

多纵模短腔染料激光放大前后光谱的比较*

杨胜利

(厦门大学物理系, 厦门 361005)

摘 要 实验观测了短腔染料激光器输出的多纵模激光及其经一级染料放大的激光光谱, 比较了光谱特性。在一定情况下, 短腔染料激光器的多纵模激光经放大器放大可产生一个至几个新纵模, 新纵模与短腔染料激光器输出的纵模有相似的频率间隔、线宽及频率牵引等特征。新纵模产生属于三阶四光子混频(即四波混频)为主导的非线性光学效应。存在频率牵引表明, 增益介质中的多波混频存在频率失配, 在这一四波混频中光子能量并不守恒。

关键词 新纵模产生, 频率失配, 频率牵引, 光子能量。

带染料放大的串联短腔染料激光器(SCDL), 不用锁模和单脉冲选取, 可直接得到微微秒单脉冲激光, 并有较高的峰功率^[1]。一些文献已介绍了对短腔染料激光器特性的研究^[1-4], 文献[5]报道了短腔染料激光器的频率牵引特性, 文献[6]观测了染料放大器新光频的产生, 指出新光频产生的条件、新光频的特征、产生新光频的根源及非线性光学效应及四光子混频的完全共振特性。

本文主要研究短腔染料激光器及其染料放大器多纵模运转的光谱特性。实验上观测了短腔染料激光器输出的激光及其经放大后频谱特性的变化: 测量了纵模中心频率、线宽、频率间隔; 比较了放大前后激光光谱包络、纵模数目、频率牵引等的变化。放大器引起激光包络、纵模数等变化归因于非线性光学效应。在均匀各向同性的染料放大介质中, 这属于三阶过程的四光子混频(即四波混频)为主的效应。产生的新光频落在放大介质增益带内紫端, 新模与原纵模有很大的相似性: 存在频率牵引, 与原纵模共线同向传播。新模的频率牵引意味着增益介质中的完全共振四波混频中光子能量不守恒。

1 实验装置与方法

实验的激光装置为两级串联的短腔染料激光器后跟一级染料激光放大, 如图 1 所示。系统的基本结构如文献[7]所述。仅有的差别是短腔染料激光器 I 的光路采用双通结构(后面加一个对激光高反的反射镜)。整个光路布局较[1]中的更为合理、紧凑。一个大气压的 N₂ 激光器用作短腔染料激光器 I 和染料放大的泵浦源, 其脉宽不到 1 ns, $\lambda = 337.1 \text{ nm}$, 脉冲能量~

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1996 年 2 月 1 日; 收到修改稿日期: 1996 年 9 月 16 日

1 mJ。从 N₂ 激光器输出端到放大器的光程不到 20 cm, 避免了文献[1]中因光路长引起的 N₂ 激光弥散等损耗, 从而使泵浦光的利用率有较大提高, 短腔染料激光器 I 为一个厚 1 mm 的石英染料池, 激光介质为香豆素的乙醇溶液(10⁻³ mol/l)。它输出的激光泵浦短腔染料激光器 II。第二级的激光介质为 Rh6G 的乙醇溶液, 浓度在 10⁻²~10⁻³ mol/l, 按腔长而用不同浓度。激光波长处于 560~610 nm。调节腔长, 其纵模数、纵模间隔、中心波长随之变化。腔长为几个微米时, 振荡的纵模仅 2~3 个, 甚至单纵模运转。短腔染料激光器 II 输出的激光通过棱镜 P₃ 和透镜 L₂、分束镜 B₁、放大器 A 放大。放大器用 N₂ 激光纵向泵浦, 其增益介质与短腔染料激光器相同, 但浓度较低, 约 10⁻³~10⁻⁴ mol/l, 其染料池厚 5 mm 和 10 mm。

