

文章编号: 1001-3806(2003)03-0208-03

## 电光调 $Q$ $\text{CO}_2$ 激光器进展

田兆硕 成向阳 王 骥

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨, 150001)

摘要: 总结了国内外电光调  $Q$   $\text{CO}_2$  激光器的发展, 介绍了不同激励方式、不同结构的电光调  $Q$   $\text{CO}_2$  激光器及其应用, 概括了理论研究结果。

关键词: 电光调  $Q$ ;  $\text{CO}_2$  激光器; 激励方式

中图分类号: TN248.2<sup>+</sup>2 文献标识码: A

### Developments of electric-optically $Q$ -switched $\text{CO}_2$ laser

Tian Zhaoshuo, Cheng Xiangyang, Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

**Abstract:** Developments of electric optically  $Q$ -switched  $\text{CO}_2$  laser are summarized. Lasers with different structures and different exciting methods and their applications are described. Finally the result of theoretical study is provided.

**Key words:** electric optically  $Q$  switch;  $\text{CO}_2$  laser; exciting method

### 引 言

电光  $Q$  开关  $\text{CO}_2$  激光器具有高脉冲重复频率、可编程输出、及输出稳定等优点, 目前已应用在激光雷达、激光光谱分析、远红外激光泵浦源等诸多方面<sup>[1-3]</sup>。电光调  $Q$   $\text{CO}_2$  激光器的发展经历了从直流放电激励到射频放电激励及脉冲放电激励的发展过程, 技术上已经逐渐趋于成熟。

### 1 电光调 $Q$ $\text{CO}_2$ 激光器的发展

#### 1.1 直流放电激励电光调 $Q$ $\text{CO}_2$ 激光器

1978 年, Marcus 等人报道了使用电光调  $Q$   $\text{CO}_2$  激光器作为光源的相干  $\text{CO}_2$  激光雷达<sup>[4]</sup>。其中光栅选支电光调  $Q$   $\text{CO}_2$  激光器结构如图 1 所示, 激光器主要由光栅、CdTe 电光晶体、CdS 波片、BeO 放电管和输出镜组成。放电管总长 130cm, 为了降低加在晶体上的电压, 采用 3/16 波片代替 1/4 波片, 可以降低电压 25%; 采用 CdTe 电光晶体进行电光调  $Q$ , 调  $Q$  脉冲重复频率 (PRF) 最高为 50kHz, 脉冲宽度为 300ns, 峰值功率约 300W, 在低脉冲重复频率时, 峰值功率可以达到 600W。



图 1 电光调  $Q$   $\text{CO}_2$  激光器

1979 年, Marcus 和 Curter 报道了电光  $Q$  开关波导  $\text{CO}_2$  激光器<sup>[5]</sup>, 调  $Q$  脉冲重复频率 (PRF) 为 108kHz 时, 连续输出功率为 13W, 最高 PRF 可达 345kHz, 此时占空比为 20%。在低频时输出峰值功率为 940W, 脉宽为 70ns, 在最高 PRF 时脉宽为 110ns。

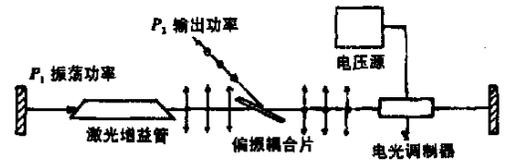


图 2 可编程电光开关波导  $\text{CO}_2$  激光器

由于电光调  $Q$  技术, 要求腔内激光在增益介质内传输为线偏振光, 因此腔内需要布氏窗检偏。如果采用加电压调  $Q$  时, 腔内还需要波片, 使激光器体积增大。为了减小激光器体积, Marcus 于 1981 年报道了紧凑结构的电光  $Q$  开关波导  $\text{CO}_2$  激光器<sup>[6]</sup>, 采用方波导结构可以限制激光的偏振方向, 采用退电压调  $Q$  方式可以省去波片, 激光器外型体积仅为 15cm  $\times$  20cm  $\times$  30cm, 其中波导长 15cm, 波导截面为 2mm  $\times$  2mm, 激光输出的脉冲波形与重复

