

## 混合染料的双频调谐特性\*

孔羽飞 刘宏发 张国威

(北京理工大学, 北京)

**摘要:** 对Rh6G与甲酚紫(CV)组成的混合染料乙醇溶液的双频调谐特性进行了系统的实验, 并利用混合染料能量转移原理和单元染料系统的双频相关调谐原理对比进行了分析和讨论。

### Dual-frequency tuning characteristic of the mixed-dye laser

Kong Yufei, Liu Hongfa, Zhang Guowei

(Beijing Institute of Technology)

**Abstract:** A systematic experiment on the dual-frequency tuning characteristic of the dye mixture of Rh6G and CV in ethyl alcohol has been made, and by using the theory of energy transfer in the dye mixture and the principle of dual-frequency correlated tuning in single dye, the tuning characteristic is discussed and analyzed.

### 一、引言

在双光子共振激光光谱、非线性光学、激光等离子体诊断和激光大气检测中, 双波长可调谐染料激光器有着广泛的应用。根据激光染料激活区的不同分类, 产生双波长染料激光的方法有三种: 1. 共激活区型, 其双波长同时共振于同一激活模体积内, 它存在频间模竞争引起的双波长输出功率比起伏变化大, 连续可调谐范围小等严重问题, 若不采取有效措施, 其应用价值不大; 2. 部分共激活区型, 即两个波长的激活模体积仅部分地重合, 因此频间模竞争有所抑制, 但输出光束在空间也有所分离; 3. 全分离激活区型, 它是一种激活区有空间光全分离的结构, 其实质是两个单频激光器的并列组合, 双光束平行输出, 两束光之间的强度比仍无法调节。许多实际应用不仅要求双波长在时间上同步, 在空间上共线, 而且希望有更宽的双波长连续调谐范围。为此, 我们在利用单元染料双频相关调谐原理, 实现强度比可调和谐线输出的基础上<sup>[1]</sup>用图1所示的共激活区腔型, 并利用双元激光染料混合体系, 以实现较宽光谱范围的可调谐双频输出。

用双元激光染料体系拓宽激光辐射光谱, 其应用的机理有两种:

a. 两种染料分子间不存在或基本上不存在能量转移<sup>[2]</sup>。选择这样两种激光染料时必须考虑到: (1)两者均须在泵浦波长处有一定的吸收; (2)它们的荧光谱有一定的相对位移; (3)一种染料的吸收谱不应与另一种染料的荧光谱有明显重叠, 否则将会出现能量转移。它

\* 本课题为国家自然科学基金资助的项目。

是两种激光染料分别独立产生各自的激光辐射，以达到拓宽光谱实现宽间隔双波长的输出。此法的优点是，当双波长分别振荡于这两种染料各自的辐射谱区内时将不存在强烈的双频间模竞争。但存在两种染料吸收截面不同，效率差别大，两波长的功率比无法控制等问题。

b. 两种激光染料分子间存在能量转移作用。依Förster理论<sup>[3]</sup>，一般混合染料系统中能量转移的机理主要是共振转移和辐射转移。给体染料分子受光泵浦而激发，然后将部分或全部能量转移给受体染料分子，使受体分子也得以激发而产生辐射。这两种转移都要求给体的荧光谱与受体的吸收谱有较大的重叠。可用光谱重叠积分 $J$ <sup>[3]</sup>表示能量转移的大小。哪一种能量转移起主导作用，与溶液浓度有关。一种混合染料存在所谓的临界浓度，如果其溶液浓度小于该临界浓度，能量转移将以辐射转移为主，否则，共振转移将占上风。

本实验主要研究有能量转移的激光染料混合系统的双频激光器的调谐特性。激光染料分别为Rh6G和CV(甲酚紫)，Rh6G浓度为 $2 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ ，CV浓度分别为 $8 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 、 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 和 $1.2 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ ，其展宽的光谱分布如图2所示。这里，我们只选用了低浓度的CV为受体，是为了让辐射转移起主导作用，而抑制其共振转移。

