

激光与光电子学进展

基于全光纤结构的光束匀化整形技术研究进展

张栩, 邢颖滨, 褚应波, 陈瑰, 戴能利, 李海清, 彭景刚, 李进延*

华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 光纤激光器被广泛应用于工业加工、军事国防等领域,其输出的激光能量分布往往呈类高斯型分布,这种光斑直径内的非均匀能量分布在应用于光刻、焊接等方面时往往会影响到光斑内沿光斑直径不同位置处加工效果的一致性。因此在实际应用中,对类高斯光束进行匀化整形具有重大意义。相对于传统空间结构的光束整形方法,全光纤结构的光束整形对光纤激光器来说具有结构简单、紧凑型好等优点。通过对近年来各学者研究进展的总结,将全光纤结构的匀化整形技术归类为增加输出激光中的高阶模成分和直接改变基模的能量分布两类,并从这两种方法详细阐述了全光纤结构光束匀化整形技术的研究现状,并展望了全光纤结构光束整形技术的未来发展方向。

关键词 光纤光学; 光束整形; 平顶光束; 光纤激光器

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1516021

Research Progress on Beam Homogenization and Shaping Technology Using All-Fiber Structure

Zhang Xu, Xing Yingbin, Chu Yingbo, Chen Gui, Dai Nengli, Li Haiqing, Peng Jinggang, Li Jinyan*

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

Abstract Fiber lasers are widely used in industrial processing, military defense, and other fields. The energy distribution of the laser output in fiber lasers is Gaussian-like distribution. This nonuniform energy distribution within the spot diameter affects the consistency of the processing effect at different positions along the spot diameter when applied to lithography, welding, etc. Therefore, homogenizing and shaping Gaussian-like beams in practical applications is greatly significant. Compared with the beam shaping method of the traditional spatial structure, using the all-fiber structure in beam shaping provides a simple structure and good compactness for the fiber lasers. By summarizing the research progress of various scholars over the years, the homogenization and shaping technology of the all-fiber structure is classified into two categories: increasing the components of the high-order mode in the output laser and directly changing the energy distribution of the fundamental mode. In this paper, we present the research status of all-fiber structure beam homogenization and shaping technology and discuss prospects of future development in all-fiber structure beam shaping technology.

Key words fiber optics; beam shaping; flat top beam; fiber lasers

1 引言

20 世纪 60 年代梅曼发明了世界上第一台红宝石激光器以来,激光凭借着高亮度、高方向性和高单色性、高准直性等超越普通光源的优点在工业、通信、医学、光存储、航天航空、军事和科学研究等各个领域都

发挥着极为重要的作用^[1]。从 1961 年 Snitzer^[2]提出光纤激光器的概念,到 1988 年双包层光纤和包层泵浦技术的提出^[3],再到今天,光纤激光器得到了飞速的发展,输出功率实现了从毫瓦级到十万瓦级^[4]的飞跃,光纤激光器也凭借着其高输出功率、高光束质量和高效率的优点^[5-6]在工业加工、医学等领域占据着举足轻重

收稿日期: 2022-04-28; 修回日期: 2022-06-15; 录用日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61975061)

通信作者: *ljj@hust.edu.cn

的地位^[7]。

光纤激光器输出激光的光束强度在空间上通常呈类高斯型分布^[8],即中心强度最高,四周的强度按照高斯分布逐渐下降。在实际应用中,类高斯型光束在作用于加工面时,光斑中心处的能量密度远大于光斑边缘处的能量密度,从而影响光斑内沿光斑直径不同位置处加工效果的一致性。特别是当类高斯型能量分布的飞秒激光用于金属材料加工时,光斑边缘处的低能量密度会在金属材料表面发生较为严重的热灼烧效应,从而可能导致裂纹、溅射等缺陷^[9]。因此,改变光斑的能量分布,将其转化成均匀分布的平顶光斑,尤其是对于实际加工来说具有重要意义。光束匀化的优点也能够体现在激光照明应用上,通常情况下激光器的远场光强分布是不均匀的,这将会造成明暗相间或中心亮四周暗的光斑图样,在实际应用中,会影响系统的照明效果,而经过光束整形后,远场光强变为均匀分布,此时将得到一个亮度均匀的光斑图样。对于光纤激光器来说,传统的光束整形可以依靠空间光学系统(诸如非球面透镜组法、微透镜阵列整形法以及衍射光学元件法等方法^[10])来完成。这些方法虽然具有整形效果好和光能量损耗较小等特点,但在实际应用中往往会引入较为复杂的透镜光学系统,并会影响激光系统的集成度,除此之外,复杂的透镜光学系统还具有较差的抗震能力^[11]。近年来,越来越多的学者开始研究全光纤结构的光束整形方法,通过将光纤结构的光束

整形装置与光纤激光器系统直接耦合来实现光束整形的目的。目前主要有两种方法来实现光纤结构的光束匀化整形:1)直接将基模高斯光束的能量分布匀化,将部分光束中心的能量转移到光束的边缘处以获得一个能量分布平坦的基模输出^[12],最终实现匀化光束能量的目的,简称为基模整形法;2)通过增加输出激光中高阶模式的所占比例以增强基模边缘处的能量,最终实现多模输出进而达到输出光斑的能量分布平顶化^[13],简称为高阶模整形法。

基于此,本文首先介绍了近年来基于光纤结构的光束整形的各种方法,并对其研究现状进行了较为详细的介绍。

2 基于光纤结构的光束匀化整形技术研究进展

2.1 基模整形法

一种实现光束整形的方法是通过改变基模的能量分布来实现光束整形。1999年印度学者 Ghatak 等^[14]为了增加光纤的有效模场面积以降低光纤中的非线性效应,提出在纤芯中引入一个高折射率环的结构(图1),并通过模拟获得了一个平顶模场。在纤芯中引入高折射率环结构会使一部分纤芯的能量耦合入高折射率环而不是让能量保持在纤芯中心,增加了有效模场面积进而能够达到降低非线性效应的目的,实现了对基模的匀化整形。

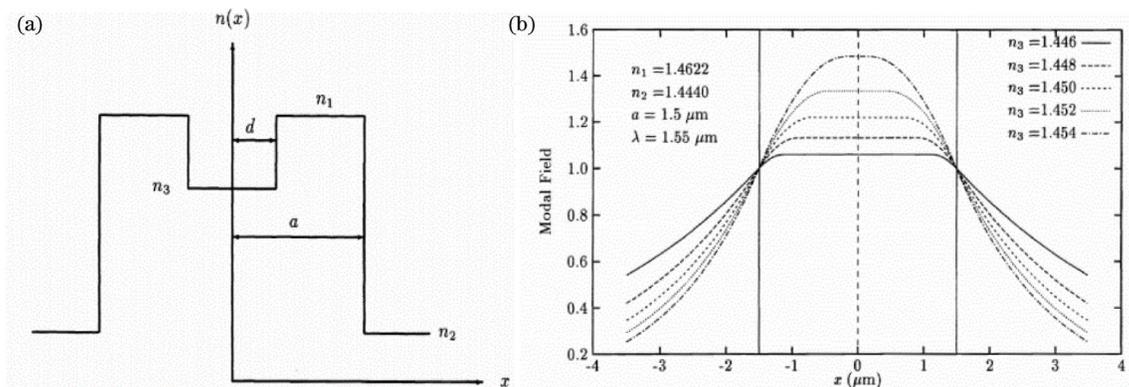


图1 高折射率环结构与模拟结果^[14]。(a)折射率分布;(b)不同纤芯折射率下的模式能量分布

Fig. 1 High-refractive-index ring structure and simulation results^[14]. (a) Refractive index distribution; (b) mode energy distribution at different core refractive indices

2004年,美国劳伦斯利物莫国家实验室的 Dawson 等^[15]通过在 30/400 μm 掺镱光纤的纤芯中添加高折射率环结构实现了能量分布较为平坦的输出光斑(图2),将有效模场面积提高了 2.5 倍,并且该输出光束与单模光纤(SMF)的耦合效率最高可达 83%,因此可以认为达到了准单模输出,实现了基模的匀化整形。

2005年中国科学院上海光学精密机械研究所的 Zhou 等^[16]提出使用微结构光纤进行光束整形的设想,并进行了拟真验证。其使用的微结构光纤横截面如图3所示,其中六边形区域为内纤芯,内纤芯与第一层

十二个空气孔之间的区域为外纤芯,内纤芯的折射率低于外纤芯,因此在内纤芯与外纤芯的分界面处将发生反射与折射,部分能量不能进入内纤芯,进而在光束传播过程中实现能量的匀化分布。且匀化整形效果与内纤芯尺寸有关,从图4可以看出,内纤芯尺寸越大,所得到的能量分布越接近于平顶分布。

2009年北京交通大学的 Wang 等^[17]提出通过带有高折射率环结构纤芯的光子晶体光纤获得一个能量平顶分布的基本模式的方法,并对其进行了模拟。从图5可以看出,该结构的光子晶体光纤不仅可以得到

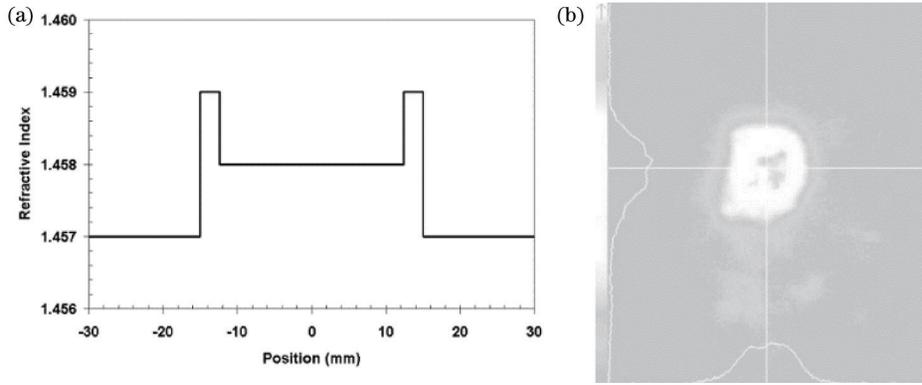


图 2 高折射率环结构与实验结果^[15]。(a)折射率分布;(b)输出光斑能量分布图

Fig. 2 High-refractive-index ring structure and experimental results^[15]. (a) Refractive index distribution; (b) output spot energy distribution

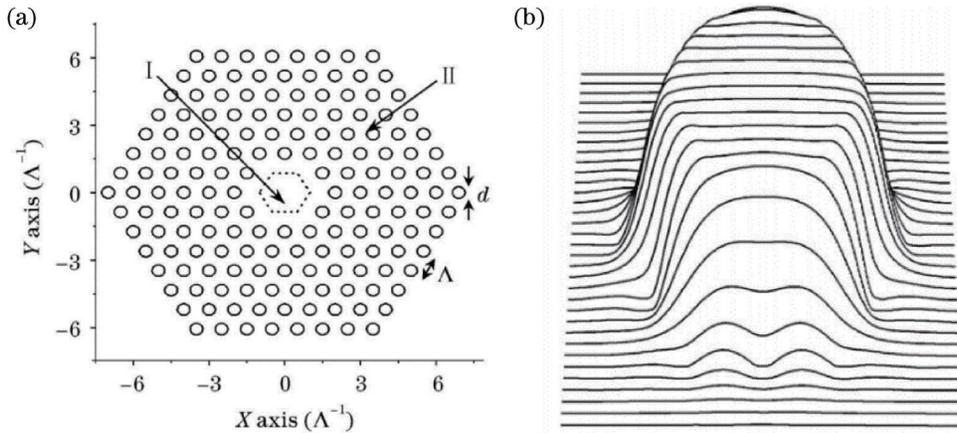


图 3 用于光束整形的微结构光纤^[16]。(a)光纤横截面;(b)经整形后得到的三维能量分布

Fig. 3 Microstructured fibers for beam shaping^[16]. (a) Fiber cross section; (b) three-dimensional energy distribution after shaping