作者简介: 田兆硕, 男, 1970 年 12 月出生。副教授。主要从事长波红外激光技术方面的研究。

收稿日期: 2002-06-04; 收到修改稿日期: 2002-10-15

频率与文献[5]中相同,但是脉冲宽度较宽,为700ns。为了满足多功能激光雷达的需要,Laugh和Wayne等人报道了应用于激光雷达的可编程电光开关波导CO<sub>2</sub>激光器<sup>[7]</sup>,其结构如图2所示,CdTe

电光调制晶体位于腔内,激光由布氏窗侧窗输出,通过改变晶体调制电压及其波形,可以获得调Q、锁模和腔倒空等激光波形输出,达到了可编程输出的目的,如表1所示。

表 1 可编程 CO<sub>2</sub> 激光器输出激光波形

调制形式	脉冲重复频率(PRF)	脉宽	正弦调制频率	脉冲波形
1. 连续波无调制	连续	不适用	不适用	
2. 连续正弦功率振幅调制	连续	不适用	$1 < f_m < 10^9 \text{ Hz}$	
3. Q 开关	$1 \leq \text{PRF} \leq 300 \text{ kHz}$	$100 \leq \tau \leq 500$	不适用	
4. Q 开关加功率振幅正弦调制	$1 \leq \text{PRF} \leq 300 \text{ kHz}$	$100 \leq \tau \leq 500$	$10^6 < f_m < 10^9 \text{ Hz}$	
5. Q 开关加腔倒空	$1 \leq \text{PRF} \leq 300 \text{ kHz}$	$20 \leq \tau \leq 150$	不适用	
6. 成型脉冲	$1 \leq \text{PRF} \leq 300 \text{ kHz}$	$10^2 \leq \tau \leq 10^4$	不适用	
7. Q 开关加锁模	$1 \leq \text{PRF}_m \leq 300 \text{ kHz}$	$100 \leq \tau_m \leq 500$ $1 \leq \tau_{ML} \leq 10$	$f_m = \frac{nc}{4L}$	
8. 连续锁模加腔倒空	$1 \leq \text{PRF}_m \leq nc/2L$	$1 \leq \tau \leq 10$	$f_m = nc/4L$	
9. Q 开关锁模加腔倒空	$1 \leq \text{PRF} \leq 300 \text{ kHz}$	$1 \leq \tau \leq 10$	$f_m = nc/4L$	

为了满足差分吸收激光雷达的需要, Fox 与 Gauthier 报道了快速调谐电光调 Q CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[8]</sup>, 结构如图 3 所示, 通过调整光栅谐振腔内全反镜角度, 获得不同的激光波长输出(9μm~11μm), 调整调 Q 晶体的电压方式, 可以获得不同的脉冲激光重复频率、峰值功率、脉冲宽度。



图 3 快速调谐电光调 Q CO<sub>2</sub> 激光器

1.2 射频激励电光调 Q CO<sub>2</sub> 激光器

1987 年, Ferranti 公司以 8W 连续激光器为基础研制了 CdTe 电光调 Q 射频波导 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[9]</sup>,

脉冲重复频率为 50kHz, 输出峰值功率为 250W, 模式为 EH<sub>11</sub> 模。

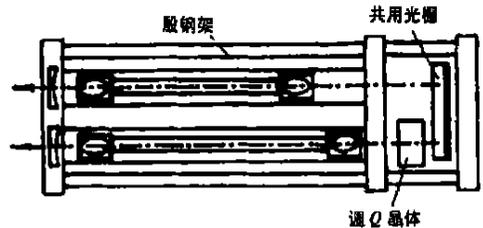


图 4 共用光栅的电光 Q 开关射频波导 CO<sub>2</sub> 激光器

1991 年, Pearson 报道了应用于多普勒激光雷达的射频波导电光 Q 开关 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[10]</sup>, 如图 4 所示。为保证外差频率稳定性, 主振激光器与本振激光器谐振腔共用 1 块光栅, 2 只激光器分别由独立的射频电源激励, 其中本振激光器连续激光输出, 主振激光器电光调 Q 脉冲激光输出, 脉冲重复可达

