

超短腔染料激光器的频率牵引特性*

杨胜利

(厦门大学物理系, 厦门, 361005)

摘要: 比较了激光增益介质不同增宽类型对激光纵模频率牵引的影响, 实验测量了超短腔染料激光器 (SCDL) 多纵模运转时输出的光谱, 分析其频率牵引特性。通过频率牵引特性曲线可测定 SCDL 的腔长。

Characteristics of the frequency pulling of an ultrashort cavity dye laser

Yang Shengli

(Department of Physics, Xiamen University)

Abstract: The effects of spectral broadenings of laser materials on laser frequency pulling are compared, and the spectra and the characteristics of output from an ultrashort cavity dye laser (SCDL) at multi-longitudinal mode (LM) states were measured and observed experimentally. The instantaneous cavity length of SCDL can be determined by measuring the curves of the LM spacing vs the middle wavelength of the adjacent LM.

激光发明后不久, Lamb 就用密度矩阵方法导出了二能级原子介质的振荡频率关系, 其中对振荡频率的影响包括线性的频率牵引项和三阶非线性的频率排斥项^[1]。此后, 其它研究者采用不同的方法导出了频率牵引的公式^[2,3]。但是, 实验方面的研究却很少有关的报道。原因之一是实际运转的激光器腔长较长, 纵模间隔很小, 频率牵引对纵模的影响须用高分辨光谱仪才便于观测, 而且, 对频率牵引的测量也还没有至关重要的应用。我们研制的 SCDL 腔长仅 $10\mu\text{m}$ 量级, 纵模间隔可达 500cm^{-1} 以上, 用分辨率不高的单色仪也很容易把不同的纵模分得很开, 清楚地看到激光纵模受频率牵引影响后的变化。本文初步比较了不同增宽类型的频率牵引及其对激光纵模频率间隔的影响, 实验观测了 SCDL 的光谱及频率牵引效应的特征。实验结果表明, 染料(若丹明 6G)激光的频率牵引与通常遇到的具有洛伦兹线型的均匀增宽及具有高斯线型的非均匀增宽介质的频率牵引有较明显的差别。通过实验得到的频率牵引特性曲线, 可测定 SCDL 腔长的瞬时值, 并可稳定腔长。

一、光谱增宽类型对纵模的影响

决定激光频率牵引特性最重要的因素是激光介质的光谱增宽类型及其线型函数的形式。最常见的两种基本类型是具有洛伦兹线型的均匀增宽及具有高斯线型的非均匀增宽。激光染料的光谱增益带是由不同振转能级跃迁产生的密集谱线组成的。每条单一谱线一般属均匀增宽, 但整个激光增益谱带的线型属非均匀增宽, 而且其光谱轮廓是不对称的, 这显然不是高斯线型。可见, 染料激光的频率牵引特性不能用上述两种基本线型来解释。为了更清楚地了解与

* 国家自然科学基金资助项目。

两种基本增宽类型激光频率特性的差别,下面首先对它们进行讨论。

对于均匀增宽激光器,其纵模频率间隔为:

$$\Delta\nu_m = \Delta\nu_0 \left\{ 1 + \frac{c}{2\pi n \Delta\nu_H} \left[\Delta\nu_{m0} G'_L(\nu) \Big|_{\bar{\nu}_m} - G_L(\nu_{m-1}) \right] \right\} \quad (1)$$

$$G_L(\nu) = A g_L(\nu), \quad A = \frac{\Delta N_0 c^2}{8\pi n^2 \nu_0 \tau_{sp}}$$

$$g_L(\nu) = \frac{\Delta\nu_H}{2\pi} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_H/2)^2} \quad (2)$$

式中, ν_m, ν'_m, ν_0 分别为无源腔、有源腔共振频率及洛伦兹线型函数 $g_L(\nu)$ 的中心频率; $\Delta\nu_0$ 为无源腔纵模间隔: $\Delta\nu_{m0} = \nu_m - \nu_0, \bar{\nu}_m = (\nu_m + \nu_{m-1})/2; G'_L(\nu) = \frac{dG_L(\nu)}{d\nu}$; n 为增益介质远离共振的折射率, ΔN_0 为光场为 0 的粒子反转密度, c 为真空中光速。

