

文章编号: 0258-7025(2010)09-2389-06

基于管状预电离的光栅选线 TEA CO₂ 激光器

吉洪煦^{1,2} 谭荣清¹ 刘世明¹ 朱玉峰^{1,2} 文康^{1,2} 王东蕾¹ 曾元¹

(¹ 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 研制了一种基于管状预电离的可调谐横向激励大气压(TEA)CO₂激光器。激光器采用光桥结构和折叠腔技术,输出稳定、结构紧凑。采用光栅谐振腔,实现了激光的调谐输出。激光器可输出谱线 73 条,波长范围为 9.19~10.86 μm,其中 45 条谱线输出能量大于 2 J。对于 P₁₀(20), R₁₀(20), P₉(20), R₉(20) 四条谱线,获得最大的激光脉冲能量分别为 5.3, 5.4, 5.5, 5.1 J, 对应的电-光转换效率分别为 9.6%, 9.8%, 10.0%, 9.3%; 获得的最高电-光转换效率依次为 10.3%, 10.7%, 10.7%, 10.7%。在气压为 30 kPa 下,激光器获得的最大比注入能量为 2.626 J/(L·kPa), P₉(20) 谱线获得的最大比输出能量为 0.205 J/(L·kPa)。测量了不同气压下的四条谱线的激光脉冲波形,输出的激光脉冲宽度值有所不同,其中 R₉(20) 的脉冲宽度最大。测量了光束远场发散角,其值为 2.6 mrad。实现了激光器的高重复频率可调谐输出,重复频率最高可达 190 Hz。

关键词 激光器; TEA CO₂ 激光器; 管状预电离; 高重复频率; 可调谐

中图分类号 TN248.2⁺2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103709.2389

Grating Line Selectable TEA CO₂ Laser with Tubulous Preionizer

Ji Hongxu^{1,2} Tan Rongqing¹ Liu Shiming¹ Zhu Yufeng^{1,2}
Wen Kang^{1,2} Wang Donglei¹ Zeng Yuan¹

(¹ Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A tunable TEA CO₂ laser with tubulous preionizer is developed. With optical bridge and folded cavity, laser is compact and stable. Tunable laser output is realized by grating resonator. 73 lines of the CO₂ molecule rotational transition which wavelengths range from 9.19 to 10.86 μm are obtained, and there are 45 lines whose pulse energies of laser radiation exceed 2 J. The maximum pulse energies of P₁₀(20), R₁₀(20), P₉(20), R₉(20) are 5.3, 5.4, 5.5 and 5.1 J with the corresponding electro-optical efficiency of 9.6%, 9.8%, 10.0%, 9.3%; The maximal electro-optical efficiency of the above four lines are 10.3%, 10.7%, 10.7% and 10.7% respectively. Under the gas pressure of 30 kPa, the maximal specific injection energy is 2.626 J/(L·kPa), and the maximal specific output energy of P₉(20) is 0.205 J/(L·kPa). Laser pulse waveforms of the above four lines with different gas pressures are measured; The output pulse widths vary from each other, and the width of R₉(20) is the largest. The far-field divergence angle is 2.6 mrad. Tunable high repetition laser output is realized at the repetition rate of 190 Hz.

Key words lasers; TEA CO₂ laser; tubulous preionizer; high repetition rate; tunable

1 引 言

高重复频率可调谐横向激励大气压(TEA) CO₂ 激光器除具有一般 TEA CO₂ 激光器的优点外,还具

有输出波长在 9~11 μm 范围内可调谐,以及能同时输出较高的平均功率和脉冲峰值功率的特点。因此其在激光雷达^[1]、激光推进^[2]、激光水声探测^[3]、激光

