

双棱镜扩束、光栅调谐的 ps 染料激光器

赵庆春 董景元 钱林兴 何慧娟

(中国科学院上海光机所)

提要: 用重复率脉冲锁模 YAG 激光同步泵浦双棱镜扩束的光栅染料激光腔, 对于 R-6G 激光染料, 获得脉冲列重复率为 20 Hz、脉冲峰值功率为 7.6 MW、平均功率为 9.5 mW 的 30 ps 可调谐激光, 其谱线宽度为 0.04 nm, 接近变换极限宽度。激光输出稳定, 调谐方便。

Ps dye laser with double-prism beam expander and grating

Zhao Qinchun, Dong Jingyuan, Qian Linxing, He Huijuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: A dye laser cavity with double-prism beam expander and grating has been synchronously pumped by repetitive pulsed mode-locked YAG laser light. For R-6G laser dye, the following experimental results have been obtained: pulse duration 30 ps, peak power of the pulse 7.6 MW, pulse repetition rate 20 Hz, average power 9.5 mW, line width 0.04 nm (close to the transform limited linewidth). The laser offers the advantages of stable output energy and easy wavelength tuning.

引言

脉冲宽度为 ps 的波长可调谐激光, 在非线性光学及 ps 光谱研究中有很多应用。用重复率脉冲锁模 YAG 激光同步泵浦的染料激光器, 可输出既有高的峰值功率, 又有一定平均功率的 ps 激光, 我们曾在文章 [1] 中报道过。

为获得接近变换极限的谱线宽度, 文章 [1] 中, 在染料激光腔内采用色散棱镜和标准具作为色散元件; 也可以采用两个标准具 [2]。采用这两种方法的激光腔, 易于调整、准直, 但调谐波长却是麻烦的。前者需要先调棱镜

再调标准具; 后者则要先调自由光谱范围大的标准具, 然后再调自由光谱范围小的标准具, 使用不方便。为此, 我们研制了本文介绍的双棱镜扩束、光栅调谐的同步泵浦 ps 染料激光系统。该系统调波长仅需转动光栅, 使用方便。并从理论计算和实验比较上证实了这种双棱镜扩束光栅腔好于几种单棱镜光栅腔。

激光系统

双棱镜扩束、光栅调谐的 ps 染料激光系统如图 1 所示。上部为泵浦激光系统。由

收稿日期: 1986 年 1 月 7 日。

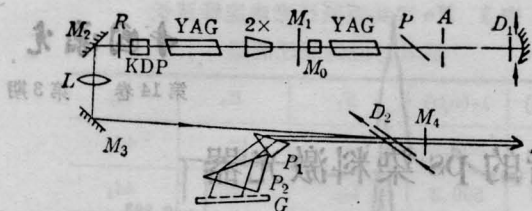


图1 ps染料激光系统

D_1 —锁模染料盒; A —光阑; P —偏振膜; M_0 —声光调制器; M_1 —输出腔镜; $2\times$ —扩束望远镜; R —旋光片; M_2, M_3 — 45° 全反射镜; L — $f=2\text{m}$ 透镜; M_4 —染料激光输出腔镜; D_2 —R-6G流动染料盒; P_1, P_2 —串联扩束棱镜; G —光栅

具有热稳定腔的重复率脉冲主被动锁模YAG激光器^[3]、一级YAG放大器和KDP倍频器组成。该激光系统与文章[1]中的泵浦激光系统相同。脉冲列重复率20 Hz, 脉冲列能量起伏4%。二次谐波脉冲宽度为34 ps, 每个脉冲列能量6.5 mJ, 激光系统的设计、布局和各参数的详细情况见文章[1]。

同步泵浦方式工作, 染料激光器腔长 L_D 与泵浦激光器腔长 L_P 的匹配方式取 $L_D \approx L_P$ 。

为获得较高的激光转换效率和较好的输出横模, 采用非共线的纵向泵浦结构, 激光染料为R-6G的乙醇溶液。

图1下部为染料激光腔, 内有相同的两个扩束棱镜, 终端为平面反射光栅。

染料激光腔分析

在R-6G激光染料输出的波长范围内, 对于脉冲宽度为 10^{-11}s 量级的激光脉冲, 其变换极限谱线宽度为 10^{-2}nm 量级。获得这样的谱线宽度, 光栅不需要为增大色散而工作在损耗很大的掠入射方式, 工作在损耗较小的衍射一级就足够了。所以, 这里光栅以自准直方式(Littrow型)工作在衍射一级。光线满足下式

