

激光与光电子学进展

渐变折射率多模光纤产生可见光超连续谱研究进展

李敬岁¹, 李博¹, 张丹^{1,2,3}, 陈胜平^{1,2,3*}, 许晓军^{1,2,3}¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073;³脉冲功率激光技术国家重点实验, 湖南 长沙 410073

摘要 渐变折射率多模光纤中存在几何参量不稳定性等时空非线性效应,在一定条件下会使传输激光的光谱逐渐展宽,最终演化为超连续谱。本文介绍了几何参量不稳定性的概念、物理内涵以及利用渐变折射率多模光纤获得可见光超连续谱的研究现状,分析了光纤参数、脉冲参数对输出光谱的影响,提出实现全光纤结构以及采用短波长激光作为泵浦源是今后研究的重点方向。利用几何参量不稳定性产生可见光超连续谱有望突破传统光子晶体光纤产生可见光超连续谱方案因纤芯过小造成的功率限制。

关键词 光纤光学; 可见光超连续谱; 渐变折射率多模光纤; 空间自成像; 几何参量不稳定性

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223336

Research Advances of Visible Supercontinuum Generation in Graded-Index Multimode Fibers

Li Jingsui¹, Li Bo¹, Zhang Dan^{1,2,3}, Chen Shengping^{1,2,3*}, Xu Xiaojun^{1,2,3}¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;²Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;³State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract Typically, graded-index multimode fibers feature certain spatiotemporal nonlinear effects such as geometric parametric instability (GPI), which gradually expands the spectrum of transmitted laser light under certain conditions and eventually evolves into a supercontinuum. This paper introduces the concept of GPI and its physical connotations; moreover, the status of research on GPI-induced visible supercontinuum generation in graded-index multimode fibers is reviewed, and an analysis on the influence of fiber and pulse parameters on the output spectrum is presented. In addition to this, realizing an all-fiber structure and using short wavelength lasers as pump sources constitute key future research directions. Overall, the GPI-induced generation of the visible supercontinuum is expected to break through the power limitation of the supercontinuum generated by small core traditional photonic crystal fibers.

Key words fiber optics; visible supercontinuum; graded-index multimode fibers; spatial self-imaging; geometric parametric instability

1 引言

多模光纤的出现要早于单模光纤,其在 20 世纪 70 年代就得到了应用,但是由于支持大量传输模式,较大的模间色散使其在光纤通信领域逐渐被单模光纤取代,关于光纤内脉冲传输的研究也主要集中在单模光纤。不过随着物联网和数字地球技术的发展,通信容

量需求剧增,单模光纤难以满足要求,而多模光纤中的空分复用技术可以极大提高光纤通信系统的传输容量,近年来多模光纤再次吸引了科研人员的兴趣,其多模特性也成了无可替代的优势。同时,在激光领域,较大的纤芯尺寸为获得超高功率激光输出提供了载体,而且其内部丰富的时空非线性效应不仅为研究时空动力学过程提供了物理平台,也为波长扩展^[1-6]、光束整

收稿日期: 2022-12-15; 修回日期: 2023-01-05; 录用日期: 2023-01-10; 网络首发日期: 2023-01-20

通信作者: *chespn@163.com

形^[7-12]、时空锁模^[13-16]等提供了新方案。

折射率呈抛物线型分布的渐变折射率多模光纤会产生光束空间自成像效应,即入射光场会周期性地再现其初始的场分布。在空间自成像、色散和非线性效应的作用下,大量模式之间进行能量的非线性耦合,因此会产生几何参量不稳定性(GPI)^[7, 17-19]、克尔光束自清洁^[9-10, 12, 20-21]、时空多模孤子^[22-26]等独特的时空非线性效应。GPI效应可以产生新的频率分量,为获得可见光超连续谱提供了一种新的物理途径。当峰值功率足够强的近红外激光脉冲注入到渐变折射率多模光纤时,在 GPI 效应作用下会产生一系列分立的可见光谱边带,并在多模四波混频^[27-29]和受激拉曼散射^[3, 28, 30-31]等非线性效应的共同作用下使光谱逐渐变得平坦,最终演化成为可见光超连续谱,同时该过程往往伴随着克尔光束自清洁,能量逐渐向低阶模式转移,因而可以在获得高功率可见光超连续谱的同时又能保持较好的光束质量。

当前产生可见光超连续谱的主流方案为 1 μm 脉冲激光泵浦专门设计色散曲线的光子晶体光纤(PCF),光纤的色散特性对输出光谱具有重要影响,在反常色散区,超连续谱在受激拉曼散射、孤子自频移和色散波等非线性效应的共同作用下产生。在正常色散区,自相位调制和群速度色散是导致光谱展宽的主要因素,通常泵浦激光的中心波长位于零色散点附近时更有利于超连续谱的展宽。光子晶体光纤产生超连续谱的方案在功率的提升方面存在不足,为了使光子晶体光纤的零色散点更接近于 1 μm,设计时其纤芯应尽可能小,然而小纤芯的光纤却不能承受过高的功率以及脉冲能量,并且 PCF 的设计、加工以及和常规光纤的熔接较为复杂,不利于实现商业化。利用渐变折射率多模光纤多模时空非线性效应产生可见光超连续谱可以解决上述问题。首先渐变折射率多模光纤模场面积大,可以承受极高的功率,有望突破单路超连续谱的输出功率极限。其次典型的渐变折射率多模光纤的色散曲线与单模光纤一样都是由材料色散决定的,零色散点一般在 1.3 μm 附近,在正常色散或反常色散区不仅存在受激拉曼散射、自相位调制、孤子自频移、色散波等非线性过程,还存在 GPI 效应等多模时空非线性效应,该效应是渐变折射率光纤中产生可见光成分的重要物理过程,当泵浦激光的峰值功率足够高时,不需要专门考虑光纤的零色散点也可以产生可见光成分,因而不用像光子晶体光纤那样专门去针对色散曲线设计加工,大大降低了难度和成本。

2016 年, Krupa 等^[7]提出并解释了渐变折射率多模光纤中的 GPI 效应,利用其产生了一系列可见光边带,证明了利用渐变折射率多模光纤获得可见光的可行性;同年, Lopez 等^[4]通过高功率脉冲激光泵浦渐变折射率多模光纤获得了光谱覆盖 450~2500 nm

的超连续谱。如何更有效地利用渐变折射率多模光纤获得可见光吸引着研究人员的兴趣, Krupa 等^[32]和 Lopez 等^[4]都研究了光纤长度和脉冲峰值功率对输出光谱的影响; Krupa 等^[33]还研究了渐变折射率多模光纤的折射率分布对输出光谱的影响; Eftekhar 等^[34]研究了激光以不同方式空间耦合到渐变折射率多模光纤对输出光谱的影响。在全光纤结构方面, 2022 年, Zhang 等^[35]对脉冲光纤激光器进行功率放大,然后在其后熔接 20 m 长的渐变折射率多模光纤,实现了利用渐变折射率多模光纤产生瓦量级的平坦超连续谱,随后的工作中他们又将输出功率提高到了 30 W^[36]。渐变折射率多模光纤在获得高功率输出方面的潜力是巨大的,相信利用其获得百瓦量级超连续谱也将很快能得以实现。

