

## SCDL振荡放大系统单模及双模运转的特性

杨胜利

(厦门大学物理系, 厦门)

**摘要:** 本文报道对短腔染料激光 (SCDL) 振荡放大系统单模工作及双模工作时输出的光谱特性和运转性能的研究, 观测了放大器放大自发发射 (ASE) 及系统调谐特性, 讨论了系统ASE及其不稳定性等问题及其解决的措施。

## Features of SCDL oscillator-amplifier performance in single and double longitudinal modes

Yang Shengli

(Department of Physics, Xiamen University)

**Abstract:** The experimental research on the spectral properties of the output and the performance of the short cavity dye laser (SCDL) and its dye amplifier operating in single and double modes respectively is reported. The problems on amplified spontaneous emission (ASE) from the amplifier, and instability of the ASE are discussed. The solution of the problems are proposed.

## 前 言

用ns脉冲泵浦的短腔染料激光器 (SCDL) 作为压缩短激光脉冲, 产生ps单脉冲的一种方便的手段, 已受到一些研究者的注意, 并已有一些文章报道了它的工作原理<sup>[1]</sup>及其有关的实验结果<sup>[2~5]</sup>。由于SCDL的腔长很短, 输出的脉冲能量很低, 一般都需要经过放大才能达到实际应用的水平。在许多工作中要求激光器为单纵模输出, 而另一些场则需要双频的光源。可见, 深入地研究SCDL及其放大器分别在单(纵)模及双(纵)模工作状态下的

作者简介: 徐平, 男, 1965年出生。研究生。从事光电子及光信息处理。

高文琦, 女, 1934年出生。副教授。从事激光及光信息处理。

收到修改稿日期: 1990年3月29日。

性能,有着重要的实际意义。对SCDL及其放大器输出的光谱特性的研究,是了解SCDL振荡放大系统性能最重要的方法之一,同时也是寻求提高系统的性能及获得高质量、高稳定度激光输出的关键。至今,关于SCDL及其放大器输出光谱特性的系统研究则还未见有报道。本文的目的是阐明我们在这方面工作的一些初步的结果。我们在实验中测量了SCDL及其染料激光器在单模工作及双模工作时输出的光谱,放大自发发射(ASE)的光谱,讨论了调谐特性,系统的稳定性等存在的问题,提出了解决问题的途径。

## 一、实验装置和方法

用于本实验的仪器装置如图1所示。其中的激光主振荡器为两级短腔串联的SCDL,其结构的详细描述见文献[2,3]。第一级SCDL(图中未画出)是一个染料厚度为1mm的染料池,染料为香豆素540A的乙醇溶液,浓度为 $4 \times 10^{-8} \text{ mol/l}$ ,用 $\text{N}_2$ 激光纵向泵浦。它输出的绿色激光中心波长为 $\lambda_m = 536 \text{ nm}$ ,用于泵浦第二级——SCDL<sub>2</sub>。SCDL<sub>2</sub>的腔长仅几微米到十几微米,可通过改变加在其压电陶瓷环(PZT)上的电压来调节,从而可连续调谐其输出

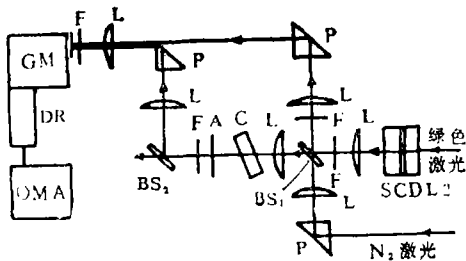


图1 实验装置

SCDL<sub>2</sub>—两级串联的SCDL的第二级  
C—染料激光放大器染料池 P—棱镜  
L—透镜 F—滤光片 A—小孔光栏  
BS<sub>1</sub>、BS<sub>2</sub>—分束镜(反射透射比 $R/T$   
为:BS<sub>1</sub>对可见光 $R/T = 15/85$ ,对  
337.1nm $R/T = 99/1$ ;BS<sub>2</sub>对可见光  
 $R/T = 10/90$ ) GM—双光栅单色仪  
DR—平面二极管阵列探头 OMA—光  
学多道分析仪

