

分布反馈染料激光器实验研究

张永生¹, 颜立新², 黄珂¹, 刘晶儒¹

(1.西北核技术研究所, 陕西 西安 710024 ;2.清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要:对一种能够产生亚皮秒(0.5 ps)超短脉冲的宽波段可调谐分布反馈染料激光器的工作原理进行了分析并给出了具体的实验结果。结果表明该系统通过简单地更换光学元件就可以同时实现脉冲宽度可调。另外,给出了一种获得单模激光输出分布反馈染料激光器的调节方法。

关键词:分布反馈染料激光器; 动态光栅; 脉宽

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)02-0155-04

Experiment of distributed feedback dye laser

ZHANG Yong-sheng¹, YAN Li-xin², HUANG Ke¹, LIU Jing-ru¹

(1.Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2.Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Analysis on the working principle of a distributed feedback dye laser with sub-pico-second output (0.5 ps) is carried out, and the experimental results are obtained. It is pointed out that a simple change of the system will realize pulse width tunable. Additionally, a simple adjust method is described to obtain single mode DFDL laser output.

Key words: Distributed feedback dye laser; Dynamic grating; Pulse width

0 引言

在化学分析、燃烧诊断等激光光谱技术应用中,对时间分辨特性要求越来越高,要求激光脉冲的宽度在皮秒量级甚至更短。分布反馈染料激光器除了具有宽的光谱覆盖范围、波长连续可调和良好的光谱分辨率外,另一个优异的性能是能够很容易产生皮秒甚至亚皮秒的超短脉冲。另外,分布反馈形式的染料激光器在集成光学上也有可能成为非常重要的主动光学元件^[1],还有进一步阵列集成化的可能。随着聚合物光纤的出现及该种光纤的诸多优点,分布反馈固体染料激光器引起了人们极大的关注^[2-6]。

分布反馈染料激光器广泛使用 Shank 形式的光路布局^[7-10],这种光路形式的缺点是波长调节要靠两个反射镜同步进行,产生的激光脉冲宽度在几十皮秒量级^[11-13]。基于分布反馈染料激光器的优异性能和众多潜在的应用领域,本文对一种不同于 Shank 光路形式的连续可调谐分布反馈染料激光器的工作原理进行了分析,同时给出了具体的实验结果和调节方法。

1 亚皮秒分布反馈染料激光器工作原理

为了从 DFDL 得到亚皮秒的超短激光脉冲输出,必须使泵浦光的前沿非常陡或者脉冲宽度足够短。为

此使用了一系列的染料激光器来获得合适脉宽的泵浦光。染料激光器和放大器均使用一台 Lambda Physics 公司的 XeCl 准分子激光器提供泵浦。XeCl 准分子激光器产生上升前沿为 5 ns, 脉冲宽度 (FWHM) 为 20 ns 的激光脉冲, 由分束片分束后分别用于泵浦染料激光器和相应的放大器。XeCl 激光首先泵浦淬灭腔染料激光器 (QCDL), 产生脉宽约 200 ps, 波长 340 nm 的亚纳秒激光脉冲。顺序用该激光脉冲泵浦短腔染料激光器 (SCDL) 和门控饱和吸收体 (GSA), 将激光脉冲宽度压缩到约 9 ps。经放大器放大后, 泵浦光通过可调扩束望远镜聚焦入射到透射型衍射光栅上并将 (+1) 级衍射光和 (-1) 级衍射光聚焦到显微物镜前焦面上, 经消色差显微物镜后两个成一定角度 θ 的平面波在染料池内叠加的区域干涉, 增益区的直径约 10 μm , 长度约 100 μm , 使用的染料为 C307, 溶剂为 DMF, 染料浓度为 0.1 mol/L。干涉条纹产生的周期性增益结构形成动态光栅, 即分布反馈染料激光器, 通过调节透射光栅的位置和使用合适的泵浦强度, 获得波长为 497 nm 的 0.6 ps 超短脉冲激光输出。利用 BBO 倍频晶体和染料的受激布里渊散射, 波长可调范围可以从紫外 200 nm 进一步扩展到约 10 μm 的中红外波段。在适当的染料循环速度下, 整个系统的工作频率可达 30 Hz。

