F, et al. High power pump and signal combiner for backward pumping structure with two different fused fiber bundle designs by means of pretapered pump fibers [J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13344-13358.
- [22] 崔政吉. 锥形光纤器件制备及其特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017. Cui Z J. Fabrication and experimental research of tapered optical fiber [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [23] 张媛. 锥形光纤 Bragg 光栅制备及其传感特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008. Zhang Y. Fabrication and sensing characteristic of tapered fiber Bragg grating [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [24] 朱翔宇. 锥形耦合长周期光纤光栅的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009. Zhu C Y. Long-period fiber grating fabricated by arc tapering [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [25] 罗爱平, 高侃, 刘峰, 等. 长周期光纤光栅和双锥形光纤间的倏逝波耦合作用 [J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1603-1606. Luo A P, Gao K, Liu F, et al. Evanescent-field coupling based on long-period grating and tapered fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1603-1606.
- [26] Lee T, Jung Y, Codemard C A, et al. Broadband third harmonic generation in tapered silica fibres [J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 8503-8511.
- [27] Tang Z J, Lian Z G, Benson T M, et al. High performance tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser implemented by using tapered triple-core photonic crystal fiber [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 121833-121842.
- [28] Xu Z, Yu C B, Huang W, et al. Tunable multi-wavelength Er-doped fiber laser based on a fiber taper [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(8): 085701.
- [29] Ibarra-Escamilla B, Hernández-Arriaga M V, Durán-Sánchez M, et al. Abrupt-tapered fiber filter arrangement for a switchable multi-wavelength and tunable Tm-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 14894-14904.
- [30] Han H Y, Li X L, Zhang S M, et al. Precise wavelength control of Yb-doped fiber laser using fused tapered fiber technology [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(3): 715-721.
- [31] Luo Z Q, Huang Y Z, Wang J Z, et al. Multiwavelength dissipative-soliton generation in Yb-fiber laser using graphene-deposited fiber-taper [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(17): 1539-1542.
- [32] Jiang T X, Wang A M, Wang G Z, et al. Tapered photonic crystal fiber for simplified Yb: fiber laser frequency comb with low pulse energy and robust frequency signals [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1835-1841.
- [33] Han M M, Li X L, Zhang S M, et al. Tunable and channel spacing precisely controlled comb filters based on the fused taper technology [J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 265-272.



- [34] Xie Y, Han H N, Zhang L, et al. Yb-doped fiber comb based on a tapered single-mode fiber [C] // 2015 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), August 24-28, 2015, Busan, Korea (South). New York: IEEE Press, 2015.
- [35] Kerttula J, Filippov V, Chamorovskii Y, et al. 250  $\mu$ m broadband supercontinuum generated using a Q-switched tapered fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(6): 380-382.
- [36] Campling J, Horak P, Peacock A C. Designing silicon-core fiber tapers for efficient supercontinuum generation in the greenhouse gas absorption region [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(6): 1698-1706.
- [37] černe L, Novak J, Agrež V, et al. Optimization of a supercontinuum source based on tapered ordinary fibers [J]. Laser Physics, 2019, 29(2): 025103.
- [38] Rusu M, Kivistö S, Gawith C, et al. Red-green-blue (RGB) light generator using tapered fiber pumped with a frequency-doubled Yb-fiber laser [J]. Optics Express, 2005, 13(21): 8547-8554.
- [39] Rehan M, Kumar G, Rastogi V. Optimization of tapered fiber for the compression of femtosecond pulses at different wavelengths [C] // 2019 Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP), December 13-14, 2019, Guwahati, India. New York: IEEE Press, 2019.
- [40] Zhang J, Ramana P V, Hon-Shing J L, et al. Design and characterization of taper coupler for effective laser and single-mode fiber coupling with large tolerance [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(16): 1375-1377.
- [41] Jedrzejczyk D, Asbahr P, Pulka M, et al. Coupling of DBR tapered diode laser radiation into a single-mode-fiber at high powers [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 89651A.
- [42] Jedrzejczyk D, Sahn A, Carstens C, et al. Coupling of a high-power tapered diode laser beam into a single-mode-fiber within a compact module [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480Z.