2 渐变折射率多模光纤中几何参量不稳定性

常见的多模光纤折射率分布有阶跃型和抛物线型,抛物线型渐变折射率多模光纤从纤芯到包层的折射率分布函数为

$$n^2(x, y) = n_{co}^2 [1 - 2\Delta(r/\rho)^2], \quad (1)$$

式中: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; ρ 为纤芯半径; $\Delta = (n_{co}^2 - n_{cl}^2)/2n_{co}^2$ 为光纤相对折射率差; n_{co} 为最大纤芯折射率; n_{cl} 为包层折射率。

研究脉冲在单模光纤中传输时,一般只考虑时间效应,光场的空间分布随着传输而保持恒定。但是在渐变折射率多模光纤中,由于其模场面积大,可以支持成百上千种模式^[37],在交叉相位调制、四波混频和拉曼散射等非线性效应的作用下,每种模式都会受到其他模式的影响,大量的模式在传输的同时存在能量的非线性耦合,需要同时从时间和空间的角度来考虑。渐变折射率多模光纤内所有模式在特定波长下可以几乎相同的群速度传播,入射的泵浦光会激发出大量的横模,不同的横模之间存在时空能量耦合,导致光束空间自成像,即任何模场分布的光在渐变折射率多模光纤纵向传播时都会周期性地再现初始光场分布。图 1 给

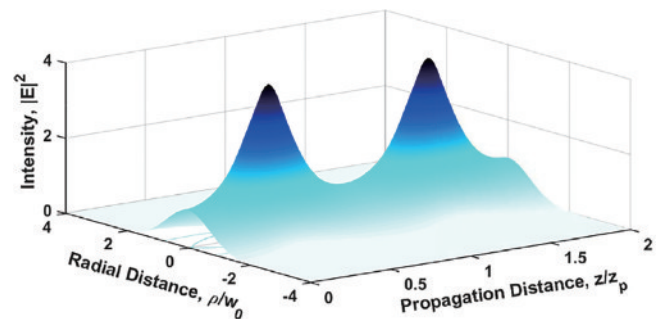


图 1 高斯光束在渐变折射率多模光纤内传输的空间自成像^[39]
Fig. 1 Spatial self-imaging of Gaussian beams propagating in graded-index multimode fibers^[39]

出了高斯光束在渐变折射率多模光纤内两个自成像周期的光强演化。

GPI 是一种独特的调制不稳定效应,由于其与光纤的几何特性(抛物线型折射率分布)有关,因此被称为几何参量不稳定性^[38]。周期性的光束空间自成像导致光纤纤芯折射率在纵向上形成了周期性强度调制,这种强度调制可以等效看作光栅,在等效光栅作用下泵浦激光能量发生时空耦合,最终在长波和短波方向产生一系列光谱边带。GPI 是一种时空非线性效应,不同于单模光纤中仅限于反常色散区域的纯时间效应的传统调制不稳定性,其在正常色散和反常色散区域都可以发生^[39],沿渐变折射率多模光纤振荡的高斯光束无论在光纤的正常色散区还是反常色散区传播,都可能因小扰动变得不稳定,产生新的频率分量^[39],对正常色散区域的泵浦脉冲,非线性折射率光栅在可见光和近红外区域产生一系列准相位匹配四波混频边带^[7];对反常色散区域的飞秒多模孤子,周期性的非线性折射率光栅导致了一系列色散波边带的产生^[22]。

GPI 来源于大量模式之间的时空耦合,抛物线型渐变折射率多模光纤内大量模式在传输方向上自成像周期为

$$\xi = \pi\rho/\sqrt{2\Delta}。 \quad (2)$$

通过 GPI 产生的斯托克斯边带的波矢 k_s 和反斯托克斯边带波矢 k_A 与泵浦光波矢 k_p 应满足以下准相位匹配条件:

$$2k_p - k_s - k_A = -2\pi h/\xi, \quad (3)$$

式中 h 取整数,代表产生 GPI 边带的阶数。如果只考虑在泵浦波长处的群速度色散 κ'' ,则产生的频率偏移量 f_h 可以通过下式计算:

$$(2\pi f_h)^2 = 2\pi h/(\xi\kappa'') - 2n_2\hat{I}\omega_0/(c\kappa''), \quad (4)$$

式中: n_2 为非线性折射率; ω_0 为泵浦光角频率; \hat{I} 为平均光强; c 为真空中的光速。简单起见,可以忽略等号右边第二项,简化为

$$f_h \approx \pm\sqrt{h} f_m = \pm\sqrt{h/2\pi(\xi\kappa'')}。 \quad (5)$$

通过式(5)可以快速估算出 GPI 边带位置,可以看出 GPI 边带产生的位置与渐变折射率多模光纤的纤芯尺寸、数值孔径、色散系数等参数有关,这将会在下一节详细介绍。正常色散和反常色散区域产生的频率边带都满足准相位匹配条件,因此边带的位置都可以通过式(5)计算,其中在正常色散区 h 取正整数,反常色散区 h 取负整数。

渐变折射率多模光纤中 GPI 效应以及多模时空非线性耦合可以用广义(3+1) D 非线性薛定谔方程(GNLSE)来描述^[1, 7, 24, 40],其可以通过分步傅里叶法^[41]求解:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i\frac{1}{2k_0}\nabla_{\perp}^2 A + i\frac{\kappa''}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\frac{k_0\Delta}{\rho^2}r^2 A = i\gamma|A|^2 A, \quad (6)$$

式中: A 为电场包络; k_0 为光在介质中的传播矢量; z 为光纵向传播距离; γ 为光纤非线性系数; κ'' 为群速度色散。Krupa 等^[7]通过式(6)模拟了峰值功率 125 kW 的激光在渐变折射率多模光纤内光谱随传输距离的演化,结果如图 2(a)所示,在传输一段距离后,可见光波段和中红外波段同时产生了新的光谱边带,并且二者与泵浦光的频率失谐量相等。随着传输距离的增大,新频率边带的宽度在其他各种非线性效应的作用下逐渐展宽,图 2(b)分别给出了 0.12 m 和 0.22 m 处的光谱。并且他们在随后的实验中取得了与仿真一致的结果。

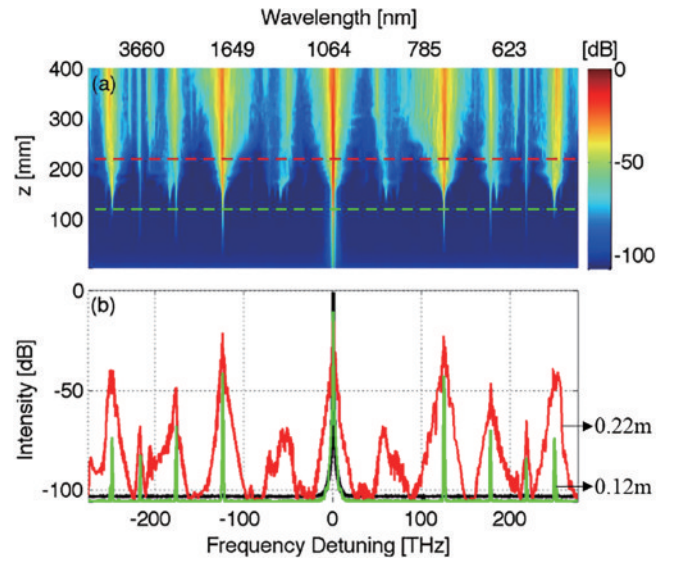


图 2 激光在渐变折射率多模光纤中的光谱演化数值仿真^[7]。(a) 光谱演化与传输距离的关系; (b) 泵浦光传输 0.12 m 和 0.22 m 后的光谱

Fig. 2 Numerical simulation of spectrum evolution of laser in graded-index multimode fibers^[7]. (a) Relationship between spectrum evolution and transmission distance; (b) output spectrum of pump light after 0.12 m and 0.22 m transmission

