

声光调 Q CO₂ 激光器的动力学模型

潘其坤^{1,2} 谢冀江¹ 阮鹏^{1,2} 张来明¹ 李殿军¹ 郭劲¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 利用六温度模型理论对声光调 Q CO₂ 激光器的动力学过程进行了理论分析, 并与速率方程理论计算的结果进行了比较, 证明这两种理论在激光输出性能方面的计算结果基本一致。六温度模型理论模拟的脉冲激光波形有明显的拖尾, 与实验结果更相符, 且更全面地解释了激光器工作气体中不同分子能级间的能量转移过程。利用六温度模型模拟了输出功率作为输出镜透射率的函数曲线, 得到了最佳输出镜透射率参数, 其结果与实验相符。实验表明, 输出窗口的透射率对激光输出性能影响明显, 可通过优化输出镜透射率来改善激光器的输出性能。实验中获得的激光脉冲宽度为 160 ns, 峰值功率为 4750 W。

关键词 激光器; CO₂ 激光器; 声光调 Q; 六温度模型; 速率方程

中图分类号 TN248.2⁺2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702002

Dynamical Model of Acousto-Optically Q-Switched CO₂ Laser

Pan Qikun^{1,2} Xie Jijiang¹ Ruan Peng^{1,2} Zhang Laiming¹ Li Dianjun¹ Guo Jin¹

¹ State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Six-temperature model was used to simulate the theoretical process of dynamical emission in an acousto-optically (AO) Q-switched CO₂ laser. Then the result of the simulation is compared with the numerical calculation results by Q-switched pulsed laser rate equations. The numerical calculation results of the two theories are consistent on laser output performance. However, the tail phenomenon is different between numerical calculation results of the six-temperature model theory and rate equations theory. The former is more in agreement with the experimental results. Therefore the theory of six-temperature model more perfectly explained the process of energy transfer between the different molecular energy levels in the laser gain medium. By using the six-temperature model theory, the CO₂ pulse laser output performance as a function of the output mirror transmittance is simulated, and the optimum output mirror transmittance is obtained which is consistent with the experimental results. The theoretical analysis and experimental results show that the output mirror transmittance can influence the laser output performance. Therefore the output performance of the AO Q-switched CO₂ laser can be improved by optimizing the transmittance of output mirror. The measured peak power of this device is 4750 W and the pulsed width is 160 ns.

Key words lasers; CO₂ laser; acousto-optically Q-switched; six-temperature model; rate equations

OCIS codes 140.3460; 140.3470; 140.3540; 140.3430

1 引言

小型窄脉冲、高重复频率 CO₂ 激光器在诸如激

光测距、环境探测、激光强化、激光医疗等领域具有广泛的应用需求^[1~3]。该类激光器通常采用电光调

收稿日期: 2011-03-01; **收到修改稿日期**: 2011-03-22

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM0902-01)和吉林省科技厅科技支撑计划(20090358)资助课题。

作者简介: 潘其坤(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事 CO₂ 激光器及其应用技术等方面的研究。

E-mail: panqikun2005@163.com

导师简介: 谢冀江(1959—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事激光器及其应用技术等方面的研究。

E-mail: Laserxjj@163.com(通信联系人)

$Q^{[4]}$ 和机械调 $Q^{[5]}$ 的方法实现脉冲运转,其理论和技术相对成熟,但对于利用声光调 Q 的方法实现此类激光器脉冲运转的研究报道还相对较少。我们此前利用谐振腔内插入声光调制器(AOM)的方法实现小型 CO_2 激光器窄脉冲、高重复频率运转的实验结果,证实了此技术方案的可行性,并利用调 Q CO_2 激光器速率方程进行了理论分析和计算,解释了此激光器脉冲运转的动力学过程 $^{[6]}$ 。但该理论只能对此激光器脉冲激光建立的时间和脉冲宽度给出较为准确的分析结果,而对于激光脉冲波形的细节,特别是通常存在的激光脉冲波形拖尾现象,无法给出理论上的解释。本文将介绍利用 CO_2 激光器的六温度模型理论 $^{[7,8]}$ 对该激光器的动力学过程进行分析的方法,同时对上述两种理论的分析结果进行比较。还介绍了声光调 Q CO_2 激光器输出镜透射率参数对激光输出性能影响的实验研究结果。在放电增益区长度、工作气体比例和气压、全反射镜曲率半径等参数不变的情况下,得到的最佳透射率为39%。此工作可为该类激光器的进一步研究和设计提供参考。