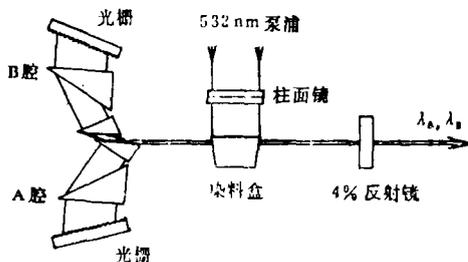


图1 双频染料激光器工作原理简图

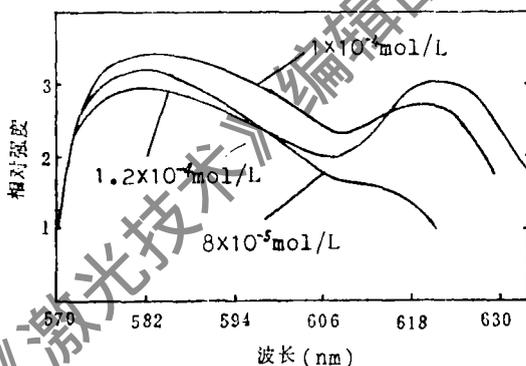


图2 Rh6G浓度为 $2 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 与等量不同CV浓度下混合溶液的光谱展宽

### 二、双频染料激光的运转原理

文献〔4〕只报导了单元染料的双频运转特性实验曲线，未进行理论分析和讨论。文献〔5〕把文献〔6〕对染料激光系统的半经典模式耦合波理论应用于双频运转，研究了单元染料激光的双频运转问题，得到其双频的强度表达式为：

$$I_i = \frac{k [1 - (2l+1)/\epsilon_i + 2l/\epsilon_j]}{(l+k + \frac{1}{2}) \cdot F(\nu_i)} \tag{1}$$

$$I_j = \frac{l [1 - (2k+1)/\epsilon_j + 2k/\epsilon_i]}{(l+k + \frac{1}{2}) \cdot F(\nu_j)} \tag{2}$$

式中， $\epsilon_i, j = g_{i,j}/\xi_{i,j}$  (“增益/损耗”)； $g_{i,j}$ 为频率 $i(j)$ 的线性增益系数； $\xi_{i,j}$ 为在腔内的损耗系数； $k$ 和 $l$ 分别为 $i$ 频和 $j$ 频所含纵模数。 $F(\nu_{i,j}) = C_{ij}/g_{i,j}$ ，式中 $C_{ij}$ 为两个频率间的交叉饱和系数。显然，从式中可看出，双频激光间的强度是相关的，调谐时将引起两个频率光强产生相对的变化。如其中一个波长 $\lambda_A$ 固定不变，让另一个波长 $\lambda_B$ 由染料增益曲线的一端，经增益峰值调谐到另一端，即可得到双频输出的调谐曲线，图3为Rh6G乙醇溶液的双频相关特性曲线。其特点是，在泵浦能量一定时，能产生的激发单态 $S_1$ 上的粒子数可认为也是

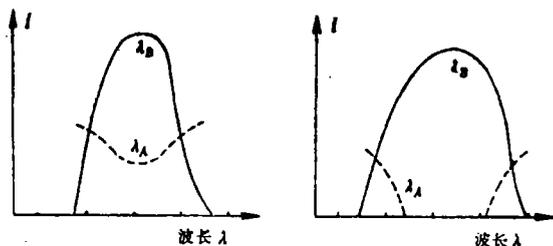


图3 单元染料双频调谐特性曲线

一定的，双频增益间存在相互竞争和抑制作用，其中之一增强必伴随着另一频率振荡的减弱。但是，对于二元混合染料，由于同时存在着能量转移作用。因此，其双频运转特性在某种程度上不同于单元染料。对于给体染料，由于部分能量转移给了受体，本身辐射强度将有所降低，但若两波长都在其荧光谱范围内调谐，其双频

调谐特性与单元染料的规律基本相同。而受体的激活粒子数取决于给体转移能量的多少。因此，若两波长同时工作在受体荧光谱内，其双频特性也将与单元染料有相似规律。但对于大间距的双频调谐，这时双波长分别处在两不同染料的谱区内。如果只有给体染料分子能吸收泵浦光，则受体的激发只有通过给体的能量转移来达到。两种能量转移机制的时间常数不同，共振转移是快转移，它在给体辐射之前即完成了，而辐射转移是慢转移，它是在给体辐射后进行的，本实验的目的是针对后者。

