

高分辨率光谱用的染料激光 振荡放大系统*

夏敬芳

(复旦大学激光物理教研室)

提要: 介绍一种用于高分辨率光谱的染料激光振荡放大系统, 利用调 Q 的 Nd:YAG 激光器的二次谐波作泵浦光, 使稳频连续染料激光输出获得放大, 从而得到接近傅里叶变换极限的带宽及兆瓦级的峰功率。

Frequency stabilized dye laser oscillator-amplifier system for high resolution spectroscopy

Xia Jingfang

(Laser Physics Lab., Dept. of Physics, Fudan University)

Abstract: This paper describes a frequency stabilized dye laser oscillator-amplifier system for high resolution spectroscopy. It uses frequency doubled output of a Q-switched Nd:YAG laser to pump a system that amplifies the output of a frequency stabilized CW dye laser to provide near Fourier transform limited pulses of 1 MW peak intensity. A new method for laser frequency stabilization is also presented.

窄带、频率稳定、高功率的脉冲染料激光器是研究高分辨率光谱、喇曼散射、非线性光谱的强有力的工具。笔者曾涉及建立一套激光振荡放大系统的工作, 它的振荡级是一台稳频连续染料激光器, 放大器的泵浦源使用调 Q 的 Nd:YAG 的二次谐波输出。图 1 是该系统的原理图。

来自振荡级的 40 mW 连续激光经小孔 P 及焦距为 10 cm 的透镜 L_1 被聚焦至第一放大级的染料池, 腰部直径约为 0.1 mm。10% 的 Nd:YAG 泵浦功率由分束板 S_1 检

取并被 15 cm 焦距的柱面透镜 L_2 聚焦至第一放大级。 L_2 距染料池约 17 cm, 调节其间距离使泵浦光束和被放大光束接近匹配来提高输出功率。

振荡级与第一放大级之间的小孔 P 是为了抑制第一级放大产生的自发辐射反馈到振荡级的参考腔, 否则将引起稳频系统工作不正常。

收稿日期: 1985 年 1 月 21 日。

* 这项工作是作者在美国福特汽车公司科学研究中心 C. C. Wang 实验室与 John. U. James 和 C. Guo 共同完成的。

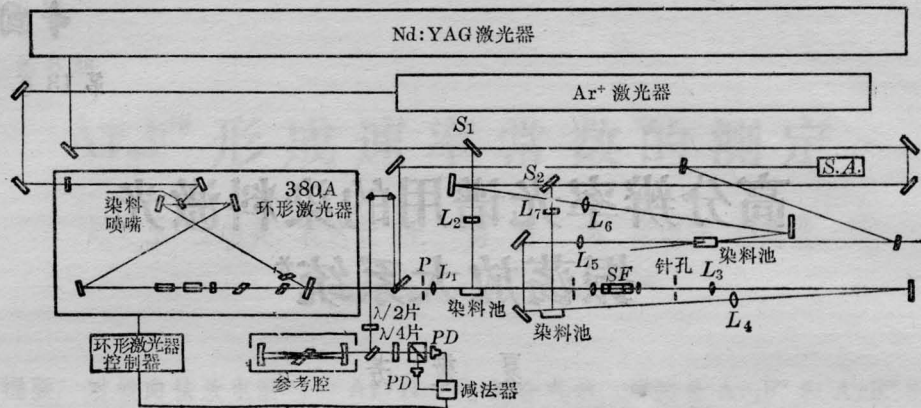


图1 系统原理图

考虑到整个系统输出的荧光背景将主要来自第一级,为此在第一、二级放大之间插入空间滤波器 SF ,它是由直视棱镜、一组透镜和一对 0.15 mm 的针孔所组成。

由于整个系统的增益很高,因此必须减少级间的反馈耦合。为此,使用 10 cm 焦距透镜 L_3 把输出光变换成平行光,增加第一放大级和第二放大级之间的空间距离,以致第二放大级产生的自发辐射反馈至第一级时,泵浦光脉冲已过去,该级增益降为零。

第二级放大用的染料池位于 50 cm 焦距的透镜 L_4 的焦点上,它距第一放大级约 2 m 。第二级也是横向泵浦,分束板 S_2 的反射率为 30% ,泵浦光由 25 cm 柱面透镜 L_7 会聚在第二级染料池上,其间距离为 23.5 cm 。第二级输出能量约 1 mJ 。

第一、二级放大用的染料是浓度为 2×10^{-3} 的 R6G,共用一个小型循环泵使染料流动。

第二级放大输出经由 40 cm 透镜 L_5 转换成平行光耦合至第三放大级。第三级是纵向泵浦型,对纵向偏振的泵浦光和被放大光来说,染料盒和入射光成布角。第三级染料浓度为 4×10^{-4} 的 R6G,染料也是流动的。泵浦光被 1 m 透镜 L_6 聚至第三级,其间距离为 90 cm ,以获得二光束匹配。耦合太紧将损坏染料盒窗片,因此必须小心从事。对应 50 mJ