2 声光调 Q CO_2 激光器的六温度模型 在 CO_2 激光器动力学的五温度模型理论 $^{[9]}$ 基

础上,人们考虑了 CO_2 分子的分解对激光输出的影响,把 CO 分子等效振动温度作为模型微分方程组的一个变量,此时微分方程组具有6个温度变量,因此称为六温度模型理论。

如图1所示,在考虑了这些分子的碰撞激发过程、分子间碰撞时发生的各种能量转移过程,以及受激发射和自发辐射过程的基础上,可得到一组描述各振动模的振动能量变化的方程 $^{[7,8,10]}$

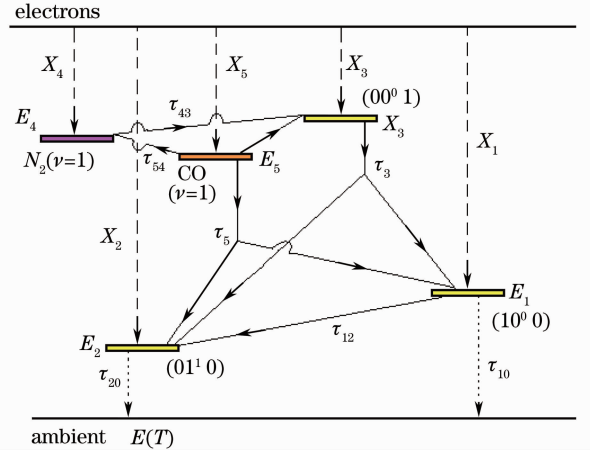


图1 N_2-CO_2-CO 系统能级图

Fig. 1 Schematic energy-level diagram for N_2-CO_2-CO system

$$\frac{dE_1}{dt} = n_e(t)fn_{CO_2}X_1h\nu_1 - \frac{E_1 - E_1(T)}{\tau_{10}(T)} - \frac{E_1 - E_1(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} + \frac{h\nu_1}{h\nu_3} \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \frac{h\nu_1}{h\nu_5} \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} + h\nu_1 \Delta NWI_{v_0}, \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = n_e(t)fn_{CO_2}X_2h\nu_2 + \frac{h\nu_2}{h\nu_3} \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \frac{E_1 - E_1(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} - \frac{E_2 - E_2(T)}{\tau_{20}(T)} + \frac{h\nu_2}{h\nu_5} \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)}, \quad (2)$$

$$\frac{dE_3}{dt} = n_e(t)fn_{CO_2}X_3h\nu_3 + \frac{E_4 - E_4(T_3)}{\tau_{43}(T)} - \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \frac{h\nu_3}{h\nu_5} \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)} - h\nu_3 \Delta NWI_{v_0}, \quad (3)$$

$$\frac{dE_4}{dt} = n_e(t)fn_{N_2}X_4h\nu_4 - \frac{E_4 - E_4(T_3)}{\tau_{43}(T)} + \frac{h\nu_4}{h\nu_5} \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)}, \quad (4)$$

$$\frac{dE_5}{dt} = n_e(t)(1-f)n_{CO_2}X_5h\nu_5 - \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)} - \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} - \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)}, \quad (5)$$

式中 n_{CO_2} 和 n_{N_2} 分别为 CO_2 和 N_2 的浓度, $n_e(t)$ 为单位体积内电子密度。 T_1 为 CO_2 分子对称振动模等效振动温度; T_2 为 CO_2 分子变形振动模等效振动温度; T_3 为 CO_2 分子反对称振动模等效振动温度; T_4 为 N_2 分子等效振动温度; T_5 为 CO 分子等效振动温度。(1)~(3)式描述了单位体积内 CO_2 分子3个振动模的总能量随时间的变化,(4)和(5)式分别描述

