

CO₂ 激光调 Q 技术

徐艳^{1,2}, 谢冀江^{1,*}, 李殿军¹, 杨贵龙¹, 陈飞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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 调 Q 技术是实现小型 CO₂ 激光器短脉冲输出的重要手段, 近年来随着短脉冲 CO₂ 激光器在激光测距、测速、成像雷达、环境探测、空间通讯及激光与物质相互作用等领域应用需求的不断增长, 激光调 Q 技术越来越受到国内外专家的关注而成为红外激光技术的研究热点之一。本文就目前用于 CO₂ 激光器中实现短脉冲输出的 5 种主要调 Q 技术(机械调 Q 技术、电光调 Q 技术、声光调 Q 技术、被动调 Q 技术、复合调 Q 技术)的国内外发展历程和现状进行了综合评述, 总结了各种方法的关键技术和存在的问题, 并简要分析了该技术的未来发展趋势。

关键词: CO₂ 激光器; 短脉冲; 调 Q 技术

中图分类号: TN248. 2; O432. 1⁺2 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/CO. 20140702. 0196

Q-switch techniques of CO₂ laser

XU Yan^{1,2}, XIE Ji-jiang^{1,*}, LI Dian-jun¹, YANG Gui-long¹, CHEN Fei¹

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

** Corresponding author, E-mail: laserxj@163.com*

Abstract: Short-pulse CO₂ laser has significant applications in many fields such as laser ranging, environmental detection, space communication and laser interaction with matter. Q-switch techniques are important approach for generating short-pulse CO₂ laser and have been extensively studied by researchers. Main Q-switch techniques for CO₂ laser are reviewed in this paper, including mechanical Q-switch, electro-optically Q-switch, acousto-optically Q-switch, passively Q-switch and double Q-switch. The key technical points and problems of each Q-switch technique are summarized and analyzed. In addition, the tendencies of Q-switch techniques for CO₂ laser are proposed.

Key words: CO₂ laser; short pulse; Q-switch technique

收稿日期: 2013-11-19; 修订日期: 2014-02-16

基金项目: 国家重点实验室基金资助项目 (No. SKLLIM0902-01); 吉林省科技厅科技支撑计划资助项目 (No. 20090358)

1 引 言

CO₂激光器可产生 9 ~ 11 μm 的激光输出,此波段由于处于光束传输的大气窗口,因此在激光测距、测速、成像雷达、环境探测、空间通讯及激光与物质相互作用机理研究等方面具有广阔的应用前景^[1-5]。为满足实际应用中对高峰值功率和高平均功率的要求,此类激光器通常需要在高重复频率的脉冲形式下工作,并将能量压缩到宽度极窄的脉冲中发射,从而针对 CO₂激光器的调Q技术应运而生。目前小型 CO₂激光器实现短脉冲输出的调Q技术主要有机械调Q、电光调Q及声光调Q。机械调Q通常是将转镜或高速旋转的斩波器置于谐振腔内实现的,具有结构简单、稳定性高、成本低、脉冲峰值功率高(可达 kW 级)等突出优点,但受斩波器或转镜转速的限制而难以实现高重频和激光脉冲编码输出。电光调Q是利用晶体的普克尔效应作为Q开关的实现机制,可获得脉宽数十 ns,脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF) 100 kHz 的激光输出,但由于晶体普克尔效应的高电压条件,导致电光设备制造价高,而且易损坏,这些缺陷对电光调Q技术适用范围的扩展有所限制^[6]。声光调Q是在激光谐振腔内放置声光偏转器(通常由 Ge 晶体制成),利用光的布拉格衍射效应改变腔内损耗的方法实现的,具有脉冲重复频率高,输出稳定等优点,但声光晶体自身属性的局限性也限制了其应用范围,例如声光晶体较大的吸收系数使得腔内损耗严重并导致激光器运转困难,故国内外关于声光调Q CO₂激光器的报道较少^[7]。除以上3种主要应用于CO₂激光器的调Q技术外,还有可饱和吸收调Q以及复合调Q技术。可饱和吸收调Q又称为被动调Q,主要是利用材料对光的吸收系数随光强变化的特性来实现的,其操作简单、成本较低、效果明显,但由于它的Q开关延迟时间取决于材料本身的性质而不为人所控,因而其适用范围受到限制。复合调Q技术是在上述较为成熟技术的基础上发展起来的一种新型调Q技术,有

望在进一步提高峰值功率、压窄脉宽等激光输出特性方面取得突破性的进展,但由于受到调Q器件性能等多方面技术条件的限制,目前国内外还处于积极地研究和探索中。

本文重点就目前用于实现 CO₂激光器短脉冲输出的最主要的3种调Q技术,即机械调Q技术、电光调Q技术和声光调Q技术的发展历程与现状、关键技术及存在的问题进行综合评述和分析,在总结比较各种技术方法优缺点的基础上,指出该技术的未来发展趋势。

2 CO₂激光调Q技术进展

2.1 机械调Q技术

机械调Q主要是通过转动腔内元件实现Q调制,如旋转镜片、棱镜和开关等,如图1所示。采用机械偏转技术具有偏转角大、分辨率高、光损失小、适应光谱范围大的优点,其操作简单、稳定可靠且成本较低,是最早用于Q开关的关键技术^[8]。

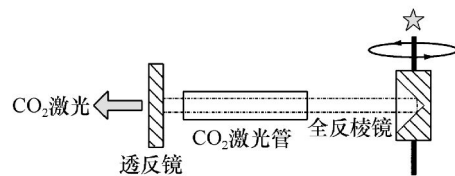


图1 机械调Q原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of mechanical Q-switch

