

超连续谱激光光束质量特性

张世强, 蔡雷, 张政, 卢慧玲, 周松青, 瞿谱波

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 作为一种新型激光光源, 超连续谱光源由于具有白炽灯的光谱宽度和激光的亮度, 成为目前研究的一个热点, 但其光束质量的评价方法至今研究报道的较少, 给应用带来了不便。分析比较了各种常用光束质量评价方法的优缺点, 提出用测量典型波长光束质量, 结合光谱特性及光束同轴性分析评价超连续谱光源光束质量的方法, 并用此方法对一台超连续谱光源的光束质量进行了测量。结果表明, 超连续谱光源的光束质量与泵浦光的功率密切相关, 功率较小时 M^2 因子在 1.5 以下, 功率较大时 M^2 维持在 1.9 左右。另外, 可见光部分光束质量 M^2 因子在 1.5 左右, 且随着泵浦功率的提高, 光束质量越变越好, 维持在 1.3 左右。

关键词: 超连续谱; 光束质量; 评价方法

中图分类号: TN252 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)05-1428-05

Beam quality of the supercontinuum laser beam

Zhang Shiqiang, Cai Lei, Zhang Zheng, Lu Huiling, Zhou Songqing, Qu Pubo

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: As a new type of laser source, supercontinuum has become a hot study, owing to its incandescent wide spectra and the brightness of the laser, but the reports of the beam quality are few recently. It inconveniences the application of SC. The method of measuring the beam quality of supercontinuum was put forward by analyzing and comparing the beam quality evaluation methods. The beam quality of a supercontinuum source was measured. The results shows that the beam quality of the supercontinuum source is closely related to the pump power density. The beam quality M^2 factor is less than 1.5, when the pump power is small. The beam quality M^2 factor is around 1.9, when the pump power is larger. In addition, the beam quality M^2 factor of visible part is less than 1.5, and with the increase of the pump power, the beam quality of supercontinuum is getting better, the beam quality M^2 factor is maintained at about 1.3.

Key words: supercontinuum; beam quality; method of evaluation

0 引言

作为常规光源的白炽灯和荧光灯是由钨、卤素或者气等制成的,这类光源的光谱非常宽,常为400~1700 nm,但是灯丝的质量或气体激发的效率限制了其发光强度。同时,由于其发出的光不是相干光,光亮度低、光束质量较差。另一方面,激光虽然具有很好的空间相干性和很高的亮度,但激光通常是单色的,因此如需多种波长的光,就需使用多种激光器,使发出的光覆盖较宽的光谱,超连续谱激光解决了上述问题。这种光源可以发出超宽的白光光谱,同时还具有良好的方向性以及可以与激光相媲美的亮度^[1]。

在激光出现不久,1970年 Alfano 和 Shapiro^[2-3]就利用倍频锁模皮秒脉冲激光泵浦 BK7 玻璃,首次获得了400~700 nm的光谱,宣告了超连续谱(supercontinuum, SC)研究的开始。到目前为止,大多数研究都集中在其产生机理、理论模拟以及实验制作等^[4-6]方面,有关光源特性方面,张会^[7]等人对光子晶体光纤中超连续谱产生的蓝移光谱进行了分析,深圳大学郭媛^[8]等人对光子晶体光纤中超连续谱的相干性进行了实验研究,而对超连续谱激光光束质量研究报道的较少,给其应用带来了不便。文中分析比较了各种光束质量评价方法的优缺点,提出用测量典型波长光束质量,结合光谱特性及光束同轴性分析评价超连续谱光源光束质量的方法,并运用该方法在实验中对一台超连续谱光源的光束质量进行了测量。

1 超连续谱光源光束质量的评价方法

光束质量是光源的一项重要性能指标,光源的应用不仅取决于输出功率,与光束质量也密切相关。因此,作为超连续谱光源,有必要研究其光束质量特性。与一般光源的光束质量有特定的评价标准和测量方法不同,超连续谱光源作为一种新型的光源,没有现成的评价标准与测量方法可以依照。因此,文中拟在分析比较各种光束质量评价方法的基础上,研究超连续谱光源光束质量与输出功率(光谱)变化的关系,提出评价超连续谱光源的光束质量水平的方法。