了 N_2 分子及由 CO_2 分子分解的 CO 分子振动态的总能量随时间的变化, f 为未分解的 CO_2 分子比例。

对于 $CO_2-N_2-He-CO$ 系统,环境温度随时间变化可表示为单位体积的混合气体动能 E 随时间的变化,表示为

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E_1 - E_1(T)}{\tau_{10}(T)} + \frac{E_2 - E_2(T)}{\tau_{20}} +$$

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{h\nu_1}{h\nu_3} - \frac{h\nu_2}{h\nu_3}\right) \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \\ & \left(1 - \frac{h\nu_3}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)} + \\ & \left(1 - \frac{h\nu_1}{h\nu_5} - \frac{h\nu_2}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} + \\ & \left(1 - \frac{h\nu_4}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$E = \left(\frac{5}{2}n_{N_2} + \frac{5}{2}n_{CO} + \frac{3}{2}n_{He} + \frac{5}{2}fn_{CO_2}\right)kT, \quad (7)$$

式中 n_{CO} 为 CO₂ 分子分解的 CO 分子浓度, $n_{CO} = (1-f)n_{CO_2}$ 。

综合受激发射、自发辐射及激光器存在的损耗, 得到激光腔内光强变化速率方程为

$$\frac{dI_{\nu_0}}{dt} = -\frac{I_{\nu_0}}{\tau_c} + ch\nu_0 \left[\frac{\Delta N W I_{\nu_0}}{h} + n_{001} P(J) S \right], \quad (8)$$

式中 c 为光速, h 为普朗克常数, ν_0 为激光频率, J 为振动量子数, τ_c 为腔内光子寿命, 其计算式为

$$\tau_c = -\frac{2L}{c(\ln r_1 + 2\ln r_2)}, \quad (9)$$

式中 r_1 为谐振腔后反射镜反射系数, r_2 为谐振腔输出镜反射系数。(8) 式中 W, S 的计算式分别为

$$W = \frac{\lambda^2 F}{4\pi^2 \nu_0 \Delta\nu_L \tau_{sp}}, \quad (10)$$

$$S = \frac{2\lambda^2}{\pi A \tau_{sp}} \times \frac{\Delta\nu_N}{\Delta\nu_L}, \quad (11)$$

式中 λ 为激光波长, $\Delta\nu_L$ 为碰撞加宽引起的线宽, $\Delta\nu_N$ 为自然加宽引起的线宽, τ_{sp} 为自发辐射寿命, A 为激光束有效截面积, $F = l/L$ 为填充因子。

Q 开关未打开时没有激光输出, 腔内光强近似为 0, 由于抽运使激光上能级粒子数达到最大值, 此时(1)~(5)式应等于 0。(1)~(5)式 5 个微分方程中的 E_1 (单位体积 CO₂ 分子对称振动模的总能量), E_2 (单位体积 CO₂ 分子变形振动模的总能量), E_3 (单位体积 CO₂ 分子反对称振动模的总能量), E_4 (单位体积 N₂ 分子振动态总能量), E_5 (单位体积 CO 分子振动态总能量) 分别由 T_1, T_2, T_3, T_4 和 T_5 所决定。解这 5 个非线性方程组可得出 5 个温度值, 即 T_1, T_2, T_3, T_4 及 T_5 。这 5 个温度值与气体平均温度 T 即为 Q 开关打开时激光器的调 Q 过程的初值。

Q 开关打开后激光上能级粒子数急剧下降, 激光在极短的时间内急剧振荡, 形成巨脉冲输出。此时激光器输出镜透射率为 t , Q 开关 CO₂ 激光器的数学模型由 7 个微分方程描述, 即(1)~(6), (8)式; 其相应的变量为 $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T, I_{\nu_0}$ 。这组微