收稿日期: 2010-05-06; 收到修改稿日期: 2010-06-22

作者简介: 吉洪煦(1986—),男,硕士研究生,主要从事新型预电离可调谐气体激光器方面的研究。

E-mail: jhxcas@126.com

导师简介: 谭荣清(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率气体激光及应用等方面的研究。

E-mail: rongqingtan@163.com

抽运远红外^[4]等领域有着广阔的应用前景。

为了实现 TEA CO₂ 激光器的调谐输出,通常使用的调谐方法包括:注入锁定、低锐度法布里-珀罗(F-P)耦合腔^[5]及光栅选线等。其中光栅选线是最常用的一种方法,光栅的衍射特性决定了光栅具有很好的频率选择能力,尤其适用于增益较高、腔长较长的情况。在 TEA CO₂ 激光器等横向放电激励的脉冲气体激光器中,为了获得大体积下的均匀稳定辉光放电,通常需要采用预电离技术。常用的预电离技术有:火花针阵列预电离^[6]、电晕预电离^[7]、半导体预电离^[8]、印刷电路板预电离^[9]等。在前期工作中,所研制的高重复频率可调谐 TEA CO₂ 激光器^[10]采用印刷板预电离,激光器主体为两节组件串联的结构形式,放电增益区总长度 1.1 m, P₁₀(20), R₁₀(20), P₉(20), R₉(20) 四条谱线输出激光脉冲能量分别为 5.8, 5.8, 5.5, 5.6 J, 电-光转换效率依次为 8.46%, 8.46%, 8.02%, 8.15%。本文采用紧凑的单组件形式,基于一种新型的预电离结构——“管状预电离”^[11],利用光栅选线方案,设计了一种采用光桥的折叠型光栅谐振腔,在长度为 0.55 m 的增益区内,实现了较高脉冲能量的调谐输出。

2 激光器设计

激光器主体结构包括一对主放电电极、预电离器、切向风机、热交换器、风道、外壳及光桥等部分。采用切向风机,激光器的外壳与气流通道较好吻合,使得通过放电喉道的气流速度较为均匀,同时也使得激光器的结构更加紧凑。

激光器的管状预电离电极组件结构^[11]如图 1 所示。主放电阳极即上电极为 Ernst 电极;主放电阴极即下电极为经验电极;电极间距约为 50 mm,激活区长度约为 550 mm,激活区宽度约为 25 mm,则主电极形成的激活体积约为 0.69 L。管状预电离器位于主放电阴极两侧,其结构的对称轴与主放电电极对的对称轴平行。管状预电离结构采用管状同轴分布电容耦合器形式,由同轴圆柱形电容单元阵列和预电离针阵列组成。在有效长度约为 600 mm 的管状预电离器上均匀分布了 82 个小圆环阵列,形成均匀的火花放电阵列。这样的结构设计在更紧凑的空间中获得了较好的预电离强度和均匀性的效果,有利于获得较高的电-光转换效率和高重复频率的激光输出。

2.1 激光器的激励电路

激光器的放电电路如图 1 所示,整个放电过程

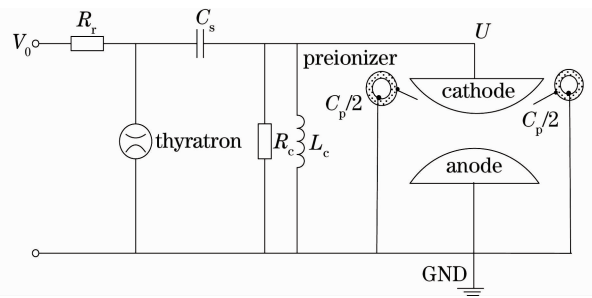


图 1 激光器激励电路示意图

Fig. 1 Schematic of the excitation circuit

如下:首先直流高压电源通过限流电阻 R_r 给储能电容 C_s 充电至工作电压 V_0 ;之后闸流管导通,储能电容 C_s 上的高压加在主电极对和预电离支路上,电压 U 快速上升;由于预电离气隙很小其首先击穿产生火花放电;预电离放电产生的电弧电流对此分布式电容耦合器 C_p 充电,此过程中放电火花阵列产生的紫外光辐射使主放电空间形成初始电子分布,当电子分布达到一定浓度后,主放电区导通,形成辉光放电;预电离电容与激光器储能电容对主放电空间工作气体放电而完成整个脉冲激励过程。