动态光栅结构是整个系统的核心, 在染料中产生动态光栅的过程和制作全息光栅掩模的过程类似。两个成一定角度 θ 的平面波在叠加的区域形成干涉条纹, 产生折射率调制。形成的动态光栅周期为:

$$\Lambda = \lambda_p / 2n \sin(\theta/2) \approx \lambda_p / 2NA \quad (1)$$

式中 λ_p 是泵浦激光波长; n 为染料的折射率; NA 是显微镜的数值孔径。激光输出波长为:

$$\lambda = 2n\Lambda / S = n\lambda_p / (NA \times S) \quad (2)$$

式中 S 是衍射级次。可以看出, 出射激光波长越短, 要求成像系统的数值孔径越大, 质量越高。

动态光栅的产生采用了一种结构紧凑的透射光栅成像的方法^[2], 如图 1 所示。

考虑一个周期为 d 的光栅, 放在一个成像系统的前面, 在一般情况下像面上场分布 $V(x)$ 和一个高阶

衍射级次场分布 V_0 的比值为^[14-16]:

$$\frac{V(x)}{V_0} = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi s}{d}}{\frac{m\pi s}{d}} \cos \frac{2\pi mx}{d'} \quad (3)$$

式中 $d' = Md$, M 是成像系统的放大率; $m = ad/\lambda f$, a 是孔径光阑的半径; s 是衍射级次。

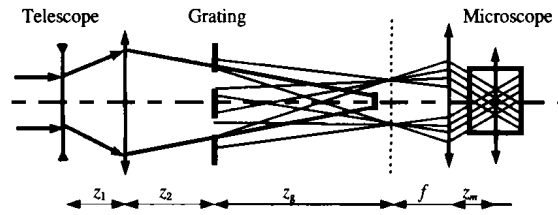


图 1 分布反馈染料激光器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of distributed feedback dye laser

当允许零级和两个一级 (S_1, S_{-1}) 通过孔径光阑成像时, 由公式 (3) 得:

$$\frac{V(x)}{V_0} = 1 + 2 \frac{\sin \frac{\pi s}{d}}{\frac{\pi s}{d}} \cos \frac{2\pi x}{d'} \quad (4)$$

此时光栅的像有正确的周期 $x = d' = Md$ 。由于零级的存在, 强度分布在很大程度上被展平, 所以, 为了得到高对比度的干涉像, 要将零级衍射光挡住。

对于这种具体的光路形式, 用几何光学的方法分析会更具有启发性。从图 1 很容易看出, 以显微透镜前焦平面上的交点为对称顶点形成相似三角形, 有:

$$\Lambda/d = f/z_g \quad (5)$$

式中 d 为透射光栅的周期; Λ 为干涉条纹的周期, 激光输出波长为:

$$\lambda = 2ndf/z_g \quad (6)$$

显然, 出射波长与入射波长无关, 通过调节 z_g 就可以改变激光输出波长。另外, 非常重要的是在波长变化的同时, 被成像的光栅大小和 z_g 同步变化, 保证了在不同波长工作时激光介质激活区尺寸不变, 即输出激光的脉冲宽度保持不变。

2 亚皮秒超短脉冲的获得和脉宽可调的实现

在化学分析和燃烧诊断等激光光谱应用中, 对时

间分辨的光谱测量要求越来越高。分布反馈染料激光器输出的最短激光脉冲宽度主要取决于激活区的尺寸^[17,18],即 $\tau = \frac{2nl}{c}$ 。通过控制泵浦光照射衍射光栅的尺寸,可以改变输出激光脉冲的宽度。目前的激光系统,泵浦光的尺寸约为 $1\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,放大倍数约为 50,设染料的平均折射率为 1.3,则有激活区尺寸为 $20\text{ }\mu\text{m} \times 80\text{ }\mu\text{m}$,计算得到输出脉冲宽度为 $\tau = 0.63\text{ ps}$,图 2 为利用紫外自相关仪测得的输出脉冲经 BBO 晶体倍频后的脉宽,假设输出脉冲为高斯脉冲,脉冲宽度为 600 fs ,与计算结果相符。

