

高能窄带激光系统中光谱纯度检测的实验研究

吴月婷^{1,2} 范元媛¹ 刘广义¹ 周 翊¹

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对高能窄带激光系统对光谱纯度检测的需求, 提出通过精确测量激光光谱能量分布情况分析光谱纯度的方法, 并进行了相关实验研究。该光谱纯度检测装置主要由中阶梯光栅、精密移动刀口、灵敏功率计等组成, 实验利用该装置分析了复合腔结构准分子激光系统输出激光的光谱纯度, 实验结果表明通过精确测量激光中各光谱成分所占的能量比例可实现光谱纯度的检测。该光谱纯度检测装置结构紧凑、成本较低、测量准确度高, 在窄带激光系统搭建过程中具有重要的应用价值。

关键词 光谱学; 光谱能量分布; 刀口; 复合腔; 双腔结构

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.073002

Experimental Study on Spectral Purity Detecting in High-Energy Narrow-Linewidth Laser System

Wu Yueting^{1,2} Fan Yuanyuan¹ Liu Guangyi¹ Zhou Yi¹

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For the demand of spectral purity detecting in high-energy narrow-line width laser system, a method of spectral purity analysis by measuring the spectral energy distribution is reported and experimentally studied. The spectral purity analysis device is mainly composed of echelle grating, moveable blade, sensitive power meter, etc. The output spectrum of excimer laser system with a compound cavity is analysed by using this device. The experimental results show that the spectral purity detection can be achieved by accurately measuring the energy ratio of the spectral components. The spectral purity analysis device has the advantages of compact structure, low cost and high accuracy, which has important application in the building process of high-energy narrow-linewidth laser system.

Key words spectroscopy; spectral power distribution; knife-edge; compound cavity; dual-cavity structure

OCIS codes 300.3700; 300.6540; 230.0040; 140.2180

1 引言

窄线宽激光光源由于具有良好的单色性及时间相干性, 被广泛应用于激光相干合成、激光雷达^[1]、光纤传感、受激拉曼散射^[2]、精密微细加工及光刻^[3]等领域。窄线宽激光通常是通过在谐振腔内或腔外加入选频元件(如棱镜、光栅、标准具等), 增加非被选模的损耗而获得的, 但由于激光系统引入了较大的插入损耗, 一般输出功率较低。

目前, 国内外获得高功率、窄线宽激光输出的技术主要有两种, 分别是注入放大技术及复合腔技术。其中, 注入放大技术采用双腔结构, 主振荡腔产生优质窄线宽种子激光, 放大腔对其进行能量放大。典型的双腔结构主要有主振-功率放大(MOPA)结构^[4]、采用注入锁定技术的主振-功率振荡(MOPO)结构^[5]及采用环形腔技术

收稿日期: 2015-03-09; 收到修改稿日期: 2015-03-18; 网络出版日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61405202)、北京市科技专项(Z141104004414069)

作者简介: 吴月婷(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事准分子激光及固体激光光谱控制方面的研究。

E-mail: wuyueting@aoe.ac.cn

导师简介: 周翊(1970—), 男, 博士, 研究员, 主要从事准分子激光技术、固体激光技术、多光束激光相干耦合、光纤激光器等方面的研究。E-mail: zhoyi@aoe.ac.cn(通信联系人)

的主振-功率再生放大(MOPRA)结构^[6]。复合腔技术采用耦合腔结构,通过被选模式的反馈耦合,使输出激光在保证窄线宽的条件下功率成倍提高。目前掠射棱镜复合腔结构及掠射光栅复合腔结构已被成功应用在光参量振荡器^[7-9]、脉冲染料激光器^[10-11]、钛宝石激光器^[12]及半导体激光器^[13-15]中。

注入放大技术及复合腔技术主要基于激光的模式竞争效应实现窄线宽、高功率的同时输出,在此类激光系统的搭建过程中,其系统参数需要精确调节,避免激光系统输出能量的提升是以光谱的展宽为代价。以准分子激光系统为例,由于其高增益与高自发辐射率造成的自发辐射放大效应显著,且准分子激光脉宽短、腔长长,单脉冲在谐振腔中往返次数少,所以将注入放大技术及复合腔技术引入准分子激光系统时,若系统参数未精确设置,易造成模式竞争不充分的后果,即输出激光光谱中除窄线宽部分外,光谱底部会存在强度较弱的宽带包络。因此需要对其输出激光的光谱纯度进行检测,并依据光谱纯度分析结果对系统参数进行优化调整,以保证输出窄线宽激光的光谱纯度。