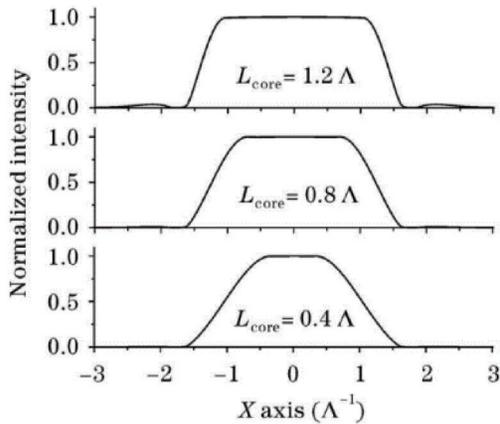


图 4 不同内纤芯尺寸下的能量分布^[16]

Fig. 4 Energy distribution with different inner core sizes^[16]

一个能量分布均匀的基本模式,并且更利于实现准单模输出。

2012年法国的研究人员 Valentin 等^[18]利用具有高折射率环纤芯的微结构光纤实现了高斯光束的匀化整形。该光纤的横截面和折射率剖面如图 6 所示,作者首先对不同波长下的整形效果进行了模拟,发现得到模式的强度轮廓很大程度上依赖于波长与高折射率环厚度的相对值。当波长比环尺寸小或相同时,大部

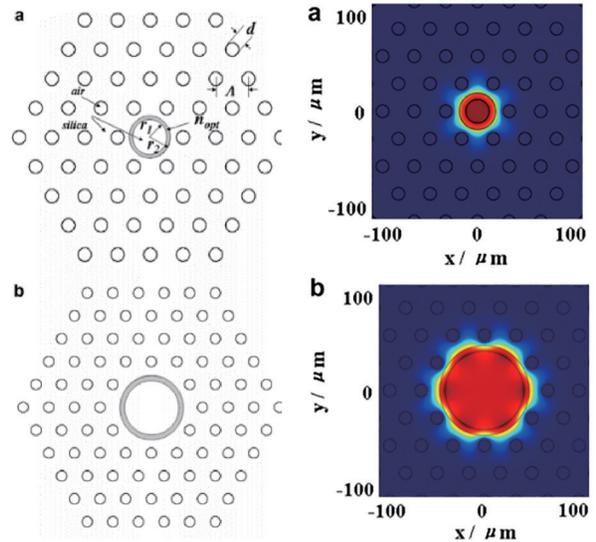


图 5 获得平顶基模的微结构光纤横截面以及所获得的平顶基本模式^[17]。(a)有一个气孔被纤芯替代;(b)有七个气孔被纤芯替代

Fig. 5 Cross section of microstructured fiber for obtaining the flat-top fundamental mode and the obtained flat-top fundamental mode^[17]. (a) With one air hole replaced by the fiber core; (b) with seven air holes replaced by the fiber core

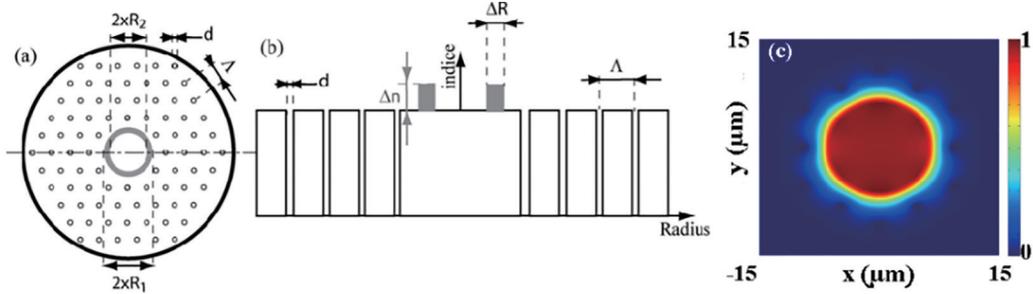


图 6 平顶模光纤^[18]。(a)横截面；(b)折射率分布；(c)在光纤中模拟得到平坦模式

Fig. 6 Flat top mode fiber^[18]. (a) Cross section; (b) refractive index profile; (c) a flat mode simulated in a fiber

分基模能量集中在高折射率环内(图 7, 700 nm)。相反,对于足够长的波长,大部分基模能量将集中于纤芯,并随着波长的增加,基模能量越发集中于纤芯中心(即越发靠近高斯型分布),最终在 1050 nm 左右获得了一个能量平坦分布的基模。随后通过实验验证了该模拟结果。通过使用白光源与一个 10 nm 的带通滤光

片进行滤波处理,在经过整形之后得到 1050 nm 附近近乎完美的平顶基模(图 8)。

2013 年美国克莱姆森大学的 Kong 等^[19]利用掺镱泄漏通道光纤(Yb-doped-LCF)实现了从高斯光束到平顶光束的光束整形。其光纤横截面如图 9 所示,中心暗处为掺镱的纤芯,周围黑色的区域为掺氟的包层。

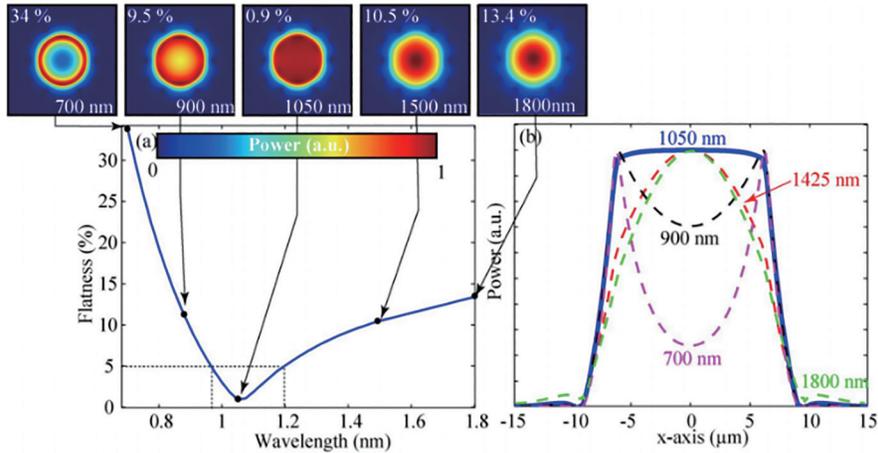


图 7 不同波长下的模拟结果^[18]。(a)不同波长下模式能量分布平坦度；(b)不同波长下基模的能量分布轮廓

Fig. 7 Simulation results at different wavelengths^[18]. (a) Flatness of the mode energy distribution at different wavelengths; (b) energy distribution profile of the fundamental mode at different wavelengths

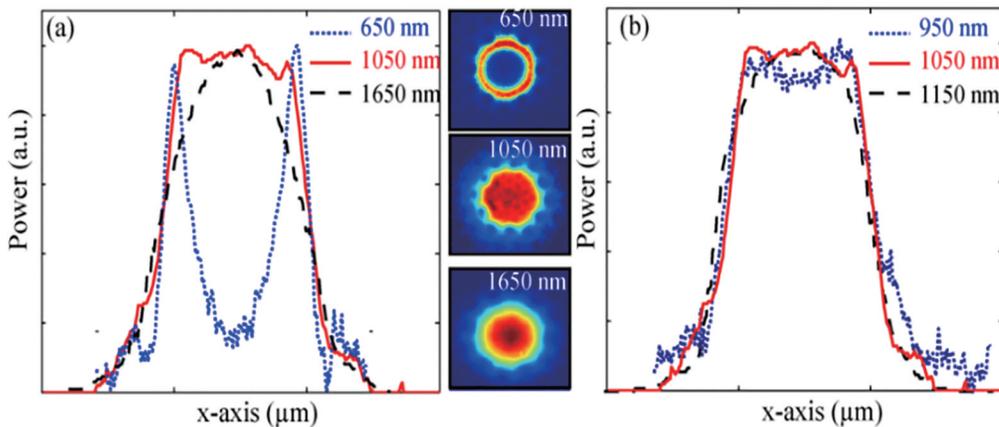


图 8 实验得到的不同波长下基模能量分布轮廓^[18]。(a)从 650 nm 到 1650 nm；(b)从 950 nm 到 1150 nm

Fig. 8 Experimentally obtained fundamental mode energy distribution profiles at different wavelengths^[18]. (a) From 650 nm to 1650 nm; (b) from 950 nm to 1150 nm

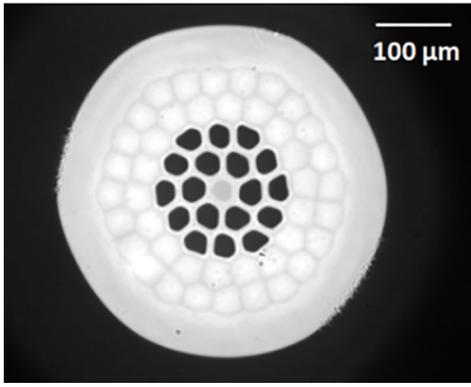


图 9 掺镱泄漏通道光纤横截面图^[19]

Fig. 9 Cross section of Ytterbium-doped leakage channel fiber^[19]

当纤芯与二氧化硅背景的折射率差为 2×10^{-4} 并以 1050 nm 的光入射时, 所得到的模式图案与强度分布如图 10(a) 所示。作者模拟了不同折射率差时的模式图案与强度分布[图 10(b)], 可以看出, 在折射率差为 1.75×10^{-4} 时具有最佳的平坦度。

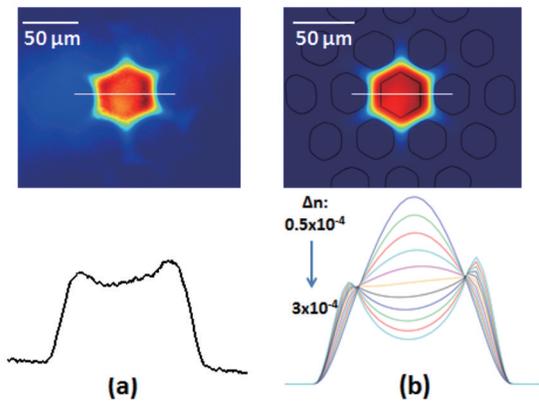


图 10 实验和模拟结果^[19]。(a) 近平顶基模; (b) 不同折射率差时的基模强度分布

Fig. 10 Experimental and simulation results^[19]. (a) Nearly flat-top fundamental mode; (b) fundamental mode intensity distribution with different refractive index differences

2.2 高阶模整形法

另一种实现光束整形的方法是通过激发高阶模式来实现的。根据高阶模光束整形法的原理不同, 本文从促使基模向高阶模式耦合和基模与高阶模的非相干叠加两个方面来介绍高阶模光束整形法的研究现状。

2.2.1 基模向高阶模式耦合

1) 大芯径多模光纤光束整形

利用大芯径的多模光纤进行光束整形是非常简单且有效的一种方法。

用于光束整形的高阶模式光纤其本质属于多模光纤, 为了使光纤能够支持更多数量的导模, 通常需要令纤芯的数值孔径(NA)和直径尽可能大, 归一化频率公式表示为

$$V = \frac{2\pi a NA}{\lambda} \quad (1)$$

可以看出, NA 越大、芯径越大, 光纤的归一化频率越大, 光纤中允许存在的模式数量越多, 其可支持的导模数量可以表示为

$$M \cong \frac{V^2}{2} \quad (2)$$

当单模光纤与多模光纤耦合时, 由于大芯径的多模光纤 NA 较大, 能够支持的模式非常多, 单模激光在多模光纤端面会激发出高阶模式^[20], 此时基模的大部分能量会向多模光纤所支持的高阶模耦合, 这些模式之间会发生能量的相互耦合。设由单模光纤入射的光场分布为 $E_{in}(x, y, z=0)$, 入射光进入多模光纤之后熔接面处的光场分布变为各个模式叠加的结果, 即

$$E_{in}(x, y, z=0) = \sum_1^M \sum_1^N C_{mn} e_{mn}(x, y, z=0), \quad (3)$$

式中: $e_{mn}(x, y, z=0)$ 是多模光纤中的第 mn 阶导模的光场分布; $M \times N$ 是多模光纤内所激发的模式数; C_{mn} 是模态膨胀系数。 C_{mn} 定义为

$$C_{mn} = \frac{\iint_s E_{in}(x, y, 0) \times e_{mn}^*(x, y, 0) ds}{\iint_s |e_{mn}(x, y, 0)|^2 ds} \quad (4)$$