国内外对于机械调Q技术的研究主要集中在20世纪60年代到90年代初,之后则陆续在原基础上做相关性能优化的工作。机械调Q最直接的方法是利用同步马达转动腔的一个反射镜或光闸斩断腔中的光束。1966年,由Kovacs等人首先采用转镜技术实现了Q开关CO₂激光器的脉冲激光输出,获得峰值功率10 kW,单脉冲能量mJ量级,重复频率达500 Hz,脉冲宽度约300 ns的激光输出^[9]。为解决转镜技术引起的啁啾现象,Dietrich Meyerhofer于1968年报道了谐振腔内置机械光闸的调Q技术,实现了重复频率高达

5 kHz的脉冲 CO₂激光输出^[10]。

由于受驱动器(如马达,斩波器,转镜)旋转速度的限制,机械 Q 开关技术难以实现高重复输出,而且无法对输出激光脉冲序列进行编码控制,这一技术瓶颈的出现使其应用范围大大缩小,故近年来关于此方法的技术报道不是很多。国内这方面的报道则主要来自吉林大学和华中科技大学。

2004年,高锦岳等人做了机械调 Q CO₂激光器动力学分析的相关研究,实验采用一部转速达 12 000 r/min 的微型高速电机和一片超薄铝箔组成的调 Q 装置,获得峰值功率超过 1 kW,脉冲宽度为 200 ns 左右的脉冲序列,并利用该激光器作为泵浦源,进行了中红外晶体的倍频实验及其它实验研究^[11];同时用二能级速率方程和四能级振-转模型做了相关的激光器动力学分析,在理论结合实践的基础上,确定了该台 CO₂激光器的动力学参数和过程。2008年,姜云等人又发表了直流电纵向激励机械调 Q CO₂激光器的动力分析相关研究,主要采用一种快速斩波器实现简单直流电纵向激励 CO₂激光的机械 Q 调制,并用六温度模型对该机械调 Q CO₂激光器 Q 调制的动力学过程做了相关模拟,最终获得了峰值功率为 1 ~ 2 kW、重复频率为 740 Hz、单脉冲宽度为 200 ~ 300 ns 的激光脉冲输出^[12]。为了满足实验室 EUV 项目参数需求,华中科技大学于 2012 年研制了一台输出特性较好的机械调 Q CO₂激光器^[13],实验采用机械斩波法,并通过对比优化不同腔型下的激光输出特性,获得了重复频率 1 680 ~ 3 120 Hz,平均功率约 200 W,脉冲宽度 245 ~ 340 ns,峰值功率约 40 kW 的脉冲激光稳定输出。

机械调 Q 为实现 CO₂激光脉冲输出提供了简便并具有实际意义的方案基础,合理控制驱动器转速成为提高该类 CO₂激光器性能的主要技术途径。

2.2 电光调 Q 技术

电光调 Q 是利用晶体的普克尔效应作为 Q

开关的实现机制,在激光谐振腔中插入起偏振片及作为 Q 开关的电光晶体,如图 2 所示。电光调 Q CO₂激光器主要采用 CdTe 电光晶体,具有脉冲重复频率高、可编程、输出稳定性高等优点,其先后经历了直流放电激励、射频放电激励、脉冲放电激励的发展过程^[14]。电光调 Q CO₂激光器在技术上已经逐渐趋于成熟,目前已广泛应用于激光雷达、激光光谱分析、远红外激光泵浦源等诸多方面^[15-16]。

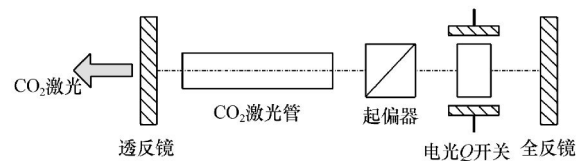


图 2 电光调 Q 原理示意图

Fig. 2 Principle diagram of electro-optic Q-switch

2.2.1 直流放电激励电光调 Q CO₂激光器

1978年, Marcus 等人报道了一种光栅选支输出的电光调 Q CO₂激光器,用作相干 CO₂激光雷达的光源^[17]。通过不断地实验改进, Marcus 和 Curter 于 1979 年又报道了波导型电光调 Q CO₂激光器,在激光输出特性上得到了进一步提高^[18]。为满足在腔内增益介质中传播的激光为线偏振光,同时尽可能省去波片,减小激光器体积, Marcus 又于 1981 年报道了采用方波导结构和退电压调 Q(非线性晶体 CdTe 特性随自身加电压值的改变而改变)方式的紧凑结构的电光调 Q 波导 CO₂激光器^[19]。为实现激光雷达的可编程控制, Laugh 和 Wayne 等人通过实验改变晶体的调制电压及波形,成功获得多种激光脉冲波形(调 Q、锁模、腔倒空)的可编程输出^[20]。Fox 与 Gautier 报道了可快速调谐的电光调 Q CO₂激光器,通过调整光栅谐振腔内全反镜的角度和调 Q 晶体的加压方式,获得 9 ~ 11 μm 波段快速调谐输出的调 Q 脉冲^[21],从而满足了差分吸收激光雷达的需要,加速了激光雷达的多功能化。表 1 给出了直流放电激励电光调 Q CO₂激光器研究历程。

表1 直流放电激励电光调Q CO₂激光器研究历程Tab.1 The progress of electric-optically Q-switched CO₂ laser with DC discharge excitation

年份/年	研究单位/人员	激光器结构特点	主要输出技术指标
1978	Marcus 等	光栅选支	脉冲重复频率 (PRF) 最高为 50 kHz, 脉冲宽度为 300 ns, 峰值功率约 300 W; 在低脉冲重复频率时, 峰值功率可以达到 600 W
1979	Marcus 和 Curter	波导型	PRF 最高为 345 kHz, 对应脉宽 110 ns; 1 kHz 时, 峰值功率 940 W, 脉宽 70 ns; 108 kHz 时, 输出功率 13 W, 占空比 20%
1981	Marcus 等 Laugh 和 Wayne 等 Fox 与 Gautier	方波导; 退电压调 Q 波导型; 可编程 光栅谐振腔	PRF 同上, 脉宽 700 ns 可编程输出 获得了 9 ~ 11 μm 波长快速谐调输出

