

光学学报

线偏振超连续谱研究进展

李博¹, 陈胜平^{1,2,3*}, 李敬岁¹, 宋家鑫^{1,2,3}, 宋锐^{1,2,3}, 韩凯^{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室, 湖南长沙 410073

摘要 线偏振超连续谱光源是具有线偏振特性的宽光谱激光光源,是连接偏振光学与非线性光学的一个很好的纽带,在高光谱成像照明、光学相干层析等领域有重要应用。近几年关于线偏振超连续谱的研究报道逐渐增多,研究人员已经针对线偏振超连续谱的偏振度提高、相干性增强、光谱平坦度提高、功率提升以及光谱拓展等重点问题开展研究工作,并取得重要进展。本文介绍线偏振超连续谱的研究进展,总结分析线偏振超连续谱产生中的关键技术,并介绍与分析两种针对线偏振超连续谱的偏振消光比测量方法。

关键词 偏振消光比; 线偏振; 超连续谱; 保偏光纤; 光纤激光器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230923

1 引言

激光在非线性介质中传输时,由于各种线性与非线性效应的共同作用,输出光谱出现极大展宽的现象,称为超连续谱的产生^[1-2]。超连续谱激光光源具有高亮度、宽光谱等优点,在光谱学、生物医学、材料表征等领域有着广阔的应用前景。具有双折射特性的保偏光纤可以稳定保持传输光的偏振态,被广泛应用到线偏振光纤激光器领域^[3-14]。基于保偏光纤的线偏振超连续谱在具有高亮度、宽光谱特性的同时,还具有优良的线偏振属性。偏振特性为超连续谱的研究和应用提供了新的维度,使线偏振超连续谱更具研究意义和应用价值。对线偏振超连续谱的详细研究可以加深对光纤中偏振相关非线性效应的理解,促进偏振光学与非线性光学的融合发展。相比于非保偏光纤,保偏光纤的抗干扰能力更强,不易受光纤弯折、环境温度变化、外界应力等因素影响,因此基于保偏光纤的线偏振超连续谱输出更稳定。由于保偏光纤两个偏振主轴的色散特性不同,当线偏振泵浦光以不同的偏振方向入射到保偏光纤时,会产生具有不同输出特性的线偏振超连续谱,这使得线偏振超连续谱的产生更加灵活。

具体应用方面,在主动成像领域,当使用非保偏主动照明光源对样品进行成像时,环境中的杂散光会对光电探测设备造成一定的干扰,从而影响成像质量。选择线偏振超连续谱作为主动照明光源,可以有效过滤环境杂散光,极大地降低背景噪声,提高信噪

比^[15-16]。在线偏振主动成像系统中,线偏振照明光源被探测物体散射时,其偏振态变化与被探测物体表面结构有着密切关系,因此还可以通过线偏振超连续谱的散射光偏振态变化来获取物体表面结构信息^[17-19]。此外,基于全正色散保偏光子晶体光纤的高相干度线偏振超连续谱在光学相干层析成像^[20]、相干放大^[21]等领域具有重要的应用价值。

近几年关于线偏振超连续谱的研究报道逐渐增多,研究人员已经针对线偏振超连续谱的偏振度提高、相干性增强、光谱平坦度提高、功率提升以及光谱拓展等重点问题开展研究工作,并取得重要进展。本文针对线偏振超连续谱领域研究人员关注的重点问题,以线偏振超连续谱的功率提升和光谱展宽为主线,介绍线偏振超连续谱的研究进展,总结分析线偏振超连续谱产生中的关键技术,并介绍偏振消光比(PER)的测量方法,特别是适用于线偏振超连续谱的两种偏振消光比测量方法。

2 线偏振超连续谱研究进展

现有的线偏振超连续谱报道中,研究人员重点关注偏振度提高、相干性增强、光谱平坦度提高、功率提升以及光谱覆盖范围拓展等方面,特别是线偏振超连续谱的功率提升和光谱展宽方面。输出功率和光谱宽度是评价线偏振超连续谱性能的重要指标,在保持偏振特性的基础上提升功率以及拓宽光谱,可以有效扩展线偏振超连续谱的应用范围。近年来,国内外诸多

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-06-29; 录用日期: 2023-07-12; 网络首发日期: 2023-08-02

通信作者: *chespn@163.com

研究团队通过研制新型非线性光纤、优化系统结构,在极大程度上提升了线偏振超连续谱光源的输出光谱范围、输出平均功率以及偏振特性。目前线偏振超连续谱产生的技术方案日益丰富,现已报道的线偏振

超连续谱几乎涵盖整个可见光到中红外波段,输出功率最高达到百瓦级。表 1 列出了关于线偏振超连续谱的主要研究成果^[22-32],详细内容将在下文中分类介绍。

表 1 线偏振超连续谱的主要研究成果
Table 1 Research results of linearly polarized supercontinuum

| Year | Organization | Pump wavelength | Nonlinear media | Wavelength range | Output power | PER | Ref. |
|------|--------------------------------|-------------------|--|------------------|--------------|---------|------|
| 2003 | University of Helsinki | 798 nm | PM-PCF | 400-1750 nm | >1 mW | / | [22] |
| 2006 | Shenzhen University | 1200 nm | PM-PCF | 300-1350 nm | >1 mW | / | [23] |
| 2013 | Yanshan University | 820 nm | PM-PCF | 600-900 nm | >100 mW | / | [24] |
| 2017 | HUST | 1040 nm | PM-PCF | 800-1500 nm | >1 W | 21.2 dB | [25] |
| 2019 | University of Warsaw | 1550 nm | PM-PCF | 1100-2200 nm | 57.2 mW | ~18 dB | [26] |
| 2019 | NUDT | 1064 nm | PM-PCF | 520-2300 nm | 93 W | 16 dB | [27] |
| 2021 | NKT | 1049 nm | PM-PCF | 670-1390 nm | 720 mW | 17 dB | [28] |
| 2015 | NUDT | 1064 nm | Polarization maintaining ytterbium-doped fiber (PM-YDF) | 900-1800 nm | 124.8 W | 85% | [29] |
| 2021 | NUDT | 1064 nm | PM-YDF + polarization maintaining germanium doped fiber (PM-GDF) | 800-1700 nm | 4.43 W | 18 dB | [30] |
| 2021 | XAUT | 1563.7 nm | Polarization maintaining erbium-ytterbium co-doped fiber | 1450-2200 nm | 11.51 W | 18 dB | [31] |
| 2020 | Toyota Technological Institute | 2.1 μm | ZBLAN | 350-4500 nm | >1 mW | / | [32] |

Notes: HUST—Huazhong University of Science and Technology; NUDT—National University of Defense Technology; XAUT—Xi'an University of Technology.

2.1 可见光到近红外波段线偏振超连续谱

泵浦源和非线性介质是超连续谱产生的两个重要因素。可见光到近红外波段线偏振超连续谱通常以石英基质保偏光纤为非线性介质,其实现方式通常有两种:一种是通过线偏振光纤激光器泵浦保偏光子晶体光纤;另一种是以增益光纤和无源光纤为非线性介质,通过线偏振光纤放大器直接产生超连续谱。保偏光子晶体光纤由于具有优良的偏振保持特性、高非线性和灵活的色散管理特性,非常适合用于产生线偏振超连续谱,但是保偏光子晶体光纤与泵浦光的耦合较为困难,这严重限制了保偏光子晶体光纤产生超连续谱时输出功率的提升。相较于保偏光子晶体光纤产生线偏振超连续谱,采用保偏放大器直接产生线偏振超连续谱的整个系统结构更为简单且更易于实现全光纤化,在功率的提升上具有优势,然而光纤色散难以调控,使得该方法产生的线

偏振超连续谱难以向短波拓展。本小节分别介绍保偏光子晶体光纤产生超连续谱以及保偏放大器产生超连续谱的研究进展。

2.1.1 保偏光子晶体光纤中线偏振超连续谱的产生

光子晶体光纤的概念最早由 Russell 等于 1992 年提出。光子晶体光纤可以自由地设计空气孔形状、大小、排列、占比等参量,从而灵活地进行色散调控,通过调控光纤的色散特性并使用合适的泵浦光泵浦光子晶体光纤可以实现光谱的极大展宽。光子晶体光纤的保偏特性是通过在光子晶体光纤内部引入几何或者应力双折射获得的。近年来,多家研究机构通过不同的结构设计获得具有不同色散特性的保偏光子晶体光纤,用于产生线偏振超连续谱。

1) 高双折射系数保偏光子晶体光纤产生线偏振超连续谱

2003 年,赫尔辛基理工大学首次报道了高双折射

光子晶体光纤中产生线偏振超连续谱^[22]。他们使用空间泵浦的方式将平均功率为 140 mW、波长为 798 nm 的 100 fs 脉冲射入 5 m 长的高双折射光子晶体光纤中，泵浦光偏振方向与光纤的快轴方向对准，该光纤快轴

的零色散点位于 635 nm 处，获得了覆盖 400~1750 nm 的线偏振超连续谱，输出光谱如图 1(a) 所示。他们研究了泵浦光中心波长、偏振方向以及脉宽对所产生线偏振超连续谱的影响。