这些模式在光纤中经过一定距离的传播之后, 各个传导模所携带的功率达到稳定, 此时所输出光斑的能量分布为纤芯内各个模式能量叠加的结果。

$$E_{out}(x, y, L) = \sum_1^M \sum_1^N C_{mn} e_{mn}(x, y, 0) \exp(-i\beta_{mn}L), \quad (5)$$

式中: β_{mn} 为多模光纤中波导的第 mn 阶激发模式的传播常数。并且入射光斑的直径与多模光纤芯径的尺寸差异越大, 所激发出的高阶模式就越多^[21], 越利于光束的匀化。

2014 年 Nufern 公司的 Farley 等^[22] 发现通过将入射激光错位对准耦合进入多模光纤可以实现高斯光束的匀化整形。其实验装置如图 11 所示, 通过透镜将波长为 $1 \mu\text{m}$ 的高斯型入射激光耦合进入芯径 $200 \mu\text{m}$ 的传能光纤, 然后移动透镜来使入射激光在与纤芯圆心对准形成错位。其实验结果如图 12 所示, 当入射激光的焦平面与入射激光在光纤端面的位置同时发生一定程度的偏移时, 输出光斑能量分布呈平顶型分布。

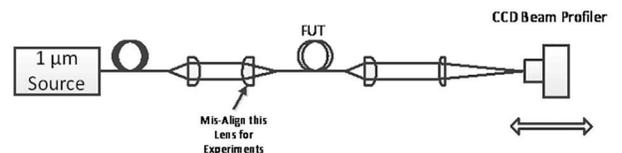


图 11 入射激光在径向和轴向上错位对准的实验原理图^[22]
Fig. 11 Schematic diagram of the experiment of the misaligned alignment of the incident laser in the radial and axial directions^[22]

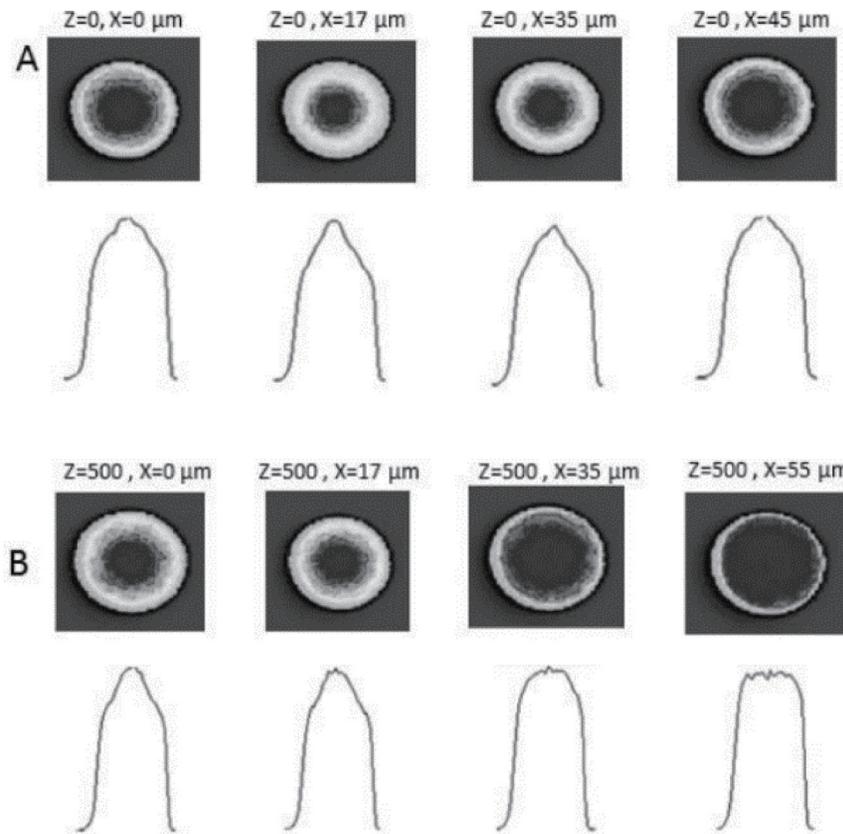


图 12 在近场处的光束强度剖面。(a) 仅在径向(x 方向)上的错位^[22]; (b) 在轴向(z 方向)和径向(x 方向)上的错位^[22]
 Fig. 12 Beam intensity profile at the near field. (a) Misaligned in radial (x -direction) only^[22]; (b) misaligned in axial (z -direction) and radial (x -direction)^[22]

可以看出,在光纤熔接时进行错位熔接会激发高阶模的产生从而达到光斑匀化的效果,但该方法的缺点较为明显:一方面,若想要通过错位熔接来达到光束整形的目的,则需要对错位偏移量进行非常精准的控制;另一方面,光纤的错位熔接将带来较大的损耗,不利于实际应用。

2015年中国科学院半导体研究所全固态光源实验室^[23]在研究单模激光在多模光纤中的传输特性时发现,单模激光在多模光纤中不能保持其基模特性,经多模光纤传输后的出射光束为准均匀光束,且随着光纤芯径及传输长度的增加,匀化效果增强。其实验装置如图 13 所示,该实验装置使用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器作为单模光源,并利用透镜将激光耦合入多模光纤。在上述实验装置下,进行了以下对比实验:使用相同长度为 2 m、不同芯径为 200、400、600 μm 的多

模光纤,研究芯径对输出光斑能量分布及出射光束质量的影响;并使用不同长度的芯径为 400 μm 的多模光纤,研究单模光束在多模光纤中的传输演化过程。最终发现在高斯型能量分布的单模光源经过相同长度、不同芯径的多模光纤后,光斑出现了不同程度的平顶化,其中芯径越大的多模光纤对单模光源的平顶化越明显,其光斑形状如图 14 所示。这是因为单模光纤与多模光纤之间存在模场失配,光纤中的高阶模式被激发,导致能量在基模与各高阶模式中重新分配,最终光纤出射的光束能量分布是各阶模式的叠加结果。且多模光纤的芯径与入射光斑的直径相差越大,多模光纤内激发的高阶模式就越多,对光斑的匀化效果也越好。不仅如此,单模激光通过相同芯径、不同长度的多模光纤后,光斑的匀化程度也有不同。图 15 为单模光束经不同长度多模光纤的远场光斑图,可以看出传输长度对出射光束特性有很大的影响。

2016年 Nufern 公司的 Jollivet 等^[24]通过在 100/120/360 μm 多模光纤中添加特定的模式混合元件,成功激发出大量的高阶模式,并实现了较高功率下的光斑匀化整形。其实验装置如图 16 所示,以能量高斯型分布的单模激光入射,通过其特制的多模光纤之后有效地激发出了大量的高阶模式以此实现高斯光束的匀化整形,且整形效果很好(图 17)。

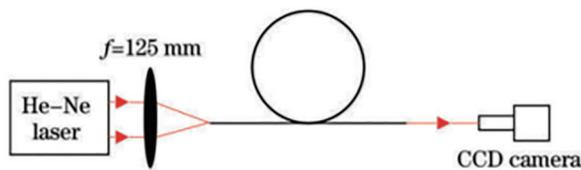


图 13 实验装置图^[23]
 Fig. 13 Experimental setup^[23]

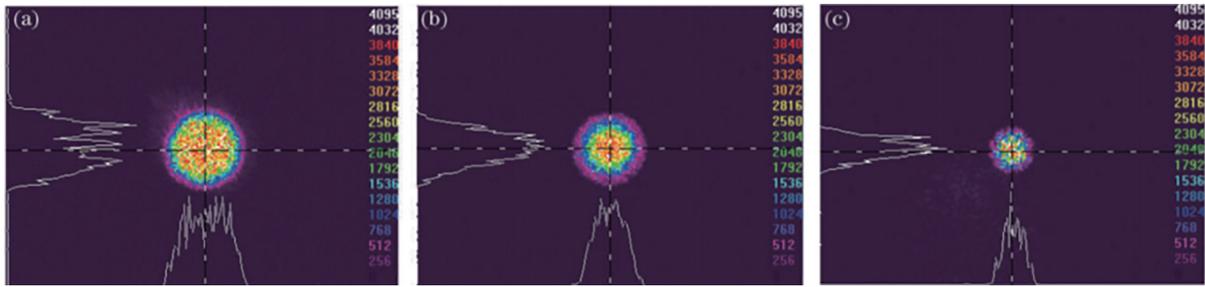


图 14 单模激光经过不同芯径的多模光纤后的输出光斑^[23]。(a)芯径 600 μm; (b)芯径 400 μm; (c)芯径 200 μm

Fig. 14 Output spot of the single-mode laser after passing through multi-mode fibers with different core diameters^[23]. (a) Core diameter of 600 μm; (b) core diameter of 400 μm; (c) core diameter of 200 μm

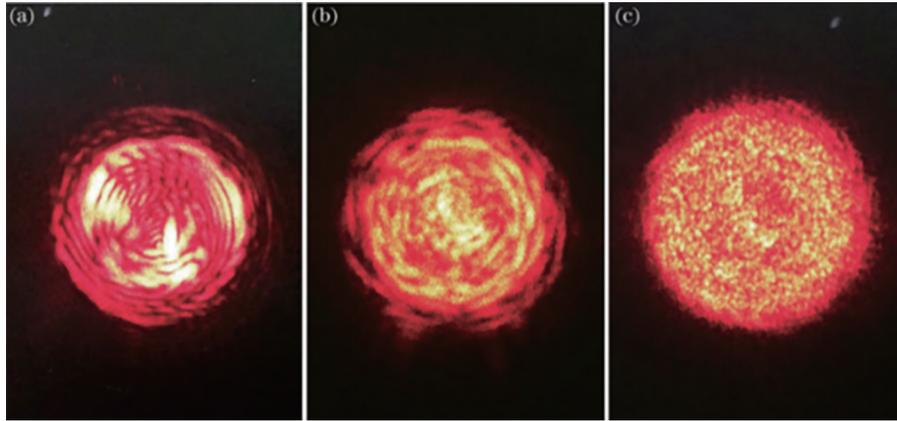


图 15 单模激光经过不同长度的多模光纤后的输出光斑^[23]。(a)10 cm; (b)30 cm; (c)2 m

Fig. 15 Output spot of the single-mode laser after passing through the multi-mode fiber of different lengths^[23]. (a) 10 cm; (b) 30 cm; (c) 2 m

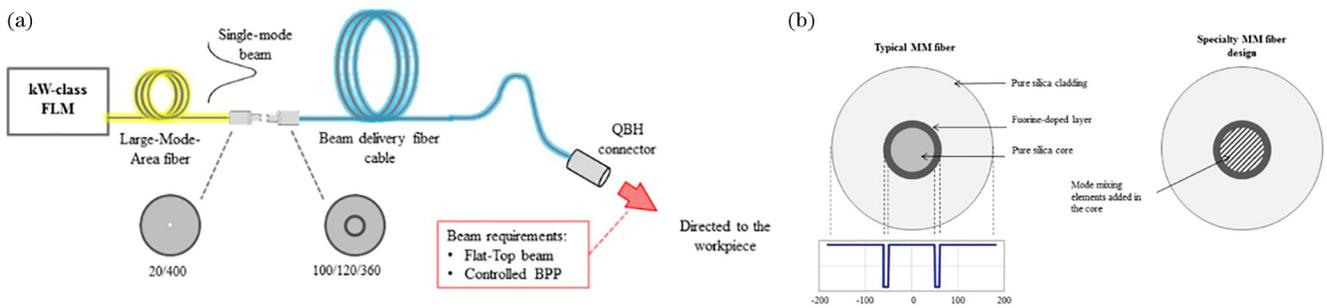


图 16 实验装置^[24]。(a)全光纤结构的光束整形装置; (b)特制的多模光纤

Fig. 16 Experimental setup^[24]. (a) Beam shaping device with all-fiber structure; (b) special multimode fiber