2.2 采用光桥的谐振腔结构

为了较好地保证谐振腔结构的稳定性,研制了一种采用光桥的谐振腔^[12]。光桥主要由光桥杆及光桥端板组成,组成谐振腔的光学元件安装在光桥端板上。实验中采用光栅谐振腔方案,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。谐振腔结构如图 2 所示。

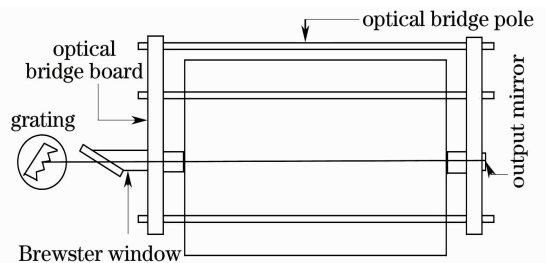


图 2 激光器谐振腔

Fig. 2 Laser resonator

为了提高增益介质的利用率,并且使得结构较为紧凑,采用 N 型折叠腔结构,激光器的实际腔长为 1.2 m,折叠腔的等效光学长度为 3.6 m。采用闪耀光栅作为调谐元件。谐振腔由一级衍射效率为 95%,光栅常数为 80 line/mm 的闪耀光栅,一个曲率半径为 20 m 的 ZnSe 凹面输出镜,两个镀金的铜全反射镜,及一个 ZnSe Brewster 窗组成。激光器调谐结构由单片机控制的步进电机、零点定位器、触

发器和光栅组成。其中零点定位器采用高精度开关作为光栅旋转台的零点开关,其重复精度小于 1 μm。

3 实验结果

在单脉冲运转的方式下,使用步进电机控制光栅转动的角度,实现了光栅谐振腔选线输出。使用 Gentec-EO 公司制造的能量计测量激光单脉冲能量,及 Optical Engineering 公司生产的激光光谱仪测量波长值。

实现了整个 CO₂ 激光可调谐区域的调谐输出,在注入能量为 28.8 J,气压为 40 kPa 条件下,获得了 R₉, P₉, R₁₀, P₁₀ 四支激光辐射谱。所得谱线如图 3 所示,共得到谱线 73 条,它们分别是:R₉ 支的 17 条谱线,跃迁谱线范围为 R₉(4)~R₉(36),对应波长范围为 9.19~9.37 μm;所得谱线的能量范围为 0.8~3.0 J,其中能量大于 2 J 的谱线有 11 条,能量在 1 J 与 2 J 之间的谱线有 5 条,能量小于 1 J 的谱线只有 1 条。P₉ 支的 17 条谱线,其跃迁谱线范围为 P₉(6)~P₉(38),对应波长范围为 9.44~9.71 μm,所得谱线的能量范围为 0.7~2.8 J,其中能量大于 2 J 的 10 条,能量在 1 J 与 2 J 之间的谱线有 5 条,能量小于 1 J 的谱线有 2 条。R₁₀ 支的 18 条谱线,其跃迁谱线范围为 R₁₀(4)~R₁₀(38),对应波长范围为 10.14~10.37 μm;所得谱线的能量范围为 0.8~2.9 J,其中能量大于 2 J 的谱线有 12 条,能量在 1 J 与 2 J 之间的谱线有 5 条,能量小于 1 J 的谱线只有 1 条。P₁₀ 支的 21 条谱线,其跃迁谱线范围为 P₁₀(4)~P₁₀(44),对应波长范围为 10.44~10.86 μm;所得谱线的能量范围为 0.3~2.9 J,其中能量大于 2 J 的谱线有 12 条,能量在 1 J 与 2 J 之间的谱线有 4 条,能量小于 1 J 的谱线有 5 条。从以上结果可以看出,所测得的谱线范围从最短的 9.19 μm 到最长的 10.86 μm。测得的单脉冲能量

