

声光-染料双调 Q 激光器的理论与实验研究

张小洁* 杨 杰 韩汝聪 姚建铨

(天津大学精仪系, 300072)

提要: 本文利用声光调 Q 和染料调 Q 各自的特点, 提出了声光-染料双调 Q 理论。文中对双调 Q 激光器的输出特性随激光器各参量的变化关系进行了研究, 为实现在合理的参数选择下的最佳输出提供了可靠的理论依据, 并给出了与理论相符的实验结果。

关键词: 声光-染料调 Q

Acousto-optic-dye double Q-switched laser: theory and experiments

Zhang Xiaojie, Yang Jie, Han Rucong, Yao Jianquan

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin)

Abstract: Based on respective features of acoustooptic Q-switching and dye Q-switching, the theory of acoustooptic-dye double Q-switching (ADDQS) is first reported in this paper. We studied the characteristics of ADDQS laser output and provided a dependable theoretical basis for realizing the optimum laser output by means of reasonable selection of the laser parameters. The experimental results coincide with the theory.

Key words: acoustooptic-dye double Q-switching

声光调 Q 和染料调 Q 已经是很成熟的调 Q 技术了^[1]。基于声光调 Q 可实现高频调 Q 光脉冲输出, 而染料调 Q 可实现窄脉宽调 Q 光脉冲输出的特性, 我们提出了声光-染料双调 Q 理论, 综合利用声光器件和染料分别调 Q 时各自的优点, 等效地缩短单声光调 Q 的开关时间, 加速开关打开时系统损耗的变化率, 以获得高重复率、窄脉宽的双调 Q 脉冲输出。

一、双调 Q 系统的动力学方程

在双调 Q 理论研究中, 为了使理论研究更接近于实际情况, 我们考虑了声光器件开关时间的影响和激活介质下能级寿命^[2]对调 Q 脉冲输出特性的影响, 由此导出了如下描述实际四能级系统声光-染料双调 Q 脉冲动力学过程的速率方程:

收稿日期: 1990年12月3日; 修改稿收到日期: 1991年1月29日。

*现在北京大学物理系国家重点实验室 100871。

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt'} = n_a\varphi + \frac{\mu_a\sigma_s l_s N_{s0}}{\mu_s\sigma_a l_a N_{a0} n_{a1}} n_s\varphi - \left(1 + \frac{\delta_a(t')}{\delta_p}\right)\varphi \\ \frac{dn_a}{dt'} = -2n_a\varphi + \frac{\tau'_R}{\tau_{a1}} n_{a1} \\ \frac{dn_{a1}}{dt'} = n_a\varphi - \frac{\tau'_R}{\tau_{a1}} n_{a1} \\ \frac{dn_s}{dt'} = -2\frac{\mu_a\sigma_s l_s}{\mu_s\sigma_a l_a} n_s\varphi - \frac{(1+n_s)\tau'_R}{\tau_{s2}} \end{cases} \quad (1)$$

其中 φ , n_a , n_{a1} , n_s 和 t' 分别为无量纲化的腔内光子数密度、激活介质反转粒子数密度及下能级粒子数密度、染料的反转粒子数密度和时间; μ 为折射率; σ 为吸收截面; l 为材料长度; N_0 为材料密度(浓度); τ 为能级寿命, 其中以 a 为脚标的参量相应材料为激活介质, 以 s 为脚标的参量相应材料为染料介质, 脚标 1 代表下能级, 脚标 2 代表上能级; δ_p 为声光衍射损耗为零时谐振腔各种损耗的总合; τ'_R 为此时的腔内光子寿命; $\delta_a(t')$ 为谐振腔内的声光开关损耗函数, 且有

$$\delta_a(t') = \begin{cases} \delta_a e^{-(t'/t_s)^2} & (t' > 0) \\ \delta_a & (t' \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