2.2.2 射频 (RF) 激励电光调 Q CO₂ 激光器

1987年, Ferranti 公司报道的 CdTe 电光调 Q 射频波导 CO₂ 激光器, 实现了脉冲重复频率 50 kHz, 峰值功率为 250 W 的 EH₁₁ 模的激光输出^[22]。为满足稳定的外差频率激光输出, Pearson 于 1991 年报道了 RF 波导电光 Q 开关 CO₂ 激光器, 实验中本振激光工作在连续输出模式, 主振激光工作在调 Q 输出模式, 从而获得脉冲重复频率为 50 kHz, 脉冲宽度为 180 ns 到几 ms 的激光输出^[23], 该激光器可应用于多普勒激光雷达。为了大大增加激活区长度, 提高输出功率, Mcmillan 等人于 1995 年研究报道了一种采用 4 面反射镜实现激光往返的多折叠腔射频激励波导电光 Q 开关 CO₂ 激光器^[24]。

2000 年, 哈尔滨工业大学的王骥等人首先研制并报道了国内的首台电光调 Q RF 波导 CO₂ 激光器^[25], 获得最高重复频率为 10 kHz, 峰值功率为 200 W, 脉冲宽度为 400 ns 的调 Q 脉冲激光输出。在此基础上又研制了高差频稳定的双通道电光调 Q 射频波导 CO₂ 激光器^[26], 实验采用不等长电极结构, 双通道激光反向输出, 通过调节射频电源功率的方式调谐双通道输出激光的外差频率, 最终输出调谐率约 0.1 MHz/W, 外差频率稳定度

达 10⁻¹⁰ 的脉冲激光。2002 年他们又报道了光栅选支电光调 Q 的射频激励波导 CO₂ 激光器, 实现了最高重复频率 10 kHz, 峰值功率 300 W, 脉冲宽度 150 ns 的激光输出^[27-28]。西南技术物理所的研究人员在这方面也有突出的研究成果, 2002 年他们研制的电光调 Q 射频波导 CO₂ 激光器以脉冲重复频率 40 kHz 工作时, 已经达到输出激光峰值功率 360 W、脉冲宽度 150 ns 的水平^[29-30]。2004 年, 他们又报道了应用于主动激光成像雷达光源的准折叠高重频腔倒空射频波导 CO₂ 激光器, 通过改变加在 CdTe 电光晶体上高压脉冲的上升沿时间、布氏窗输出反射率等工作参数, 获得了脉冲宽度为 20 ~ 30 ns 的可调输出^[31]。为了满足激光外差成像雷达系统的参数要求, 他们又于 2007 年报道了脉宽可控的腔倒空射频波导 CO₂ 激光器, 采用了在陶瓷板上直接开波导槽构成多通道 Z 折叠主本振激光器结构, 并在主振波导进行 CdTe 电光晶体腔内调 Q 的方法, 实现了在 20、40、65 及 70 kHz 的重频运转, 半峰全宽约 30 ns、峰值功率大于 2 kW^[32]。表 2 列出了国内外射频激励电光调 Q CO₂ 激光器的发展进程。

表2 国内外射频激励电光调Q CO₂激光器的发展进程Tab. 2 The development of RF excited electric-optically Q-switched CO₂ laser

年份/年	研究单位/人员	激光器结构特点	主要输出技术指标
1987	Ferranti 公司	RF	PRF 为 50 kHz, 输出峰值功率为 250 W, 模式为 EH ₁₁ 模
1991	Pearson 等	波导型; RF	PRF 可达到 50 kHz, 脉冲宽度 180 ns ~ ms
1995	Mcmillan 等	多折叠腔; RF	增加了激活区长度, 提高了输出功率
2000	哈尔滨工业大 学/王骥等	RF	PRF 最高为 10 kHz, 峰值功率 200 W, 脉冲宽度 400 ns
	西南技术物理所	高差频稳定的双通 道型; RF	脉冲激光峰值功率 300 W, 脉冲宽度 180 ns, 短期外差 频率稳定度可达 10 ⁻⁹
		双通道不等长电 极波导型; RF	调谐率约 0.1 MHz/W, 外差频率稳定度达 10 ⁻¹⁰
		RF	PRF 为 40 kHz 时输出激光峰值功率 300 W; 最高重复频 率可达 100 kHz, 峰值功率 300 W, 脉冲宽度 500 ns
2002	西南技术物理所、四 川大学/周鼎富、 江东等	RF	输出 EH ₁₁ 模, 重复频率 41.67 kHz, 峰值功率达到 360 W, 脉冲半宽度 150 ns
	哈工大/田兆硕等	光栅选支; RF; 波导型	PRF 为 1 ~ 10 kHz 可调, 在 10 kHz 重复频率时, 获得激光 脉冲峰值功率为 300 W, 脉冲宽度为 150 ns
2004	四川大学、国内 西南技术物理所/ 杨泽后、江东等	多通道 Z 折叠腔; RF	脉冲宽度 20 ~ 30 ns 的可调输出
2007	四川大学、国内西 南技术物理所/ 王建银、孙鹏等	多通道折叠腔; RF	在 20、40、65 及 70 kHz 的重频工作下, 获得半峰全宽 约 30 ns、峰值功率大于 2 kW 的脉冲输出
2009	西南技术物理所、 四川大学/王从刚、 周鼎富等 ^[33]	多通道折叠腔; RF; 波导型	PRF 达到 70 kHz, 峰值功率 2.5 kW, 脉宽约为 30 ns、主本 振外差中频(120 MHz)频率漂移在短期内小于 1 MHz

