

文章编号: 0258-7025(2007)09-1232-05

# 横向抽运染料激光振荡器效率分析

王墨戈, 许晓军, 李 霄, 郭少锋, 陆启生

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 染料激光器由于不同的抽运方式, 在出光效率和最佳输出耦合率等参数上有很大的不同。根据速率方程理论, 分析了铜蒸气激光器(CVL)511 nm 横向抽运染料罗丹明 6G(Rh6G)激光振荡器的光-光转换效率问题。得出染料对激光的自吸收损耗效应是造成横向抽运和纵向抽运两种方式光-光转换效率与输出耦合率差异的主要原因。对不同的染料 Rh6G 浓度和不同的输出耦合镜反射率进行横向抽运实验, 得到 8.2% 的最高光-光转换效率。实验结果显示横向抽运时较低的 Rh6G 浓度可以降低染料自吸收效应对出光效率的影响。同时, 最佳输出耦合镜的反射率比纵向抽运时小。

**关键词** 激光技术; 横向抽运; 速率方程理论; 光-光转换效率

**中图分类号** TN 248.3<sup>+</sup>3 **文献标识码** A

## Efficiency Analysis of Transversly Pumped-Dye Laser Oscillator

WANG Mo-ge, XU Xiao-jun, LI Xiao, GUO Shao-feng, LU Qi-sheng

(College of Optoelectronic Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410073, China)

**Abstract** According to various pumping styles, the laser output efficiency and optimal output coupling are different, and so do other parameters. Based on theory of rate equation, the optical-to-optical conversion efficiency of 511 nm copper vapor laser (CVL) transversely pumped Rh6G dye laser oscillator is studied. Result shows that the major reason of the difference of optical-to-optical conversion efficiency and output coupling between transverse pumping and longitudinal pumping is dye self-absorption. Experiments of transverse pumping have been done for various Rh6G concentration and output coupling mirror's reflectivity, and the highest optical-to-optical conversion efficiency 8.2% was obtained. The relation between the efficiency and dye concentration and the reflectivity of output mirror was given. Experimental results show that the lower Rh6G concentration could reduce the influence of dye self-absorption on laser output efficiency, and meanwhile the optimal output coupling mirror's reflectivity in transverse pumping is bigger than that in longitudinal pumping.

**Key words** laser technique; transverse pumping; rate equation theory; optical-to-optical conversion efficiency

## 1 引 言

染料激光器以其高增益、带谱宽、方便的热管理机制等特点, 在同位素分离、激光导星等诸多应用中占有重要地位。染料激光振荡器产生后续激光放大器的种子光源, 其特性研究具有一定的意义, 光-光转换效率是染料激光振荡器的一个重要指标, 人们已开展一系列的工作<sup>[1~9]</sup>。Hargrove 等<sup>[1]</sup>分析了纵向抽运和横向抽运时染料激光放大器的效率问

题, 没有涉及振荡器的效率问题; W. Sun 等<sup>[3]</sup>采用铜蒸气激光器(CVL)纵向抽运染料罗丹明 6G(Rh6G), 其激光振荡器得到了 31% 的效率, 但在理论分析中没有考虑染料自吸收效应的影响, 理论与实验结果有一定差距; Zhenguang Huang 等<sup>[2]</sup>考虑了受激态吸收机制, 从理论和实验两方面分析铜蒸气激光器纵向抽运染料 keton red, 实验得到效率为 40%, 但增益区内激光强度  $I$  为常数的条件在横向抽运结构中并不成立, 应采用数值解法求解。文献

收稿日期: 2007-02-08; 收到修改稿日期: 2007-05-18

作者简介: 王墨戈(1979—), 男, 江西人, 博士研究生, 主要从事染料激光技术研究。E-mail: wmg\_nudt@sina.com

导师简介: 陆启生(1942—), 男, 浙江人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用、非线性光学方面的研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