3 渐变折射率多模光纤产生可见光研究进展

3.1 渐变折射率多模光纤产生可见光边带及可见光超连续谱

渐变折射率多模光纤中超连续谱的产生是各种非线性效应共同作用的结果,如 GPI、受激拉曼散射、四波混频、色散波等,其中 GPI 在产生可见光分量的过程中扮演着重要角色。关于激光在渐变折射率多模光纤内传输的时空动力学研究尽管起步较晚,但是近些年却吸引了研究人员的极大兴趣,相关的研究工作也取得了一系列成果。

2015年, Wright等^[22]将200 nJ、500 fs、1550 nm的激光注入到一段渐变折射率多模光纤中, 意想不到地产生了一系列如图3(a)所示的732、652、516 nm等分

立的可见光波段光谱边带, 数值仿真图3(b)同样证明了光谱边带的存在。在随后的工作中他们将其来源解释为多模孤子时空振荡产生的色散波^[42]。

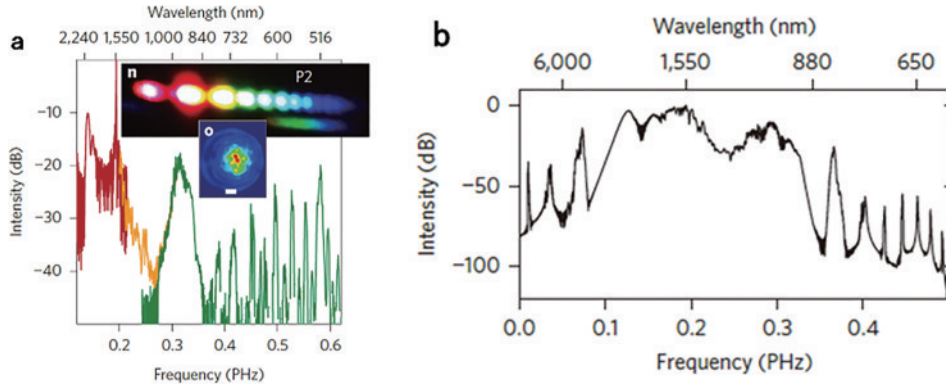


图3 1550 nm激光在渐变折射率多模光纤产生红移和蓝移光谱尖峰^[22]。(a)仿真结果;(b)实验结果

Fig. 3 Red-shifted and blue-shifted spectral peaks generated in graded-index multimode fibers with 1550 nm laser^[22]. (a) Experimental results; (b) simulation results

2016年, Krupa等^[7]将渐变折射率光纤内产生可见光边带的物理机制解释为GPI效应。他们将峰值功率为50 kW、中心波长为1064 nm的激光耦合进长度为6 m、纤芯直径为52.1 μm的渐变折射率多模光纤中, 得到了波长在450~730 nm范围内的一系列光谱边带。通过广义非线性薛定谔方程对光谱的演化进行了数值仿真, 仿真结果和实验结果如图4所示, 实验测量的光谱边带的位置与仿真结果完美匹配。此外他们还对光束质量进行了测量, 发现随着泵浦光峰值功率的提高, 光束质量逐渐得到改善, 光谱展宽的同时伴随着光束自清洁, 光斑在空间上呈现钟形, 但毕竟光纤内部支持大量传输模式, 其输出光斑形状虽然有一定程度的优化, 但光束质量仍比不上单模光纤。

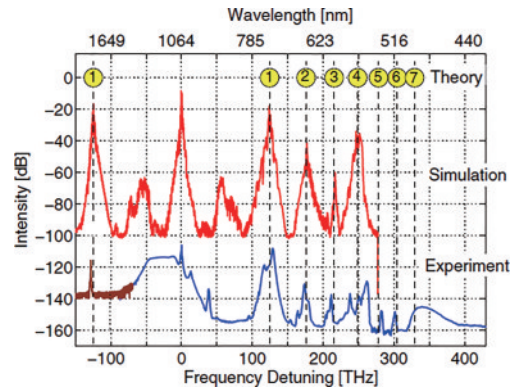


图4 渐变折射率多模光纤中产生GPI边带的仿真结果(上面的实线)、实验结果(下面的实线)与计算结果(虚线)^[7]

Fig. 4 Simulation (upper solid line), experimental (lower solid line), and calculated (dotted line) results of GPI sideband generated in graded-index multimode fibers^[7]

2016年, Lopez等^[4]采用图5(a)所示结构, 微芯片调Q激光器可以产生峰值功率高达185 kW的1064 nm激光, 以85%的空间耦合效率注入到长度为28.5 m、纤芯直径为50 μm的低差模群延迟折射率渐变光纤中, 最终在GPI效应、四波混频等多种复杂非线性效应的作

用下, 获得了如图5(b)所示的超连续谱, 光谱覆盖450~2500 nm, 具有良好的光谱平坦度。

2016年, Krupa等^[32]通过皮秒脉冲泵浦渐变折射

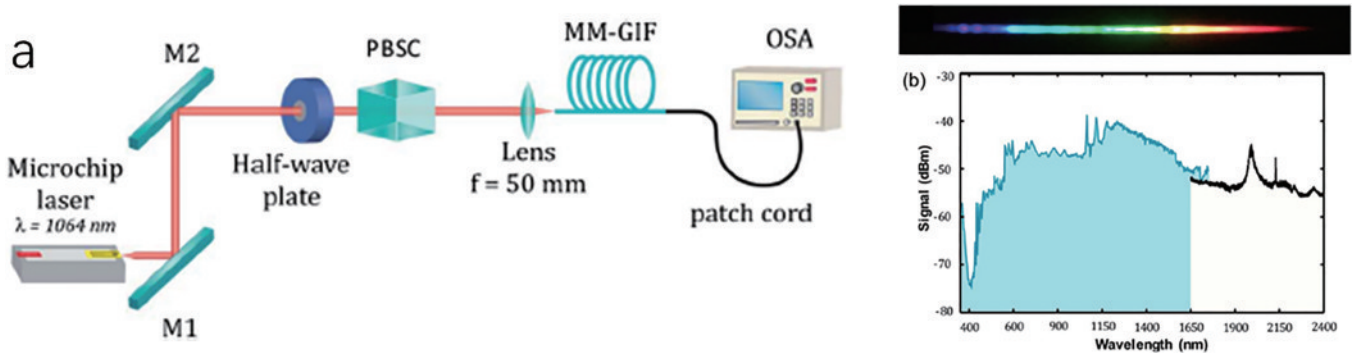


图5 185 kW峰值功率激光在28.5 m渐变折射率多模光纤内产生超连续谱^[4]。(a)实验装置图;(b)输出光谱

Fig. 5 Supercontinuum generation in 28.5 m graded-index multimode fiber with 185 kW peak power laser^[4]. (a) Experimental structure; (b) output spectrum