### 三、实 验

#### 1. 染料溶液

Rh6G为天津试剂研究所研制，CV为西德Lambda Physik公司产品，溶剂为化学分析纯无水乙醇，Rh6G浓度为 $2 \times 10^{-3}$  mol/L，CV分别为 $8 \times 10^{-5}$  mol/L， $1 \times 10^{-4}$  mol/L 和  $1.2 \times 10^{-4}$  mol/L。

#### 2. 实验装置

本工作所用双频运转染料激光器的迈克尔逊选频腔如图1。染料盒宽度为20mm，光栅常数为12001/mm，输出耦合为4%的反射镜。两支腔完全对称，以保证实现双波长激光同步、共线输出。采用双棱镜扩束，线宽可达小于0.01nm。在

一支腔内加入损耗补偿器，以进行双频输出功率比的调节。本实验用YAG倍频光532nm泵浦，可认为CV的激发粒子数主要由Rh6G染料能量转移激发所致。

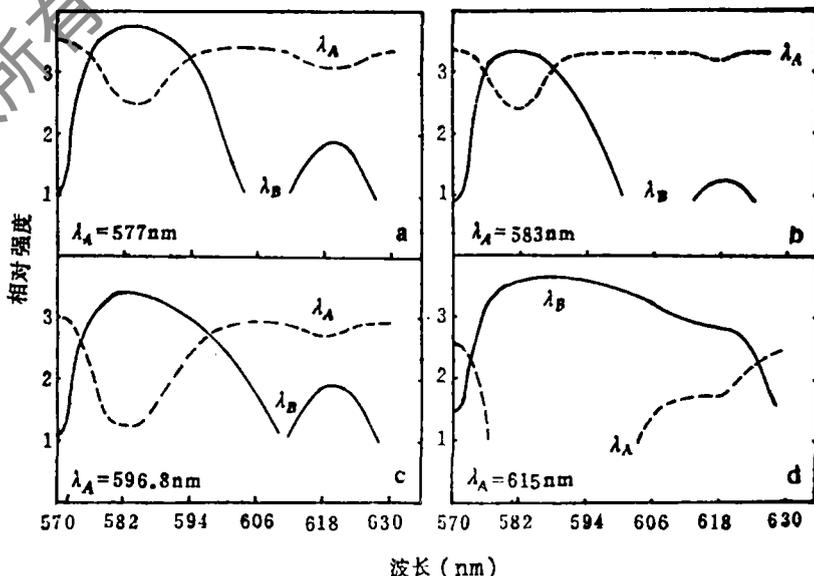


图4 受体CV浓度为 $8 \times 10^{-5}$  mol/L时双频调谐曲线  
虚线—固定频率的强度变化(A支腔) 实线—B腔调谐曲线

### 3. 实验结果及分析

首先研究不加损耗补偿（即不控制双频增益相关性）的双频调谐特性，即让A腔（图1中所示）振荡固定于某一频率上（对应波长 $\lambda_A$ ），然后对B支腔调谐，使该腔振荡频率扫描整个双元染料的光谱辐射区，同时记录A、B两支腔输出强度相对于频率的变化。然后，选定A腔另一固定频率，再进行上述的测试。图4、图5、图6是泵浦能量为2mJ，Rh6G浓度不变，改变CV浓度时的实验结果。

图4是受体CV为低浓度 $8 \times 10^{-5}$  mol/L时的双频调谐曲线。图4a、4b、4c表明 $\lambda_A$ 为三个不同的值时，对受体辐射产生不同的影响。如果 $\lambda_A$ 处于Rh6G辐射峰值振荡，由于此处增益最大，几乎所有能量均在此频率振荡，故CV辐射很小；但当 $\lambda_A$ 偏离峰值时，就有一部分能量传递给受体，使之产生辐射。虚线在CV区出现凹陷，表明能量转移为辐射转移，凹陷大小随 $\lambda_A$ 的不同而不同说明辐射能量转移不仅与浓度有关，而且与频率有关。

图5是CV浓度增加到 $1 \times 10^{-4}$  mol/L时的双频调谐曲线。与图4不同之处是：随着CV浓度的增加，长波段的CV辐射也增强，同时固定波长的强度产生了明显的变化而出现第二个凹陷（虚线）。图5a、5b、5c、5d每张图左边为双频同时共振于给体区，其双频规律与单元染料相同。右边即为双频分别同时共振于给体和受体区，虚线在此区为一凹陷，虽然它与左边的