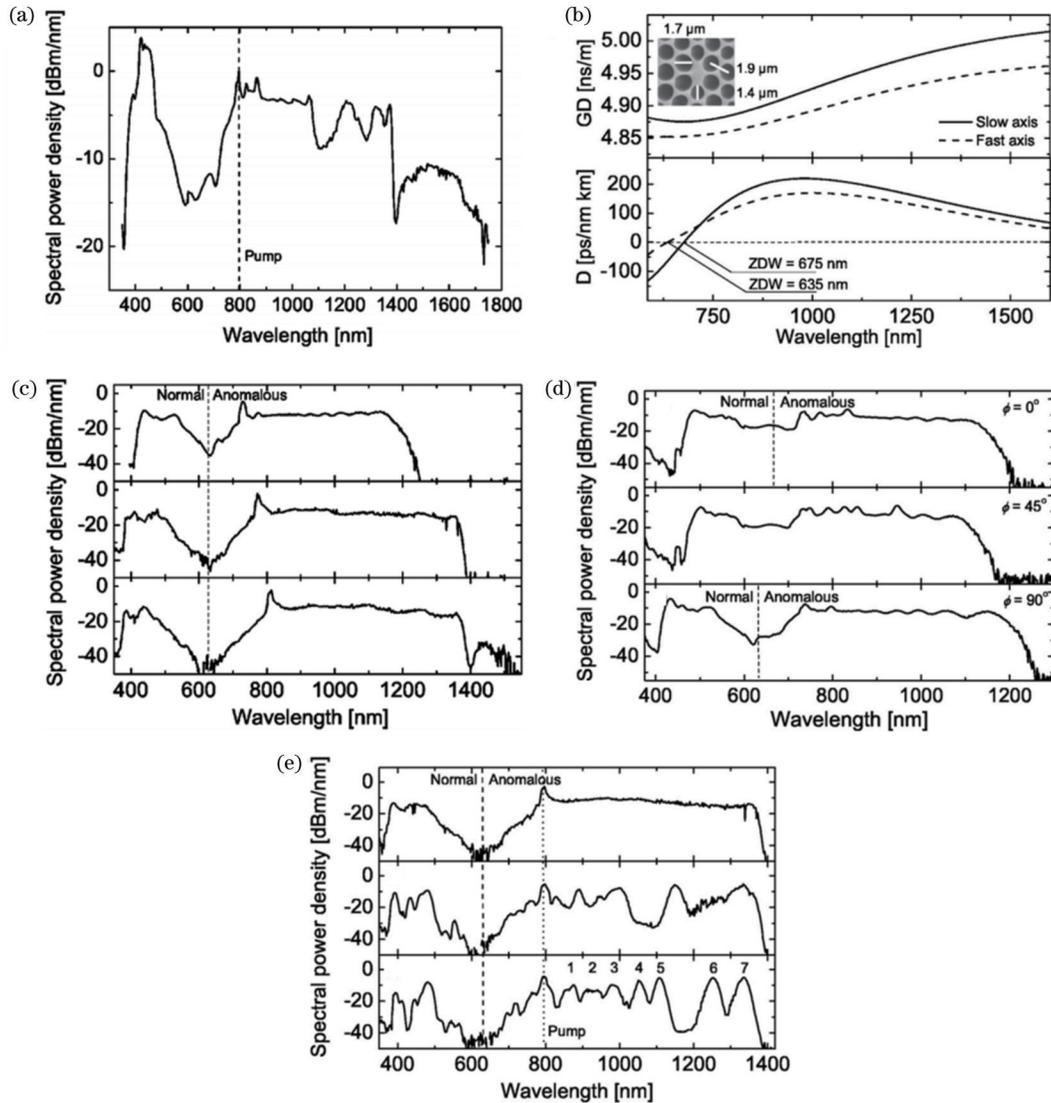


图 1 首个线偏振超连续谱^[22]。(a)超连续谱的输出光谱;(b)光纤的色散和群延迟曲线;(c)泵浦波长对超连续谱的影响;(d)泵浦光偏振方向对超连续谱的影响;(e)泵浦光脉宽对超连续谱的影响

Fig. 1 The first linearly polarized supercontinuum fiber source^[22]. (a) Output spectrum of supercontinuum; (b) dispersion and group delay curves of the fiber; (c) effect of pumping wavelength on supercontinuum; (d) effect of polarization direction of pumping light on supercontinuum; (e) effect of pulse width of pumping light on supercontinuum

将脉宽为 250 fs，波长分别为 728 nm、711 nm 和 810 nm 的脉冲泵浦光入射到高双折射系数光子晶体光纤中，泵浦光偏振方向与光纤的快轴方向对准，实验结果如图 1(c) 所示。泵浦波长与保偏光子晶体光纤的零色散波长相差越大，孤子自频移产生的红移量以及高阶色散产生的蓝移量越大，产生超连续谱的波长范围越宽，导致零色散波长附近产生的光谱凹陷的深度和宽度增大，光谱平坦度下降。

高双折射系数光子晶体光纤的色散、群延迟曲线以及光纤截面如图 1(b) 所示。相比于各向同性的普通光

子晶体光纤，高双折射系数光子晶体光纤的快轴和慢轴具有不同的色散特性。从不同角度入射的泵浦光可以对产生的超连续谱进行灵活调控，在不同偏振方向泵浦光子晶体光纤时产生的超连续谱如图 1(d) 所示。

将平均功率相同，波长为 790 nm，脉宽分别为 300 fs、100 fs 以及 70 fs 的脉冲泵浦光射入高双折射系数光子晶体光纤中，泵浦光偏振方向与光纤的快轴方向对准，输出光谱如图 1(e) 所示。泵浦脉冲的脉宽越宽，产生的孤子数越多，线偏振超连续谱的光谱平坦度越高。

2006年,深圳大学报道了一种高双折射系数光子晶体光纤,该光纤的光纤截面如图2(a)所示,通过减小纤芯附近的两个对称位置的空气孔直径实现高双折射系数。使用中心波长为1200 nm的光参量放大器泵浦光子晶体光纤,产生光谱范围为300~1350 nm的线偏振超连续谱^[23],输出光谱如图2(b)所示。由于泵浦光中心波长所在位置距离光子晶体光纤的零色散点较远,输出光谱的光谱平坦度较低。

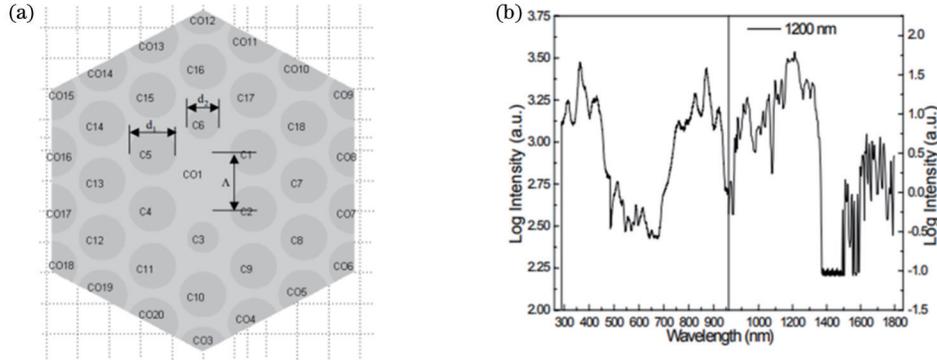


图 2 高双折射系数光子晶体光纤产生的线偏振超连续谱^[23]。(a)高双折射系数光子晶体光纤端面图;(b)输出光谱
Fig. 2 Linearly polarized supercontinuum generated in high birefringence photonic crystal fiber^[23]. (a) Cross section of the high birefringence photonic crystal fiber; (b) output spectrum

2013年,燕山大学报道了自行研制的V型高双折射系数光子晶体光纤,该光纤的端面结构如图3(a)所示,通过V型排列直径不同的空气孔实现高双折射系数,该光纤的双折射系数在1200 nm波长处达到 0.84×10^{-2} ,比传统保偏光纤高2个数量级。使用中心波长在760~860 nm可调的钛宝石飞秒激光器,以空间耦合的方式泵浦V型高双折射系数光子晶体

光纤,可产生光谱范围为600~900 nm的线偏振超连续谱^[24]。如图3(b)所示,该光纤具有双零色散点,其中一个零色散点在泵浦波长附近,另一零色散点在1114 nm,这一特性虽然限制了光谱的进一步展宽,但使得光谱展宽更为对称,且能量更为集中。在不同功率下得到的超连续谱如图3(c)所示。

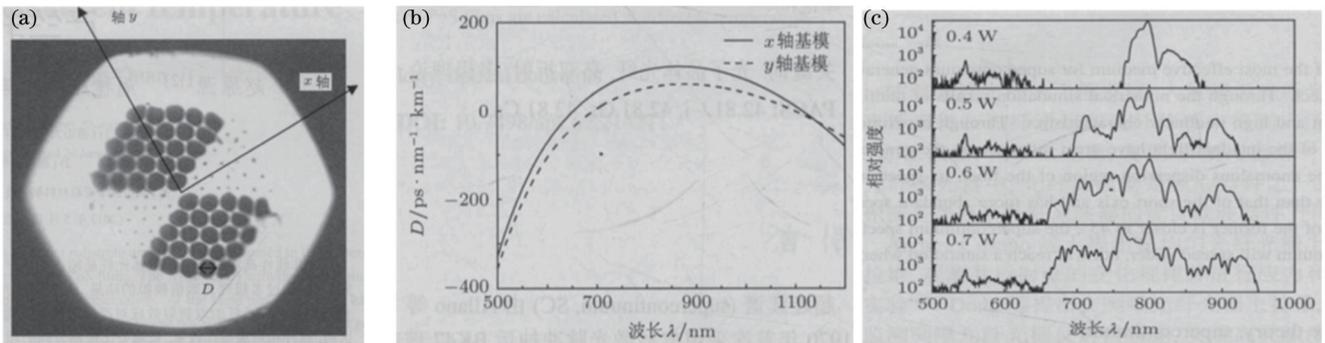


图 3 V型高双折射系数光子晶体光纤产生的线偏振超连续谱^[24]。(a)V型光子晶体光纤端面图;(b)两个基模的色散曲线;(c)不同泵浦功率下的输出光谱
Fig. 3 Linearly polarized supercontinuum generated in V-type photonic crystal fiber with high birefringence^[24]. (a) Cross section of V-type photonic crystal fiber; (b) dispersion curves of two fundamental modes; (c) output spectra at different pump power

2017年,华中科技大学提出一种新型微结构纤芯光子晶体光纤,通过在椭圆纤芯中增加一排亚微米级的空气孔来提高光纤的双折射系数,其双折射系数在1 μm波长处达到了 10^{-3} 量级。该光纤的光纤端面结构和色散曲线如图4(a)、(b)所示。通过中心波长为1040 nm、脉宽为15 ps、重复频率为45 MHz的激光以空间耦合的方式泵浦该光纤,可产生覆盖800~1500 nm的线偏振超连续谱^[25],如图4(c)所示,其消光比为21.2 dB。

2) 全正色散保偏光子晶体光纤产生高相干度线偏振超连续谱

典型的基于孤子的超连续谱的主要缺点是:在光纤的反常色散区,当孤子数较多时,由调制不稳定性和孤子分裂引起的噪声放大导致超连续谱的相干度降低^[33]。全正色散光子晶体光纤产生超连续谱的本质是非线性相干效应,如自相位调制和随之产生的光波分裂,具有较高的相干度^[28]。通过优化设计全正色散光纤并优化泵浦参数,在全正色散保偏光子晶体光纤和