率多模光纤,获得了可见光至中红外范围的超连续谱。以微芯片 1064 nm Nd:YAG 激光器作为泵浦源,其平均功率为 1.4 W,峰值功率为 51.8 kW,通过透镜将其聚焦并空间耦合进纤芯直径为 52 μm 、长度为 12 m 的渐变折射率多模光纤中,最终输出功率为 827 mW,光谱包含可见光至中红外,如图 6 所示,在可见光区域可以明显观察到由 GPI 效应产生的光谱边带。

利用渐变折射率多模光纤产生可见光的泵浦源通

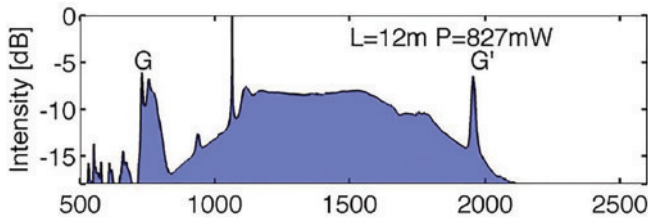


图 6 51.8 kW 峰值功率激光在 12 m 渐变折射率多模光纤内产生超连续谱^[32]

Fig. 6 Supercontinuum generation in 12 m graded-index multimode fiber with 51.8 kW peak power laser^[32]

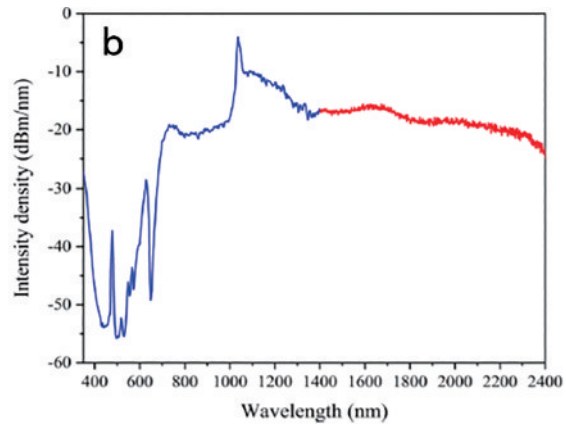
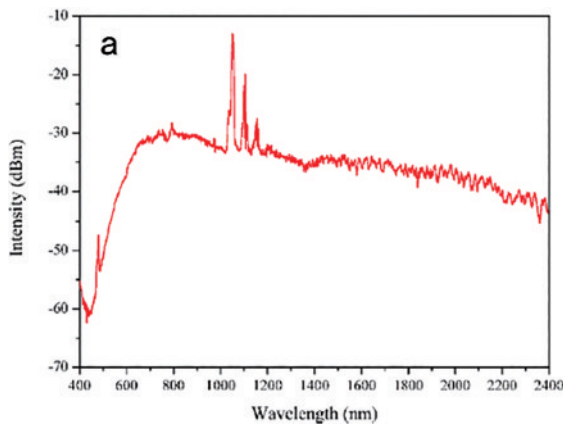


图 7 全光纤结构的渐变折射率多模光纤产生超连续谱^[35-36]

Fig. 7 Generation of supercontinuum in graded-index multimode fiber with all-fiber structure^[35-36]

渐变折射率多模光纤产生可见光超连续谱的研究现状总结在表 1 中。从中可以看出,利用渐变折射率光纤的 GPI 效应可以有效产生可见光成分,其短波边也可以扩展到 350 nm,但是如果想要获得光谱平坦度较好的超连续谱输出,需要泵浦光具有很高的峰值功

率,一般需要超过百千瓦,并且光纤的长度和纤芯尺寸也要合理选择。空间耦合结构复杂,抗干扰能力差,耦合过程中存在损耗,全光纤结构是更好的方案,研究高功率光纤激光器并用其作为泵浦源将是发展的重点方向。

表 1 渐变折射率多模光纤产生可见光的研究成果

Table 1 Research results of visible light generation in graded-index multimode fibers

Year	Reference	Peak power and wavelength of input pulsed laser	Length and core size of multimode fiber	Structure	Shortest wavelength
2015	[22]	1550 nm	1 m	Spatial structure	516 nm
2016	[7]	50 kW, 1064 nm	6 m, 52.1 μm	Spatial structure	450 nm
2016	[4]	185 kW, 1064 nm	28.5 m, 50 μm	Spatial structure	450 nm
2016	[32]	51.8 kW, 1064 nm	12 m, 52 μm	Spatial structure	500 nm
2022	[35]	180 kW, 1053 nm	20 m, 50 μm	All-fiber structure	450 nm
2023	[36]	260 kW, 1053 nm	5 m, four-mode graded-index fiber	All-fiber structure	350 nm

3.2 渐变折射率多模光纤产生可见光的影响因素分析

渐变折射率多模光纤和泵浦激光的许多参数都会影响可见光光谱边带的形成与演化,为了获得更短波长、更平滑的光谱,研究人员做了一系列的探索。

泵浦激光的峰值功率和渐变折射率光纤的长度都会影响输出光谱。泵浦激光峰值功率越高、光纤长度越长,可以获得更平滑的可见光光谱。2016年,Lopez等^[4]对此问题展开了研究,实验输出光谱如图8所示,其中左侧光纤长度为6 m,右侧光纤长度为11 m,可以

看出,光纤较长时输出光谱分立边带之间的凹陷得到了填充。逐步提高峰值功率,达到28 kW时由于受激拉曼散射和自相位调制在基频光附近产生了新的频率成分,达到85 kW时在GPI效应的作用下光谱中产生了一系列远离基频光的频率分量。进一步增加泵浦功率时,分离的光谱边带会在自相位调制、四波混频和受激拉曼散射作用下相连接,最终形成超连续谱。实验结果说明,较长的光纤长度有利于输出光谱变得更平滑,此外泵浦脉冲的峰值功率越高越有利于光谱的扩展。