- [43] Huang W, Cui Y L, Li X Q, et al. Low-loss coupling from single-mode solid-core fibers to anti-resonant hollow-core fibers by fiber tapering technique [J]. Optics Express, 2019, 27(26): 37111-37121.
- [44] Xie L Q, Fang F, Sun B, et al. Wavelength switchable mode-locked fiber laser with tapered two-mode fiber [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 7103508.
- [45] Xie L Q, Sun B, Chen, et al. Sensitivity enhanced temperature sensor with serial tapered two-mode fibers based on the Vernier effect [J]. Optics Express, 2020, 28(22): 32447-32455.
- [46] 何相平. 锥形光纤倒像器的制备与传像性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
He X P. Research on fabrication and image-transmission performance of tapered fiber inverter [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [47] 苏贤续. 锥形光纤的传输特性及其在光纤探针中的应用 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2011.  
Su X X. The transmission characteristics of tapered optical fiber and application in the optical fiber probe [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2011.
- [48] 余志强. 锥形光纤的传输特性及其在近场光学显微镜中的应用 [D]. 广州: 中山大学, 2009.  
Yu Z Q. Propagation characteristics in tapered fiber and its applications [D]. Guangzhou: Zhongshan University, 2009.
- [49] Mao D, He Z W, Lu H, et al. All-fiber radially/azimuthally polarized lasers based on mode coupling of tapered fibers [J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1590-1593.
- [50] Li Z B, Wang Q, Xu S H, et al. Iterative method for the design of LP<sub>0m</sub> mode converter [J]. Journal of Optics, 2017, 19(9): 095703.
- [51] Hosseini A, Covey J, Kwong D N, et al. Tapered multi-mode interference couplers for high order mode power extraction [J]. Journal of Optics, 2010, 12(7): 075502.
- [52] Alvarez-Chavez J A, Grudinin A B, Nilsson J, et al. Mode selection in high power cladding pumped fibre lasers with tapered section [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics (IEEE Cat. No. 99CH37013), May 28, 1999, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 1999: 247-248.
- [53] 王碧霖. 基于表面石墨烯修饰的锥形多模光纤传感特性研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.  
Wang B L. Research on sensing characteristics of tapered multimode fiber based on surface modified graphene [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- [54] 余佳浩. 基于双锥形马赫-曾德光纤传感器的特性及应用研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020.  
Yu J H. Research on the characteristics and application of optical fiber sensor based on double-cone Mach-Zehnder [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020.
- [55] Zhang X P, Peng W, Shao L Y, et al. Strain and temperature discrimination by using temperature-independent FPI and FBG [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 272: 134-138.
- [56] 孙思佳. 基于锥形光纤光栅的磁场传感器研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2018.  
Sun S J. Research of tapered fiber Bragg grating magnetic field sensor based on magnetic fluid [D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [57] Miller J, Castaneda A, Lee K H, et al. Biconically tapered fiber optic probes for rapid label-free immunoassays [J]. Biosensors, 2015, 5(2): 158-171.
- [58] Lokman A, Arof H, Harun S W. Tapered fiber coated with hydroxyethyl cellulose/polyvinylidene fluoride composite for relative humidity sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 225: 128-132.
- [59] 闫宝罗, 李晓龙, 张红伟, 等. 锥形光纤在空间光通信耦合系统中的应用 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 287-294.  
Yan B L, Li X L, Zhang H W, et al. Application of tapered fibers to free-space optical communication coupling system [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 287-294.
- [60] 林建文, 雷斌, 连重炎, 等. 大气激光通信用直锥形光纤发射天线 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(12): 1959-1964.  
Lin J W, Lei B, Lian C Y, et al. Tapered fiber transmitting antenna for atmosphere laser communication [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(12): 1959-1964.
- [61] Guo L L, Wang Y, Wang K J. Optical taper of polymer optical fiber used in laser communication system [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6150: 615031.
- [62] Fischer U H P, Krips O, Mueller E, et al. Laser microwelding for fiber-chip coupling modules with tapered standard monomode fiber ends for optical communication systems [J]. Optical Engineering, 2002, 41: 3221-3229.
- [63] Hutchens T C, Blackmon R L, Pierce B I M D, et al. Comparison of detachable and tapered fiber optic tips for use in thulium fiber laser lithotripsy [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8565: 85651A.
