

光栅与标准具对称放置的新型 脉冲染料激光器

张 同 李凤英

(上海市激光技术研究所)

提 要

本文进一步完善了光栅在近掠入射条件下应用于脉冲染料激光器的工作。解决了装置中进一步压缩线宽的问题和在近掠入射条件下最佳光栅及其级次的选取问题。提出了一个光栅与标准具对称放置的方案,其结构简单,调节方便,具有较高的能量转换效率和实用价值。单模输出时线宽达几百个兆赫(0.006 \AA 以下)。

A new pulsed dye laser with grating and etalon on symmetric arrangement

Zhang Tong Li Fengying

(Institute of Laser Technology, Shanghai)

Abstract

The grating at near grazing incidence used for pulsed dye lasers has been further improved. Two problems has been solved of inserting the intracavity etalon and of selecting the optimal blazed grating and its orders at grazing incidence. A new version has been presented in which the grating and the etalon are arranged symmetrically. Single-mode operation and the output linewidth of the order of a few hundred MHz (below 0.006 \AA) can be obtained.

一、引 言

在染料激光发展的最初十年里,发表了不少有关氮激光泵浦的染料激光器的方案,其中 Hänisch 型的方案^[1]已被广泛地采用。但这一方案以及其他一些方案仍存在某些尚待解决的问题^[2~3]。

为改善脉冲染料激光器的各种性能,曾有不少文章提出过好方法。如采用扩束方法^[4~6]和准分子激光泵浦^[3]等;还有采用四

棱镜系统来缩短腔长和降低安装及调整精度^[4],特别是 L. Shoshan^[7,8]等和 M. G. Littman^[9]等提出的光栅在近掠入射条件下氮激光泵浦染料激光器的方法显著地缩短了腔长,简化了结构,有较多的优点。本文在掠入射方案的基础上,采用光栅与标准具对称放置的构型,它只采用一般较易获得的低倍数扩束望远镜和低细度的标准具,就可以把输出线宽压缩到几百兆赫,接近于相应短脉宽所制约的傅氏变换极限。当略去扩束望

收稿日期: 1979年10月23日。

透镜, 仅采用一个光栅和一个低精细度标准具, 可方便地把输出线宽压缩至0.02埃左右。

二、方案论述

实验装置如图1所示, 其中几个部件的设计如下:

(1) 氮激光作为泵浦源, 其输出经一 $f=85$ 毫米的石英柱面镜聚焦至一长约20毫米的染料盒上。氮激光发散角(全角)约为2毫弧度, 聚焦半径 $\omega_1 = \frac{1}{2} f \cdot \theta$ 约为0.08毫米左右。氮激光输出脉宽经300兆赫示波器测量约为3~4毫微秒(FWHM)。

(2) R 为端面反射镜, R_r 为端面调谐反射镜。 R 与 R_r 构成一谐振腔。总腔长

$$L = d_1 + d_2 + d_3$$

约为20~25厘米, 比Hänsch型的腔长缩短了 $\frac{1}{2}$ 左右。

(3) 低细度的F-P与长约5厘米的低倍数BET(扩束望远镜)相结合, 用于进一步压缩线宽。

(4) 光栅是在掠入射的条件下使用。光栅因入射光束束散引起的被动谱宽即表征了此时激光的单通线宽:

$$\delta\lambda = \frac{a}{2m} \cos\alpha \delta\alpha \quad (1)$$

式中, a 为光栅常数, m 为所采用的衍射级次, α 为入射光束与光栅法线之间的夹角, $\delta\alpha$ 为入射光束的束散角(全角)。

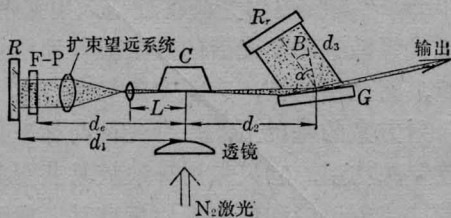


图1 光栅与标准具对称放置的新型脉冲染料激光器示意图

R —反射镜; $F-P$ —法布里-珀罗标准具;
 C —染料盒; G —光栅; R_r —调谐镜

通常选用高色散光栅和高倍数BET或其它扩散元件来改善激光束的发散角 $\delta\alpha$, 使式中的 $\delta\lambda$ 下降, 而在近掠入射的情况下, 是通过尽量增大入射角 α 来减少式中的因子 $\cos\alpha$, 从而获得了小的 $\delta\lambda$ 。

