

# 激光通道空间分离式多色激光器的输出光谱

A. G. Zhiglinsky A. M. Izmailov I. A. Smirnova P. A. Vorotnev

(俄罗斯圣彼得堡大学物理所)

方香云 赵 鸿 周寿桓

(华北光电所, 北京 100015)

**提要** 在稳态和准稳态近似下求解速率方程, 计算了激光通道空间分离式激光器的输出光谱。从理论上和实验上对通过改变泵浦功率在增益介质上的分布而获得预先所需的光谱输出的激光器特性进行了研究。

**关键词** 光谱, 多色染料激光器

## 1 理论分析

在许多科技研究领域需要用到多种波长的激光或更为复杂的宽波段连续可调谐的激光。但目前还没有全光谱范围内任意可调谐的激光器。

对于均匀加宽型的增益介质, 当谐振腔内没有色散元件时, 模式竞争使传统激光器的输出光谱变窄。一种防止模式竞争的方法是在空间将增益介质分成若干部分, 以产生不同波长的激光振荡<sup>[1~4]</sup>。

假定激光器中不同的激光通道(激光回路)在空间上是完全分离的。增益介质中不同的位置为不同的辐射波长提供反馈放大, 而整个增益介质为增益谱宽内的所有波长提供反馈放大。这不同的位置用空间坐标  $x$  表示,  $x$  轴的方向与激光传播方向垂直, 如图 1 所示。对于均匀加宽型四能级结构的增益介质, 在单一波长的激光泵浦下, 激光作用的速率方程可采用如下形式

$$\frac{dW(x, \lambda, t)}{dt} = \left[ n_1(x, t) \epsilon b_{10}(\lambda) - \frac{1}{\tau(x, \lambda)} \right] W(x, \lambda, t) \quad (1)$$

$$\frac{dn_1(x, t)}{dt} = n_0(x, t) b_{01}(\lambda) W_p(x) - n_1(x, t) \int b_{10}(\lambda) W(x, \lambda, t) d\lambda \quad (2)$$

$$n_0(x, t) + n_1(x, t) = n = \text{常数} \quad (3)$$

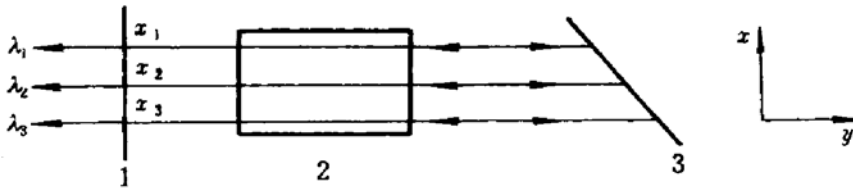


Fig. 1 Schematic diagram of polychromatic dye laser

1—output mirror; 2—dye cell; 3—grating

这里  $n$ ,  $n_0$  和  $n_1$  是  $x$  点上的粒子数密度, 其中  $n_0$  是基态粒子数密度,  $n_1$  为激发态粒子数密度,  $n$  为总粒子数密度。  $W(x, \lambda, t)$  是  $t$  时刻波长为  $\lambda$  的谐振腔内的光子数密度, 它是由  $x$  点的增益介质辐射形成的。  $\tau(x, \lambda)$  是腔内光子寿命,  $W_p(x)$  是  $x$  点上的泵浦功率密度,  $b_{01}(\lambda)$  和  $b_{10}(\lambda)$  是增益介质中基态与激发态之间的受激辐射跃迁爱因斯坦系数,  $\epsilon$  是增益介质中属于  $W(x, \lambda, t)$  的那部分光子数,  $\lambda_p$  为泵浦激光的波长。

