

## 宽调谐范围三频共线输出染料激光器\*

刘宏发 严柏生 张国威

(北京理工大学, 北京, 100081)

**摘要:** 一种宽范围连续调谐的三波长共线、时间同步输出的染料激光器。使用R560/DCM乙醇混合溶液, 激光调谐范围为554~667nm。采用相关补偿调谐原理, 容易在560~640nm范围实现三波长激光的强度比为1:1:1的控制, 并获得了高功率放大运转。

A correlated tuning tri-frequency dye laser with high power  
and broad tuning range

Liu Hongfa, Yan Baisheng, Zhang Guowei

(Beijing Institute of Technology)

**Abstract:** A tri-frequency dye laser with coaxial and synchronous output is developed and can be tuned in the range of 554~667 nm when R560/DCM alcohol solution is used. It is easy to adjust the power ratio of three wavelengths to be 1:1:1 in the range of 560~640 nm on the basis of correlated tuning principle. An amplifier operation with high power is also achieved.

### 一、引 言

众所周知, 染料激光器可作激光波长连续调谐, 是由于染料辐射宽波长范围的荧光。每种染料的辐射光谱范围、辐射强度等与泵浦、溶剂与溶液浓度等许多因素有关。通常一种染料的激光调谐范围仅十几至几十纳米, 且在这一范围内调谐激光的强度有很大差别。如果要在更宽谱区实现高转换效率的激光调谐, 必须更换多种染料溶液。对许多应用如多光子光谱、激光同位素分离、激光医疗以及军事上用于目标和背景的光学特征研究、战场烟幕的光谱透过率测定、激光多波长遥感与侦察等。希望由一台激光器既能在尽可能宽范围实现连续调谐, 又能共线、时间同步输出几个可调谐且强度相近或强度比可调节的激光波长。这就需要拓宽染料溶液的辐射光谱范围, 并研究解决多波长调谐时, 由于共激活区模式竞争机制引起的各激光波长的强度相互抑制问题。否则不仅难实现多波长宽范围连续调谐运转, 而且会因输出波长的强度差别大而达不到实际使用要求。

近几年来, 我们在国家自然科学基金资助下, 研究了“多频相关调谐染料激光振荡与放大”问题, 取得了一些明显的进展和有实用价值的结果。得到了几种宽范围辐射的混合染料

\*国家自然科学基金(高技术)资助项目。

溶液体系<sup>[1]</sup>。并根据相关调谐原理实现了单体染料和混合染料激光双波长共线相关调谐放大运转<sup>[2,3]</sup>。本文介绍一种三波长共激活区调谐的染料激光系统,使用R560与DCM染料在乙醇中的混合溶液,由532nm脉冲激光泵浦时获得单峰连续的调谐曲线,波长范围为554~667nm。并实现了三波长强度比为1:1:1的共线放大输出。

## 二、R560与DCM乙醇溶液的光谱和激光调谐特性

用532nm激光泵浦R560和DCM的乙醇溶液,浓度为 $1\sim 3\times 10^{-3}$  mol。由于前者的吸收峰值波长为530nm,正好与泵浦光匹配,因而可获得高效率光谱转换。其辐射范围为540~610nm,峰值在560nm附近。后者的吸收峰值波长尽管在480nm附近,但其吸收带在长波区有宽的延伸,因而也适合用532nm光泵浦,得到辐射范围为590~680nm。峰值波长随浓度变化较大,约为 $625\pm 15$ nm。图1中A(R560), B(DCM)曲线是这两种染料浓度为 $2\times 10^{-3}$  mol时的辐射光谱强度分布。将这两种染料按浓度比R560: $2\times 10^{-3}$  mol与DCM: $1\sim 2\times 10^{-3}$  mol混合后,得到如图C曲线所示的荧光强度分布。C曲线反映出两种染料除同时吸收泵浦光独立发光外,还存在分子间的能量转移过程。辐射谱是两种染料分子的综合贡献。由于参与辐射的染料分子总数增加,C曲线下的面积虽比A与B曲线下面积之和略小,但却比A,B中任何一个大得多,表明这一混合体系具有高的光谱转换效率和宽范围辐射的优良光谱特性。

