

文章编号: 1001-3806(2019)01-0075-04

同步调制调 Q 射频波导 CO₂ 激光器研究

马芳^{1,2}, 李辉¹, 谭荣清^{1,2*}, 石佳俊^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所先进激光与探测技术部, 北京 100190; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: 为了斩断调 Q 脉冲拖尾, 提高激光器电光效率, 提出了一种在机械调 Q 射频激励波导 CO₂ 激光器中采用同步调制的激励方式。实验研究了同步调制信号对调 Q 脉冲拖尾长度、脉冲宽度、峰值功率和电光效率的影响。结果表明, 当同步调制信号截断时刻为 -80 μs 时, 调制调 Q 脉冲拖尾长度最短, 为 23 μs; 当同步调制信号无激励时长为 800 μs 时, 电光效率最高且为 3%。采用同步调制的激励方式可以在有效斩断脉冲拖尾的同时保持脉冲宽度基本不变, 提高了激光器的峰值功率和电光效率。

关键词: 激光技术; 同步调制; 机械调 Q; 射频 CO₂ 激光器

中图分类号: TN248.2+2 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.01.015

Study on synchronous modulation Q-switched RF excited waveguide CO₂ laser

MA Fang^{1,2}, LI Hui¹, TAN Rongqing^{1,2}, SHI Jiajun^{1,2}

(1. Department of Advanced Laser and Probing Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to cut off the Q-switched pulse trailing and improve the electro-optical efficiency, an exciting mode of synchronous modulation in a mechanical Q-switched radio frequency (RF) excited waveguide CO₂ laser was proposed. The effects of synchronous modulation signal on the tail length of Q-switched pulse, pulse width, peak power and electro-optical efficiency were studied experimentally. The results show that, when the cut-off time of synchronous modulation signal is -80 μs, the tail length of modulation Q-switched pulse is the shortest of 23 μs. The electro-optical efficiency is the highest of 3% when the non-excitation duration of synchronous modulation signal is 800 μs. The excitation mode of synchronous modulation can effectively cut off the pulse tail and keep the pulse width at the same time, and improve the peak power and electro-optical efficiency.

Key words: laser technique; synchronous modulation; mechanical Q-switched; radio frequency excited CO₂ laser

引言

中小功率射频激励 CO₂ 激光器具有结构紧凑、易于快速调制、工作电压低、器件寿命长等优良特性, 在材料加工、医疗外科和激光雷达等领域得到了广泛的应用^[1-2]。近年来高重复频率、短脉冲宽度、高峰值功率脉冲 CO₂ 激光器的需求不断增长^[3-5]。目前国内中小功率射频激励 CO₂ 激光器主要是通过电调制实现脉冲输出, 其脉冲宽度在百微秒量级^[6]、电光效率不

高^[7-8], 在一定程度上限制了射频 CO₂ 激光器的应用。

在射频激励波导 CO₂ 激光器中使用的调 Q 技术主要有电光调 Q、声光调 Q 和机械调 Q。电光调 Q 的特点是调 Q 脉冲重复频率高、脉冲宽度窄^[9], 但电光晶体不易生长且价格昂贵, 增加了制造成本, 并且由于电光晶体损伤阈值低, 电光调 Q 主要用于小功率激光器。声光调 Q 的特点是可以对脉冲激光进行编码^[10], 但声光调 Q 开关的插入损耗大, 导致激光器的效率不高。相较于电光调 Q 和声光调 Q, 机械调 Q 具有脉冲峰值功率高、结构简单、成本低廉等优势^[11]。

根据矩形波导耦合效率理论研究^[12-15], 已在半外腔射频激励波导 CO₂ 激光器中实现了机械调 Q, 获得了高重复频率, 高峰值功率的调 Q 脉冲输出^[16]。为了增大机械调 Q 脉冲的峰值功率, 一般是提高斩波片的

作者简介: 马芳(1992-), 女, 硕士研究生, 现主要从事射频波导 CO₂ 激光器调 Q 的研究。

* 通讯联系人。E-mail: rongqingtan@163.com

收稿日期: 2018-03-15; 收到修改稿日期: 2018-03-28

运动速度以缩短 Q 开关的开启时间,尽可能减小腔内损耗,以保证在 Q 开关开启时间内有较高 Q 值。此种做法虽可产生前沿陡峭、高峰值功率的调 Q 脉冲,但不利于巨脉冲形成后反转粒子数的消耗,使得输出的调 Q 脉冲带有很长的拖尾^[17]。而聚积在脉冲后沿的这部分能量所产生的热效应,在激光探测、加工等应用中是极其不利的,应尽可能消除^[18]。

