

文章编号: 0258-7025(2010)07-1697-07

1.5 kW 新型长脉冲 TE CO₂ 激光器

吴 谨 卢远添 王东蕾 刘世明 张阔海

(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

摘要 研究了一台增益体积为 2.48 L, 采用 pulser/sustainer 放电技术激励的高功率长脉冲紫外预电离 TE CO₂ 激光器的运转特性。激光器采用普通平凹稳定腔输出或光栅谐振腔调谐输出。在 20~40 kPa 气压范围, 10~50 μ s 放电脉冲宽度下, 均获得均匀稳定的大体积辉光放电和大能量长脉冲激光输出。给出了激光器在不同脉冲宽度、不同气压下的典型放电电压、放电电流波形和详细的激光输出脉冲能量及电光转换效率数据; 也给出了采用光栅谐振腔调谐输出时 4 条主要激光跃迁谱线的输出激光脉冲波形。工作在非调谐谐振腔和激光混合气气压 30 kPa 时, 激光器以 50.1 μ s 放电脉冲宽度工作, 单脉冲输出激光能量 11.1 J, 相应脉冲功率达 220 kW; 以 31.6 μ s 放电脉冲宽度 150 Hz 高重复频率工作输出平均功率达 1.52 kW, 相应平均脉冲能量 10.0 J, 脉冲功率超过 300 kW。

关键词 激光器; 长脉冲 TE CO₂ 激光器; pulser/sustainer 技术; 光栅谐振腔; 高重复频率

中图分类号 TN248.2⁺2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1697

Novel Long Pulse TE CO₂ Laser with 1.5 kW Average Output Power

Wu Jin Lu Yuantian Wang Donglei Liu Shiming Zhang Kuohai

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

Abstract The performance of a high power long-pulse ultraviolet-preionized TE CO₂ laser with an active volume of 2.48 L utilizing pulser/sustainer discharge technique is investigated in detail. The laser head consists of a plano-concave resonator for non-tunable operation or a grating resonator for tunable operation. Stable volume discharge and high laser pulse energy output are obtained under various mixture pressures of 20~40 kPa and various discharge lengths of 10~50 μ s. Typical laser discharge voltage/current waveforms and detailed data of laser output pulse energy and electro-optical conversion efficiency under various discharge lengths and various mixture pressures are given. The laser pulse profiles of the four main transition lines are demonstrated as operated with a grating resonator. When operated under a non-tunable resonator and 30 kPa mixture pressure, the laser generates 11.1 J pulse energy at 50.1 μ s discharge length, corresponding a laser pulse power of 220 kW; 1.52 kW average power at 31.6 μ s discharge length and 150 Hz high repetition rate, resulting in an average pulse energy of 10.0 J and an average pulse power of over 300 kW.

Key words lasers; long pulse TE CO₂ laser; pulser/sustainer technique; grating resonator; high repetition rate

1 引言

新型的长脉冲 TE CO₂ 激光器是指基于 pulser/sustainer 放电技术^[1]激励的紫外预电离长脉冲激光器。这种激光器在 20 世纪 80 年代末才有一些研究报道^[2~7]。2005 年, 国内报道了一种具有许多独特输出特性的新型长脉冲 TE CO₂ 激光器, 放电体积 1.17 L^[8]。在后续的工作中, 对这台激光

器的放电特性^[9,10]、可调谐特性^[11]、高重复频率运转特性^[12]等做了比较仔细的研究。文献[13]详细总结了这台激光器展现出的特点。在此基础上, 将在 1.17 L 放电体积中获得成功的技术应用于更大放电体积(约 2.48 L)的激光器, 再次成功获得 18.5 J/32 μ s 的单脉冲激光输出^[14]。鉴于这种新型长脉冲激光器的研究报道并不多见, 本文更进一

收稿日期: 2009-10-16; 收到修改稿日期: 2009-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(60678019)资助课题。

作者简介: 吴 谨(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事脉冲气体激光器、合成孔径激光雷达等方面的研究。

E-mail: jwu@mail.ie.ac.cn

步给出这台 2.48 L 放电体积高功率新型长脉冲 TE CO₂ 激光器的详细运转数据(包括采用光栅谐振腔时激光器主要跃迁谱线的输出特性)。

2 激光器基本结构

2.1 放电电极

如文献[14]所述,主放电电极由一对改进的 Chang's 电极组成,电极间距和放电宽度分别为 55 mm 和 50 mm,有效放电长度为 900 mm,放电体积约为 2.48 L。采用电容耦合双边火花针阵列紫外光预电离方式,在阴极两侧各有一排针状火花隙,每根针与一个约 15 pF 的小电容相连。