[4~6]给出了实验中得到的横向抽运染料激光的光-光转换效率。

本文采用铜蒸气激光器横向抽运染料 Rh6G, 分析染料激光振荡器的光-光转换效率问题。加入染料自吸收效应对光-光转换效率的影响, 得到了各种实验参数与光-光转换效率的关系图, 实验中得到 8.2% 的最高光-光转换效率, 与理论分析的结果基本符合。

## 2 理论模型

图 1 是简化的染料 Rh6G 能级结构图。包含了采用模型的各个动力学过程。\$S\_i (i = 0, 1, 2, \dots)\$ 表示各个本征能级, \$|\psi\_\alpha^i\rangle, |\psi\_0^i\rangle\$ 分别为第 \$i\$ 个本征能级的振子能级和最低振子能级。在本模型中, \$|\psi\_0^1\rangle\$ 为激光上能级, \$|\psi\_\alpha^0\rangle\$ 为激光下能级, \$|\psi\_0^0\rangle\$ 为基态能级。可以看出 Rh6G 为典型的四能级系统。

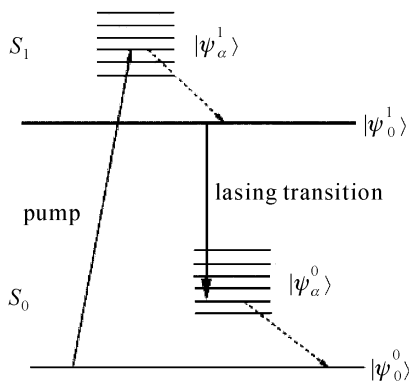


图 1 简化的染料能级结构图

Fig. 1 Simplified energy level structure of laser dye

速率方程组为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} \frac{dn_1}{dt} = \sigma_{0p}n_0I_p + \sigma_{01}n_0I_1 - \sigma_e n_1 I_1 - \frac{n_1}{\tau} \\ \frac{1}{c} \left( \frac{\partial I_p}{\partial t} + \frac{\partial I_p}{\partial x} \right) = -(\sigma_{0p}n_0 + \sigma_{1p}n_1)I_p \\ \frac{1}{c} \left( \frac{\partial I_1^\pm}{\partial t} \pm \frac{\partial I_1^\pm}{\partial z} \right) = (\sigma_e - \sigma_{11})n_1 I_1^\pm - \sigma_{01}n_0 I_1^\pm \\ n = n_0 + n_1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 \$n, n\_0, n\_1\$ 分别为染料、基态、激光上能级的粒子数密度(单位: \$\text{cm}^{-3}\$); \$x\$ 为抽运光方向; \$z\$ 为激光方向; \$I\_p, I\_1^\pm\$ 分别为抽运光和谐振腔内激光正负 \$z\$ 方向上的光子数密度(单位: \$\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\$); \$\sigma\_{0p}, \sigma\_{1p}, \sigma\_{01}, \sigma\_{11}, \sigma\_e\$ 分别为基态、激光上能级对抽运光的吸收截面, 基态和激光上能级对激光的吸收截面以及激光的受激发射截面; \$\tau\$ 为激光上能级寿命; \$c\$ 为光速。

在方程组(1)中, 忽略了一些动力学过程。抽运光脉宽 \$\tau\_1\$ 为 20~50 ns, 远小于染料三重态效应时间常数 \$K\_{st}^{-1}\$ (\$10^{-7}\$ s), 因此三重态效应在本模型中影响可以忽略; 同时抽运光脉宽大于激光上能级寿命 \$\tau\$ (约为 5 ns), 方程的稳态条件是成立的。当 \$i \ge 2\$ 时, \$S\_i\$ 能级向 \$S\_1\$ 能级以及 \$S\_0, S\_1\$ 能级内各转动能级 \$|\psi\_\alpha^{0,1}\rangle\$ 向最低振动能级 \$|\psi\_0^{0,1}\rangle\$ 的无辐射衰减时间 \$\tau\_s\$ (\$10^{-12} \sim 10^{-11}\$ s) 都远小于激光上能级寿命 \$\tau\$。因此, 可以认为粒子数集中于激光上能级和基态能级。