CW 运转或稳态的情况下,增益 $G_L(\nu)$ 等于损耗 α 。这时,振荡纵模仍然是等间隔的。非稳态时激光纵模不再是等间隔的。由于 $g_L(\nu)$ 是以 $\nu = \nu_0$ 为对称轴的对称函数,故频率牵引对纵模的影响也是以 $\nu = \nu_0$ 为对称的: ν_0 两边纵模都向 ν_0 靠近,牵引量仅与 $\nu_m - \nu_0$ 大小有关,而与其符号无关。

如果考虑强光产生介质饱和对纵模频率的影响,则上面式子中 $G_L(\nu)$ 须用 $G_L(\nu, I)$ 代替:

$$G_L(\nu, I) = G_L(\nu) / [1 + I(\nu)/I_s(\nu)] \quad (3)$$

式中, $I_s(\nu) = \frac{4\pi n^2 \hbar \nu}{\rho \lambda^2 g_L(\nu)}$, $\rho = \tau/\tau_{sp}$ 为激光上能级量子效率,这样, (3) 式就包含了非线性的影响。

对于非均匀增宽激光器,如果增益线型为高斯线型 $g_D(\nu)$, 且 $\nu - \nu_0$ 甚小于 $\Delta\nu_D$, 则激光纵模间隔为:

$$\Delta\nu_m = \Delta\nu_0 \left[1 + B \Delta\nu_{m0} g'_D(\nu) \Big|_{\bar{\nu}_m} - B g_D(\nu_{m-1}) \right] \quad (4)$$

式中, $g_D(\nu) = \frac{2}{\Delta\nu_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp \left[-4 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D} \right)^2 \ln 2 \right]$ (5)

而 $g'_D(\nu) = \frac{dg_D(\nu)}{d\nu}$, $B = \frac{c^3 \Delta N_0 \sqrt{\ln 2}}{8 \sqrt{\pi n^3 \nu_0^2 \tau_{sp} \Delta\nu_D}}$ 。由于 $g_D(\nu)$ 是对称的, 于是, 频率牵引对纵模的影响也是相对于 $\nu = \nu_0$ 对称的, 使 ν_0 两边的纵模向 ν_0 靠拢。稳态情况下, 纵模间隔为:

$$\Delta\nu_m = \Delta\nu_0 \left[1 - B \sqrt{1 + I(\nu_m)/I_s} \right] \quad (6)$$

小信号 $I(\nu_m) \ll I_s$ 情况下, 纵模才是等间隔的。

染料激光介质的增益线型主要由其荧光光谱线型决定, 而如若丹明 6G 等染料的荧光光谱带是一个不对称线型, 它与频率的关系比较复杂, 可写为^[4]:

$$g(J) = a(J + J' + 1) \exp[-BJ(J + 1)\hbar c/kT] \quad (7)$$

J, J' 为染料上、下能级的转动量子数, 振转跃迁频率 (cm^{-1}) 为:

$$\tilde{\nu} = \tilde{\nu}_0 + BJ(J + 1) - BJ'(J' + 1) \quad (8)$$

这是一个短波长沿较长波长沿陡峭的函数。荧光光谱的这一不对称特性, 导致频率牵引使染料激光纵模间隔在光谱峰 ν_0 为中心的较大范围内随相邻纵模中间频率的增加而减少。

二、实 验 装 置

实验利用了一个双光栅单色仪与光学多道分析仪 (OMA) 观测了一个两级 SCDL 串联的

振荡系统中后一级 SCDL 输出激光脉冲的光谱^[5,6]。后一级 SCDL 用前一级输出的激光($\lambda \sim 540\text{nm}$)泵浦。前一级输出的激光脉冲宽度 $\sim 100\text{ps}$,其泵浦源为一大气压氮分子激光($\lambda = 337.1\text{nm}$)脉冲,宽度约为 750ps 。末级 SCDL 的激光介质采用若丹明 6G 的乙醇溶液,浓度 $10^{-3} \sim 10^{-2}\text{mol/L}$,其输出脉冲 $\sim 20\text{ps}$ 。SCDL 都处于瞬态工作状态。脉宽取决于泵浦水平、腔长、染料浓度等^[5]。