- [64] Blackmon R L, Irby P B, Fried N M. A tapered distal fiber tip for thulium fiber laser lithotripsy [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7548: 75481F.
- [65] 王通. 基于渐变多模光纤的单光纤光镊技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.  
Wang T. Research on single optical fiber tweezers technology based on graded-index multi-mode fiber [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [66] 郭小男. 基于锥形光纤和微纳光纤的光镊及其光操控性能的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.  
Guo X N. Research on optical control performance of optical tweezers based on taper fiber and micro fiber [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [67] 李智云. 可调双光纤锥形光镊对球形颗粒捕获操控的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.  
Li Z Y. Study on the trapping and manipulation of spherical

- particle by two-fiber conical optical tweezers with tunable microcavity[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [68] Della Patria A, Pisanello M, Sileo L, et al. Influence of laser beam quality on modal selection in tapered optical fibers for multipoint optogenetic control of neural activity[C]//2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 10-14, 2016, Trento, Italy. New York: IEEE Press, 2016.
- [69] 王小林, 叶云, 奚小明, 等. 一种纤芯尺寸纵向渐变的增益光纤: CN208569093U[P]. 2019-03-01.  
Wang X L, Ye Y, Xi X M, et al. One type of gain fiber with vary core diameter along the lengthways: CN208569093U[P]. 2019-03-01.
- [70] 王小林, 叶云, 史尘, 等. 一种基于纤芯尺寸纵向渐变增益光纤的全光纤激光振荡器: CN208522240U[P]. 2019-02-19.  
Wang X L, Ye Y, Shi C, et al. One type of all fiber laser oscillators based on gain fiber with vary core diameter along the lengthways: CN208522240U[P]. 2019-02-19.
- [71] 张汉伟, 王小林, 许晓军, 等. 马鞍形增益光纤及基于马鞍形增益光纤的全光纤振荡器: CN112736630A[P]. 2021-04-30.  
Zhang H W, Wang X L, Xu X J, et al. Saddle-shaped gain fiber and all fiber laser oscillators based on saddle-shaped gain fiber: CN112736630A[P]. 2021-04-30.
- [72] 奚小明, 林贤峰, 叶云, 等. 基于新型纤芯纺锤形增益光纤的3.4 kW全光纤振荡器[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1216001.  
Xi X M, Lin X F, Ye Y, et al. 3.4 kW all fiber laser oscillator based on novel spindle-shaped core gain fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1216001.
- [73] Bobkov K, Levchenko A, Kashaykina T, et al. Scaling of average power in sub-MW peak power Yb-doped tapered fiber picosecond pulse amplifiers[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 1722-1735.
- [74] Shi C, Wang X L, Zhou P, et al. Theoretical study of stimulated Raman scattering in long tapered fiber amplifier[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(11): 110605.
- [75] Filippov V, Chamorovskii Y K, Golant K M, et al. Optical amplifiers and lasers based on tapered fiber geometry for power and energy scaling with low signal distortion[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 97280V.
- [76] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. 750-W double-clad ytterbium tapered fiber laser with nearly theoretically limited efficiency [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7580: 758017.
- [77] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. Double clad tapered fiber for high power applications[J]. Optics Express, 2008, 16(3): 1929-1944.
- [78] 张瑞瑞. 新型长锥形光纤拉制装置的研究[D]. 郑州: 河南师范大学, 2010.  
Zhang R R. Research on preparation equipment of novel long-tapered fiber[D]. Zhengzhou: Henan Normal University, 2010.
- [79] Lin X F, Zhang Z L, Chu Y B, et al. Fabrication and laser performance of cladding uniform core tapered fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 64: 102561.
- [80] Huang Z H, Tang X, Lin H H, et al. Tapered cladding diameter profile design for high-power tandem-pumped fiber lasers[J]. Laser Physics, 2016, 26(5): 055101.
- [81] Huang Z H, Zhang Y L, Deng Y, et al. Tapered inner-cladding fiber design for uniform heat deposition in Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. Journal of Optics, 2015, 17(4): 045701.
- [82] Stiller B, Lee M W, Delqué M, et al. Suppression of SBS in a photonic crystal fiber with periodically-varied core diameter[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011, March 6-11, 2011, Los Angeles, California. Washington, D. C.: OSA, 2011: OMO5.