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (1)$$

d 为光栅常数, θ 为波长 λ 的光对于光栅的入

射角。光栅在激光腔内的角色散为

$$\left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_g = \frac{2 \tan \theta}{\lambda} \quad (2)$$

如果激光腔内仅有光栅为色散元件, 则由它决定的谱线宽度为

$$(\Delta\lambda)_g = \left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_g^{-1} \cdot \Delta\theta$$

$\Delta\theta$ 为入射到光栅上的光束的发散角。如果把该光束的直径扩大 M 倍, 则发散角将小 M 倍, 变为 $\Delta\theta/M$, 从而谱线宽度

$$(\Delta\lambda)_g = \left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_g^{-1} \cdot \frac{\Delta\theta}{M}$$

也小 M 倍。因此, 只需适当地选择 M 值, 即可获得所需的谱线宽度。

我们用串联使用的两个同样的棱镜作为扩束器(见图1), 它比望远镜扩束器易于准直和调整。扩束棱镜是这样制作的, 使得扩束后的光线垂直于棱镜的出射面射出。单个棱镜的扩束倍数为

$$M_1 = \frac{(n^2 - \sin^2 \psi)^{1/2}}{n \cos \psi} \quad (3)$$

n 为棱镜材料的折射率, ψ 为光束对于棱镜的入射角。两个同样棱镜串联使用的总扩束倍数为

$$M = M_1 \times M_1 \quad (4)$$

偏振光的电矢量的 P 分量在棱镜入射面上的反射损耗为

$$R_1 = \frac{\tan^2(\psi + \psi')}{\tan^2(\psi - \psi')} \quad (5)$$

ψ' 为折射角。

两个棱镜总的反射损耗为

$$R = R_1 + (1 - R_1)R_1 \quad (6)$$

棱镜除了作为扩束器外, 本身也是一个色散元件, 单个棱镜的角色散为

$$\left(\frac{d\psi}{d\lambda}\right)_1 = \frac{2 \sin \psi}{(n^2 - \sin^2 \psi)^{1/2}} \frac{dn}{d\lambda} \quad (7)$$

$\frac{dn}{d\lambda}$ 为棱镜材料的色散值。两个棱镜的总色散^[4]为

$$\left(\frac{d\psi}{d\lambda}\right)_r = \frac{2 \sin \psi}{(n^2 - \sin^2 \psi)^{1/2}}$$

$$\times \left[\frac{n \cos \psi}{(n^2 - \sin^2 \psi)^{1/2}} + 1 \right] \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (8)$$

双棱镜扩束的光栅腔的色散则是两者的代数和

$$\left(\frac{d\theta}{d\lambda} \right)_G \pm \left(\frac{d\psi}{d\lambda} \right)_T$$

两者色散相加或相减视它们放置的相对取向而定^[5]。它们决定的谱线宽度为

$$\Delta\lambda = \left[\left(\frac{d\theta}{d\lambda} \right)_G \pm \left(\frac{d\psi}{d\lambda} \right)_T \right]^{-1} \cdot \frac{\lambda}{\pi M \omega_0} \quad (9)$$

