

连续波环形染料激光器的单向运转特性

张 铁 军

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130032)

提 要

本文讨论了连续波环形染料激光器的单向运转特性。采用改进的 Ganiel 速率方程模型, 分析了在单向运转条件下泵浦光通量、染料分子密度等参量对激光光通量、激发单重态粒子集居数密度以及增益的影响; 揭示了在连续波环形染料激光器中单向运转条件下存在粒子集居数密度的非对称性、激光光通量与激活介质内空间位置的相关性和增益峰值波长的扫描现象。本文给出了数值计算结果。

关键词: 连续波环形染料激光器, 速率方程。

一、引 言

连续波环形染料激光器^[1,2]作为一种高光谱分辨率激光器在激光光谱学、激光化学等方面具有广泛的应用。目前关于连续波染料激光器(包括环形激光器)的理论都是针对双方向的激光光通量而言的^[3,4], 而在环形激光器的实际情况下, 单向运转具有许多新的特点, 对此问题的分析同双方向是不完全相同的。本文采用速率方程模型, 详细研究了连续波环形染料激光器的单向运转特性, 给出了数值计算结果。

二、速率方程模型

单方向的光通量的时间演变和在激活介质中的能级集居数变化的速率方程如下^[5]:

$$\frac{\partial N_1(x, t)}{\partial t} = W(x, t)N_0(x, t) - \tau^{-1}N_1(x, t) - N_1(x, t) \int \sigma_e(\lambda) I(x, t, \lambda) d\lambda + N_0(x, t) \int \sigma_{01}(\lambda) I(x, t, \lambda) d\lambda, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_T(x, t)}{\partial t} = K_{sr}N_1(x, t) - \tau_T^{-1}N_T(x, t), \quad (2)$$

$$N_0(x, t) + N_1(x, t) + N_T(x, t) = N, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} I(x, t, \lambda) = N_1(x, t) \sigma_e(\lambda) I(x, t, \lambda) + \tau^{-1} N_1(x, t) E(\lambda) g(x) - \sigma_{01}(\lambda) N_0(x, t) I(x, t, \lambda) - \sigma_T(\lambda) N_T(x, t, \lambda) I(x, t, \lambda), \quad (4)$$

$$\frac{d}{dx} I_p(x, t, \lambda_p) = -N_0(x, t) I_p(x, t, \lambda_p) \sigma_{01}(\lambda_p) \quad (5)$$

其中 $\frac{d}{dx}I = \left(\frac{\partial}{\partial x}I\right) + \left(\frac{n}{c}\right)\left(\frac{\partial}{\partial t}I\right)$ 。

$$W(x, t) = [P(x, t)/A] \int \sigma_{01}(\lambda_p) f(\lambda_p) (\lambda_p/h\nu) d\lambda_p, \quad (6)$$

$$\sigma_e(\lambda) = [\lambda^4 E(\lambda)] / 8\pi\eta^2 c\eta, \quad (7)$$

$$\int E(\lambda) d\lambda = \phi, \quad (8)$$

$$g(x) = \frac{1}{2} \{1 - (L-x) / [(L-x)^2 + r^2]^{\frac{1}{2}}\}. \quad (9)$$

(1)~(9)式就是纵向泵浦条件下改进的 Ganiel 速率方程模型,其中忽略了三重态和激发单重态的受激吸收。在式(1)~(9)中, N 为染料分子密度, $N_0(x, t)$, $N_1(x, t)$ 和 $N_T(x, t)$ 分别为 S_0 态、 S_1 态和 T_1 态的集居数密度, $W(x, t)$ 为泵浦速率, A 为泵浦面积, $f(\lambda_p)$ 为泵浦辐射的归一化谱分布且 $\int f(\lambda_p) d\lambda_p = 1$, $\sigma_{01}(\lambda_p)$ 为在波长 λ_p 处的 S_0 态吸收截面, h 为 Planck 常数, c 为真空中光速, η 为 S_1 态寿命, $\sigma_e(\lambda)$ 为 $S_1 \rightarrow S_0$ 态受激发射截面, $\sigma_{01}(\lambda)$ 为 $S_0 \rightarrow S_1$ 态吸收截面, $\sigma_T(\lambda)$ 为 T_1 态吸收截面, K_{ST} 为 $S_1 \rightarrow T_1$ 态系际交叉速率, τ_T 为 T_1 态寿命, $E(\lambda)$ 为归一化荧光谱($S_0 \rightarrow S_1$), ϕ 为荧光量子效率, $I(x, t, \lambda)$ 为激光光通量, $I_p(x, \lambda_p)$ 为泵浦光通量, $g(x)$ 为几何因子。