激光的波长。SCDL<sub>2</sub>的增益介质为若丹明6G的乙醇溶液,输出波长可在560~610nm的范围内调谐。SCDL<sub>2</sub>的输出激光经BS<sub>1</sub>、L、F进入染料放大池C放大。染料放大池C用泵浦第一级SCDL的同一个 $\text{N}_2$ 激光器纵向泵浦。 $\text{N}_2$ 激光的主要特性为:波长 $\lambda = 337.1 \text{ nm}$ ,当其电源电压为18kV时,输出的激光脉冲能量为1.1mJ,脉冲宽度为~750ps。当泵浦光稍高于其增益介质的阈值时,第一级SCDL可输出~75ps的单脉冲,第二级SCDL<sub>2</sub>可输出~22ps的单脉冲。由于光程较长及各光学元件的损耗,且放大池前用一小孔光栏挡掉离散的泵浦光,进入放大池C的 $\text{N}_2$ 激光的脉冲能量仅~0.3mJ。放大器增益介质用若丹明6G的乙醇溶液,配1cm厚的染料池时,其能获得最大增益的浓度为 $4 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ 。在这条件下放大后的激光的脉冲能量最高可达14 $\mu\text{J}$ 。放大池的效率为5%。

为了研究第二级SCDL<sub>2</sub>及其放大器C输出的光谱特性,我们用双光栅单色仪GM及带有一个平面二极管阵列探头DR的数学多道分析仪OMA同时测量了SCDL<sub>2</sub>输出脉冲的光谱及其经C放大之后的光谱。如图1所示,SCDL<sub>2</sub>输出的脉冲一部分被BS<sub>1</sub>反射后经F、L、P、L和F,再从GM的狭缝进入GM,另一部分透过BS<sub>1</sub>经L进入C放大,放大后输出的激光经A、F被BS<sub>2</sub>反射的部分经L、P、L、F,与BS<sub>1</sub>的反射束一起进入GM的狭缝,一束在上,一束在下。两束激光经GM展开后,由DR检测。光谱数据贮存于OMA的存贮单元中,用计算机处理,把光谱曲线用X-Y绘图仪画出来。

## 二、光谱特性

### 1. 单纵模运转

SCDL2单纵模运转时输出及其经放大器C放大之后输出的光谱如图2(a)、(b)所示。其中右边500~1000通道(CH)的曲线为SCDL2输出的激光光谱；左边0~500CH的曲线为SCDL2输出经C放大之后的光谱及放大器C产生的放大自发发射(ASE)背景光谱。其主要光谱参数如表1所示。

表1

		染料浓度 (mol/l)	纵模峰波长 $\lambda_m$ (nm)	纵模线宽 $\Delta\lambda$ (nm)	纵模峰功率 $P_m$	纵模积分强度 $I$	腔长 $d$
图2 (a)	SCDL2	$4 \times 10^{-3}$	589.68	0.389	$2.65 \gamma_a$	$8.78 \gamma_a$	$< 5\mu\text{m}$
	放大器C	$4 \times 10^{-4}$	589.27	1.001	$6.48 \gamma_a$	$6.36 \gamma_a$	1cm
图2 (d)	SCDL2	$4 \times 10^{-3}$	589.67	0.310	$2.79 \gamma_a$	$8.45 \gamma_a$	$< 5\mu\text{m}$
	放大器C	$4 \times 10^{-4}$	591.19	1.194	$7.05 \gamma_a$	$7.24 \gamma_a$	1cm

