

# 红宝石激光器的被动式隐花菁染料调 Q

赵燕曾 伍少明 金惠淑 谢威光 郝南军

(中国科学院大气物理研究所)

## Cryptocyanine solution as a passive Q-switch in ruby laser

Zhao Yanzeng Wu Shaoming Jin Huishu  
Xie Weiguang Hao Nanjun

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

### Abstract

The experimental investigations on Q-switching of a ruby laser system by cryptocyanine are reported: 1) The dependence of output characteristics on dye concentration and other parameters of the laser cavity, 2) the dependence of output energy on temperature and solvent of the dye, 3) the influences of temperature, solvent and impurity content on the optical bleaching of the dye solution. Theoretical analysis and numerical tests are made for the third problem on the basis of the experiments.

### 一、隐花菁染料调 Q 器件的动态输出特性

隐花菁调 Q 器件具有阶梯状的动态输出 (如图 1 所示), 即从动态阈值  $W_0$  起, 逐渐增加输入能量, 输出能量基本不变, 直到输入能量达到  $W_1$  器件输出两个能量大致相等的脉冲为止, 这时输出能量跃增一倍。原则上说, 若光泵能量继续增加, 则输出能量将随脉冲个数的增多而成倍增长。 $W_0$  到  $W_1$  称单脉冲区。在其他条件不变时, 若光泵效率下降, 动态输出曲线仅仅向右平移 (如图 1 中虚线所示), 输出能量并不发生变化。因此若在单脉冲区的固定输入能量  $W$  下工作, 则在相当

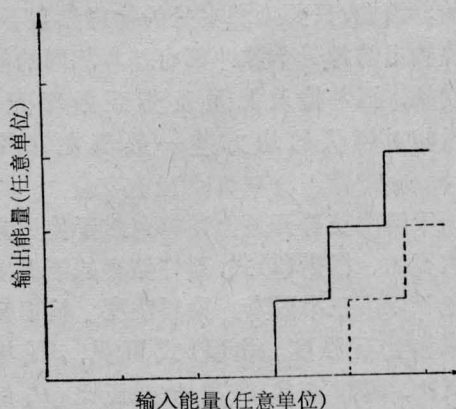


图 1 隐花菁调 Q 器件的动态输出曲线

长时间内可以保持输出能量不变, 直到  $W$  低于阈值为止, 这时必须提高输入能量或重

收稿日期: 1978 年 12 月 9 日。

新处理光泵。

隐花菁调 Q 器件的这一特性是由开关的被动性质所决定的。染料作为开关是基于染料的光学漂白原理,因而腔内出现强光是“打开”染料开关的先决条件。我们的实验表明,隐花菁溶液的吸收饱和参量在常温下很高,它在静态激光(峰值功率密度约  $10^4$  瓦/厘米<sup>2</sup>)下的透过率与弱光透过率几乎相等。这说明,在激光振荡出现之前,腔内始终维持在高损耗下,直到反转粒子数密度达到这种高损耗腔的阈值,出现激光后,损耗才迅速下降,从而形成巨脉冲。

从染料开关的开启过程可知,巨脉冲能否出现基本上只取决于初始反转粒子数密度是否达到了高损耗腔的阈值条件,即

$$\Delta N = -\ln[R(1-A_s)T_0^2]/2\sigma_a L \quad (1)$$

式中  $\Delta N$  是反转粒子数密度,  $R$  是输出镜反射率,  $A_s$  是腔内各种附加损耗的总和,  $T_0$  是染料的弱光透过率,  $\sigma_a$  是红宝石  $R_1$  线的峰值吸收截面,  $L$  是宝石的有效长度。在谐振腔其他参数不变的条件下,  $\Delta N$  只依赖于染料的初始透过率  $T_0$ 。染料浓度确定时,激光脉冲出现之初工作物质内储存的能量也是确定的。因此,只要染料本身的物理参数不变,器件输出的每一个脉冲都有基本相同的能量和功率,而与输入能量及光泵效率无关。能量相对起伏的均方差一般都在 10% 以下。