与传统激光器相比, 上述方程组中有三个不同之处。1) 在一般情况下, 增益介质中不同的位置所形成的激光振荡波长可有所不同,  $\lambda$  随坐标  $x$  的变化而变化, 所以  $W(x, \lambda, t)$  不依赖于分立的变量即模数而是随连续可变的波长的变化而变化; 2) 空间分离式的激光通道使得增益介质中不同的位置形成不同的振荡波长, 必须将  $W(x, \lambda, t)$  考虑成空间坐标  $x$  的函数; 3) 腔内光子寿命是辐射波长和空间坐标的函数, 因为腔内损耗是和波长有关, 也是随空间位置的变化而变化的。

激光器的输出谱为

$$W(\lambda, t) = \int W(x, \lambda, t) dx \quad (4)$$

从 (1) ~ (4) 式可知, 当泵浦功率随增益介质的空间分布  $W_p(x)$  已知时, 可以预先求得激光器的输出光谱。这里先求 (1) ~ (3) 式的稳态解。在稳态条件下, (1) 式和 (2) 式的微分等于零。假定光子寿命  $\tau(x, \lambda)$  与所考虑的增益介质的位置及该位置所形成的激光振荡波长有关, 即

$$\tau(x, \lambda) = \left[ \frac{c}{L} \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 F(x, \lambda)}} \right]^{-1} \quad (5)$$

其中  $c$  为光速,  $L$  为谐振腔的长度,  $R_1$  和  $R_2$  为腔镜反射率。稳态系统速率方程的解取决于函数  $F(x, \lambda)$ 。假定  $F(x, \lambda)$  作为  $\lambda$  的函数, 在  $\lambda = \lambda(x)$  上有尖峰最大值,  $\lambda(x)$  是单值连续函数。这样方程 (1), (2) 的稳态解为

$$n_1^0(x) = \frac{1}{\epsilon \tau(x, \lambda) b_{01}[\lambda(x)]} \quad (6)$$

$$W^0(x, \lambda) = W^0(x) \delta[\lambda - \lambda(x)] \quad (7)$$

$$W^0(x) = \left[ \frac{n}{n_1^0(x)} - 1 \right] \frac{b_{01}(\lambda_p)}{b_{10}[\lambda(x)]} W_p(x) \quad (8)$$

(5) 式对函数  $F(x, \lambda)$  的假定要求是谐振腔内不同波长的激光振荡在空间上是完全分离的。由 (6), (7) 和 (8) 式可知, 激光通道空间分离式激光器的输出光谱取决于增益介质本身的增益系数和泵浦光在坐标  $x$  上的功率分布。因此, 对于特定的工作物质, 可以通过改变泵浦功率密度在其上的分布即  $W_p(x)$  而获得所需的激光光谱。根据泵浦情况的不同, 它可以是多线分立谱、宽带连续谱或二者同时输出。

为了求得达到稳态工作或可以使用 (6), (7) 和 (8) 式所需的时间, 我们对上述的稳态解作

一级修正,函数形式如下

$$n_1(x, t) = n_1^0(x) + \delta n_1(x, t)$$

$$\delta n_1(x, t)/n_1^0(x) \ll 1 \quad (\text{对任意的 } x \text{ 和 } t)$$

方程(1)~(3)在  $\delta n_1$  的线性近似下变为

$$\frac{d\delta n_1(x, t)}{dt} = -\delta n_1(x, t)b_{01}(\lambda_p)W_p(x) \quad (9)$$

$$\frac{dW(x, \lambda, t)}{dt} = \left\{ \frac{1}{\tau(x, \lambda)} \left[ \frac{b_{10}(\lambda)}{b_{10}[\lambda(x)]} - 1 \right] + \delta n_1(x, t)\epsilon b_{10}(\lambda) \right\} W(x, \lambda, t) \quad (10)$$

对(9),(10)式的微分方程组求解,得出与  $x$  点的增益介质相对应的激光光谱为

$$W(x, \lambda, t) \sim W_p(x) \exp \left\{ \left[ \frac{b_{10}(\lambda)}{b_{10}[\lambda(x)]} - 1 \right] \frac{t}{\tau_0} \right\} \exp \left\{ \left[ \frac{b_{10}(\lambda)}{b_{10}[\lambda(x)]} - 1 \right] |\ln F^{c/2L}(x, \lambda)| \right\} \quad (11)$$