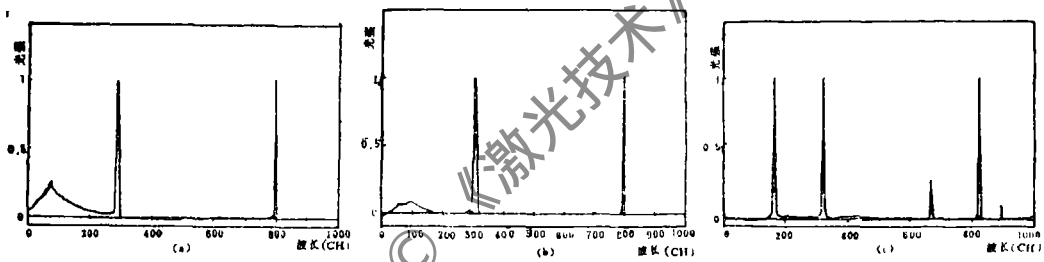


图2 SCDL2输出的激光及其经放大器C放大之后的光谱。(a)、(b)为单模运转的光谱，(c)为双模运转时的光谱  $1\text{CH} = 0.1101\text{nm}$   $0\text{CH} = 557.5\text{nm}$

从图2(a)、(b)可见，放大之后的激光光谱除了一个纵模的光谱外，比SCDL2输出的激光光谱还多了一个范围很宽的光谱带，这是放大器C产生的放大自发发射(ASE)的光谱。从表1纵模线宽的数值可见，放大之后纵模加宽了，这主要是饱和效应引起的。图2(a) SCDL2纵模线宽大于图2(b)，纵模的极限线宽 $\Delta\nu$ 与无源腔纵模线宽 $\Delta\nu_c$ 的平方成正比，与其功率成反比<sup>[6]</sup>：

$$\Delta\nu \propto h\nu (\Delta\nu_c)^2 / P \quad (1)$$

式中， $\nu$ 为纵模频率； $\Delta\nu_c$ 为无源腔线宽； $P$ 为激光功率。

实验中，我们没有测量图2(a)、(b)两种情况SCDL2及放大后的输出功率的绝对值，表中纵模峰功率为从OMA记录的数据求得的。由于图2(a)与(b)测量的元件布置一样，因此元件的衰减可用同一系数 $\gamma_a$ 表示SCDL2输出经这些元件的衰减常数，而 $\gamma_b$ 表示放大器输出所经元件的衰减常数。可见，图2(a) SCDL2输出纵模峰功率 $P_a$ 与图2(b)的SCDL2输出纵模峰功率 $P_b$ 比为：

$$P_a : P_b = 2.65 : 2.79$$

即  $P_a < P_b$ , 因此,  $\Delta\lambda_a > \Delta\lambda_b$ , 这就是图2 (a) SCDL2纵模线宽较图2 (b) 大的原因。放大后纵模增宽图2 (b) 比 (a) 厉害, 也正是  $P_b > P_a$ , 使其饱和效应比图2 (a) 严重, 而且图2 (a) SCDL2纵模积分强度  $I_a > I_b$  (图2 (b) SCDL2纵模积分强度), 放大后的积分强度则有:  $I_b > I_a$ 。

## 2. 双纵模运转

图2 (c) 为系统双纵模运转时, SCDL2及放大器输出的激光光谱, 右边为SCDL2输出的光谱, 左边为放大后的光谱。其主要光谱参数如表2所示。比较表1和表2的参数可知, 双模运转SCDL2纵模线宽较单模运转时宽, 双模放大纵模增宽比单模情况小得多, 其原因是单模输出峰功率比双模峰功率高得多的缘故。从表2可见SCDL2输出的纵模间隔与放大后的

表 2

	模序号	染料浓度 (mo/l)	纵模峰波长 $\lambda_m$ (nm)	纵模间隔 $\Delta\nu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	纵模线宽 $\Delta\lambda$ (nm)	纵模峰功率 $P_m$	腔长
SCDL2	1	$2 \times 10^{-2}$	575.62	502.0	0.561		$\sim 7.4\mu\text{m}$
	2		592.74		0.557		
C	1	$4 \times 10^{-4}$	575.49	499.3	0.659		1cm
	2		592.44		0.694		