在此 δ_a 为声光器件的衍射损耗, 它与所加的声功率大小有关, t_s 定义为声光开关的关断时间。

在上述方程中, 染料的饱和吸收是按二能级系统考虑的, 而且染料分子的粒子数反转方程中计入了弛豫时间的影响。

利用方程组(1)在 $t'=0$ 时的初值条件, 可得系统在高阈值时所对应的最大无量纲化的初始反转粒子数密度 n_{a1H} (以下不加说明均指无量纲化的, 其它量同) 所满足的关系:

$$n_{a1H} - 1 - \frac{\delta_a}{\delta_p} = \frac{\mu_a\sigma_s l_s N_{s0}}{\mu_s\sigma_a l_a N_{a0} n_{a1}} \quad (3)$$

由此可将(1)简化为

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt'} = n_a\varphi + \left(n_{a1H} - 1 - \frac{\delta_a}{\delta_p}\right)n_s\varphi - \left(1 + \frac{\delta_a(t')}{\delta_p}\right)\varphi \\ \frac{dn_a}{dt'} = -2n_a\varphi + \frac{\tau'_R}{\tau_{a1}} n_{a1} \\ \frac{dn_{a1}}{dt'} = n_a\varphi - \frac{\tau'_R}{\tau_{a1}} n_{a1} \\ \frac{dn_s}{dt'} = -2\sigma_s n_s\varphi - \frac{(1+n_s)\tau'_R}{\tau_{s2}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\sigma_s = \frac{\mu_a l_s \sigma_s}{\mu_s l_a \sigma_a}$ 。方程组(4)即为描述实际四能级系统声光-染料双调 Q 脉冲动力学特性的方程组。

由(4)可以看出, 双调 Q 系统的阈值反转粒子数密度是随时间变化的函数, 且由式

$$n_{a1}(t') = 1 - \left(n_{a1H} - 1 - \frac{\delta_a}{\delta_p}\right)n_s(t') + \frac{\delta_a}{\delta_p} e^{-(t'/t_s)^2} \quad (5)$$

决定。只有满足 $n_a(t') = n_{a1}(t') = n_{a1}$ 时, 双调 Q 脉冲在腔内的 φ 才达到峰值 φ_m , 此时的 $t' = t_m$ 为脉冲延迟时间。

Q 开关开启时刻腔内 φ 增加的条件为

$$\sigma_e > \frac{n_{ai}}{n_{aiH} - 1 - \frac{\delta_a}{\delta_p}} \tag{6}$$

其中 $n_{ai} = n_a|_{t=0}$ 。所以，双调 Q 时应在此条件限制下合理地选择染料参数。

二、双调 Q 系统动力学方程的解

为了解双调 Q 脉冲特性，在不同的激光器各参数下对描述双调 Q 脉冲动力学特性的方程组(4)进行数值求解，从而获得描述双调 Q 脉冲特性的参数 φ_m ， Δt 和 t_m 随激光器各参数的变化关系。从中选出激光器运转的最佳参数条件。

求解过程中采用如下定值参数： $\mu_a = 1.82$ ， $l_a = 10 \text{ cm}$ ， $\sigma_e = 8.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ， $N_{a0} = 1.38 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ， $\tau_{a1} = 50 \text{ ns}$ ， $\delta_p = 0.134$ ， $\sigma_s = 2.6 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ， $\tau_{s2} = 9 \text{ ps}^{[8]}$ 。

2.1 染料浓度变化的影响

在腔长一定，泵浦条件(即 n_{ai})一定，以及声光器件所加的声功率(即 δ_a)和染料厚度 l_s 一定时，不同声光开关时间 t_s ，染料浓度 N_{s0} 变化对巨脉冲特性的影响很大，图 1 给出了 Δt 的变化特性。

由图可知： t_s 是有决定性影响的参数，而且并不是所有单声光调 Q 脉冲宽度(图中 $N_{s0} = 0$ 所对应的 Δt)都能用双调 Q 方法进一步压窄的。只有 t_s 足够长时才存在一浓度范围，在此范围内双调 Q 脉冲宽度小于单声光调 Q 时的脉冲宽度，并有一最佳浓度 N_{s0b} ，达到最大的脉宽压缩幅度。 t_s 越大，双调 Q 方法的压脉宽效果越明显， N_{s0b} 也越大。