到 50kHz, 通过调节加在晶体上的高压脉冲宽度, 可以使激光脉冲宽度的变化范围从 180ns 到几毫秒。

1995 年, Mcmillan 等人介绍了一种多折叠腔射频激励波导电光 Q 开关 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[11]</sup>, 如图 5 所示, 此激光器巧妙利用 4 面反射镜, 激光束在 4 面反射镜间往复反射(如图中波导通道内粗实线所示), 使激光器在有限体积内大大增加了激活区长度, 输出功率提高很大。在调 Q 运转状态时, 脉冲重复频率可达 100kHz, 峰值功率 300W, 脉冲宽度 500ns。

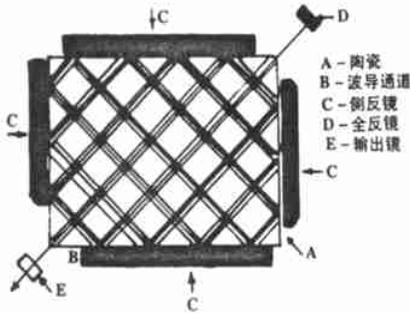


图 5 多折叠腔射频激励波导 CO<sub>2</sub> 激光器

国内在“九五”期间也进行了电光调 Q 射频波导 CO<sub>2</sub> 激光器的研究, 哈尔滨工业大学的王骥于 2000 年首先在国内报道了研制的电光调 Q 射频波导 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[12]</sup>, 获得调 Q 脉冲激光输出, 因受调 Q 晶体电源的限制, 脉冲重复频率最高为 10kHz, 峰值功率 300W。在此基础上他们又研制了高差频稳定的双通道电光调 Q 射频波导 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[13]</sup>(如图 6 所示), 两通道输出激光方向相反, 其中一个通道采用光栅选支连续输出激光, 可用压电陶瓷改变腔长调谐激光频率, 另一通道采用光栅选支电光调 Q 方式输出脉冲激光。获得调 Q 脉冲激光峰值功率 300W, 脉冲宽度 180ns, 短期外差频率稳定度可达 10<sup>-9</sup>。国内西南技术物理所研制的电光调 Q 射频波导 CO<sub>2</sub> 激光器目前已经达到在脉冲重复频率 40kHz 时输出激光峰值功率 300W 的水平。

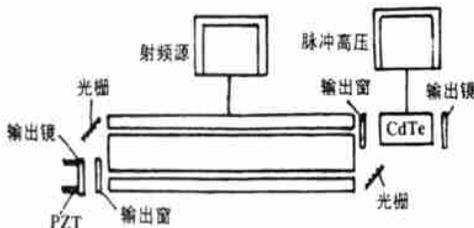


图 6 双通道电光调 Q 射频波导 CO<sub>2</sub> 激光器

### 1.3 脉冲放电激励电光调 Q CO<sub>2</sub> 激光器

1.3.1 电光调 Q TEA CO<sub>2</sub> 激光器 在 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的某些应用中(如测距), 希望消除主激光脉冲(50ns~100ns)后面的低强度拖尾(1μs~3μs), 而

Q 开关激光器的优点在于既能增加输出功率的同时又能消除拖尾。1983 年, Mangir 等人在 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的谐振腔中插入 CdTe 电光晶体(如图 7 所示), 激光功率增加了 25% 并且拖尾也消除了<sup>[14]</sup>。

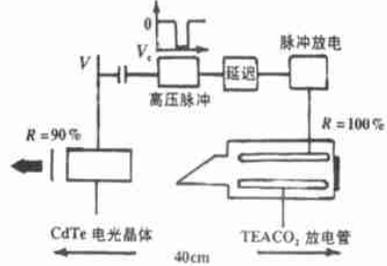


图 7 电光 Q 开关 TEA CO<sub>2</sub> 激光器

1.3.2 增益开关与 Q 开关结合的射频波导 CO<sub>2</sub> 激光器 单独的增益开关或 Q 开关射频波导 CO<sub>2</sub> 激光器也可以获得脉冲激光输出, 但在较高的脉冲重复频率时(如几千赫), 脉冲峰值功率只有几百瓦, 在许多方面应用受到限制, 为了在较高的脉冲重复频率时增加激光输出的脉冲峰值功率, 1992 年, Al-Shiraida 等人报道了增益开关与 Q 开关结合的射频波导 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[15]</sup>, 他们采用增益开关延时一定时间后打开 Q 开关的方法, 在脉冲重复频率为 1.3kHz 时获得 5.5kW 的峰值功率, 脉冲宽度为 60ns。