从弱线的 0.3 J 到强线的 3.0 J;其中单脉冲能量超过 2 J 的有 45 条谱线,单脉冲能量在 1 J 至 2 J 之间的有 19 条谱线,1 J 以下的有 9 条谱线。

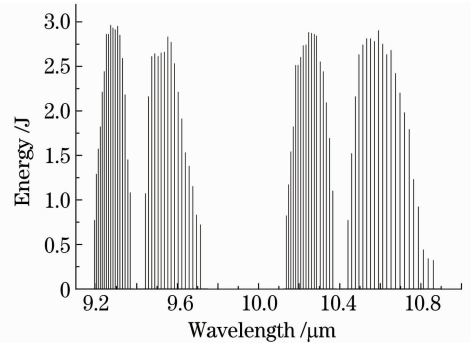


图 3 整个可调谐区域输出的激光辐射谱

Fig. 3 Radiation spectrum of whole tunable region

重点研究了 P₁₀, R₁₀, P₉, R₉ 四支中增益较高的 P₁₀(20), R₁₀(20), P₉(20), R₉(20) 四条谱线的输出特性。除气体配比实验外,实验中所用的激光工作气体 CO₂, N₂, He 混合体积比为 1:1:4,输出耦合率为 60%。

研究了注入能量与激光脉冲能量的关系,这里通过两种方法改变注入能量,第一种是改变放电电压的方法,第二种是增大储能电容的方法。分别测量了 C_s = 60, 85 nF 两种储能电容下气压分别为 30, 35, 40, 45 kPa 的四条谱线随注入能量变化的单脉冲能量值。图 4, 5 所示为 R₉(20) 及 P₁₀(20) 两条谱线在两种电容下的激光脉冲能量随注入能量变化的关系曲线。

从图 4, 5 可以看出,在每个气压条件下,两种电容下的激光脉冲能量都随着注入能量的增大而单调增高。在 C_s = 60 nF 下的激光脉冲能量随着气压的加大先增高后降低,当 30 kPa 加大 5 kPa 后能量有明显增高;但再加大 5 kPa 后能量基本与 35 kPa 时相当,并没有较大的增高;随着气压加大到 45 kPa,

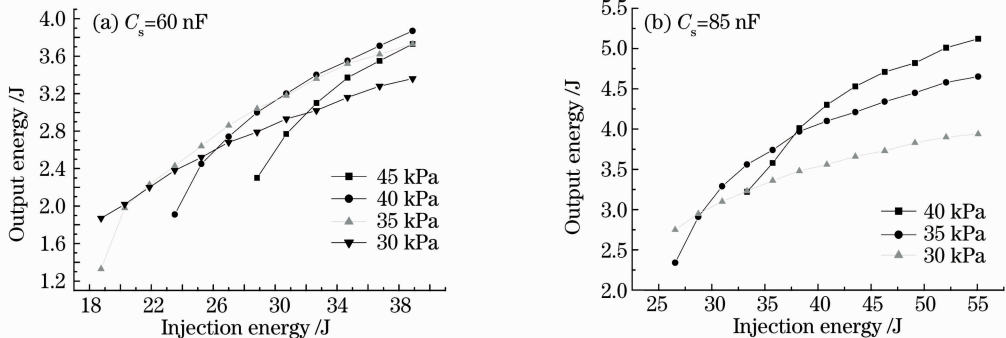
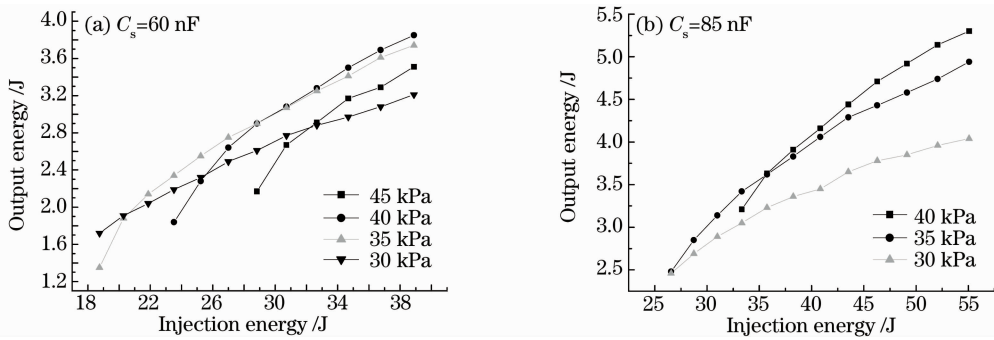