了解隐花菁开关上述特点对于使用是十分重要的。根据(1)式,器件储存的能量主要决定于以下三个因素:染料浓度、输出镜反射率和宝石温度。由(1)式可见,  $\Delta N$  与  $\sigma_a$  成反比,因而与  $R_1$  线宽  $\Delta\nu$  成正比( $R_1$  线是均匀加宽的)。而  $\Delta\nu$  是随温度增加的<sup>[4]</sup>。所以如果红宝石没有冷却措施,输入能量的阈值就起伏很大,难于找到稳定的工作点。此外,由于  $\Delta N$  增加时器件储存的能量增加,加上在染料调 Q 时储存能量转换为输出能量

的比例随  $\Delta N$  而增加,因此器件输出能量也随宝石温度升高而加大。每根宝石的温度效应都不尽相同,铬离子浓度愈低则温度效应愈显著。基于以上规律,红宝石一直是水冷的,水温短时间内的变化在  $\pm 1\sim 2^\circ\text{C}$  内。图 2 是一个具体例子,表明器件阈值及输出能量随宝石温度的变化。

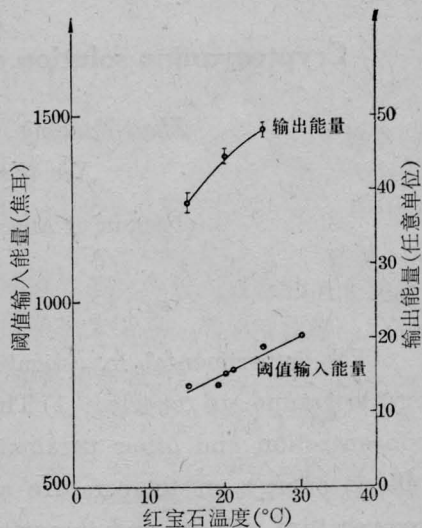


图 2 器件输出能量及阈值随红宝石温度的变化

(1)式还表明,  $R$  愈小,则  $\Delta N$  愈大(输出能量愈大),但  $R$  减小时阈值也要升高。究竟减小  $R$  是否有利要看红宝石的铬离子浓度。实验表明,当铬离子浓度较大时减小  $R$  引起的阈值升高并不多,而输出能量的增加却是十分显著的。例如在 I 型激光雷达的器件中将输出镜从 50% 反射介质膜镜换成三平晶组和一片平行平晶时,能量从 1 焦耳左右分别增加到 3 焦耳和 5 焦耳左右,而阈值的变化不到 20%。后来的理论分析进一步解释了这一事实。

染料调 Q 器件输出大小和稳定性以及近场花样都与谐振腔的调整有密切关系。实验表明,在输出端反射率很小时,腔内各元件不完全平行是获得稳定输出的必要条件之一。

## 二、温度、溶剂种类、杂质含量对染料的光学漂白及器件输出能量的影响

如前所述，在谐振腔参数不变和染料浓度确定的情况下，巨脉冲出现之初红宝石储存的能量是常数。但其中有多少转换为激光能量，则依赖于巨脉冲过程中染料开关的损耗，即与染料的吸收饱和过程有关。染料吸收饱和的特征量决定于染料激发态的弛豫过程及其速率，因而与溶剂的温度、粘性、杂质含量等因素有密切关系。

### 1. 染料温度对输出能量的影响

染料的温度效应是引起我们注意溶剂物理参数的重要原因。1974年以前我们一直使用甲醇作溶剂。由于发现器件的稳定性在夏季变差，且能量的平均值随环境温度升高而系统下降，促使我们考虑染料的温度效应，并对此进行了专题实验。实验中使用的染料盒置于温度可控的黄铜水套中，染料配置已有半年，估计已达氧饱和，弱光透光率  $T_0 \geq 0.5$ 。