ω_0 为光束腰 (Gaussian 光束近似)。

实验中, 我们用重火石玻璃棱镜, 它对 $0.567 \mu\text{m}$ 光的折射率 $n=1.6139$, 其色散值 $\frac{dn}{d\lambda}=1.61 \times 10^{-4}(\text{nm})^{-1}$ 。光栅为复制的 1200 条/mm 平面反射光栅, 闪耀波长为 546.1 nm 。对于 R-6G 乙醇溶液的最大输出激光波长 $0.567 \mu\text{m}$, 利用公式(1)~(9)计算出双棱镜光栅腔的各参数如表 1 所示。表中也给出了扩束分别为 4 倍和 10 倍的单棱镜光栅腔的计算值。从表 1 可看出, 为了获得 0.047 nm 的激光谱线宽度, 用 4 倍扩束的单棱镜光栅腔是不行的。只能用扩束 16 倍的双棱镜光栅腔或扩束 10 倍的单棱镜光栅腔。然而, 后者的腔内棱镜损耗(表面反射损耗 52%)比前者(33%)大接近 1.6 倍, 故我们选用了扩束为 16 倍的双棱镜光栅腔。

表 1 三种染料激光腔的参数计算值

	θ (度)	ψ (度)	M	R (%)	$\Delta\lambda$ (nm)
双棱镜光栅腔	19.9	78.5	4×4	33	0.047
4×单棱镜光栅腔	19.9	78.5	4	18	0.02
10×单棱镜光栅腔	19.9	85.5	10	52	0.047

注: 双棱镜光栅腔的色散是两者色散相抵消取向时的值。

实验结果与讨论

双棱镜扩束的光栅染料激光腔输出的锁模脉冲列



图 2 $L_D=L_P$ 双棱镜光栅腔输出的锁模脉冲列 (横坐标 5 ns/div)

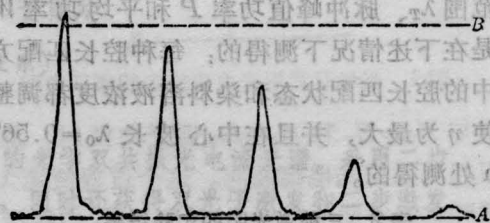


图 3 条纹相机测得的脉冲波形图。图中相邻脉冲之间的时间间隔为 200 ps

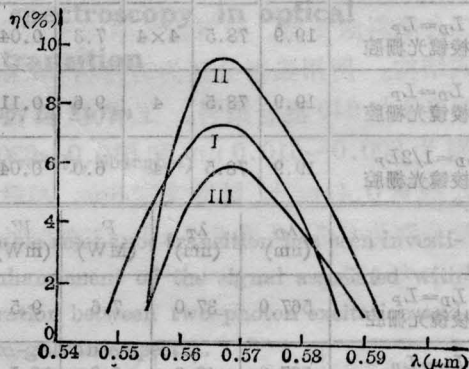


图 4 表 2 中三种腔的输出调谐曲线

I: $L_D=L_P$ 双棱镜光栅腔; II: $L_D=L_P$ 扩束 4 倍单棱镜光栅腔; III: $L_D=1/2L_P$ 单棱镜光栅腔

模脉冲列如图 2 所示。无论其包络形状或输出能量的稳定性都与泵浦的 $0.532 \mu\text{m}$ 激光脉冲列基本相同, 只是脉冲列中脉冲个数减少了。

染料激光的脉冲宽度为 30 ps。用 BWS-5K 型条纹相机测得。波形如图 3 所示。它不是染料激光输出脉冲列, 而是脉冲列中的一个脉冲形成的。该脉冲被一个厚为 20 mm 的涂膜平行平板多次反射后形成的一个幅度递减的, 时间间隔为 200 ps 的一系列脉冲, 详见[1]。

双棱镜光栅腔激光输出的调谐曲线如图 4 所示。作为比较, 也画出了两种腔长匹配

方式($L_D=L_P$ 和 $L_D=1/2L_P$)的4倍扩束单棱镜光栅腔的调谐曲线。

其他各参数的实验结果列于表2。也同时列出了 $L_D=L_P$ 和 $L_D=1/2L_P$ 两种扩束4倍的单棱镜光栅腔的实验结果。表2中的激光能量转换效率 η 、谱线宽度 $\Delta\lambda$ 、波长调谐范围 λ_T 、脉冲峰值功率 P 和平均功率 W 都是在下述情况下测得的:每种腔长匹配方式中的腔长匹配状态和染料溶液浓度都调整到使 η 为最大,并且在中心波长 $\lambda_0=0.567\mu\text{m}$ 处测得的。