图 4 不同气压下 R₉(20) 激光脉冲能量曲线

Fig. 4 Laser energy of R₉(20) under variable gas pressures

图5 不同气压下 $P_{10}(20)$ 激光脉冲能量曲线Fig. 5 Laser energy of $P_{10}(20)$ under variable gas pressures

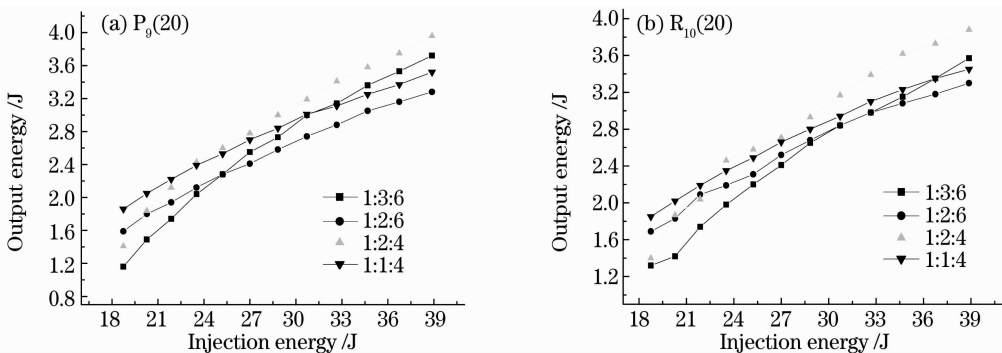
脉冲能量却有了较大的下降,且放电起弧较多。在 $C_s = 85 \text{ nF}$ 下,当 30 kPa 加大 5 kPa 后脉冲能量有明显增高;但再加大 5 kPa 后能量增长较小;增加至 45 kPa 后起弧较多,无法正常输出。

当 $C_s = 60 \text{ nF}$ 时,在注入能量为 38.9 J ,气压为 40 kPa 下,获得最高的激光脉冲能量, $P_{10}(20)$, $R_{10}(20)$, $P_9(20)$, $R_9(20)$ 四条谱线的能量分别为 $3.9, 3.8, 3.9, 3.9 \text{ J}$; 当 $C_s = 85 \text{ nF}$ 时,在注入能量为 55.1 J ,气压为 40 kPa 下获得最高的脉冲能量,四条谱线的能量分别为 $5.3, 5.4, 5.5, 5.1 \text{ J}$,对应的电-光转换效率依次为 $9.6\%, 9.8\%, 10.0\%, 9.3\%$ 。通过对这两组能量的比较,可以看出 85 nF 下的输出脉冲能量大约是 60 nF 的 1.4 倍。这表明,激光输出脉冲能量随着注入能量的增长而单调增高。在 30 kPa 下,获得最大比注入能量,其值为 $2.626 \text{ J}/(\text{L} \cdot \text{kPa})$; 在获得最大比注入能量的同时,

上述四条谱线分别获得最高的比输出能量,其中 $P_9(20)$ 的比输出能量最大,其值为 $0.205 \text{ J}/(\text{L} \cdot \text{kPa})$ 。

通过计算得出每个注入能量下的电-光转换效率,当 $C_s = 60 \text{ nF}$ 时,在注入能量为 27 J ,气压为 35 kPa 下电-光转换效率最大,上述四条谱线的效率分别为 $10.2\%, 10.6\%, 10.7\%, 10.6\%$; 当 $C_s = 85 \text{ nF}$ 时,在注入能量为 33.3 J ,气压为 35 kPa 下电-光转换效率最大,四条谱线的效率分别为 $10.3\%, 10.7\%, 10.7\%, 10.7\%$ 。从中可知,最大的电-光转换效率并没有随着储能电容的增大而变大,而是基本不变。