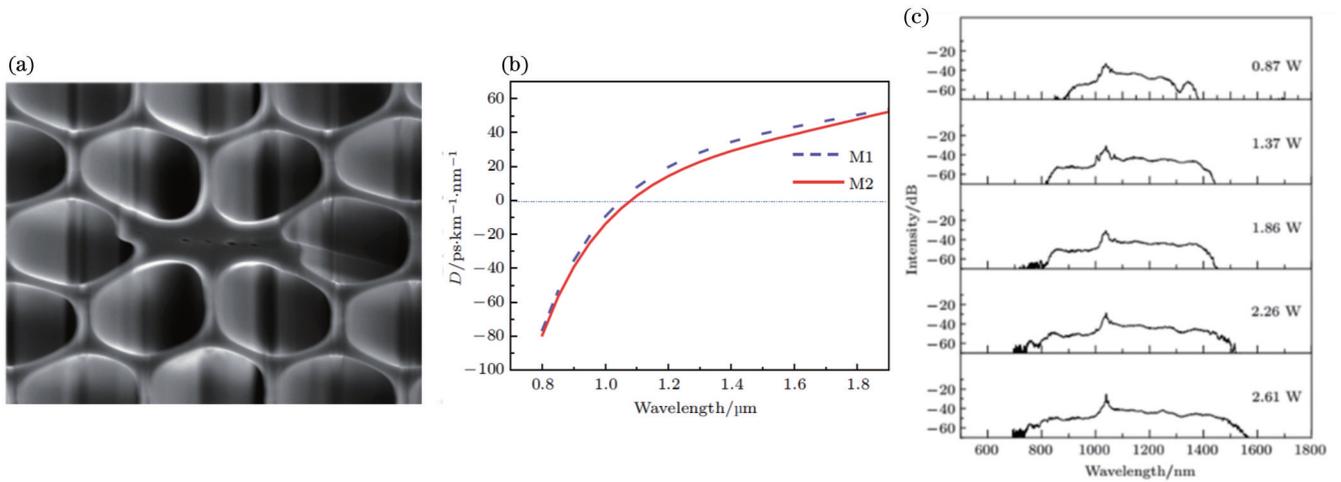


图 4 含亚微米空气孔椭圆纤芯光子晶体光纤产生的线偏振超连续谱^[25]。(a) 光纤端面图; (b) 色散曲线; (c) 输出超连续谱随泵浦功率的变化

Fig. 4 Linearly polarized supercontinuum generated in elliptical core photonic crystal fiber with submicron air holes^[25]. (a) Cross section of the fiber; (b) dispersion curve; (c) spectra at different pump power

全正色散非保偏光子晶体光纤中均可产生低噪声、高相干度、高平坦度的超连续谱^[20,26,28,34]。由于保偏光子晶体光纤具有良好的偏振保持特性,理论上在产生高相干度超连续谱方面更具优势。

2019年,弗罗茨瓦夫理工大学报道了全光纤结构的线偏振超连续谱。他们使用飞秒光纤激光器泵浦全正色散保偏光子晶体光纤,光纤的端面结构如图 5

(a)、(b)所示。由于该光纤的石英纤芯附近的空气孔极小,与保偏单模光纤的熔接相对简单。通过光纤熔接全正色散光子晶体光纤可获得覆盖 1100~2200 nm 的线偏振超连续谱^[26],输出光谱如图 5(c)所示。该超连续谱在 1.23~1.88 μm 波长范围内的相干度高于 0.7,如图 5(d)所示。

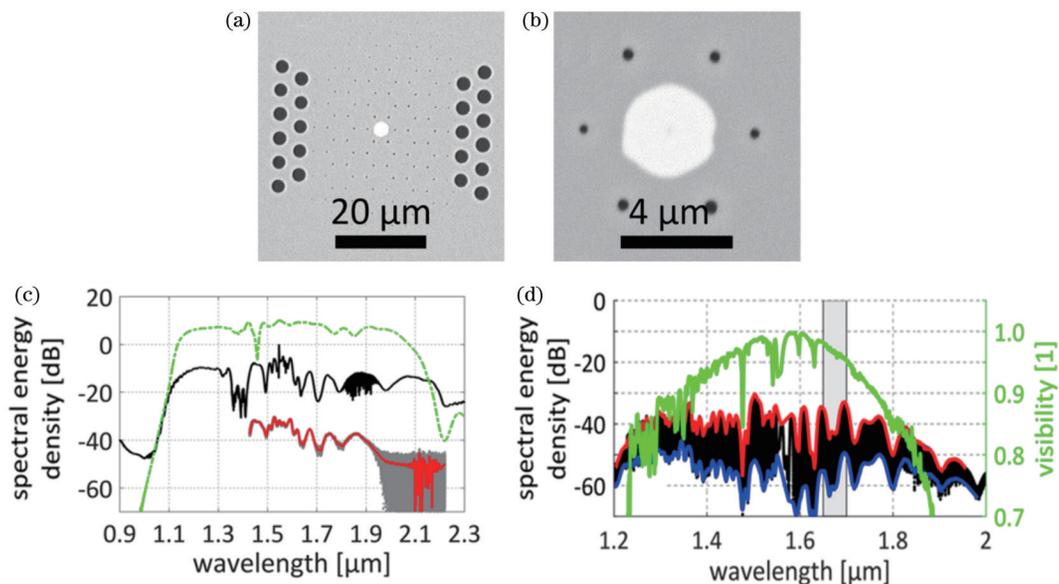


图 5 全光纤结构的高相干度线偏振超连续谱^[26]。(a) 光纤端面结构图; (b) 纤芯区域结构图; (c) 光谱图(黑色曲线为实验测量曲线,绿色曲线为理论计算曲线,红色和灰色曲线为利用色散傅里叶变换技术表征超连续谱稳定性的曲线); (d) 脉冲对脉冲干涉以及条纹可见度

Fig. 5 All-fiber structure linearly polarized supercontinuum with high coherence^[26]. (a) Cross section of the fiber; (b) structure of fiber core region; (c) spectra (the black curve is the experimental measured curve, the green curve is the theoretical calculated curve, and the red and gray curves represent the supercontinuum stability by dispersion Fourier transform technology); (d) measured pulse-to-pulse interference and calculated fringes visibility

2021年,丹麦 NKT 公司使用 1049 nm 的飞秒种子源泵浦一段全正色散保偏光子晶体光纤,获得在 670~1390 nm 波长范围内平坦度优于 3 dB 的超快、低噪声线偏振超连续谱^[28],实验结构如图 6(a)所示,输出光

谱如图 6(b)所示。他们测量了光子晶体光纤快轴和慢轴的输出光谱,在 720 nm 的谱宽范围内消光比优于 17 dB,在 700~1100 nm 波长范围内相关强度噪声低于 0.54%。

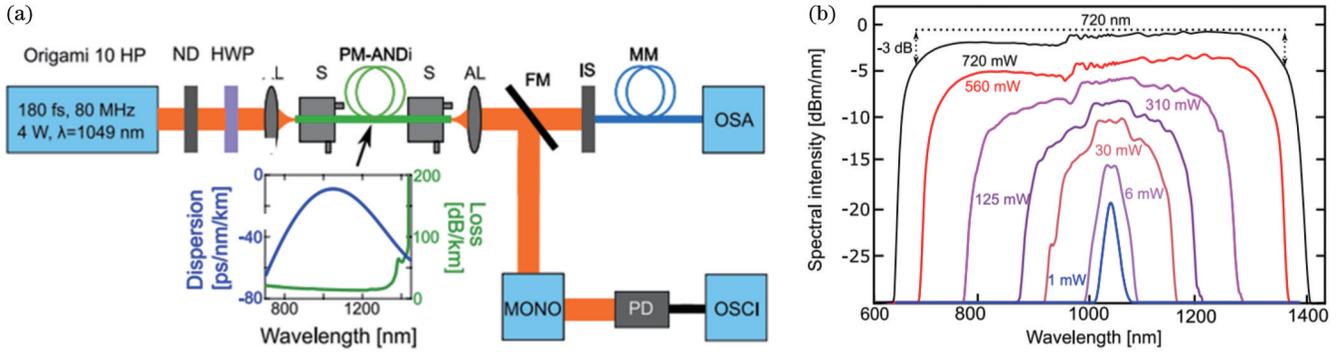


图 6 超快、低噪声线偏振超连续谱^[28]。(a)实验结构图;(b)输出光谱

Fig. 6 Ultra-fast and low noise linearly polarized supercontinuum^[28]. (a) Experimental structure; (b) output spectra

3) 高功率保偏光子晶体光纤产生线偏振超连续谱

基于保偏光子晶体光纤产生线偏振超连续谱的方案,在功率提升方面受到泵浦源与非线性介质间耦合较为困难的限制。保偏光子晶体光纤与泵浦源的耦合通常有空间耦合和光纤熔接两种方式。文献[22]中,钛宝石激光器输出的泵浦光通过透镜耦合进光子晶体光纤中,耦合效率为 20%~30%。文献[26]中,通过将保偏光子晶体光纤的石英纤芯附近空气孔设计得极小,使该保偏光子晶体光纤与保偏单模光纤的熔接相对简单,在光纤熔接后测得熔点处有约 2 dB 的损耗,即耦合效率约为 63%。目前光子晶体光纤的空间耦合效率可以达到 80% 左右,但是高功率泵浦光在进行空间耦合时,光纤的端面容易损伤,因此空间耦合的方式难以获得高功率输出激光。对于光纤熔接的方式,由于泵浦激光器尾纤的保偏光纤与保偏光子晶体光纤的模场不匹配,且光子晶体光纤在熔接过程中容易出

现空气孔塌缩等,保偏光子晶体光纤的熔接较为困难。但是,通过优化熔接参数,可以得到更高的空间耦合效率,目前实验获得的保偏光子晶体光纤的熔接耦合效率达到 90%^[27]。使用选择性空气孔塌缩技术对光子晶体光纤进行扩芯,并进一步优化熔接参数,有望进一步提升保偏光子晶体光纤的熔接耦合效率。

2019年,国防科技大学报道了一种基于应力型保偏光子晶体光纤的高功率全光纤结构线偏振超连续谱光源^[27]。先将 1064 nm 皮秒种子源利用全保偏的主振荡器功率放大(MOPA)结构进行功率放大,再用其泵浦 2.6 m 长的零色散点位于 1070 nm 的保偏光子晶体光纤,光纤端面及色散曲线如图 7(a)所示。通过优化熔接参数,可将光纤熔接的耦合效率提升到 90%,最终得到覆盖 520~2300 nm 的 93 W 高功率线偏振超连续谱,如图 7(b)所示。这是目前报道的基于保偏光子晶体光纤产生线偏振可见光到近红外超连续谱的最高功率。