分方程中包含 6 个温度变量 ($T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T$), 因此可称为六温度模型。

采用 Rung-Kutta 法可以从这 7 个微分方程解出 7 个变量。已知 I_{ν_0} 的值, 即可算出激光输出功率

$$P_{out} = -\frac{A}{2} \ln r_2 \times \frac{1 - r_2 - \alpha}{1 - r_2} \times I(t) \times 10^{-7}, \quad (12)$$

式中 α 为输出镜的等效损耗。

3 理论计算与实验结果对比分析

3.1 六温度模型理论计算结果

用六温度模型对 Q 开关 CO₂ 激光器动力学过程进行计算, 解方程时考虑了激光器调 Q 过程的初值, 运用了激光器的实际测量结果及表 1 中所列出的相关数据^[7,8,10]。在输出镜透射率分别为 18%, 25%, 32%, 39%, 46% 和 53% 时, 基于 Runge-Kutta 法, 运用 Matlab 计算软件进行数值计算, 得出腔内光强度随时间的变化关系, 如图 2 所示。随着输出镜透射率 t 的升高, 腔内光强度逐渐减低。由(12)式可得调 Q CO₂ 激光脉冲波形与输出镜透射率的关系, 如图 3 所示。由此可看出透射率对激光输出

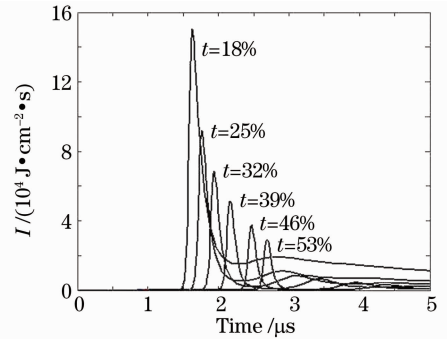


图 2 不同透射率时腔内光强度与时间的关系
Fig. 2 Light intensity in the laser cavity versus time at different transmittances

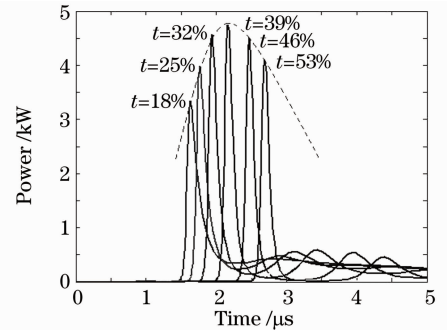


图 3 不同透射率时输出功率与时间的关系
Fig. 3 Output power of the laser versus time at different transmittances

特性影响明显,并且在其他条件不变的情况下,激光器输出峰值功率为输出镜透射率的函数,如图 3 中虚线(峰值功率包迹线)所示。激光脉冲的建立时间随着输出镜透射率的升高而变长,这与激光增益损耗比有关,即透射率越大,增益损耗比越小,激光脉冲的建立时间越长。计算结果显示,激光器输出峰值功率存在最大值,这为优化激光器参数提供了参考。

表 1 求解 Q 开关 CO₂ 激光器动力学方程组所需
相关数据参考值

Table 1 Parameters used for solving the dynamical equations of Q-switched CO₂ laser

Parameter	Numerical value	Parameter	Numerical value
$(\nu_1/c) / \text{cm}^{-1}$	1337	$h / (\text{J} \cdot \text{s})$	6.626×10^{-34}
$(\nu_2/c) / \text{cm}^{-1}$	667	J	18
$(\nu_3/c) / \text{cm}^{-1}$	2349	f	0.2
$(\nu_4/c) / \text{cm}^{-1}$	2330	$B_{\text{CO}_2} / \text{cm}^{-1}$	0.4
$(\nu_5/c) / \text{cm}^{-1}$	2150	$\tau_{\text{sp}} / \text{s}$	0.2
$X_1 / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	5×10^{-9}	$\lambda / \mu\text{m}$	10.6
$X_2 / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	3×10^{-9}	$c / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	2.998×10^{10}
$X_3 / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	8×10^{-9}	$M_{\text{CO}_2} / \text{g}$	7.3×10^{-23}
$X_4 / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2.3×10^{-8}	M_{CO} / g	4.6×10^{-23}
$X_5 / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	3×10^{-8}	$M_{\text{N}_2} / \text{g}$	4.6×10^{-23}
$k / (\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	1.38×10^{-23}	M_{He} / g	6.7×10^{-24}