在忽略自发辐射及稳态条件下,式(4)可以表示为:

$$dI(x, \lambda)/I(x, \lambda) = \alpha(x, \lambda) dx, \quad (10)$$

$$\alpha(x, \lambda) = N_1(x) [\sigma_e(\lambda) + \sigma_{01}(\lambda) (1 + K_{ST}\tau_T) - \sigma_T(\lambda) K_{ST}\tau_T] - N\sigma_{01}(\lambda), \quad (11)$$

增益系数 $G(\lambda)$ 为:

$$G(\lambda) = I(L, \lambda)/I(0, \lambda) = \exp\left[\int_0^L \alpha(x, \lambda) dx\right]. \quad (12)$$

其中 L 为激活介质长度。如果激光器输出镜的反射率为 R , 腔内插件的总透过率为 $T(\lambda)$, 则在阈值条件下有:

$$RT(\lambda)G(\lambda) = 1. \quad (13)$$

于是在阈值条件下激发单重态的集居数密度为:

$$\begin{aligned} \bar{N}_1 &= \frac{1}{L} \int_0^L N_1(x) dx \\ &= \left[N\sigma_{01}(\lambda) - \frac{1}{L} \ln RT(\lambda) \right] / [\sigma_e(\lambda) + \sigma_{01}(\lambda) (1 + K_{ST}\tau_T) - \sigma_T(\lambda) K_{ST}\tau_T]. \end{aligned} \quad (14)$$

在本文的分析中,不考虑腔内插件的影响,亦即 $T(\lambda) = 1$, 关于 $T(\lambda)$ 的影响参见文献[6]。

三、数值计算

在数值计算中,将波长范围分为许多小区域,将对空间长度的积分转化为多点求和。激光光通量 $I(x, \lambda)$ 的初值由自发辐射项 $N_1(x)\tau^{-1}g(x)E(\lambda)$ 决定, 泵浦光通量 $I_p(x, \lambda_p) = W(x)/\sigma_{01}(\lambda_p)$ 的初值取为 $I_p(0) = P/Ah\nu$, 其中 P 为泵浦光功率。激发单重态集居数 $N_1(x)$ 由激光光通量 $I(x, \lambda)$ 及泵浦光通量 $I_p(x, \lambda_p)$ 的初值决定。受激吸收截面和受激发

射截面的数值引自文献[7]。

采用 Runge-Kutta 方法, 计算了在稳态条件下连续波环形染料激光器的单向运转特性, 尤其是泵浦光通量、染料分子密度等因素的影响。

图 1 给出了不同泵浦光通量对激光光通量和激发单重态粒子集居数密度影响的计算曲线。对于给定的 $N = 10^{18} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-3}$, 随着 I_p 的增加, $I(x, \lambda)$ 及 $N_1(x)$ 亦增加; 对于给定的 I_p , $I(x, \lambda)$ 随 x 增加而增加, 而 $N_1(x)$ 随 x 增加而减小。当 $I_p(0) \geq 1.4 \times 10^{23} \text{ photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $I(x, \lambda)$ 和 $N_1(x)$ 均出现饱和状态, $I(x, \lambda)$ 和 $N_1(x)$ 基本上不再随 I_p 之变化而变化。

