

文章编号: 0258-7025(2005)06-0739-04

高重复频率可调谐 TEA CO₂ 激光研究

谭荣清, 万重怡, 吴 谨, 刘世明, 王东蕾, 周锦文, 唐永新, 王 永, 赵 冲,
万 朋, 程 亮, 芦葱葱, 齐继兰

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要 以研制平均功率千瓦级的实用化高重复频率可调谐 TEA CO₂ 激光器为目标, 分别研究了注入锁定、低锐度法布里-珀罗(F-P)耦合腔、光栅选线等三种调谐方法。利用光栅选线的方案, 采用光栅谐振腔, 实现了平均功率千瓦级的高重复频率 TEA CO₂ 激光调谐输出。激光器输出 10P(20), 10R(20), 9P(20), 9R(20) 线的脉冲能量分别为 5.8 J, 5.8 J, 5.5 J, 5.6 J, 重复频率 200 Hz, 光束远场发散角为 1.66 mrad(水平)与 1.43 mrad(竖直), 约为 2 倍衍射极限。

关键词 激光技术; TEA CO₂ 激光器; 高重复频率; 可调谐

中图分类号 TN248.2⁺1 **文献标识码** A

Investigation on Tunable High Repetition Rate TEA CO₂ Laser

TAN Rong-qing, WAN Chong-yi, WU Jin, LIU Shi-ming, WANG Dong-lei,
ZHOU Jin-wen, TANG Yong-xin, WANG Yong, ZHAO Chong, WAN Peng,
CHENG Liang, LU Cong-cong, QI Ji-lan

(Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Tunable high repetition rate transversely excited atmospheric-pressure (TEA) CO₂ laser has potential applications in laser chemistry, laser radar and optically pumped far-infrared laser investigation. In this paper, with the aim of development of kilowatt-level high repetition rate tunable TEA CO₂ laser, inject-locking method, low fitness Fabry-Perot (F-P) coupler method and grating line selection method were investigated. With the method of grating line selection, kilowatt-level high repetition rate tunable TEA CO₂ laser output was realized by grating resonator. The pulse energies of 10P(20), 10R(20), 9P(20) and 9R(20) are 5.8 J, 5.8 J, 5.5 J and 5.6 J respectively, at the repetition rate of 200 Hz. The far-field divergence angles are 1.66 mrad (horizontal) and 1.43 mrad (vertical), namely, about 2 times of diffraction limitation.

Key words laser technique; TEA CO₂ laser; high repetition rate; tunable

1 引 言

高重复频率可调谐横向激励大气压(TEA)CO₂ 激光器由于具有输出波长在 9~11 μm 范围内可调以及能同时输出较高的平均功率和脉冲峰值功率的特点, 在激光化学、激光雷达、光抽运远红外研究等领域有着广泛的应用前景^[1~4]。目前, 国际上在可调谐 TEA CO₂ 激光器研制方面已经报道的代表性工作主要有俄罗斯 A. I. Karapuzikov 等^[3] 研制的光栅选支 TEA CO₂ 激光器, 在 9R, 9P, 10R, 10P

四个分支的多条谱线上均实现了激光输出, 在上述每一分支的最强线输出能量分别达到 8.8 J, 7.8 J, 6.8 J, 7.9 J, 重复频率最高为 2 Hz, 该激光器适用于远程激光差分吸收雷达中。国内曲彦臣等^[4] 在重复频率快调谐 TEA CO₂ 激光器方面做了较多工作, 所研制的激光器输出能量 30~100 mJ, 重复频率 100 Hz。本文中, 以研制脉冲能量 5 J 以上, 重复频率可达到 200 Hz 的高重复频率可调谐 TEA CO₂ 激光器为目的, 通过对调谐方法的研究, 采用光栅选

收稿日期: 2004-06-04; 收到修改稿日期: 2004-08-11

作者简介: 谭荣清(1966—), 男, 辽宁辽阳人, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士, 主要从事高功率气体激光及应用研究。E-mail: rongqingtan@163.com

线的方案,实现了平均功率千瓦级的 TEA CO₂ 激光调谐输出。

2 调谐方法

CO₂ 的振转能级在 9~11 μm 波段有 100 多条谱线,其中波长为 10.6 μm 附近的 10P(20) 等几支谱线的增益最高,因此通常的 CO₂ 激光器输出波长为 10.6 μm。通过采用频率调谐技术,可以实现在 9~11 μm 范围内的选线振荡输出。