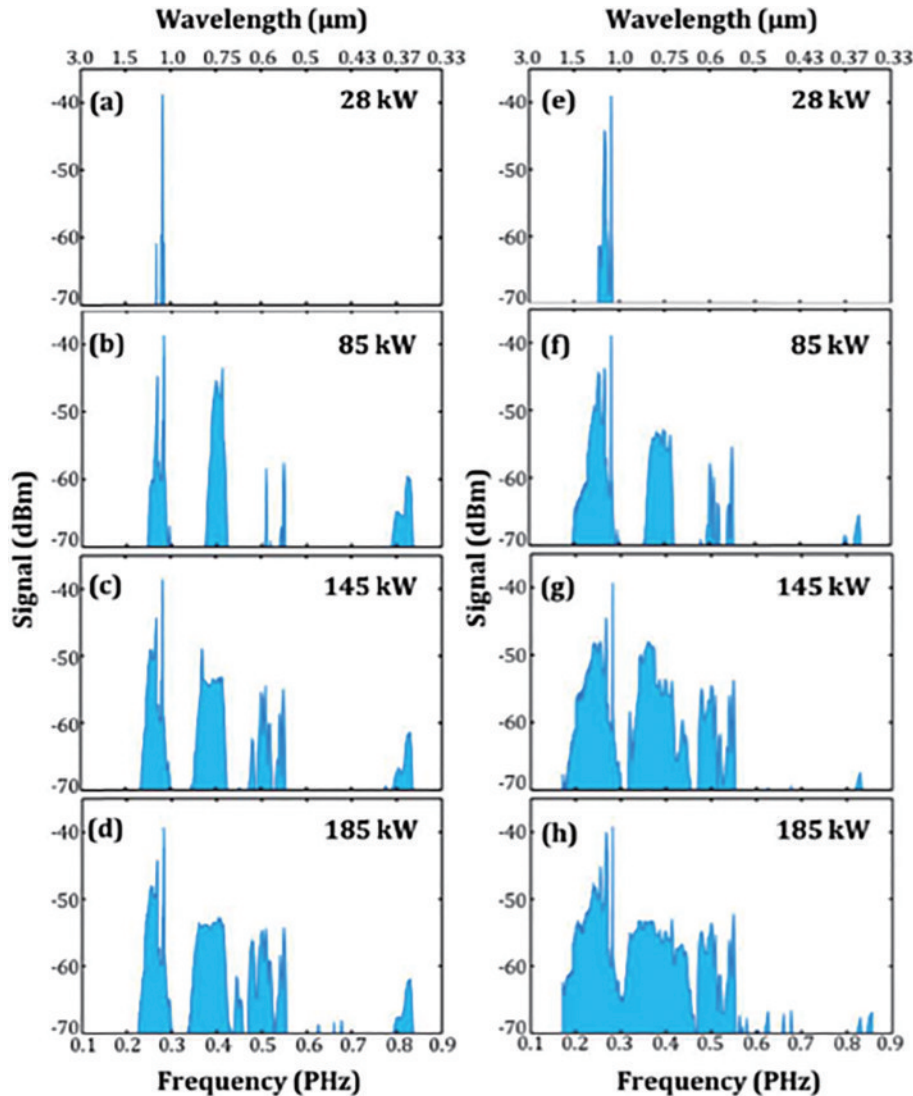


图8 激光峰值功率和渐变折射率光纤长度对输出光谱的影响(左侧和右侧光纤长度分别为6 m和11 m)^[4]

Fig. 8 Effects of laser peak powers and graded-index fiber lengths on output spectra (lengths of fibers on left and right are 6 m and 11 m, respectively)^[4]

2016年,Krupa等^[32]同样研究了泵浦光的峰值功率和渐变折射率多模光纤长度对光谱演化的影响。他们先研究了入射激光的峰值功率对产生光谱的影响,在渐变折射率多模光纤长度为12 m情况下不同峰值功率脉冲最终输出的光谱如图9(a)所示,可以看出,当泵浦峰值功率达到25 kW时,产生了500 nm附近光

谱成分,泵浦峰值功率达到35 kW时700 nm以上的光谱呈现出较好的平坦度,随着泵浦光峰值功率提高,可见光成分逐渐增强。为了探索脉冲在渐变折射率多模光纤内传输时的光谱展宽的动力学过程,他们通过截断法研究了不同光纤长度对光谱演化的影响,此时泵浦光的峰值功率为51.8 kW,最终输出光谱如图9(b)

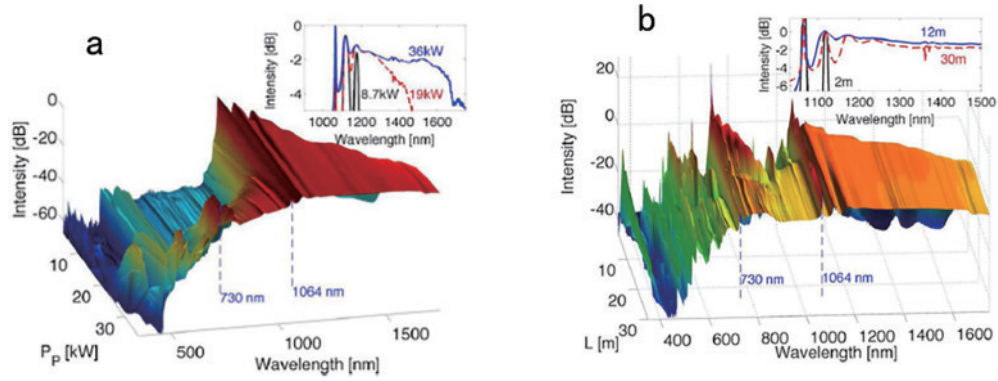


图 9 不同激光峰值功率和渐变折射率多模光纤长度下输出光谱的实验结果^[32]。(a)不同激光峰值功率时的输出光谱;(b)不同渐变折射率多模光纤长度时的输出光谱

Fig. 9 Experimental results of output spectra with different laser peak powers and graded-index multimode fiber lengths^[32]. (a) Output spectra with different laser peak powers; (b) output spectra with different graded-index multimode fiber lengths

所示,分析可知在传输的前 1 m 产生了 730 nm 的 GPI 边带,在 1.5 m 后受激拉曼效应开始发挥作用,导致光谱逐渐向红外方向延伸,由此产生的泵浦损耗反过来降低了 GPI 边带的高度,长度大于 3 m 后,在交叉相位调制和拉曼效应作用下 730~1000 nm 之间的光谱逐渐填充。上述结果说明,想要获得可见光占比更高的平滑超连续谱,选择合适的光纤长度十分重要,光纤长度太短时光谱平坦度较差,光纤长度太长时又会抑制短波分量的产生。

泵浦光以不同的方式注入到渐变折射率多模光纤也会影响光谱的演化。2017 年, Eftekhar 等^[34]从理论和实验上对该问题进行了研究。他们通过广义单向脉冲传播算子方程模拟了泵浦光以共轴(正入射到纤芯

中心)和离轴(正入射到偏离纤芯中心 10 μm 处)的方式入射并在渐变折射率多模光纤内传输 20 cm 后的输出光谱情况。仿真结果如图 10(a)所示,其中共轴注入输出光谱在短波方向产生了更多的分量并且光谱也更平滑;离轴注入输出光谱可以明显观察到分立的 GPI 边带。产生上述结果与两种入射方式在渐变折射率多模光纤内部激发的模式有关。共轴入射激发的模式更集中于基模,产生更为强烈的多模孤子,光传输的同时经历更强的拉曼自频移,色散波逐渐向短波漂移,并在四波混频等效应的共同作用下产生了平坦的光谱。离轴入射的光拉曼自频移较弱,光谱凹陷得不到有效的填充。实验结果如图 10(b)所示,很好地验证了上述结论,并且共轴激发条件下输出光斑质量更好。