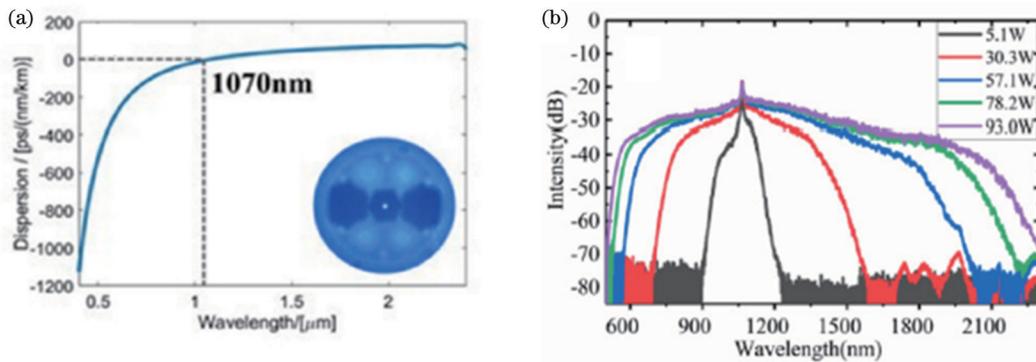


图 7 高功率全光纤结构线偏振超连续谱^[27]。(a)保偏光子晶体光纤端面及色散曲线;(b)输出的线偏振超连续谱

Fig. 7 All-fiber structure linearly polarized supercontinuum with high power^[27]. (a) Cross section and dispersion curve of polarization-maintaining photonic crystal fiber; (b) spectra of linearly polarized supercontinuum

2.1.2 保偏光纤放大器产生超连续谱

保偏光纤放大器直接产生线偏振超连续谱是以保偏增益光纤和保偏无源光纤为非线性介质,可以避免常规保偏光纤与保偏光子晶体光纤间较大的熔接损耗,实现泵浦源与非线性介质的更高效耦合,在线偏振超连续谱的功率提升上更具优势。

2015年,国防科技大学在全保偏光纤放大器中直接产生线偏振超连续谱^[29],实验结构如图8(a)所示,种子源脉宽为70 ps,重复频率为5 MHz,中心波长为1060 nm,对种子源进行三级全保偏功率放大。随着主放大功率的增加,掺镱光纤中的非线性效应造成光

谱不断展宽,如图8(b)所示。当峰值功率达到35 kW时,输出光谱的短波边拓展到900 nm,此时输出平均功率为124.8 W,这是当时报道的线偏振超连续谱的最高输出功率。使用格兰棱镜和功率计测试了超连续谱的偏振消光比,测得慢轴所占能量为85%。该方案采用了全光纤结构,输出功率得到显著提升。但是,所用的常规保偏光纤非线性系数较低且色散特性难以调节,导致光谱展宽有限,仅覆盖近红外区域。最近,本课题组通过进一步优化保偏掺镱光纤放大器的结构参数,实现了平均功率达到322.5 W的线偏振超连续谱,最大输出功率下光谱覆盖范围为800~2200 nm。

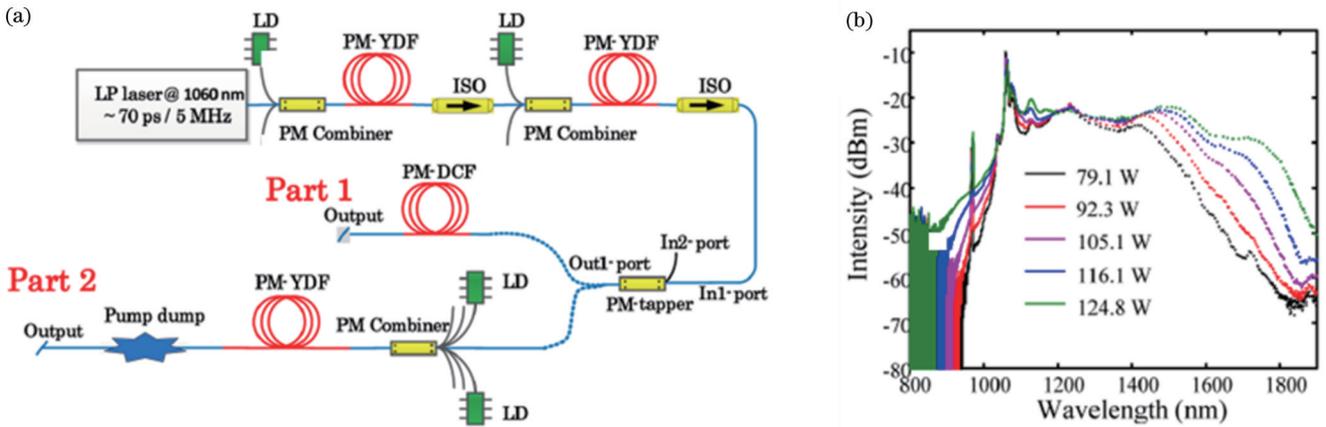


图8 基于保偏光纤放大器结构产生线偏振超连续谱^[29]。(a)实验结构图;(b)输出光谱

Fig. 8 Linearly polarized supercontinuum generated in polarization maintaining fiber amplifier^[29]. (a) Experimental structure; (b) output spectra

2021年,国防科技大学利用保偏随机光纤激光器直接产生近红外线偏振超连续谱^[30],实验结构如图9(a)所示。当达到最大输出功率4.43 W时,光谱覆盖

范围为800~1700 nm,如图9(b)所示。这种方法产生线偏振超连续谱的优势在于结构简单,更易于实现整个系统的小型化和轻量化。

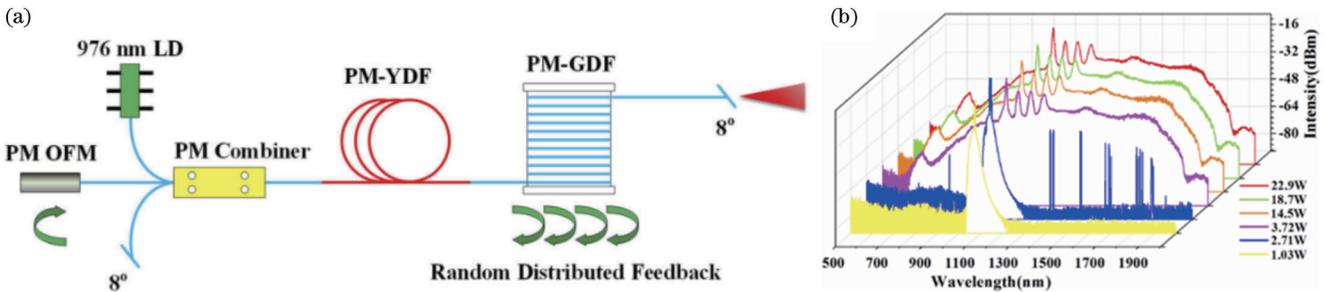


图9 保偏随机光纤激光器产生的线偏振超连续谱^[30]。(a)实验结构图;(b)输出光谱

Fig. 9 Linearly polarized supercontinuum generated in polarization-maintaining random fiber laser^[30]. (a) Experimental structure; (b) output spectra

2021年,西安理工大学在保偏掺铒光纤放大器中产生了超过10 W的线偏振超连续谱^[31]。自制的掺铒光纤激光器中心波长为1563.7 nm,脉宽为209 fs,使用一段较长的正常色散光纤将脉宽展宽至1015 ps。孤子的时域展宽降低了峰值功率的增加幅度,有利于放大器实现更高平均功率输出。实验结构如图10(a)所示,通过多级MOPA结构可实现平均功率为

11.51 W、光谱范围为1450~2200 nm的线偏振超连续谱输出,输出光谱如图10(b)所示,其偏振消光比为18 dB。

基于保偏光纤放大器产生线偏振超连续谱的方案,在输出平均功率的提升上有很大优势,然而由于光纤色散难以调控且非线性系数相对较小,光谱的展宽受限,通常被限制在近红外区域。

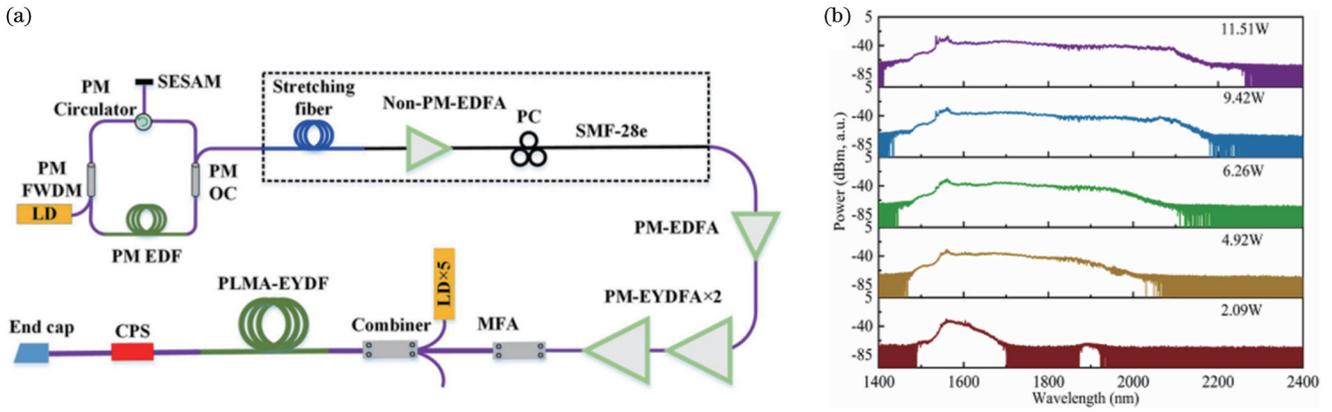


图 10 保偏掺铒光纤放大器产生线偏振超连续谱^[31]。(a)实验结构图;(b)输出光谱随功率的变化

Fig. 10 Linearly polarized supercontinuum generated in polarization maintaining erbium-doped fiber amplifier^[31]. (a) Experimental structure; (b) spectra at different pump power

2.2 中红外线偏振超连续谱

目前,石英基质的保偏光纤产生超连续谱的长波段沿已接近石英光纤的损耗极限波段,更长波段的中红外超连续谱的产生需要由特种非线性介质来实现。ZBLAN (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF) 光纤因在中红外波段具有良好的传输特性而被广泛应用于中红外光纤

激光器中。2020年,丰田技术研究所使用基于掺铈 ZBLAN 光纤的飞秒光纤放大器泵浦一段椭圆纤芯的无源单模 ZBLAN 光纤,产生了覆盖 350~4500 nm 的线偏振超连续谱^[32],实验结构和输出光谱如图 11(a)、(b)所示。

