

闪光灯泵浦施主-受主染料激光器

李又生 陈美锋 张德沛 李 斌

(华中理工大学激光技术和工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 从施主-受主染料体系出发, 研究了双重染料对灯泵染料激光器输出的影响。我们认为在低浓度下, 施主和受主之间能量转移主要以辐射能量转移方式进行了通过计算施主和受主的光谱转换率, 得出施主-受主系统中施主和受主的浓度都低的结论; 提出分离施主和受主是使用多重染料的最佳方案。在此基础上, 我们在重复频率闪光灯泵浦染料激光器上进行实验, 实验结果与理论分析结果相一致。

关键词: 染料激光器 施主 受主 光谱转换率

Flashlamp pumped donor-acceptor dye laser

Li Yousheng, Chen Meifeng, Zhang Depai, Li Bin

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: This paper studies the influence of bi-dye on the output of flashlamp-pumped dye laser from the point of donor-acceptor dye system. We consider that radiation energy-transfer is the dominant energy-transfer mechanism between donor and acceptor under low concentrations. After calculating the spectrum inversion rate of donor and acceptor, we conclude that in the donor-acceptor system the concentrations of donor and acceptor is low. We point out that separating donor from acceptor is the optimum way to use multi-dye system. Base on the theoretic analysis, we carry out some experiments on the repetition rate flashlamp-pumped dye laser, the results of the experiments agree with those of the theoretic analysis.

Key words: dye laser donor acceptor spectral inversion rate

一、引 言

自 1966 年染料激光器问世以来, 至今已发展到了较成熟的阶段, 但仍局限于实验室应用水平, 要使染料激光器发展到实际应用水平, 还需克服存在的缺点和不足。闪光灯泵浦染料激光器研制人员采用了多种方法^[1~5], 从激光器的各个部分入手提高性能。这些方法主要靠增大平均输入功率来提高激光器的输出功率, 而激光器的效率并没有很大提高, 而且这些方法使激光器的结构复杂化。

灯泵染料激光器的闪光灯在放电过程中电流密度很大, 可达 10^5 A/cm^2 ^[6], 泵浦光光谱成分非常丰富, 从紫外到红外, 光谱重心在短波, 而大部分有机染料的吸收带都很窄, 如最常用的激光染料若丹明 6G (R6G), 在乙醇溶液中的吸收峰中心波长为 5000 \AA 左右, 半宽度只有 30 nm 左右。本文以香豆素 6 (C6) 作若丹明 6G 的施主, 拓宽了施主-受主体系的吸收带, 提高了染料激光器的效率。

二、理论分析

1. 施主和受主之间的能量转移机理包括: (1) 辐射能量转移; (2) 库仑作用能量转移; (3)

电子交换能量转移。这三种能量转移机理都要求受主吸收带和施主荧光带重叠程度要大^[7]。辐射能量转移是二步过程,受主吸收施主发出的荧光,这种能量转移可以跨越很大的距离,库仑作用和电子能量转移同属无辐射能量转移,都出现在施主发光之前,能量转移必将影响施主的特性,这种特性由斯特恩-沃尔默方程表示出来^[8]:

$$\tau_0/\tau_f = \varphi_0/\varphi_f = 1 + k_{ET}\tau_0[A] \quad (1)$$

下标 0 表示无受主,下标 f 表示有受主, τ 和 φ 分别表示施主的寿命和荧光量子产额, k_{ET} 为能量转移速率常数, $[A]$ 为受主染料浓度。(1) 式说明施主溶液中加入受主后,施主的荧光量子产额降低。

对于浓度为 10^{-4} M/L 的稀溶液,将有机染料的分子典型值: $k_{ET} \approx 10^{11} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ^[9] 和 τ_0 为几个纳秒代入(1)式,可知 τ_0/τ_f 只稍大于 1,说明在这种稀溶液中,无辐射能量转移的速率非常小,辐射能量转移是能量转移的主要机理。所以,低浓度混合染料溶液中施主染料必须是量子效率高的激光染料。

由于辐射能量转移可跨越很大的距离,本文提出分离施主与受主的方案以避免施主三重态吸收对受主激光作用的影响。

2. 一种有机染料的吸收光谱在可见波段常常具有强吸收带的特性,该吸收带与基态到 S_1 能态的激励相对应。另外,在紫外波段有时还有较弱的吸收带。在这些吸收带之间的波长上,染料也有较大的吸收。在染料管的激光作用部位上,哪一部分光谱成分的泵浦光是粒子数反转的主要贡献者,在很大程度上取决于染料溶液的浓度,我们可以由光谱转换率这一概念出发,对这一效应从量的方面进行分析。

在离染料池壁为 x 处,从入射泵浦光 $I(\lambda)$ 和染料十进制摩尔消光系数 $\delta(\lambda)$ 可以计算出作为 λ 和 x 函数的光谱转换率 S. I. R. 这里作矩形管近似,在矩形管边长与圆柱管直径相同的条件下,矩形管的结果同圆柱管结果近似。对于双灯泵浦染料激光器,在平面几何学条件时,设闪光灯发出的平行光束从两侧照明染料池,则有:

$$\text{S. I. R} = I(\lambda)N\delta(\lambda)[e^{-N\delta(\lambda)x} + e^{-N\delta(\lambda)(d-x)}] \quad (2)$$