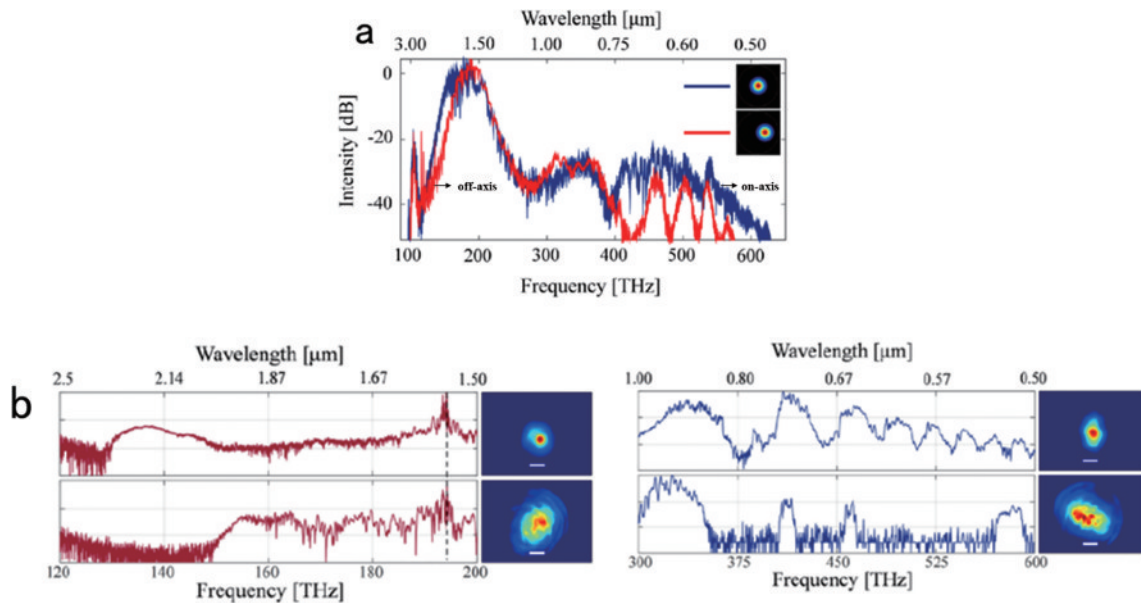


图 10 1550 nm 激光以共轴与离轴方式注入到渐变折射率多模光纤的输出光谱与光斑^[34]。(a)两种情况下的数值仿真结果;(b)近红外与可见光波段输出光谱实验结果(上方为共轴激发,下方为离轴激发)

Fig. 10 Output spectra and spots of 1550 nm laser injected into graded-index multimode fiber in coaxial and off-axis excitation conditions^[34]. (a) Theoretical simulation results in two cases; (b) experimental results of output spectra in near-infrared and visible domains (above is coaxial excitation and below is off-axis excitation)

上述结果说明,要想获得更平坦的可见光超连续谱,应尽可能保证激光正入射到渐变折射率多模光纤中。

渐变折射率光纤的纤芯尺寸会影响 GPI 边带的产生位置,最终影响输出光谱。2019 年, Lopez 等^[18]研究了渐变折射率多模光纤纤芯尺寸对产生 GPI 边带的影响。他们先进行了理论仿真,然后将峰值功率高达 185 kW 的 1064 nm 激光聚焦注入到纤芯尺寸分别为

60 μm 和 80 μm 的 5 m 长度渐变折射率多模光纤中。数值仿真与实验结果如图 11 所示,随着纤芯半径的增加, GPI 边带的频移量变小,该结果与第 2 节得到的结论一致,这是因为纤芯尺寸较大时,其可以支持更多的模式,光束自成像的周期也会越长,较长的周期降低了产生新频谱边带的频移量。此外图 11(b)表明,纤芯尺寸增大使非线性阈值升高,最终导致频率转化效率变低。

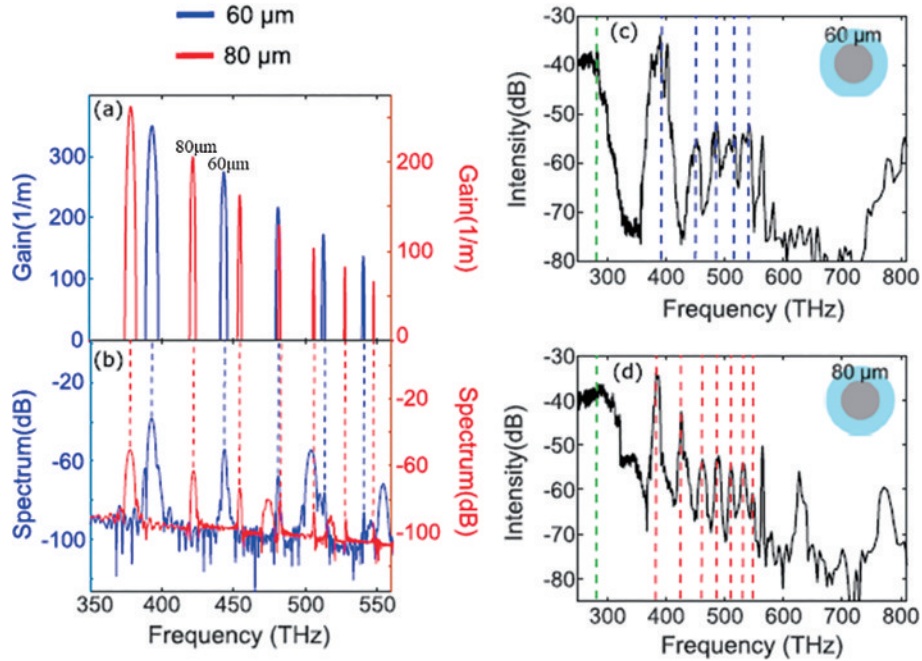


图 11 纤芯直径分别为 60 μm 和 80 μm 的渐变折射率多模光纤产生的 GPI 边带^[18]。(a)增益谱仿真结果;(b)输出光谱仿真结果;(c)纤芯直径为 60 μm 的渐变折射率多模光纤输出光谱;(d)纤芯直径为 80 μm 的渐变折射率多模光纤输出光谱
Fig. 11 GPI sidebands generated in graded-index multimode fibers with core diameters of 60 μm and 80 μm , respectively^[18].
(a) Simulation results of gain spectrum; (b) simulation results of output spectra; (c) output spectrum of graded-index multimode fiber with core diameter of 60 μm ; (d) output spectrum of graded-index multimode fiber with core diameter of 80 μm