的 Nd:YAG 倍频光泵浦能量,输出能量为 8 mJ 。

最后,为了监视振荡器及放大输出的频率特性,系统安排了另一条光路,耦合部分来自振荡级的和放大级的光至扫描频谱分析器 S. A。请参看系统原理图。

信噪比:这里是指被放大的输出激光对荧光背景之比。测量方法是当连续激光被阻断及未被阻断时用能量计分别测得相应的输出能量 $E_{\text{阻断}}$ 及 $E_{\text{未阻断}}$ 。但是有一点必须指出, $E_{\text{阻断}}$ 并非真正的荧光背景,这是因为染料介质的增益在有输入光时是不同于无输入光时的增益,用失谐的光谱分析器可以测量这二种情况下的增益比 $G' = G_{\text{CW}}/G_{\text{NOCW}}$ 。因此输出信噪比为 $(E_{\text{未阻断}} - E_{\text{阻断}} \cdot G')/G' E_{\text{阻断}}$ 。该系统信噪比为 5% 。

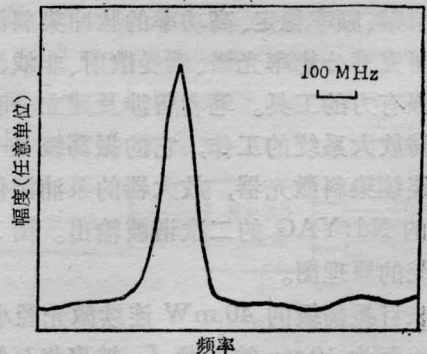


图2 激光振荡放大系统的输出频谱 (使用 Tropel 240 型光谱分析器得到的结果。FSR 为 1.5 GHz)

线宽: 用 1.5 GHz 的扫描光谱分析器测量激光光谱, 输出接至 Boxcar。图 2 是扫描光谱, FWHM 为 100 MHz。

时间特性: 图 3(a) 是 Nd:YAG 二次谐波的时间特性, 图 3(b) 是被放大的光的时间特性。根据

$$\Delta f_F = \frac{2(\ln 2)}{\pi} \frac{1}{\Delta t_F}$$

(这里 Δf_F 是输出激光频率特性的全半宽度 FWHM, Δt_F 是它的时间特性的全半宽度 FWHM) 计算, 5 ns 脉宽的激光脉冲相应的傅里叶变换极限带宽约为 90 MHz, 而测量值为 100 MHz, 可见该系统的输出激光的线宽是接近于它的时间特性的傅里叶变换极限。

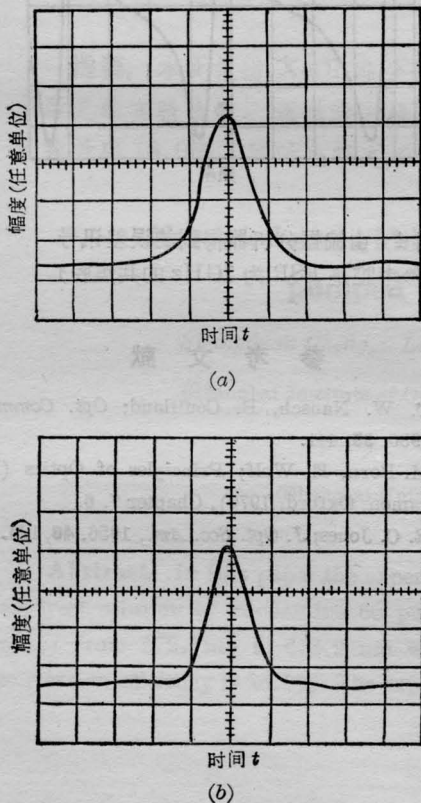


图 3

- (a) Nd:YAG 二次谐波输出时间特性, 5 ns/div;
 (b) 被放大的激光输出的时间特性, 同样扫描速度

边带: 当 Nd:YAG 多模时, 输出光存在一些边带, 其原因是 Nd:YAG 的多模引起染料介质折射率的调制, 从而引起介质增益调

制, 在这种情况下使用小尺寸的染料盒及提高泵浦功率是卓见效果的。

振荡器采用光谱物理公司的 380A 环形激光器, 这是一台单频扫频的激光系统, 有效带宽为 40 MHz, 扫描范围 30 GHz。380A 内部有三个频率选择元件, 它们是双折射滤光片, FSR 为 900 GHz 的薄 F-P 干涉仪及 FSR 为 75 GHz 的电调谐 F-P 干涉仪。适当地放置这些元件可使腔内只有一个振荡频率, 改变腔长可实现频率扫描, 具体是旋转一对伽文尼板来改变有效腔长。为了防止扫频时跳模, 厚的 F-P 干涉仪的传输峰必须以同样的扫频速率移动, 所以扫描控制信号必须同时加到电调谐(厚的) F-P 干涉仪上。