表2 三种激光腔的实验结果

	θ (度)	ψ (度)	M	η (%)	$\Delta\lambda$ (nm)
$L_D=L_P$ 双棱镜光栅腔	19.9	78.5	4×4	7.3	0.04
$L_D=L_P$ 单棱镜光栅腔	19.9	78.5	4	9.6	0.11
$L_D=1/2L_P$ 单棱镜光栅腔	19.9	78.5	4	6.0	0.04

	λ_D (nm)	λ_T (nm)	P (MW)	W (mW)
$L_D=L_P$ 双棱镜光栅腔	567.0	37.0	7.6	9.5
$L_D=L_P$ 单棱镜光栅腔	567.0	43.0	9.9	12.5
$L_D=1/2L_P$ 单棱镜光栅腔	568.0	350	6.2	7.8

$\Delta\lambda$ 的实验值小于计算值是因为计算值是静态的,而实验值则是受激发射状态下的动态值。对于脉冲宽度为30 ps的 $0.567\mu\text{m}$ 激光,其变换极限谱线宽度($\Delta t \cdot \Delta\nu=1$)为 0.036nm ,可见双棱镜光栅腔的 $\Delta\lambda$ 值已接近此值。

对于 $L_D=1/2L_P$ 的扩束4倍的单棱镜光栅腔,由于光在腔内往返振荡的次数是 $L_D=L_P$ 腔的两倍,从色散和损耗的角度看,可等效地看成腔内有两个4倍扩束棱镜,并且在 $2L_P/c$ 时间内受到光栅两次色散和损耗的 $L_D=L_P$ 腔,因而这种腔的色散和损耗都比 $L_D=L_P$ 的单棱镜或双棱镜光栅腔的大。因

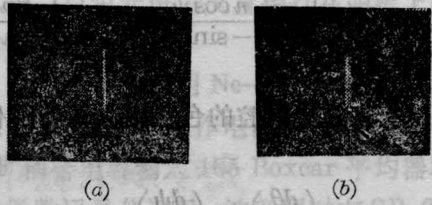


图5 表2中三种激光腔的输出光谱

- (a) $L_D=L_P$ 双棱镜光栅腔和 $L_D=1/2L_P$ 单棱镜(4×)光栅腔
 (b) $L_D=L_P$ 单棱镜(4×)光栅腔

而这种腔在表2中的三种腔里损耗是最大的,然后依次是双棱镜光栅腔和 $L_D=L_P$ 的单棱镜光栅腔;腔的色散大小也是这个顺序。因此它们的 η 、 λ_T 、 P 和 W 值的大小顺序则恰好相反。而 $\Delta\lambda$ 值则是 $L_D=L_P$ 单棱镜光栅腔的最大,如图5(b)所示。另外两种腔的 $\Delta\lambda$ 值已接近变换极限值,如图5(a)所示。总之,实验结果与理论预言基本一致。

$L_D=1/2L_P$ 单棱镜光栅腔,虽然它能获得近变换极限谱线宽度,但其 η 、 λ_T 、 P 及 W 都比双棱镜光栅腔的小。并且输出的脉冲列由幅度大小相间的脉冲组成,对某些应用是不希望的。因而 $L_D=L_P$ 的双棱镜扩束光栅腔是较为理想的,与色散棱镜加标准具腔或双标准具腔相比,在调谐波长上便利得多。

结 束 语

我们用扩束16倍的双棱镜光栅腔获得了谱线宽度接近变换极限的、峰值功率为MW级、平均功率为mW级的30 ps可调谐激光,其输出稳定、调谐方便。

参加本工作的还有李永春、顾圣如、赵隆兴和赵世诚等同志。

参 考 文 献

- [1] 赵庆春等;《中国激光》,1986, 13, No.7, 414.
- [2] L. Goldberg, G. Moore; *Appl. Phys. Lett.*, 1975, 27, 217.
- [3] 何慧娟等;《中国激光》,1983, 10, 765.
- [4] T. Kasuya et al.; *Appl. Phys.*, 1978, 17, 131.
- [5] L. G. Nair; *Opt. Commun.*, 1977, 23, 273.