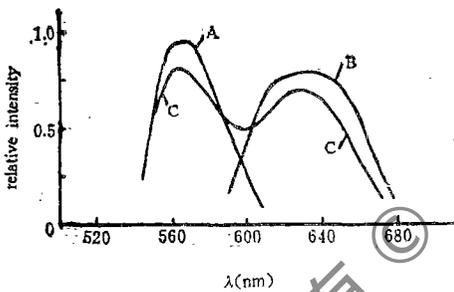


Fig. 1 The emission spectra of dyes R560 and DCM

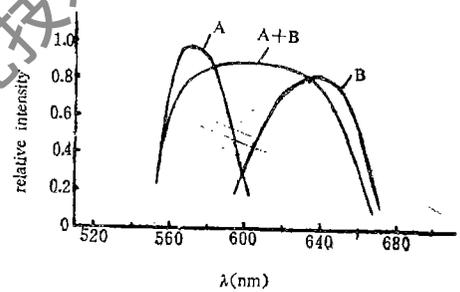


Fig. 2 The laser tuning curves of the solution of dyes R560 and DCM

使用这一混合体系进行激光调谐,得到如图2所示较为理想的结果。即调谐曲线A+B的波长范围几乎是两单体染料调谐曲线A(R560), B(DCM)的范围之和。值得指出的是A+B曲线是单峰连续,峰值恰在两单体染料辐射谱的交接处,并有一个较平坦的宽波长范围,峰值效率相当于R560单体的90%左右,而却比DCM单体高。这一调谐特性被进一步实验证明,是由于在这种混合体系中主要发生了共振能量转移过程,特别在单体辐射谱的交接处,激光振荡是两种染料分子的综合增益贡献。有利于我们在这种宽光谱范围内实现三波长激光的连续调谐运转。

## 三、三波长激光振荡器的设计

每个可调谐的激光波长,必须分别在各自的谐振腔中振荡产生。三个谐振腔共用一个激活区产生不同激光波长振荡时,由于存在增益竞争效应,小增益的激光波长的强度受到大增益激光波长的抑制,严重时只有两个或一个激光波长存在,另一个或另两个波长不会产生激

光振荡。这是设计共激活区三波长激光振荡器需要解决的重要问题。

共激活区三波长激光的稳定振荡条件为<sup>[4]</sup>：

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 > 1 \\ \varepsilon_1 < 2m_1 / \left[ (m_1 + 1/2) \left( \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \varepsilon_3} - 1 \right) \right] \\ (\varepsilon_3 + \varepsilon_2) / (\varepsilon_2 \varepsilon_3) < m_1 + 1/2 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_2 > 1 \\ \varepsilon_2 < 2m_2 / \left[ (m_2 + 1/2) \left( \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \varepsilon_3} \right) - 1 \right] \\ (\varepsilon_3 + \varepsilon_1) / (\varepsilon_1 \varepsilon_3) < m_2 + 1/2 \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_3 > 1 \\ \varepsilon_3 < 2m_3 / \left[ (m_3 + 1/2) \left( \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \varepsilon_2} \right) - 1 \right] \\ (\varepsilon_2 + \varepsilon_1) / (\varepsilon_1 \varepsilon_2) < m_3 + 1/2 \end{array} \right. \quad (3)$$

式中， $\varepsilon_i = g_i / \zeta_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为各激光波长的增益与损耗之比 (简称增损比)， $m_i$  为各波长所含纵模个数。由此可知，三个波长要同时产生激光振荡，除各波长的增损比必须大于 1 外，其中另两个波长的增损比也要约束在一定范围，即只有同时满足上述 9 个关系式，

才能同时获得三个波长的激光稳定振荡运转。

因此设计上首先要保证三个共激活区谐振腔的固有损耗基本一致，即使这三个谐振支腔的激光调谐性能基本对称。进而必须在产生较高增益波长的腔中插入可连续变化的附加损耗，用其调节和控制各支腔调谐波长的增损比，达到展览三波长激光连续调谐范围的目的，同时实现改变输出激光波长的强度比例以满足使用要求。把这种利用增益竞争机制，采用损耗相关补偿的调谐思想或方法称为相关调谐原理。根据这一原理设计的共激活区三波长激光振荡器如图 3 所示。

图 3 是一种复合型迈克尔逊谐振腔结构。

$P_A, P_B$  是分束棱镜，它们将由染料池出射的光束反射、折射耦合成三束。 $G_A, G_B, G_C$  是光栅，分别与输出耦合反射镜 M 构成共激活区的调谐振荡支腔。 $P_A, P_B$  棱镜除起分束作用外，也和其它棱镜一样具有扩束作用。为使三个支腔的固有损耗近似相等，并具有尽可能大的能量反馈率，采用了简便的对称设计计算方法<sup>[5]</sup>。F 是在扩束光路中插入可旋转非涅尔玻板，用作展览三波长激光的连续调谐范围和调节输出激光波长的强度比，实现所谓的相关调谐。