3.2 实验装置

实验装置如图 4 所示,采用半外腔式直流放电增益区和 ZnSe 输出镜直接输出的方式。放电管由带水冷套的玻璃管制成,管内径 8 mm,放电管增益区长度 800 mm,气压为 3.3 kPa。Xe、CO₂、N₂、He 气体的体积比为 1:2.5:2.5:17.5。全反射镜曲率半径为 3 m,反射率为 98.5%,布儒斯特窗采用 ZnSe 材料,光学谐振腔长度为 1200 mm。实验中将中国电子科技集团公司第 26 研究所研制的 QSGSU-8/Q 型声光调 Q 开关(声光介质为 Ge 单晶体,对 10.6 μm 激光的单程透射率为 90%,采用布

拉格衍射垂直入射方式,中心频率为 40 MHz,通光口径为 6 mm×10 mm)置于输出镜与布儒斯特窗之间,腔内安置一个可变光阑,输出镜为镀膜 ZnSe 平面镜。激光输出后由平面镜反射改变光路,如图 4 所示,接着由分光镜(透射率为 30%的镀膜 ZnSe 平面镜)将激光分为两束,一束由探测器接受,经过放大器放大后由示波器显示激光脉冲波形,另一束由功率计实时监测功率。

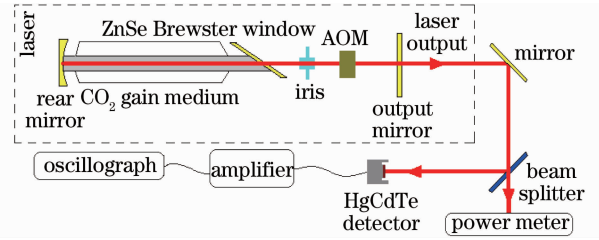


图 4 实验装置简图

Fig. 4 Diagram of experimental device

3.3 实验结果与分析

实验中,在调 Q 工作条件下,脉冲重复频率在 1 Hz~100 kHz 间连续可调,电极两端的电压为 20 kV,注入功率为 160 W。研究了输出镜的透射率对激光脉冲峰值功率的影响,选用的 ZnSe 输出镜的透射率分别为 18%,25%,32%,39%,46%和 53%,孔径均为 30 mm。在脉冲重复频率为 5 kHz 时,对每块输出镜的平均功率及脉宽分别测量 10 次,计算各自的峰值功率,对测量结果取平均值,得到的峰值功率、脉冲宽度与输出镜透射率的拟合曲线如图 5 所示。对比图 3 峰值功率的包迹线可知,实验结果与六温度模型理论相符。输出镜透射率存在一个合适的参数使得激光器输出峰值功率取得最大值。该实验结果证实了六温度模型的正确性。由图 5 可知,输出镜的透射率对声光调 Q CO₂ 激光器的峰值功率影响显著,实验中得到的较好输出镜透射率为 39%。

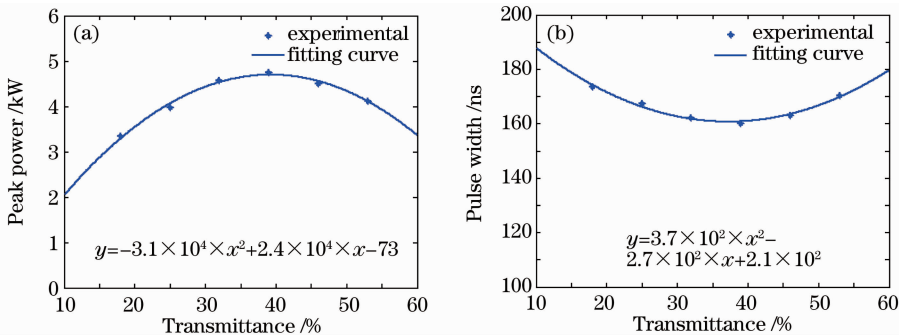


图 5 峰值功率(a)和脉冲宽度(b)与透射率的拟合曲线

Fig. 5 Fitting cure of peak power (a) and pulse width (b) versus transmittance of the output mirror