为了尽量增大入射角 α 而取得窄线宽, 除了受到所选用的光栅长度(垂直于刻槽方向)的限制外, 主要限制是大入射角条件下光栅衍射效率太低, 不能保证足够的反馈量而造成的。本实验结果表明, 当入射角 $\alpha > 89^\circ 30'$ 时, 实现稳定的激光运转已相当困难。

(5) 标准具与扩束望远镜。在入射角为 θ 、束散角为 $\delta\theta$ 时 F-P 被动谱宽的表达式:

$$\delta\lambda_\theta = \lambda \operatorname{tg} \theta' \delta\theta' \approx \frac{\lambda}{n^2} \theta \delta\theta \quad (2)$$

设, ω_1 为染料激活区半径, ω_2 为扩束后光束半径, d_0 为染料盒中心至 F-P 之间距离, $\Delta\theta_1 = \frac{\lambda}{\pi\omega_1}$ 为扩束前光束束散角, $\Delta\theta_2 =$

$\frac{\lambda}{\pi\omega_2}$ 为扩束后光束束散角, f_1 为望远镜的目镜焦距, f_2 为望远镜的物镜焦距。在目前情况下, (2)式中的束散角 $\delta\theta$ 可用 $\Delta\theta_2 = \frac{\lambda}{\pi\omega_2}$

代入。此外, 由(2)式知, 为了得到小的 $\delta\lambda_\theta$, 则光束入射角, 即 F-P 与腔轴夹角 θ 显然越小越好。但为了防止入射于 F-P 上的光因表面直接反射从原路返回进入染料激活区, 还需保证

$$\theta \geq \theta_{\min}$$

其中

$$\theta_{\min} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2 d_0} \quad (\text{弧度}) \quad (3)$$

这样, 相应于 $\theta = \theta_{\min}$ 时的最小被动谱宽为:

$$(\delta\lambda_\theta)_{\min} = \frac{\lambda^2 \omega_1^2}{\pi d_0 \omega_2^2 n^2} \quad (4)$$

其中 ω_1^2/ω_2^2 可从它们所满足的关系式

$$\omega_2^2 = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \left[\omega_1^2 + (f_1 - l)^2 \left(\frac{\lambda}{\pi\omega_1}\right)^2 \right] \quad (5)$$

求出, 式中 l 是染料盒中心至 BET 目镜之间

的距离。

考虑通过改变 θ 而使 F-P 调谐。设 θ 从 θ_{\min} 变至 θ_m 时, F-P 调谐范围为一个 FSR (自由光谱范围), 则有

$$\theta_m \approx \sqrt{\frac{n\lambda}{t}} + \theta_{\min} \quad (6)$$

相应的被动谱宽为

$$(\delta\lambda_\theta)_m = \frac{\lambda}{n^2} \left(\sqrt{\frac{n\lambda}{t}} + \theta_{\min} \right) \frac{\lambda}{\pi\omega_2} \quad (7)$$

(6) BET 的选取

通过(4)式及(7)式, 适当选取 f_1 、 f_2 和 l , 保证 $(\delta\lambda_\theta)_{\min}$ 或 $(\delta\lambda_\theta)_m$ 小于 F-P 的透射谱宽, 即可达到压缩输出线宽至 F-P 的透射谱宽的目的。