2.2.3 脉冲放电激励电光调Q CO₂激光器

脉冲放电激励的 CO₂ 激光器在提高激光峰值功率及重频输出方面具有一定的优势。2013 年, 由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所邵明振等人综合光、机、电一体化技术完成了高功率 TEA CO₂ 激光器主机的结构优化设计, 进一步提

高了激光的高重频输出^[34]。而电光调 Q 技术的引入, 更在优化脉冲波形、消除拖尾现象及提高峰值功率方面起到了重要作用。表 3 列出了国内外脉冲放电激励电光调 Q CO₂ 激光器的发展状况。

表3 国内外脉冲放电激励电光调Q CO₂激光器的发展状况Tab. 3 The development of electric-optically Q-switched CO₂ laser with pulse discharge excitation

年份/年	研究单位/人员	主要输出技术指标
1983	Mangir 等 ^[35]	腔内插入 CdTe 电光晶体, 激光功率增加了 25%, 消除了拖尾现象
1989	Letalick 等 ^[36]	采用速率方程理论进行动力学分析, 得到激光输出脉冲波形
1992	Al-Shiradia 等 ^[37]	采用增益延时 Q 开关法, 在 1.3 kHz 时, 获得峰值功率 5.5 kW, 脉冲宽度 60 ns 的激光输出
2001	哈工大/田兆硕等 ^[38]	利用六温度模型理论进行动力学分析, 获得拖尾现象微弱的脉冲波形

目前,电光调Q CO₂激光器在理论、技术等方面的发展已较为成熟,且部分产品实现商业化。但是由于调Q晶体加工(切割、抛光等)难度大、电源造价高,这大大限制了电光调Q CO₂激光器的广泛应用。表4给出了美国大通公司产品化电光调Q CO₂激光器的技术指标。

表4 美国大通公司产品化电光调Q CO₂激光器的实际技术指标

Tab.4 The technical indicators of electric-optically Q-switched CO₂ laser of Access Laser Company

产品型号	L50Q	L50GQ
脉冲功率	1 kW	8 W(平均功率)
脉冲宽度/ns	300	300
重复频率/kHz	50	80
M2	<1.3	<1.2
全角发散角/mrad	6	5.5
功率稳定性/%	±5	±5
波长/μm	10.6左右	9.2~10.8
电压/V	28	28
电流/A	28	28

附注:G表示谱线可调;Q表示调Q模式

与科学研究不同的是,产品市场化更趋向于优良的性价比,因此导致市场化产品与实验室水平有着一定的差距。从表中得出,在峰值功率和重复频率等输出指标上,已产品化投入市场的调Q CO₂激光器可以达到实验室水平,但其脉冲宽度仍较宽。因此在保持高功率、高重频输出的前提下尽量压窄脉宽,成为当前市场化CO₂激光器的努力方向。

电光调Q的出现,在一定程度上大大改善了机械调Q方法的技术弊端,在实现高重频、可编码方面提供了稳定可靠的技术途径。提高现有电光晶体光学性能,或设计更加合理的实验方案以降低晶体两端的加载电压值成为提高CO₂激光器性能的关键技术。

2.3 声光调Q技术

声光调Q开关在实现激光器高重频输出方面具有重要作用,它包括声光Q开关器件和驱动电源,如图3所示。声光调Q开关主要是利用超声波在介质中的传播造成介质折射率的周期性变化,形成等效的“相位光栅”,实现对光束的衍射

偏转。

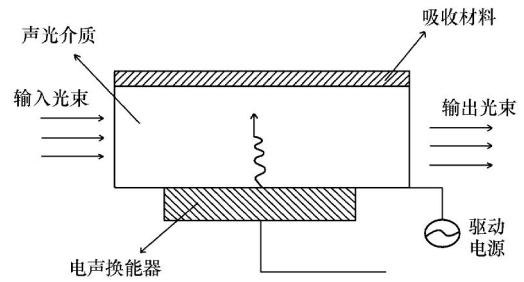


图3 声光Q开关原理图

Fig.3 Principle diagram of acousto-optic Q-switch

声光调Q CO₂激光器通常是将声光调制器(AOM)置于谐振腔内,它是获得高重频、高峰值功率、窄脉宽激光输出的有效技术手段^[39]。受晶体加工工艺的限制,声光晶体(通常为Ge晶体)的吸收系数较大,导致激光器大的腔内损耗而运转困难,因此国内外关于运用声光调Q技术实现CO₂激光输出的报道较少。

80年代末,西南技术物理研究所的杨大林等用Ge单晶作为声光介质首次研制出声光Q开关波导CO₂激光器^[40],实现了重复频率从0~200 kHz连续可调。由于CO₂激光器的增益反比于放电管的内径,饱和光强正比于气压的平方,故Q开关波导CO₂激光器中普遍采用放电管内径小、气压高的波导腔。但这样的波导腔会面临以下问题:首先波导管与腔镜之间的低损耗耦合条件比较严格^[41],当在波导管与腔镜之间再插入调Q元件时,耦合条件将更为苛刻;其次放电管内径太小,不利于气体的冷却,反而导致增益下降;最后波导腔内光束直径小,将导致腔内的调制器、布氏窗等元件承受很高的功率密度,透射损耗会急剧增加。为解决这些问题,王波等人的研究中指出,如果适当增大波导CO₂激光器的放电管内径,可以获得较高的输出功率^[42]。据此,李建军等人提出了采用准波导腔的声光调Q CO₂激光器,获得了脉宽100 ns、峰值功率2 kW的激光输出,与腔长相近的典型波导腔声光Q开关CO₂激光器相比较,光脉冲峰值功率提高了近4倍,脉冲宽度减小了33%^[43],但此激光器无法实现激光波长的可调谐输出及对脉冲序列的编码控制。