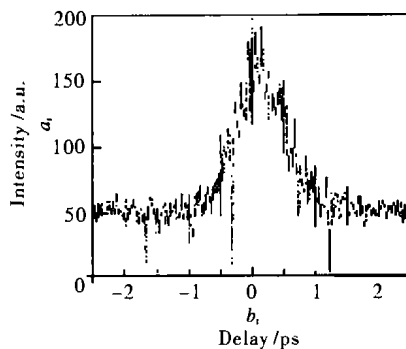


图 2 紫外自相关函数曲线

Fig.2 UV-autocorrelation function

针对不同的研究对象,还希望分布反馈染料激光器的脉宽能够在相当的范围内可调。但是对于目前的光路结构,改变光栅尺寸的方法只能使输出激光脉宽在很小的范围内变化。更为有效的方法是在增益区长度一定的情况下,通过改变泵浦光的脉冲宽度来改变输出激光脉冲的脉宽。一般情况下,分布反馈染料激光器能将泵浦光的脉冲宽度压窄 50~100 倍^[19]。如果将门控饱和和吸收体去掉,此时泵浦脉冲的宽度为 300 ps 左右,能够获得约 6 ps 的激光脉宽^[17]。直接用纳秒量级的固体 Nd:YAG 激光器泵浦,会得到 $50\sim 100\text{ ps}$ 的激光脉冲。需要注意的是,任何情况下都需要控制泵浦光的强度,过强的泵浦会出现多个激光脉冲^[20]。

3 线宽的精细调节和单模输出的获得

分布反馈激光器的独特优点是在超短脉冲条件下具有稳定的单模激光输出,这对于通信、集成光学

等应用来说无疑是最重要的。考虑在染料溶液中形成的一个均匀的动态光栅,设染料溶液的平均折射率为 n_0 ,则此时折射率分布表示为:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos \frac{2\pi z}{\Lambda} \quad (7)$$

式中 Δn 是泵浦光感生的折射率变化; z 是沿着染料溶液的轴向分布距离。从输出波长公式(2)可以定性分析各种因素的影响:

$$\Delta \lambda \approx \lambda s \sqrt{\left(\left(\frac{\Delta n}{n_0} \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \right)^2 \right)} \quad (8)$$

式中 N 是形成动态光栅的总线数; s 是一个与光栅折射率调制程度有关的常数。从该式可以看出,可以通过改变泵浦光强度和改变光栅的长度来实现调节输出脉冲的线宽。在光栅长度一定的情况下,输出激光脉冲的模式主要依赖于泵浦强度,反复的实验证明,选择泵浦光的强度为分布反馈染料激光器 2 倍激射阈值时,能够获得稳定的单模输出。图 3 是泵浦光强度为 2 倍激射阈值时测量得到的光谱曲线。

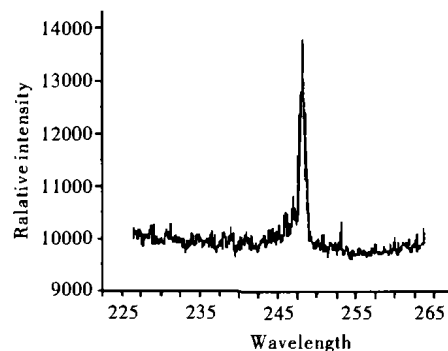


图 3 超短脉冲激光信号的光谱

Fig.3 Spectrum of the UV ultra-short pulse

4 激光输出的判断

由于分布反馈染料激光器的结构紧凑,准直精度要求高,而且染料在紫外激光的泵浦下,非常容易产生自发辐射放大(ASE),强度也很高,在调节的过程中很难判断分布反馈染料激光器的输出是否为单模激光。

一个简单有效的判断方法是利用一块刻线密度适当的反射光栅,将分布反馈染料激光器输出光束尽

可能靠近光栅面掠入射,然后在后面观察较高衍射级次的光斑大小。由于染料的激射光谱都比较宽,染料受激发射时会观察到一条细长的光斑分布,而分布反馈染料激光器单模激光输出时基本上为一个点,如图 4 所示。另一个判断方法是利用短焦透镜将衍射光束聚焦或者在观察的同时改变透射光栅的位置,如果是分布反馈染料激光器激射,衍射光斑的位置会有显著的改变。另外,利用同样的方法也可以控制泵浦光的强度。