2) 长周期光栅(LPG)光束整形

长周期光栅是通过紫外曝光、飞秒激光刻写、二氧化碳激光照射和熔融拉锥等方法在光纤轴向上引入周期性的折射率变化,且该调制周期为几十到几百微米的一种光纤光栅^[25]。其作用为促使正向传输的各个模式之间的能量耦合,传光特性相当于透射带阻滤波器^[26]。长周期光栅也能够被用于光束整形领域,将部分基模能量耦合到特定的高阶模式中,以此增加光斑边缘能量薄弱处的能量来达到匀化光束整形的目的。

利用长周期光栅实现光束整形的关键在于控制其调制周期与基模和高阶模的传播系数满足如下式所示的相位匹配条件,进而实现基模向特定高阶模的定向

耦合。

$$\beta_k - \beta_j = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (6)$$

式中: β_k 和 β_j 表示第 k,j 阶模式的传播系数; Λ 表示长周期光栅的调制周期。

2008年加拿大瑞尔森大学的Gu等^[27]利用长周期光栅制作了一种 $1.5 \mu\text{m}$ 波段全光纤结构的激光束整形装置,实现了从高斯光束到平顶光束的整形。其实验原理图如图18所示,该装置的核心为一段长度为4 cm、周期为 $610 \mu\text{m}$ 的长周期光栅,激光束通过长周期光栅后纤芯的部分基模(LP₀₁模)被耦合进包层中的高阶模(LP₀₃模),之后基模与这个高阶模将发生干涉,

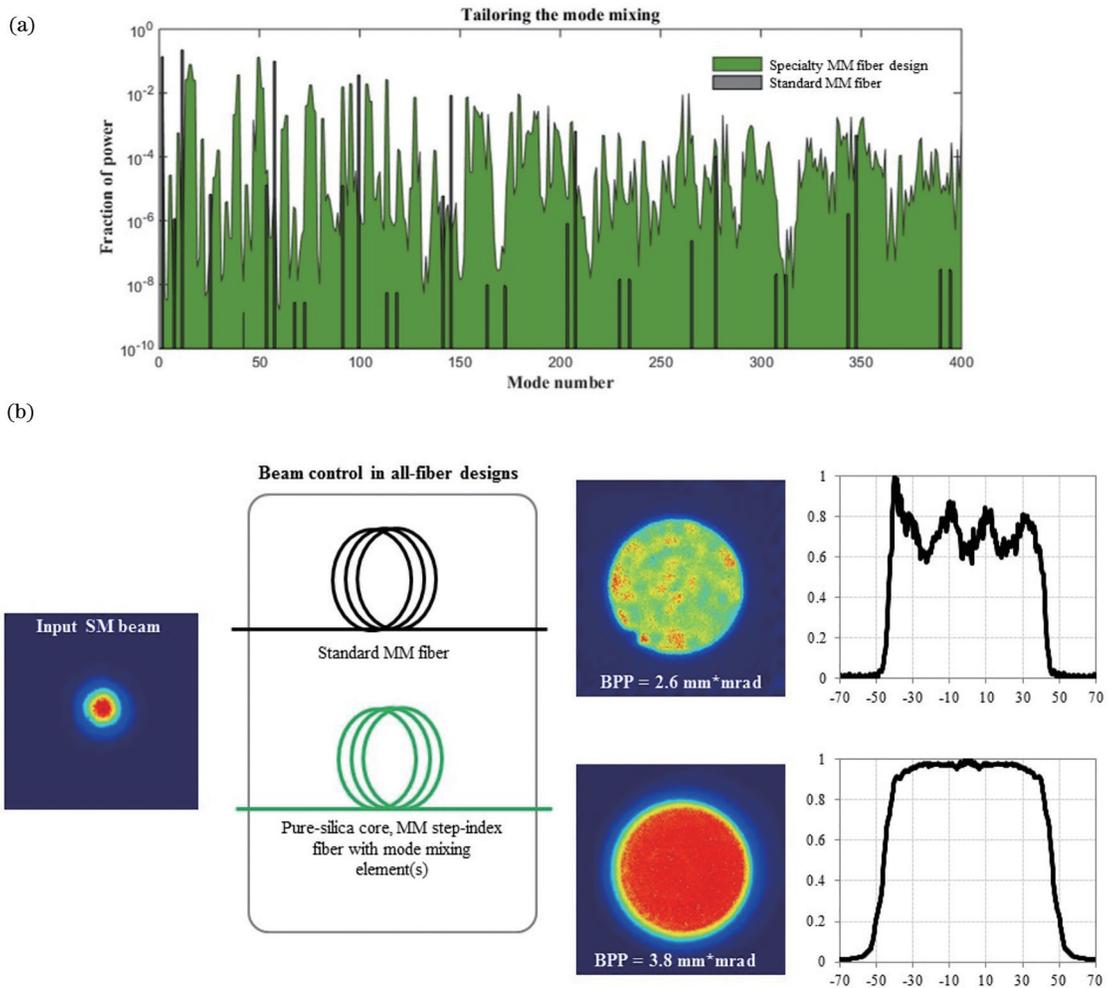


图 17 普通多模光纤与特制多模光纤^[24]。(a)模式数量;(b)整形效果

Fig. 17 Ordinary multimode fiber and special multimode fiber^[24]. (a) Number of modes; (b) shaping effect

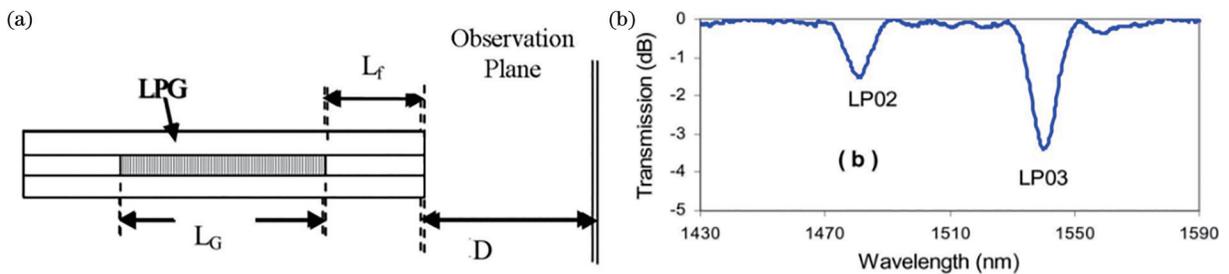


图 18 用于光束整形的长周期光栅^[27]。(a)实验原理图;(b)长周期光栅的透射谱

Fig. 18 Long period gratings for beam shaping^[27]. (a) Schematic diagram of experiment; (b) transmission spectrum of the LPG

由于基模与高阶模的传播常数不同,干涉图案将随着模式的传播而改变,在这个过程中,纤芯的光强减弱,而包层中的光强被增强,以此实现光斑的匀化。从图 19 可以看出,当有 2.1% 的基模光耦合进入 LP_{03} 模时可以得到平顶光束,而当没有基模光耦合进入 LP_{03} 模时,输出光斑仍呈高斯型。另外,长周期光栅后方不同距离下的光斑形状也不尽相同,从图 20 可以看出,只有在 9~12 mm 之间才能得到平顶光束。不仅如此,光束整形效果也与激光波长有关,图 20 展示了相同观测距离下不同波长的整形效果。

2009 年加拿大瑞尔森大学的 Mohammed 等^[28]再次利用长周期光栅实现了 $1 \mu\text{m}$ 波段全光纤结构的光束整形。在 Hi1060 光纤中刻写长度 4 cm、周期为 $580 \mu\text{m}$ 的长周期光栅,该光栅对应的光谱特性如图 21(a) 所示。使用可调谐光源入射,当激光调谐到 963.3 nm 时,对应约有 3.1% 的基模光耦合到 LP_{03} 模式,此时用 CCD 光束分析仪记录得到了一个平顶型光束,如图 21(b) 所示。

3) 锥形光纤光束整形

在弱耦合波导(如光纤)中,自然模式将结合成线

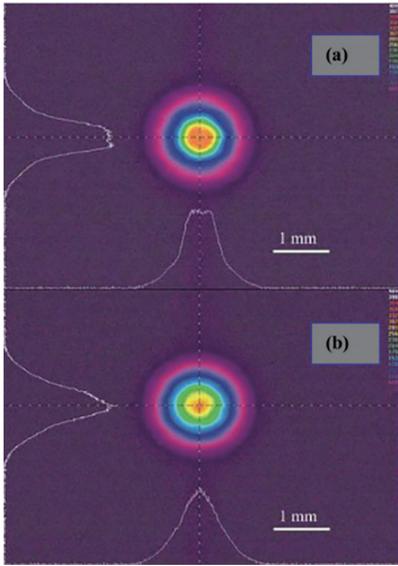


图 19 实验结果^[27]。(a) 2.1% 基模光耦合进 LP₀₃ 模; (b) 无基模光耦合进 LP₀₃ 模

Fig. 19 Experimental results^[27]. (a) 2.1% fundamental mode is optically coupled into LP₀₃ mode; (b) no fundamental mode is optically coupled into LP₀₃ mode

偏振 LP_{mn} 模式^[29]。通常情况下, 由于衰减很小的原因, SMF 可以支持 LP₀₁ 模式传播几千米远。当 SMF 受到扰动, 比如引入锥区时, 部分 LP₀₁ 的能量可以作为

包层模式耦合到包层里^[30]。但是由于光纤的外部有涂覆层, 包层模式通常会因为经历很高的衰减而只能在包层中传播几厘米。然而, 在去除涂覆层之后, 包层可以当作是包层模式的无损介质^[31]。由于激光的高相干性, 各种模式将发生干涉, 最终观测面上将得到一个干涉图样, 进而将输出光斑的能量分布轮廓平坦化。

用于光束整形的锥形光纤其主要原理与多模光纤类似, 它是通过光纤芯径的变化来实现对高阶模式的控制, 多模光纤可以看作锥区光纤长度为 0 的情况。锥形光纤可以通过控制锥角的大小来实现对高阶模式的数量以及相应模式含量的选择性激发。在光纤相同且满足拉锥绝热条件的情况下: 锥角越大, 所激发的模式数量越多, 高阶模含量越高; 锥角越小, 所激发的模式数量越少, 高阶模含量越少。通过设计一个特定角度的锥角, 能够得到特定数量和含量的高阶模式, 进而得到想要获得的光束能量分布轮廓。

2009 年加拿大皇后大学的 Tian 等^[32]通过在单模光纤中引入一端突然的锥区来激发高阶模式, 将部分能量耦合到 LP₀₂ 到 LP₀₉ 模等高阶模式中 (尤其是 LP₀₅ 模), 以此实现了光纤结构的光束整形, 成功将高斯型光斑整形为平顶光斑, 其插入损耗小于 0.1 dB。实验装置如图 22 所示, 通过熔接机对 SMF-28 单模光纤进行拉锥, 锥区长度 L_c 约为 700 μm , 腰宽 W_c 为 40 μm , 锥