其中  $\tau_0 = [(c/L) \ln \sqrt{1/R_1 R_2}]^{-1}$ 。

对于普通的染料,当光子在谐振腔内振荡6到7次之后,用(11)计算的结果与用(6)~(8)式计算的结果非常相似,也就是说,经过这段时间之后,激光作用可以看成是稳态的。

## 2 实验结果

根据上述的分析,我们设计了一台新型的激光通道空间分离式染料激光器。在工作原理上它与传统激光器的不同之处在于各种波长的激光是由增益介质中相应的各部分所产生的,其振荡回路是完全分开的。图1是激光器的光路示意图。谐振腔由输出镜和反射光栅组成。输出镜不同的位置  $x_i$  所对应的反射波长  $\lambda_i$  和反射率不同。泵浦激光经扩束后经过一个结构复杂的反射光学系统,从垂直于纸面的  $z$  轴方向泵浦染料。由于反射光学系统的巧妙设计,  $x$  方向上的分布  $W_p(x)$ , 包括在染料盒上的泵浦宽度和强度分布等。这种特殊结构的谐振腔形成了一系列的自反馈回路,当工作物质被泵浦时,不同的反馈回路即激光通道所形成的激光振荡波长不同。通过调节上述的反射光学系统,改变泵浦光在染料盒上的强度分布(空间分布)实现输出波长和强度的可调谐。根据实际的需要,染料可以装在一个盒里,也可以分别装进三个染料盒并排放于  $x_1, x_2$  和  $x_3$  上,以扩大输出光谱的范围。实验中用调  $Q$  Nd:YAG 激光器的三倍频光泵浦,重复频率 10 Hz。工作物质为若丹明 R<sub>6G</sub> 酒精溶液,浓度在  $2 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$  mol/l 之间。

图2是通过改变泵浦位置而得到的激光器的输出光谱。它证实了波长与位置坐标  $x$  的强烈依赖关系。其中  $b \sim f$  是线光谱,这时只有很窄的一条工作物质被泵浦。当泵浦的范围加宽时,输出的是如图2中  $g \sim j$  所示的波长可调谐的窄带连续谱。

图3是激光器的多线分立谱。所输出的线光谱的条数与工作物质被泵浦的区域数相同(图3中  $f \sim h$ ), 它们的波长取决于泵浦的位置(图3  $b \sim e$ ), 它们的相对强度与泵浦这些位置的相对功率密度有关(图3  $b \sim f$ )。

实验中我们还将 R<sub>6G</sub>, C<sub>47</sub> 和 C<sub>30</sub> 三种染料的酒精溶液分别装在三个小染料盒里,将它们按顺序排在一起,可以实现从红光-紫外光的可调谐输出。将同时输出的三种波长的激光,用光纤耦合输出,适当调节各自的波长和相对强度,获得了白色激光。

图4是 R<sub>6G</sub> 酒精溶液连续谱输出时的理论曲线与实验曲线对照。图中用实线表示的实验结果与用虚线表示的计算曲线很好地吻合,这验证了理论分析的正确性。

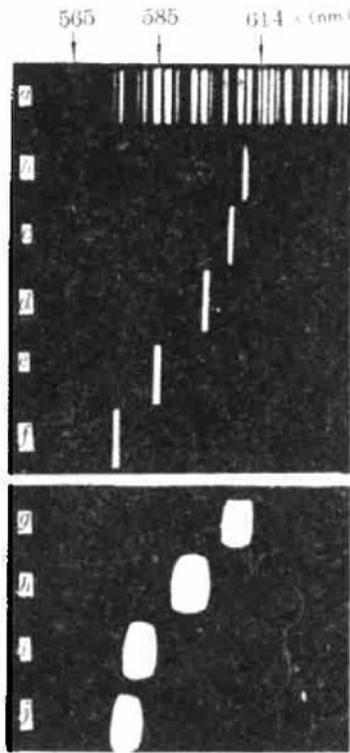


Fig. 2 Output spectrum variation of the laser vs. the positions change of the pumped active medium region ( $b \sim f$ ), the same for the broader pumped region ( $g \sim j$ ), and the reference spectrum of Ne in alcohol discharge ( $a$ )