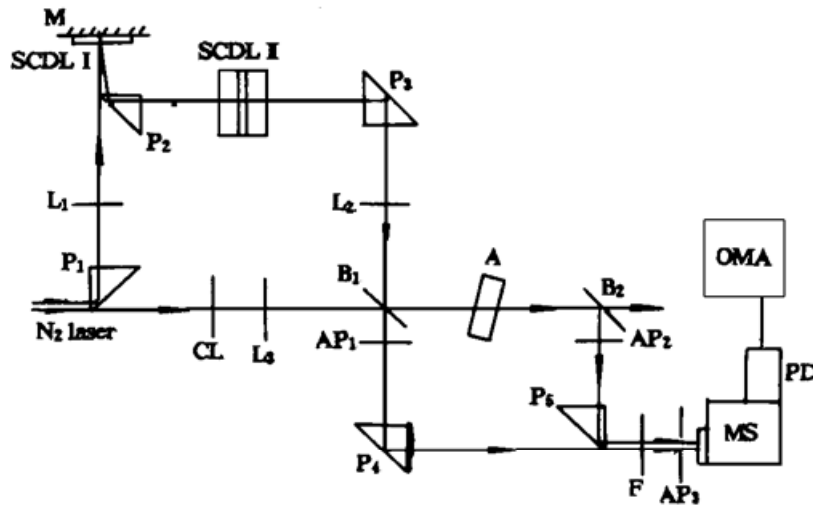


Fig. 1 Scheme of experimental arrangement. SCDL—short cavity dye laser, A—dye amplifier, P—prism, L—lens, CL—cylinder lens, M—mirror, B—beam splitter, AP—aperture, F—filter; MS—multichromic spectrometer, PD—photodiode array, OMA—optical multichannel analyzer

用多色仪(MS)和光学多道分析仪(OMA)测量短腔染料激光器 II 输出光谱与经放大器放大后的激光光谱。光路如图 1 所示。

测量的方法如下: 短腔染料激光器 II 输出的脉冲进入放大器 A 之前经分束器 B₁ 分成两部分, 反射部分进入 A 放大, 一小部分透射的经 P₄, 与经 A 放大后被 B₂ 分出的部分通过 P₅ 一起进入多色仪。多色仪分光后, 进入光学多道分析仪的二极管列阵探测器测量, 光谱数据用计算机存贮、处理并显示, 再给出光强随波长变化的光谱曲线。

2 激光光谱及其特性参数

图 2 所示为短腔染料激光器 II 输出的激光光谱与放大之后的激光光谱。每一图中上面为放大前的光谱, 下面为放大后的光谱。图 2(a) 放大前后纵模数目相同, (b)、(c) 增加一个。新增加的模皆位于蓝端。

表 1 给出图 2 中放大前后各纵模的中心波长 λ_m 、相邻两纵模的中间波长 $\lambda'_m = (\lambda_m + \lambda_{m-1})/2$ 、线宽 $\Delta\lambda_f$ (nm) 与纵模间隔 $\Delta\lambda_m = \lambda_m - \lambda_{m-1}$ 及 $\Delta\nu_m$ (cm⁻¹)。图 3 所示为图 2 中的纵模间隔 $\Delta\nu_m$ 随中间波长 λ'_m 变化的曲线, 虚线为放大前、实线为放大后 $\Delta\nu_m \sim \lambda'_m$ 的曲线。

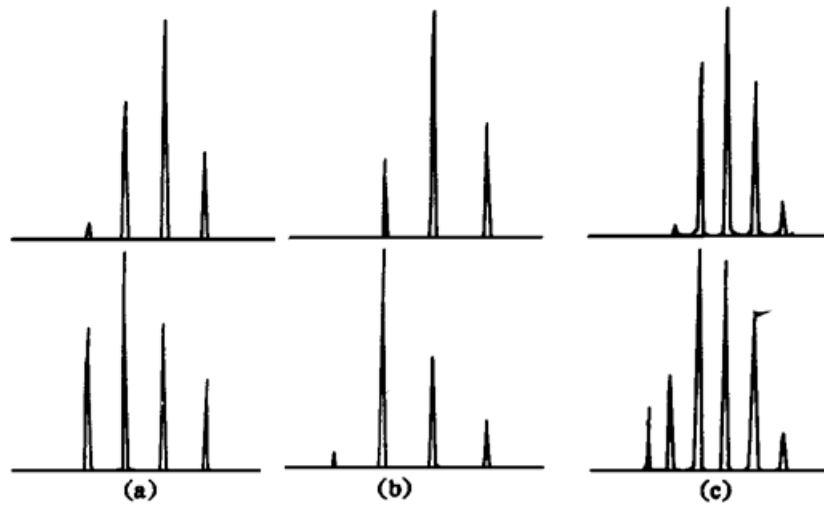


Fig. 2 Spectra of laser pulses: (upper) unamplified, i. e. output from SCDL II; (lower) amplified. (a): the number of longitudinal mode (LM) remains unchanged; (b), (c): one new LM added on the blue of amplified-laser spectra