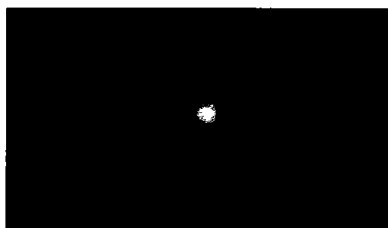


图 4 DFDL 输出激光光斑照片

Fig.4 Photograph of DFDL output beam

5 结束语

综上所述,利用衍射光栅成像方法获得的分布反馈染料激光器是一种通用型、多功能激光装置,可以通过简单的调节方便地改变激光输出波长、线宽、脉冲宽度等参数。同光学参量振荡器、可调谐固体激光器和其他形式的分布反馈染料激光器相比,在较高的重复频率(30 Hz)下,具有亚皮秒超短脉冲激光输出、波长覆盖范围宽和单模激光输出等独特的优点,在集成光学、聚合物光纤应用以及化学分析、燃烧诊断等光谱应用领域中有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] Schafer F P. Dye laser[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1990. 78.
 [2] Szatmari S, Schafer F P. Subpicosecond, widely tunable distributed feedback dye laser[J]. Applied Physics B, 1988, 46: 305-311.
 [3] Kogelnik H, Shank C V. Stimulated emission in a periodic structure[J]. Applied Optics, 1971, 18(4): 152-154.
 [4] Szatmari S. High brightness ultraviolet excimer lasers[J]. Applied

Physics B, 1994, 58: 211-223.
 [5] Xiaolei Zhu, Dennis Lo. High order operation of distributed feedback dye-doped sol-gel silica laser[J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(2): 99-101.
 [6] Oki Y, Miyamoto S, Maeda M. Multi-wavelength distributed feedback dye laser array and its application to spectroscopy[J]. Optics Letter, 2002, 27: 1220-1222.
 [7] Szatmari S, Racz B. Generation of 320 fs pulses with a distributed feedback dye laser[J]. Applied Physics B, 1987, 43: 93-97.
 [8] Eichler H J, Gunter P, Pohl D W. Laser-induced dynamic gratings[M]. New York: Springer-Verlag, 1986. 45.
 [9] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli. Fiber Bragg Gratings[M]. Norwood: Artech House, 1999.
 [10] Wadsworth W J, Mckinnie I T, Woolhouse A D, et al. Efficient distributed feedback solid state dye laser with a dynamic grating[J]. Applied Physics B, 1999, 69: 163-165.
 [11] Yaney Perry P, Klinier Dahv A V, Schrader Paul E, et al. Distributed-feedback dye laser for picosecond ultraviolet and visible spectroscopy[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(3): 1296-1305.
 [12] Muller A. Two independently tunable distributed feedback dye lasers pumped by a single picosecond Nd:YAG laser[J]. Applied Physics B, 1996, 63: 443-450.
 [13] Shank C V, Bjorkholm J E, Kogelnik H. Tunable distributed-feedback dye laser[J]. Applied Physics Letter, 1971, 18(8): 395-396.
 [14] Mansuripur Masud. Classical optics and its applications[M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2002.
 [15] Born Max, Wolf Emil. Principle of Optics. 7th ed[M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 1999. 471.
 [16] Bor Zs, Muller Alexander, Racz B, et al. Ultrashort pulse generation by distributed feedback dye lasers I[J]. Applied Physics B, 1982, 27: 9-14.
 [17] Bor Zs, Muller Alexander, Racz B, et al. Ultrashort pulse generation by distributed feedback dye lasers[J]. Applied Physics B, 1982, 27: 77-81.
 [18] Vavra G, Szatmari S. Theoretical study of the operation of gated saturable absorbers[J]. Optical and Quantum Electronics, 1993, 25: 733-744.
 [19] Szabo G, Bor Zs. Amplification and measurement of single 1.6-3.5 ps pulses generated by a distributed feedback dye laser[J]. Applied Physics B, 1983, 31: 1-4.
 [20] Bor Zs, Muller Alexander, Racz B. UV and blue picosecond pulse generation by a nitrogen-lase-pumped distributed feedback dye laser[J]. Optics Communications, 1982, 40(4): 294-296.