1.1 常用激光光束质量的评价标准

常用的光束质量的评价参数包括:光斑半径、远

场发散角、衍射极限倍数、斯特列尔比、 M^2 因子、环围能量比BQ等。各种光束质量的评价参数对不同的应用目的,所反映光束质量的侧重点也不同^[9]。

(1) 远场发散角小的光束,其光斑半径则较大。这样单独用光斑半径或远场发散角来评价光束质量是不够全面的。

(2) 衍射极限倍数 β 值的测量依赖于对光束远场光斑半径的准确测量。超连续谱各种波长成分之间间隔很小,很难准确测量各种波长成分分别对应的远场光斑半径。

(3) 对于高斯型激光光束可用 M^2 因子定义光束质量,即光束光腰处光斑半径与远场发散角的乘积为一常数。避免了只用光斑半径或远场发散角作为光束质量的判据带来的不确定性。但其测量方法较为复杂,常用的移动CCD逐点测量,操作繁琐,且不能同时测量、实时检测光束质量。另外一种方法是采用正交散焦光栅 M^2 因子测量仪,该设备可以实时测量高重复频率脉冲激光的光束质量^[10]。

(4) BQ值是针对能量耦合型应用,结合光束在目标上的能量集中度进行光束质量的评价。需要准确测量光斑半径和空间绝对能量分布,这给测量带来不便。刘泽金等^[11]提出用光束传输因子(BPF)来评价光束质量,BPF的计算方法为:

$$BPF = 1.19P/P_{total} \quad (1)$$

式中: P 定义为远场半径,为 $1.22\lambda L/D$ 大小的桶中功率; L 为光束传输距离; P_{total} 为输出光束的总功率; D 为光束发射孔径的最小外接圆直径。

光束传输因子不仅可以用于评价单束激光的光束质量,还适合于评价相干合成激光光束质量,且具有测量次数少,误差小等优点。但测量中,小孔的大小与波长有关,而超连续谱光源的波长是连续变化的,且覆盖宽度比较大,小孔的大小不好确定。

1.2 超连续谱光源光束质量的评价方法

通过上面的讨论可知, M^2 因子可以比较客观地反映光束质量的本质,且针对超连续谱这种谱宽比较宽的光源,同时要保证典型波长光束质量评价的准确性,选择 M^2 因子作为光束质量评价因子是比较合适的。

先用滤波片对光源进行滤波,选择典型波长,用正交散焦光栅 M^2 因子测量仪测量典型波长的光束质量,然后结合光源的光谱特性和各波长激光的同

轴性,分析评价整个光源的光束质量。

此外,由于超连续谱光源的光谱特性与输出功率密切相关,因此,需在不同功率水平下开展实验,测量光源的光束质量。

2 超连续谱光源光束质量的测量

正交散焦光栅 M^2 因子测量仪是利用正交散焦光栅组与短焦透镜密接使用的方法测量多点的光强分布,由二阶矩定义束宽,采用双曲线拟合法计算得到 M^2 因子。此设备可以实时测量光束质量,且可以测量脉冲激光的 M^2 因子。用此设备对 Fianium 公司的一台 SC450-8 型超连续谱光源的光束质量进行了测量。SC450-8 的功率为 2.6W,泵浦光波长为 1 064 nm,光谱宽度为 450~2 000 nm。

2.1 典型波长光束质量测量

实验中,分别用 1 064 nm、670 nm、532 nm 滤波片对光源进行滤波后测量。实验示意图如图 1 所示。

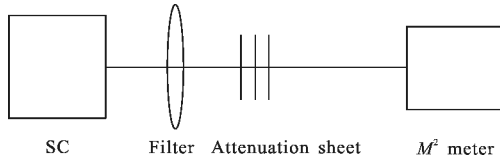


图 1 用正交散焦光栅 M^2 因子测量仪测量光源的光束质量示意图
Fig.1 Schematic diagram of beam quality measurement with orthogonal defocus grating M^2 meter