为克服无法调谐输出和编码控制的技术缺

陷,中国科学院长春光机所激光与物质相互作用国家重点实验室谢冀江、李殿军等人于2008年运用调 Q 脉冲激光器速率方程分析计算了声光调 Q 小型 CO_2 激光器的主要技术参数^[44-47],并设计制造了一台新型 CO_2 激光器—波长可调谐的编码输出声光调 Q 脉冲 CO_2 激光器,通过光栅调谐实现了重复频率1~50 kHz的重频输出,1 kHz时获得了脉宽180 ns,峰值功率4 062 W的高稳定性脉冲激光输出,该激光器满足了实际应用需求。2009~2011年期间,他们又先后对声光调 Q CO_2 的输出特性进行了相关研究。通过在谐振腔调 Q 晶体两端对称放置一对ZnSe透镜($f=100$ mm),发现调 Q 晶体中超声场的渡越时间不会影响输出激光的脉冲宽度,为减少腔内光学元件、降低插入损耗、提高激光器输出性能方面奠定了实验基础;利用六温度模型理论对声光调 Q CO_2 激光器

的动力学过程进行了理论分析,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;采用基于小信号增益和饱和光强的耦合输出数学模型从理论上给出了激光器最佳输出镜透过率的数值解,并运用相关实验装置研究了输出镜的透射率对激光输出性能的影响,从理论和实验上一致得出了激光输出功率的最佳透过率为39%。

2011年,华中科技大学也报道了声光调 Q 可调谐 CO_2 激光器的相关研究^[48],实验采用光栅调谐一级振荡、一级输出模式,实现了9~11 μm 的波长输出,并详细记录了每条输出谱线对应的不同激励电流下的激光输出功率,获得了与美国相干公司GEM-100激光器相似的激光输出特性。表5列出了近年来国内声光调 Q CO_2 激光器研究进展。

表5 国内声光调 Q CO_2 激光器研究状况

Tab.5 The development of acousto-optically Q -switched CO_2 laser

年份/年	研究单位/人员	激光器结构特点	主要输出技术指标
1991	西南技术物理研究所/杨大林等	波导型	PRF从0~200 kHz连续可调
1995	成都电子科技大学/李建军等	准波导型	获得了脉宽100ns,峰值功率2000 W的激光输出
2009	中科院长春光机所/谢冀江, 李殿军等	光栅谐振腔	实现PRF为1~50 kHz连续可调,最大输出功率7.5 W的准基模输出;在1 kHz运转时,峰值功率4 062 W,脉宽180 ns
2011	中科院长春光机所/谢冀江, 李殿军等	光栅谐振腔	输出镜最佳透过率为39%
2011	华中科技大学	光栅谐振腔	获得 CO_2 激光谱线段9~11 μm 的41条谱线,并详细记录了每一条谱线对应的不同激励电流下的激光输出功率,实现最大功率输出的激励电流在12~16 mA之间

声光调 Q 在实现窄脉宽、高峰值功率、高重频、稳定的编码输出等方面具有一定的潜在价值,提高现有晶体的光学性能或研制新的高性能晶体将是优化该激光器输出特性的主要技术途径。

2.4 可饱和吸收被动调 Q 技术

可饱和吸收被动 Q 开关主要是利用材料对光的吸收系数随光强变化的特性来实现的。可饱和吸收 Q 开关放置在谐振腔内,其中的吸收体在腔内激光强烈的相干激励下,容易伴随产生所谓的自感生透明现象,如图4所示。被动 Q 开关的优势在于依靠激光辐射自身启动,无需高压、快速

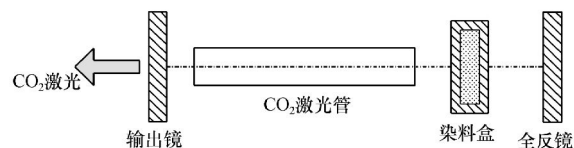


图4 饱和吸收调 Q 原理示意图

Fig.4 Principle diagram of saturable absorption Q -switch

电光驱动器或射频调制器,设计简单、成本低;其不足是外部控制性能的精确度不高,输出能量较之电光或声光调 Q 开关激光器要低^[49-50]。

国内外关于 CO₂激光器被动调 Q 技术的报道不是很多,早年主要集中于日本。美国 NASA 电子研究中心的 Hanst 等人报道的 CO₂气体和丙烯气体作可饱和吸收体的实验研究^[51],美国贝尔电话实验室的 Patel 等人将 CO₂激光束射到 SF₆盒中获得自感生透明度阈值的相关研究等等^[52]。在 1970 年《激光与光电子学进展》期刊中的基于转镜和可饱和吸收体并用的 CO₂ Q 开关激光器报道中,得知可饱和吸收体 SF₆能有效提高慢开关速度^[53]。

由于 SF₆分子的吸收光谱和 CO₂的 P 支的很多激光谱线符合较好,吸收系数又大,加之 SF₆分子的上下跃迁能级的寿命较长,谱线的自然宽度较窄,因此是很好的参考谱线,故近年来相关报道主要集中于可饱和吸收体 SF₆对 CO₂激光器的稳频作用^[54]。

2.5 复合调 Q 技术

复合调 Q 技术是一种新型技术,即采用两个或多个置于腔内的调 Q 开关来实现激光器的短脉冲输出技术,目前该调 Q 技术用于 CO₂激光器中的报道还很少。1970 年《激光与光电子学进展》报道了一篇关于主被动 Q 开关并用的文献^[55],主要是将转镜技术和可饱和吸收体 SF₆并用于 CO₂激光 Q 开关技术中,实验研究发现被动开关的引入明显提高了慢开关速度,为解决低转速下得到快 Q 开关速度的技术问题提供了一定的可能。