与纵向抽运方式相比, 在横向抽运方式中由于增益长度的增加和基态能级粒子数密度的增大, 必须考虑基态能级对激光的吸收损耗机制。

稳态时, 方程组(1)简化为

$$\begin{cases} n_1 = \frac{(\sigma_{0p}I_p + \sigma_{01}I_1)n}{\sigma_{0p}I_p + \sigma_{01}I_1 + \sigma_e I_1 + 1/\tau} \\ \frac{dI_p}{dx} = -(\sigma_{0p}n_0 + \sigma_{1p}n_1)I_p \\ \pm \frac{dI_1^\pm}{dz} = (\sigma_e - \sigma_{11})n_1 I_1^\pm - \sigma_{01}n_0 I_1^\pm \end{cases}. \quad (2)$$

考虑如图 2 所示的平-平谐振腔, 全反镜 \$M\_1\$ 的反射率 \$R\_1 = 1, M\_2\$ 为具有一定反射率的平面镜 (\$R\_2 = R\$), 从而得到稳态时, 对于平-平谐振腔具有以下关系

$$I_1^-(L) = I_1^+(L)R, \quad (3)$$

$$I_1^+(0) = I_1^-(0), \quad (4)$$

$$I_1(z) = I_1^+(z) + I_1^-(z), \quad (5)$$

式中 \$L\$ 为增益区长度。将方程组(2)与(3), (4) 联立, 即可得到 \$I\_1^\pm(z)\$ 在稳态时的数值解。

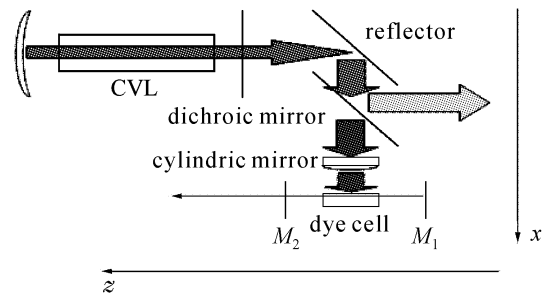


图 2 铜蒸气激光器横向抽运染料激光器实验图

Fig. 2 Experimental arrangement of CVL transversely pumped dye laser

所以从该谐振腔内输出的激光光子数密度为

$$I_{out} = I_1^+(L)(1 - R), \quad (6)$$

若采用输出功率的表达形式

$$P_{out} = I_{out} E_e S, \quad (7)$$

式中 \$E\_e\$ 为输出激光的单光子能量, \$S\$ 为激光的横截

面积,则得到光-光转换效率为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P/f\tau_1}, \quad (8)$$

式中  $P$  为抽运光功率,  $f$  为脉冲重复频率,  $\tau_1$  为抽运光脉宽。

文献[3]中理论分析纵向抽运方式时,通过在增益区内  $I^\ddagger$  为常数的条件,得到了输出光子数密度与初始抽运光子数密度的解析关系。但是其应用具有一定的局限性。在横向抽运方式中由于抽运光方向上激光光子数密度的不均匀性而使上述方法失效,必须采用数值解法求解。计算中采用的参数如表 1 所示。

表 1 理论计算参数

Table 1 Parameters for calculation

Rh6G concentration / (mol/L)	$4 \times 10^{-4} \sim 7 \times 10^{-4}$
Output coupling / %	15~70
Length of dye cell / cm	2.4
Focusing fineness / cm	0.12
$\sigma_e^{[11]}$ / $\text{cm}^2$	$2.3 \times 10^{-16}$
$\sigma_{op}^{[11]}$ / $\text{cm}^2$	$1.8 \times 10^{-16}$
$\sigma_{o1}^{[11]}$ / $\text{cm}^2$	$6.2 \times 10^{-18}$
$\sigma_{1p}^{[11]}$ / $\text{cm}^2$	$5.0 \times 10^{-17}$
$\sigma_{11}^{[11]}$ / $\text{cm}^2$	$4.5 \times 10^{-17}$
$\tau$ / ns	5.5
$\tau_1$ / ns	20
$f$ / kHz	8