2.1 注入锁定

所谓注入锁定的方法,就是将一束特定波长的低功率激光注入到高平均功率 TEA CO₂ 激光谐振腔中作为“种子”光,使高平均功率 TEA CO₂ 激光也在同一波长振荡输出。通过调谐低功率注入激光器的波长,实现对高平均功率主激光器的调谐。实验装置如图 1 所示^[5]。

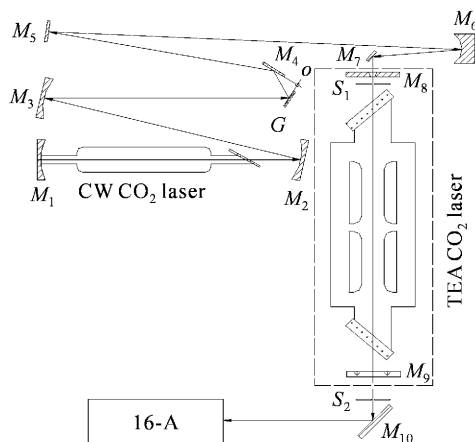


图 1 注入锁定调谐方案示意图

Fig. 1 Schematic of inject-locking scheme

图 1 中, $M_1 \sim M_8$ 以及 M_{10} 为全反射镜, M_9 为 Ge 输出镜, G 为闪耀光栅, S_1, S_2 为光阑, 16-A 为光谱仪。发射“种子”光的是一台输出功率为 5 W 的普通纵向放电 CW CO₂ 激光器, 采用光栅调谐。激光器输出光束经小孔耦合注入一高重复频率 TEA CO₂ 激光谐振腔中, 该主激光器输出光束经适当衰减后进入 CO₂ 激光光谱仪中测量输出激光波长。

采用该方法, 虽然有控制简单、激光器输出脉冲能量不直接受光栅等调谐元件损伤阈值限制等优点, 但激光器输出中除含有注入激光波长外往往含有增益最高的 10P(20) 成分, 较难实现单一波长输出。

2.2 低锐度法布里-珀罗耦合腔

采用低锐度的法布里-珀罗调制器直接代替高重

复频率 TEA CO₂ 激光谐振腔的输出镜, 激光经法布里-珀罗耦合后直接输出, 可以实现激光器调谐输出^[6,7]。实验装置如图 2 所示。

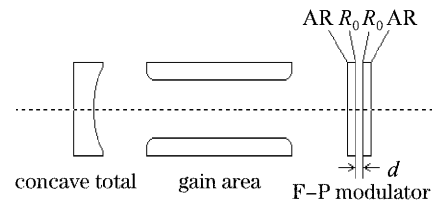


图 2 低锐度法布里-珀罗耦合腔

Fig. 2 Low finesse F-P coupling resonator

图 2 中, 法布里-珀罗耦合腔两镜片的间距 d 由压电陶瓷(PZT)控制, 它与作为端镜的全反射凹面镜组成法布里-珀罗耦合腔。忽略吸收及衍射等损耗, 波长为 λ 的激光在低锐度法布里-珀罗耦合腔内往返一次的净增益为

$$G(\lambda) = 2\alpha(\lambda) + \ln R(\lambda), \quad (1)$$

其中 $\alpha(\lambda)$ 为小信号增益系数, $R(\lambda)$ 为法布里-珀罗耦合腔的反射率

$$R(\lambda) = \frac{4R_0 \sin^2(2\pi d/\lambda)}{(1 - R_0)^2 + 4R_0 \sin^2(2\pi d/\lambda)}, \quad (2)$$

其中, R_0 为法布里-珀罗每片镜片的反射率。

由(1), (2)式可以看出, 通过控制法布里-珀罗的间距, 可以在一定范围内控制(1)式中的第二项, 进而可以在一定程度上控制不同波长的净增益, 实现波长调谐。

采用该方法实现调谐, 具有激光器结构简单、调谐迅速、波长控制灵活等优点。通过分析(1)式可以看出, 该方法主要适用于增益长度较短的情况, 这时(1)式中的第二项的影响显著。而对于腔长较长的情况, (1)式中第二项的变化不足以对净增益产生显著影响, 这时该方法将不再适用。

2.3 光栅选线

光栅的衍射特性决定了光栅具有很好的频率选择能力^[8], 尤其适用于腔长较长、增益较高的情况。采用光栅选线的常用方法主要有两种: 一种是零级耦合输出, 即将光栅的一级衍射反馈回谐振腔内而将零级衍射耦合输出, 采用该方案可以将光栅损失的影响降到最小; 另一种是光栅谐振腔方案, 即以反射光栅和输出耦合镜组成可调谐激光谐振腔, 通过控制光栅的转动角度达到对振荡频率的选择。该方案的优点是谐振腔结构简单、易于控制。采用该方案, 实现了平均功率千瓦级的高重复频率可调谐激光输出。