基于高功率、窄线宽激光系统光谱纯度检测的需求,本文提出了通过精确测量激光中各光谱成分的能量分布情况分析光谱纯度的方案,利用复合腔结构的准分子激光系统对检测方案进行了相关的实验验证,实验结果表明超高分辨率光谱仪(LTB ELIAS III)在检测此类激光系统的光谱时存在局限性,而本文提出的检测方案可实现特定光谱的准确检测。

2 实验条件及装置

实验使用的光谱纯度检测装置如图1所示。待测激光经光纤耦合传输至入射狭缝,折叠反射镜及离轴抛物面反射镜对入射到光栅的光束进行准直和扩束。准直激光沿垂直光栅槽面方向入射到中阶梯光栅,准 Littrow 自准直工作模式(满足 $\alpha = \beta = \theta_0$, 光栅方程为 $2d\sin\theta_0 = m\lambda$, 其中 α 为入射角, β 为衍射角, θ_0 为闪耀角, d 为光栅常数, λ 为闪耀波长)的光栅对入射到其表面的激光进行色散分光,将不同波长的光谱成分分开,对应闪耀级次的衍射光返回后经离轴抛物面反射镜聚焦在其焦平面上,形成一系列按波长顺序排列的窄缝像。抛物面反射镜焦平面处放置刀片 K, 固定在俯仰、高低可调节的光学调整架上,调整刀片位置使其垂直于输出激光轴线方向。光学调整架安装在可沿垂直激光轴线方向移动的平台,移动平台配有标准测微头,旋转测微头,可将刀片逐步由完全遮挡输出激光状态移动至完全未遮挡输出激光状态。焦平面后方放置灵敏功率计 E, 对通过刀口的特定光谱成分的能量进行精确测量。

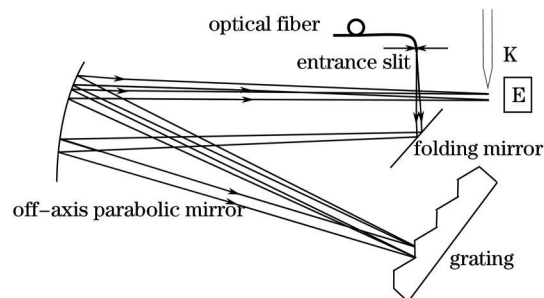


图1 光谱纯度检测实验装置图

Fig.1 Experimental configuration of spectral purity detection

需要注意的是:需将实验装置放置在黑色避光密封盒子中,以排除外部杂散光对实验结果的干扰;同时在光栅其余级次衍射方向及装置内部非通光位置安置多个黑色吸光介质,限制装置内部的杂散光;此外使用的刀片切面要尽可能薄,尺寸大小要足够覆盖抛物面反射镜焦平面处的激光截面。

实验使用上述光谱纯度检测装置分析复合腔结构准分子激光系统^[6]的光谱纯度,该激光系统由两个耦合的腔构成:光栅选频腔及宽带谐振腔,两腔共用增益介质。当复合腔系统未优化时,考虑到输出光谱中除光栅选频的窄带光谱外,会存在宽谱的底部包络。压窄后的激光线宽理论计算值在皮米量级,综合考虑光栅分辨率和功率探测计灵敏度的需求,选择 Thorlabs 公司的 79 line/mm、闪耀角为 75° 、尺寸为 $25\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 9.5\text{ mm}$ 的中阶梯光栅进行色散分光,193 nm 波段焦距为 327 mm 的抛物面反射镜进行聚焦成像, Ophir 公司的纳瓦级灵敏光电二极管功率计进行光谱能量的探测。

3 实验结果及分析

转动移动平台的测微头,使刀片沿垂直激光轴线方向移动,由完全遮挡激光状态移至完全未遮挡激光状态,转动测微头的同时记录相应条件下的能量数据。依据实验中光栅的线色散值及待测激光系统的自然线宽,选择刀片的移动步长为0.5 mm。

实验分别测量了光栅选频腔单独振荡条件以及复合腔振荡条件下输出激光的光谱能量分布,得到的实验结果如图2所示。其中,图2(a)是根据移动刀口逐渐使激光中特定光谱成分通过过程中灵敏功率计的原始测量数据绘制的能量随步长变化图。图2(b)是根据对原始数据进行背景光去除(即在刀片完全遮挡激光状态下将灵敏功率计进行归零处理)、逐差处理(取能量差值)后得到的各光谱成分能量分布图。