首先用 1 064 nm 的窄带滤波片滤波,然后经过中性衰减片衰减后,入射到 M^2 因子测量仪中。 M^2 因子测量仪采集到数据是泵浦光九个不同位置处的光斑,且九个光斑均匀的分布在探测器的表面上。然后对图像进行分析,拟合计算(见图 2)得到 M^2 因子的数值。

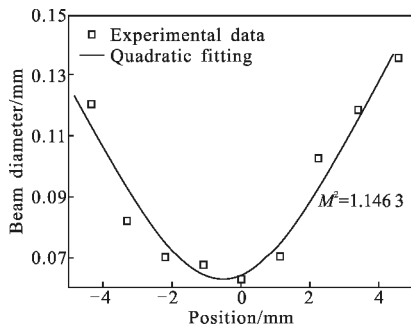


图 2 拟合计算 M^2 因子
Fig.2 Interface of M^2 calculation

实验中不断增大泵浦光的功率,测量了随着输出功率的不同,超连续谱中 1 064 nm 光的 M^2 因子的变化,拟合得到的测量结果如图 3 所示。

其次,分别用 670 nm、532 nm 滤波片对光源进行滤波后测量。测量结果见图 3。

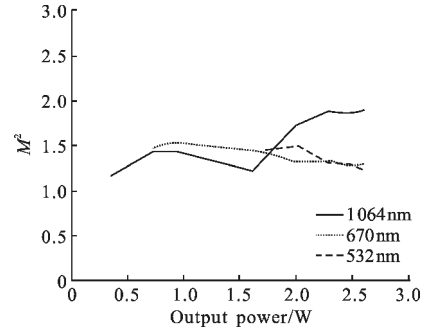


图 3 泵浦光、红光、绿光的光束质量
Fig.3 Beam quality of pumping, red and green light

从测量结果看出:

(1) 泵浦光(1 064 nm)在功率较低时,光束质量较好, M^2 因子在 1.2 以下,随着泵浦光功率的提高,光谱被展宽,超连续谱产生,此时泵浦光的光束质量逐渐变差,输出功率为 2 W 时, M^2 因子在 1.9 左右。此外,在实验过程中发现,非线性效应明显,展宽幅度较大的时候,泵浦光光束质量下降较明显。如在 0.7 W 作用时,非线性效应明显,光谱展宽到可见光部分,开始出现红光,此时泵浦光光束质量下降较快, M^2 因子从 1.2 增大到 1.5 左右,随着泵浦功率的进一步提高,超连续光谱也逐渐平坦,泵浦光光束质量变化幅度不是很大时,维持在 1.9 左右。

(2) 可见光部分光束质量在刚产生可见光时,光束质量在 1.5 左右,随着泵浦功率的提高,光谱持续展宽,且逐渐平坦,可见光部分的光束质量逐渐变好,维持在 1.3 左右。

通过上面的实验,测量得到了泵浦光、红光以及绿光等典型波长的光束质量,此外,根据超连续谱产生机理及输出光谱,可以推断其它波长的光束质量与典型波长光束质量相类似。

2.2 典型波长光斑形态测量

保持超连续谱光源和光斑仪的位置不变,分别测量不加滤波片、加 1 064 nm 滤波片、加 532 nm 滤波片、加 670 nm 滤波片时的光斑,并根据需要选择合适的衰减片数目,使光斑仪能够准确测量光源的