在脉冲重复频率为 5 kHz 条件下,透射率为 39%时,由荷兰 ZIGO 公司生产的 PVM-10.6 型室温 HgCdTe 探测器测得输出激光脉冲波形,该脉冲信号经过放大器放大后由美国 Tektronix 公司生产的带宽为 500 MHz 的 TDS3052B 型示波器显示激光脉冲波形,显示结果如图 6 所示,通道 1 为激光脉冲波形,通道 2 为 TTL 触发脉冲波形。调 Q 激光

脉冲宽度为 160 ns,声光调 Q 激光脉冲延迟时间为 3 μ s。此时由北京物科光电公司生产的 LP-3C 型激光功率计测得平均激光功率为 1.14 W,则激光器实际输出的平均激光功率为 3.8 W(分光比为 3:7),可计算出激光脉冲峰值功率为 4750 W。考虑声光 Q 开关开启时间,激光脉冲建立时间应该加上 0.85 μ s 的修正值^[6]。此时理论计算结果如图 7 所示。

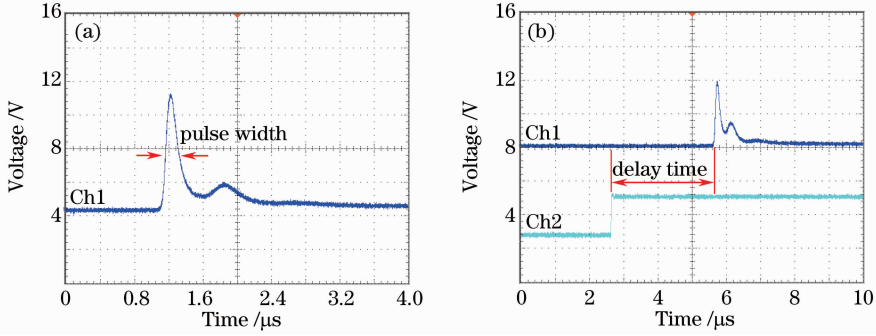


图 6 声光调 Q 激光脉冲波形。(a)脉冲宽度;(b)脉冲建立时间

Fig. 6 Measurement shape of the pulsed laser. (a) Pulse width; (b) delay time

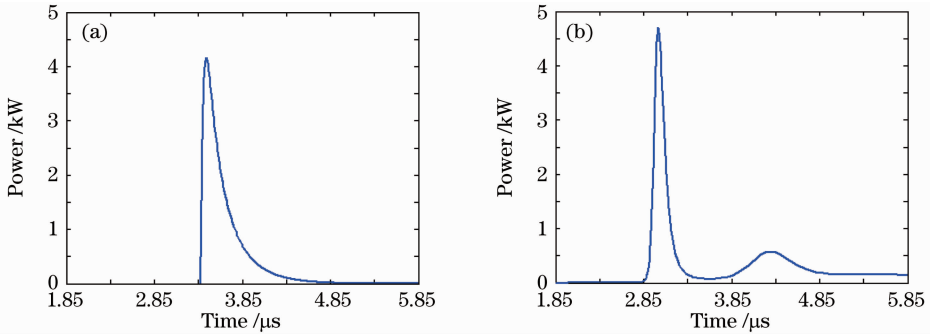


图 7 声光调 Q 脉冲波形理论计算结果。(a)速率方程计算结果;(b)六温度模型计算结果

Fig. 7 Theoretical shape of the pulsed laser. (a) Calculated by rate equations; (b) calculated by six-temperature model