输出能量随染料温度的变化见表1及图3。

由图及表可以看出，随着染料温度的升高，输出能量的下降及起伏量的加大都是显著的。

表 1

染料温度 (°C)	平均输出能量 (焦耳)	相对均方差 (%)
5.0~6.3	0.63±0.03	5
9.8~10.2	0.66±0.02	3
11.2~11.7	0.67±0.05	8
15.0~16.0	0.60±0.06	10
20.0	0.56±0.05	8
25.0	0.43±0.05	12
30.0	0.48±0.08	17
35.0	0.49±0.07	15
40.0	0.37±0.09	23

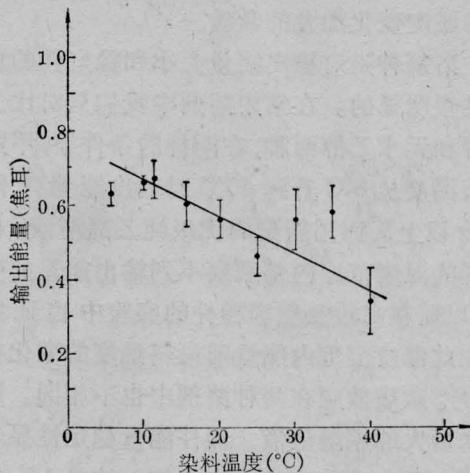


图3 动态输出能量随染料温度的关系 (隐花菁-甲醇溶液)

值得注意的实验事实还有两点：(1)染料加热后再冷却，器件的输出能量可以恢复到原来数值，即过程是可逆的。(2)染料温度升高后，器件阈值并不降低，还略有升高，即宝石的阈值反转粒子数并未降低。这两点表明，温度升高时染料既未发生热分解，弱光消光系数也未减小，因此输出能量的降低只能归因于染料强光消光系数随温度的增加。如果确系如此，应该从染料强光透过率的温度效应中得到证明；而且，强光透过率及输出能量随染料温度的变化应与溶剂种类及杂质含量有密切关系。

### 2. 溶剂种类及杂质含量对器件输出能量的影响

杂质效应我们很早就注意到了。在溶液中放进微量环氧树脂就能使器件输出极不稳定。因此我们一直使用光胶的玻璃盒作为染料盒，避免用任何有机胶或橡皮来密封染料盒，也避免任何金属与染料长期接触。此外我们还发现，用含水量为0.3%的分析纯甲醇作溶剂，与含水量为0.05%的保证试剂相比，输出能量及起伏量随染料温度的变化都更为显著；而且，空瓶中长时间储存的染料比新配染料温度效应强。这些现象表明，溶液中的氧和水是一些可能引起染料强光消光系

数的温度变化加大的杂质。

溶剂种类对输出能量大小和稳定性的影响是很明显的。在常用溶剂中我们只对比了甲醇和无水乙醇两种,在同样的条件下,甲醇溶液温度从0°C升到40°C时输出能量下降40%以上,而用新配的优级纯乙醇溶液,在同样的温度范围内却观察不到输出能量的变化(以后在高重复频率器件的实验中也证实了在此温度范围内能量随染料温度的变化很小<sup>[21]</sup>)。杂质效应在两种溶剂中也不相同。用含水量大的甲醇溶液,器件能量稳定性显著降低,而在乙醇溶液中有意加入约0.1%的蒸馏水后未观察到输出的变化。此外,在同样的染料浓度下,用乙醇溶液调Q时输出能量提高30%以上。鉴于用乙醇溶液调Q时热稳定性好,杂质影响小,输出能量大,而且乙醇又是无毒的和最容易买到的溶剂,因此我们最近几年全部改用乙醇为溶剂。

当然,上述结果决不意味着乙醇就是隐花菁作为调Q染料时的最佳溶剂。如果能找到粘滞系数更大,分子极性更小,而且光化学稳定性好、无毒的溶剂,则估计效果会更好。

### 3. 温度、溶剂种类、杂质含量对染料强光透过率的影响

我们认为弱光透过率相同的染料溶液在激光巨脉冲过程中的强光消光系数会因溶剂的物理参数不同而异,因而器件的输出能量也不一样。为此我们进行了染料强光透过率的测量,实验装置如图4所示。

