

声光调 Q 准连续 YAG 倍频光泵浦下的染料激光器研究

王仕康 薛 彬 张江波

(天津大学)

提要: 本文讨论了染料激光器在以 KTP 作倍频元件的 YAG 准连续倍频光泵浦下使用不同染料及不同选频元件时输出光束的线宽、转换效率及最佳运转参数。考虑到选频元件的选频损耗特性,通过对多波长速率方程组的数值解,讨论了在有限的泵浦光持续时间内,光束在染料激光腔内往返通过选频元件的次数对输出线宽的影响。计算结果与实验数据基本相符。

Study of dye laser pumped by an acousto-optic Q-switched YAG SHG laser

Wang Shikang, Xue Bin, Zhang Jiangbo

(Tianjin University, Tianjin)

Abstract: The frequency-doubled and Q-switched quasi-cw YAG laser using KTP SHG crystals is a new pumping source for dye lasers. The performances of this system such as efficiencies, optimum structure and output band width with different dyes and frequency selection elements are discussed. Considering the loss characters of the frequency selection elements and by obtaining the numerical solution of multi-wavelength rate equation, the effects of beam round trips through frequency elements in dye laser cavity on the output linewidth are discussed. The calculation are in agreement with the experimental results.

随着 KTP 等高质量倍频晶体生产工艺的完善,声光调 Q YAG 倍频激光器的输出功率已大大提高。国外已有输出平均功率超过 20 W 的报道。国内同类装置的输出功率也已达 8.7 W^[1]。由于倍频 YAG 激光器的输出谱线正好落在常用可见光区染料的吸收带内,故 YAG 倍频激光器是一种较理想的染料激光器泵浦光源。KTP 晶体出现以前,由于连续调 Q YAG 激光器倍频后的输出

功率仅几百毫瓦,泵浦染料激光器后,输出功率更低,远不能满足非线性光学和光谱学研究的要求,限制了其应用范围。

使用 KTP 作内腔倍频晶体的连续声光调 Q YAG 激光器的典型输出参数为:平均功率 5 W,脉冲宽度 100 ns,脉冲重复率 5 kHz。由这组参数可知,每一个光脉冲的能量为 1 mJ,峰值功率为 10⁴ W。由此看出,

收稿日期:1986年4月19日。

声光调 Q YAG 倍频激光器的输出特性(以下简称准连续输出)介于一般脉冲 YAG 倍频激光器(峰值功率 10^6 W, 脉冲重复率 10 Hz)和氩离子连续激光器(输出功率 3 W)之间。本文讨论准连续泵浦时,对染料激光器结构参数的考虑及实验结果。

一、染料循环方式及腔形

考虑到准连续泵浦光的占空系数很大,在选择染料循环方式时可忽略三重态的影响。但又由于脉冲峰值功率比普通脉冲激光器小几个量级,所以我们仍选用了染料喷膜循环方式,以降低插入损耗。在准连续泵浦下,染料喷膜的流速已不象连续泵浦时那样重要。在保证喷膜光学质量的前提下,流速可降低至连续泵浦时的 $1/4$ 到 $1/3$, 这样将大大降低对循环泵的要求。腔的参数和布局见图 1。

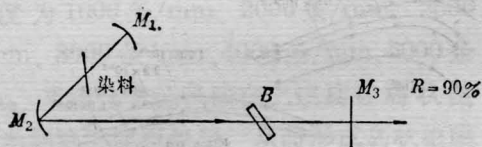


图 1 三镜折迭腔结构图

$R_{M_1}=53.48$ mm, $R_{M_2}=53.48$ mm, $R_{M_3}=\infty$, $\overline{M_1M_2}=81$ mm, $\overline{M_2M_3}=320$ mm, 折迭角为 9°

二、输出镜反射率及染料浓度

输出镜 M_3 的反射率及染料的浓度是不插入任何选频元件时影响激光器转换效率的主要因素。这两个参数最佳值的确定可以通过对速率方程的数值解来定性估计,也可通过实验具体确定。我们用渐变反射率铝膜平面镜作输出镜对 Rh6G 和 Kiton red 两种染料进行了实验,发现 M_3 反射率的最佳值远低于连续泵浦时所需要的值。在用氩离子激光泵浦时,同样腔型下 M_3 反射率的最佳值在 90% 附近,而准连续泵浦时, M_3 的反射