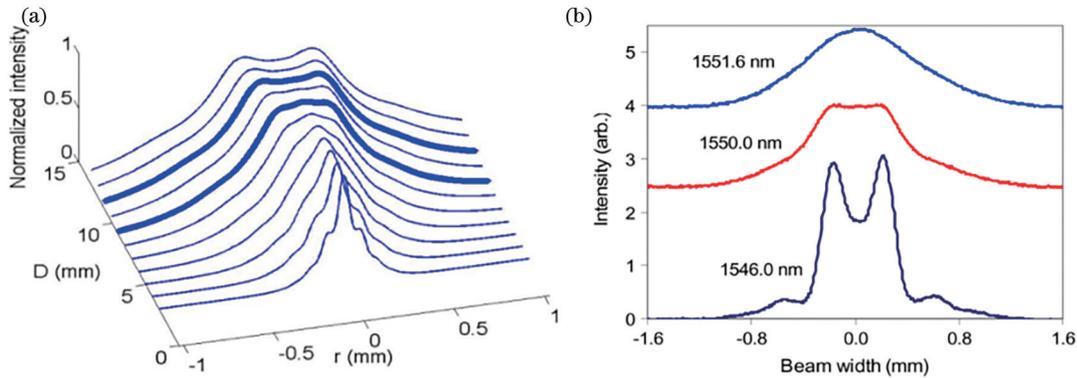


图 20 实验结果^[27]。(a) 不同观测距离下的光斑能量分布图; (b) 12 mm 处不同波长的光斑能量分布图

Fig. 20 Experimental results^[27]. (a) Spot energy distribution at different observation distances; (b) spot energy distribution at different wavelengths at a distance of 12 mm

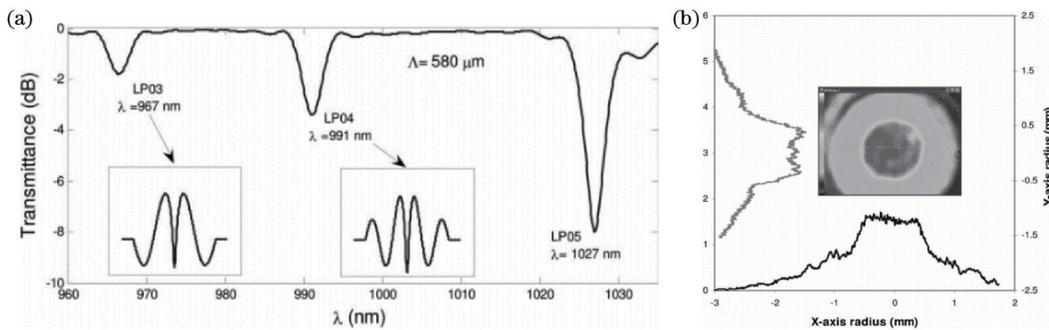


图 21 用于 1 μm 激光整形的长周期光栅与实验结果^[28]。(a) 长周期光栅的透射光谱; (b) 距离光纤端面 13 mm 处光斑能量分布

Fig. 21 Long period grating for 1 μm laser shaping and experimental results^[28]. (a) Transmission spectrum of the long period grating; (b) energy distribution of the spot at 13 mm from the fiber end face

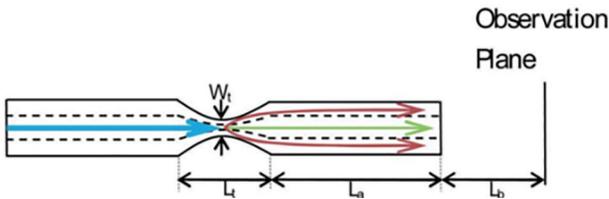
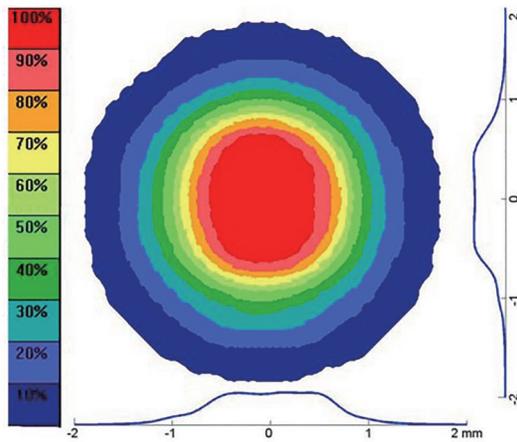


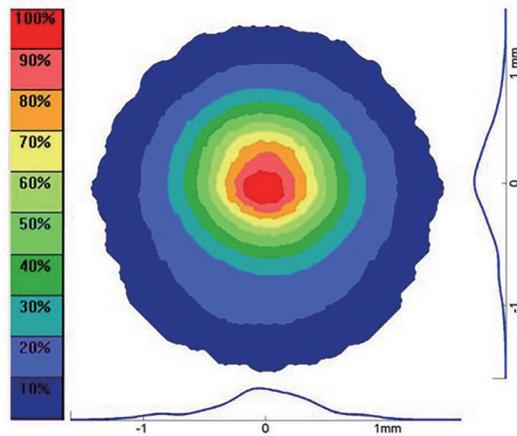
图 22 锥形光纤光束整形原理图^[32]

Fig. 22 Schematic diagram of tapered fiber beam shaping^[32]

区到光纤输出端面的距离 L_a 为 15.5 mm, 光纤输出端面到观测面的距离 L_b 为 7~12 mm 可调。光源使用 1530~1600 nm 的可调谐光源来研究不同波长的激光对锥形光纤光束整形的影响。从图 23 可以看出, 对于相同观察位置, 不同波长的光束具有不同的光斑形状, 1570.1 nm 的光束经过整形后的光斑呈平顶形, 而 1589 nm 的光束经过整形后的光斑依然是高斯型。该结构的整形效果除了和波长有关之外, 还与观测平面的位置有关, 图 24 比较了两种波长的激光在不同观测位置时的光斑能量分布, 经过锥形光纤后的光斑(A)



(a)



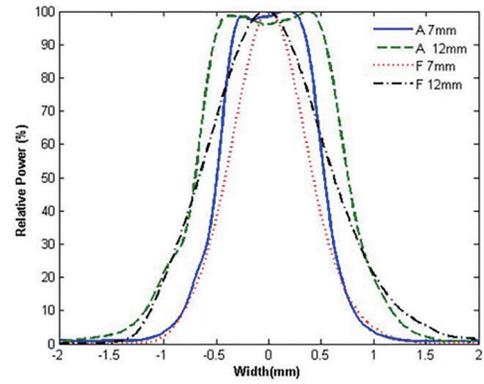
(b)

图 23 在 $L_b = 12$ mm 处观察到的光斑能量分布^[32]。

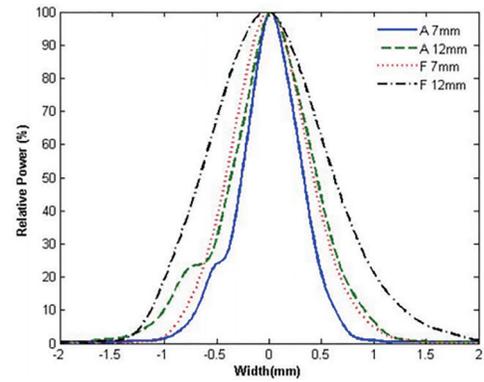
(a) 1570.1 nm; (b) 1589 nm

Fig. 23 Spot energy distributions observed at $L_b = 12$ mm^[32].

(a) 1570.1 nm; (b) 1589 nm



(a)



(b)

图 24 经过锥形光纤与经过单模光纤在不同位置处 ($L_b = 7$ mm 和 12 mm) 的光斑能量分布^[32]。(a) 1570.1 nm; (b) 1589 nm

Fig. 24 Spot energy distribution at different positions ($L_b = 7$ mm and 12 mm) after passing through the tapered fiber and after passing through the single-mode fiber^[32].

(a) 1570.1 nm; (b) 1589 nm

与只经过单模光纤后的光斑(F)相比, 具有良好的匀化效果, 且匀化效果随观测面位置改变而改变, 这是由于因锥区激发的高阶模式和基模的传播常数各不相同, 每一种模式都以不同的相位到达观测面。

2019 年中国科学院上海光学精密机械研究所的 Liu 等^[33]将单模光纤和一段拉锥的多模光纤熔接在一起实现模式控制, 以此实现全光纤结构的高斯光束的匀化整形。其实验装置如图 25(a)所示, 左侧为 20/400 μm ($NA = 0.06$) 的 Nufern 双包层无源光纤, 右侧为由 50/400 μm ($NA = 0.2$) 的多模光纤拉锥得到的锥形光纤。图 25(b)为该装置的模拟结果, 可以看出, LP_{02} 模含量上升到 20%~25%, LP_{01} 模含量下降到 70%~75%, 这说明 LP_{02} 模在熔点处被激发, 并随着传播距离在一定程度内与 LP_{01} 模相互耦合。该装置的尾纤长 1000 mm, 使用 1064 nm 的单模激光入射, 并在距输出尾纤端面 25 mm 处用光电探头观测输出光斑形状以及强度分布。在观测面上的光斑形状与强度分布如图 25(c)所示, 所得到的 x/y 方向上的平坦因子分别

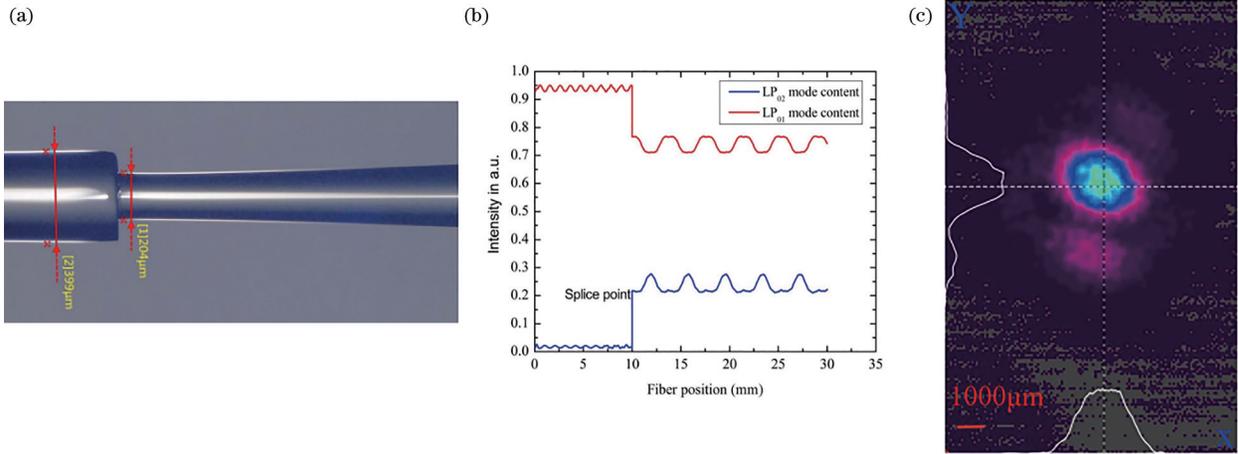


图 25 用于光束整形的锥形光纤结构^[33]。(a)全光纤结构的光束整形装置;(b)各模式含量随传播距离的变化;(c)实验结果图
Fig. 25 Tapered fiber structure for beam shaping^[33]. (a) Beam shaping device with all-fiber structure; (b) variation of mode content with propagation distance; (c) experimental results

为 0.65/0.60, 该现象可能是熔接点处的纤芯错位或光纤弯曲造成的。

4) 光纤端面蚀刻光束整形

通过对输出光纤的端面进行化学蚀刻处理, 能够一定程度地激发出高阶模式, 因此也能够实现对激光束的整形。

2012 年北卡罗来纳大学的 Mayeh 等^[34]通过对单模及多模光纤的端面进行蚀刻形成一个凹形的尖端, 成功将高斯光束整形为强度分布均匀的平顶光斑。其整形装置如图 26 所示, 该装置利用氢氟酸将光纤端面蚀刻, 将光纤的一端从圆柱形蚀刻成圆锥形, 并且通过控制蚀刻时间以达到控制尖端形状的目的。对单模光纤进行端面蚀刻处理后的实验结果如图 27 所示, 可以看出, 经过氢氟酸腐蚀 3 min 后的单模光纤能够将高斯光束转化为平顶光束, 而经过 4 min 蚀刻后的单模光纤能够将高斯光束转化为“甜甜圈”型能量分布的光束。对多模光纤进行端面蚀刻处理后的实验结果如图 28 所示, 可以看出, 此时的光束整形效果对观测位