1999 年由美国新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯国家实验室报道的高速随机激光微调实验,采用双声光调 Q 技术,实现了重复频率高达 100 kHz 的操作稳定、完全集成的 AO 激光微调系统^[55]。但由于 Ge 晶体光吸收效率较高,导致腔内严重的热效应,限制了实验的进一步优化。

受实验方案设计的影响,复合调 Q 的应用范围目前仍较为局限,但从理论上讲,该技术在

进一步提升激光器性能方面具有巨大的潜在优势,寻求最佳实验设计方案成为实现该技术手段走入实用阶段的重要途径。

3 结束语

本文简要评述了能实现 CO₂激光器调 Q 输出的几种主要方法的发展状况,总结分析了各种方法的关键技术和存在的问题。目前,应用在小 CO₂激光器中的较为成熟的调 Q 技术为主动调 Q,包括机械调 Q、电光调 Q 及声光调 Q。这些技术在 CO₂调 Q 输出特性上各有特点和优势,但也由于各自的技术瓶颈限制了其在某些方面性能的进一步提高,不过国内外科研工作者仍在积极地研究之中。关于被动 CO₂激光调 Q 技术,则在很大程度上选择与主动 Q 开关并用,主要起到提高慢开关速度的作用。至于复合调 Q 技术,属于一种新型的 Q 开关技术,是在前面成熟的调 Q 技术基础上发展起来的一种复合技术,它为进一步提高峰值功率,压窄脉宽的激光输出结果提供了可能,但由于实验条件等多方面的局限,国内外还在积极地研究当中。

总之,高峰值功率,高重频,窄脉宽的激光光源一直是激光领域内众多研究人员所追求的目标和方向,它在工业、医疗、军事和科研等多个领域中都有着非常高的应用价值。国内外的研究人员也正在积极地对现有技术进行优化,并不断探索新的技术途径,以期获得更高的峰值功率、脉冲重复频率和更窄的脉宽,并进一步实现激光器的小型化和实用化。从目前的技术发展趋势来看,机械和电光调 Q CO₂激光器在实现高功率、窄脉宽的稳定输出方面占据明显的优势,而声光调 Q CO₂激光器则在小型化、可调谐等方面更具发展潜力。

参考文献:

- [1] QU Y C, REN D M, HU X Y, *et al.*. A monolithic microprocessor controlled turning and triggering system of TEA CO₂ laser for differential absorption lidar[J]. *SPIE*, 2003, 4893:377-383.
- [2] PILTINGSRUD H V. CO₂ laser for lidar application and producing two narrowly spaced independently wavelength-selectable Q-switched output pulses[J]. *Appl. Opt.*, 1991, 30(27):3952-3963.
- [3] PEARSON GRYE B J. Frequency fidelity of a compact CO₂ Doppler lidar transmitter[J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(30):

- 6475-6484.
- [4] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
SUN CH W. *Laser Irradiation Effect*[M]. Beijing:National Defense Press,2002. (in Chinese)
- [5] 姜振华,王挺峰,郭劲. LPP-EUV 光源中的高功率 CO₂激光监测与控制系统[J]. 中国光学,2013,6(4):544-550.
JIANG ZH H, WNAG T F, GUO J. Monitoring and controlling system for high power CO₂ laser in "LPP-EUV" light source [J]. *Chinese Optics*,2013,6(4):544-550. (in Chinese)
- [6] 田兆硕,王雨三,刘逢梅,等. 射频波导激光器电极参数的测量[J]. 中国激光,1999,A26(2):135-140.
TIAN ZH SH, WANG Y S, LIU F M, *et al.*. The measurement of electrode parameters of RF waveguide lasers[J]. *Chinese J. Lasers*,1999,26(2):135-140. (in Chinese)
- [7] 谢冀江,李殿军,张传胜. 小型多功能 CO₂激光器[J]. 中国光学与应用光学,2009,3(2):248-252.
XIE J J, LI D J, ZHANG CH SH. Compact multifunctional CO₂ laser[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Optics*,2009,3(2):248-252. (in Chinese)
- [8] 陈鹤鸣,赵新彦. 激光原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
CHEN H M, ZHAO X Y. *Theory and Application of Laser*[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2009. (in Chinese)
- [9] KOVACS M A, FLYNN G W, JAVAN A. Q-Switching of molecular laser transitions[J]. *Appl. Phys. Lett.*,1966,8:62-63.
- [10] MEYERHOFER D. Q-switching of the CO₂ laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*,1968,11(4):762-769.
- [11] 马涛. 机械调 Q 二氧化碳激光器的动力学分析[D]. 长春:吉林大学,2003.
MA T. The dynamic analysis of mechanical Q-switched CO₂ laser[D]. Changchun:Jilin University,2003. (in Chinese)
- [12] 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.
JIANG Y, WANG T J, ZHANG H ZH, *et al.*. Analysis of kinetics of a mechanical Q-switched CO₂ laser with longitudinal DC discharge[J]. *J. Jilin University*,2008,46(1):115-119. (in Chinese)
- [13] 秦文仲. 二氧化碳激光器机械调 Q 的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
QIN W ZH. Studies on mechanical Q-switched CO₂ laser[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 田兆硕,成向阳,王琪. 电光调 Q CO₂激光器进展[J]. 激光技术,2003,27(3):208-213.
TIAN ZH SH, CHENG X Y, WANG Q. Developments of electric-optically Q-switched CO₂ laser[J]. *Laser Technology*, 2003,27(3):208-213. (in Chinese)
- [15] AHLBERG H, LANQVIST S, LETALIO K D, *et al.*. Imaging Q-switched CO₂ laser radar with heterodyne detection design and evaluation[J]. *Appl. Opt.*,1986,25(17):2891-2892.
- [16] PILTINGSRUD H V. CO₂ laser for lidar applications and producing two narrowly spaced independently wavelengthselectable Q-switched output pulses[J]. *Appl. Opt.*,1991,30(27):3952-3963.
- [17] MARCUS S, CAUNT J W. Compact electro-optically Q-switched CO₂ waveguide laser[J]. *Rev. Sci. Instrum.*,1978,49(10):1410-1412.
- [18] MARCUS S, CARTER G M. Electro-optically Q-switched CO₂ waveguide laser[J]. *Appl. Opt.*,1979,18(16):2824-2826.
- [19] MARCUS S. Compact electro-optically Q-switched CO₂ waveguide laser[J]. *Rev. Sci. Instrum.*,1981,52(3):482-483.
- [20] LAUGHMAN L M, WAYNE R J. Programmable transmitters for coherent laser radars[J]. *SPIE*,1981,300:163-171.
- [21] FOX J A, GAUTIER C R. Rapid-tuning device for CO₂ heterodyne detection lidar[J]. *Rev. Sci. Instrum.*,1989,60(7):1258-1261.
- [22] MILLER G M, WILLIAMS C A. Compact high power transmitters for CO₂ laser systems[J]. *SPIE*,1987,806:14-20.
- [23] PEARSON G N, RYE B J. Frequency fidelity of a compact CO₂ Doppler lidar transmitter[J]. *Appl. Opt.*,1992,31(30):6475-6484.
- [24] MCMLLAN R C, DAVIDSON R B. Light-weight low-volume CO₂ lidar technology[J]. *SPIE*,1995,2472:132-141.
- [25] 王骥,田兆硕,王雨三,等. 电光调 Q 射频激励波导 CO₂激光器[J]. 中国激光,2000,27(2):97-100.
WANG Q, TIAN ZH SH, WANG Y S, *et al.*. Electro-optically Q-switched RF excited CO₂ waveguide laser[J]. *Chinese*