2.2 光学谐振腔

非调谐输出时,激光器采用简单平凹稳定腔结构,全反射端是平面全反铜镜,输出端是耦合透射率为 50%,曲率半径为 20 m 的 ZnSe 凹面镜,谐振腔长约为 2 m。

可调谐输出时,激光器采用光栅谐振腔,即上述平凹腔输出耦合镜不变,全反铜镜代之以一块金属原刻闪耀光栅,光栅常数 150 line/mm,采用一级耦合输出。

2.3 Pulsar/sustainer 放电技术激励电路

激励电路如文献[14]所述,依然如文献[8]所采用的由双高压放电开关组成的 pulser/sustainer 放电技术激励电路。其中 pulser 放电电路包含一个高压放电开关和一个高压储能电容(C_s),sustainer 放电电路包含一个高压放电开关和一个 10 级脉冲形成网络(PFN)($L_i, C_i, i=1, 2, \dots, 10$)。

电路参数取值为: $C_s = 14$ nF, $C_i = 20$ nF, ($i = 1, 2, \dots, 10$)。PFN 放电脉冲宽度由组成 PFN 的电感电容决定。实验中,PFN 放电脉冲宽度通过改变 PFN 中 10 个电感的大小来实现。这样改变 PFN 参数的优点是所有储能电容值不改变,更换电感简单方便;不足之处是,PFN 的特征阻抗随脉冲宽度的增加而增加。

实验了 5 组 PFN 电感数据,分别构成 PFN 放电脉冲宽度为 10.1, 21.3, 31.6, 40.9 和 50.1 μ s, 以期在 10~50 μ s 范围内分别获得相应的长脉冲激光输出。

2.4 热设计

激光器重复频率运转时,采用切向风机驱动的封闭气体循环。在激光混合气气压 30 kPa, 风机转速约 3000 r/min 时,放电区的气体流速约为 15 m/s, 对应 100 Hz 重复频率放电时约 3 的清洗系数。

热交换采用铜制翅片式热交换器,通水实现热交换。

高压元器件,如闸流管、高压电容等采用强迫风冷。

2.5 激光混合气

采用 5 种气体组成,混合体积比为 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})=1:2.5:13$ (含少量 CO 和 H₂)。进行了 20, 25, 30, 35 和 40 kPa 等 5 种气压下的激光放电实验。

3 实验结果

3.1 单脉冲放电特性

3.1.1 相同 PFN 放电宽度不同气压下的放电特性

当 PFN 的特征阻抗与负载激光器阻抗匹配时,PFN 放电最充分,有利于激光器能量注入。激光混合气体辉光放电阻抗随着气压的升高而增大^[15]。当 PFN 构成参数不变,在同样的放电电压(V_s, V_{PFN})下,在较低气压时是阻抗匹配良好的,随着气压升高,也会阻抗失配。另外,根据辉光放电特点,气压不变时,辉光放电过程的放电电压基本稳定^[16],增大注入能量将增大放电电流,即降低气体放电阻抗。因此,气压升高,可以通过增大放电电流实现阻抗匹配。作为例子,图 1 给出了激光器在 10.1 μ s PFN 放电宽度时,20 kPa 气压下,激光混合气辉光放电阻抗随 PFN 充电电压变化的实测曲线。可见,随着 PFN 充电电压的增加,辉光放电阻抗明显下降。图 2 利用不同气压下的典型放电电压、放电电流测量波形展示了相同放电电压下因激光混合气气压变化而出现的 3 种放电现象。图 2 中, ch1 为放电电压波形, ch2 为放电电流波形。图 2(a)中,

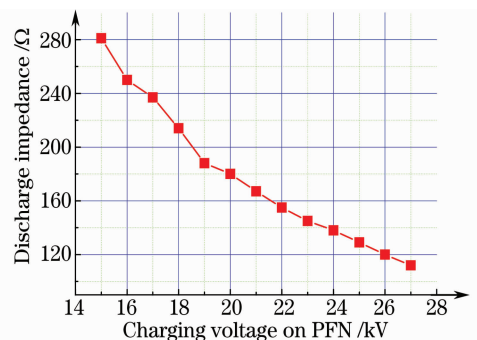


图 1 20 kPa 气压, 10.1 μ s PFN 放电宽度下, 激光器放电阻抗随 PFN 充电电压的变化曲线

Fig. 1 Laser discharge impedance versus PFN charging voltage under 20 kPa mixture pressure and 10.1 μ s PFN discharge length