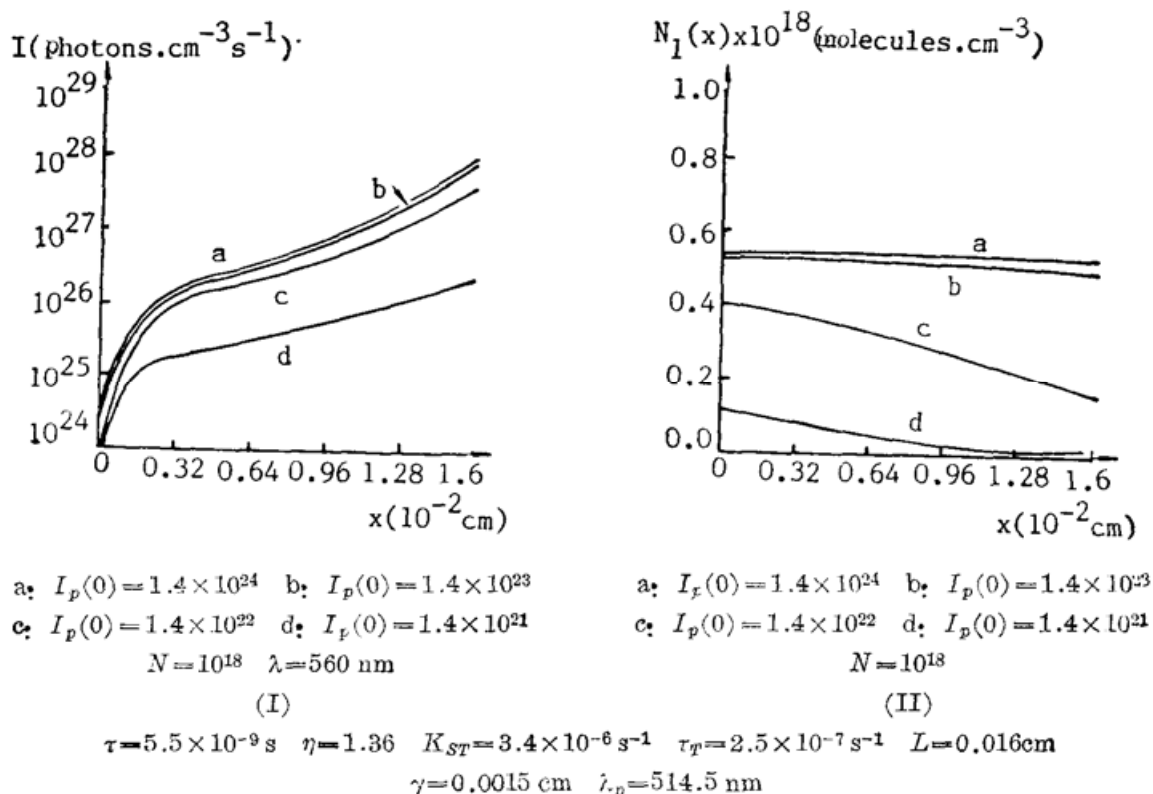
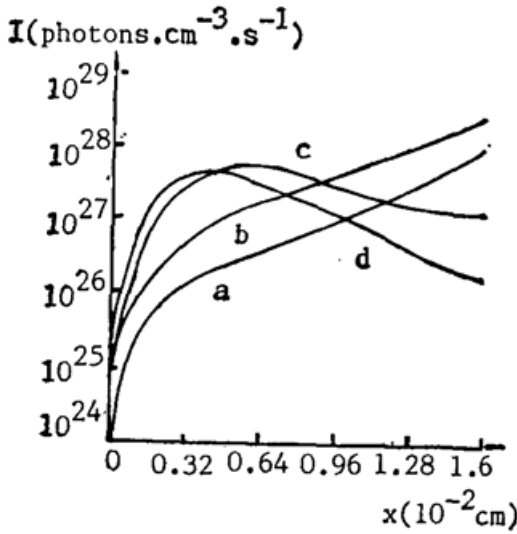


Fig. 1 (I) Photon flux I as a function of position x in the medium for various pumping rates; (II) Excited-state population $N_1(x)$ as a function of position x in the medium for various pumping rates

图 2 给出了不同染料分子密度对激光光通量影响的计算曲线。对于给定的 $I_p(0) = 1.4 \times 10^{23} \text{ photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 随着 N 的增加, $I(x, \lambda)$ 的变化比较复杂, 以饱和状态为分界点, 在未饱和时, 如 $N \geq 10^{19} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 随 x 的增加, $I(x, \lambda)$ 先随 x 增加然后又减小, 而对 $N < 10^{19} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 随 x 的增加, $I(x, \lambda)$ 始终随之增加。同样的计算还表明: 对于 $N_1(x)$, 在 $N \geq 10^{19} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $N_1(x)$ 随 x 增加而减小, 在 $N < 10^{19} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $N_1(x)$ 随 x 增加, 基本不变, 略有减小, 这正是 $N_1(x)$ 进入饱和状态的反映。