三、光谱及频率牵引特性

实验测量了 SCDL 在几种多纵模(从三模至十几个模)运转时的激光光谱。图 1a,图 1b 给出了三模与四模的光谱。图中横坐标为波长,单位是通道(CH),每通道宽为 0.1101nm ,原点 O CH 是波长 557nm 的起点;纵坐标为归一化光强。图 1a,图 1b 都是用 OMA 的二极管阵列探测器接收,SCDL 输出一个激光脉冲经双光栅单色仪后的光谱。从图中可清楚地看出,纵模间不相等,且随波长增大而变大。附表给出三至七个纵模运转的光谱参数。表中三模与四模是图 1a,图 1b 的光谱参数。表中 $\lambda_m, \Delta \tilde{\nu}_m, \Delta \lambda_m$ 分别为纵模峰波长、两相邻

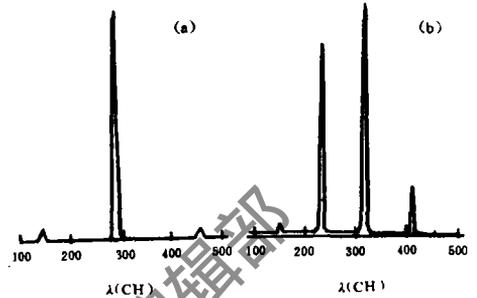


Fig. 1 The spectra of the laser output from the last stage of SCDL
a—at the state of 3-modes
b—at the state of 4-modes

Table Spectra data of the laser output from the last stage of SCDL operating at three to seven modes

operat. states	mode orders	λ_m (nm)	$\bar{\lambda}_m$ (nm)	$\Delta \tilde{\nu}_m$ (cm)	$(\Delta \lambda_m)$ (nm)	operat. states	mode orders	λ_m (nm)	$\bar{\lambda}_m$ (nm)	$\Delta \tilde{\nu}_m$ (cm)	$(\Delta \lambda_m)$ (nm)
(A) 3 modes	1	607.26	598.02	516.7	(18.48)	(D) 6 modes	1	601.72	598.55	177.0	(6.34)
	2	588.78	580.68	484.1	(16.32)		2	595.38	592.38	171.2	(6.00)
	3	572.47	573.78	265.3	(8.87)		3	589.38	586.46	169.8	(5.84)
(B) 4 modes	1	602.16	597.09	284.5	(10.14)	4	583.54	580.67	170.5	(5.75)	
	2	592.02	587.34	271.6	(9.37)	5	577.79	575.01	168.2	(5.56)	
	3	582.65	578.22	265.3	(8.87)	6	572.23				
	4	573.78				(E) 7 modes	1	601.31	598.47	159.1	(5.69)
(C) 5 modes	1	604.98	600.31	259.1	(9.34)		2	595.62	592.90	154.6	(5.44)
	2	595.64	592.32	247.2	(8.64)		3	590.18	587.58	151.0	(5.21)
	3	587.00	582.91	241.0	(8.19)		4	584.97	582.43	150.1	(5.09)
	4	578.81	574.94	232.8	(7.69)		5	579.88	577.41	148.4	(4.95)
	5	571.12					6	574.93	572.34	158.1	(5.18)
					7		569.75				

纵模波数间隔(cm^{-1})与波长(nm)间隔, $\bar{\lambda}_m$ 为两相邻纵模的中间波长 $\bar{\lambda}_m = (\lambda_m + \lambda_{m-1})/2$ 。从附表(A)三纵模的数据可见,纵模间隔达 500nm 以上,两个间隔之差超过 30nm 。频率牵引引起纵模间隔这么大的差别只有利用 SCDL 才可能观测到。