本文中提出了一种在射频激励波导 CO_2 激光器中将电调制与机械调 Q 结合的同步调制激励方式,通过精确调控激励电源的占空比和截断时刻与调 Q 脉冲之间的关系,可在保持输出脉冲宽度不变的同时,有效地截断脉冲拖尾,提高电光效率和峰值功率。

1 实验装置及同步调制时序控制

实验装置如图 1 所示。半外腔射频波导 CO_2 激光器的波导纵横比 $m = 2$,波导口尺寸为 $1.5\text{mm} \times 3\text{mm}$,放电增益区的长度为 343mm ,其中充入体积混合比为 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{Xe}) = 1:1:2:0.25$ 的混合气体,气压为 13kPa 。平面全反镜置于距离波导口 10mm 处构成半外腔,输出镜采用透过率为 15% 的硒化锌窗口片,获得了 EH_{11} 耦合效率高于 80% 的激光输出。

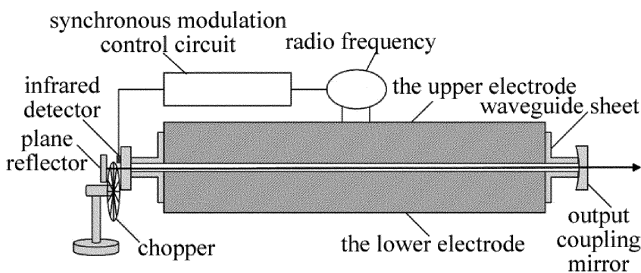


Fig. 1 Schematic diagram of synchronous modulation Q -switched radio frequency excited waveguide CO_2 laser

斩波器为 Thorlabs 公司生产的 MC2000 光学斩波器,电机转速为 100r/s 。斩波片直径为 102mm ,开口宽度为 2mm ,开口数为 10 ,置于距波导口 5mm 处。在波导口处安装红外探测器监测斩波片的运动状态,监测信号输入同步调制控制电路,处理后输入射频电源脉冲调制端口。

使用 Gentec-EO 公司生产的 UP25N-250F-H12 型激光功率计测量输出光平均功率,使用碲镉汞探测器探测输出调 Q 脉冲波形。

同步调制控制电路工作时序如图 2 所示。斩波片运动信号是一列宽度一定的周期矩形脉冲信号,其周期取决于斩波片的开口数及转速,占空比取决于斩波

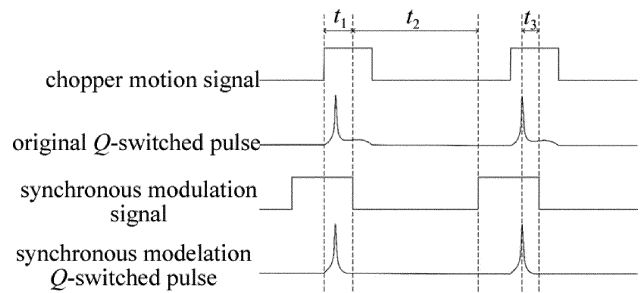


Fig. 2 Sequence diagram of synchronous modulation control circuit

片的直径、开口宽度及开口数。本实验中斩波片运动信号的重复频率为 1kHz ,占空比为 7.5% 。

原始调 Q 脉冲是在一般激励方式下,即射频电源连续激励时产生的调 Q 脉冲序列。由于巨脉冲形成后 Q 开关不能及时关闭,腔内损耗仍然较低,调 Q 脉冲带有较长拖尾。为方便对比不同激励方式下脉冲拖尾的长度,本文将调 Q 脉冲峰值降至 0.1% 时所对应的两个时刻差定义为脉冲拖尾长度 τ_2 。

同步调制信号是控制射频激励源的周期矩形脉冲信号。其下降沿由斩波片运动信号上升沿触发,延迟时间为 t_1 。在 t_2 时长的低电平 (0V) 状态后返回高电平 (5V) 状态直到斩波片运动信号上升沿再次触发。由于射频激励源在同步调制信号为低电平期间无电功率输出,因此将低电平时长 t_2 定义为无激励时长,并定义同步调制信号的下降沿与原始调 Q 脉冲峰值两时刻差 t_3 为截断时刻,当同步调制信号的下降沿晚于原始调 Q 脉冲峰值时刻 t_3 为正值,反之则为负。