渐变折射率多模光纤纤芯折射率分布也会对光谱演化产生影响。2019 年, Krupa 等^[33]对该问题展开了

研究。他们采用了折射率分布如图 12(a)所示的两种渐变折射率多模光纤(纤芯直径均为 52.1 μm),其中

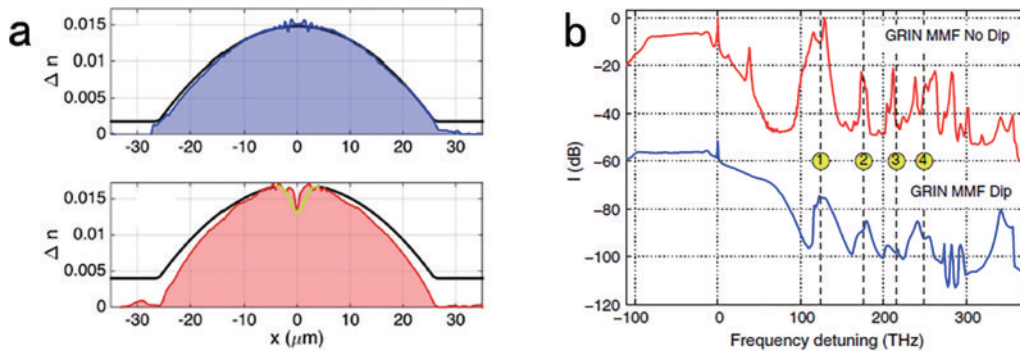


图 12 纤芯折射率分布对输出光谱的影响^[33]。(a)两种光纤纤芯折射率分布(上图为准抛物线分布,下图为在准抛物线分布的基础上中间存在凹陷);(b)峰值功率为 36 kW 的激光注入到 10 m 折射率分布无凹陷(上面的曲线)与有凹陷(下面的曲线)的渐变折射率多模光纤的输出光谱实验结果

Fig. 12 Influence of core refractive index profile on output spectrum^[33]. (a) Core refractive index profiles of two fibers (above is nearly parabolic profile, below is parabolic profile with a dip on top); (b) experimental results of output spectrum with a 36 kW peak power injected into a 10 m graded-index multimode fiber with refractive index profile without (upper curve) and with (lower curve) a dip on top, respectively

一种折射率为准抛物线分布,另一种折射率在准抛物线分布的基础上中间存在凹陷。实验中两种光纤的长度均为 10 m,注入脉冲的峰值功率为 36 kW,在短波方向分别产生了如图 12(b)所示的光谱,可以看出两种光纤产生的多阶 GPI 边带位置都能与理论值很好地对应,但是折射率分布中心凹陷的光纤转换效率明显较低,一阶反斯托克斯光强度相比前者降低了约 20 dB。上述结果表明,折射率分布为准抛物线型的渐变折射

率多模光纤有利于可见光边带的产生。

泵浦激光参数、渐变折射率光纤参数及入射方式对输出光谱的影响总结为表 2,利用准抛物线型渐变折射率多模光纤可以有效获得可见光分量,并且如果泵浦脉冲的峰值功率足够高,以共轴的方式聚焦注入到合适长度、合适纤芯尺寸的渐变折射率多模光纤中,将会获得高可见光占比、良好平坦度的可见光超连续谱。

表 2 渐变折射率多模光纤产生可见光的影响因素

Table 2 Effect of different conditions on visible light generation in graded-index multimode fibers

Parameter	Reference	Conclusion
Pump laser	Peak power [4,32]	Higher peak power produces a broader and smoother spectrum
	Incident condition [34]	On-axis excitation can generate more short-wave spectral components and spectrum is also smoother
Graded-index multimode fiber	Length [4,32]	Longer fiber produces a smoother spectrum, but too long fiber will inhibit visible light
	Core size [18]	Larger core size of graded-index multimode fiber and smaller frequency shift of GPI sidebands
	Index profile [33]	Parabolic profile graded-index multimode fiber has higher frequency conversion efficiency

4 总结与展望

尽管渐变折射率多模光纤中的多模时空非线性效应研究起步较晚,但是近些年来利用其获得可见光超连续谱也取得了一系列的进展。在理论仿真方面,多模能量耦合数值理论模型初步建立并不断得到完善,这有利于认识光束在渐变折射率多模光纤内的演化过程,并进一步发现更为复杂的物理现象。在实验方面,科研人员也做了一系列重要工作,研究了利用渐变折射率多模光纤产生可见光波段光谱边带并进一步演化为超连续谱的有效方案。实验结果表明,想要得到较强的可见光分量,泵浦激光峰值功率要尽可能高;聚焦耦合进入渐变折射率多模光纤的方式也很重要,应尽可能保持正入射到纤芯;此外光纤长度的选择也是关键的一点。目前利用渐变折射率多模光纤产生的超连续谱的短波边界已经可以达到 350 nm,输出功率可以达到 30 W,但这还不能满足人们的需求,在诸如生物医学成像、光学传感、光谱学等领域都需要光谱短波更短、可见光占比更高的超连续谱光源,因此如何进一步拓展短波边、提高可见光占比、提高光谱平坦度是今后研究的重点。

实现全光纤结构的渐变折射率多模光纤超连续谱输出对实际应用具有重要意义。由于 1 μm 波段高功率固体激光器研究较为成熟,因此目前利用渐变折射率多模光纤产生可见光超连续谱大多数采用 1 μm 固体脉冲激光作为泵浦源,但这样只能通过空间耦合的方式将其注入到渐变折射率多模光纤中,该过程引入了较大的损耗,并且鲁棒性差。相比于固体激

光器,光纤激光器具有光束质量好、体积小、散热方便等优点,并且可以直接与渐变折射率多模光纤熔接,但是目前其输出峰值功率还比不上固体激光器。研究高功率脉冲光纤激光器,实现几百千瓦峰值功率输出,用其泵浦渐变折射率多模光纤,不仅可以实现全光纤结构,还能获得高光束质量的可见光超连续谱。

绿光激光作为渐变折射率多模光纤的泵浦源有利于进一步拓展可见光范围、提高可见光占比。GPI 效应产生高频反斯托克斯边带的同时,也会以相同的频率失谐量产生低频斯托克斯边带。1 μm 泵浦激光的 GPI 斯托克斯边带大多位于中红外区域,在石英光纤中损耗较大,并且斯托克斯光会抑制可见光边带的产生,最终降低可见光的占比。解决上述问题的一个方式是用更短波长的激光作为泵浦源,并且更短的泵浦波长有利于光谱整体向短波边扩展。目前该方案主要面临以下挑战:1)在光谱平坦度方面,由于泵浦激光波长位于正常色散区并且远离光纤的零色散点,在长波方向的展宽机制主要是受激拉曼散射,在短波方向的展宽机制主要是 GPI 效应,可见光波段这两种效应产生的光谱都不具备好的平坦度,为了解决该问题,一是采用合适的渐变折射率多模光纤,多模光纤的长度、芯径、折射率分布等参数都会影响输出光谱的平坦度;二是采用高功率可见光激光作为泵浦源,更高的峰值功率可以提高自相位调制等非线性过程,从而提高光谱平坦度。2)在可见光激光器方面,全光纤结构可见光激光器的研制十分具有挑战性,受限于增益光纤的吸收发射截面其输出功率还远达不到实际使用要求;固体绿光脉冲激光器研究成熟,其输出的峰值功率

可以达到兆瓦量级,但光束耦合较为困难。受限于绿光激光器发展的不足,当前还很少见到绿光泵浦渐变折射率多模光纤产生可见光超连续谱的报道,但是由于该方案在获得纯可见光超连续谱方面具有潜在的优势,因此随着绿光光纤激光器的发展,相信相关研究工作也会在不久的将来陆续出现。研究绿光激光在渐变折射率多模光纤中的 GPI、受激拉曼散射、四波混频等多模非线性过程,可为获得可见光占比极高的白光激光光源提供新的途径。