### 1.4 电光调 Q CO<sub>2</sub> 激光器理论研究进展

1989 年, Letalick 等人采用速率方程理论对 Q 开关 CO<sub>2</sub> 激光器动力学过程进行了理论分析<sup>[16]</sup>, 但是他们忽略了 CO<sub>2</sub> 气体的分解、各能级电子碰撞激发过程、振动能级间的振动弛豫过程, 而是主要考虑了转动能级的弛豫过程, 因此与实验结果比较, 理论计算的调 Q 激光脉冲宽度较“窄”, 而且激光脉冲拖尾太小。

哈工大田兆硕等人把 CO<sub>2</sub> 激光器动力学的 6 温度模型理论应用于 Q 开关 CO<sub>2</sub> 激光器动力学过程的分析<sup>[17]</sup>, 不仅考虑了转动能级的弛豫过程, 而且考虑了 CO<sub>2</sub> 气体的分解、各能级电子碰撞激发过程、振动能级间的振动弛豫过程, 理论计算的调 Q 激光脉冲峰值功率、脉冲宽度与实验符合较好, 拖尾现象也与实验符合。另外, 6 温度模型理论可以全面反映激光器工作气体中不同分子能级的能量转移过程。

## 2 发展应用前景

目前, 电光调 Q CO<sub>2</sub> 激光器理论与技术发展基

(下转第 213 页)

值与模具侧壁表面粗糙度有关系。当达到光学上要求的光洁度时,才能发光。由 4 个发射面形成的光学振荡器,只以一些特定的分立频率振荡,谐振腔的长度总是谐振频率的半波长的

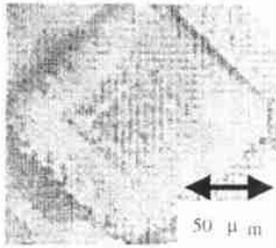


Fig. 5 Micrograph of the excited microcavities

整数倍。对于一个给定的腔长有许多分立的频率(即纵模)振荡。然而,只有在激光介质的增益包络线内才能有受激发射,带宽之外的频率由于没有辐射而不能形成振荡。由于只能在对应于腔纵模的特定分立频率上形成振荡,故而只能在这些频率上维持受激发射,最终发射的光的光谱是腔模和激光增益的作用结果。图 6 为该复制的微小谐振腔在室温下用光谱仪(PMA-100, hamamatsu photonics)测得的发光光谱。Rh6G 发光光谱中许多尖峰是等间隔的,表示多模谐振。从微小谐振腔尺寸,设  $\lambda_0$  为中心波长, $n$  为 PMMA 的折射率, $L$  为光在介质中传

播一圈的长度,则光谱峰值间隔为  $\lambda = \lambda_0^2 / 2nL = 600 \times 600 / (2 \times 1.49 \times 282800) = 0.427\text{nm}$ ,这与实验值如图 6 所标的 1nm 长度中有 3 个峰值,即峰值间隔约 0.333nm 基本一致。

从图 6 看出,提高 Nd:YAG 自倍频绿光(532nm)激光器泵浦 Rh6G 染料激光的功率,能得到较大的激光输出。该微小谐振腔的阈值是 23mW。

## 4 结 论

利用 Si<110>晶面,制作了光学程度平坦面的四角形微小谐振腔。硅微小谐振腔模具的侧面经测定,达到光学表面。利用激光染料若丹明 6G 掺杂的聚甲基丙烯酸甲酯,在调 Q Nd:YAG 自倍频激光 532nm 泵浦下,得到 590nm 波长附近的激光输出。