光斑。测量了不同功率情况下,整个光源以及泵浦光的光斑。测量结果如图 4 所示。

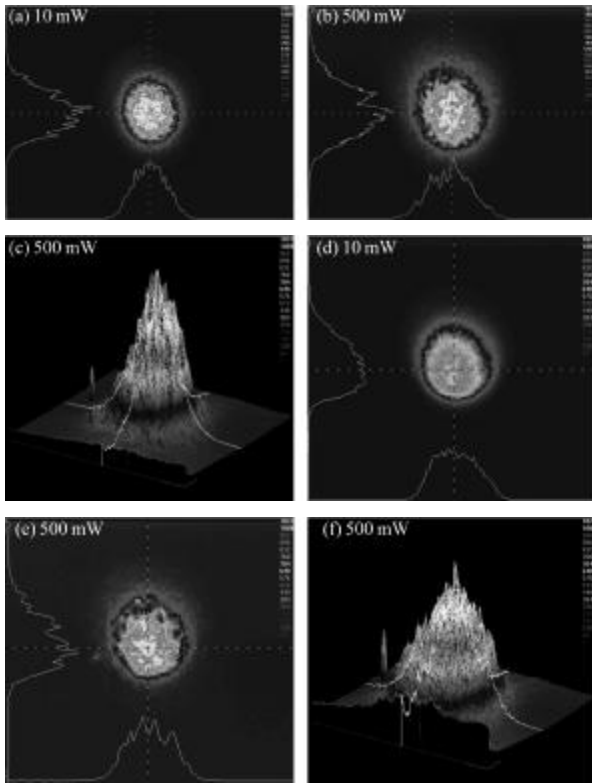


图 4 整个光源及泵浦光光斑随输出功率变化图

Fig.4 Change of the whole light source and pumping light with the power variety

从图可以看出,在输出功率较低(小于 500 mW)时,整个光源的光斑和泵浦光的光斑基本相同。随着功率的增大,各种非线性效应的作用,光谱展宽,产生超连续谱,泵浦光的光斑明显变大,能量向周围扩散,能量集中度下降,可以看出,泵浦光的光束质量随着功率的增加和非线性效应的增强而逐渐变差,这与上面得到的结论是一致的。另外,整个光源的光斑也逐渐变大,且光轴基本上没变,和泵浦光始终保持同轴。此外,还测量了超连续谱中新产生频率成分的光斑。并选择 670 nm 和 532 nm 的窄带滤波片测量了典型波长的光斑。测量结果见图 5。

从图中不难看出,在开始出现可见光分量时,光斑形状并不规整,且光斑较大,能量分散,随着入射功率的增加,非线性效应的增强,光谱充分展宽且趋于平坦,红光和绿光的光斑成规则的圆形,且光斑变小,能量越来越集中,可以看出新产生的可见光成分的光束质量随着功率的提高而逐渐变好,且趋于稳

定。这与上面得到的结论一致。

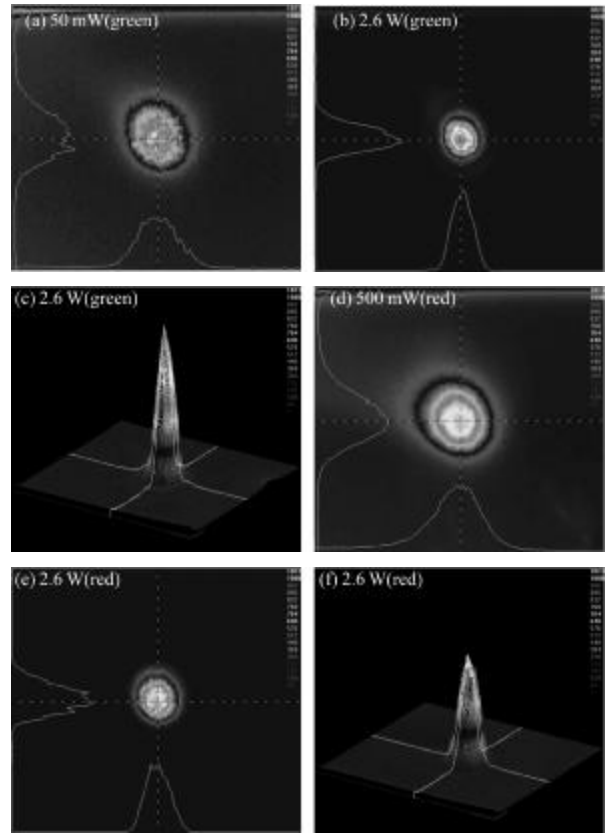


图 5 可见光光斑随输出功率变化图

Fig.5 Change of visible light spot with the power variety

由于实验过程中始终保持超连续谱光源和光斑仪的位置不变,且从图 4、图 5 中可以看出,整个光源、泵浦光、红光以及绿光的光斑基本上在光斑仪靶面的中央,即使光斑变大或缩小,光斑中心始终保持在靶面中心,且基本呈圆点对称分布,这就说明所有成分光的光轴始终是保持一致的。