参 考 文 献

- [1] Longhi S. Modulational instability and space-time dynamics in nonlinear parabolic-index optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(23): 2363-2365.
- [2] Mafi A. Pulse propagation in a short nonlinear graded-index multimode optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(17): 2803-2811.
- [3] Pourbeyram H, Agrawal G P, Mafi A. Stimulated Raman scattering cascade spanning the wavelength range of 523 to 1750 nm using a graded-index multimode optical fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(20): 201107.
- [4] Lopez-Galmiche G, Sanjabi Eznaveh Z, Eftekhar M A, et al. Visible supercontinuum generation in a graded index multimode fiber pumped at 1064 nm[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2553-2556.
- [5] Teğin U, Ortaç B. Spatiotemporal instability of femtosecond pulses in graded-index multimode fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(24): 2195-2198.
- [6] Eftekhar M A, Eznaveh Z S, Antonio Lopez J E, et al. Tailoring nonlinear frequency generation in graded-index multimode fibers[C]//*Optical Fiber Communication Conference*, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2017: Tu3H.3.
- [7] Krupa K, Tonello A, Barthélémy A, et al. Observation of geometric parametric instability induced by the periodic spatial self-imaging of multimode waves[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(18): 183901.
- [8] Wright L G, Liu Z W, Nolan D A, et al. Self-organized instability in graded-index multimode fibres[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(12): 771-776.
- [9] Krupa K, Tonello A, Shalaby B M, et al. Spatial beam self-cleaning in multimode fibres[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(4): 237-241.
- [10] Niang A, Mansuryan T, Krupa K, et al. Spatial beam self-cleaning and supercontinuum generation with Yb-doped multimode graded-index fiber taper based on accelerating self-imaging and dissipative landscape[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24018-24028.
- [11] Deliancourt E, Fabert M, Tonello A, et al. Kerr beam self-cleaning on the LP₁₁ mode in graded-index multimode fibers[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(4): 1089-1096.
- [12] Niang A, Modotto D, Tonello A, et al. Spatial beam self-cleaning in tapered Yb-doped GRIN multimode fiber with decelerating nonlinearity[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 6500308.
- [13] Wright L G, Christodoulides D N, Wise F W. Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers[J]. *Science*, 2017, 358(6359): 94-97.
- [14] Wright L G, Sidorenko P, Pourbeyram H, et al. Mechanisms of spatiotemporal mode-locking[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(5): 565-570.
- [15] Liu K W, Xiao X S, Yang C X. Observation of transition between multimode Q-switching and spatiotemporal mode locking[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 530-534.
- [16] Liu K W, Xiao X S, Ding Y, et al. Buildup dynamics of multiple solitons in spatiotemporal mode-locked fiber lasers[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 1898-1906.
- [17] Mas Arabi C, Kudlinski A, Mussot A, et al. Geometric parametric instability in periodically modulated graded-index multimode fibers[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(2): 023803.
- [18] Lopez-Aviles H E, Wu F O, Sanjabi Eznaveh Z, et al. A systematic analysis of parametric instabilities in nonlinear parabolic multimode fibers[J]. *APL Photonics*, 2018, 4(2): 022803.
- [19] He W T, Dai J N, Ma Q C, et al. Modal perspective on geometric parametric instability sidebands in graded-index multimode fibers[J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 11353-11360.
- [20] Liu Z W, Wright L G, Christodoulides D N, et al. Kerr self-cleaning of femtosecond-pulsed beams in graded-index multimode fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(16): 3675-3678.
- [21] Ma S C, Zhang B F, He Q R, et al. Wavelength-tunable mode-locked Yb-doped fiber laser based on nonlinear Kerr beam clean-up effect[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(4): 041403.
- [22] Wright L G, Christodoulides D N, Wise F W. Controllable spatiotemporal nonlinear effects in multimode fibres[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(5): 306-310.
- [23] Renninger W H, Wise F W. Optical solitons in graded-index multimode fibres[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1719.
- [24] Wright L G, Renninger W H, Christodoulides D N, et al. Spatiotemporal dynamics of multimode optical solitons[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3492-3506.
- [25] Ahsan A S, Agrawal G P. Graded-index solitons in multimode fibers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3345-3348.
- [26] Zitelli M, Ferraro M, Mangini F, et al. Single-mode spatiotemporal soliton attractor in multimode GRIN fibers[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 741-748.
- [27] Nazemosadat E, Pourbeyram H, Mafi A. Phase matching for spontaneous frequency conversion via four-wave mixing in graded-index multimode optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(2): 144-150.
- [28] Mondal P, Bhatia N, Mishra V, et al. Cascaded Raman and intermodal four-wave mixing in conventional non-zero dispersion-shifted fiber for versatile ultra-broadband continuum generation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2351-2357.

- [29] Guasoni M, Parmigiani F, Horak P, et al. Intermodal four-wave mixing and parametric amplification in kilometer-long multimode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(24): 5296-5305.
- [30] Teğin U, Ortaç B. Cascaded Raman scattering based high power octave-spanning supercontinuum generation in graded-index multimode fibers[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 12470.
- [31] Chiang K S. Stimulated Raman scattering in a multimode optical fiber: evolution of modes in Stokes waves[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(5): 352-354.
- [32] Krupa K, Louot C, Couderc V, et al. Spatiotemporal characterization of supercontinuum extending from the visible to the mid-infrared in a multimode graded-index optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5785-5788.
- [33] Krupa K, Couderc V, Tonello A, et al. Refractive index profile tailoring of multimode optical fibers for the spatial and spectral shaping of parametric sidebands[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(4): 1117-1126.
- [34] Eftekhar M A, Wright L G, Mills M S, et al. Versatile supercontinuum generation in parabolic multimode optical fibers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9078-9087.
- [35] Zhang T, Zhang W, Hu X H, et al. All fiber structured supercontinuum source based on graded-index multimode fiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2022, 19(3): 035101.
- [36] Zhang T, Hu X H, Pan R, et al. 30 W all-fiber supercontinuum generation via graded-index multimode fiber pumped by picoseconds laser pulse[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 108943.
- [37] Mynbaev D K, Scheiner L L. *Fiber-optic communications technology*[M]. London: Prentice Hall, 2000.
- [38] Krupa K, Tonello A, Barthélémy A, et al. Multimode nonlinear fiber optics, a spatiotemporal avenue[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(11): 110901.
- [39] Agrawal G P. Invite paper: self-imaging in multimode graded-index fibers and its impact on the nonlinear phenomena[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 50: 309-316.
- [40] Poletti F, Horak P. Description of ultrashort pulse propagation in multimode optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(10): 1645-1654.
- [41] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]//Christiansen P L, Sørensen M P, Scott A C. *Nonlinear science at the dawn of the 21st Century. Lecture Notes in Physics*. Heidelberg: Springer, 2007, 542: 195-211.
- [42] Wright L G, Wabnitz S, Christodoulides D N, et al. Ultrabroadband dispersive radiation by spatiotemporal oscillation of multimode waves[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(22): 223902.