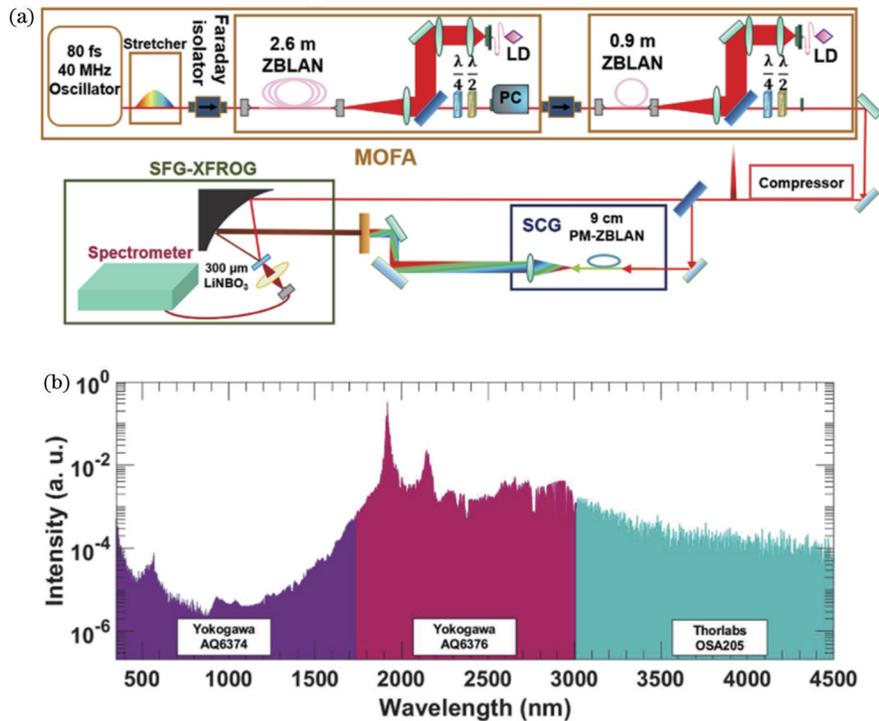


图 11 ZBLAN 光纤产生线偏振超连续谱^[32]。(a)实验结构图;(b)输出光谱

Fig. 11 Linearly polarized supercontinuum generated from ZBLAN fiber^[32]. (a) Experimental structure; (b) spectrum of linearly polarized supercontinuum

相比于氟化物光纤,硫化物光纤可以将光谱范围向长波方向进一步扩展。2016年,澳大利亚国立大学以硫化物肋状波导为非线性介质,在中心波长为 4.184 μm 的飞秒脉冲泵浦下,获得了覆盖 2~10 μm 的

线偏振超连续谱^[35],输出光谱如图 12 所示。

2.3 小结

本节针对研究人员关注的重点问题,综述了国内中红外偏振超连续谱的相关研究成果。在高双折射系数

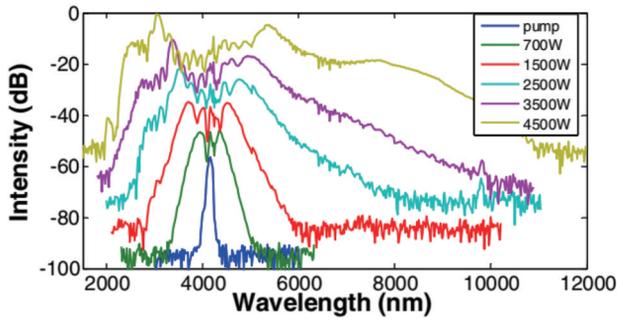


图 12 硫化物光纤产生的线偏振超连续谱^[35]

Fig. 12 Linearly polarized supercontinuum generated from chalcogenide fiber^[35]

光纤的设计方面,经过优化设计的保偏光子晶体光纤的双折射系数在 1000 nm 波长以上达到 10^{-3} 量级,所产生的线偏振超连续谱的偏振消光比达到 21.2 dB。在相干度方面,基于全正色散保偏光子晶体光纤的线偏振超连续谱在 650 nm 的波长范围内相干度大于 0.7。在光谱拓展上,基于保偏光子晶体光纤的线偏振超连续谱的光谱范围为 300~2300 nm,基于保偏 ZBLAN 光纤的线偏振超连续谱的光谱范围为 350~4500 nm;基于硫化物的线偏振超连续谱的光谱范围为 2~10 μm 。在输出功率上,目前基于保偏光子晶体光纤的线偏振超连续谱的最大输出功率达到 93 W,采用保偏光纤放大器直接产生线偏振超连续谱的方案的最大输出功率已经超过 300 W。

虽然线偏振超连续谱的研究已经取得重要进展,但与非保偏超连续谱相比,还存在差距。在输出功率方面,目前基于放大器产生超连续谱方案的输出功率达到 3180 W^[36],基于非保偏光子晶体光纤产生的超连续谱功率达到 563 W^[37],而使用上述两种方案产生的线偏振超连续谱的最大功率分别为 322 W 和 93 W^[27]。保偏光纤具有应力棒或者非对称的空气孔结构,使得光纤熔接更为困难,而且在高功率下,热变形很可能对这种不对称的结构产生更大的破坏,因此线偏振超连续谱的功率提升更为困难。在光谱展宽方面,基于非保偏光子晶体光纤产生超连续谱的输出光谱范围为 350~2400 nm^[38],目前光谱最宽的基于保偏光子晶体光纤的线偏振超连续谱的光谱范围为 520~2300 nm^[27]。二者在光谱展宽方面虽有差距,但造成

差距的原因与偏振特性无关,通过进一步优化保偏光子晶体光纤结构以及泵浦参数,未来线偏振超连续谱也可以达到与普通超连续谱相同的光谱宽度。

随着研究的深入,线偏振超连续谱的各项参数有望进一步提升,特别是在平均功率提升和光谱拓展方面:通过搭建更高功率的保偏光纤放大器并使用更大纤芯的保偏光纤,保偏放大器产生线偏振超连续谱的输出功率有望突破千瓦量级;通过进一步提高泵浦光耦合效率、优化保偏光子晶体光纤的色散特性以及优化泵浦参数,保偏光子晶体光纤产生的线偏振超连续谱有望在短波边沿和长波边沿均达到石英光纤的损耗极限波段,输出平均功率有望由目前的近百瓦提高至 200 W 以上。

3 偏振消光比测量方法

偏振消光比是衡量线偏振激光器输出光偏振特性的重要参数,偏振消光比的准确测量对线偏振光纤激光器的研究与应用具有重要意义。目前被研究人员广泛研究并应用的偏振消光比测量方法为旋转检偏法,该方法是通过连续旋转检偏器并记录检偏器透射光的光功率变化,通过透射光的最大、最小功率计算出待测器件或者光源的消光比。目前国内外已有多家单位基于旋转检偏法研制出消光比测试仪^[39-44],并实际应用偏振器件和偏振光源的消光比测量中。国防科技大学张万儒等^[7]使用消光比测量仪对平均输出功率为 10 mW 量级的增益开关线偏振单频脉冲光纤激光器的偏振消光比进行测量,在不同重复频率和功率条件下,均获得优于 29 dB 的偏振消光比。消光比测量仪具有消光比测量范围宽、测量简便等优点,但是其对待测光功率大小有严格限制,通常情况下待测光功率被限制在 10 mW 量级,不能直接应用在平均功率较高的线偏振光纤激光器的偏振消光比测量上。

高功率线偏振激光器的偏振消光比测量需要自行搭建消光比测量系统。如图 13 所示:待测光经过准直后入射到可连续旋转的半波片中,旋转半波片调节待测光的偏振方向;检偏器的作用是对入射光进行偏振分束,通常选用高损伤阈值、高消光比的偏振分束器 (PBS);功率计用来测量 PBS 透射光的功率。具体的测量方法是连续旋转半波片并记录 PBS 透射光的功率变化,通过透射光的最大、最小功率计算待测光源的

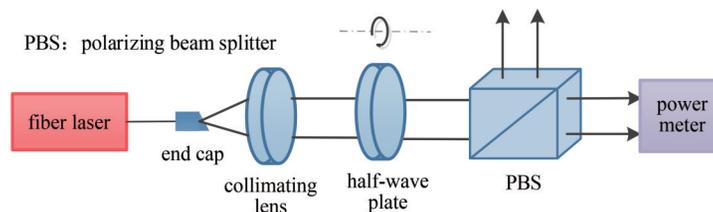


图 13 旋转检偏法测量高功率线偏振光纤激光器偏振消光比示意图

Fig. 13 Measurement of polarization extinction ratio of high-power linearly polarized fiber lasers by the method of rotating polarizer

偏振消光比。基于旋转检偏法的偏振消光比测量方法目前已经应用在百瓦量级线偏振光纤激光器的偏振消光比测量中。国防科技大学的 Song 等^[45]使用此方法测量了百瓦级线偏振拉曼光纤激光器的偏振消光比。清华大学的 Wu 等^[46]用同样的方法测量了平均功率为 340 W 的线偏振光纤放大器的偏振消光比。对于平均功率在千瓦级的线偏振光纤激光器的偏振消光比测量,可以使用高反镜反射大部分激光,并将高反镜的透射光作为待测光测量偏振消光比。中国工程物理研究院的王岩山等^[47]用上述方法测量了 4.45 kW 窄线宽线偏振光纤激光器的偏振消光比。

使用旋转检偏法测量线偏振超连续谱消光比的报道中,如文献[29]和[30],均发现线偏振超连续谱光源偏振消光比随泵浦功率增加而降低的现象。由于旋转检偏法仅从总功率角度反映待测光源的偏振特性,上述研究将消光比退化的原因归结为热致偏振耦合。线偏振超连续谱的产生是多种效应共同作用的结果,其中的一些效应与偏振相关,如模间四波混频和交叉相位调制^[48]。这些与偏振相关的非线性效应仅在光纤的某一特定光轴中产生光分量,会影响线偏振超连续谱在某个波段的消光比,因此线偏振超连续谱的消光比退化的原因不只是热致偏振耦合,而进一步分析消光比退化的原因需要测量线偏振超连续谱在各个波长处的偏振态。旋转检偏法的测量结果无法从光谱的角度反映各个波长处的偏振态,进而无法分析线偏振超连

续谱光谱展宽过程中各个效应与偏振的关联。下文介绍两种可以反映线偏振超连续谱在各个波长处偏振状态的宽光谱偏振消光比测量方法,并简单介绍基于测量结果发现的有意思的新现象。