### 3 计算与实验结果

实验装置如图 2 所示。铜蒸气激光器工作频率为 8 kHz, 波长为 511 nm 和 578 nm, 两种波长的功率比值约为 1:1; 针对 Rh6G 的吸收和发射谱特性, 使用双色分光镜过滤波长为 578 nm 的激光; 波长为 511 nm 的激光经过焦距为 5 cm 的柱面镜聚焦注入染料池中; 谐振腔由  $M_1$  和  $M_2$  组成,  $M_1$  为全反镜  $R_1 = 100\%$ ,  $M_2$  为输出耦合镜  $R_2 = R$ ; 染料池宽度为 2.4 cm, 腔长为 15 cm。

图 3 为染料激光输出效率与抽运光功率之间的关系。溶液浓度为  $5 \times 10^{-4}$  mol/L, 输出耦合镜的透射率为  $T = 60\%$ 。当抽运功率大于 4.5 W 时, 染料光-光转换效率趋于稳定。理论计算与实验结果基本符合。

图 4 中比较了输出耦合镜反射率与输出效率之间的关系。溶液浓度为  $5 \times 10^{-4}$  mol/L, 保持抽运光功率为 4.87 W, 此时最佳输出耦合反射率为 8%。

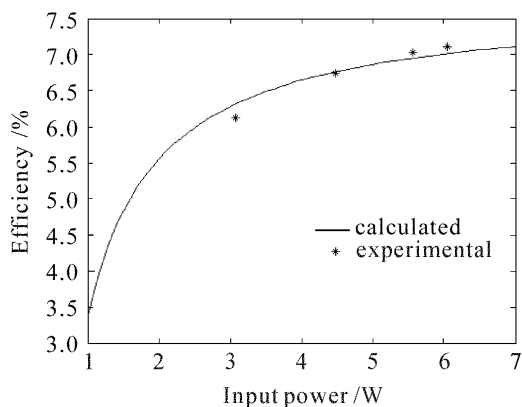


图 3 光-光转换效率与抽运光功率的关系  
Fig. 3 Optical-to-optical conversion efficiency versus pumping power

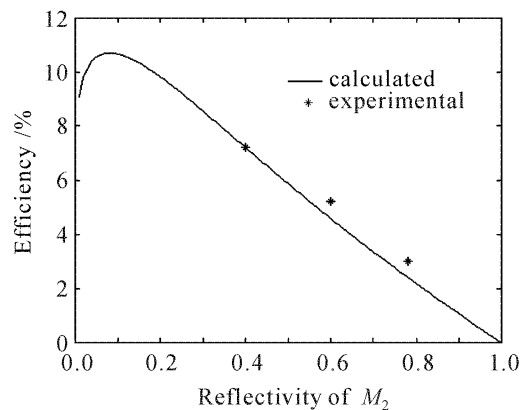


图 4 光-光转换效率与输出镜反射率的关系  
Fig. 4 Optical-to-optical conversion efficiency versus reflectivity of the output mirror

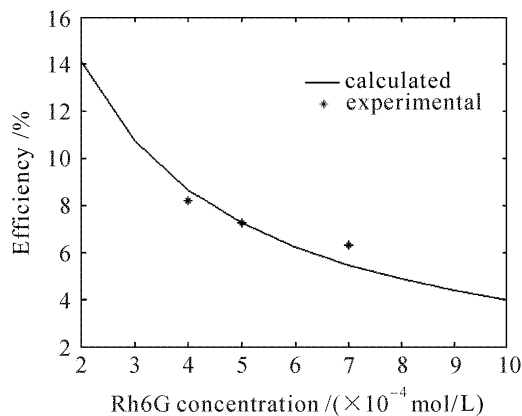


图 5 光-光转换效率与溶液浓度的关系  
Fig. 5 Optical-to-optical conversion efficiency versus dye concentration