2.3 超连续谱光源光束质量

通过上面的分析,可以得到以下结论:

(1) 超连续谱光源的红外部分的能量占整个光源的大部分,其光束质量 M^2 因子随着泵浦功率的提高而增大, M^2 因子最大为 1.9 左右。

(2) 可见光部分的光束质量 M^2 因子在 1.5 以下,且随着泵浦功率的提高而减小。在较高功率时维持在 1.3 左右。

3 结 论

超连续谱光谱由于其超宽的光谱,使其不同于常见的激光器(常见激光器尽量要求单色性),但整

个光束从一个发射孔径出来,又不同于简单的将多个激光光束进行合束。另外,超连续谱光源的特殊性也决定了对其特性的测量也不同于一般的激光光源。文中以一台超连续谱激光光源为对象,对光源的光束质量进行了深入细致的研究。结果表明,超连续谱光源的光束质量和输出功率(光谱)密切相关,泵浦光的光束质量 M^2 因子随着功率的提高而增大,可见光部分的光束质量 M^2 因子随着泵浦功率的提高以及光谱展宽而较小。

参考文献:

- [1] Zhang Xing. Supercontinuum source with incandescent wide spectra and the brightness of the laser[J]. OME Information, 2008, 25(2): 21-23. (in Chinese)
张星. 超连续谱激光-白炽灯的光谱宽度激光的亮度[J]. 光机电信息, 2008, 25(2): 21-23.
- [2] Alfano R R, Shapiro S L. Emission in the region 400 to 700 nm via four-photon coupling in glass [J]. Phys Rev Lett, 1970, 24: 584-587.
- [3] Alfano R R, Shapiro S L. Observation of self-phase modulation and small scale filaments in crystals and glasses [J]. Phys Rev Lett, 1970, 24: 592-594.
- [4] Wang Wei, Zhu Ziming. Analysis of photonic crystal fibers and its application in supercontinuum[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 684-688. (in Chinese)
王伟, 竺子民. 光子晶体光纤分析及其在超连续谱中的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 684-688.
- [5] Zhang Bin, Hou Jing, Jiang Zongfu. Tellurite glass microstructured fibers for mid-IR supercontinuum generation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 328-331. (in Chinese)
张斌, 侯静, 姜宗福. 碲化物微结构光纤应用于中红外超连续谱的产生[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 328-331.
- [6] Govind P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Translated by Jia Dongfang, Yu Zhenhong. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 49-70. (in Chinese)
Govind P Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 译. 第 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2002: 49-70.
- [7] Zhang Hui, Wang Wei, Chang Shengjiang. Blue-shifted spectra of supercontinuum generation in photonic crystal fibers [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39 (11): 1938-1942. (in Chinese)
张会, 王伟, 常胜江. 光子晶体光纤中超连续谱产生的蓝移光谱分析[J]. 光子学报, 2010, 39(11): 1938-1942.
- [8] Guo Yuan, Ruan Shuangcheng. Analysis on the coherence properties of supercontinuum spectra generated in a photonic crystal fiber[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2007, 24(2): 149-153. (in Chinese)
郭媛, 阮双琛. 光子晶体光纤产生超连续谱的相干性研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2007, 24(2): 149-153.
- [9] Gao Wei, Wang Yunping, Li Bin. Study on characterization and diagnosis of high-power laser beam quality [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 21-24. (in Chinese)
高卫, 王云萍, 李斌. 强激光光束质量评价和测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 21-24.
- [10] Geng Yifeng, Xu Xiaojun, Xi Fengjie. Real-time measurement of beam quality factor M^2 based on defocus gratings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35 (s1): 98-100. (in Chinese)
耿义峰, 许晓军, 习锋杰. 一种基于散焦光栅的光束质量 M^2 因子实时测量技术[J]. 中国激光, 2008, 35(s1): 98-100.
- [11] Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 46(4): 773-778. (in Chinese)
刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. 中国激光, 2009, 46(4): 773-778.