激光光束经分束镜后分为两束,反射光

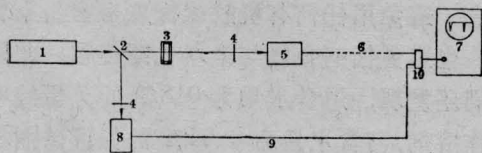


图4 隐花菁染料强光透过率的测量装置示意图

1—激光器; 2—分束镜; 3—染料盒; 4—衰减片;  
5—强流二极管PT<sub>2</sub>; 6—20米同轴电缆; 7—50  
兆周脉冲示波器; 8—强流二极管PT<sub>1</sub>; 9—2米  
同轴电缆; 10—三通接头

由强流二极管PT<sub>1</sub>接收,透射光经染料盒由PT<sub>2</sub>接收。PT<sub>2</sub>的输出信号经20米同轴电缆延时后,和PT<sub>1</sub>的信号显示在同一条示波轨迹上,用照相机摄下。两脉冲间隔70毫微秒,脉冲经示波器展宽后半功率点宽度14毫微秒(实际上≤10毫微秒)。染料盒的入射光强约 $1.2 \times 10^8$ 瓦/厘米<sup>2</sup>。

我们用上述装置测激光峰值光强下的染料透过率。为了消去仪器常数及染料盒和溶剂的本底透过率,分别测出充纯溶剂和充染料时两光电管输出脉冲峰值,由此求出染料透过率 $T_d$ ,显然 $T_d$ 是光强的函数。由于配制的溶液浓度不尽相同,为了便于比较,我们用比消光系数 $\alpha = \ln T_d / \ln T_0$ 将结果归一化, $\alpha$ 比 $T_d$ 有更清楚的物理意义,因为

$$\alpha = \ln T_d / \ln T_0 = \frac{\sigma \Delta N_a}{\sigma N_a} = \frac{\Delta N_a}{N_a} \quad (2)$$

式中 $\sigma$ 是隐花菁在6943 Å的吸收截面, $N_a$ 是染料分子数密度, $\Delta N_a$ 是强光下净吸收的有效分子数密度,所以 $\alpha$ 反映了染料光学漂白的程度。在我们的实验中 $\alpha$ 的绝对误差在0.01~0.02之间。