实验中采用的输出耦合镜反射率分别为 40%, 60%, 78%, 随着反射率的增加效率逐渐减小。

保持抽运功率为 5.17 W, 输出耦合镜透射率  $T = 60\%$  不变, 研究不同溶液浓度对输出效率的影响, 实验和计算结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 随着溶液浓度的增加, 染料激光器的出光效率逐渐

减小。这是由于在相同的抽运条件下,浓度的增加引起基态能级对激光的吸收损耗增大,从而导致了效率的降低。实验中当浓度为 $4 \times 10^{-4}$  mol/L时,出光效率为8.2%。

## 4 讨 论

文献[4~6]的实验中得到横向抽运结构下的振荡器光-光转换效率为5%~7.5%,与本文得到的实验数据基本符合,主要差距来源于不同的溶液浓度引起的自吸收损耗效应以及腔损耗的不同。

横向抽运与纵向抽运方式存在以下几个不同点:

1) 出光效率明显下降,纵向抽运时光-光转换效率能达到31%<sup>[2]</sup>;

2) 最佳输出耦合率相差较大,横向抽运时最佳输出耦合镜反射率较小(低于10%),而纵向抽运时最佳输出耦合镜反射率较大(约为100%);

3) 浓度与出光效率之间的关系正好相反。横向抽运时随着浓度的增加效率降低;而纵向抽运时效率增加。

由于Rh6G的光谱特性以及染料中杂质等因素的影响,其吸收谱与发射谱之间具有一定的重合<sup>[12]</sup>,如图6所示,基态能级对激光具有一定的吸收损耗作用。本文中吸收和受激辐射截面之间相差约3个数量级。

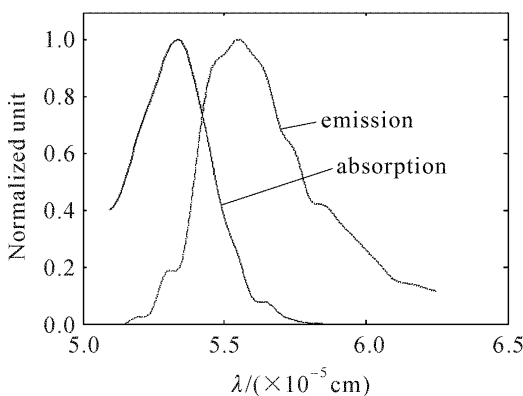


图6 染料Rh6G乙醇溶液的吸收光谱和发射光谱

Fig. 6 Absorption and emission spectra of Rh6G in ethanol

我们认为两种不同的抽运方式的差别在于染料对激光的自吸收损耗的差异所造成的。在稳态条件下,采用纵向抽运方式时,由于基态能级粒子数较少,增益区长度极短,染料的自吸收损耗与输出耦合镜的输出损耗相比可以忽略。而在横向抽运方式

中,染料的自吸收成为了激光振荡器的主要损耗机制。

在染料浓度为 $5 \times 10^{-4}$  mol/L,输出损耗为 $\alpha = 0.2$ 时,比较横向与纵向抽运方式时染料自吸收机制的影响。根据稳态条件 $G = \delta$ , $G$ 为激光器增益, $\delta$ 为激光器损耗

$$\begin{cases} G = gL = n_1 \sigma_e L \\ \delta = \alpha + \delta_{\text{abs}} = \alpha + n_0 \sigma_{01} L, \\ n = n_0 + n_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中 $g$ 为增益系数, $\sigma_{\text{abs}}$ 为染料自吸收损耗。由方程组(9)和稳态条件可以得到 $\delta_{\text{abs}}$ 。