- [83] Trikshev A I, Kurkov A S, Tsvetkov V B, et al. 160 W single-frequency laser based on active tapered double-clad fiber amplifier[C]//2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC, May 12-16, 2013, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2013.
- [84] Trikshev A I, Kurkov A S, Tsvetkov V B, et al. A 160 W single-frequency laser based on an active tapered double-clad fiber amplifier [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(6): 065101.
- [85] Zhou Z C, Zhang H W, Wang X L, et al. All-fiber-integrated single frequency tapered fiber amplifier with near diffraction limited output[J]. Journal of Optics, 2016, 18(6): 065504.
- [86] Pierre C, Guiraud G, Vinçont C, et al. 120 W single frequency laser based on short active double clad tapered fiber[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2017.
- [87] Pierre C, Guiraud G, Yehouessi J P, et al. 200-W single frequency laser based on short active double clad tapered fiber [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105122A.
- [88] Noronen T, Fedotov A, Rissanen J, et al. Ultra-large mode area single frequency anisotropic MOPA with double clad Yb-doped tapered fiber [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105121T.
- [89] Huang L, Zhou Z C, Shi C, et al. Towards tapered-fiber-based all-fiberized high power narrow linewidth fiber laser[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(7): 971-981.
- [90] Lai W C, Ma P F, Liu W, et al. 550 W single frequency fiber amplifiers emitting at 1030 nm based on a tapered Yb-doped fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20908-20919.
- [91] Huang L, Lai W C, Ma P F, et al. Tapered Yb-doped fiber enabled monolithic high-power linearly polarized single-frequency laser[J]. Optics Letters, 2020, 45(14): 4001-4004.
- [92] 安毅, 潘志勇, 杨欢, 等. 国产长锥形光纤实现400 W单频单模激光输出[J]. 物理学报, 2021, 70(20): 204204.  
An Y, Pan Z Y, Yang H, et al. 400-W single-mode single-frequency laser output from homemade tapered fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(20): 204204.
- [93] Koptev M Y, Anashkina E A, Bobkov K K, et al. Fibre amplifier based on an ytterbium-doped active tapered fibre for the generation of megawatt peak power ultrashort optical pulses [J]. Quantum Electronics, 2015, 45(5): 443-450.
- [94] Mu X D, Steinvurzel P, Belden P, et al. Nanosecond-pulsed, mJ-level single-mode fiber master oscillator power amplifier with polarization maintaining tapered gain fiber[C]//Lasers Congress 2016 (ASSL, LSC, LAC), October 30-November 3, 2016, Boston, Massachusetts. Washington, D. C.: OSA, 2016: LW3B.2.
- [95] Filippov V, Vorotynskii A, Noronen T, et al. Picosecond MOPA with ytterbium doped tapered double clad fiber [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10083: 100831H.
- [96] Roy V, Paré C, Labranche B, et al. Yb-doped large mode area tapered fiber with depressed cladding and dopant confinement [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10083: 1008314.
- [97] Zhu Y, Lorenz M, Leich M, et al. Laser peak power scaling and beam quality improvement with a tapered ytterbium rod-type amplifier made by powder sinter technology [C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2017.
- [98] Bobkov K, Andrianov A, Koptev M, et al. Sub-MW peak power diffraction-limited chirped-pulse monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier [J]. Optics Express, 2017, 25(22): 26958-26972.
- [99] Noronen T, Gumenyuk R, Chamorovskii Y, et al. Ultrafast picosecond MOPA With Yb-doped tapered double clad fiber[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York:

- IEEE Press, 2017.
- [100] Bobkov K, Levchenko A, Aleshkina S, et al. 1.5 MW peak power diffraction limited monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2017.
- [101] Noronen T, Gumenyuk R, Chamorovskii Y, et al. Anisotropic ultra-large mode area Yb-doped tapered double clad fiber for ultrafast amplifiers[C]//Laser Congress 2017 (ASSL, LAC), October 1-5, 2017, Nagoya, Aichi. Washington, D.C.: OSA, 2017: JTU2A.51.
- [102] Khudyakov M M, Levchenko A E, Velmiskin V V, et al. 107-kW-peak-power 2-ns pulse tapered Er-doped fiber amplifier [C]//2018 International Conference Laser Optics (ICLO), June 4-8, 2018, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2018.