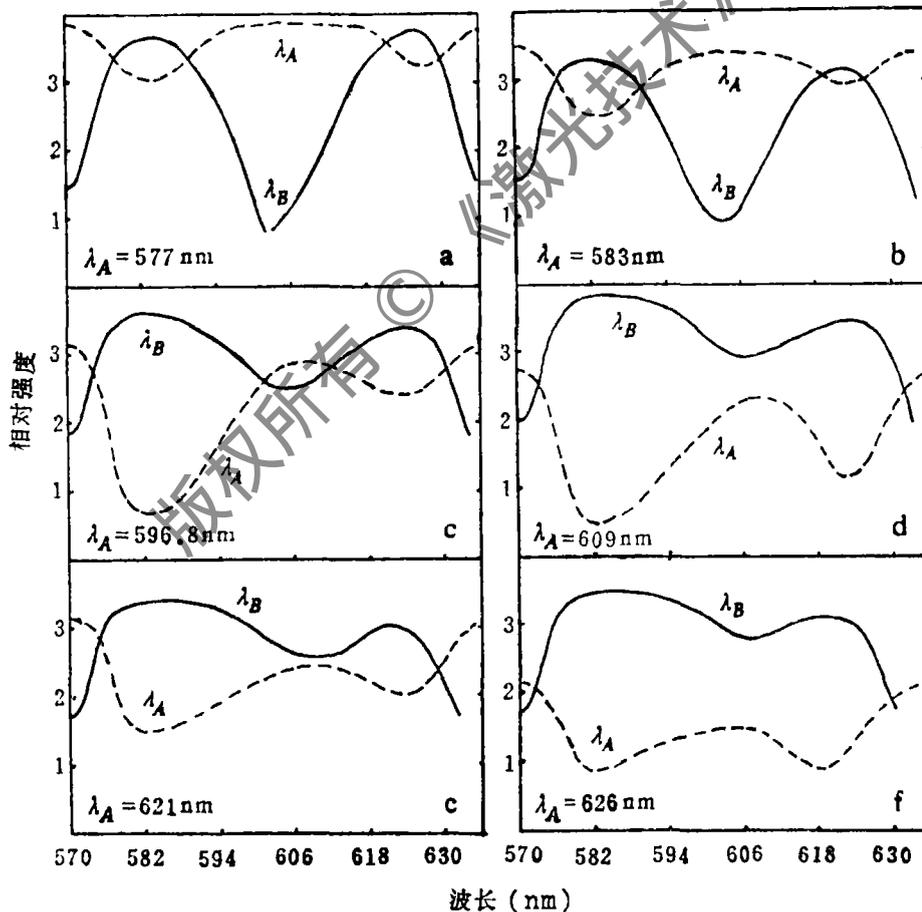


图5 CV浓度为 $1 \times 10^{-4}$  mol/L时的双频调谐曲线  
虚线—固定频率的强度变化 实线—B腔调谐曲线

形状相似但机理不同。右边凹陷说明此时能量转移不仅有辐射转移同时还有共振转移。图5e、5f与上述四个图正好相反，图左边的峰谷对应关系曲线表明，Rh6G的不同辐射波长对CV能量转移速率的影响和CV本身辐射截面大小的关系。

如果进一步把CV的浓度提高到 $1.2 \times 10^{-4}$  mol/L，如图6所示。当把A腔频率固定在给体染料谱区时，其规律与上述相似（图5a~图5d）。而当把A腔频率固定在受体染料谱区，把B腔在Rh6G谱区内调谐，如图6c、6d两图，固定频率的强度值不受或基本不受另一频率在给体谱区内的改变而发生变化，即图中左边近似为直线，这恰恰说明了当受体浓度提高后，辐射能量转移作用降低，相反共振能量转移作用逐渐增强。因此，可利用二元混合染料的双频调谐特性分析混合染料系统中能量转移机理。