率最佳值对 Rh6G 为 15%, 对 Kiton red 为 65% 左右。

染料浓度对转换效率的影响与所用输出镜反射率有关。实验表明,当输出镜反射率取上述最佳值时, Rh6G 的最佳摩尔浓度为: 1.25×10^{-3} , Kiton red 为 1.79×10^{-3} 。实验结果见图 3(空腔条件下)。

以上讨论的是针对转换效率的最佳参数,即空腔时的最佳值。当腔内插入选频元件后,最佳的涵义将不仅仅是转换效率。选频元件所能实现的波长调谐范围和输出线宽往往也是染料激光器设计者和使用者所关心的指标。由于输出镜反射率和选频元件的选择损耗共同决定了激光器的振荡阈值,二者相互制约的关系使得频率参数和线宽参数很难同时实现最佳化。实际工作中应根据需要确定最佳对象。关于这点后面两节还要讨论到。

三、选频方式

一般连续泵浦的染料激光器常采用双折射片压缩线宽和调谐频率。单片双折射片就可将线宽压缩至 0.1 nm 左右。但同样的元件在准连续泵浦下却几乎失去了上述二个作用。单片双折射片作选频元件时,输出线宽达 3 nm, 在输出反射镜反射率取最佳值时,双折射片几乎失去了频率调谐的作用。

为考察一般常用选频元件在准连续泵浦下的选频作用,我们分别用双折射片(B)、光栅(G)、棱镜(P)及它们的不同组合进行了实验对比。其光路见图 2。

图 2(a)、(b)分别是用双折射片和色散棱镜作选频元件的光路。其中输出镜 M_3 反射率的选择很难兼顾所有输出特性的要求。按空腔最大转换效率所对应的反射率时,能得到最大的输出功率,但频率选择性很差。尤其是双折射片,要使它有明显的选频和压缩带宽作用,输出镜反射率要高达 85~95%。

这时输出功率将大大降低。棱镜选频也要求反射率在 65% 左右才能有较好的效果, 仍离最佳转换效率所要求的值较远。另外转动棱镜时, 输出光束的方向也随着改变, 这在很多应用场合是不允许的。

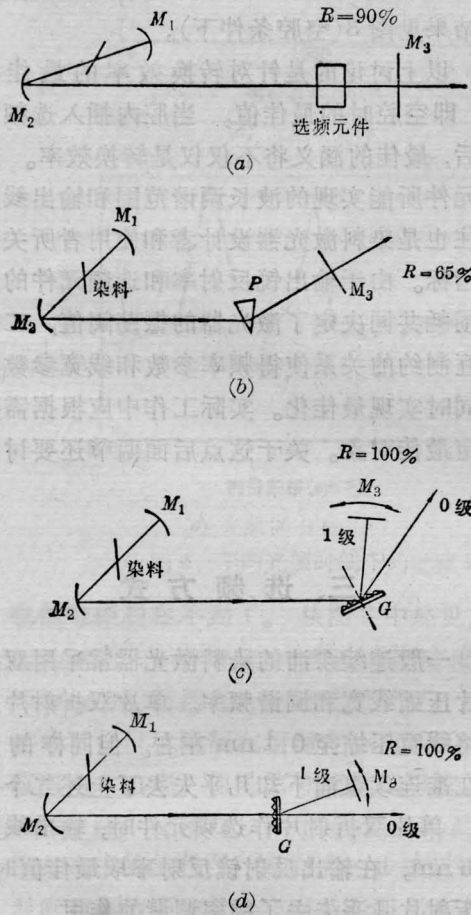


图 2 不同选频元件的光路设置

图 2(c)、(d) 分别为用反射光栅和透光光栅选频的光路图。因光栅的衍射效率随入射角度改变而改变, 角度越大, 效率越低, 同时, 光束复盖刻线的数目还将影响激光线宽, 所以对不同要求下的输出线宽将需要选择不同闪耀波长的光栅, 使等效反射率接近空腔时的最佳反射率。在光谱测量中, 有时需要激光器以较窄的线宽输出, 这时要采用掠入射方案。我们用 1260 线/mm, 闪耀波长 600 nm 的光栅测量, 发现在入射角为 87° 时, 一