20 kPa 气压时,PFN 主放电周期结束,放电电压即过零点,表明 PFN 放电干净,PFN 贮存能量充分注入激光器,阻抗匹配良好;图 2(b)中,气压升高至 30 kPa,PFN 主放电周期结束,放电电压仍有残余,表明 PFN 放电不完全。这种不完全放电波形发生在负载激光器放电阻抗大于 PFN 特征阻抗的情形。据图 2(a)和(b)计算出激光器放电阻抗分别约为 180 和 330 Ω 。可见,随着气压由 20 kPa 升高至

30 kPa,激光放电阻抗升高了近 1 倍。图 2(c)为在图 2(b)情形下,加大注入能量(即提高 PFN 充电电压),放电电流增大,又能获得良好的阻抗匹配,此时,激光器放电阻抗约为 200 Ω ,与图 2(a)相近。

从图 2 放电电压/电流波形还可以看出,3 种情形下,在 PFN 主放电周期,均有较大的放电电流,这表明,即使阻抗不匹配,激光器仍可能会有较大的激光输出。

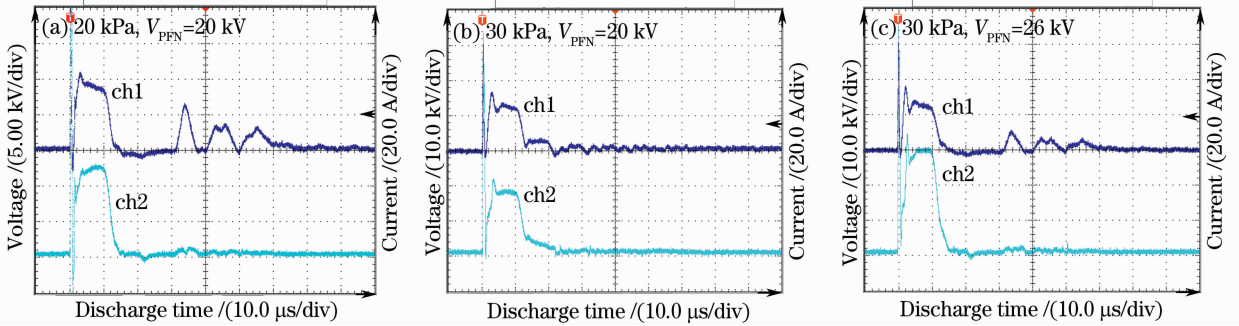


图 2 10.1 μ s PFN 放电宽度下典型的放电电压(ch1)和放电电流波形(ch2)

Fig. 2 Typical discharge waveforms under 10.1 μ s PFN discharge length. upper (ch1): discharge voltage; lower (ch2): discharge current

3.1.2 相同气压不同 PFN 放电宽度的放电特性

当气压相同时,由于辉光放电过程放电电压具有“准稳态”特性^[16],放电阻抗主要与放电电流有关。激光器注入能量相同时,放电电流随 PFN 放电宽度增大而减小,放电阻抗随 PFN 放电宽度增大而增大。本激光器实验时,PFN 放电宽度的改变只是改变组成 PFN 的电感而不改变电容,这样,PFN 的特征阻抗随脉冲宽度的增大而增大。根据这些特性,在同一气压下,不同的脉冲宽度放电,均有可能获得阻抗匹配良好的机会。

激光器 sustainer 放电过程的放电阻抗 Z_d 可由放电电压 V_d 和放电电流 I_d 计算

$$Z_d = V_d / I_d, \quad (1)$$

式中的放电电压与放电电流可实际测量而得,如图 2(a)情形, $V_d \approx 9$ kV, $I_d \approx 50$ A,相应 $Z_d = 180 \Omega$ 。