式中, N 是染料溶液浓度, d 是染料溶液的厚度。图 1, 图 2 是不同浓度 R6G 乙醇溶液和不同浓度 C6 乙醇溶液在染料池轴线上的光谱转换率(假设灯光谱各个波段的光强都相等),曲线下面的数据表示曲线包围的相对面积,这里 $d = 4 \text{ m}$ 。

R6G 溶液和 C6 溶液在不同浓度下的光谱转换率有这样的共同特点:在高浓度下,染料溶液对其强吸收带对应的光谱转换效率低,但浓度太低,光谱转换率的总面积下降。从计算结果看出,当 C6 浓度为 2×10^{-4} M/L, R6G 浓度为 4×10^{-5} M/L 时, C6 溶液和 R6G 溶液对各自吸收峰附近的光的光谱转换率最高。从光谱转换率出发,以这种浓度混合的 C6 和 R6G 混合染

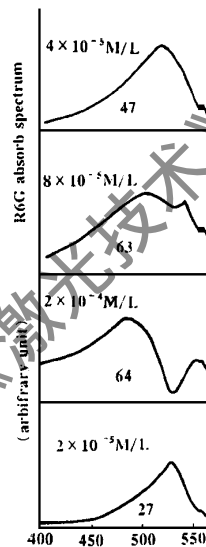


Fig. 1 R6G solution spectrum inversion rate

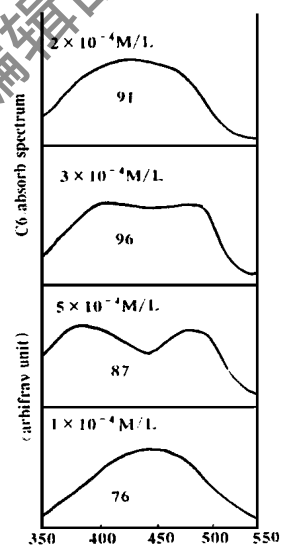


Fig. 2 C6 solution spectrum inversion rate

料溶液是最佳浓度溶液。我们发现,在这种浓度下, C6 和 R6G 对各自强吸收峰对应的波长光的吸收长度约为染料溶液厚度的一半,也就是满足: $\delta \cdot l \cdot N = 1$ (3)

式中, δ 为染料十进制摩尔消光系数的最大值, l 为染料溶液厚度的一半, N 为染料溶液浓度。

这样,我们可以根据下式近似计算施主-受主染料体系中各染料成分的最佳浓度(分离或混合染料体系): $N = 1/(\delta \cdot l)$ (4)

以避免做大量实验确定最佳浓度。

除了波导染料激光器外,由公式(4)得出的染料浓度都低于单独染料体系的溶液浓度,而低浓度染料溶液对泵浦光吸收均匀性好。

三、实验及分析

在增强预燃灯泵染料激光器上实验研究施主-受主体系对灯泵染料激光器输出的影响。激光器的聚光腔是镀银铜质相交圆腔,分别冷却两支脉冲氙灯,腔内染料溶液不冷却。两支 $\phi 4\text{mm} \times 150\text{mm}$ 短脉冲氙灯作泵浦光源,染料管内径 4mm,外径 8mm,长 150mm。谐振腔是内腔式平-平腔结构,输出镜透过率 40%。

分三种情况进行对比实验:

A. 单独 R6G 乙醇溶液为工作物质,自来水冷却脉冲氙灯; B. 施主-受主分离情况,若丹明 6G 乙醇溶液为工作物质, C6 乙醇溶液冷却脉冲氙灯; C. 施主与受主混合情况, R6G 和 C6 混合乙醇溶液为工作物质,自来水冷却脉冲氙灯,冷却层厚度 2.8mm。图 3A, B, C 是三种情况下对应不同 R6G 浓度的激光输出。分离 C6-R6G 体系中 C6 的浓度为 $3 \times 10^{-4}\text{M/L}$,是根据公式(4)计算的。混合 C6-R6G 体系中 C6 浓度为 $2.8 \times 10^{-4}\text{M/L}$,是由实验确定的。很明显,分离 C6-R6G 体系和混合 C6-R6G 体系均使激光输出得到提高,不同的是混合体系激光输出能量提高得不大,而分离体系激光输出能量得到大大

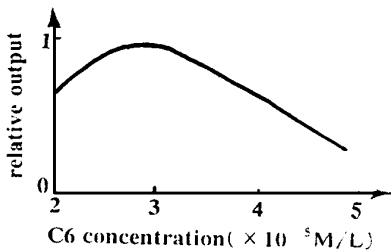


Fig. 4 Laser output change according to C6 concentration R6G concentration in compound solution of C6 and R6G is $7 \times 10^{-5}\text{M/L}$