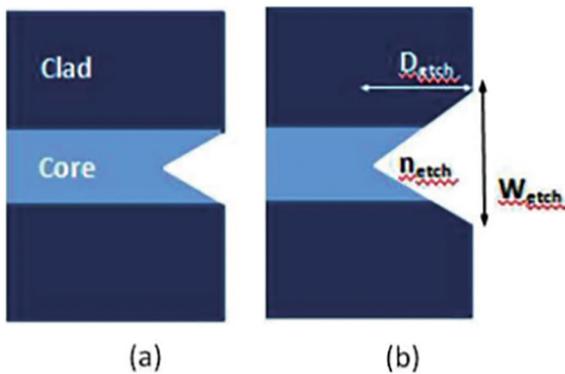


图 26 实验装置图^[34]。(a)仅对纤芯进行蚀刻处理;(b)对纤芯和包层进行蚀刻处理
Fig. 26 Experimental setup^[34]. (a) Only the core is etched; (b) core and cladding are etched

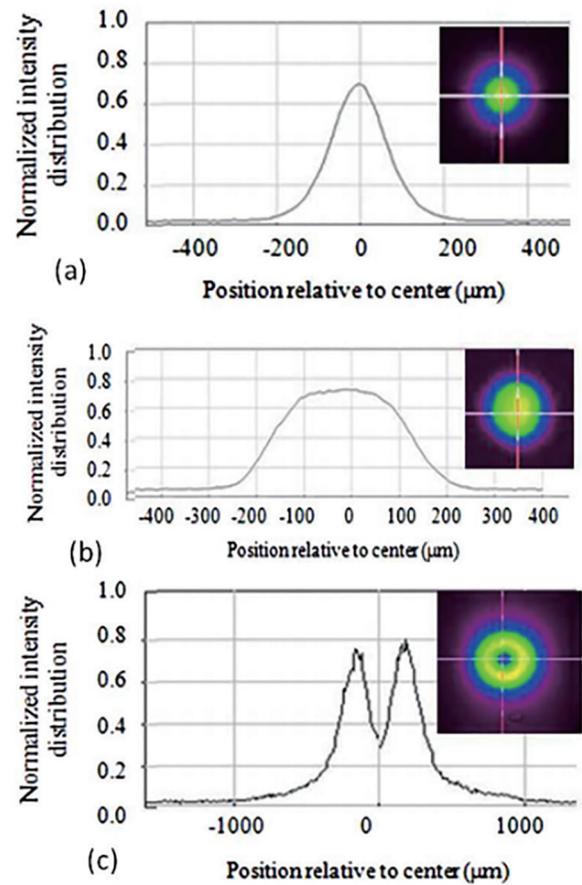


图 27 光斑能量分布^[34]。(a)未经蚀刻的单模光纤;(b)经过 3 分钟蚀刻后的单模光纤;(c)经过 4 min 蚀刻后的单模光纤
Fig. 27 Spot energy distribution^[34]. (a) Unetched single-mode fiber; (b) single-mode fiber after 3 min of etching; (c) single-mode fiber after 4 min of etching

置较为敏感, 当腐蚀后的光纤端面距离 CCD 2 mm 时能够得到平顶光斑, 而当蚀刻后的光纤端面距离 CCD 2.1 mm 时能够得到“甜甜圈”光斑。此种方法虽然具有较小的损耗, 但其对蚀刻精度的要求较高, 且经过蚀

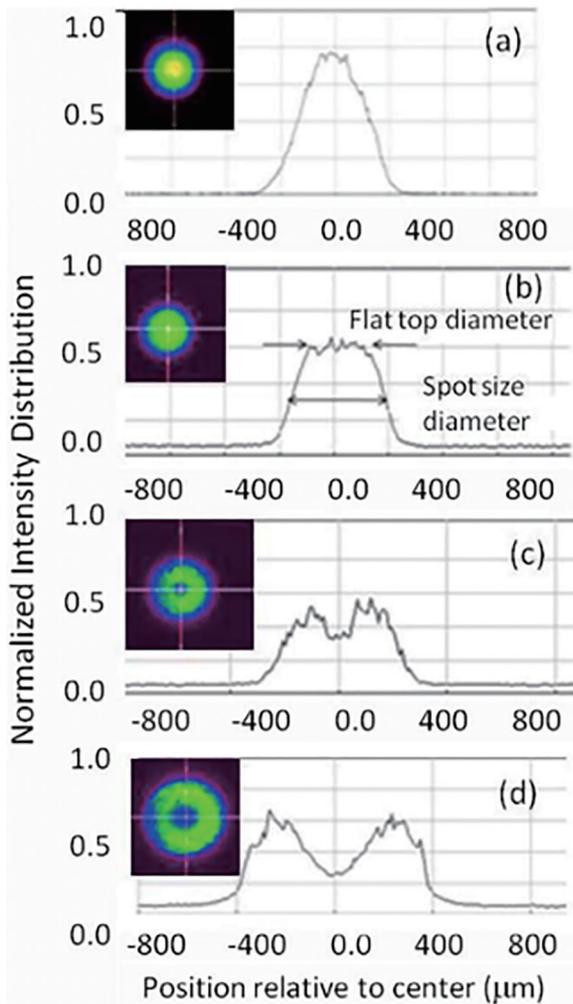


图 28 光纤尖端距 CCD 相机不同距离时观察到的光斑能量分布^[34]。(a)0.5 mm; (b)2 mm; (c)2.1 mm; (d)2.5 mm
 Fig. 28 Spot energy distribution observed when fiber tip is at different distances from the CCD camera^[34]. (a) 0.5 mm; (b) 2 mm; (c) 2.1 mm; (d) 2.5 mm

刻后光纤端面的损伤阈值将会大大降低,因此并不适合在高功率激光输出下的应用。

5) 多边形纤芯光纤光束整形

利用矩形或多边形纤芯的光纤或多边形光纤来进行光束的匀化整形是最早的光束整形方法之一。其通过矩形或多边形此类非圆形波导结构来激发光纤中的高阶模式^[35],使得光束能量在基模与高阶模之间耦合,

达到光束能量重新分布的目的,以此实现光束的匀化整形。

2003 年日本东北大学的 Matsuura 等^[36]利用矩形空芯光纤实现了光纤结构的匀化光束整形(图 29)。通过纤芯边长为 1 mm 的大尺寸矩形波导结构来激发大量的高阶模式,最终得到一个能量分布均匀的矩形光斑。

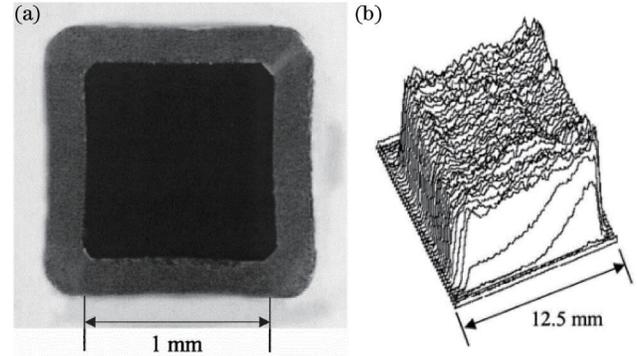


图 29 用于光束整形的方芯光纤^[36]。(a)光纤横截面;(b)输出光斑的三维能量分布图
 Fig. 29 Square core fiber for beam shaping^[36]. (a) Fiber cross section; (b) three-dimensional energy distribution of output spot

2006 年南安普敦大学的 Haynes 等^[37]利用方形纤芯空气包层光纤实现了圆形到方形的光斑匀化整形。其光纤结构如图 30 所示,其尺寸为 $380 \mu\text{m} \times 380 \mu\text{m}$ 的方形纤芯,包层由 48 个空气孔包围组成,每个气孔长 $40 \mu\text{m}$ 间隔 $2 \mu\text{m}$ 。其近场的光斑强度分布如图 31

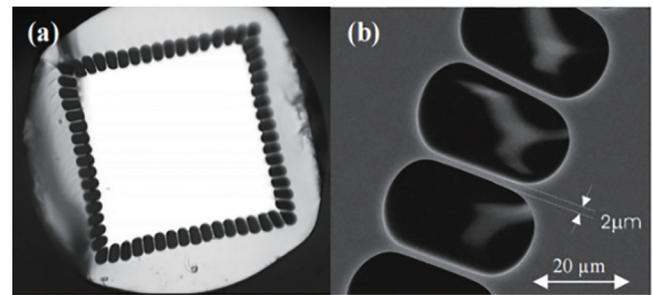


图 30 光纤横截面^[37]。(a)光纤端面;(b)包层气孔
 Fig. 30 Fiber cross section^[37]. (a) Fiber end face; (b) cladding air hole

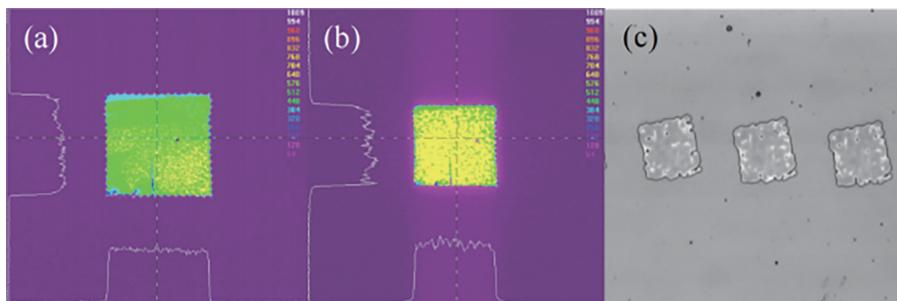


图 31 近场光斑强度分布^[37]。(a)633 nm; (b)1060 nm; (c)用 1060 nm 整形激光融化氧化锡
 Fig. 31 Near field spot intensity distributions^[37]. (a) 633 nm; (b) 1060 nm; (c) melting indium tin oxide with a 1060 nm shaping laser

所示,可以看出该结构的光纤对于两种波长的单模激光均有较好的匀化整形效果,其在 1060 nm 处的损耗低于 10 dB/km。

2010 年日本学者 Konishi 等^[38]利用矩形芯光纤实现了高斯光束的匀化整形,并研究了不同尺寸的矩形芯光纤以及不同 NA 的矩形芯光纤对光束整形效果的影响。其光纤截面和实验结果如图 32 和图 33 所示,可以看出,无论是 50 μm×50 μm 还是 600 μm×600 μm 的矩形芯光纤都能实现高斯光束的匀化整形。当 NA 与光纤长度相同时,纤芯更大的矩芯光纤的整形能力更好;当纤芯尺寸与 NA 相同时,光纤越长整形效果越好。

2021 年 Yin 等^[39]设计了一种用于光束整形的大芯径双包层光纤,并通过软件模拟验证了该光纤的光束匀化能力。光纤截面和折射率分布如图 34 所示,该光

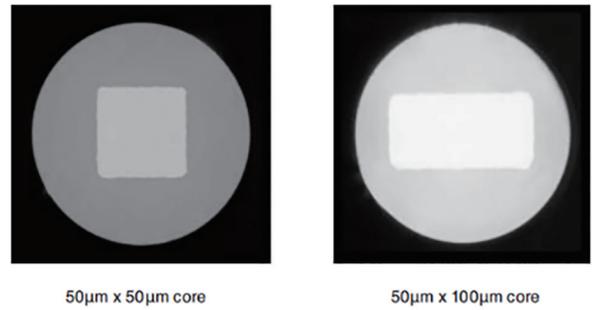


图 32 矩芯光纤横截面^[38]