横向抽运条件下,采用表1的染料池参数,得到此时染料自吸收损耗 $\delta_{\text{abs}_t} = 4.3416$ 。

纵向抽运条件下,增益区长度为 $L = 0.02$ ,得到染料自吸收损耗 $\delta_{\text{abs}_l} = 0.031$ 。

从上述讨论中可以看出,染料自吸收机制对两种抽运方式的光腔损耗影响很大。横向抽运时, $\delta_{\text{abs}_t} \gg \alpha$ ,使得横向抽运方式的光-光转换效率低于纵向抽运方式。

## 5 结 论

从理论和实验两方面分析了横向抽运染料Rh6G激光振荡器的效率问题。结果表明,适当增加输出耦合镜的透射率并降低染料浓度有利于增加横向抽运时激光振荡器的效率。实验中采用浓度为 $4 \times 10^{-4}$  mol/L, $T = 60\%$ 的输出耦合镜,效率达到了8.2%。并比较了横向抽运与纵向抽运两种方式,认为基态对激光的吸收机制使得横向抽运方式的光-光转换效率低于纵向抽运方式。

## 参 考 文 献

- 1 R. Steven Hargrove, Tehmau Kan. High power efficient dye amplifier pumped by copper vapor laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(10):1108~1113
- 2 Zhenguo Huang, Kazumi Namba. High power efficient dye laser pumped by copper vapor laser [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1981, **20**(12):2383~2387
- 3 W. Sun, C. S. Tang, X. B. Zhuge *et al.*. Theory and experiments of dye lasers longitudinally pumped by copper vapor lasers (CVL) [J]. *Opt. Commun.*, 1986, **58**(3):196~200
- 4 Liu Dawei, Sun Shulan, Jiang Chongde *et al.*. High power pulsed dye laser oscillator-amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 1985, **12**(5):275~278  
刘达伟,孙树兰,蒋崇德等. 高功率脉冲染料激光振荡-放大器 [J]. *中国激光*, 1985, **12**(5):275~278
- 5 Ren Quan, Liu Minqiang, Wang Qingpu *et al.*. The study of oscillator-amplifier dye laser pumped by a frequency-doubling Nd:YAG laser [J]. *Laser Journal*, 1988, **9**(2):111~113  
任 詮,刘敏强,王青圃等. Nd:YAG 倍频激光泵浦的染料激

- 光器的研究[J]. 激光杂志, 1988, **9**(2):111~113
- 6 F. J. Duarte, James A. Piper. Narrow linewidth, high prf copper laser-pumped dye-laser oscillators [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(9):1391~1394
- 7 Chen Risheng, Zhang Zhizhong, Xie Quanxin *et al.*. Physical design of high power pulsed dye laser amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7):815~819  
陈日升, 张志忠, 谢全新 等. 高功率脉冲染料激光放大器物理设计[J]. 光学学报, 2001, **21**(7):815~819
- 8 Kong Xianglei, Luo Xiaolin, Zhang Xianyi *et al.*. Optimal design for small signal two-stage dye laser amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2):137~141  
孔祥蕾, 罗晓琳, 张先懿 等. 小信号双级染料激光放大器的优化设计[J]. 中国激光, 2004, **31**(2):137~141
- 9 Juan Cheng, Yinghong He, Haoyi Zuo *et al.*. Enhancement of stimulated Raman scattering of acetone and the generation of three-color laser by using fluorescence dye RB [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1):46~48
- 10 F. J. Duarte. High-Power Dye Laser [M]. Springer-Verlag, 1991. 55~58
- 11 Akira Sugiyama, Tsuyoshi Nakayama, Masaaki Kato *et al.*. Characteristics of a dye laser amplifier transversely pumped by copper vapor lasers with a two-dimensional calculation model [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24):5849~5854
- 12 Zhang Guowei. Tunable Lasers [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 50~51  
张国威. 可调谐激光技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 50~51