- [103] Zhu Y, Leich M, Lorenz M, et al. Yb-doped large mode area fiber for beam quality improvement using local adiabatic tapers with reduced dopant diffusion[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17034-17043.
- [104] Fedotov A, Noronen T, Gumenyuk R, et al. Ultra-large core birefringent Yb-doped tapered double clad fiber for high power amplifiers[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 6581-6592.
- [105] Fedotov A, Ustimchik V, Rissanen J, et al. Large-mode-area double clad ytterbium-doped tapered fiber with circular birefringence [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11665: 116651T.
- [106] Huang L, Lai W C, Su R T, et al. Monolithic linearly polarized nanosecond fiber laser with record peak power and near-transform-limited linewidth[C]//2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN), August 5-8, 2019, Huangshan, China. New York: IEEE Press, 2019.
- [107] Bobkov K K, Levchenko A E, Velmiskin V V, et al. High peak and average power Yb-doped tapered fiber amplifier[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: SM4E.2.
- [108] Andrianov A V, Koptev M Y, Anashkina E A, et al. Tapered erbium-doped fibre laser system delivering 10 MW of peak power[J]. Quantum Electronics, 2019, 49(12): 1093-1099.
- [109] Bobkov K K, Levchenko A E, Velmiskin V V, et al. 71 W average power sub-MW peak power diffraction-limited monolithic tapered fiber amplifier [C]//2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 23-27, 2019, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2019.
- [110] Petrov A, Odnoblyudov M, Gumenyuk R, et al. Picosecond Yb-doped tapered fiber laser system with 1.26 MW peak power and 200 W average output power[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 17781.
- [111] Leich M, Kalide A, Eschrich T, et al. 2 MW peak power generation in fluorine co-doped Yb fiber prepared by powder-sinter technology[J]. Optics Letters, 2020, 45(16): 4404-4407.
- [112] Guesmi K, Mugnier A, Canat G, et al. Simple design for high energy femtosecond tapered double clad fiber amplifier [J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11665: 1166517.
- [113] Scol F, Bouwmans G, Hugonnot E. High-energy, narrow-linewidth, flat-top temporal profile nanosecond-pulses from ytterbium-doped tapered fiber amplifier with chirped-diode seeding[J]. OSA Continuum, 2021, 4(4): 1162-1169.
- [114] Petrov A, Mikhailovsky G, Gorbachev A, et al. High-power and pulse energy picosecond narrow linewidth laser system based on tapered fiber amplifier for second harmonic generation [J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11665: 116651D.
- [115] Patokoski K, Rissanen J, Noronen T, et al. Single-frequency 100 ns/0.5 mJ laser pulses from all-fiber double clad ytterbium doped tapered fiber amplifier [J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31532-31541.
- [116] Fedotov A, Ustimchik V, Chamorovskii Y, et al. Low-birefringence active tapered fibers for high-power applications [C]//OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2020 (IPR, NP, NOMA, Networks, PVLED, PSC, SPPCom, SOF), July 13-16, 2020, Washington, DC. Washington, D. C.: OSA, 2020: SoTu2H.7.
- [117] Fedotov A, Ustimchik V, Rissanen J, et al. Active tapered double-clad fiber with low birefringence[J]. Optics Express, 2021, 29(11): 16506-16519.
- [118] Fedotov A, Ustimchik V, Rissanen J, et al. Large mode area double-clad ytterbium-doped tapered fiber with low birefringence [J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11665: 116651T.
- [119] Bobkov K K, Aleshkina S S, Khudyakov M M, et al. Active tapered fibers for high peak power fiber lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11773: 117730F.
- [120] Huang L, Ma P F, Su R T, et al. Comprehensive investigation on the power scaling of a tapered Yb-doped fiber-based monolithic linearly polarized high-peak-power near-transform-limited nanosecond fiber laser[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 761-782.
- [121] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. High-power single-mode tapered double-clad ytterbium fiber laser pumped by diode-laser bar [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 719506.
- [122] Filippov V, Kerttula J, Chamorovskii Y, et al. Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser [J]. Optics Express, 2010, 18(12): 12499-12512.
- [123] Kerttula J, Filippov V, Chamorovskii Y, et al. Tapered fiber amplifier with high gain and output power[J]. Laser Physics, 2012, 22(11): 1734-1738.