Fig. 32 Cross section of rectangular core fiber^[38]

纤的纤芯为圆形纤芯,其内包层为高折射率的矩形包层。在高斯光束入射的条件下,光束的匀化效果随匀化光纤长度的增加而优化,最终实现了方形匀化光斑输出。

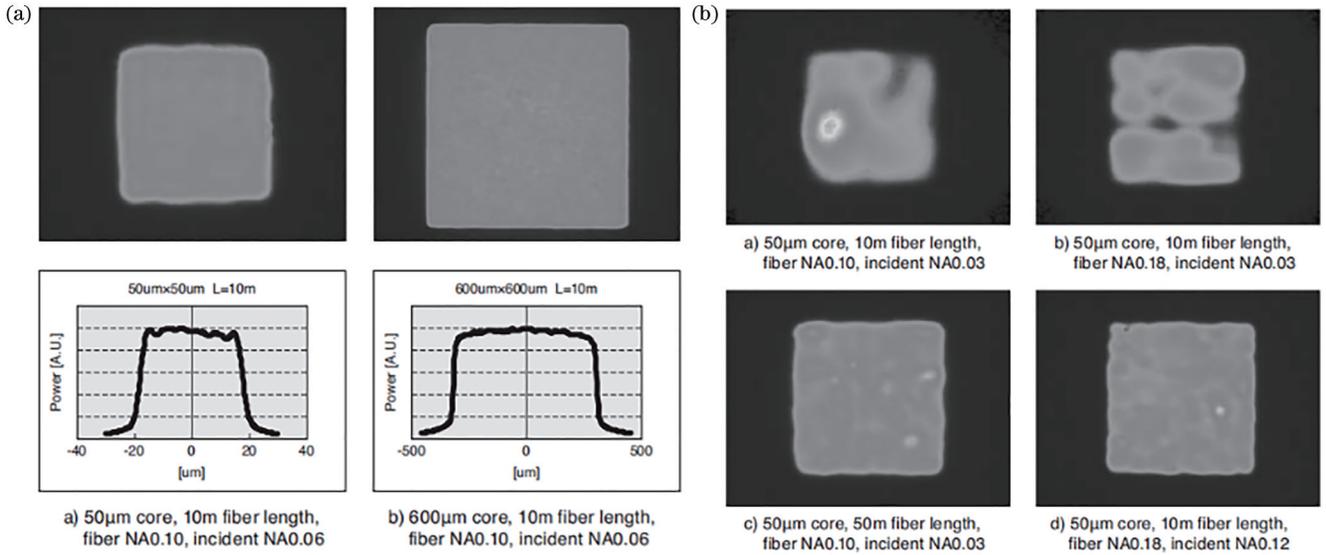


图 33 实验结果^[38]。(a)以多模光束入射时的光斑图像;(b)以高斯光束入射时的光斑图像

Fig. 33 Experimental results^[38]. (a) Spot images when incident with multimode beam; (b) spot images when incident with Gaussian beam

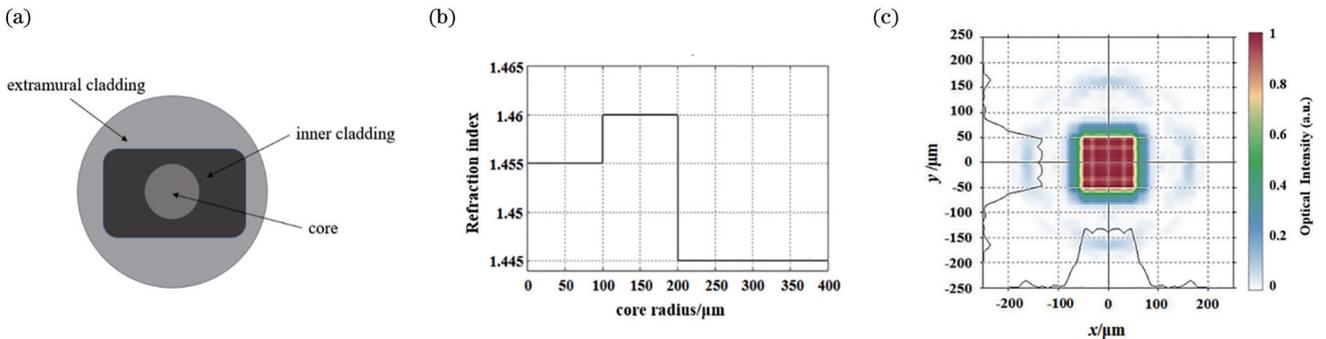


图 34 实验装置与结果^[39]。(a)光纤截面;(b)折射率分布;(c)经过 1 m 匀化光纤后的光斑能量分布

Fig. 34 Experimental setup and results^[39]. (a) Fiber cross section; (b) refractive index distribution; (c) spot energy distribution after 1 m of homogenized fiber

2.2.2 基模与高阶模的非相干叠加

通过基模与非相干的高阶模式的叠加,也能够实

现光束匀化整形。通过两个独立的谐振腔得到的基模与高阶模具有不同的波长或偏振态,使得它们并不具

有相干性,因此可以实现非相干叠加。图 35^[40]模拟了非相干条件下不同比例的基模与二阶模耦合的光斑能量分布,展示了基模与二阶模的相对强度分别为

40%、60%、80%、100%、120%、140% 时的耦合情况,可以看出,二阶模的中心被基模不断填充,并在合适的比例下呈现出平顶光斑。

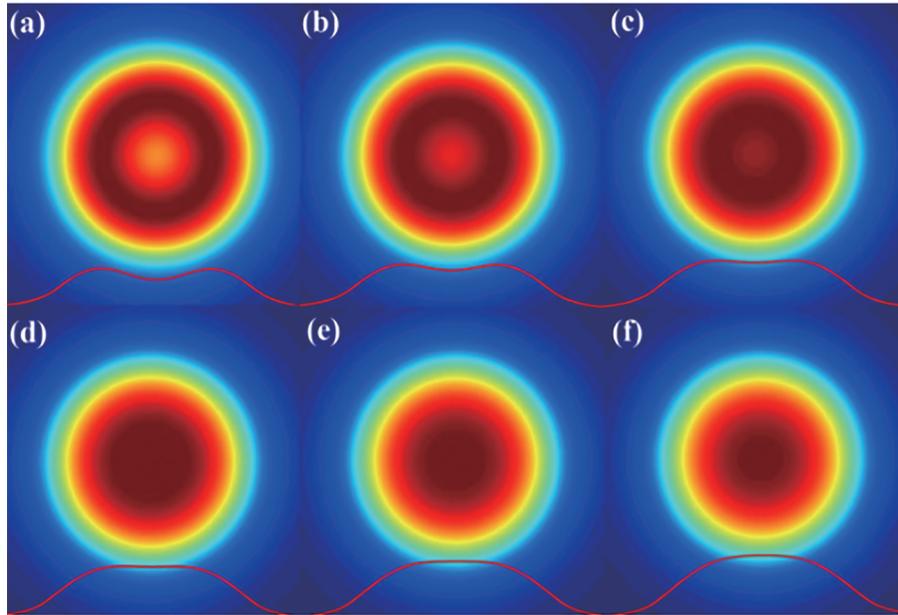


图 35 不同比例的基模与二阶模耦合的光斑能量分布^[40]

Fig. 35 Spot energy distributions of coupled fundamental mode and second-order mode with different ratios^[40]

2018年中国科学技术大学的Xu等^[41]利用基模与二阶模的非相干叠加实现了全光纤结构的光斑匀化整形。其实验原理图如图36所示,该装置先分别通过两个布拉格光栅得到波长为1053.7 nm的高斯型基模以

及波长为1055.4 nm的二阶模(LP₁₁模),之后通过耦合器(OC)以及偏振控制器(PC)来将这两种模式的光束进行耦合,由于这两种模式不满足相干条件所以不会发生干涉,最终实现了激光束的匀化整形。并且由于两种模式的激光在不同的腔内产生,并不存在相干性,所以光斑形状不会随着传播距离的改变而改变(图37)。

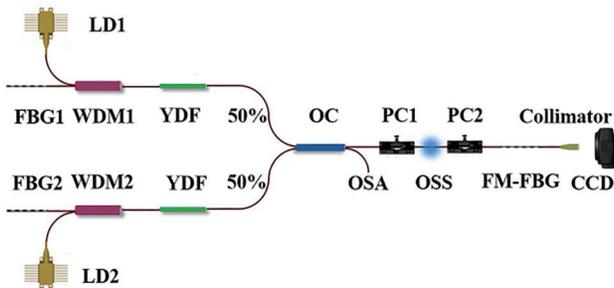


图 36 全光纤结构光束整形装置^[41]

Fig. 36 All-fiber structure beam shaping device^[41]

2022年四川大学的Zhang等^[42]通过将基模与轨道角动量(OAM)非相干叠加首次实现了脉冲光纤激光器结构的光束匀化整形。与文献[41]方法不同的是,文献[42]方法是通过偏振态的不同来创造非相干条件的。其实验装置如图38所示,利用偏振控制器来调整LP₁₁偶数模和LP₁₁奇数模的偏振态最终得到一个能量中空分布的轨道角动量,再将其与LP₀₁模叠加,由于二者的偏振态不同,故不满足干涉条件,最终得到一个平顶光斑,且该光斑形状不会随传播的距离而改变。

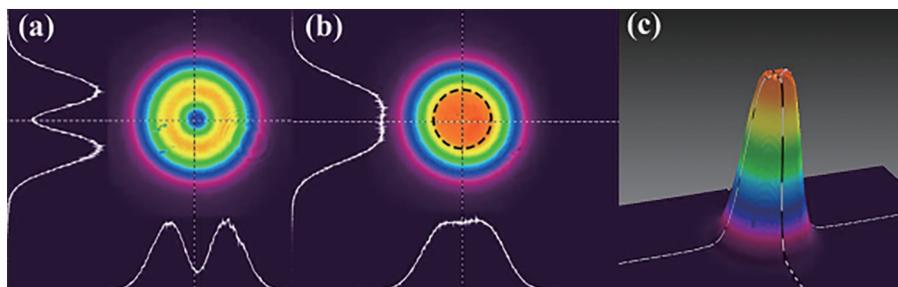


图 37 实验结果^[41]。(a)“甜甜圈”型光斑二维能量分布图;(b)平顶光斑二维能量分布图;(c)平顶光斑三维能量分布图

Fig. 37 Experimental results^[41]. (a) Two-dimensional energy distribution diagram of the “doughnut” light spot; (b) two-dimensional energy distribution diagram of the flat-top light spot; (c) three-dimensional energy distribution diagram of the flat-top light spot

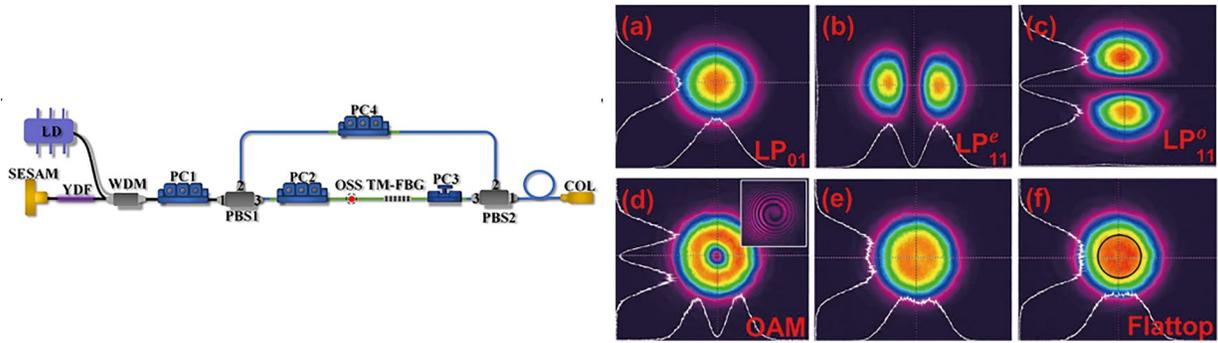


图 38 基模与轨道角动量非相干叠加结构的光束整形实验装置及结果图^[42]