这一设计的特点是：1. 棱镜  $P_1, P_2$  是布儒斯特角入射的，其它棱镜和光栅也对与纸面

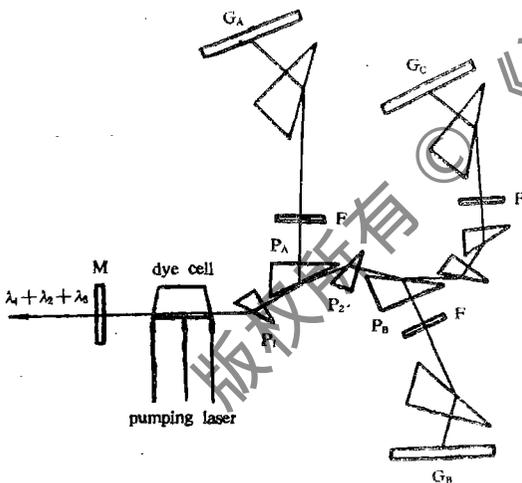


Fig. 3 A tri-wavelength laser oscillator in a common gain volume

平行振动 ( $\pi$ 分量) 的偏振光有较高的选择性, 加之激活染料分子扩散再定向效应的选偏作用<sup>[8]</sup>, 结果分别由各支腔产生的调谐激光的偏振方向相同, 且有很高的偏振度。2. 各支腔中用于扩束的棱镜数是最优选择的, 既满足了扩束倍率的要求, 又减少了棱镜表面的反射损失 (它是腔的基本损耗之一)。这种采用棱镜直接反射、折射耦合分束, 和在一定扩束倍率情况下棱镜数的最优选择设计, 使腔内能量总反馈率比单个支腔高很多。既有利于激活区光增益的提取而得到强的振荡输出, 又有利于增宽三波长激光的相关调谐范围。3. 按对称设计的三个支腔产生的激光线宽基本相同, 输出时间基本同步。4. 用于损耗相关补偿调谐的非涅尔玻板措施简单、效果好, 旋转时不对三波长激光输出的共线性产生影响。

#### 四、实验结果与分析

##### 1. 染料溶液的浓度选择

R560可用乙醇溶剂直接溶解成高浓度母液。DCM需先用DMSO溶剂溶解成高浓度母液, 然后再用乙醇稀释。附表给出了这两种单体染料溶液不同浓度时的激光调谐结果。染料

Table The experimental tuning values of dye solutions with different concentrations

| R560                    |                      |                       | DCM                                   |                       |                      |                         |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| peak relative intensity | peak wavelength (nm) | wavelength range (nm) | concentration ( $\times 10^{-3}$ mol) | wavelength range (nm) | peak wavelength (nm) | peak relative intensity |
|                         |                      |                       | 0.25                                  | 595~650               | 910                  | 21                      |
|                         |                      |                       | 0.50                                  | 590~660               | 620                  | 42                      |
| 40                      | 554                  | 545~584               | 1.00                                  | 591~671               | 630                  | 46                      |
| 45                      | 560                  | 554~601               | 2.00                                  | 594~667               | 635                  | 39                      |
| 53                      | 560                  | 556~603               | 3.00                                  | 596~662               | 640                  | 35                      |
| 44                      | 562                  | 558~603               | 4.00                                  | 605~659               | 640                  | 18                      |

池的泵浦宽度为10mm, 泵浦光能量为2~3mJ。可以看出, 浓度小或浓度大时, 两种染料的激光波长都发生蓝移或红移。而且浓度偏大或偏小, 激光调谐范围和峰值强度都小。DCM的峰值波长随浓度的变化较大。只有在合适浓度时, 才能得到较大的峰值强度和较宽的调谐范围。这两种染料单体溶液较适宜的浓度分别为R560:  $2 \times 10^{-3}$  mol, DCM:  $1 \sim 2 \times 10^{-3}$  mol。