通过调整电路可实现同步调制信号占空比不变的同时截断时刻由负到正的连续变化,以及截断时刻不变的同时占空比的连续变化。

2 实验结果及分析

图 3 所示是一般激励方式下以及截断时刻 t_3 为 $-50\mu\text{s}$, $0\mu\text{s}$, $48\mu\text{s}$ 时输出的调 Q 脉冲波形。图 3a 所示为一般激励方式下输出的重复频率为 1kHz 的调 Q 脉冲,脉冲宽度为 380ns ,拖尾长度为 $54\mu\text{s}$;图 3b 所示为当截断时刻 $t_3 = -50\mu\text{s}$ 时输出的调制调 Q 脉冲,脉冲宽度为 290ns ,拖尾长度为 $30\mu\text{s}$;图 3c 所示为当截断时刻 $t_3 = 0\mu\text{s}$ 时输出的调制调 Q 脉冲,脉冲宽度为 320ns ,拖尾长度为 $44\mu\text{s}$;图 3d 所示为当截断时刻 $t_3 = 48\mu\text{s}$ 时输出的调制调 Q 脉冲,脉冲宽度为 250ns ,拖尾长度为 $48\mu\text{s}$ 。为进一步研究同步调制信号的控制参数,即截断时刻和无激励时长对调制调 Q 脉冲的脉冲宽度、拖尾长度、峰值功率等特性的影响,测量了在无激励时长 $t_2 = 600\mu\text{s}$ 时拖尾长度、脉冲宽度、峰值功率

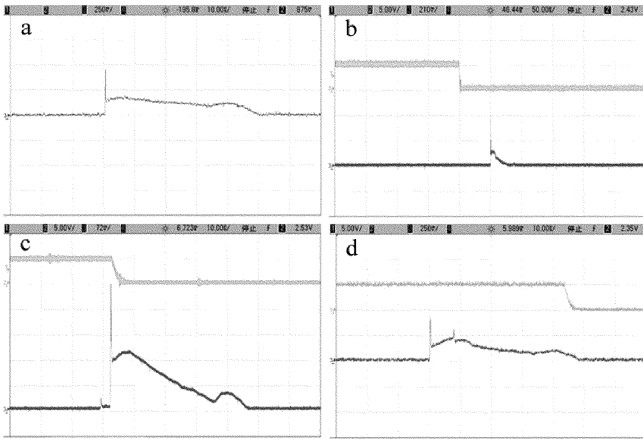


Fig. 3 Pulse waveform with different excitation modes
 a—normal mode b— $t_3 = -50\mu\text{s}$ c— $t_3 = 0\mu\text{s}$ d— $t_3 = 48\mu\text{s}$