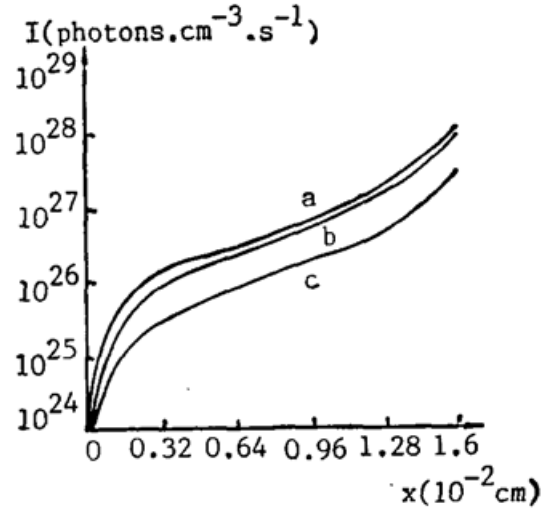
图 3 给出了不同的波长上激光光通量与激活介质中不同坐标位置的关系曲线, 同样也以饱和状态为分界点, 而且 $I(x, \lambda)$ 同 $N_1(x)$ 一样, 均不存在空间对称性, 这正是单向运转的特点。

图 4 给出了在不同染料分子密度时增益系数与波长的关系曲线。当处于饱和状态时, $G(\lambda)$ 与 N 的关系基本不变。但是, 不论是非饱和状态还是饱和状态, 随着 N 的增加, $G(x)$



a: $N=10^{18}$ b: $N=3 \times 10^{18}$ c: $N=10^{19}$
 d: $N=1.5 \times 10^{19}$ $I_p(0)=1.4 \times 10^{23}$
 $\lambda=560$ nm

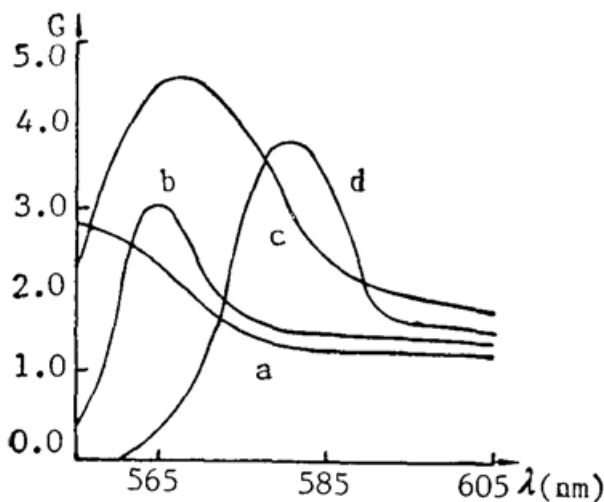
Other parameters are the same as Fig. 1.
 Fig. 2 Photon flux I as a function of position x in the medium for various total concentrations



a: $\lambda=560$ nm b: $\lambda=550$ nm
 c: $\lambda=610$ nm $I_p(0)=1.4 \times 10^{24}$
 $N=10^{18}$

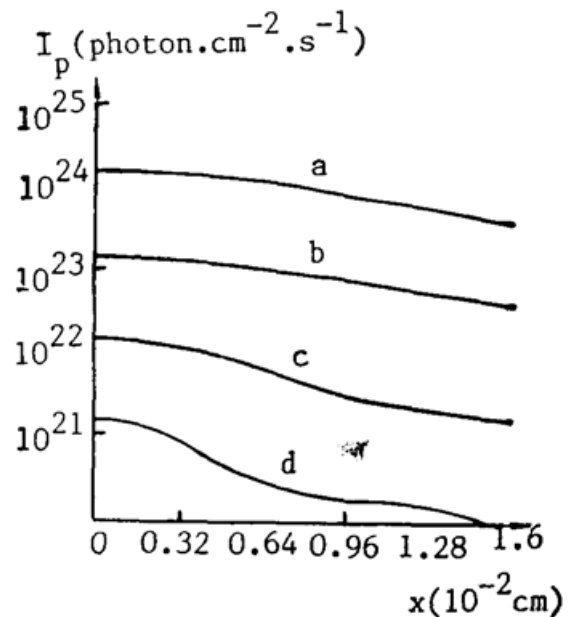
Other parameters are the same as Fig. 1.
 Fig. 3 Photon flux I as a function of position x in the medium for various wavelengths

的峰值波长 λ_l 向长波长方向移动, 即 $G(\lambda) \sim N$ 的关系出现峰值波长的扫描现象; 类似地计算表明: 随着 I_p 的增加, $G(\lambda)$ 的峰值波长 λ_l 出现向短波方向移动, 亦存在波长的扫描现象, 但波长移动量不如 $G(\lambda) \sim N$ 关系那么明显。



a: $N=10^{18}$ b: $N=6 \times 10^{18}$ c: $N=10^{19}$
 d: $N=2 \times 10^{19}$ $I_p(0)=1.4 \times 10^{23}$ $R=0.94$