3.1 基于偏振相位滤波的偏振消光比测量方法

2019年,国防科技大学 Tao 等^[27,49]基于偏振相位滤波原理^[50],提出一种适用于高功率宽光谱光源偏振消光比的测量方法。基于相位滤波原理的偏振消光比测量方法示意图如图 14 所示。待测光源的输出尾纤与一段长度为 L 的保偏光纤之间以 45° 夹角偏轴熔接,该熔接点使得原本沿着光纤主轴(通常为慢轴)传输的线偏振光均匀地分解到长度为 L 的保偏光纤的快轴和慢轴上。由于保偏光纤具有双折射特性,经过该光纤的传输后,光纤快轴和慢轴上的传输光会产生相位差,相位差是随波长变化的函数。经过该保偏光纤的待测光由准直透镜准直后入射到 PBS 中, PBS 主轴与待测光纤激光器输出尾纤的主轴夹角为 45° ,此时待测光源的慢轴和快轴传输光经过 PBS 后的透过率均是随相位差变化的函数,且当慢轴传输光透过率为 1 时,快轴传输光透过率为 0。最后用积分球和光谱仪测量 PBS 透射光的光谱,并用待测光源的原始光谱和测量后的光谱进行归一化差值计算,使慢轴传输光透过率为 1 的所有波长处光谱强度为 0,从而在快轴传输光透过率为 1 的所有波长处获得极小值,该极小值的绝对值表征对应波长附近的偏振消光比。

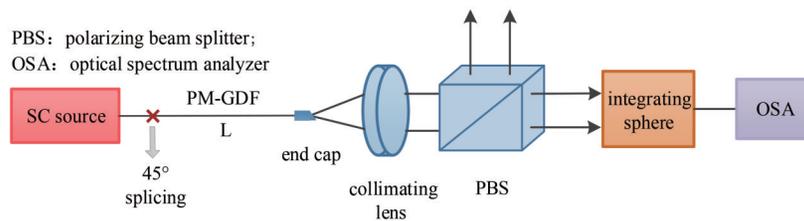


图 14 基于偏振相位滤波原理的偏振消光比测量方法

Fig. 14 Polarization extinction ratio measurement method based on polarization phase filtering principle

使用基于偏振相位滤波的偏振消光比测量方法单次测量得到的结果,无法获得单个波长处的偏振消光比数值,需要偏轴熔接长度分别为 L_1 和 L_2 的两段保偏光纤来测量某个波长处的偏振消光比。两段光纤的长度需要通过精确计算得到,此时待测光经两段不同长度的光纤后,在波长 λ_0 处的透过率满足以下条件:在偏轴熔接长度为 L_1 的保偏光纤的测试结果中,待测光纤激光器的慢轴传输光透过率为 1,快轴传输光透过率为 0,即在波长 λ_0 处透射光中只有待测光纤激光器的慢轴传输光;在偏轴熔接长度为 L_2 的保偏光纤的测试结果中,待测光纤激光器的快轴传输光透过率为 1,慢轴传输光透过率为 0,即在波长 λ_0 处透射光中只有待测光纤激光器的快轴传输光。对 λ_0 处的两次测量结果进行差值计算,即可获得宽光谱线偏振光纤激光器在 λ_0 处

的偏振消光比。

基于偏振相位滤波原理的偏振消光比测量方法,其测量波长范围由 PBS 工作波长范围以及光谱仪工作波长范围决定,而测量功率范围则由 PBS 和积分球的功率承受能力决定。目前,该方法已应用在近百瓦的宽光谱线偏振光纤激光器的偏振消光比测量中。国防科技大学 Tao 等^[27]使用上述方法,对输出功率为 93 W 的可见光到近红外线偏振超连续谱光源的偏振消光比进行测量,得到 520~650 nm、900~1600 nm 波长范围的偏振消光比测量结果,如图 15(a)、(b)所示,相邻波峰和波谷之间的差值即为该波长范围内的偏振消光比。

基于偏振相位滤波原理的偏振消光比测试方法通过单次测量即可获得宽光谱光纤激光器各个谱段的偏

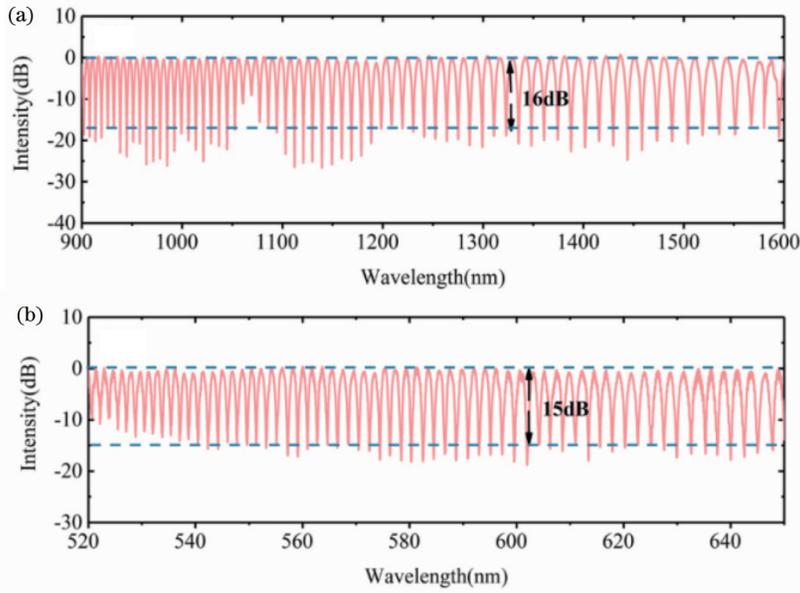


图 15 不同波长范围的偏振消光比测量结果^[27]。(a) 900~1600 nm; (b) 520~650 nm

Fig. 15 Polarization extinction ratio measurement results at different wavelength ranges^[27]. (a) 900-1600 nm; (b) 520-650 nm

振消光比。然而,测量结果的精度不高,仅反映相邻波峰和波谷所在波长范围的偏振消光比。对于单一波长处偏振消光比的测量,由于两段保偏光纤的长度需精确控制,测量过程较为复杂且测量结果容易出现误差,而两段光纤熔接损耗的差别和对轴角度的偏差会使测量结果出现额外误差。此外,该方法的测量结果不会出现负值,当宽光谱光源在某段波长范围内的快轴传输光功率大于慢轴传输光功率时,测量结果为 0,无法准确反映此种情况下的偏振消光比。采用相位滤波方法测量基于 PM-PCF 的超连续谱时,PM-PCF 的熔点损耗会极大限制测量功率。

针对这些问题,详细研究了基于光谱差值计算偏

振消光比的方法,结果表明,该方法可以有效解决上述问题,实现线偏振超连续谱光源偏振消光比的高分辨率、高准确度测量。

3.2 基于光谱差值计算的偏振消光比测量方法

基于光谱差值计算的偏振消光比测量方法示意图如图 16 所示,待测光经准直镜准直后,入射到可连续转动的检偏器中,检偏器的透射光由积分球吸收,积分球的多个开口可以连接光谱仪、功率计等测量设备。旋转检偏器并通过积分球、功率计和光谱仪获得主偏振方向以及主偏振方向正交的偏振方向的光谱和功率信息,对两个正交偏振态的光谱进行差值计算,获得宽光谱的偏振消光比测量结果。

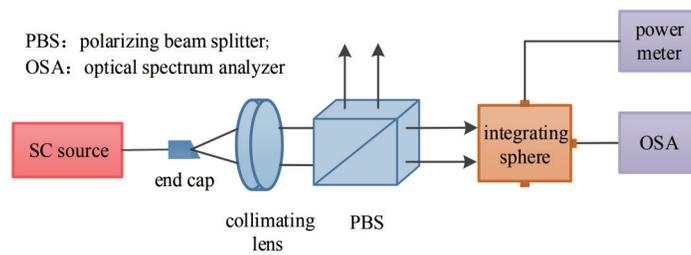


图 16 基于光谱差值计算的偏振消光比测量方法示意图

Fig. 16 Schematic of polarization extinction ratio measurement method based on spectral subtraction calculation

基于光谱差值计算以及基于偏振相位滤波的两种偏振消光比测量方法的测量性能均受到检偏器、积分球以及光谱仪的共同影响^[51-56],如表 2 所示。检偏器、积分球和光谱仪的工作波长范围决定探测波长范围,检偏器和积分球的损伤阈值决定测量功率极限,检偏器的消光比和光谱仪的动态范围决定消光比测量的动态范围。

将基于光谱差值计算的偏振消光比测量方法应用到超过 200 W 的近红外线偏振超连续谱的偏振消光比

测量中。使用工作波长范围为 900~1300 nm 的 PBS 测量近红外线偏振超连续谱在 1020~1200 nm 波长范围内的偏振消光比,线偏振超连续谱的偏振消光比测量结果如图 17 所示。从 1020~1050 nm 的光谱对比结果发现,线偏振超连续谱的输出光在该波长范围内仅有沿快轴的传输光,该波段的消光比计算结果为负值。

虽然没有明确提出,但经过推敲可以发现,文献[28]中 NKT 公司的研究人员应用了类似的方法来测

表 2 检偏器、积分球和光谱仪的参数以及其对测量性能的影响

Table 2 Parameters of polarizer, integrating sphere, and optical spectrum analyzer and their impact on measurement performance

| Parameter | Polarizer ^[51-56] | | | Integrating sphere | Optical spectrum analyzer |
|---------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|---|---------------------------|
| | PBS | Glan-laser (calcite) | Glan-laser (α -BBO) | | |
| Wavelength range /nm | 420-680 | 350-700 | 210-400 | 250-2500 | 350-1200 |
| | 620-1000 | 650-1050 | 300-700 | | 600-1700 |
| | 900-1300 | 1050-1700 | 700-3000 | | 1200-2400 |
| | 1200-1600 | 350-2300 | | | |
| Damage threshold | $>10 \text{ J/cm}^2$ | 20 J/cm^2 | 5 J/cm^2 | 7 J/cm^2 2 kW/cm^2 | |
| PER/power detection range | $>1000:1$ | $>10000:1$ | $>10000:1$ | | $>70 \text{ dB}$ |

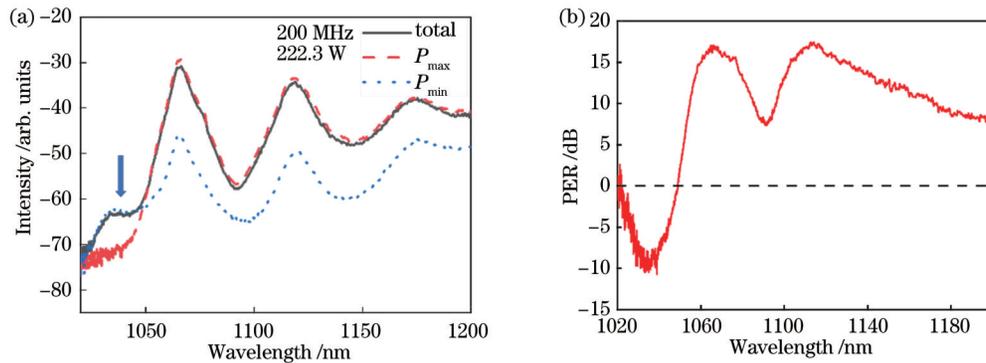


图 17 高功率线偏振超连续谱。(a)最大、最小以及总功率下的输出光谱;(b)偏振消光比计算结果

Fig. 17 Linearly polarized supercontinuum with high power. (a) Output spectra at maximum, minimum, and total power; (b) PER measurement result