该项研究得到日本文部省的资助,大部分工作在日本东北大学风险事业实验室(VBL)完成。

## 参 考 文 献

- [1] Slusher R E, Pearon S J, McCall S L *et al.* A P L, 1992, 60(3): 289~ 291.
- [2] Ando S, Kobayashi N, Ando H. Japan J A P, 1995, 34(1): L4~ L6.
- [3] Okayasu M, Oku S, Ikeda M. IEEE Photo Technol Lett, 1991, 3(3): 588~ 590.
- [4] Wu S L, Ho S T, Bi W G *et al.* Phys Rev Lett, 1995, 75(9): 2678~ 2681.
- [5] Sasaki M, Li Y, Akatu Y *et al.* Japan J A P, 2000, 39(12B): 7145~ 7149.
- [6] Seidel H, Csepregi A, Heuberger A *et al.* J Electrochem Soc, 1990, 137(12): 3612~ 3626.

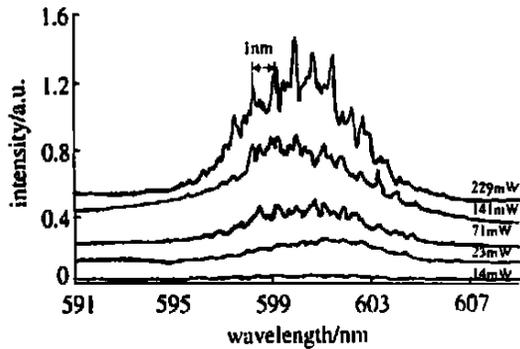


Fig. 6 Spectra of Rh6G dye laser

(上接第 210 页)

本成熟,可以在许多领域得到应用,现在市场上已经有商品出售,但是由于调 Q 晶体与电源造价高,并且激光器结构相对复杂,所以价格较贵,限制了电光调 Q CO<sub>2</sub> 激光器广泛应用。随着技术的发展,造价将进一步降低,可以预见电光调 Q CO<sub>2</sub> 激光器将有更加广泛的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Ahlberg H, Lanqvist S, Letalio K D *et al.* Appl Opt, 1986, 25(17): 2891~ 2892.
- [2] Piltingsrud H V. Appl Opt, 1991, 30(27): 3952~ 3963.
- [3] Mueller E R, Wilson T E, Waldman J. A P L, 1994, 64(25): 3383~ 3385.
- [4] Marcus S, Caunt J W. Rev Sci Instrum, 1978, 49(10): 1410~ 1412.
- [5] Marcus S, Carter G M. Appl Opt, 1979, 18(16): 2824~ 2826.

- [6] Marcus S. Rev Sci Instrum, 1981, 52(3): 482~ 483.
- [7] Laughman L M, Wayne R J. SPIE, 1981, 300: 163~ 171.
- [8] Fox J A, Gautier C R. Rev Sci Instrum, 1989, 60(7): 1256~ 1261.
- [9] Miller G M, Williams C A. SPIE, 1987, 806: 14~ 20.
- [10] Pearson G N, Rye B J. Appl Opt, 1992, 31(30): 6475~ 6484.
- [11] McMillan R C, Davidson R B. SPIE, 1995, 2472, 132~ 141.
- [12] 王 骐, 田兆硕, 王雨三 *et al.* 中国激光, 2000, A22(2): 97~ 100.
- [13] Wang Q, Tian Zh Sh, Wang Y S. Infrared Physics & Technology, 2000, 41(6): 349~ 352.
- [14] Mangir M S, Parazzoli C G. Proceeding of CLEO/Conference on laser and Electro optics, 1983: 130~ 132.
- [15] Shiradia Y S, Paukon M, Rosadiuk T *et al.* Rev Sci Instrum, 1992, 63(7): 3575~ 3578.
- [16] Letalick D, Renhom I, Widen A. Opt Engng, 1989, 28(2): 172~ 179.
- [17] 田兆硕, 王 骐, 李自勤. 物理学报, 2001, 50(12): 2369~ 2374.