- J. Lasers*,2000,27(2):97-100. (in Chinese)
- [26] 王琪,田兆硕,李自勤,等.射频激励双通道不等长电极波导CO₂激光器的外差频率调制研究[J].光学学报,2000,20(11):1473-1476.
WANG Q,TIAN ZH SH,LI Z Q,*et al.*. Study of offset frequency modulation of RF excited waveguide CO₂ laser with two unequally long electrode channels[J]. *Acta Optica Sinica*,2000,20(11):1473-1476. (in Chinese)
- [27] 田兆硕,李自勤,王琪,等.CdTe电光调频晶体用于电光调Q研究[J].量子电子学报,2002,19(4):301-304.
TIAN ZH SH,LI Z Q,WANG Q,*et al.*. Study on Q-switching using electro-optic FM crystal[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*,2002,19(4):301-304. (in Chinese)
- [28] 田兆硕,王琪,王雨三,等.光栅选支电光调Q射频激励波导CO₂激光器研究[J].光电子·激光,2000,11(3):282-284.
TIAN ZH SH,WANG Q,WANG Y S,*et al.*. Study of electro-optically Q-switched RF excited CO₂ waveguide laser with line selected by grating[J]. *J. Optoelectronics · Laser*,2000,11(3):282-284. (in Chinese)
- [29] 周鼎富,江东,侯天晋,等.RF激励波导CO₂激光器电光调Q实验研究[J].激光技术,2002,26(4):270-272.
ZHOU D F,JIANG D,HOU T J,*et al.*. The study on the E-O Q-switch of RF waveguide CO₂ laser[J]. *Laser Technology*,2002,26(4):270-272. (in Chinese)
- [30] 江东,周鼎富,侯天晋,等.激光主动成像雷达CO₂激光器研究[J].中国激光,2002,29(5):397-401.
JIANG D,ZHOU D F,HOU T J,*et al.*. Study on CO₂ laser for active imaging lidar[J]. *Chinese J. Lasers*,2002,29(5):397-401. (in Chinese)
- [31] 杨泽后,周鼎富,陈建国,等.波导CO₂激光器电光腔倒空特性研究[J].激光技术,2004,28(5):485-487.
YANG Z H,ZHOU D F,CHEN J G,*et al.*. Study on the characteristics of cavity-dumped RF waveguide CO₂ laser[J]. *Laser Technology*,2004,28(5):485-487. (in Chinese)
- [32] 王建银,周鼎富,陈建国,等.脉宽可控的腔倒空射频波导CO₂激光器[J].激光技术,2007,31(1):25-28.
WANG J Y,ZHOU D F,CHEN J G,*et al.*. RF excited waveguide CO₂ laser with controllable width of cavity-dumping pulse[J]. *Laser Technology*,2007,31(1):25-28. (in Chinese)
- [33] 王从刚,周鼎富,赵晓军,等.陶瓷多通道折叠射频波导稳频脉冲CO₂激光器研究[J].激光技术,2009,33(4):355-358.
WANG C G,ZHOU D F,ZHAO X J,*et al.*. Study on ceramic multi-channel folded RF waveguide CO₂ laser[J]. *Laser Technology*,2009,33(4):355-358. (in Chinese)
- [34] 邵明振,邵春雷,卢启鹏,等.高功率TEA CO₂激光器主机结构优化设计[J].发光学报,2013,34(3):388-393.
SHAO M ZH,SHAO CH L,LU Q P,*et al.*. Design on mainframe of high power TEA CO₂ laser and optimization[J]. *Chinese J. Luminescence*,2013,34(3):388-393.
- [35] MANGIR M S,PARAZZOLI C G. Intracavity plasma shutter for transversely excited CO₂ lasers[J]. *Proceeding of CLEO*,1983:130-132.
- [36] LETALICK D,RENHOM I,WIDEN A. CO₂ waveguide laser with programmable pulse profile[J]. *Opt. Eng.*,1989,28(2):172-179.
- [37] SHIRADIA Y S. Paulson M. Rosadiuk T A1[J]. *Rev. Sci. Instrum.*,1992,63(7):3575-3578.
- [38] 田兆硕,王琪,李自勤,等.电光调Q CO₂激光器的六温度模型理论与速率方程理论比较分析[J].物理学报,2001,50(12):2369-2374.
TIAN ZH SH,WANG Q,LI Z Q,*et al.*. Comparison between the theories of six-temperature model and rate equation for Q-switched CO₂ laser[J]. *Acta Physica Sinica*,2001,50(12):2369-2374. (in Chinese)
- [39] 谢冀江,李殿军,张传胜,等.一种波长可调谐的编码输出声光调Q脉冲CO₂激光器:中国,200810051433.4[P],2008-11-18.
XIE J J,LI D J,ZHANG C S,*et al.*. A tunable acousto-optical Q-switched pulsed CO₂ laser:China,200810051433.4 [P],2008-11-18. (in Chinese)
- [40] 杨大林,贺耀坤,时顺森.声光Q开关波导CO₂激光器[J].激光技术,1991,15(1):9-13.
YANG D L,HE Y K,SHI SH S. An acousto-optic Q-switched waveguide CO₂ laser[J]. *Laser Technology*,1991,15(1):9-13. (in Chinese)