研究了不同气体配比下的激光脉冲能量的输出特性,在 30 kPa 下测量了 $\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{He}$ 混合体积比分别为 $1:1:4, 1:2:4, 1:2:6, 1:3:6$ 时的四条谱线随注入能量变化的单脉冲能量值。图 6 所示为 $P_9(20)$, $R_{10}(20)$ 两支谱线的激光脉冲能量关系曲线。

图6 不同气体配比下的 $P_9(20)$ (a) 及 $R_{10}(20)$ (b) 两支激光脉冲能量曲线Fig. 6 Laser energy of $P_9(20)$ (a) and $R_{10}(20)$ (b) with different gas mixtures

从图 6 可以看出,在 30 kPa 条件下,气体配比为 $1:2:4$ 下的激光脉冲能量要高于其他三组,则 $1:2:4$ 为最佳气体配比。

使用光子牵引探头,测量了 30 kPa 与 40 kPa 两组气压下的四条谱线输出激光脉冲波形,通过示波器记录下四线的脉冲波形图,图 7 所示为 $R_{10}(20)$ 的激

光脉冲波形。经过计算, 30 kPa 和 40 kPa 下四条谱线的激光脉冲半峰全宽 (FWHM) 如表 1 所示。

从表 1 中可知,对每条谱线而言,气压增高 10 kPa ,激光脉冲宽度随之变小,从量子角度分析认为,气压增高会加快上下能级粒子数的弛豫速率,使能级寿命缩短,激光脉宽变小,从而出现脉宽与气压

成反比的关系。在相同的激励条件下,四条谱线的光脉冲宽度各不相同,其中 R₉(20)的光脉冲宽度值

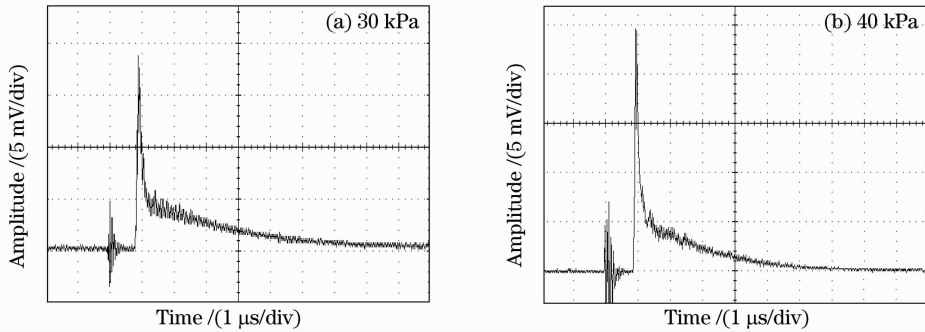


图 7 不同气压下 R₁₀(20)的激光脉冲波形

Fig. 7 Laser pulse waveform of R₁₀(20) at different pressures

表 1 不同气压下四条谱线的脉冲宽度

Table 1 FWHM of the four lines with different gas pressures

Pressure /kPa	Line	FWHM /ns
30	P ₁₀ (20)	165
30	R ₁₀ (20)	150
30	P ₉ (20)	115
30	R ₉ (20)	190
40	P ₁₀ (20)	130
40	R ₁₀ (20)	125
40	P ₉ (20)	100
40	R ₉ (20)	150

使用聚焦光斑法测量了光束远场发散角,焦点处所得 P₁₀(20)的光斑如图 8 所示。从图中可以看出光斑形状为圆形,直径约为 5.2 mm,说明激光器的光束质量较好。计算后得出,光束远场发散角约为 2.6 mrad。实验中激光输出的重复频率最高可达 190 Hz。