理论计算结果表明：在有压缩效应的情况下，不仅 N_{s0b} 处的 Δt 比单声光调 Q 时窄， φ_m 也比单声光调 Q 时大；反之 φ_m 将随 N_{s0} 的增大而快速降低。另外， t_m 在不同的 t_s 情况下随 N_{s0} 的变化规律基本相同，在 N_{s0} 增加时， t_m 均变长，只有单声光调 Q 时的 t_m 最短。

从物理上讲，双调 Q 输出脉冲特性由声光损耗和染料吸收损耗特性共同决定。在此其具体表现为系统与 $n_{ai}(t)$ 成正比的总体损耗的变化率(记为 A)随 N_{s0} 变化，只有达到 N_{s0b} 时 A 才有最大值，相应的输出脉冲才有最小的 Δt ，最大的 φ_m 。 t_s 越长，达到 A 最大所需的 N_{s0} 越大，而由于此时 A 本身的变化率大，脉宽压缩也就越明显。

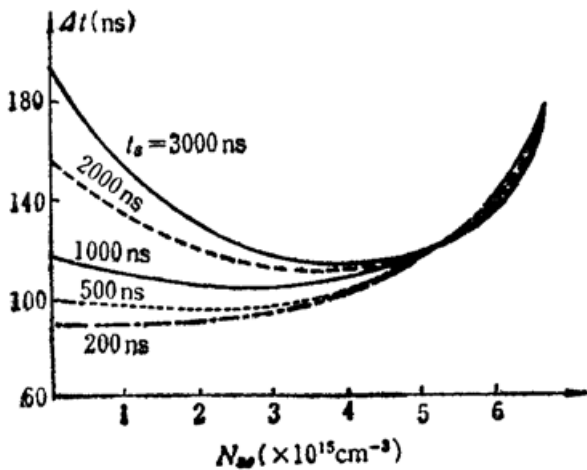


Fig.1 The relationship of $\Delta t \sim N_{s0}$ at different t_s

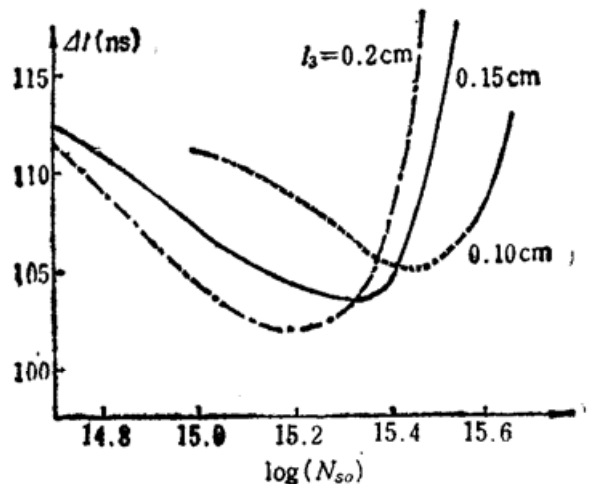


Fig.2 The relationship of $\Delta t \sim N_{s0}$ at different l_s

由上述理论分析和计算可以看出，用声光-染料双调 Q 方法不仅可以获得与单声光调 Q 同样的高重复频率的光脉冲输出，而且在一定的 t_s 范围内脉冲宽度可以比单声光调 Q 时更窄，但其所能压到的最窄脉宽并不以染料单独调 Q 时所能获得的 10~30ns 为极限，尤其是 t_s 大时。

2.2 染料厚度的影响

在与上述计算同样的参数及泵浦条件下, $t_s=1000\text{ ns}$ 时, 不同 l_s , 双调 Q 脉冲 Δt 随 N_{so} 的变化特性如图 2 所示。