- [41] LETALICK, DIETMAR, RENHOM, *et al.*. CO₂ waveguide laser with programmable pulse profile[J]. *Opt. Eng.*, 1989, 28(2):172-179.
- [42] 王波, 王瑞峰, 裘明信. 内腔式 CO₂ 激光器工作状态的研究[J]. 中国激光, 1987, 14(12):714-717.
WANG B, WANG R F, QIU M X. Investigation of working state of intra-cavity CO₂ laser[J]. *Chinese J. Laser*, 1987, 14(12):714-717. (in Chinese)
- [43] 李军建, 王瑞峰, 陈文友. 声光调 Q 准波导 CO₂ 激光器[J]. 中国激光, 1995, 22(3):195-198.
LI J J, WANG R F, CHEN W Y. An acousto-optic Q-switched CO₂ quasi-waveguide laser[J]. *Chinese J. Laser*, 1995, 22(3):195-198. (in Chinese)
- [44] 谢冀江, 李殿军, 张传胜, 等. 声光调 Q CO₂ 激光器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5):1008-1013.
XIE J J, LI D J, ZHANG CH SH, *et al.*. Acousto-optically Q-switched CO₂ laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1008-1013. (in Chinese)
- [45] 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.
XIE J J, PAN Q K, LI D J, *et al.*. Theoretical calculation and experimental study of acousto-optically Q-switched CO₂ laser[J]. *Chinese J. Laser*, 2011, 38(2):0202004. (in Chinese)
- [46] 潘其坤, 谢冀江, 阮鹏, 等. 声光调 Q CO₂ 激光器的动力学模型[J]. 中国激光, 2011, 38(7):0702002.
PAN Q K, XIE J J, RUAN P, *et al.*. Dynamical model of acousto-optically Q-switched CO₂ laser[J]. *Chinese J. Laser*, 2011, 38(7):0702002. (in Chinese)
- [47] 潘其坤, 谢冀江, 阮鹏, 等. 声光调 Q CO₂ 激光器的输出特性[J]. 中国光学, 2012, 5(3):283-288.
PAN Q K, XIE J J, RUAN P, *et al.*. Output performance of acousto-optic Q-switched CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):283-288. (in Chinese)
- [48] 赵军强. 声光调 Q 可调谐 CO₂ 激光器的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
ZHAO J Q. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- [49] 蓝信锯. 激光技术[M]. 北京:科学出版社, 2005.
LAN X J. *Laser Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [50] 陈家璧. 激光原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
CHEN J B. *Theory and Application of Laser*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [51] HANST P L, MORREAL J A, HENSON W J. Repetitive pulsing of the CO₂ laser by means of CO₂ gas and other absorbers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, 12(3):58-61.
- [52] PATEL C K N, SLUSHER R E. Self-induced transparency in gases[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1967, 19(18):1019-1022.
- [53] 转镜和可饱和吸收体并用的 CO₂ Q 开关激光器[EB/OL](1970-07-08). <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-JGDJ197007008.htm>.
- [54] 林太基, 翁兆恒, 耿秀兰. SF₆ 饱和吸收稳频 CO₂ 激光器[J]. 光学机械, 1980, 1:14-16.
LIN T J, WENG ZH H, GENG X L. Frequency stable CO₂ laser with SF₆ saturable absorption[J]. *Opt. Mech.*, 1980, 1:14-16. (in Chinese)
- [55] DAVID C THOMPSON, GEORGE E BUSCH, CLIFFORD J HEWITT, *et al.*. High-speed random access laser tuning[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(12):2545-2553.

作者简介:



徐 艳(1988—),女,陕西西安人,硕士研究生,2012年于西北工业大学获得学士学位,主要从事激光技术及其应用方面的研究。E-mail: 18792410097@163.com



杨贵龙(1966—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事大功率脉冲气体激光器方面的研究。E-mail: yanggl@ciomp.ac.cn



谢冀江(1959—),男,江苏镇江人,学士,研究员,硕士生导师,1983年于哈尔滨科学技术大学获得学士学位,主要从事激光器及其应用技术方面的研究。E-mail:laserxjj@163.com



陈 飞(1982—),男,河南南阳人,博士,副研究员,2005年于长春理工大学获得学士学位,2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2011年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事高功率激光器及非线性频率变化技术等方面的研究。E-mail:feichenny@126.com



李殿军(1957—),男,吉林长春人,研究员,主要从事激光器及其应用方面的研究。E-mail:lidj0906@163.com

《发 光 学 报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862,84613407

E-mail:fgxbt@126.com

国内统一刊号:CN 22-1116/04

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:12-312

国外发行代号:4863BM

http://www.fgxb.org