比较图 6 和 7 可知,实验测得脉冲峰值功率、激光脉冲延迟时间、脉冲宽度与速率方程理论及六温度模型理论计算结果相符。六温度模型计算的结果显示出激光脉冲有明显的拖尾,更符合实际测量的激光脉冲波形,而速率方程计算的模型几乎没有拖尾。两种理论计算结果与实验测量结果如表 2 所示。

表 2 速率方程及六温度模型理论与实验结果比较

Table 2 Comparison of theoretical calculations and experimental results

Comparing results	Rate equations	Six-temperature model	Experimental result
Pulse width /ns	200	166	160
Peak power /kW	4.15	4.7	4.75
Pulse delay time / μ s	3.35	2.9	3
Tail phenomenon	Not obvious	Obvious	Obvious

4 结 论

六温度模型理论及速率方程理论均可较好地分析 CO₂ 激光器的声光调 Q 过程,但是六温度模型可以更好地模拟激光脉冲的波形,描述出激光器输出脉冲的拖尾现象。输出镜透射率是影响激光器输出

峰值功率及脉冲宽度的一个重要因素,可以通过优选输出镜透射率参数实现声光调 Q CO₂ 激光器窄脉宽、高重复频率、高峰值功率输出。在实验条件下得到了声光调 Q CO₂ 激光器的峰值功率及脉冲宽度的二次拟合曲线,该拟合曲线与六温度模型的理

论计算结果吻合得很好。六温度模型理论可为该类激光器的优化设计提供参考。

参 考 文 献

- 1 I. Nasrullah, K. Kiichiro, S. Fujio *et al.*. Analysis of heavy metal pollution in soil using transversely excited atmospheric CO₂ laser-induced plasma by trapping the soil in microstructured holes on metal subtargets[J]. *Applied Spectroscopy*, 2007, **61**(12): 1344~1351
- 2 Zhao Haibin, Zhang Xianzeng, Zhan Zhenlin *et al.*. Influence of an applied water film on bone hard tissue ablation with pulsed CO₂ laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0104002
赵海滨, 张先增, 詹振林 等. 组织表面附着水膜层对脉冲 CO₂ 激光骨硬组织消融的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0104002
- 3 Z. Zelinger, M. Strizik, P. Kubat. Dispersion of light and heavy pollutants in urban scale models; CO₂ laser photoacoustic studies[J]. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(4): 430~436
- 4 Zhaoshuo Tian, Qi Wang, Chunhui Wang. Investigation of the pulsed heterodyne of an electro-optically Q-switched radio-frequency-excited CO₂ waveguide laser with two channels[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(18): 3033~3037
- 5 Jiang Yun, Wang Tiejun, Zhang Hongzhi *et al.*. Analysis of kinetics of a mechanical Q-switched CO₂ laser with longitudinal DC discharge[J]. *Journal of Jilin University*, 2008, **46**(1): 115~119
姜 云, 王铁军, 张洪志 等. 直流电纵向激励机械调 Q CO₂ 激光器的动力学分析[J]. *吉林大学学报*, 2008, **46**(1): 115~119
- 6 Xie Jijiang, Pan Qikun, Li Dianjun *et al.*. Theoretical calculation and experimental study of acousto-optically Q-switched CO₂ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202004
谢冀江, 潘其坤, 李殿军 等. 声光调 Q CO₂ 激光器的理论计算和实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202004
- 7 K. Smith, R. M. Thomson. Computer Modeling of Gas Laser [M]. New York: Plenum Press, 1978. 25~27
- 8 M. Soukieh, B. G. Abdul, M. Hammadi. Mathematical modeling of CO₂ TEA laser[J]. *Optics Laser Technology*, 1998, **30**(8): 451~457
- 9 Chen Zongzhu. Luminescence Dynamics of Ionized Gas [M]. Beijing: Science Press, 1996. 212~235
陈宗柱. 电离气体发光动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 212~235
- 10 Wang Qi, Zhao Yongpeng. Laser Kinetics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2008. 167~181
王 骐, 赵永蓬. 激光器动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2008. 167~181