与截断时刻的关系,如图 4 ~ 图 6 所示。

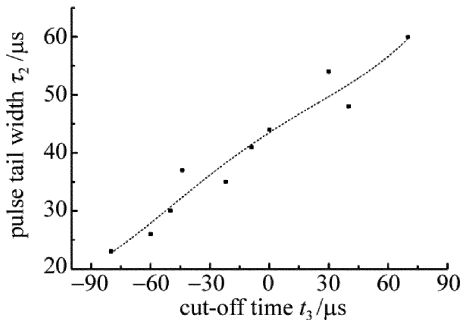


Fig. 4 Relationship between pulse tail width and cut-off time

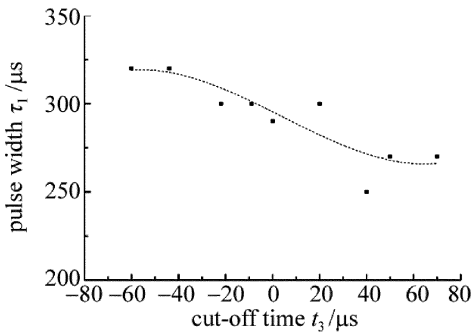


Fig. 5 Relationship between pulse width and cut-off time

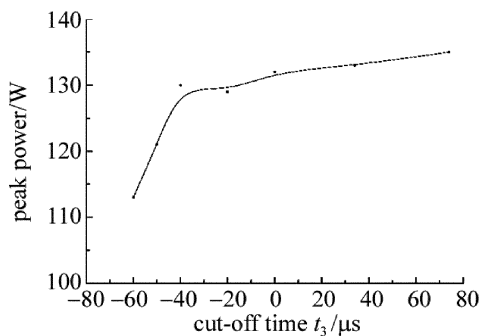


Fig. 6 Relationship between peak power and cut-off time

从图 4、图 5 中可以看出,当截断时刻 t_3 为负值,

即射频电源的激励早于脉冲产生前截止时,随着截断时刻 t_3 绝对值的增大,脉冲宽度 τ_1 基本不变,拖尾长度 τ_2 变短。当截断时刻 t_3 为正值,即射频电源的激励晚于脉冲产生后截止时,随着截断时刻 t_3 的增长,脉冲宽度 τ_1 基本不变,拖尾长度 τ_2 变长。

对比图 3 中一般激励方式下输出的调 Q 脉冲的拖尾长度可知,当射频源提前于脉冲产生时停止激励可以有效斩断脉冲拖尾,由于在 Q 开关打开、开始形成脉冲时,腔内损耗虽然较小但是激励为 0,加速了翻转粒子数的消耗,斩断了拖尾,但是当射频源过早 ($t_3 < -80\mu\text{s}$) 于脉冲产生前停止激励,会导致输出脉冲激光不稳定。这是因为在激励源停止激励时 Q 开关仍然处于关闭状态,停止激励后,翻转粒子数不断消耗,当 Q 开关打开时,翻转粒子数刚刚超过阈值,仅能勉强输出很微弱的调 Q 脉冲。

从图 5 中可以看出,截断时刻 t_3 对脉冲宽度的影响较小,同步调制激励方式下输出的调 Q 脉冲宽度在 300ns 左右,与一般激励方式下输出的调 Q 脉冲宽度基本一致。

在一般激励方式下输出的调 Q 脉冲峰值功率为 75W。从图 6 可知,当截断时刻 $t_3 > -40\mu\text{s}$ 时,调制调 Q 脉冲的峰值功率随截断时刻的变大缓慢上升,保持在 130W 以上,较一般激励方式提高了 73%,即当射频激励适当早于脉冲形成前截断,不仅对于主脉冲没有影响,还会大大地削弱拖尾,获得高功率的调制调 Q 脉冲;当截断时刻 $t_3 < -40\mu\text{s}$ 时,调制调 Q 脉冲的峰值功率随截断时刻的变小急剧下降,即当射频激励过早于脉冲形成前截断,会降低输出脉冲的峰值功率。这是由于过早结束射频激励影响了翻转粒子数的积累,使得调制调 Q 脉冲峰值功率下降。

结合图 6 中截断时刻对拖尾长度的影响可知,当截断时刻 $t_3 < -40\mu\text{s}$ 时,虽然调制调 Q 脉冲具有很短的拖尾,但峰值功率急剧下降;当截断时刻 $t_3 > -40\mu\text{s}$ 时,虽然峰值功率较高,但拖尾较长。综上所述,当截断时刻 $t_3 = -40\mu\text{s}$ 时,输出的调制调 Q 脉冲在拖尾较短的同时,具有较高的峰值功率。

图 7 所示为电光效率和无激励时长的关系。在一般激励方式下,注入电功率为 125W,输出调 Q 脉冲激光平均功率为 0.5W,电光效率为 0.4%。从图中可以看出,当无激励时长小于 400 μs 时,同步调制激励方式下的电光效率近似于一般激励方式下的电光效率。之后随着无激励时长的延长,同步调制信号占空比变小,注入电功率成比例减小,电光效率提高;当无激励时长

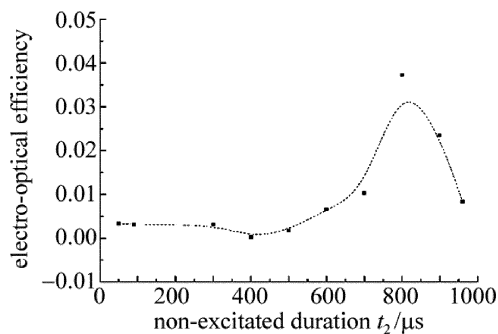


Fig. 7 Relationship between electro-optical efficiency and non-excited duration

$t_2 = 800\mu\text{s}$, 即同步调制信号占空比为 20% 时电光效率为 3% 达到最大值, 相比一般激励方式提高了 650%。当无激励时, 长继续延长电光效率迅速下降, 当无激励时长 $t_2 = 960\mu\text{s}$ 时, 虽然仍有 0.8% 的电光效率, 但此时激光器运转已经不稳定。