级衍射效率为 18%, 接近 Rh6G 所要求的最佳反射率, 对 Kiton red, 因它的最佳反射率高达 65%, 故很难在这种工作方式下找到合适的光栅, 只能偏离最佳状态工作。这时的输出线宽小于 0.1 nm。对要求宽带输出的场合, 如与 OMA 配合进行光谱测量时, 要求输出线宽达 1 nm。这时就应减少入射角, 而衍射效率也随之增强。当入射角为 45° 时, 对 Rh6G 染料, 要选用闪耀波长远离工作波长的光栅, 使其等效反射率仍为 10~20%, 我们用闪耀波长为 240 nm, 刻线 1200 线/nm 的光栅满足了这一要求。实验数据见表 1。对 Kiton red, 则应选择闪耀波长接近工作波长的光栅, 以得到高的等效反射率。

图 3 为空腔时的一组实验数据。

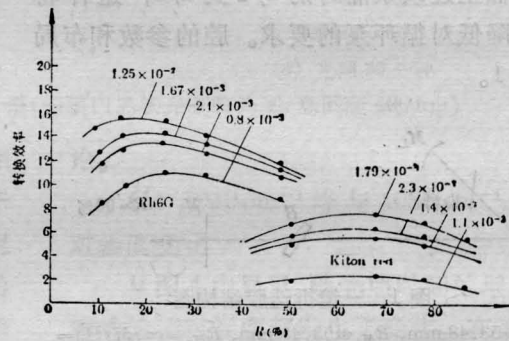


图 3 不同反射率、不同浓度(摩尔浓度)下的转换效率实验曲线 (空腔条件下的结果)

表 1 为采用不同选频元件及组合情况下的一组实验数据, 其结果有些接近空腔最佳值, 有些则不然。表中转换效率是输入泵浦平均功率与输出平均功率之比。调谐范围以得不到稳定激光输出为极限。与已有的不同泵浦光源下的染料激光器调谐范围相比较: 准连续泵浦下的染料激光器的调谐范围介于连续泵浦 (Rh6G: 560~630 nm) 与脉冲 YAG 倍频光泵浦 (Rh6G: 545~580 nm) 之间。

表 1 实验结果数据表

选频方式 \ 项目	染料	输出线宽 (nm)	调谐范围 (nm)	转换效率 (%)	输出镜反射率
B	Rh6G	3	572~598	7	R=90%
	Kiton red	3.5	589~618.5	3.3	R=90%
P	Rh6G	5	554~585	15	R=15%
	Kiton red	5	577.5~610.5	5.7	R=65%
G	Rh6G	0.6	552~581.2	9	等效 R≈15%
	Kiton red	0.4	591~601	2.1	等效 R≈15%
B+G	Rh6G	0.6	552~585	8.5	等效 R≈15%
	Kiton red				
P+G	Rh6G	0.5	552~585	8.7	等效 R≈15%
	Kiton red				

四、泵浦光脉冲持续时间与染料激光器输出线宽的关系

任何一种放置在传统光路中的光学选频元件，当它自身的结构参数和外部光路参数确定后，其带通函数也就随之确定了。但是，若将选频元件放置在激光谐振腔内，激光输出的线宽将不象在传统光路中那样可以由选频元件的带通函数简单地确定。激光谐振腔的振荡阈值、起振过程中的模式竞争、非矩形的激活介质增益曲线与选频元件引入的以选择损耗形式出现的带通函数将是决定激光器输出线宽的主要因素。腔内光束往返通过选频元件不仅直接使远离中心波长的模式损耗大于增益而不能起振，而且由于模式竞争和增益饱和效应，还能使一些起振的模式增益降到阈值以下。腔内光束每往返通过一次选频元件，上述过程就重复一次。其结果是只有中心波长附近的模式得以维持振荡。显然，激光输出的线宽比宽带光束一次通过选频元件后的线宽要窄。在脉冲泵浦情况下，有限的脉冲持续时间使腔内光束只能完成有限次数的往返。往返次数越多，选频元件压

缩线宽的作用就越明显。其结果，即泵浦脉冲持续时间越长，染料激光器输出线宽就越窄。

以 Rh6G 和双折射片调谐为例，我们用多波长速率方程组来描述线宽变化规律。对其它染料和选频元件可以用相应的发射截面参数和带通函数代入。

双折射片的带通函数为：^[2]

$$K(\lambda) = 2b \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{\lambda}$$

其中 α, b 是与双折射片几何尺寸及腔的相对位置有关的参数。对满足 $\frac{\alpha}{\lambda_m} = m\pi$ 的波长 λ_m , $K(\lambda_m) = 0$, 这些波长在激光形成过程中最具竞争力，也即所谓中心波长。由于这些波长与双折射晶体在腔内的几何位置有关，调节其相对位置即可调谐输出波长。另外，为保证在染料的增益线宽内只有一个中心波长，晶体的厚度要满足一定的要求。

