

超连续谱激光光束质量评价及提升方法

李 瑶, 何衡湘, 万 勇

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要:针对超连续谱的光束特性,分析了各种光束质量评价方法对超连续谱激光器输出光束质量评价的适用性,并综合各个评价方法的优缺点,找到一种最适合超连续谱光束质量的评价方法。要提高超连续谱激光光束质量,可以从两方面入手:一种是将光束的强度调整成为近高斯分布,另一种方法是补偿光束波前像差。对强度的补偿方法为增益导引效应,对波前像差的补偿方法有相位共轭镜、可变形镜等技术。利用球差校正板对球差进行补偿,也可以提高光束质量。

关键词:超连续谱激光器;光束质量;评价方法;球差补偿;球差校正板

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.04.011

Evaluation and improvement of beam quality of supercontinuum laser

LI Yao, HE Heng-xiang, WAN Yong

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the beam characteristics of supercontinuum laser, several beam quality evaluation methods for output beam quality of supercontinuum laser are analyzed, and the merit and demerit of every method are summarized. The most adaptive method of measuring the beam quality of supercontinuum laser was put forward by analyzing and comparing those evaluation methods. To improve the beam quality of supercontinuum laser, there are two methods. One is to adjust the intensity of the beam into a nearly Gaussian distribution, and the other is to compensate the wavefront aberration of the beam. The method of compensating the intensity is the gain guidance effect, and the compensation methods of wavefront aberration include the phase conjugate mirror, the deformable mirror, and so on. The spherical aberration can be compensated by the spherical aberration corrector, then the beam quality can also be improved.

Key words: supercontinuum laser; beam quality; evaluation method; spherical aberration compensation; spherical aberration corrector

1 引 言

随着20世纪90年代末光子晶体光纤的问世,人们利用这种具有诸多优良特性的新型光导纤维极大地拓展了制造超宽带、高亮度相干超连续谱光源的研究空间,大批新技术、新方法不断涌现。在实际应用中,采用在宽波段范围内产生的平坦超连续谱光源,不仅可以满足系统对光谱带宽的要求,还能提

高测量精度,降低功率均衡的技术难度,平坦超连续谱光源已成为国内外研究机构的重要研发方向。而且,由于超连续谱具有高的输出功率、平坦的宽带光谱、高度的空间相干性等特性,能大大提高信噪比、减小测量时间以及加宽光谱测量范围,因此可广泛应用于光纤衰减测量、干涉测量仪、光相干摄影技术、光谱学分析(医学成像、光纤通信、军事)等领

作者简介:李 瑶(1990-),男,硕士研究生,主要从事激光器设计以及光束特性研究。E-mail:18428067196@163.com

通讯作者:何衡湘(1968-),男,研究员,主要从事光电系统与电子对抗技术研究。E-mail:hhxhyx@163.com

收稿日期:2017-08-15; **修订日期:**2017-10-06

域。因而超连续谱激光器的研究和应用也飞速发展。

然而,热效应问题是制约超连续谱激光系统发展的主要障碍之一。增益介质在抽运过程中由于热积累而导致严重的热效应,包括光束质量的破坏,如热致双折射退偏、热透镜效应、热致双焦点等,因而影响了输出光束的质量。

光束质量是超连续谱应用中的一个极其关键的参数,通常认为它是从质的方面来评价激光束的传输特性,对理论分析和激光器的设计、制造、检测、实际应用等方面具有重要意义。因此根据超连续谱的光束特性,准确的衡量其光束质量是必要的。分析各种评价方法对超连续谱光束质量评价的优点和缺点,(综合考虑设计)优选一种适合超连续谱光束质量评价的方法。然后分析几种提高超连续谱光束质量的方法,论述自适应光学技术对提高超连续谱光束质量的有效性。