3 结 论

本文中基于半外腔机械调 Q 射频激励波导 CO_2 激光器, 采用同步调制激励方式, 通过改变同步调制信号的占空比和截断时刻的方式获得了高电光效率、短拖尾的调 Q 脉冲激光输出。

从电光效率分析可知, 当同步调制信号无激励时长为 $800\mu\text{s}$, 即占空比为 20% 时, 有最大电光效率 3%, 是一般激励方式电光效率 (0.4%) 的 7.5 倍。从拖尾长度分析可知, 当同步调制信号截断时刻为 $-80\mu\text{s}$ 时, 调制调 Q 脉冲拖尾长度最短, 为 $23\mu\text{s}$ 。从峰值功率分析可知, 当同步调制信号截断时刻为 $74\mu\text{s}$ 时, 调制调 Q 脉冲峰值功率最高, 为 135W。综合拖尾长度和峰值功率, 当截断时刻为 $-40\mu\text{s}$ 时, 调制调 Q 脉冲具有短拖尾、高峰值功率。

作者下一步将开展在高重复频率机械调 Q 射频激励波导 CO_2 激光器中实现高电光效率、高峰值功率、短拖尾的调 Q 激光输出。

参 考 文 献

[1] WANG Sh G. RF excited CO_2 waveguide laser[J]. Laser Technology, 1986, 10(1): 33-35(in Chinese).
 [2] ZHANG D L, CAO F G, HAN Y Sh, *et al.* Study on the relationship

between the power and the frequency of CO_2 laser excited by RF[J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 199-200(in Chinese).
 [3] ZHOU D F, JIANG D, HOU T J, *et al.* The study on the E-O Q -switch of RF waveguide CO_2 laser[J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 270-272(in Chinese).
 [4] WANG Y L, WU H L, XIAO M Q, *et al.* Overview of phylogeny and outstanding performances for RF-excited CO_2 laser[J]. Laser and Infrared, 2001, 31(1): 10-12(in Chinese).
 [5] CAO F G. Research on power system of RF excited CO_2 laser in the low power[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 1-2(in Chinese).
 [6] FAN Y X. The research of driver and characteristics of AOM of CO_2 laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006: 1-7(in Chinese).
 [7] LU X Ch, ZHANG K H, TAN R Q, *et al.* Design and experimental study of radio frequency excited rectangle waveguide CO_2 laser[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 159-162(in Chinese).
 [8] LIU Y H. Devising of an inner hydro-cooling circulation system of RF-excited the all metal CO_2 waveguide laser[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2013, 43(3): 400-402(in Chinese).
 [9] TIAN Zh Sh, CHENG X Y, WANG Q. Development of electric-optically Q -switched CO_2 laser[J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 208-210(in Chinese).
 [10] XIE J J, LI D J, ZHANG Ch Sh, *et al.* Acousto-optically Q -switched CO_2 laser[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1008-1013(in Chinese).
 [11] XU Y, XIE J J, LI D J, *et al.* Q -switch techniques of CO_2 laser[J]. Chinese Optics, 2014, 7(2): 196-207(in Chinese).
 [12] LI H, FENG J D, TAN R Q, *et al.* Coupling efficiency of CO_2 laser resonator with rectangular waveguide[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0701003(in Chinese).
 [13] RICHARD L A. Coupling losses in hollow waveguide laser resonators[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1972, 8(11): 838-843.
 [14] ZHU J, CHEN Y Q, WANG J H. Research on reflection coupling of square waveguide laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(1): 34-38(in Chinese).
 [15] WANG X B, XU Q Y, XIE M J, *et al.* Coupling losses and mode properties of planar waveguide resonators[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(11): 1515-1519(in Chinese).
 [16] LI H. Research on Q -switched technology of RF-excited rectangular waveguide CO_2 laser[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 46-50(in Chinese).
 [17] HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. A adjustment method for adjusting Q -switched pulse shape: CN, 87103899.4[P]. 1991-07-24(in Chinese).
 [18] SONG W L. The development of laser processing technology[J]. Laser and Infrared, 2006, 36(s1): 755-758(in Chinese).