- [124] 史尘. 高功率长锥形掺镱光纤放大器研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.
- Shi C. The study of high power long tapered fiber amplifiers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [125] Shi C, Zhang H W, Wang X L, et al. kW-class high power fiber laser enabled by active long tapered fiber[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e16.
- [126] Zhang H W, Yang B L, Wang X L, et al. High power all-fiberized oscillator based on tapered fiber [C]//CLEO Pacific Rim Conference, July 29-August 3, 2018, Hong Kong, China. Washington, D.C.: OSA, 2018: Th3D.4.
- [127] Yang B L, Zhang H W, Shi C, et al. High power monolithic tapered ytterbium-doped fiber laser oscillator [J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7585-7592.
- [128] Lin X F, Cheng Y S, Wang Y B, et al. Ytterbium-doped fiber with tapered core and uniform cladding [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 10-15, 2020, Washington, DC. Washington, D.C.: OSA, 2020: SF1P.3.
- [129] Kerttula J, Filippov V, Chamorovskii Y, et al. A comparative study of tapered fiber laser configurations[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8237: 82370W.
- [130] Zeng L F, Xi X M, Ye Y, et al. A 1.8 kW fiber laser oscillator employing a section of spindle-shaped core ytterbium-doped fiber[J]. Laser Physics Letters, 2020, 17(9): 095104.
- [131] Ye Y, Lin X F, Xi X M, et al. 2 kW monolithic fiber amplifier based on constant-cladding tapered-core Yb-doped fiber [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11717: 1171735.
- [132] Ye Y, Lin X F, Xi X M, et al. Novel constant-cladding tapered-core ytterbium-doped fiber for high-power fiber laser oscillator [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9: e21.
- [133] 奚小明, 曾令筱, 叶云, 等. 基于国产双锥形光纤实现 3 kW 单模全光纤振荡器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0916001.
- Xi X M, Zeng L F, Ye Y, et al. Single mode 3 kW all fiber laser oscillator employing home made double tapered fiber[J].

- Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0916001.
- [134] 安毅, 杨欢, 肖虎, 等. 国产双锥形光纤实现 4 kW 单模激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0115002.  
An Y, Yang H, Xiao H, et al. 4-kW single-mode laser output using homemade double-tapered fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0115002.
- [135] Zeng L F, Pan Z Y, Xi X M, et al. 5 kW monolithic fiber amplifier employing homemade spindle-shaped ytterbium-doped fiber[J]. Optics Letters, 2021, 46(6): 1393-1396.
- [136] Zeng L F, Xi X M, Ye Y, et al. A novel fiber laser oscillator employing saddle-shaped core ytterbium-doped fiber [J]. Applied Physics B, 2020, 126(11): 185.
- [137] Gao S, Zhang L, Xu Y P, et al. Tapered fiber based Brillouin random fiber laser and its application for linewidth measurement [J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28353-28360.
- [138] Zhang H W, Du X Y, Zhou P, et al. Tapered fiber based high power random laser[J]. Optics Express, 2016, 24(8): 9112-9118.
- [139] Lou Z K, Jin X X, Zhang H W, et al. High power, high-order random Raman fiber laser based on tapered fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 7100406.
- [140] Zhang H W, Ye J, Zhou P, et al. Tapered-fiber-enabled high-power, high-spectral-purity random fiber lasing [J]. Optics Letters, 2018, 43(17): 4152-4155.
- [141] Leich M, Jäger M, Grimm S, et al. Tapered large-core 976 nm Yb-doped fiber laser with 10 W output power [J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(4): 045102.
- [142] Leich M, Jäger M, Grimm S, et al. Tapered single-mode Yb-fiber laser at 976 nm[C]//Advanced Photonics, July 27-31, 2014, Barcelona. Washington, D.C.: OSA, 2014: SoM3B.6.
- [143] Ustimchik V, Fedotov A, Rissanen J, et al. Green picosecond narrow-linewidth tapered fiber laser system[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 112601Y.
- [144] Roy V, Desbiens L, Deladurantaye M, et al. High power UV pulsed laser with LMA tapered fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 112601W.
- [145] Kuznetsov I I, Mukhin I B, Palashov O V. Thin-tapered-rod Yb:YAG amplifier for fiber oscillator[C]//2016 International Conference Laser Optics (LO), June 27-July 1, 2016, Saint Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2016.