2 光束质量评价方法

基于光束质量在超连续谱激光源应用中的重要意义,对超连续谱光源光束质量进行评价是十分必要的。针对不同的应用目的,人们对激光的光束质量的定义也不尽相同。常用的光束质量的评价参数包括:聚焦光斑尺寸、远场发散角、衍射极限倍数 β 、斯特列尔比、环围能量比 BQ、 M^2 因子等。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。

2.1 聚焦光斑尺寸

聚焦光斑尺寸是指光束经过聚焦后,焦平面光斑的大小。用聚焦光斑尺寸评价光束质量简便直观,然而聚焦光斑尺寸不仅与光束自身特性有关,而且与聚焦系统的特性有关。因此,只用聚焦光斑尺寸评价超连续谱光束质量是不够的。

2.2 远场发散角

远场发散角表征光速传输一定距离的发散程度。远场发散角小的光束其光斑半径较大。用它来评价超连续谱的光束质量不够全面。

2.3 衍射极限倍数 β

衍射极限倍数 β 是实际聚焦光斑尺寸 r 与衍射极限光斑尺寸 r_0 的比值。衍射极限倍数 β 的测量依赖于光束远场光斑半径的测量,然而超连续谱个波长成分间的间隔很小,难以准确测量各波长成分的远场光斑半径。因此,用衍射极限倍数 β 评价超

连续谱光束质量也不合适。

2.4 斯特列尔比与环围能量比

斯特列尔比指实际远场光斑峰值光强与理想无波像差的光斑峰值光强的比值。环围能量比,也称桶中功率比,定义为规定尺寸内理想光斑靶面上的功率与实际光斑靶面上的功率的比值得平方根。它针对远距离能量输送、耦合型的应用。

而超连续谱含有多个波长成分,因而测量光斑半径和空间绝对能量的分布难度较大。

2.5 M^2 因子

M^2 因子定义为实际光束的空间束宽积与理想光束的空间束宽积之比,束宽积是指光束光腰处光斑半径与远场发散角的乘积(其值为常数)。与其他诸多评价光束质量的参数相比, M^2 因子更为全面和准确的表征了激光光束质量。然而,一般的测量 M^2 因子的方法只是对超连续谱光谱成分分别进行测量,并没有对超连续谱整体光束质量进行测量。这样不能反应整个光源的特性,因而失去其整体作为新型的宽光谱源的特性。

通过上面的讨论,再结合超连续谱的宽谱特性以及兼具传统激光优点的特点,因而可以采用正交散焦光栅 M^2 因子测量仪测量,此仪器正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。

3 提高超连续谱光束质量的方法

在超连续谱激光器的发展旅程中,提高功率和光束质量一直是研究的重点。提高光束功率一般采用 MOPA 技术,但是由于热效应的存在光束质量在放大的过程中会逐渐恶化。提高激光的光束质量可以从两方面入手:一种是将光束的强度调整成为高斯分布,另一种方法是补偿光束波前像差。对强度的补偿的方法为增益导引效应,对波前像差的补偿方法有相位共轭镜、可变形镜等技术。由于激光增益介质热效应导致的最主要的像差是初级球差,因而波前畸变的输入光束一般都具有负的球面系数,因此补偿球差可以有效地提高光束质量。因此,采用球差校正板补偿其球差可以提高光束质量。

验证如下:将平均功率为 12 W 的质量较差的激光(M^2 因子为 2.4)从主控振荡器注入到放大器

中,通过球差补偿板对其球差进行补偿。分析球差,可以用泽尼克多项式来分析球差对光束质量的影响。由于泽尼克多项式具有正交性、圆对称性,这和光斑的性质非常相似,因而可用来表示光学畸变。利用泽尼克多项式对波前进行分解,泽尼克多项式中每项都对应光束中一种特定的像差。因而十分适合用来分析球差对光束质量的影响。波前用泽尼克多项式的展开如下:

$$W(x, y) = \sum_{n=1}^N C_n Z_n(x, y) = \sum_{n=1}^N C_n Z_n(\rho, \theta) \quad (1)$$