结果表明: 只改变 l_s , 系统输出特性随 N_{so} 的变化规律不变, 只是随 l_s 的增加 N_{sob} 向小的方向移动, 而且其所对应的 Δt 略有减小, 相应的 φ_m 增加, t_m 加长。

在同一 N_{so} 下改变 l_s 与在同一 l_s 下改变 N_{so} 的效果是相同的, 都是改变了参与调 Q 作用的染料分子总数。而组成双调 Q 系统总体损耗的染料吸收损耗部分正是由染料分子总数决定, 它只在 l_s 一定时才取决于 N_{so} , 这就导致了图 2 中 l_s 增加 N_{sob} 减小的结果。

l_s 的变化似乎不应导致 N_{sob} 所对应的 Δt 的变化, 但图 2 的理论计算结果并非如此, 这是由于 l_s 增加时, 虽然最佳调 Q 时染料分子总数没变, 但其小信号透过率 $T_0(\propto e^{-\alpha_0 l_s})$ 减小了, 从而导致饱和吸收后的染料透过率 T_{st} 变小 ($T_{st}=T_0^{1/(1+\alpha_0 l_s)}$)^[4], 腔内损耗增加。因此, Δt 也会变小, φ_m 相应地便有所增加。所以, 在条件允许的情况下, 适当增加 l_s 可以获得相对较窄的双调 Q 脉冲。

2.3 泵浦强度的影响

固定 $l_s (=0.1\text{ cm})$, 在 $t_s=1000\text{ ns}$ 时, 其它参量同前, 改变泵浦强度(以初始粒子数反转比 n_{at}/n_{t0} 量度, n_{t0} 为静态阈值反转粒子数密度), 对双调 Q 脉冲特性随 N_{so} 的变化进行研究, $\Delta t \sim N_{so}$ 关系示于图 3。

可见, 随泵浦强度的增加, N_{sob} 增大, 其相应的 Δt 变小。这是因为随泵浦的加强, φ 增加变快, 染料漂白时间变短, 如果此时 N_{so} 不相应增加, 染料的损耗减小很快, 声光的慢开关时间将起主要作用, 系统的开关特性便不能很好地被改善, 增加 N_{so} , 使总体损耗特性决定的等效开关速度加快, 于是便可获得在更高的泵浦强度下更大的 N_{sob} 时的最佳双调 Q 脉冲输出。