- [146] Kuznetsov I, Mukhin I, Vadimova O, et al. Thin-rod and thin-tapered-rod ytterbium amplifiers for fiber lasers [C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017.
- [147] Chizhov S A, Kuznetsov I I, Mukhin I B, et al. Comparison of thin-tapered-rod and thin-rod Yb:YAG laser amplifiers at high average power operation [C]//2020 International Conference Laser Optics (ICLO), November 2-6, 2020, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2020.
- [148] Fan X Y, Liu J J. New simplified coupling system of 15 MW Nd:YAG laser pulse with 600  $\mu\text{m}$  optical fiber by use of a taper fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7282: 494-499.
- [149] Tang C, Tong L X, Xie G, et al. Tapered fiber phase conjugator for high-power all-solid lasers with high repetition rate[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8433: 843318.
- [150] Moore S W, Soh D B S, Bisson S E, et al. A high-energy cladding-pumped 80 nanosecond Q-switched fiber laser using a tapered fiber saturable absorber [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8601: 86011N.
- [151] Rehan M, Kumar G, Rastogi V. Optimization of tapered large mode area fiber for compression of high peak power ultrashort pulses[C]//JSAP-OSA Joint Symposia 2018, September 18-21, 2018, Nagoya, Japan. Washington, D.C.: OSA, 2018: 21a\_221B\_7.
- [152] Ampliconyx. TGModule-A-PM-v1.0.2-1[EB/OL]. (2020-02-01) [2021-09-23]. <http://ampliconyx.com/wp-content/uploads/2020/02/TGModule-A-PM-v1.0.2-1.pdf>.
- [153] Ino. Yb-MCOF-35/250-56/400-07-2. 2-T0. 7-PM [EB/OL]. (2020-01-01) [2021-09-24]. <https://inostorage.blob.core.windows.net/media/2061/mkt-2020-vsi-18.pdf>.
- [154] Ino. laser-engine-vsept2020[EB/OL]. (2020-01-17) [2021-08-27]. <https://inostorage.blob.core.windows.net/media/2268/laser-engine-vsept2020.pdf>.
- [155] Wan Y C, Xi X M, Yang B L, et al. Enhancement of TMI threshold in Yb-doped fiber laser by optimizing pump wavelength[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(13): 656-659.
- [156] Yang B L, Wang P, Zhang H W, et al. 6 kW single mode monolithic fiber laser enabled by effective mitigation of the transverse mode instability[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 26366-26374.
- [157] Yang B L, Zhang H W, Shi C, et al. 3.05 kW monolithic fiber laser oscillator with simultaneous optimizations of stimulated Raman scattering and transverse mode instability[J]. Journal of Optics, 2018, 20(2): 025802.

## Ytterbium-Doped Core-Diameter-Variable Fiber Laser: Current Situation and Develop Tendency

Wang Xiaolin<sup>1,2,3\*</sup>, Wen Yujun<sup>1</sup>, Zhang Hanwei<sup>1,2,3</sup>, Xi Xiaoming<sup>1,2,3</sup>, Shi Chen<sup>1,2,3</sup>,  
Yang Baolai<sup>1,2,3</sup>, Wang Peng<sup>1,2,3</sup>, Pan Zhiyong<sup>1,2,3\*\*</sup>, Wang Zefeng<sup>1,2,3</sup>, Xu Xiaojun<sup>1,2,3</sup>,  
Chen Jinbao<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

<sup>3</sup> Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China

### Abstract

**Significance** In the power scaling process of fiber lasers, nonlinear effects are one of the most important limiting factors. In order to suppress the nonlinear effects in high power fiber lasers, researchers have proposed to use a gain fiber whose core diameter is variable along the length direction (called core-diameter-variable gain fiber) as the laser gain medium. Core-diameter-variable gain fibers mainly includes single-tapered fibers, spindle-shaped fibers, and saddle-shaped fibers. Core-diameter-variable gain fibers have many advantages over the ordinary gain fibers. This type of fiber

used in lasers can make the laser have the capabilities of maintaining beam quality, suppressing mode instability, and mitigating amplified spontaneous emission (ASE) simultaneously, and has a broad application prospect in the field of high power lasers. In particular, the spindle-shaped gain fiber with an asymmetric structure may become the key device that breaks through the power limitation of the traditional gain fibers with uniform core diameters and obtains a high power laser output.