其中, n 为径向阶数; ρ 和 θ 为极坐标; c_n 为其系数。为了证明光束质量的提高,激光场波前畸变的计算如下:

$$W_{ab}(x, y) = W(x, y) = \sum_{n=1}^4 C_n Z_n(x, y) \quad (2)$$

如图 1 所示,激光沿 z 轴传播时,波前畸变渐减。而如图 2 所示, M^2 因子也有同样的趋势。

第十一次泽尼克多项式的系数 C_{11} 表示球面像差,它是影响光束质量的主要像差,也叫球差系数。激光场在放大器中传播时球差系数的演变过程如图 3 所示。输入光束的球差系数为负。尽管球差系数沿 z 轴方向递增而其绝对值递减,但是表征光束质量的是球差系数的绝对值,因而球差、 M^2 因子等具有相同的变化趋势。

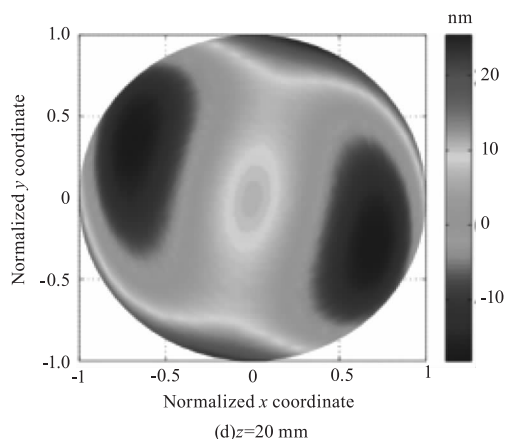
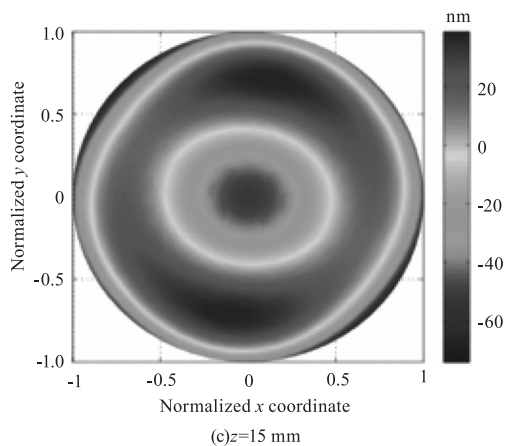
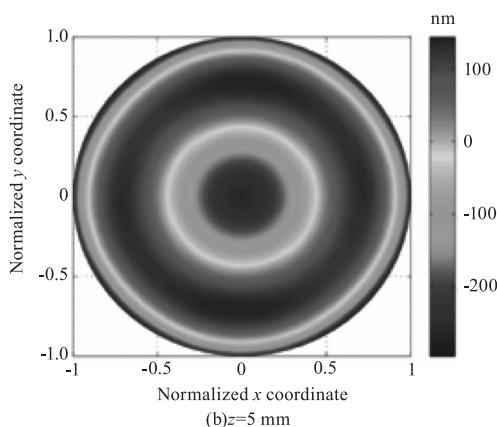
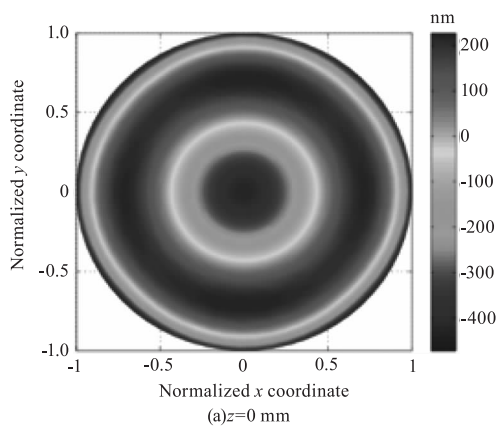