图 2 给出了激光频率牵引特性的曲线。曲线 B,C,D,E 是利用附表中 B 至 E 四组 $\Delta \tilde{\nu}_m$ 与 $\bar{\lambda}_m$ 的数据作出的。曲线反映了纵模间隔 $\Delta \tilde{\nu}_m$ 随相邻纵模中间波长 $\bar{\lambda}_m$ 的变化及频率牵引对纵模的

影响。曲线中间每一部分都接近线性,且随波长增长而变大。曲线的倾角越大,说明频率牵引纵模的影响越大。倾角不一样表明不同脉冲的频率牵引效应大小不同,其原因主要是 SCDL 工作于瞬态。激光光谱随工作条件而变化,因而使频率牵引的影响产生变化。图中 6 模的曲线 D 倾角较平缓,是由于频率牵引的影响较小。

与其荧光光谱比较,染料激光光谱包络线型有较大的变化。其一是激光光谱峰与荧光光谱峰不一致,随运转状态而变化。相对于荧光峰,激光峰向长波方向移动,从而激光光谱有较好的对称性。其二,激光光谱变窄了。本实验观测到的激光光谱大致比荧光光谱窄二倍。由于 SCDL 是瞬态运转,激光光谱随运转状态而变化,从而影响了频率牵引效应,因而图 2 各曲线倾角不一样。

利用频率牵引特性曲线,可以测量 SCDL 腔长的瞬时值。由于光谱峰处的频率牵引为 0,因此,可先通过曲线拟合找到激光光谱包络峰的波长,然后在频率牵引特性曲线上找到对应的 $\Delta \nu$ 值,由此计算该状态下腔长的瞬时值。对于腔长在 μm 量级的超短腔,要用其他常规方法测定腔长是较困难的,而且,在运转过程中,SCDL 的腔长是随时间变化的。在这种情况下,用这种方法监测腔长的动态变化比较方便,同时,还可以通过一个反馈系统来控制腔长的变化。

从上面的讨论,已经看到染料(Rh 6G)激光的频率牵引与洛伦兹线型的均匀增宽介质及具有高斯线型的非均匀增宽介质的频率牵引有较明显的差别。由于染料的荧光光谱线型比较复杂,因此,难于用明确的数学关系来较定量地分析其频率牵引特性。通过频率牵引特性曲线测量 SCDL 腔长是一个较方便的方法,同时通过腔长的监测可以实现对 SCDL 的控制。

参 考 文 献

- [1] Lamb Jr W E. Phys Rev, 1964; A134: 1429
- [2] Yariv A. Quantum Electronics. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1975
- [3] 周炳琨等编. 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1984
- [4] 赫茨伯格 G. 分子光谱与分子结构. 第一卷, 双原子分子光谱. 北京: 科学出版社, 1983
- [5] 杨胜利, Scott G W, Cox A J. 中国激光, 1989; 16: 452
- [6] 杨胜利. 激光技术, 1990; 14(5): 47

*

*

*

作者简介: 杨胜利, 男, 1946 年出生。讲师。现从事光电子学、激光与非线性光学的教学与研究工作。

收稿日期: 1993 年 7 月 12 日。

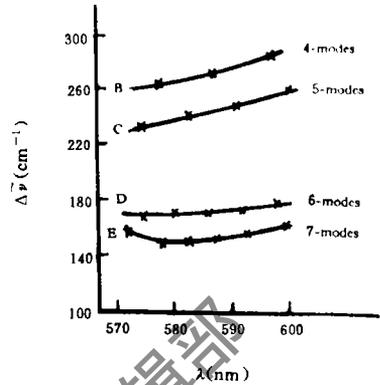


Fig. 2 The characteristic curves of the frequency pulling, the longitudinal mode (LM) spacing $\Delta \nu$ (cm^{-1}) vs middle wavelengths of the adjacent two LM's $\bar{\lambda}$ (nm)