不一样, 其原因可能是: (1) 频率牵引; (2) 仪器噪声影响; (3) SCDL2与放大器输出的两束进入双光栅单色仪GM的光平行度及准直的误差; (4) 光谱定标的误差等因素引起的。由于我们没能动态监测SCDL2腔长, 因此无法估计其频率牵引量。其中SCDL2腔长值是由纵横间隔的估计值。

## 三、放大的自发发射 (ASE)

实验中我们发现, 当输入泵浦光时, 放大器会产生两种类型的ASE。

第一类ASE (I), 非类激光型。它伴随泵浦光输入放大器而产生, 不要求泵浦光超过放大器增益介质的阈值, 其发散角较大, 几度到十几度, 与泵浦光共轴。它不同于自发发射, 自发发射是各向同性的, ASE (I) 有明显的方向性; 也不同于第二类ASE (II), 不同于激光。ASE (II) 及激光发散角都很小, 有阈值。当放大池用1cm池, 染料为  $4 \times 10^{-4}$  mol/l时, ASE (I) 接近最强; 浓度增加时, ASE (I) 减弱; 浓度为  $8 \times 10^{-5}$  mol/l时, ASE (I) 已很弱 (这时用0.5cm或0.1cm厚池也仍很弱)。由ASE (I) 与泵浦光共轴, 可见图2 (a)、(b) 中左侧的ASE光谱是ASE (I)。图2 (a)、(b) ASE (I) 的积分强度皆比激光强, 图2 (a) 中ASE (I) 积分强度约为激光的2倍, 图2 (b) 的1倍多。取这两个图的数据时, 放大池输出方已用一小孔光栏挡掉了比激光束稍大的那部分ASE (I), 可见ASE (I) 的损耗是很大的。而多模运转则大不相同, 大多数情况下都没有ASE (I) 背景, 个别情况下, 即使有, 也很弱。比较图2 (a) 与 (b) 的ASE (I) 光谱可见, 两者的轮廓不一样, 带宽不一样, (a) 比 (b) 宽, (a) 积分强度大。再比较表1中两种情况下SCDL2的峰功率及积分强度可知,  $P_a < P_b$ , 而  $I_a > I_b$ 。可见, 纵模功率高的激光放大时才能更有效地抑制ASE (I), 当峰功率足够大时, 便可完全猝灭ASE (I)。

比较图2中单模与双模的情况及实验中其它多纵模放大的光谱可知\*, 单模放大的条件下, 要求其信号功率比双模等多模放大情况下高得多, 才能使ASE (I) 完全猝灭。激光纵模猝灭ASE (I), 与不同纵模之间的竞争都是三阶非线性耦合效应。纵模间隔小, 耦合大, 间隔大, 模间的耦合小。从这一道理, 我们就更易于理解, 单模放大要使ASE (I) 完全猝灭, 要求比多模放大高得多的功率的原因。

第二类ASE (II), 类激光型。它是在泵浦光超过介质阈值的条件下才可能产生的, 其发散角很小, 仅几个mrad, 其光轴与放大池的输入面(输出面与输入面平行)垂直; 光斑亮度很高。当放大池端面法线与泵浦光成一定角度, 并输入信号激光后, ASE (II) 便消失。

#### 四、光谱调谐

SCDL是一标准F-P腔, 其纵模频率:

$$\tilde{\nu}_k = k/nd \quad (2a)$$

波长,  $\lambda_k = nd/k \quad (2b)$

纵模间隔为,  $\Delta\tilde{\nu} = 1/nd \quad (3a)$

或  $\Delta\lambda = \lambda_k^2/nd \quad (3b)$

式中,  $k$ 为整数;  $n$ 为腔内介质折射率;  $d$ 为腔长。利用上述关系可说明, 通过腔长改变使纵模波长(或频率)位置变化及纵模间隔的变化。

腔长 $d$ 变小时, 纵模波长及纵模间隔变小, 纵模在增益带内从右向左移动, 见图2。当纵模与增益带红端截止波长 $\lambda_r$ 差:  $\delta\lambda_k = \lambda_r - \lambda_k$ 大于腔的纵模间隔:  $\delta\lambda_k > \Delta\lambda$ 时, 便在增益带红端出现另一纵模 $\lambda_{k+1}$ , 则单模运转变为双模运转。