图 1 其中几个点的波前畸变

Fig. 1 Wavefront aberration of several points

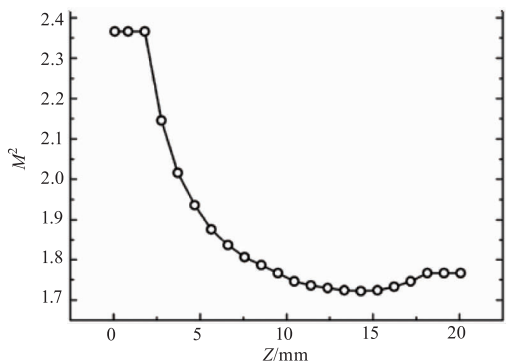


图 2 激光质量的演变

Fig. 2 Evolution of beam quality

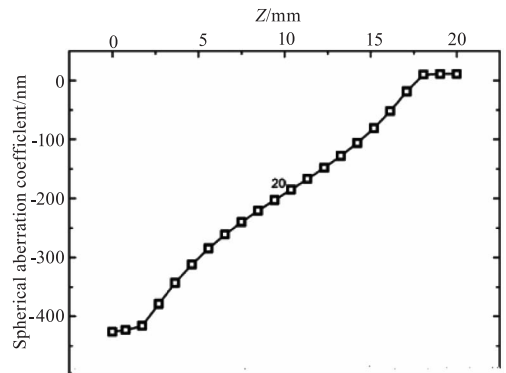


图 3 激光球差系数的演变

Fig. 3 Evolution of the spherical aberration coefficient

如上所示,最后我们获得平均功率 25 W 光束质量较好(M^2 因子为 1.7)的光束,光束质量明显提高。

4 结 论

针对超连续谱激光器输出的宽谱特点,分析了各种光束质量评价方法对超连续谱激光器输出光束质量评价的适用性,结合其优缺点用一种适合超连续谱激光器输出时的光束质量评价方法。如要提高超连续谱激光器输出光束质量,可以对波前像差进行补偿来提高输出光束质量,对强度的补偿的方法为增益导引效应,对波前像差的补偿方法有相位共轭镜、可变形镜等技术。采用球差校正板补偿其球差亦可提高光束质量。

参考文献:

- [1] Aijun Jin, Jing Hou, Bin Zhang, et al. Theoretical models for beam quality evaluation of fiber supercontinuum sources[C]. OSA, 2013.
- [2] E Esposito, J Harris, D Burns, et al. Measurement of white-light supercontinuum beam properties from a photonic crystal fibre using a laser scanning confocal microscope[J]. Meas. Sci. Technol., 2007, 18(8): 2609–2615.
- [3] Ian J Arnold, Hans Moosmüller, Noopur Sharma, et al. Beam characteristics of fiber-based supercontinuum light sources with mirror-and lens-based beam collimators[C]. Optical Society of America, 2014.
- [4] LIU Zejin, ZHOU Pu, XU Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(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, 36(4): 773–778.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] LI Xiaoming, SHEN Xueju, LI Gang, et al. Evaluating specifications of laser beam quality based on beam profile [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 9–16. (in Chinese)
李晓明, 沈学举, 李刚, 等. 基于光斑轮廓特征的激光光束质量简易评价方法[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 9–16.
- [8] JIN Aijun, HOU Jing, JIANG Zongfu. Evaluation of the beam quality of supercontinuum source using supercontinuum M^2 Factor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 32–36. (in Chinese)
靳爱军, 侯静, 姜宗福. 使用超连续谱 M^2 因子评价超连续谱光源光束质量[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502006.
- [9] HHUANG Linhao, LIAO Xuebing, ZHAO Haiyan, et al. Utilizing laser beam analyzer to measure M^2 [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2197–2200. (in Chinese)
黄林昊, 廖学兵, 赵海燕, 等. 利用光束质量分析仪测量 M^2 因子[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2197–2200.
- [10] HU Shijie, WU Jian. Evaluation and improvement of beam quality of slab laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(4): 68–72. (in Chinese)
胡诗杰, 吴健. 板条激光器光束质量评价及提高光束质量的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(4): 68–72.