Table 1. Experimental data of spectral parameters for Fig. 2 (a) ~ (c)

unamplified SCDL II laser							amplified laser					
mode	λ_m	$\Delta\lambda_f$	λ'_m	$\Delta\nu_m$	$\Delta\lambda_m$	c	λ_m	$\Delta\lambda_f$	λ'_m	$\Delta\nu_m$	$\Delta\lambda_m$	c
order	(nm)	(nm)	(nm)	(1/cm)	(nm)	(mol/l)	(nm)	(nm)	(nm)	(1/cm)	(nm)	(mol/l)
1	599.63	0.392					599.74	0.474				
2	590.62	0.349	595.12	254.52	9.01		597.09	0.423	595.11	261.42	9.26	
3	582.17	0.341	586.40	245.63	8.44	4×10^{-3}	581.91	0.412	586.20	249.40	8.57	8×10^{-4}
4	574.20	0.330	578.19	238.56	7.97		573.92	0.409	577.92	239.50	8.00	
1	599.62	0.357					600.08	0.569				
2	587.94	0.388	593.78	331.2	11.68	4×10^{-3}	588.04	0.434	594.06	341.3	12.04	
3	577.25	0.369	582.60	315.1	10.70		577.18	0.461	582.11	320.1	10.86	4×10^{-4}
4							566.93	0.564	572.06	313.2	10.25	
1	606.76	0.410	603.27	179.34	6.51		606.08	0.658	602.75	183.4		
2	599.57	0.370	596.44	173.36	6.17		599.42	0.598	596.28	177.2		
3	593.40	0.354	590.45	169.12	5.89	2×10^{-3}	593.13	0.642	590.25	171.1		8×10^{-4}
4	587.50	0.374	584.68	165.10	5.76		587.16	0.601	584.34	165.4		
5	581.85						581.51	0.534	578.72	166.9		
6							575.92	0.558				

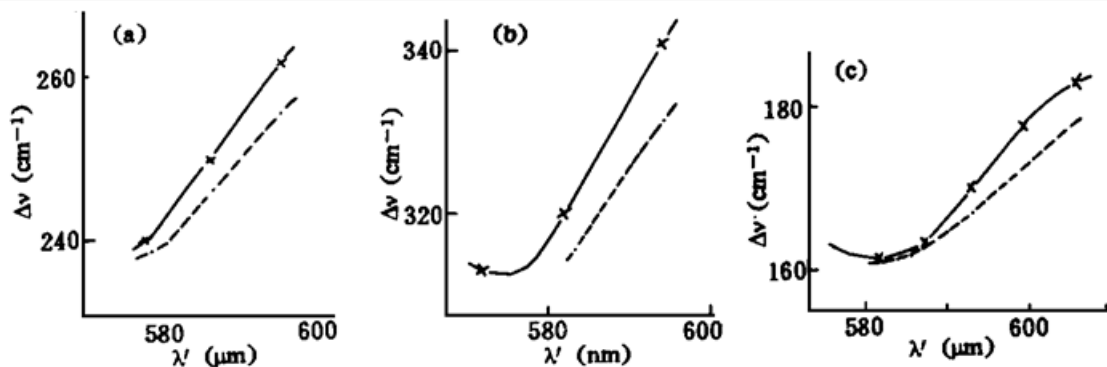


Fig. 3 Frequency pulling curves show LM's spacing ν_m vs. middle wavelength λ_m for Fig. 2 based on the data in Table 1, dashed for unamplified laser output from SCDL (II); solid for amplified laser