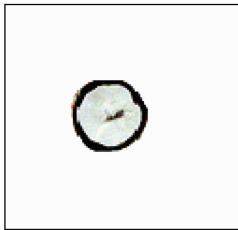


图 8 焦点处的光斑形状

Fig. 8 Focused laser spot

4 结 论

设计研制了采用管状预电离的光栅选线 TEA CO₂ 激光器,实现了激光的调谐输出。在 9.19~10.86 μm 的波长范围内,可输出谱线 73 条,其中 45 条的能量超过 2 J。在注入能量为 55.1 J 下, P₁₀(20), R₁₀(20), P₉(20), R₉(20) 四条谱线获得最

大,其光脉冲峰值最小。初步分析认为,不同谱线的增益不同导致了四条谱线的光脉冲宽度的不同。

大的激光脉冲能量分别为 5.3, 5.4, 5.5 和 5.1 J, 对应的电-光转换效率依次为 9.6%, 9.8%, 10.0%, 9.3%; 在注入能量为 33.3 J 下电-光转换效率最大, 四条谱线的效率依次为 10.3%, 10.7%, 10.7%, 10.7%。在 30 kPa 下, 1:2:4 的气体(CO₂, N₂, He)混合体积比为最佳气体配比。实验发现, 相同的激励条件下, 四条谱线输出的光脉冲宽度值各不相同。光束远场发散角为 2.6 mrad。实现了高重复频率的激光输出, 最高重复频率达 190 Hz。

参 考 文 献

- Wang Yuanhu, Qu Yanchen, Zhao Weijiang *et al.*. Tunable TEA CO₂ laser by a two-dimensional scanning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 359~362
王元虎, 曲彦臣, 赵卫疆 等. 二维振镜 TEA CO₂ 激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 359~362
- Zheng Yijun, Tan Rongqing, Ke Changjun *et al.*. Effect of pulse waveform on momentum coupling coefficient [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1472~1476
郑义军, 谭荣清, 柯常军 等. 脉冲波形对冲量耦合系数的影响 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1472~1476
- Chen Qingming, Cheng Zuhai, Zhu Haihong. Laser acoustic energy conversion efficiency induced by pulse laser in water[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 341~344
陈清明, 程祖海, 朱海红. 脉冲激光在水中激发声脉冲的光声能量转换效率[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 341~344
- Ren Deming, Zhang Lili, Qu Yanchen *et al.*. Application of plasma shutter in second harmonic generation of TEA CO₂ Laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1061~1064
任德明, 张莉莉, 曲彦臣 等. 等离子体开关在 TEA CO₂ 激光倍频中的应用[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1061~1064
- 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
- I. Chis, A. Ciura, V. Draganescu *et al.*. Design and performance of a high repetition rate TEA CO₂ laser[J]. *J. Phys. E*, 1988, **21**(4): 393~396
- R. Marchetti, E. Penco, G. Salvetti. Compact sealed TEA CO₂ lasers with corona-discharge preionization[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**(10): 1488~1492
- D. S. Stark, A. Crocker, N. A. Lowde. A semiconductor-

- preionised sealed TEA laser operating at high CO₂ concentrations and repetition rates up to 100 Hz [J]. *J. Phys. E*, 1983, **16**(11): 1069~1071
- 9 Chongyi Wan, Shiming Liu, Rongqing Tan *et al.*. Power scaling of printed-circuit-board preionized TEA CO₂ laser up to 3.6 kW [J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, **36**(8): 647~649
- 10 Tan Rongqing, Wan Chongyi, Wu Jin *et al.*. Investigation on tunable high repetition rate TEA CO₂ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 739~742
谭荣清, 万重怡, 吴 谨 等. 高重复频率可调谐 TEA CO₂ 激光研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 739~742
- 11 An Ran. Study on Discharge Excitation Technology for TEA CO₂ Lasers[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2009
安 然. TEA CO₂ 激光器放电激励技术研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2009
- 12 Zeng Yuan, Tan Rongqing, Chen Jing. Research on stability of tunable TEA CO₂ laser resonator [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(9): 928~930
曾 元, 谭荣清, 陈 静. 可调谐 TEA CO₂ 激光器谐振腔结构稳定性研究[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(9): 928~930