3 光栅选线高重复频率 TEA CO₂ 激光器

3.1 激光器设计

激光器主体结构形式为组件式结构,由两节完全类似的组件组成。每节组件包括一对主放电电极、预电离器、切向风机、热交换器、风道及外壳等部分。两节组件的外壳采用橡皮圈密封连接,形成激光器的密封腔体。

激光器的主放电电极采用经特殊设计的均匀场电极^[9],电极间距 50 mm,有效放电宽度约 25 mm,激光器总的增益体积约 1.4 L。为了在得到合适的预电离效果的同时尽量减小对工作气体的分解,采用了一种新型的预电离结构——印刷电路板预电离^[10]。

采用切向风机,激光器的外壳与气流通道较好吻合,使激光器的结构更加紧凑。为了使通过放电喉道的气流速度更为均匀,在气流通道中设置了整流装置。在放电喉道处,气流速度大于 20 m/s。在激光器的重复频率达到 200 Hz 时,相应的气流清洗系数大于 4。

为了得到较好的光束质量,提高增益介质的利用效率和激光器的紧凑性,采用“N”形折叠腔结构。激光谐振腔的结构如图 3 所示。采用闪耀光栅作为调谐元件。激光谐振腔由一级衍射效率达 96% 的闪耀光栅,两面平面转折全反射镜以及凹面输出镜组成,输出镜曲率半径为 20 m,透过率 50%。激光器的实际腔长为 2.2 m,折叠腔的等效光学长度为 6.6 m,等效增益长度为 2.2 m。

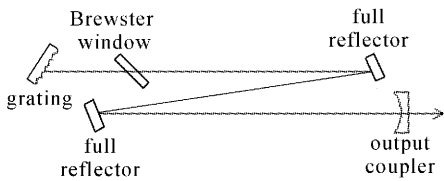


图 3 激光谐振腔
Fig. 3 Laser resonator

3.2 单脉冲运转

在单脉冲运转的情况下,实现了光栅谐振腔选线输出,经采用 CO₂ 激光光谱仪实际测量,激光器具有良好的选线性能。重点研究了 10P,10R,9P,9R 跃迁带中增益最高的 10P(20),10R(20),9P(20),9R(20)四条谱线的输出特性。图 4 所示为这四条谱线的输出光斑形状,光斑直径分别约为 23 mm,23 mm,24 mm和 25 mm。测量了 10P(20)激

光的远场发散角,光束对应水平方向和竖直方向的远场发散角略有差异,分别为 1.66 mrad 与 1.43 mrad,约为 2 倍衍射极限。图 5 为输出波长分别为 10.6 μm 和 9.3 μm 时,输出脉冲能量及相应电光转换效率曲线。从图 5 中可以看出,当激光器的工作电压达到 28 kV 以上时,虽然提高工作电压可以进一步提高激光器输出脉冲能量,但激光器的电光转换效率已经趋于饱和。

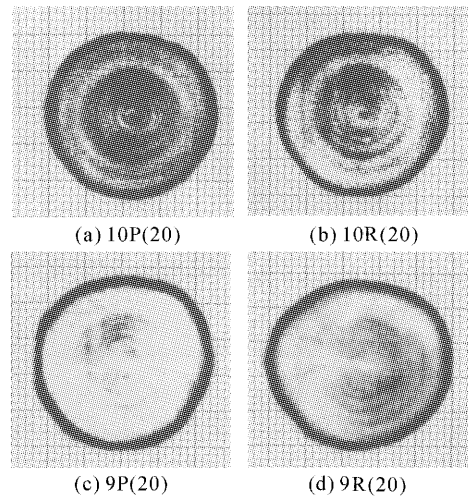


图 4 输出光斑形状
Fig. 4 Beam profile

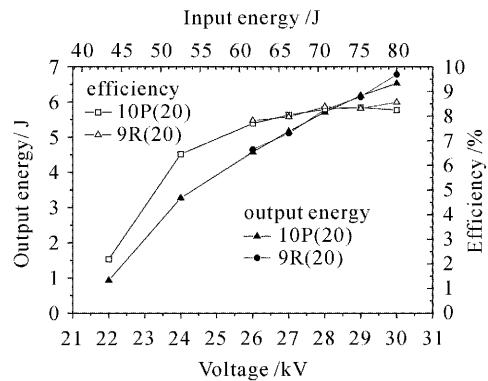


图 5 10P(20)及 9R(20)激光脉冲能量和相应电光转换效率
Fig. 5 Laser energy and efficiency of 10P(20) and 9R(20)