三、实验与结果

根据实际应用的需要, 本装置可方便地在下述三种情况下运转。

1. 近掠入射方案, 无 F-P 与 BET 情形

这时, 闪烁光栅作为唯一的波长选择和压缩线宽的元件。在实验中, 我们采用北京第二光学仪器厂生产的 1200 条/毫米光栅和法国 J-Y 公司生产的 1800 条/毫米闪烁光栅, 对于 $a=1$ 毫米/1200 为例, 实验中, 光栅衍射级次选用第二级, 即 $m=2$ 。置入射角 $\alpha=89^\circ 30'$, $d_1=5$ 厘米, $d_2=7.5$ 厘米, $d_3=4$ 厘米。采用了几种工作染料, 如若丹明 6G (5×10^{-3} 克/升), 若丹明 B (5×10^{-3} 克/升), 二氯荧光素 (5×10^{-2} 克/升) 等。通过一厚度为 6 毫米的 F-P 进行线宽测量, 条纹由观测或直接摄影获得, 由此, 测得的激光输出线宽为 0.05 埃。

2. 装置中采用光栅 + (F-P), 无 BET 情形

装置中选取 $d_1=7$ 厘米, $d_2=7.5$ 厘米, $d_3=4$ 厘米, $d_0=5$ 厘米。选用的 F-P 厚度 $t=6$ 毫米, 细度 $f=10$ 。将其插入腔内后, 获得了 1.6 千兆赫的输出线宽(在 6000 Å 处为

0.02 Å)。此外, 在实验中仔细地调节变化 F-P 与腔轴的夹角 θ , 测量条纹明显地呈现明暗环交替变化, 这显示了 F-P 对输出谱线的调谐作用。最后顺便指出, 在此情形下, 光栅只要把线宽压缩至 F-P 的自由光谱范围 $\text{FSR}=0.2 \text{ \AA}$ (6000 Å 处) 以下, 即可保证 F-P 的正常选频。因此对光栅的入射角 α 的限制显著放宽。在本实验中, 观察到 α 在 $87^\circ \sim 89.5^\circ$ 之间变化时, 输出线宽无明显变化。这样, α 选得大些, 对提高衍射强度, 增大激光反馈量十分有利。

3. 光栅 + (F-P) + BET 情形

整个装置如图 1 所示。装置中取 $d_1=12$ 厘米, $d_2=7.5$ 厘米, $d_3=4$ 厘米。

$a=1$ 毫米/1200 光栅, 把线宽压缩至 F-P 的 FSR 以下。

$t=12$ 毫米、 $f=14$ 的 F-P, 或 $t=20$ 毫米、 $f=14$ 的 F-P, 把线宽压缩至 0.5 千兆赫左右。

全长为 5 厘米、扩束 10 倍左右的 BET, 通过(5)、(3)、(7)式计算得知, 可把 F-P 的被动谱宽 $(\delta\lambda_\theta)_m$ 控制在 0.5 千兆赫以下。其中 $f_1=5$ 毫米、 $f_2=50$ 毫米、 $\omega_1 \approx 0.1$ 毫米、 $d_0=9$ 厘米。

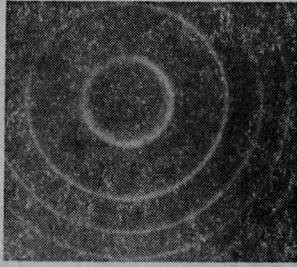
下面来考察一下短光脉冲所制约的傅氏变换极限。实验中的氮激光输出光脉冲宽度为 3~4 毫微秒(FWHM)。由于短光脉冲与 F-P 作用效应^[10], 染料激光相应的输出光脉冲宽度约为 2~3 毫微秒; 因此, 相应的傅氏变换极限

$$\Delta\nu \geq \frac{1}{\Delta\tau} \approx 0.3 \sim 0.5 \text{ 千兆赫}$$

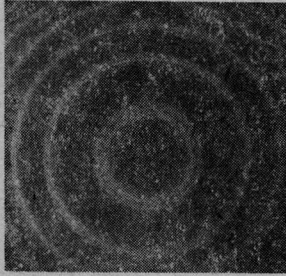
目前实验结果表明, 本装置的输出线宽为 0.006 Å 以下(6000 Å 处)(见图 2), 接近或达到了短光脉冲所制约的傅氏变换极限, 获得了单腔模输出。