所测溶液有隐花菁—甲醇和隐花菁—乙醇两类。甲醇纯度等级是“保证试

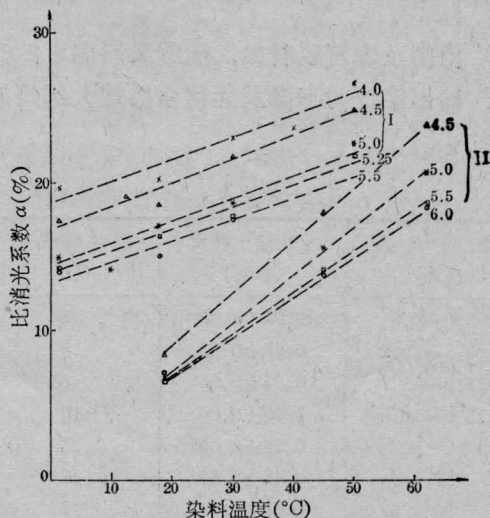


图5 隐花菁溶液比消光系数 $\alpha$ 随温度的变化  
I—旧隐花菁—甲醇溶液; II—旧隐花菁—乙醇溶液

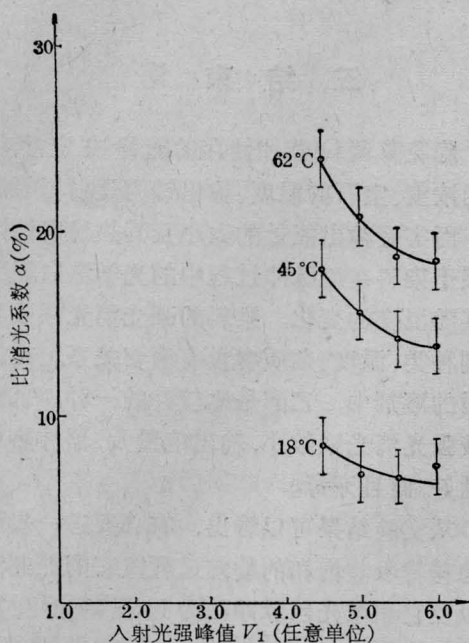


图6 旧隐花菁-乙醇溶液在强光下比消光系数  $\alpha$  随光强的变化  
( $V_1=6.0$  相当于光强  $\sim 1.2 \times 10^8$  瓦/厘米<sup>2</sup>)

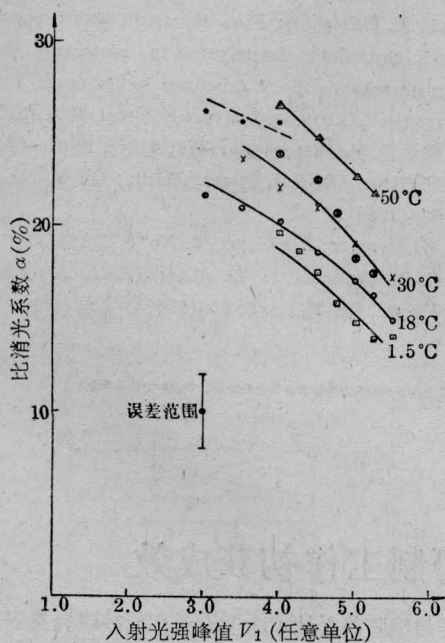


图7 旧隐花菁-甲醇溶液在强光下比消光系数  $\alpha$  随光强的变化  
( $V_1=6.0$  相当于光强  $\sim 1.2 \times 10^8$  瓦/厘米<sup>2</sup>)

剂 II 级”，乙醇是“优级纯”。为了了解溶剂中氧含量的影响，每类溶液中又有新旧两种之分，新溶液是新配制的，用小瓶满瓶密封贮存，旧溶液是在大的空瓶中贮存了一年以上的。各种溶液强光透射率的测量结果见图 5、6、7。

上述实验结果表明：(1) 隐花菁染料在  $10^8$  瓦/厘米<sup>2</sup> 的光强下仍未达到完全的漂白，比消光系数  $\alpha$  仍保持一个相当大的数值。这种“残余吸收现象”许多报告早已指出过<sup>[3~5]</sup>。(2) 比消光系数  $\alpha$  随温度有明显的增加。(3) 溶剂种类的影响是显著的。在常温下隐花菁甲醇溶液的  $\alpha$  值比乙醇溶液要大得多，但高温下相差不多。

这些现象进一步证明了染料调 Q 器件输出能量随染料温度的升高确实是染料强光消光系数随温度增加的结果，而且与溶剂的种类有密切关系。

对氧含量不同的新旧两种溶液，我们在类似的光路上用两个能量计测量了强光积分透过率  $\bar{T}_d$  (此时入射激光功率衰减约 50%)。  $\bar{T}_d$  实际上是用光强  $I$  加权的透过率平均值。在固定的激光能量下测得的积分比消光系数  $\bar{\alpha}$  见表 2。实验表明，空瓶中长期贮存的染料溶液的强光消光系数比新配溶液要高得多，这很可能是由氧含量的差别引起的。但是配制时间长的溶液中含有不少染料分解后的成分，它们成为有效的猝灭剂的可能性也不能排除。

表 2 积分比消光系数

溶液类别	温度	$\bar{\alpha} = \ln \bar{T}_d / \ln T_0$
新隐花菁-乙醇	24°C	0.10
旧隐花菁-乙醇	24°C	0.22
	50°C	0.25
新隐花菁-甲醇	20°C	0.20
	50°C	0.30
旧隐花菁-甲醇	30°C	0.31
	50°C	0.38