为讨论方便, 定义增益带宽为增益带红端截止波长与紫端截止波长差:  $\Delta\lambda_G = \lambda_r - \lambda_p$ 。那么, 当调谐过程中,  $\Delta\lambda_G \geq \delta\lambda_k$ 时, 调谐过程中保持单模输出。

在双模调谐中, 只要纵模间隔 $\Delta\lambda$ 满足关系

$$\Delta\lambda_G/3 < \Delta\lambda < \Delta\lambda_G/2$$

则SCDL2输出可保持双模激光。若 $\Delta\lambda$ 满足关系:

$$\Delta\lambda_G/4 < \Delta\lambda < \Delta\lambda_G/3$$

则随着腔长 $d$ 的变化, 双模与三模交替出现。

#### 五、SCDL的稳定性

SCDL2在单模或双模等少模运转的情况下, 由于其腔长仅几微米到十几微米, 反射镜之间染料溶液在这样薄的间隔中是很难顺畅地循环流动的。因此, 泵浦光相当大部分能量转化为泵浦染料及腔镜的热能就使其温度升高, O形圈膨胀而使腔长变长, 最终使输出波长向长波方向移动。实验中, 我们观测了重复率为2Hz的泵浦脉冲开始输入SCDL2之后, 5~10s内因腔长变化使波长移动4~8Å。停止工作后, 腔长又会因温度下降而变短, 单模

\* 多纵模的光谱特性将在另一文章中详细讨论及阐明。

或双模运转时，甚至腔内完全没有染料而不能继续运转。SCDL不稳定性的这一严重缺陷，使可调谐SCDL至今没有商品出售，极大地阻碍可调谐单模或双模SCDL的实用化。当然，可调谐SCDL也可找到一个适当的条件，使其在工作中达到腔长动态稳定。当泵浦脉冲能量及其重复率、环境温度一定，且重复率不太低时，泵浦一定时间后，腔与环境热交换达到平衡时，腔与介质温度就将保持一定，从而维持腔长不变。但这终究不是一个很好的解决问题的办法，因为，当泵浦脉冲能量及其重复率、环境温度随时间变化时，腔长仍然会变化。因此，根本的途径在于改变腔的结构设计。

本文的实验工作是在美国加州大学河溪分校G.W.Scott的实验室中完成的。感谢G.W.Scott及A.J.Cox对本工作的支持。

### 参 考 文 献

- [1] Roess D, J.A.P., 1966; 5: 2004  
Lin Chinlon et al., A.P.L., 1975; 26: 389
- [2] 杨胜利, Scott G W, Cox A J, 中国激光, 1989; 16 (8): 452
- [3] Cox A J et al., A.P.L, 1977; 31: 389
- [4] 张威芬, 王小异, 高淑娟 et al.; 中国激光, 1987; 14 (8): 473
- [5] Qian LJ et al., Opt.Comm., 1989; 69: 398
- [6] 周炳昆等编, 激光原理。北京: 国防工业出版社, 1980: 99

\*

\*

\*

作者简介: 杨胜利, 男, 1946年1月出生。讲师, 现从事光谱学、非线性光学教学及激光光谱和超短脉冲的研究。

收稿日期: 1990年4月1日。

• 简 讯 •

### 南京光学仪器厂推出一种便携式冲洗扩印设备

南京光学仪器厂设计生产的BAX-902型便携式冲洗扩印设备, 1981年11月已通过了由总参二部主持的有14个单位参加的鉴定。该机特色有: 自动校色, 微机控制, 功能全, 配套性好, 可在明室条件下操作, 有拼扩功能, 体积小, 重量轻, 便于携带, 可满足部队在野战条件下对120、135彩色、黑白胶片的冲扩要求。为我军实施侦察照相提供了一种新型的冲扩设备。

(孙建明 供稿)