3 激光光谱包络与线宽的变化

从图 2 可见, 放大后光谱包络及峰位皆蓝移了。原因是放大器染料比短腔染料激光器 II

的浓度低。光谱蓝移导致蓝端的纵模从反转介质得到的线性增益较红端高。此外, 通过非线性耦合使红端纵模的能量向蓝模转移。当波长蓝移量足够大时, 就在蓝端产生一个或多个新纵模^[6]。因此, 放大器与短腔染料激光器 II 的增益带匹配得适当, 可使产生的新模有较高转换效率。比较表 1 的数据可见, 放大后纵模线宽比放大前有不同程度的增宽。这表明放大过程中存在一定程度的饱和。同一激光脉冲的不同纵模中, 强模的饱和较弱模明显。在其它运转条件相同的情况下, 纵模较少的脉冲的饱和比纵模多的饱和明显。尤其是单纵模放大时饱和就很严重, 双模放大饱和也较厉害。如果要得到单模窄线宽的短脉冲, 又要有较高功率, 就要采取克服饱和的措施。但是, 对于纵模较少的激光放大, 如单模或双模放大, 可以通过饱和增宽及有关参量的测量推算激光介质的分子常数, 作为其它测量方法的辅助手段。

4 频率牵引特性

从图 2 及表 1 的数据可看出, 光谱都存在频率牵引; 输出激光频谱特性由各自激光介质增益谱带的特性决定。频率牵引特征可用纵模间隔 $\Delta\nu_m$ 与相邻纵模中间频率 ν_m 的关系描述。忽略一个小项后, 这一关系为^[6]:

$$\Delta\nu_m = \Delta\nu_0 [1 - B\Delta\nu_{m0}G'(\nu)|\nu_m] \quad (1)$$

其中 $\Delta\nu_m = \nu_{m+1} - \nu_m$; $\Delta\nu_0$ 为无源腔纵模间隔或不存在频率牵引时的间隔, B 为常数, $\Delta\nu_{m0} = \nu_m - \nu_0$, $\bar{\nu}_m = (\nu_m + \nu_{m+1})/2$, ν_0 为增益线型 $G(\nu)$ 的峰位, $G'(\nu) = \frac{dG(\nu)}{d\nu}$ 。

比较激光器 II 输出的激光经放大器放大前后的频率牵引特性可看到, 放大器的频率牵引曲线从谷底到长波峰这段曲线的斜率总是比放大前的大。其原因和频率牵引与激光的瞬态特性有关。稳态时, 激光增益等于损耗, 不同频率的纵模其增益皆被箝在阈值上, $G(\nu) = \text{常数}$, 故 $G'(\nu) = 0$ 。瞬态情况下, $G(\nu)$ 随 ν 变化。脉冲经放大器放大后脉宽变窄, 因此瞬态效应更明显, 在频率牵引曲线上表现为放大后的牵引曲线斜率比放大前陡。比较激光器 II 不同纵模数(即不同纵模间隔)激光的牵引曲线可见, 纵模数少(间隔大)的牵引曲线陡。这说明斜率与瞬态特性存在一定的关系。在泵浦条件一样时, 激光器 II 腔长短(即纵模间隔大)光子寿命小, 脉冲的压缩比也大。因此, 腔长短, 输出脉宽就窄。由此可见, 对激光器 II 输出的激光及其经放大器放大后频率牵引曲线斜率的测量, 可用于激光瞬态特性的检测, 乃至脉宽的测量。

5 纵模耦合的频率关系

在放大器中放大的纵模也存在耦合。从而, 引起纵模之间能量的转移, 甚至可能产生新纵模^[6]。在染料等均匀介质中, 纵模之间的耦合属于三阶为主的非线性过程。其基元过程是三个不同频率, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的光子与介质共振相互作用, 产生一个频率为 ω_4 的光子; 同时, 也可以有两个不同频率, 比如 ω_1 、 ω_2 的纵模中的三个光子与介质共振相互作用, 产生一个频率为 ω_3 的光子。这些过程皆为四波混频。前者是非简并的, 后者是一重简并的。在非共振介质中, 这两个基元过程的频率关系为:

$$\omega_4 = -\omega_1 + \omega_2 + \omega_3, \quad \omega_3 = -\omega_1 + 2\omega_2 \quad (6)$$