激光频率的稳定是由电子线路把它锁定在参考腔的腔频上来实现的^[1]。参考腔是共焦腔结构, FSR 为 1 GHz, 腔内有一块 B 角放置的伽文尼板。参考腔是温度稳定的。

来自 380A 的线偏振光经偏振旋转器 ($\lambda/2$ 波片) 进入参考腔, 入射光是离轴的, 目的是为了防止反馈光进入 380A 中去, 转动偏振旋转器使入射光的偏振方向和伽文尼板的入射面产生一个小的夹角 θ 。

输入光可分解成偏振平行及垂直入射面的二个分量 $E_{\parallel}^{(i)}$ 及 $E_{\perp}^{(i)}$:

$$E_{\parallel}^{(i)} = E^{(i)} \cos \theta$$

$$E_{\perp}^{(i)} = E^{(i)} \sin \theta$$

其中 $E^{(i)}$ 为入射光的电矢量振幅。平行分量经历一个和频率有关的相移, 而垂直分量则简单地被入射腔镜反射。这样自参考腔出射的光也由二部分组成, 即 $E_{\parallel}^{(r)}$ 及 $E_{\perp}^{(r)}$ 分别与 $E_{\parallel}^{(i)}$ 及 $E_{\perp}^{(i)}$ 相对应。

$$E_{\parallel}^{(r)} = E_{\parallel}^{(i)} \left\{ \sqrt{R_1} - \frac{TR}{\sqrt{R_1}} \right. \\ \left. \times \frac{\cos \delta - R + i \sin \delta}{(1-R)^2 + 4R \sin^2 \delta/2} \right\}$$

$$E_{\perp}^{(r)} = E_{\perp}^{(i)} \sqrt{R_1} \quad [2]$$

式中, R_1 为参考腔入射腔镜的反射率, T 为它的透射率, $\delta = 4\pi L/\lambda$ 为光在腔内一次来

回引进的位相差, R 为光在腔内一次来回引进的损耗, $R < 1$ 。

在严格共振时, $E_x^{(r)}$ 和 $E_y^{(r)}$ 同相, 合成光仍为线偏振光。失谐时, 平行分量相对垂直分量有一相移, 故合成光是椭圆偏振光, 椭圆度是由失谐程度决定的。

椭圆光检偏器由 $\lambda/4$ 波片、偏振分光棱镜及一对光电探测器组成。 $\lambda/4$ 波片的光轴这样放置, 以致当严格共振时, 它与来自参考腔的反射光偏振方向成 45° 。椭圆光检偏器把来自参考腔的反射光分成偏振互相垂直的两个分量, 它们的光强差为:

$$I_a - I_b = I^{(0)} 2 \sin \theta \cos \theta \times \frac{T_1 R \sin \delta}{(1-R)^2 4R \sin^2 \delta/2} \quad [3]$$

这个色散型的误差讯号加到伺服电路, 把激光频率锁定在参考腔频上。和调制型稳频技术相比, 它不需要调制解调装置。另外, 误差讯号在锁定点附近有陡峭的斜率, 在远失谐时仍有足够的误差讯号使系统重新回到锁定点, 这就解决了可调谐染料激光器使用中常出现的“跳模”这一棘手问题, 因而有较好的稳频效果。

一般来说, 脉冲染料振荡放大系统在以扫频方式工作时, 扫描周期很长(数分钟乃至二、三十分钟), 以配合测量仪器进行积分平均, 因此必须克服“跳模”以保证单频线性扫描。

上述激光系统在没有施加稳频措施之前, 由于染料流动的起伏、机械振动等细微因素经常发生“跳模”以致无法实现单频线性扫描, 而在采取了稳频措施后, 现象大为改观, 系统可保持在同一频率达一小时之久, 足以解决大部分实验需要。

图 4 是当 380A 扫描时得到的误差讯号。当反馈回路闭合时, 用 1.5 GHz 扫描频谱分析器测得激光线宽不大于分析器的线宽, 有效带宽为 10 MHz。

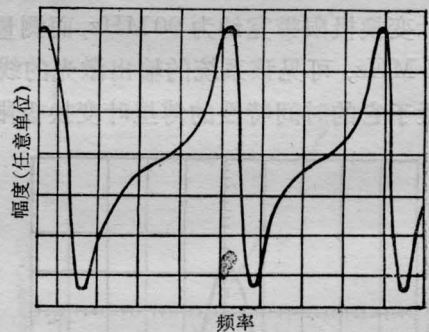


图 4 由偏振分析器得到的误差讯号 (参考腔是 FSR 为 1GHz 的共焦腔)

参 考 文 献

- [1] T. W. Nansch, B. Couillaud; *Opt. Commun.*, 1980, **35**, 441.
- [2] M. Born, E. Wolf; *Principles of Optics* (Pergamon, Oxford, 1970), Chapter 7, 6.
- [3] R. C. Jones; *J. Opt. Soc. Am.*, 1956, **46**, 126.