2.4 声光开关衍射效率的影响

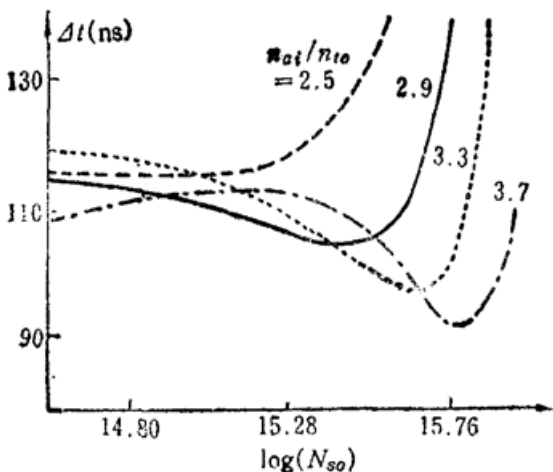


Fig.3 The relationship of $\Delta t \sim N_{so}$ at different n_{at}/n_{t0}

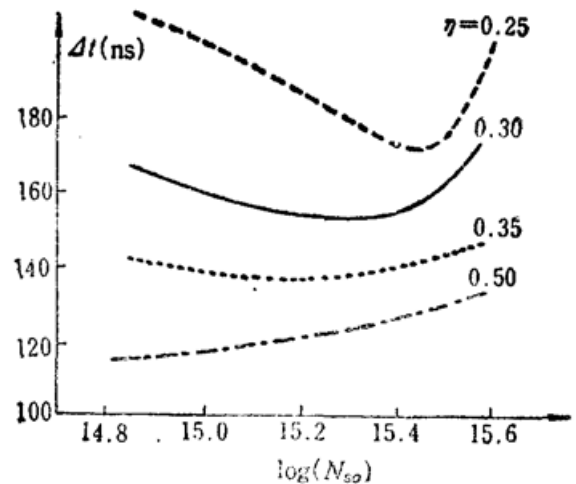


Fig.4 The relationship of $\Delta t \sim N_{so}$ at different η

声光开关衍射效率 η (具体表现为声光衍射损耗 δ_a) 与其所加的声功率大小有关。 $t_s = 1000 \text{ ns}$, 不同 η 值时双调 Q 脉冲宽度 Δt 随 N_{so} 的变化关系如图 4 所示。

理论结果表明: 对一定的 N_{so} , 声功率越大, η 越高, Δt 越小; φ_m 越大, t_m 越长。这与单声光调 Q 时的结论是相同的。 N_{so} 变时, 只能对 η 小的单声光调 Q 脉冲有脉宽压缩效果, 而且 η 越小, 压脉宽效果越明显, 相应的 N_{sob} 越大。这些结果的物理解释也同样可用 δ_a 对系统总体损耗特性的影响来说明。

三、声光-染料双调 Q 实验及其结果

为验证上述理论及结果所安排的声光-染料双调 Q 实验装置如图 5。图中, 1、2 分别为 $1.06 \mu\text{m}$ 全反镜和输出镜; 3 为染料喷嘴及调节系统; 4 为染料循环系统; 5 为声光调制器; 6 为声功率源; 7 为声光调制器水冷系统; 8 为 Nd:YAG 聚光腔; 9 为连续激光器电源; 10 为水压开关; 11 为腔、棒、灯水冷系统; 12 为分光器; 13 为 PIN 硅光电二极管; 14 为示波器; 15 为斩波器; 16 为功率计探头; 17 为功率计水冷系统; 18 为功率计。

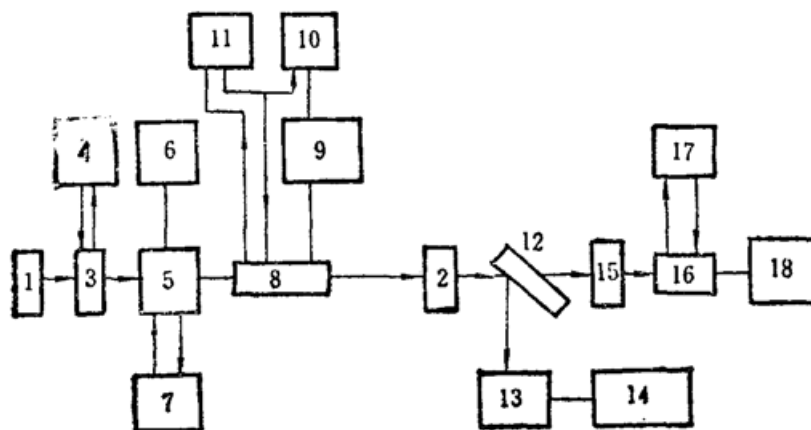


Fig.5 Experimental set-up for ADDQS system

实验中的声光系统开关时间约 1270 ns , 染料采用喷膜循环方式, 喷嘴可实现染料喷膜宽度(最宽处)约 5 mm , 厚(最薄处)约 0.5 mm 。为了使喷膜有好的质量, 除适当选取染料流速外, 染料溶液采用五甲川加乙二醇的配制方式。

实验结果表明, 在低泵浦功率和稀的染料溶液浓度下, 系统输出不稳定, 随泵浦加强, 染料浓度加大, 不仅脉宽比腔内不加染料系统的单调 Q 时有越来越明显的压缩效果, 脉冲输出的稳定性也越来越好, 而且喷膜的位置对脉宽压缩效果及脉冲输出的稳定性有非常大的影响。