考虑到染料介质的均匀加宽四能级工作特性，我们可推出描述染料激光器多波长同时振荡物理模型的速率方程组：

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -\sigma_{32} \cdot v \cdot N \cdot \sum_{\lambda_i} Q(\lambda_i) - n_3 A_{32} + n_4 S_{43} & (1) \\ \frac{dQ(\lambda_i)}{dt} = \sigma_{32} \cdot v \cdot N \cdot Q(\lambda_i) \frac{l}{L} \cdot S - \frac{Q(\lambda_i)}{\tau_R(\lambda_i)} & (2) \\ i=0, 1, \dots, I \end{cases}$$

其中, N 是粒子反转数密度, $Q(\lambda_i)$ 是波长为 λ_i 的腔内光子数密度。 σ_{32} 是染料受激发射截面^[3], v 为介质中光速, n_3 为激光上能级粒子数密度, S_{43} 是无辐射跃迁几率, A_{32} 是激光上能级自发跃迁几率, l 是激活介质厚度, L 是腔长, S 是介质中光束截面与腔内光束平均面积之比。 $\tau_R(\lambda_i)$ 是波长为 λ_i 的光子的光腔寿命。选频元件引入的与 λ_i 有关的损耗以及光子在腔内的其它损耗以和的形式反映在这一项内。总的损耗决定了激光器的振荡阈值; 选择损耗其它损耗, 特别是与由输出镜 M_2 反射率所决定的输出损耗的相对大小决定了选频元件所起作用的大小。这点在前边关于实验结果的讨论中已经提到。在数学模型处理上, 我们认为输出镜反射率对波长是慢变函数, 即在所讨论的波长范围内, 可将其视为常数。实际中使用宽带反射膜可以近似满足这一要求。

(1) 式反映了包括自发辐射和无辐射跃迁在内的反转粒子数 N 随时间的变化。(2) 式反映了多种不同波长的光子模式共享同一部分反转粒子数 N , 但分别对应不同的增益系数(由染料发射截面决定)和损耗(由选频元件的选择损耗决定)时腔内光子数随时间的变化。解该方程组可得到因选择损耗和模式竞争引起的线宽窄于选频元件固有带宽的结论。在进行数值迭代过程中, 可观察到线宽一步步变窄和远离中心波长模式的光子数逐步减少的过程。当 I 取较大值甚至趋于无穷大时, 可得到较精确的计算结果。我们在用计算机解上述方程组时, 为兼顾计算速度及计算结果的可用性, 取 $I=10$ 。

方程(1)、(2)中的系数 σ_{32} 、 A_{32} 、 S_{43} 可以

从文献[3]中查得(对 Rh6G 染料), l 、 L 、 S 可根据具体的实验装置的几何尺寸加以确定,

$$\tau_R(\lambda_i) = \frac{L}{C} \cdot \frac{1}{u + K(\lambda_i)},$$

其中 u 为非选择性损耗, 选择损耗 $K(\lambda_i)$ 采用双折射片的带通函数, 其具体数值 a 、 b 可由其几何位置和尺寸确定。

$$N = n_3 - \frac{g_3}{g_2} n_2 \approx n_3,$$

故可近似认为 $n_3 A_{32} \approx N A_{32}$, 泵浦项

$$n_4 S_{43} \approx \eta \cdot \frac{P_0}{\nu_{SHG}} f(t),$$

P_0 为泵浦光峰功率, ν_{SHG} 为泵浦光频率, η 为泵浦效率, $f(t)$ 选用尽量接近于实际的截断归一化的高斯型泵浦函数。

经过参数选取和方程归一化后, 得到如下形式的方程组:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} = & -4.4 \cdot n \cdot \sum_{i=0}^{10} (5 \times q_i) - 0.2n \\ & + 2.5 \cdot \eta \cdot f(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dq_i}{dt} = & 2.2 \cdot n \cdot q_i - \frac{4}{3} \left(0.1 + \sin^2 \frac{3500000}{\lambda_i} \right) \\ & \times q_i \end{aligned} \quad (4)$$

$$\lambda_i = 5840 + 5i \quad (5)$$

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{\exp\left[-\left(\frac{t-\tau}{\tau}\right)^2\right] - e^{-1}}{\int_0^{2\tau} \left\{ \exp\left[-\left(\frac{t-\tau}{\tau}\right)^2\right] - e^{-1} \right\} dt} & 0 \leq t \leq 2\tau \\ 0 & t > 2\tau \end{cases} \quad (6)$$

$$i=0, 1, 2, \dots, 10.$$

图 4~7 为部分理论计算结果与实验曲线。

实际上, 我们是通过改变 YAG 倍频激光器电流强度或声光 Q 开关的重复率来改变泵浦脉冲宽度的, 在不同电流或不同重复率下, 我们可以使脉冲宽度在 100 ns 到 250 ns 之间变化。其规律是在一定范围内, 氩灯电流越强或重复率越低, 其输出脉冲宽度越窄。