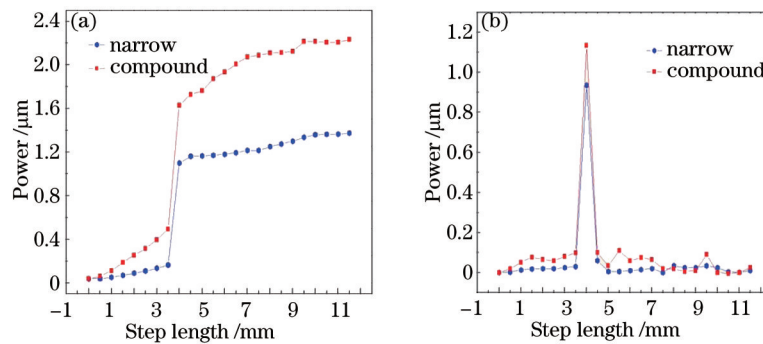


图2 光谱能量分布图。(a) 原始数据;(b) 处理后数据

Fig.2 Diagram of spectral power distribution. (a) Original data; (b) processed data

由图2可知,光栅选频腔单独振荡条件下,输出激光能量大部分集中在对应的窄线宽部分,光谱纯度较好;而对于复合腔结构的激光系统,其输出激光能量未完全集中在窄线宽部分,存在未被完全抑制的宽带频谱能量分布,光谱纯度较差,推测复合腔系统各参数未调整至最佳条件。

实验结果表明,通过精确测量激光中各光谱成分所占的能量比例可实现光谱纯度的检测,该方法可应用在复合腔及双腔激光系统的调节过程中,依据光谱纯度分析结果对激光系统参数进行优化调整。

利用LTB公司的ELIAS III型商用高分辨率光谱仪(分辨率为22 fm)探测上述复合腔振荡条件下输出激光的光谱,得到如图3所示的光谱分布图。光谱图中除窄线宽光谱外,未观察到强度较弱的宽带底部包络,可见,由于高分辨率光谱仪极高的光谱分辨率伴随而来的高色散和高衰减,造成其在测量此类激光系统输出激光的光谱纯度时存在一定的缺陷,原本的未被完全抑制的宽带频谱被淹没在光谱仪的噪声信号中,进而造成测量误差,光谱纯度的检测结果偏离真实情况。本文提出的光谱纯度测量装置基于光谱能量分布的精确测量,在分析高功率窄线宽激光系统输出激光的光谱纯度时具有更高的准确度,是对特定光谱探测的有力修正和补充。

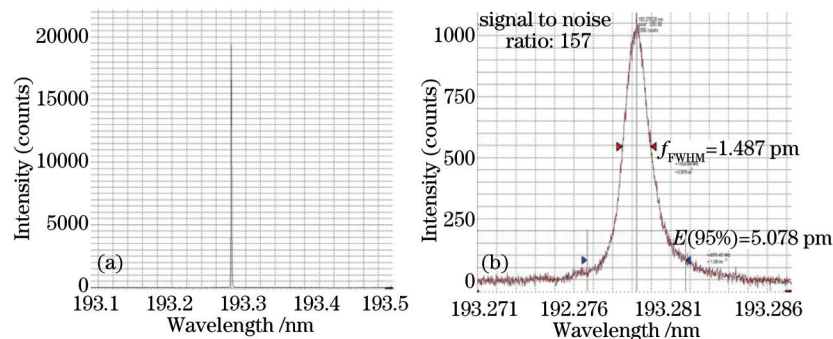


图3 高分辨率光谱仪光谱图。(a) 大探测窗口;(b) 小探测窗口

Fig.3 High resolution spectrum. (a) Big detection window; (b) small detection window

4 结 论

基于精确测量激光各光谱成分能量分布的方法对复合腔准分子激光系统的输出激光光谱纯度进行了实验研究,实现了输出激光光谱纯度的分析。本光谱纯度分析装置克服了高分辨率光谱仪器在测量复合腔

结构以及双腔结构激光系统时存在的高色散及高衰减问题,测量准确度较高,且装置结构紧凑、体积小、成本低、操作简单,适合推广应用于各类复合腔及双腔结构的激光系统,对输出激光的光谱纯度进行检测。现阶段,实验定位于光谱纯度的定性分析,可满足激光系统搭建过程中的应用需求。在今后的工作中将考虑使用图像传感元件与能量探测元件同时记录衍射光谱图样及能量分布,并对其进行波长标定,进一步优化光谱纯度检测装置。