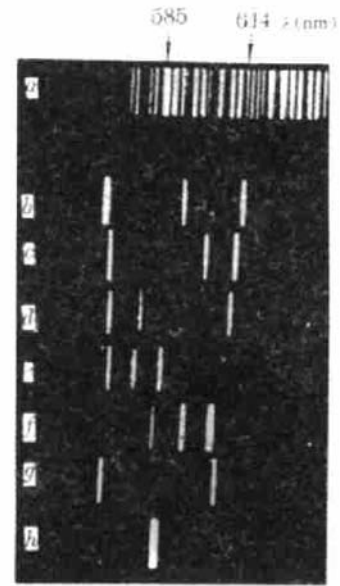


Fig. 3 Multilinear spectrum of the laser with full spatial separation of lasing Channels ( $b \sim k$ ) and the reference spectrum of Ne in alcohol discharge ( $a$ )

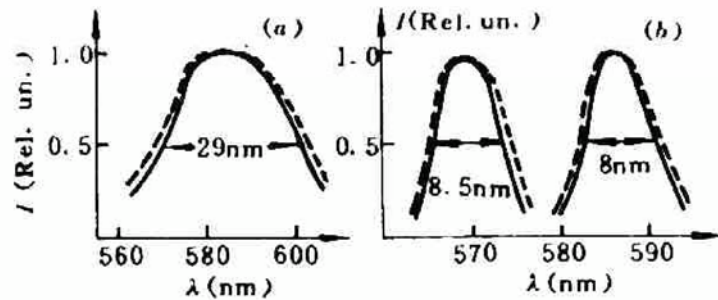


Fig. 4 Experimental (solid lines) and calculated (dashed lines) spectral distributions of lasing power. ( $a$ ) in a broad continuous spectrum region; ( $b$ ) in two parts of continuum with the position variation of the pumped active medium region

### 3 应用前景

激光通道空间分离式的激光器可获得宽光谱范围内的可调谐输出,并能同时提供几种波长的线光谱或几个波段的连续谱,将有比传统染料激光器更广泛的应用前景,可应用于激光光谱学、光化学、原生质诊断、全息光谱学和多通道光通讯等领域。白色激光在彩色全息照相和彩色显微镜等应用中可有效地防止对颜色的破坏。这种特殊结构的激光器能输出比普通激光器宽得多的超宽带连续谱,可以模仿非相干光源,这在医学上将具有重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 S. P. Anohov, V. Y. Marusiy *et al.*. Tunable Lasers, Moscow, 1982
- 2 A. Ashkine. U. S. Patent, 3774121, 1975
- 3 A. Javan. U. S. Patent, 4287486, 1981
- 4 T. Oomori, K. Oho *et al.*. U. S. Patent, 4710937, 1987

## Output Spectrum of the Polychromatic Laser with Spatial Separation of Lasing Channels

A. G. Zhiglinsky A. M. Izmailov I. A. Smirnova P. A. Vorotnev  
(Physics Research Institute of St. Petersburg University, Russia)

Fang Xiangyun Zhao Hong Zhou Shouhuan  
(North China Research Institute of Electro Optics, Beijing 100015)

**Abstract** By means of balance of rate equations the output spectrum of the laser with full spatial separation of lasing channels is calculated in stationary and quasistationary approaches. The laser characteristics for the designed radiation spectral distribution by means of the pumping power redistribution along the active medium are studied theoretically and experimentally.

**Key words** spectrum, polychromatic dye laser