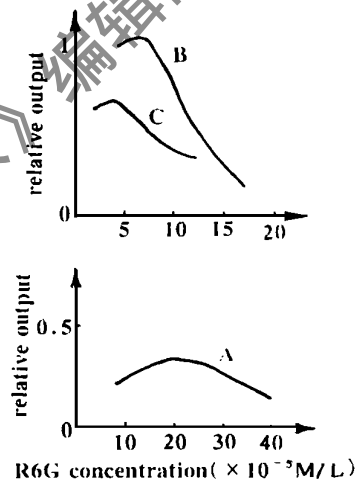


Fig. 3 Laser output change according to R6G concentration
A—individual R6G system B—separate system C6 $3 \times 10^{-4}\text{M/L}$ C—compound system C6 $2.8 \times 10^{-4}\text{M/L}$

提高。曲线 B 的峰值是曲线 A 峰值的 2.6 倍。在低浓度下,对应相同的 R6G 浓度,分离 C6-R6G 体系使激光输出能量提高 3 倍。

在较高 R6G 浓度下, C6-R6G 体系激光输出能量随 R6G 浓度增大下降得很快。这是因为在高 R6G 浓度下, R6G 溶液对泵浦光的绿光部分转换率很低,对蓝光部分转换率高,蓝光是 R6G 溶液产生粒子数反转的主要贡献者,而施主 C6 分子在其最佳浓度下正好把粒子数反转的主要贡献者蓝光转换

成绿光(辐射能量转移占主导),随着浓度增大, R6G 分子对绿光的转换率越低。所以,随 R6G

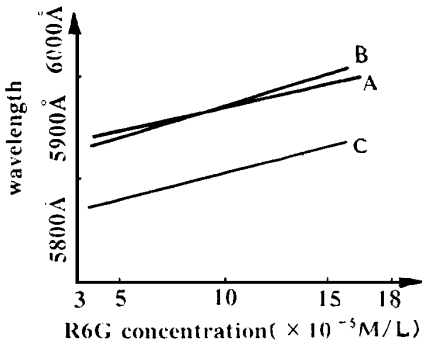


Fig. 5 Laser output change according to R6G concentration

A—individual R6G system B—separate C6-R6G system C—compound C6-R6G system C6 2.8×10^{-4} M/L

浓度增大,体系激光输出能量下降,而且下降得很快,在很高 R6G 浓度下, R6G 分子对绿光转换率几乎为零,起猝灭激光作用。

不管是混合 C6-R6G 体系,还是分离 C6-R6G 体系,高 C6 浓度对激光输出影响没有高 R6G 浓度对激光输出的影响大。随着 C6 浓度增大,尽管 C6 对对应其吸收带的光的转换效率变小,但 C6 发出的荧光仍然是低浓度 R6G 溶液粒子数反转的主要贡献者。在 C6 溶液浓度不是非常大的情况下,高浓度 C6 成分使激光输出下降的主要原因是, C6 溶液光谱转换率谱的长波部分与 R6G 溶液光谱转换率谱的短波部分发生部分重叠。

实验发现,分离 C6-R6G 体系峰值激光波长与单独 R6G 体系峰值激光波长几乎相同。但混合 C6-R6G 体系,在实验浓度范围内,峰值波长相对单独 R6G 体系峰值波长向短波移了 70 Å,

从光谱角度考虑,是 C6 三重态吸收带的短波部分与 R6G 荧光带的长波部分重叠的结果。

四、结 论

1. 本文从理论上论述了施主-受主混合染料溶液在低受主浓度(10^{-4} M/L)下施主与受主间的能量转移主要以辐射能量转移方式进行。因此,施主染料必须是高量子效率的激光染料。
2. 由于染料存在严重的三重态效应,在闪光灯光脉冲上升时间不是非常小的情况下,直接混合施主和受主,施主三重态吸收将削弱能量转移产生的效果。本文描述的分离施主和受主的方案,激光输出能量得到很大提高。
3. 施主和受主体系中,受主溶液浓度的选择非常重要,施主浓度对激光输出的影响不大。
4. 施主-受主体系中施主和受主都在低浓度(相对于单独染料体系)下工作,低浓度溶液对泵浦光的吸收比较均匀,这使得工作物质的温度分布也比较均匀。

参 考 文 献

- 1 Jethwa J, Schafer E P, Jasny J. IEEE Q E, 1978; QE- 14(2): 119~ 121
- 2 Okada T. Appl Phys, 1978; 15: 191~ 196
- 3 Mazzinghi P. IEEE Q E, 1978; QE- 17(11): 2245~ 2248
- 4 Friedman H W. Appl Opt, 1976; 15: 1494
- 5 查贵根. 激光. 1981; (8): 39~ 44
- 6 激光材料编辑组. 激光光源论文集——脉冲闪光灯, 1973
- 7 巴尔特洛浦 J, 科伊尔 J 著. 光化学原理. 北京: 清华大学出版社, 1981
- 8 Lin C L. Appl Phys, 1973; 44(1): 5050~ 5052
- 9 特罗 H J 著. 现代分子光化学, 北京: 科学出版社, 1987

* * *

作者简介: 李又生,男,1938年10月出生。副教授。长期从事染料激光器、YAG 激光器及其应用开发研究。