Fig. 38 Experimental setup and result diagram of beam shaping for the incoherent superposition structure of fundamental mode and orbital angular momentum^[42]

2.3 基于全光纤结构的光束匀化整形技术方法对比

表 1 总结了已报道的不同全光纤结构光束匀化整形技术的基本原理。

综合以上对各种光束整形技术方法与研究现状的阐述,可以看出:1)基于多边形纤芯光纤的光束整形技术,能够有效激发高阶模式,且输出光斑呈多边形,整形效果较好,该方法有利于实现高功率激光输出下的光束整形;2)基于长周期光栅的光束整形技术,利用长周期光栅的特点能够有效激发出特定的高阶模式,但由于该整形系统的输出光斑为基模与特定高阶模式模间干涉的结果,所以整形效果与波长、干涉光束的传播距离有关,因此在实际应用情况下需要对这两种因素严格控制,并且该方法能否实现高功率激光下的光束整形取决于光栅器件的损伤阈值;3)基于锥形光纤的光束整形技术,利用光纤中的锥区来激发出一定的高阶模式,该过程取决于锥形光纤的锥度,该方法所输出的光斑是基模与少量高阶模式模间干涉的结果,所以整形效果也和波长、干涉光束的传播距离有关,该方法能否实现高功率激光下的光束整形取决于锥形光纤的

插入损耗以及光纤锥区的泄漏损耗;4)基于光纤端面蚀刻的光束整形技术,该装置虽然简单且不需要引入其他的器件,但是该装置对于蚀刻精度的要求非常高,可控度以及可重复性低,整形效果与光束的传播距离有关,并且对光纤端面的蚀刻影响了光纤端面的损伤阈值,因此不适合高功率激光输出情况下使用;5)基于大芯径多模光纤的光束整形技术,利用大芯径的多模光纤激发大量的高阶模式,该方法的整形效果受光束的传播距离的影响相对较小,且插入损耗较小,可控性以及可重复性好,适合高功率激光输出下的光束整形;6)基于基模与高阶模非相干叠加的光束整形技术,该方法需要较为复杂的结构,且在高功率情况下的应用受到其光纤器件可承受最大功率的限制,其优点在于其基模与高阶模之间无相干性,所以整形效果与光束的传播距离无关;7)基于微结构光纤的光束整形技术,不同于以上的方法,该方法能够获得基模输出,且具有损耗小、整形效果好的优点,但微结构光纤与传统光纤的熔接损耗较大、耦合效率较低,且微结构光纤会带来较大的弯曲损耗。

表 1 不同光纤结构光束匀化整形技术的基本原理总结

Table 1 Summary of basic principles of different beam homogenization and shaping technology with fiber structures

Homogenization and shaping technology	Method	Basic principle
Fundamental mode shaping	High-refractive-index ring-structured core or microstructured fibers	Directly change the energy distribution of the fundamental mode
	Multimode fiber with large core diameter	Promotes the coupling of fundamental mode energy to higher-order modes
	Long period grating	Promotes the coupling of fundamental mode energy to higher-order modes
High-order modes shaping	Tapered fiber	Promotes the coupling of fundamental mode energy to higher-order modes
	Fiber end face etching	Promotes the coupling of fundamental mode energy to higher-order modes
	Incoherent superposition of fundamental and higher-order modes	Increase higher-order mode energy without reducing fundamental mode energy

未来对于光纤结构光束整形的研究将主要着力于以下几点:1)低插入损耗;2)能够和光纤激光器直接且方便地熔接或耦合;3)能够承受高功率激光输出;4)优良的整形效果。从上述总结可以看出,多边形纤芯光纤,大芯径的多模光纤在未来将成为光纤结构光束整形的主流方案,也可以将这几种方法相结合以获得实际所需形状的匀化光斑。另外,除开无源器件,从有源光纤的角度进行研究,通过对有源光纤的掺杂、结构设计,未来也可能会成为光束整形技术发展的一个重要方向。

3 结束语

根据光纤结构光束匀化整形的原理对激光束匀化整形的实现方法进行了归类,包括增加输出激光中的高阶模成分和直接改变基模的能量分布,并对这两种方法进行了较为详细的阐述,分析了这些方法的优劣势,提出了未来光纤结构光束匀化整形向低损耗、容易连接、能够承受高功率输出和优良的整形效果等特点发展的方向。高功率光纤激光器作为工业精细加工的重要手段之一,所输出激光的能量分布对加工效果有着极大的影响。深入研究光纤结构的光束整形技术,制备出既能够承受大功率的激光输出又能实现良好光束整形的整形器件,对于国产高功率光纤激光器的实用化具有重大的意义。

参 考 文 献

- [1] 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: publisher's note[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(21): 5949-5795.
- [2] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(1): 36-39.
- [3] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double clad, offset core Nd fiber laser[C]//*Optical Fiber Sensors 1988*, January 27, 1988, New Orleans, Louisiana, USA. Washington, D.C.: OSA, 1988: PD5.
- [4] Shcherbakov E, Fomin V, Abramov A, et al. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser[C]//*Advanced Solid State Lasers 2013*, October 27-November 1, 2013, Paris, France. Washington, D.C.: OSA, 2013: ATh4A.2.
- [5] Zhang Z L, Xing Y B, Li J Y. A novel low-NA confined-doped long-tapered fiber for high output power fiber amplifier[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12169: 2592-2596.
- [6] 宋家鑫, 任帅, 王广建, 等. 国产锥形光纤实现 4.2 kW 近单模窄线宽激光[J]. *中国激光*, 2022, 49(8): 0816002. Song J X, Ren S, Wang G J, et al. Realization of 4.2 kW near-single mode narrow linewidth laser by domestic tapered fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(8): 0816002.
- [7] Ye Y, Lin X F, Yang B L, et al. Tapered Yb-doped fiber enabled a 4 kW near-single-mode monolithic fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(9): 2162-2165.
- [8] Kalyoncu S K, Mete B, Yenay A. Diode-pumped triple-clad fiber MOPA with an output power scaling up to 467 kW[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1870-1873.
- [9] 李睿. 光束整形及其在飞秒激光微加工领域的应用研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2015. Li R. Laser beam shaping and using it in the femtosecond laser micromachining[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [10] 陈凯. 高斯光束整形为平顶光束整形系统的研究与设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2011. Chen K. The research and design of the system that converting a gaussian to a flattop beam[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
- [11] Valentin C, Gouriou P, Scol F, et al. First realization of a birefringent flat-top single-mode fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9886: 988615.
- [12] Zhao C J, Peng R W, Tang Z X, et al. Design and analysis of a kind of large flattened mode optical fibre[J]. *Chinese Physics*, 2006, 15(8): 1838-1842.
- [13] Jollivet C, Farley K, Conroy M, et al. Novel beam delivery fibers for delivering flat-top beams with controlled BPP for high power CW and pulsed laser applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 97283D.
- [14] Ghatak A K, Goyal I C, Jindal R. Design of a waveguide refractive index profile to obtain a flat modal field[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3666: 40-44.
- [15] Dawson J W, Beach R, Jovanovic I, et al. Large flattened-mode optical fiber for reduction of nonlinear effects in optical fiber lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5335: 132-139.
- [16] Zhou Q L, Lu X Q, Qiu J R, et al. Beam-shaping microstructure optical fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(12): 686-688.
- [17] Wang C C, Zhang F, Lu Y C, et al. Photonic crystal fiber with a flattened fundamental mode for the fiber lasers[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(11): 2232-2235.
- [18] Valentin C, Quiquempois Y, Bouwmans G, et al. Flattened fundamental mode in microstructured fibers: design, realization and characterization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8426: 84260J.
- [19] Kong F T, Gu G C, Hawkins T W, et al. Flat-top mode from a 50 μm -core Yb-doped leakage channel fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 32371-32376.
- [20] Zhu X, Schülzgen A, Li H, et al. Detailed investigation of self-imaging in large-core multimode optical fibers for application in fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 16632-16645.
- [21] Zhu X, Schülzgen A, Li H, et al. Coherent beam transformations using multimode waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 7506-7520.
- [22] Farley K, Conroy M, Wang C H, et al. Optical fiber designs for beam shaping[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8961: 89612U.
- [23] 陈寒, 邹淑珍, 于海娟, 等. 单模激光在多模光纤中的传输实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4):

040602.
Chen H, Zou S Z, Yu H J, et al. Experimental study of the transmission in multimode fiber with a single mode laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 040602.
- [24] Jollivet C, Farley K, Conroy M, et al. Specialty flat-top beam delivery fibers with controlled beam parameter product[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9727: 97270T.
- [25] 沈华, 朱日宏, 卞殷旭. 光纤光栅在高功率连续光纤激光器中的发展及展望[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(2): 20210908.
Shen H, Zhu R H, Bian Y X. Development and prospect of fiber grating in high-power continuous fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 20210908.
- [26] 赵馨艺. 少模光纤长周期光栅模式耦合及其特性研究[D]. 上海: 上海大学, 2021.
Zhao X Y. Mode coupling and characteristics of long-period fiber gratings inscribed in few-mode optical fiber [D]. Shanghai: Shanghai University, 2021.
- [27] Gu X J, Mohammed W, Qian L, et al. All-fiber laser beam shaping using a long-period grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(13): 1130-1132.
- [28] Mohammed W, Gu X J. Long-period grating and its application in laser beam shaping in the 1.0 μm wavelength region[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(12): 2249-2254.
- [29] Chen X H, Li X J, Yi D, et al. Plasmonic tapered-fiber interference sensor for simultaneously detecting refractive index and temperature[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(24): 6071-6074.
- [30] Tian Z B, Yam S S H. In-line abrupt taper optical fiber Mach-Zehnder interferometric strain sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(3): 161-163.
- [31] Lin W H, Zhao F, Shao L Y, et al. Temperature sensor based on Er-doped cascaded-peanut taper structure In-line interferometer in fiber ring laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(19): 21594-21599.
- [32] Tian Z B, Nix M, Yam S S H. Laser beam shaping using a single-mode fiber abrupt taper[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(3): 229-231.
- [33] Liu K, Yang Y F, Chen X L, et al. All-fiberized top-hat beam shaper by mode content control and multimode interference suppression[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(3): 238-241.
- [34] Mayeh M, Farahi F. Tailoring Gaussian laser beam shape through controlled etching of single-mode and multimode fibers: simulation and experimental studies[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(1): 168-173.
- [35] Rechtman L, Marom D M, Stone J S, et al. Mode characterization of rectangular core fiber[C]//2017 IEEE Photonics Conference, October 1-5, 2017, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2017: 43-44.
- [36] Matsuura Y, Akiyama D, Miyagi M. Beam homogenizer for hollow-fiber delivery system of excimer laser light[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(18): 3505-3508.
- [37] Haynes J R, Baggett J C, Monro T M, et al. Square core jacketed air-clad fiber[C]//2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 5-10, 2006, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006: 4-6.
- [38] Konishi K, Kanie T, Takahashi K, et al. Development of rectangular core optical fiber cable for high power laser [J]. *SEI Technical Review*, 2010 (71): 109-112.
- [39] Yin J J, Bao J Q, Tong Y L, et al. Research on rectangular flat-topped beam based on double-cladding fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 12073: 1207306.
- [40] 徐昌龙. 平顶光束输出的全光纤激光器研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
Xu C L. Research on all-fiber laser with flattop beam output[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [41] Xu C L, Yan K, Gu C, et al. All-fiber laser with flattop beam output using a few-mode fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1247-1250.
- [42] Zhang Z C, Wang S, Hu X W, et al. All-fiber passively Q-switched laser with flat-top beam emissions[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(3): 521-524.