量保偏光子晶体光纤快轴和慢轴的光谱,并以此得出光谱中 720 nm 波长范围内消光比大于 17 dB 的结论,实验结果如图 18 所示。使用相同的光纤,该公司的研究人员在研究全正色散保偏光子晶体光纤产生线偏振超连续谱中发现与偏振相关的光谱边带^[48],他们将其定义为 XPMI(cross-phase modulation instability)。当线偏振泵浦光与光纤的主轴方向呈 45°入射时,XPMI 效应最强(图 19)。他们通过类似的方法旋转检偏器观察光谱,从而对 XPMI 效应的偏振相关性进行研究,

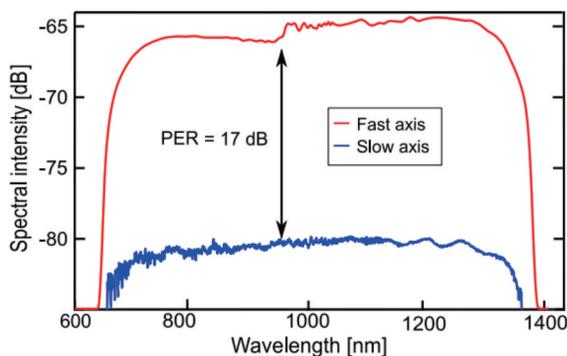


图 18 保偏光子晶体光纤的快轴和慢轴光谱,消光比为 17 dB^[28]
Fig. 18 Fast axis and slow axis spectra of polarization maintaining photonic crystal fibers, the polarization extinction ratio is 17 dB^[28]

发现 XPMI 仅在光纤的慢轴中产生。

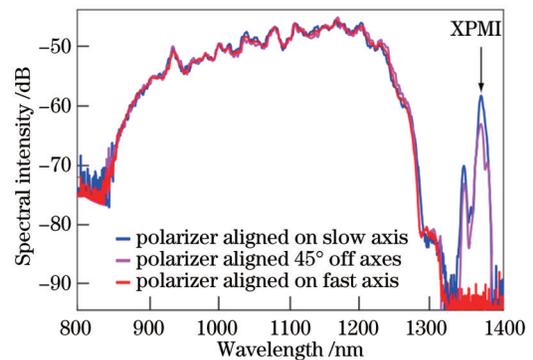


图 19 入射泵浦光与光纤主轴呈 45°时光纤慢轴、快轴以及主轴 45°方向的输出光谱

Fig. 19 Output spectra for different polarizer orientation while pumping at 45° from the two axes

3.3 小结

在超连续谱偏振特性研究过程中,宽谱段超连续谱偏振消光比的准确测量是一个关键环节。目前被广泛研究以及应用的旋转检偏法,仅可从总功率的角度反映线偏振光源的偏振特性,对于具有宽光谱特点的线偏振超连续谱光源,无法准确反映被测光源在各个波长处的偏振消光比。

本节介绍的两种线偏振超连续谱偏振消光比测试新方法,可以实现对各个波长处偏振消光比的精细测量,是探索和分析偏振相关非线性效应的产生方式与产生机理必不可少的工具。基于偏振相位滤波的测试方法可以通过单次测量获得宽光谱消光比测试结果,但是该方法单次测量的精确度相对较低,具体单波长处的消光比测量较为复杂且需要多次熔接,故存在不可避免的误差。基于光谱差值计算的测试方法可以更直观地观察线偏振超连续谱不同偏振方向上的输出光谱,更适合对偏振相关非线性效应进行具体研究,但是该方法需要旋转检偏器,检偏器反射光的光路随检偏器旋转而变化,在高功率应用时需要特别注意检偏器对反射光的吸收情况。

4 结 论

本文综述了国内外线偏振超连续谱相关研究成果,分别阐述了可见光到近红外、中红外线偏振超连续谱的研究进展。在光谱拓展上,基于保偏光子晶体光纤的线偏振超连续谱覆盖 400~2300 nm,基于保偏 ZBLAN 光纤的线偏振超连续谱覆盖 350~4500 nm,基于硫化物光纤的线偏振超连续谱覆盖 2~10 μm 。在输出功率提升方面,采用保偏光纤放大器直接产生线偏振超连续谱的方法,其输出功率已经超过 300 W。在相干度方面,基于全正色散保偏光子晶体光纤的线偏振超连续谱实现了在 650 nm 的波长范围内相干度大于 0.7。在偏振消光比提升方面,经过优化设计的保偏光子晶体光纤的双折射系数在 1000 nm 以上波长时达到 10^{-3} 量级,产生的线偏振超连续谱的偏振消光比达到 21.3 dB。在超连续谱偏振消光比测量方面:基于旋转检偏法的偏振消光比测量方法结构最为简单,但仅限应用于单波长线偏振光纤激光器的偏振消光比测量;基于相位滤波的偏振消光比测量方法可以通过单次测量获得宽光谱范围的偏振消光比,但是测量准确度有待提高,而且使用该方法测量单个波长处的偏振消光比十分复杂且误差较大;基于光谱差分计算的偏振消光比测量方法可以实现高功率、宽波长范围的高准确度偏振消光比测量,很适合于高功率线偏振超连续谱的偏振消光比测量。

可以期待,在不远的将来,保偏放大器产生线偏振超连续谱的输出功率有望突破 1000 W,基于保偏光子晶体光纤的线偏振超连续谱的光谱范围在短波边沿和长波边沿均达到石英光纤的损耗极限波段,平均输出功率有望由目前的近百瓦提高至 200 W 以上。线偏振超连续谱将从实验研究逐渐走向实际应用,在多个领域发挥其独特作用。

参 考 文 献

[1] 江丽,宋锐,何九如,等. 光纤放大器中实现 714 W 可见光至近红外超连续谱激光输出[J]. 中国激光, 2022, 49(9): 0916001.

Jiang L, Song R, He J R, et al. Realization of 714 W visible light to near infrared supercontinuum laser output in fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9): 0916001.

[2] 杨林永,张斌,侯静. 高功率 3~5 微米波段超连续谱光纤激光研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101001.

Yang L Y, Zhang B, Hou J. Progress on high-power supercontinuum laser sources at 3-5 μm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101001.

[3] Zhang C, Chen S P, Li B, et al. Narrow linewidth 49 W all fiber linearly polarized picosecond laser operating at 1016 nm[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(1): 1513307.

[4] Dontsova E I, Kablukov S I, Vatnik I D, et al. Frequency doubling of Raman fiber lasers with random distributed feedback[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1439-1442.

[5] Shang Y P, Shen M L, Wang P, et al. Amplified random fiber laser-pumped mid-infrared optical parametric oscillator[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(12): 121901-121904.

[6] Wu H S, Song J X, Ye J, et al. Hundred-watt-level linearly polarized tunable Raman random fiber laser[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(6): 061402.

[7] 张万儒,陈思雨,粟荣涛,等. 增益开关线偏振单频脉冲光纤激光器[J]. 物理学报, 2022, 71(19): 194204.

Zhang W R, Chen S Y, Su R T, et al. Gain-switched linearly polarized single-frequency pulsed fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(19): 194204.

[8] Liu Z J, Ma P F, Su R T, et al. High-power coherent beam polarization combination of fiber lasers: progress and prospect[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 34(3): A7-A14.

[9] 王涛,李灿,刘洋,等. 基于光纤拉伸器锁相实现超快激光高效相干偏振合成[J]. 中国激光, 2022, 49(23): 2316002.

Wang T, Li C, Liu Y, et al. Efficient coherent polarization synthesis of ultrafast laser based on fiber stretcher phase locking[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(23): 2316002.

[10] 马鹏飞,王小林,粟荣涛,等. 2 kW 级光纤激光相干偏振合成[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(4): 10-11.

Ma P F, Wang X L, Su R T, et al. Coherent polarization beam combining of fiber lasers to 2 kW power-level[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(4): 10-11.

[11] Zhang P F, Xu X D, Yu H L, et al. All-fiber-integrated linearly polarized fiber laser delivering 476 μJ , 50 kHz, nanosecond pulses for ultrasonic generation[J]. Applied Optics, 2016, 55(14): 3719-3723.

[12] Zhou P, Huang L, Xu J M, et al. High power linearly polarized fiber laser: generation, manipulation and application[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(12): 1784-1800.

[13] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, et al. Generation of azimuthally and radially polarized beams by coherent polarization beam combination[J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2658-2660.

[14] 朱新蕾,余佳益,蔡阳健. 新型相干结构光场产生研究进展[J]. 光子学报, 2022, 51(1): 0151103.

Zhu X L, Yu J Y, Cai Y J. Research progress of generation of partially coherent beams with prescribed correlation structures[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(1): 0151103.

[15] Fade J, Panigrahi S, Carré A, et al. Long-range polarimetric imaging through fog[J]. Applied Optics, 2014, 53(18): 3854-3865.

[16] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(3): 385-399.

[17] Jacques S L, Roman J R, Lee K. Imaging superficial tissues with polarized light[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2000, 26(2): 119-129.

[18] 何宏辉,曾楠,廖然,等. 偏振光成像技术用于肿瘤病变检测的研究进展[J]. 生物化学与生物物理进展, 2015, 42(5): 419-433.