3.3 重复频率运转

分别以输出 10P(20), 10R(20), 9P(20), 9R(20)的情况为例,实现了高重复频率运转,激光器输出平均功率如表 1 所示。表 1 给出了激光器工作电压 28 kV,重复频率 200 Hz 的情况。根据表 1 的数据,平均每脉冲输出能量分别为 5.8 J, 5.8 J, 5.5 J, 5.6 J, 比较图 5 中单脉冲输出的情况,单脉冲和重复频率工作时,单脉冲输出能量大体相同,说明

激光器具有良好的重复频率工作特性。

表 1 高重复频率输出参量

Table 1 High-repetition-rate output parameters

Wavelength / μm	Repetition rate /Hz	Output average power /W	Input electric power /kW	Electrooptical efficiency /%
10.6	200	1168	13.4	8.46
10.2	200	1168	13.4	8.46
9.6	200	1107	13.4	8.02
9.3	200	1125	13.4	8.15

4 结 论

通过对注入锁定、低锐度法布里-珀罗耦合腔以及光栅选线等几种调谐方案的研究可以看出,虽然这几种方案各有特色,但综合考虑频率调谐特性、稳定性、实用性等因素,光栅选线的方案最为合适。在本工作中,采用光栅谐振腔,实现了平均功率千瓦量级的高重复频率 TEA CO₂ 激光波长调谐输出。激光器输出 10P(20),10R(20),9P(20),9R(20) 线激光的脉冲能量分别达到 5.8 J,5.8 J, 5.5 J,5.6 J,重复频率 200 Hz。

参 考 文 献

- Huang Jinzhe, Ren deming, Zhang Lili *et al.*. Experimental research on the second harmonic generation of TEA CO₂ laser in AgGaSe₂ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 559~562
黄金哲,任德明,张莉莉等. TEA CO₂ 激光在 AgGaSe₂ 晶体中的倍频实验研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 559~562
- Zhang Lianshui, Zhang Guiyin, Fu Guangsheng *et al.*. Study on the process of SiH₄ breakdown irradiated by frequency tunable TEA CO₂ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(8): 624~627
张连水,张贵银,傅广生等. 可调谐 TEA CO₂ 激光辐照 SiH₄ 击穿过程的研究 [J]. *中国激光*, 1992, **A19**(8): 624~627
- A. I. Karapuzikov, A. N. Malov, I. V. Sherstov. Tunable TEA CO₂ laser for long-range DIAL lidar [J]. *Infrared Phys. & Technol.*, 2000, **41**(2): 77~85
- Qu Yanchen, Ren Deming, Hu Xiaoyong *et al.*. Research of rapidly tuning technology of miniature TEA CO₂ laser [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(6): 547~550
曲彦臣,任德明,胡孝勇等. 小型 TEA CO₂ 激光器的快速调谐技术研究 [J]. *激光技术*, 2003, **27**(6): 547~550
- Wu Jin. A theoretical investigation to the tuning characteristics of high power TE(A) CO₂ lasers [D]. PhD Thesis, Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, 2001
吴 谨. 高功率 TE(A) CO₂ 激光器的调谐理论研究 [D]. 中国科学院电子学研究所博士学位论文,2001
- Wan Peng, Tan Rongqing, Wu Jin *et al.*. Transition band selection of TEA CO₂ laser [J]. *Applied Laser*, 1999, **19**(6): 338~340
万 朋,谭荣清,吴 谨等. TEA CO₂ 激光跃迁带选择 [J]. *应用激光*, 1999, **19**(6): 338~340
- Jin Wu, Chongyi Wan, Rongqing Tan *et al.*. High repetition rate TEA CO₂ laser with randomly coded wavelength selection [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 601~603
- Wu Jin. Theoretical mode on calculating grating tuned TEA CO₂ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 472~476
吴 谨. 光栅调谐 TEA CO₂ 激光器理论计算模型 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 472~476
- Sheng Yugang, Wan Chongyi. Design for 3D uniform field electrodes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(12): 1093~1096
绳宇纲,万重怡. 三维均匀场电极的设计 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(12): 1093~1096
- Cheng Liang, Wan Chongyi, Zhou Jinwen *et al.*. A mini TEA CO₂ laser using printed circuit board preionization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1): 7~9
程 亮,万重怡,周锦文等. 印刷电路板预电离小型 TEA CO₂ 激光器 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1): 7~9