Other parameters are the same as Fig. 1.
 Fig. 4 Gain $G(\lambda)$ as a function of wavelength λ for various total concentration



a: $I_p(0)=1.4 \times 10^{24}$ b: $I_p(0)=1.4 \times 10^{23}$
 c: $I_p(0)=1.4 \times 10^{22}$ d: $I_p(0)=1.4 \times 10^{21}$

Other parameters are the same as Fig. 1.
 Fig. 5 Pumping rates I_p as a function of position x in the medium for various initial pumping $I_p(0, \lambda_p)$

图 5 给出了泵浦光通量与激活介质中空间位置坐标的关系曲线,显然,当 $I_p(0)$ 很高时,如 $I_p(0) > 1.4 \times 10^{23} \text{ photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $I_p(x)$ 与 x 近似满足指数变化规律。

四、讨 论

在单向运转的条件下,纵向泵浦的连续波环形染料激光器具有以下几个特点:

(1) 不论何种参量都存在饱和状态。对于给定的染料分子密度,随着泵浦光通量的增加,激光光通量和激发单重态的粒子集居数密度都将进入饱和状态;在染料分子密度增加时,同样将产生类似的效应。从理论上说,随着泵浦光通量的增加,激发单重态的粒子集居数密度也相应地增加,从而激光光通量也不断地增加,这种受激辐射的增强,又导致大量的居于激发单重态的粒子转化为基态的粒子,从而又使增益下降,平衡时便进入饱和状态。

(2) Juramy 等人讨论了脉冲染料激光器中存在的激光辐射光谱扫描现象^[8]:在整个脉冲持续期间的不同时刻,激光辐射的极大值随时间向长波长方向移动。在连续波环形染料激光器中不存在这种时间光谱扫描,但存在激光峰值波长随着染料分子密度或泵浦光通量的变化而改变的现象:随着染料分子密度的增加,或者随着泵浦光通量的降低,激光辐射的极大值也随之向长波方向移动。

(3) 对于双方向运转的情形,不同泵浦光通量条件下激发单重态的粒子集居数密度与激活介质中的位置具有中心位置对称性,粒子集居数密度的峰值出现在激活介质的中心处,而不同的泵浦光通量仅仅改变了峰值的大小^[5]。但是在单向运转的条件下,激发单重态的粒子集居数密度与激活介质中的位置不存在对称性,仅在强饱和状态下二者近似无关。

双方向运转的情形下,总的激光光通量近似与激活介质中的位置无关^[4],因而据此近似条件可以获得输出激光光通量的解析关系式^[3]。但是在单向运转的情形下,激光光通量不再与激活介质中的位置无关,忽略它们之间的依赖关系是不正确的,因而不可能获得输出激光光通量的解析关系式。

参 考 文 献

- [1] S. M. Jarrett *et al.*; *Opt. Lett.*, 1979, **4**, No. 6 (Jun), 176.
- [2] W. G. Divens *et al.*; *Rev. Sci. Instrum.*, 1982, **53**, No. 9 (Sep), 1363.
- [3] O. Teschke *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1976, **QE-12**, No. 7 (Jul), 383.
- [4] M. Munz *et al.*; *Appl. Phys.*, 1980, **22**, No. 2 (Jun), 175.
- [5] U. Ganiel *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1975, **QE-11**, No. 11 (Nov), 881.
- [6] 张铁军;《量子电子学》,1989, **6**, No. 3 (Sep), 265.
- [7] P. R. Hammond; *IEEE J. Q. E.*, 1979, **QE-15**, No. 7 (Jul), 624.
- [8] P. Juramy *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1977, **QE-13**, No. 10 (Oct), 855.

Unidirectional operation properties of CW ring dye laser

ZHANG TIEJUN

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica Changchun 130022)

(Received 16 February 1990; revised 25 October 1990)

Abstract

The unidirectional operation properties of CW ring dye lasers are discussed. Using the improved ganiel model of rate equations, the paper analyses the influences of pumping flux and dye molecules density on photon flux, excited-state population density and gain under condition of unidirectional operation. It points out that there are unsymmetry of population density to the position in the medium and correlation between photon flux and position in the medium, and the wavelength of peak gain has the scanning properties. The numerical computation results are given.

Key words: CW ring dye laser, rate equations.