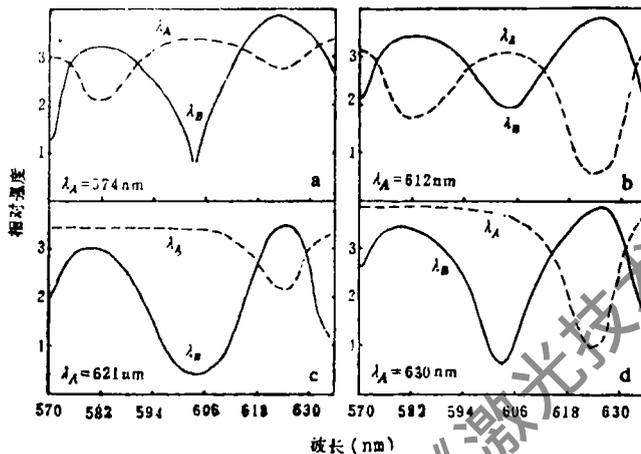


图6 CV浓度为 $1.2 \times 10^{-4}$  mol/L时的双频调谐曲线  
虚线—固定频率的强度变化 实线—B腔调谐曲线

则只能控制受体染料的发光强度。定量的实验测试工作正在进行中。

#### 四、结论与讨论

1. 借助二元染料体系可实现宽光谱范围的双频连续调谐。还可能利用三元染料体系得到更宽的双频调谐范围。

2. 双频在同一染料谱区内调谐，可利用增益相关性，控制“增损比”，实现宽范围、强度比可控的调谐。

3. 双频在不同染料谱区内调谐，则可通过选用不同的染料浓度来控制给体能量辐射转移对受体的相关程度影响，并结合腔内损耗元件的调节作用，控制两波长的强度关系。

4. 可利用二元混合染料的双频调谐规律定性分析系统中的能量转移机理。

#### 参 考 文 献

- [1] 张国威, 刘宏发. 一种双频共激活区调谐的染料激光放大系统. 北京理工大学学报, 1991 (待发表)
- [2] 张富根, 于春莲, 缪海平 *et al.* 物理学报, 1984, 33(8): 1172
- [3] Förster, Discuss. Faraday Soc, 1959, 27: 1

在上述实验中，当我们在一支腔中加入可变附加损耗时，即可实现两波长功率比可调节的宽谱区连续调谐。如两波长同在给体或受体染料谱区内调谐时，其效果与单元染料<sup>[5]</sup>中相似。如两波长分别在两不同染料谱区内，当损耗加在给体染料振荡对应的支腔中，在低浓度条件下即可控制给体本身的强度和对CV的辐射转移；在较高浓度时，主要是调节本身强度（因此时共振转移作用比辐射转移强）。若损耗加在受体染料振荡对应的支腔中，

# 阶梯反射输出的虚共焦非稳腔的研究

孙军强 丘军林 孙书华

(华中理工大学激光研究所, 武汉)

**摘要:** 本文提出了在高功率CO<sub>2</sub>激光器上应用阶梯反射输出的虚共焦非稳腔。对这种腔的激光模式进行了理论和实验的研究。获得激光输出功率为700W, 相应的光电转换效率为7.9%, 激光的远场发散角为2.1mrad。

## Investigation of a positive-branch unstable resonator with a step reflectivity mirror

Sun Junqiang, Qiu Junlin, Sun Shuhua

(Institute of Laser, Huazhong University of Science and Technology)

**Abstract:** A positive-branch unstable resonator with a step reflectivity mirror used in high power CO<sub>2</sub> laser is presented. This resonator is investigated both theoretically and experimentally. The output power of this resonator is 700 watts. With an efficiency of 7.9 percent. The divergent angle of far-field is 2.1 mrad.

### 一、引 言

经过对非稳腔的理论分析和实验研究表明: 如果腔的耦合输出镜上的反射率分布是高斯分布, 则镜面上场是高斯-拉盖尔分布<sup>[1]</sup>, 大量文献对输出镜镜面的各种反射率分布作了深入细致的分析<sup>[2~7]</sup>, 输出镜镜面上的反射率呈光滑曲线的非稳腔, 不仅能改善近场光斑的均匀性, 而且远场的聚焦性能也有较好的改善。本文设计的阶梯反射输出的虚共焦非稳腔是反射率超高斯分布的一种近似。

### 二、阶梯反射输出的虚共焦非稳腔设计

如图1所示是阶梯反射输出的虚共焦非稳腔。若输出镜镜面上的反射率呈高斯分布, 则有:

[4] Friesem A A, Ganiel U, Neumann G. A P L, 1973; 23: 249

[5] 张国威. 中国激光, 1988, 15: 272

[6] 潘少华. 物理学报, 1981, 30: 1067