混合染料溶液的浓度选择, 不仅要考虑单体溶液染料分子对泵浦光的吸收转换率, 还要考虑染料分子间的能量转移效应对辐射特性的影响, 以及混合溶液的总浓度淬灭效应, 以有利于利用能量转移机制得到宽且连续的激光调谐范围和溶液对泵浦的高效率光谱转换。我们选择振荡级的混合溶液浓度配比为: R560/DCM =  $2 \times 10^{-3}$  mol/ $1.2 \times 10^{-3}$  mol, 得到激光调谐范围为554~667nm, 调谐特性如图2中A+B曲线所示。放大级的浓度配比应根据泵浦强度、染料池宽度及由振荡级输出的信号光强度等条件确定。我们在泵浦能量为20mJ左右时, 横向泵浦染料池宽度为20mm, 浓度选为比振荡级小1倍, 得到一级放大输出能量大于3.5mJ。

##### 2. 混合染料的三波长激光调谐

在图3的染料池中, 放入R560/DCM乙醇混合溶液, 切断一个支腔 (即不让该支腔产生激光振荡), 首先用两个支腔进行双波长激光调谐实验。方法是将一个支腔的激光波长调谐到约590nm处, 此波长处于两种染料辐射谱的交接区。另一支腔分别向短波和长波方向调

谐。发现在560~640nm范围内调谐时,590nm波长激光的强度不发生大的变化,反映出这一混合体系的双波长激光调谐特性比单体染料好得多。无论是R560或是DCM单体染料进行双波长激光调谐,当一个支腔调谐到峰值波长处(分别是560nm和630nm左右),另一支腔在590nm处都不能产生激光振荡。说明这一混合体系的激光振荡,是两种染料分子独立发光和同时存在能量转移机制产生综合增益贡献的结果。不仅得到的双波长激光连续调谐范围比单体染料宽得多,而且在这一范围调谐的双波长激光强度差别不很大,即使不进行相关补偿调谐,也能得到两个激光波长同时振荡输出,表明由这一体系产生的双波长激光之间的相关性比单体染料要弱的特点。

再进行三波长激光调谐实验。即先将一个支腔的激光波长调谐到590nm处,其它两个支腔分别从590nm向短波和长波方向调谐。发现在560~640nm范围调谐过程中,共线输出的激光中都含有三种波长。我们将两个支腔分别调到560nm和640nm处,另一支腔最少做 $590 \pm 25$  nm调谐时,同样得到三波长激光同时振荡共线输出。而且另一支腔在略短于560nm和略长于640nm调谐时,也能得到三波长激光振荡输出,说明由这一混合体系和所设计的三波长激光振荡器,即使不做相关补偿调谐,也具有很宽的三波长激光连续调谐范围。

当将产生强激光波长的支腔通过菲涅尔玻板附加损耗,而进行相关补偿调谐时,共线输出的三波长激光可在555~666nm范围连续调谐。实验证明这种相关补偿调谐措施,在560~640nm范围,和另一波长略短于560nm或略长于640nm时,三波长激光的输出强度比很容易控制为1:1:1。

## 五、结 论

R560与DCM乙醇混合染料溶液,是一种高效率光谱转换的激光介质。两种染料分子对泵浦光的吸收和共振能量转移过程的存在,使振荡激光波长得到综合增益贡献。激光调谐波长范围可达554~667nm,几乎是这两种染料单体溶液调谐范围之和,而且调谐曲线呈单峰连续。并实现了这一混合体系的高功率激光放大运转。

根据共激活区多波长激光相关调谐原理和采用棱镜直接反射、折射耦合分束,按对称设计方法设计的三波长染料激光振荡器,用R560/DCM乙醇混合溶液和进行相关补偿调谐,实现了共线输出的三波长激光可在555~666nm范围内连续调谐。最少在560~640nm范围内三波长激光都有较高的转换效率,且输出强度比容易控制为1:1:1。

## 参 考 文 献

- [1] 孔羽飞,刘宏发,张国威.激光技术,1991;15(5):261~265
- [2] 张国威,刘宏发.北京理工大学学报,1991;11(4):62~67
- [3] 孔羽飞,刘宏发,张国威.激光技术,1991;15(6):321~325
- [4] 张国威.光学学报,1991;10(10):881~887
- [5] 刘宏发,张国威.光学技术,1991;(4):33~40
- [6] 张国威.北京工业学院学报,1982;(2):8~13

作者简介:刘宏发,请参见《激光技术》,1991年,第15卷,第5期,第265页。

严柏生,男,1948年11月出生。理学硕士,讲师。现从事可调谐激光器研究工作。

张国威,请参见《激光技术》,1991年,第15卷,第5期,第265页。

收稿日期:1992年10月8日。