He H H, Zeng N, Liao R, et al. Progresses of polarization

- imaging techniques and their applications in cancer detections[J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2015, 42(5): 419-433.
- [19] Ramella-Roman J C, Lee M D K, Prahl S A, et al. Design, testing, and clinical studies of a handheld polarized light camera[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2004, 9(6): 1305-1310.
- [20] Heidt A M, Modupeh Hodasi J, Rampur A, et al. Low noise all-fiber amplification of a coherent supercontinuum at 2 μm and its limits imposed by polarization noise[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 16734.
- [21] Jensen M, Gonzalo I B, Engelsholm R D, et al. Noise of supercontinuum sources in spectral domain optical coherence tomography[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(2): A154-A160.
- [22] Lehtonen M, Genty G, Ludvigsen H, et al. Supercontinuum generation in a highly birefringent microstructured fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(14): 2197-2199.
- [23] Yu Y Q, Ruan S C, Du C L, et al. Spectral broadening using a polarization-maintaining photonic crystal fiber by an optical parametric amplifier[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6025: 602507.
- [24] 赵原源, 周桂耀, 李建设, 等. V 型高双折射光子晶体光纤超连续谱产生的实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 214212. Zhao Y Y, Zhou G Y, Li J S, et al. Supercontinuum experimental study of V-type photonic crystal fiber with high birefringence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(21): 214212.
- [25] 熊梦杰, 李进延, 罗兴, 等. 新型高双折射微结构纤芯光子晶体光纤的可调谐超连续谱的特性研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(9): 094204. Xiong M J, Li J Y, Luo X, et al. Experimental and numerical study of tuneable supercontinuum generation in new kind of highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(9): 094204.
- [26] Tarnowski K, Martynkien T, Mergo P, et al. Compact all-fiber source of coherent linearly polarized octave-spanning supercontinuum based on normal dispersion silica fiber[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 12313.
- [27] Tao Y, Chen S P, Xu H. Hundred-watt level linearly polarized visible supercontinuum generation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 26044-26049.
- [28] Genier E, Grelet S, Engelsholm R D, et al. Ultra-flat, low-noise, and linearly polarized fiber supercontinuum source covering 670–1390 nm[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(8): 1820-1823.
- [29] Zhang B, Jin A J, Ma P F, et al. High-power near-infrared linearly-polarized supercontinuum generation in a polarization-maintaining Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28683-28690.
- [30] He J R, Song R, Jiang L, et al. Supercontinuum generated in an all-polarization-maintaining random fiber laser structure[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 28843-28851.
- [31] Shen R, Fang H, Zhao J Q, et al. Over 10 W linearly polarized supercontinuum directly produced in an erbium-doped fiber MOPA seeded with stretched soliton[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(2): 257-263.
- [32] Ali Rezvani S, Ogawa K, Fuji T K. Highly coherent multi-octave polarization-maintained supercontinuum generation solely based on ZBLAN fibers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29918-29926.
- [33] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [34] Gonzalo I B, Engelsholm R D, Sørensen M P, et al. Polarization noise places severe constraints on coherence of all-normal dispersion femtosecond supercontinuum generation[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 6579.
- [35] Yu Y, Gai X, Ma P, et al. Experimental demonstration of linearly polarized 2–10 μm supercontinuum generation in a chalcogenide rib waveguide[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 958-961.
- [36] Qi T C, Yang Y S, Li D, et al. Kilowatt-level supercontinuum generation in random Raman fiber laser oscillator with full-open cavity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(21): 7159-7166.
- [37] 董克攻, 张昊宇, 黎玥, 等. 全光纤白光超连续谱实现 563 W 输出[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(10): 100101. Dong K G, Zhang H Y, Li Y, et al. Generation of 563 W all-fiber white-light supercontinuum source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(10): 100101.
- [38] Qi X, Chen S P, Li Z H, et al. High-power visible-enhanced all-fiber supercontinuum generation in a seven-core photonic crystal fiber pumped at 1016 nm[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1019-1022.
- [39] 李国华, 赵明山, 吴福全, 等. 高消光比测试系统的研究[J]. *中国激光*, 1990, 17(1): 51-53. Li G H, Zhao M S, Wu F Q, et al. Study of a measurement system for high extinction ratio[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1990, 17(1): 51-53.
- [40] 薛世荣. 一种全自动偏振消光比测试仪: CN206459813U[P]. 2017-09-01. Xue S R. Full-automatic polarization extinction ratio tester: CN206459813U[P]. 2017-09-01.
- [41] 张一琪, 徐桂城, 尹炳琪. 高速大动态范围偏振消光比测试技术[J]. *红外*, 2020, 41(5): 40-44. Zhang Y Q, Xu G C, Yin B Q. Measuring technology of polarization extinction ratio with high speed and wide dynamic range[J]. *Infrared*, 2020, 41(5): 40-44.
- [42] 王冠钧, 严海东. 偏振消光比测量系统研究[J]. *测量与设备*, 2019, 41(5): 40-44. Wang G J, Yan H D. Research on polarization extinction ratio measurement system[J]. *Measurement System*, 2019, 41(5): 40-44.
- [43] Kraemer M, Baur T. Extinction ratio measurements on high purity linear polarizers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10655: 1065505.
- [44] Takubo Y, Takeda N, Huang J H, et al. Precise measurement of the extinction ratio of a polarization analyser[J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(1): 20-23.
- [45] Song J X, Wu H S, Xu J M, et al. High-power linearly-polarized tunable Raman fiber laser[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(9): 094209.
- [46] Wu Y L, Xiao Q R, Li D, et al. Thermal induced polarization coupling in double-cladding linearly polarized fiber lasers[J]. *Optics Communications*, 2022, 512: 128036.
- [47] 王岩山, 彭万敬, 王珏, 等. 4.45 kW 窄线宽线偏振近单模全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 1816003. Wang Y S, Peng W J, Wang J, et al. 4.45 kW narrow linewidth linear polarization near single mode all-fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1816003.
- [48] Genier E, Ghosh A N, Bobba S, et al. Cross-phase modulation instability in PM ANDi fiber-based supercontinuum generation [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3545-3548.
- [49] 陶悦. 基于保偏光子晶体光纤的高功率线偏振超连续谱光源[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019: 40-44. Tao Y. High power linear polarization supercontinuum source based on polarization maintaining photonic crystal fiber[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019: 40-44.
- [50] Gorman A, Fletcher-Holmes D W, Harvey A R. Generalization of the Lyot filter and its application to snapshot spectral imaging [J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5602-5608.
- [51] Lü M B, Wang P. Ray tracing in Rochon prisms with absorption [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14676-14690.
- [52] Li L, Dobrowolski J A. High-performance thin-film polarizing beam splitter operating at angles greater than the critical angle[J].

- Applied Optics, 2000, 39(16): 2754-2771.
- [53] Zheng J J, Zhou C H, Feng J J, et al. A metal-mirror-based reflecting polarizing beam splitter[J]. Journal of Optics A, 2009, 11(1): 015710.
- [54] 李春艳, 吴易明, 高立民, 等. 格兰-泰勒棱镜消光比分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 173-177.
Li C Y, Wu Y M, Gao L M, et al. Analysis of extinction ratio of a Glan-Taylor prism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 173-177.
- [55] 李居尚, 战荫泽, 张立东. 组合沃拉斯顿棱镜组的目标偏振检测方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20210339.
Li J S, Zhan Y Z, Zhang L D. Target polarization detection method of combined Wollaston prism group[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 20210339.
- [56] Kudenov M W, Miskiewicz M, Sanders N, et al. Achromatic Wollaston prism beam splitter using polarization gratings[J]. Optics Letters, 2016, 41(19): 4461-4463.

Review of Linearly Polarized Supercontinuum

Li Bo¹, Chen Shengping^{1,2,3*}, Li Jingsui¹, Song Jiaxin^{1,2,3}, Song Rui^{1,2,3}, Han Kai^{1,2,3}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

²Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

³State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract

Significance Linearly polarized supercontinuum laser source has linear polarization characteristics, which provides a new dimension for the research and application of supercontinuum. In recent years, many linearly polarized supercontinuum laser sources have been reported, and some achievements have been made in high birefringence realizing, high coherence and low noise, power increasing, and spectrum broadening. However, there are still some factors that limit the development of linearly polarized supercontinuum laser sources, and it is meaningful to make a summary and propose prospects for linearly polarized supercontinuum laser sources.

In existing reports on linearly polarized supercontinuum, the phenomenon of polarization extinction ratio (PER) degradation of linearly polarized supercontinuum has been found. However, due to the inability of the existing method to reflect the polarization states at each wavelength of the linearly polarized supercontinuum, the reason for PER degradation cannot be explained. We introduce two PER measurement methods suitable for broadband linearly polarized supercontinuum laser sources.

Progress We review the research results of linearly polarized supercontinuum fiber sources, mainly focusing on high PER realization, output power increasing, and spectrum broadening. The measurement methods of PER are introduced, especially two methods for linearly polarized supercontinuum laser sources.

Conclusions and Prospects The research progress of linearly polarized supercontinuum is mainly listed below.

1) The design of polarization-maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF). Traditional polarization-maintaining fiber realizes birefringence through stress rods. The birefringence coefficient is usually on the order of 10^{-4} . PM-PCF can achieve birefringence through the irregular arrangement of air holes. The birefringence coefficient of optimally designed PM-PCF reaches the order of 10^{-3} at the wavelength of above 1000 nm, resulting in a linearly polarized supercontinuum laser with PER of 21.2 dB.

2) In terms of coherence. Linearly polarized supercontinuum laser source generated in all-normal dispersion PM-PCF, which is essentially based on coherent nonlinear effects such as self-phase modulation and optical wave breaking, has a high degree of coherence. The coherence of linearly polarized supercontinuum lasers generated in all-normal dispersion PM-PCF is greater than 0.7 in the wavelength range of 650 nm.

3) Output power increasing. The output power of linearly polarized supercontinuum fiber lasers generated in PM-PCF is limited by the small core of the PM-PCF and its splice with the output fiber of the pump laser. By optimizing the splicing parameters, the coupling efficiency between PM-PCF and pump laser reaches 90%, and the output power of linearly polarized supercontinuum generated in PM-PCF reaches 93 W. Linearly polarized supercontinuum laser directly generated in polarization maintaining fiber amplifier is more suitable for output power increasing due to its extremely low loss of fiber splicing. The highest output power of linearly polarized supercontinuum reaches 322.5 W.

4) Spectrum broadening. The short wavelength edge of linearly polarized supercontinuum generated in PM-PCF

reaches 300 nm, and the long wavelength edge reaches 2300 nm. The spectrum of linearly polarized supercontinuum generated in PM-ZBLAN covers 350–4500 nm. The spectrum of linearly polarized supercontinuum generated in chalcogenide rib waveguide covers 2–10 μm .

It can be expected that in the near future, with the output power of the polarizing amplifier increasing and the use of large core nonlinear fiber, the output power of linearly polarized supercontinuum generated in polarization-maintaining fiber amplifier can exceed kilowatts. With the coupling efficiency between PM-PCF and pump laser increasing and better thermal management, the output power of the linearly polarized supercontinuum generated in PM-PCF is expected to exceed 200 W, and the spectrum is expected to reach the short wavelength and long wavelength limits of silica fiber.

The PER of a linearly polarized laser is usually measured by a rotating polarizer. This method is suitable for single-wavelength fiber lasers but cannot be used to measure the PER of each wavelength of a wide spectrum laser source such as supercontinuum. Two measurement methods suitable for the PER measurement of linearly polarized supercontinuum are introduced. By using these two methods, we can study the inherent mechanism of linearly polarized supercontinuum laser sources.

Key words polarization extinction ratio; linear polarization; supercontinuum; polarization-maintaining fiber; fiber lasers