4. 线宽测量问题

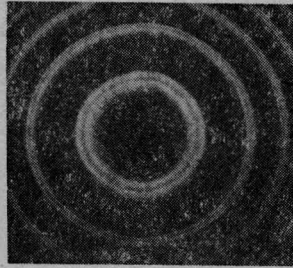
测量标准具参数为厚度 $t=20$ 毫米, 折射率 $n=1.516$, 反射率 $R=80\%$ 。首先观测



(a) 腔内标准具 $t=12\sim 20$ 毫米, $f=14$ 。染料激光 $\Delta\nu < 500$ 兆赫 (0.006 \AA)。这时泵浦功率 ≥ 100 千瓦仍可获得稳定单腔输出



(b) 腔内标准具 $t=6$ 毫米, $f=10$ 。染料激光 $\Delta\nu \sim 1600$ 兆赫 (0.02 \AA)。输出呈现 2~3 个腔模, 模距为 625 兆赫



(c) 与染料激光器腔长同为 24 厘米的 He-Ne 激光器的输出呈现 2~3 个腔模, 模距为 625 兆赫

图 2 线宽测量干涉条纹

测量标准具厚度 $t=20$ 毫米, 细度 $f \sim 14$, 折射率 $=1.516$, 单脉冲记录。ASA=100

了与本装置腔长同为 24 厘米的 He-Ne 激光器的输出, 其呈现 2 至 3 个腔模, 模距

$$\Delta\nu_0 = \frac{c}{2d} = 625 \text{ 兆赫。}$$

由此表明, 测量标准具可把频差为 625 兆赫的腔模分辨开来。此后, 测量了本装置中腔内标准具为 $t=6$ 毫米, $f \sim 10$ 的激光输出, 其输出线宽 $\Delta\nu \sim 1600$ 兆赫, 且呈现 2 至 3 个腔模。由此表明了本装置在宽谱线运转时存在数个腔模, 且在目前测试条件下可将其分辨开来。最后, 测量了本装置中腔内标准具为 $t=12\sim 20$ 毫米, $f \sim 14$ 的激光输出, 其仅呈现一个单腔模。这样, 就判定了本装置可获得单腔模运转。由于单腔模线型的半极大点全宽度小于其模间距, 所以必有 $\Delta\nu < \frac{c}{2d}$ (625 兆赫)。此外, 图 2(b) 中二相邻环中心间隔 Δr 相应于 625 兆赫, 而环本身宽度 δr 约为 Δr 的一半, 所以输出线宽可达 300 兆赫 (0.0035 \AA) 左右。为了可靠起见, 取 $\Delta\nu < 500$ 兆赫 (0.006 \AA)。

参 考 文 献

- [1] T. W. Hansch; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, 895.
- [2] J. E. Lawer, W. A. Fotzrimmons, L. W. Anderson; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, 1083.
- [3] M. D. Levenson, G. L. Eesley; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1976, **QE-12**, 259.
- [4] D. C. Hanna; *Opt. Quant. Electr.*, 1975, **7**, 115.
- [5] G. L. Eesley, M. D. Levenson; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1976, **QE-12**, 440.
- [6] L. G. Nan; *Opt. Commun.*, 1977, **23**, 273.
- [7] L. Shoshan, N. N. Danon, U. P. Oppenheim; *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**, 4495.
- [8] L. Shoshan, U. P. Oppenheim; *Opt. Commun.*, 1978, **25**, 375.
- [9] M. G. Littman, H. J. Metealf; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, 2224.
- [10] H. Daussy, R. Dumanchin; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, 451.