这种情况下, 混频过程中的光子能量守恒。但在染料放大器中, 频率为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的三个相邻纵模混频产生一个 ω_4 新纵模时, 新光频 ω_4 与 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 所满足的频率关系与(6)式不同。 ω_4 与

$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3$ 不完全相等, 存在一定失谐量 $\Delta\omega$, 即

$$\omega_4 = -\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - \Delta\omega \quad (\omega_1 < \omega_2 < \omega_3, \Delta\omega > 0) \quad (7)$$

同样, 一重简并四波混频产生的 ω_3 与 ω_1 、 ω_2 之间也存在一定的失谐 $\Delta\omega'$:

$$\omega_3 = -\omega_1 + 2\omega_2 - \Delta\omega' \quad (\omega_1 < \omega_2, \Delta\omega' > 0) \quad (8)$$

这些关系可从表 1 的频率牵引数据看出。本实验中, 放大器产生的新光频皆位于增益带紫侧。可见, 在这种共振四波混频中, 光子能量不守恒。Bloembergen 指出^[8], 在无损耗介质中的四波混频中光子能量守恒。本实验属增益介质中的四波混频, 因此, 在无损耗也无增益的介质中, 四波混频光子能量守恒; 而在增益介质中的完全共振四波混频, 光子能量并不守恒。

参 考 文 献

- [1] 杨胜利, G. W. Scott, A. J. Cox, 产生单模可调谐 PS 单脉冲的串联超短腔染料激光器. 中国激光, 1989, **16**(8): 452~ 455
- [2] G. W. Scott, S. G. Z. Shen, Tunable sub-nanosecond pulses from short cavity dye laser systems pumped with Nitrogen-TEA. laser. Rev. Instrus., 1984, **55**(3): 358~ 364
- [3] H. P. Kortz, A. J. Cox, G. W. Scott *et al.*, Amplification of tunable, picosecond pulses from a single-mode short cavity dye laser. IEEE J. Quant. Electron., 1985, **QE-21**(11): 1795~ 1798
- [4] 杨胜利, SCDL 振荡放大系统单模及双模运转的特性. 激光技术, 1990, **14**(5): 47~ 52
- [5] 杨胜利, 超短腔染料激光器的频率牵引特性. 激光技术, 1993, **17**(6): 321~ 323
- [6] Yang Shengli, Generation of new longitudinal modes in an amplifying dye solution. Chinese J. Lasers, 1992, **1**(3): 249~ 254
- [7] 杨胜利, 紧凑型串联超短腔染料激光器与放大系统. 激光技术, 1995, **19**(4): 201~ 203
- [8] N. Bloembergen, Y. R. Shen, Quantum theoretical comparison of nonlinear susceptibilities in parametric media, lasers and Raman lasers. Phys. Rev. (A), 1964, **133**(1): 37~ 49

Comparison of Spectral Features for the Light of a Short Cavity Dye Laser Before and After Amplification

Yang Shengli

(Physics Department, Xiamen University, Xiamen 361005)

(Received 1 February 1996; revised 16 September 1996)

Abstract The spectra of the laser pulses output from a short cavity dye laser (SCDL) and then amplified by a dye laser amplifier were observed experimentally. The major spectral parameters of the laser spectral of the longitudinal modes (LM) were measured. The change in spectral features including spectral envelope, frequency pulling, and number of the LM etc., are compared. Under certain conditions, the dye amplifier can produce one or more new LMs in the multi-LM amplification, while in the other cases, the number of the LM output from the amplifier remains unchanged. There are striking resemblances between the new LMs and the initial modes, for example, the new modes have properties in frequency pulling, collinear and codirection propagating. In the mode coupling and generating there exists frequency pulling, this implies that there is photon-frequency mismatch and photon energy unconserves in total resonant four-wave-mixing (FWM) in dye amplifier.

Key words new longitudinal mode (LM) generation, frequency mismatch, frequency pulling, photon energy.