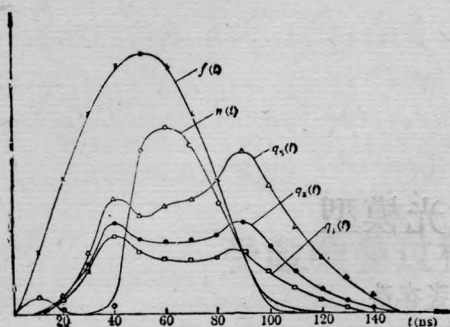


图4 粒子反转数、光子数和泵浦强度的时序关系(理论计算结果)



图5 泵浦脉冲与染料激光脉冲的时序关系
(实验结果, 上面为YAG激光脉冲, 下面为染料激光脉冲)

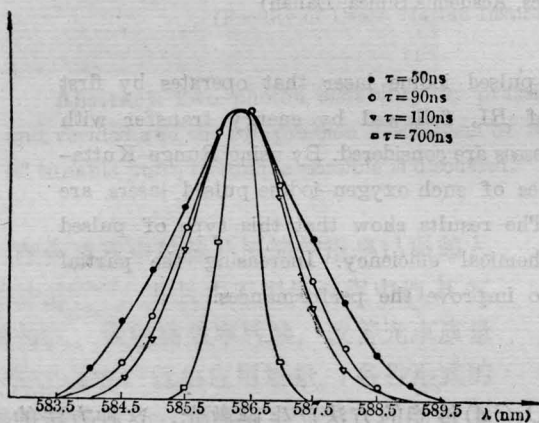


图6 不同泵浦脉宽时的染料激光光谱
(理论计算结果)

事实上, 泵浦脉冲幅值的大小也会影响染料激光器输出的线宽。为此我们用相同脉冲宽度不同幅值的泵浦光源分别代入上述速率方程组中进行数学模拟和实验观察(通过

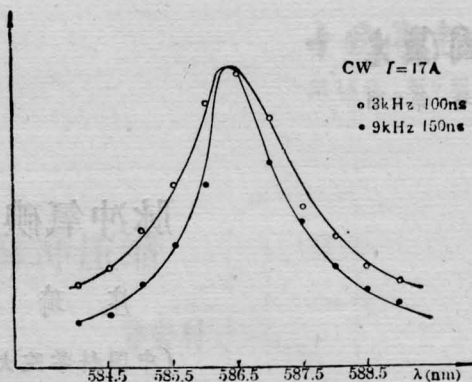


图7 不同调Q重复频率下的染料激光光谱(实验结果)

同时改变电流强度和脉冲重复率可使YAG倍频输出脉冲在一定范围内维持脉宽不变, 只改变幅度), 发现在所感兴趣的有限范围内, 由于泵浦幅度变化引起的染料激光器输出线宽的变化很小, 完全可以从实验数据中删除这一因素的影响。

计算波形和示波器拍摄波形中的双峰结构明显可见(见图4、5)。输出线宽的测量值与计算规律符合得较好。

综上所述, 准连续激光器作为介于连续和脉冲泵浦源之间的一类新的染料激光器泵浦光源, 有其特有的一些规律。在某些应用场合, 这种光源可以由其比脉冲光源高的重复频率和比连续激光器高的峰值功率而受到重视。我们希望本文能为这类激光器的设计和使用者提供有益的参考。

参 考 文 献

- [1] 姚建铨等;《中国激光》,1986, 13, No. 1, 48.
- [2] Gary Holton; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974, **QE-8**, No. 8, 577.
- [3] F. P. Schafer (Editor); "Dye Lasers", Springer Verlag, Berlin, 1978.
- [4] 景春阳等;《中国激光》,1985, 12, No. 7, 398.
- [5] A. N. Zherikin et al.; *Sov. J. Quant. Electr.*, 1981, 11, No. 6, 806.