参考文献

- 1 Sammy W Henderson, Stephen M Hannon. Advanced coherent lidar system for wind measurements[C]. SPIE, 2005, 5887: 58870I.
- 2 T R Loree, R C Sze, D L Barker. Efficient Raman shifting of ArF and KrF laser wavelengths[J]. Appl Phys Lett, 1977, 31(1): 37-39.
- 3 Rainer Paetzel, Hans S Albrecht, Peter Lokai, *et al.*. Excimer lasers for super-high NA 193 nm lithography[C]. SPIE, 2003, 5040: 1665-1671.
- 4 Du Wenbo, Xiao Hu, Wang Xiaolin, *et al.*. Narrow-linewidth high power fiber laser with output power of 334 W in all-fiber MOPA format[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(8): 1996-1997.
杜文博,肖 虎,王小林,等. 主振荡功率放大结构窄线宽全光纤激光器 334 W 高功率输出[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 1996-1997.
- 5 J Goldhar, J Dickie, L P Bradley, *et al.*. Injection locking of a Xenon Fluoride laser[J]. Appl Phys Lett, 1977, 31(10): 677-679.
- 6 Hiroaki Tsushima, Masaya Yoshino, Takeshi Ohta, *et al.*. Reliability report of high power injection lock laser light source for double exposure and double patterning ArF immersion lithography[C]. SPIE, 2009, 7274: 72743L.
- 7 Wu Qiong, Xu Zuyan, Zhang Dongxiang, *et al.*. Tuning of an optical parametric oscillator using a compound cavity[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(2): 138-142.
吴 穷,许祖彦,张东香,等. 光参量振荡器的复合腔调频[J]. 中国激光, 1997, 24(2): 138-142.
- 8 Boon Engering J M, Gloster L A W, Vander Veer W E, *et al.*. Highly efficient single-longitudinal mode β -BaB₂O₄ optical parametric oscillator with a new cavity design[J]. Opt Lett, 1995, 20(20): 2087-2089.
- 9 Zhou Yi, Xu Zuyan, Deng Daoqun, *et al.*. Optical parametric system with a compound cavity and a grazing-incidence prism[J]. J Opt Soc Am B, 1997, 14(6): 1496-1500.
- 10 Xu Zuyan, Pan Shaohua, Deng Daoqun. Tuning of a pulsed dye laser using a compound cavity[J]. Acta Physica Sinica, 1981, 30(6): 820-826.
许祖彦,潘少华,邓道群. 脉冲染料激光的复合腔调频[J]. 物理学报, 1981, 30(6): 820-826.
- 11 Wu Ling'an, Xu Zuyan, Deng Daoqun, *et al.*. Tuning of a compound cavity with a grazing-incidence grating[J]. Laser, 1981, 9(11): 698-702.
吴令安,许祖彦,邓道群,等. 掠射光栅复合腔调频[J]. 激光, 1981, 9(11): 698-702.
- 12 Do Kyeong Ko, Gwon Lim, Sung Ho Kim, *et al.*. Self-seeding in a dual-cavity-type pulsed Ti:sapphire laser oscillator [J]. Opt Lett, 1995, 20(7): 710-712.
- 13 Fu Wanqin. Research on External Cavity Feedback Spectrum-Improvement of High Power Semiconductor Lasers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 35-57.
付万琴. 外腔反馈改善高功率半导体激光器频谱特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 35-57.
- 14 Chen Shaowei, Lü Xueqin, Zhang Jiangyong, *et al.*. Blue-violet broadly tunable grating-coupled external cavity semiconductor laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 111405.
陈少伟,吕雪芹,张江勇,等. 蓝紫光宽带可调谐光栅外腔半导体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 111405.
- 15 Wei Fang, Chen Dijun, Xin Guofeng, *et al.*. A compact and rugged tunable external cavity diode laser with Littman-Metcalf configuration[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102012.
魏 芳,陈迪俊,辛国锋,等. 紧凑坚固 Littman-Metcalf 型可调谐外腔半导体激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102012.
- 16 Zhou Yi, Shan Yaoying, Fan Yuanyuan, *et al.*. Excimer Laser with a Compound Cavity, China: CN102969649A[P]. [2013-03-13].
周 翊,单耀莹,范媛媛,等. 准分子激光器复合腔,中国: CN102969649 A[P]. [2013-03-13].

栏目编辑: 何卓铭