**Progress** Core-diameter-variable gain fibers can effectively suppress nonlinear effects and maintain good beam quality, and have been widely used in single-frequency and narrow-linewidth amplifiers. Commercial polarization-maintaining tapered ytterbium-doped fibers are used in single-frequency fiber lasers with an output power of 550 W. They are also used in pulsed fiber lasers to break through the peak power output. Since 2014, the lasers based on this type of fiber have been extensively studied, and the power has been rapidly increased while maintaining the beam quality. In 2017, a femtosecond pulsed laser with an output peak power of 22 MW was realized based on the ytterbium-doped tapered fiber combined with the pulse compression technology. In 2021, the peak was increased to 97 MW with the diffraction limit beam quality in a femtosecond pulsed laser system using an ytterbium-doped tapered fiber. After the non-polarization-maintaining fiber technology matured, in order to achieve the high peak linear polarization, researchers began to study the tapered gain fiber lasers based on the linear-polarization-maintaining characteristics. There are two types of double-clad ytterbium-doped tapered fibers which can maintain the polarization: the Panda polarization-maintaining tapered fiber and the spun tapered fiber. The comparison between the spun tapered double-clad gain fiber and the Panda polarization-maintaining fiber shows that the spun tapered double-clad fiber has better extinction ratio retention characteristics. Based on these fibers, a linearly polarized pulsed laser output with an average power of 72.5 W and an extinction ratio larger than 17 dB was achieved. In 2021, based on the Panda polarization-maintaining ytterbium-doped tapered fiber, a linearly polarized pulsed laser with an average power of 150 W, a peak power of 0.74 MW, and an extinction ratio of 13.5 dB was realized. Narrow-linewidth pulsed lasers based on tapered gain fibers also attracted attention at the same time. In 2021, a narrow-linewidth pulsed laser with a linewidth of 167 pm and a peak output of 170 kW at a pulse duration of 3 ns was achieved. Core-diameter-variable gain fibers have also been widely used in the continuous-wave lasers. In 2020, the spindle-shaped ytterbium-doped fiber was used to achieve a continuous-wave laser with an output power of larger than 5 kW, and the saddle-shaped ytterbium-doped fiber was also used to achieve a 1313 W continuous-wave laser output. With the development of technologies, the application of core-diameter-variable ytterbium-doped fibers is becoming more and more extensive. At present, the development of core-diameter-variable ytterbium-doped fiber lasers shows that the output laser wavelength extends from the conventional wavelengths to some special wavelengths, the laser polarization characteristics extend from non-linear polarization to linear polarization, and the fiber structure changes from single-tapered to spindle-shaped and saddle-shaped. For new types of optical fibers, the concept of variable diameter has evolved from core to cladding. With the development of fiber manufacturing processes, core-diameter-variable ytterbium-doped fibers will be widely used in various fields of fiber lasers. The core-diameter-variable gain fibers have special requirements for the drawing process. In order to realize the fabrication of core-diameter-variable ytterbium-doped fibers, the method of preform form control and the method of drawing with a variable speed as well as the combination of these two methods can be used. Many institutions in the world have mastered the manufacturing processes of polarization-maintaining and non-maintaining core-diameter-variable fibers, and have launched some products. However, the domestic related researches mainly began at around 2016, and until now many institutions have already preliminarily mastered the manufacturing processes of non-polarization core-diameter-variable ytterbium-doped gain fibers.

**Conclusion and Prospect** The application of core-diameter-variable gain fibers in high power lasers has been widely studied. With the progress of technologies and the traction of high power laser demand, core-diameter-variable ytterbium-doped fibers have moved gradually from the laboratory to the market in recent years, greatly promoting the development of high power fiber lasers. In the near future, based on the technologies of core-diameter-variable ytterbium-doped fibers and new pumping sources, it can be expected that an industrial-grade, near single-mode fiber laser with an output power larger than 10 kW, beam quality ( $M^2$ ) smaller than 2, and stable operation for long time can be realized.

**Key words** lasers; fiber lasers; core-diameter-variable fiber; nonlinear effect; mode instability effect