在我们的实验条件下, 用 20 A 泵浦电流时得到了 1 kHz 重复频率下 60 ns 脉宽的最窄的双调 Q 脉冲输出, 而且稳定性很好, 此时声光功率(以电压值给出) $P_{ao} = 14 \text{ V}$, 染料浓度的最佳值 $N_{sob} = 3.54 \times 10^{14} (\text{cm}^{-3})$ 。当重复频率升高时, 无论是单声光调 Q 还是双调 Q, 输出脉冲宽度均增加, 而幅度也很快变小。图 6 给出泵浦电流 20 A , 重复频率 f 不同时的一组实验曲线, 可见 P_{ao} 越大, Δt 越小, 而且在 N_{sob} 最佳染料浓度下 P_{ao} 越小, 脉宽压缩幅度越明显, 这与前面的理论结果相吻合。

定义脉宽压缩幅度 $\Delta \tau = \Delta t_{AO} - \Delta t_{AD}$ 为单声光调 Q 脉冲宽度与双调 Q 脉冲宽度之差; 脉

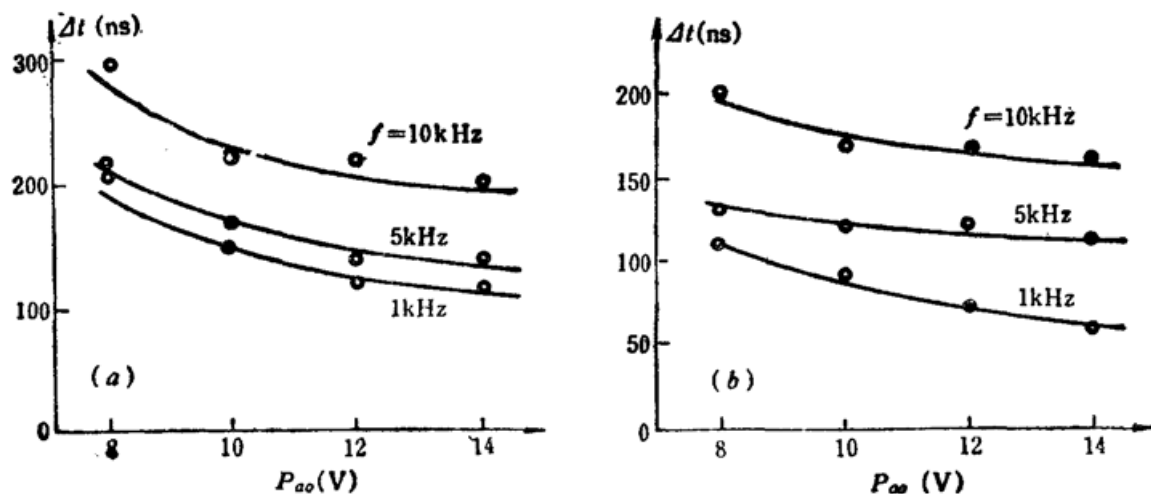


Fig.6 Experimental curves of $\Delta t \sim P_{ao}$ relationship

(a) AO Q-switching; (b) ADD Q-switching

宽压缩比 $\eta = \Delta\tau / \Delta t_{AO}$ 为脉宽压缩幅度与单声光调 Q 脉冲宽度之比。从实验结果可知，最大脉宽压缩比为 50%。

实验研究结果还表明，只要系统的染料浓度达到最佳值，不仅脉冲输出很稳定，脉冲峰值功率也比单声光调 Q 时的峰值功率略有增大；而且一旦系统达到最佳双调 Q 输出效果，染料浓度在较大的范围内变化时，双调 Q 脉冲输出特性不再有明显的变化，即 N_{\dots} 是有一定宽度范围的，并非是一个点。这些与理论计算结果也是一致的。

参 考 文 献

- 1 Walter Koehner, *Solid State Laser Engineering*, Springer-Verlag, 1976
- 2 P. C. Magnante, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-8, 444 (1972)
- 3 邱佩华, B. 可潘斯基, *物理学报*, 31, 243 (1982)
- 4 M. Hercher, *Appl. Opt.*, 6, 947 (1967)