除此以外, 在一个精度较差的初期实验中(透过率的测量误差约 $\pm 5\%$ ), 我们曾比较过隐花菁的丙酮溶液和甲醇溶液、叶绿素 d 的丙酮溶液和甲醇溶液的强光透过率, 结果见图 8。由图可见, 对同一染料丙酮溶液的透过率高, 而对同一溶剂而言, 叶绿素 d 的透过率更高。但丙酮挥发太快, 不宜作为稳定的溶剂。

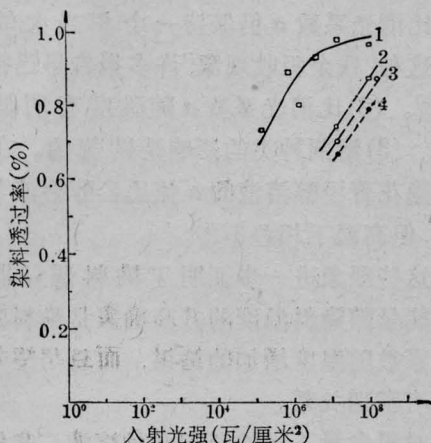


图 8 一些染料溶液的强光透过率

1—叶绿素 d-丙酮; 2—隐花菁-丙酮; 3—叶绿素 d-甲醇; 4—隐花菁-甲醇

叶绿素 d-丙酮溶液的光学饱和参量很小, 在静态激光光强下即有明显的光学漂白, 这说明阈值前的超辐射对染料开关的开启就有作用。因此用叶绿素 d 溶液调 Q 时, 与  $T_0$  相同的隐花菁溶液相比, 动态阈值较低, 能量也较小。叶绿素 d 的丙酮或乙醇溶液的温度对器件输出能量的影响不大, 但光化学稳定

性似不如隐花菁。

### 三、结 束 语

隐花菁调 Q 器件储存的能量决定于染料的浓度、宝石的温度、输出镜的反射率等因素, 而实际输出能量的大小及其热稳定性则依赖于染料在巨脉冲过程中的光学漂白程度及其随温度的变化。染料的强光消光系数与溶剂种类、温度、杂质含量有密切关系。在最常用的溶剂中, 乙醇是比较好的一种。乙醇溶液强光消光系数小, 输出能量大, 器件热稳定性好, 而且无毒。

从实验结果可以看出, 有必要进一步研究隐花菁吸收饱和的物理过程, 它的控制因子以及它和激光巨脉冲动力过程的相互制约, 我们将在另一文中给出这一问题的理论分析。

### 参 考 文 献

- [1] A. L. Schawlow; Fine structure and properties of chromium fluorescence in aluminum and magnesium oxide. "Advances in Quantum Electronics", Columbia University Press, 1961, p. 50.
- [2] 陶丽君, 孙景群; 《激光》, 1977, 4, No. 2, 32~36.
- [3] F. Gires; *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-2**, No. 9, 624(1966).
- [4] M. Hercher; *Appl. Opt.*, **6**, No. 5, 1(1967).
- [5] C. R. Ginliano, L. D. Hess; *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-3**, No. 8, 358(1967).

### 简 讯

## DF 透射率反射率测量仪研制工作初获成效

国防科学技术大学激光教研室利用差动法(或称比较法)设计、试制了一台“DF 透反仪”, 用于测量  $6328\text{\AA}$  腔片的透射率和反射率。仪器的特点是不需要稳光强, 测量精度较高(绝对偏差优于  $0.05\%$ ), 为国内先进水平。为了推广使用这项研究成果, 湖南

省科委与国防科学技术大学最近在长沙联合召开了技术鉴定会。与会代表对实验样机的原理、方法方面进行了技术性鉴定。会议建议由长沙市激光仪器厂在进一步改进结构设计的基础上进行小批生产。

(李福钧)