放电脉冲宽度 T 计算公式为

$$T = 2n \sqrt{LC}, \quad (2)$$

式中 n 为 sustainer 中 PFN 的级数(本激光器系统, $n=10$), L,C 为单级 PFN 的电感和电容。

PFN 的特征阻抗 Z_{PFN} 计算公式为

$$Z_{PFN} = \sqrt{L/C}. \quad (3)$$

激光器的注入总能量 E_t 为

$$E_t = \frac{1}{2} C_s V_s^2 + \frac{1}{2} \cdot n \cdot C V_{PFN}^2, \quad (4)$$

式中激光器注入能量的第一部分为 pulser 放电能量,第二部分为 sustainer 放电能量。在本激光器中,pulser 放电能量只占全部能量 E_t 的不到 10%,pulser 放电能量主要用于激光器预电离放电,因此,激光器主放电注入能量主要由 sustainer 放电提供。

根据图 2 给出的放电电压电流测量曲线,激光器的主放电实际注入能量 E_d 表示为

$$E_d \approx I_d \cdot V_d \cdot T. \quad (5)$$

由(1)~(5)式可以得到,在同一气压下,如果满足

$$V_{PFN} \approx 2 \cdot V_d, \quad (6)$$

则阻抗匹配关系 $Z_{PFN} = Z_d$ 得到近似满足,不同 PFN 脉冲宽度,均能够获得良好的激光放电。

对于本激光器,在 5 个气压下,分别进行了 5 个脉冲宽度的放电实验,验证了上述结论。作为例子,图 3(a)~(d)给出了 30 kPa 气压、不同脉冲宽度下,满足(6)式的放电电压、放电电流波形。图 3(a),(b)均实现了阻抗匹配良好的长脉冲激光放电。

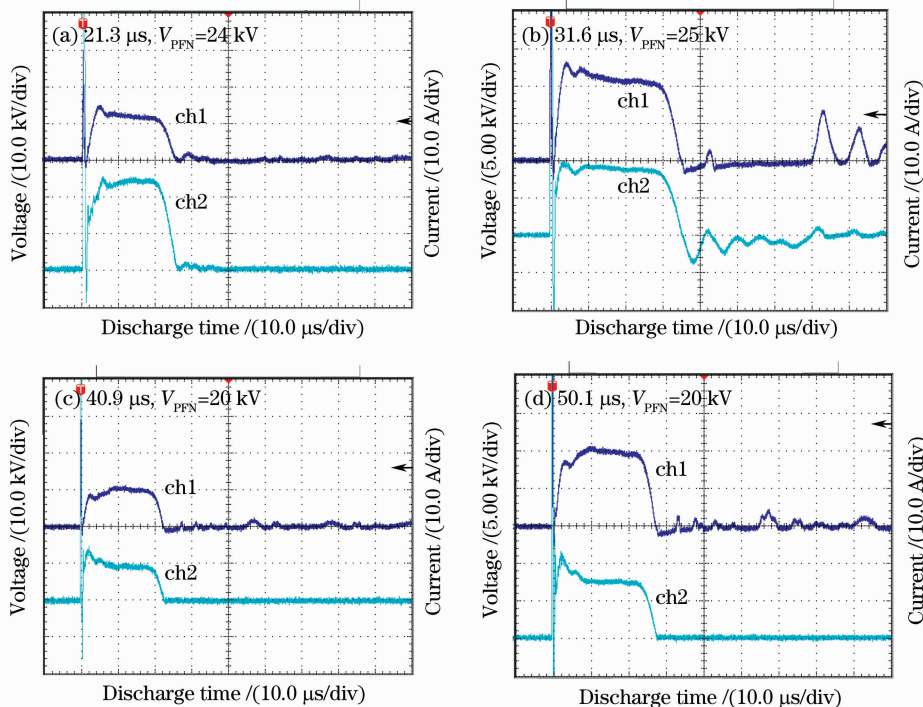


图 3 30 kPa 气压、不同 PFN 放电宽度下放电电压(ch1)、放电电流(ch2)的测量波形

Fig. 3 Discharge waveforms with various PFN discharge lengths under 30kPa mixture pressure. upper (ch1): discharge voltage; lower (ch2): discharge current

3.2 激光输出特性

3.2.1 不同脉冲宽度不同气压下激光器单脉冲输出特性

实验测量了激光器在 5 个气压, 5 个脉冲宽度下的输出特性, 获得了大量的测量数据, 这里仅给出几个典型例子。

图 4 给出了相同 PFN 放电脉冲宽度下, 激光器输出脉冲能量随 PFN 充电电压变化的曲线。其中

图 4(a), (b) 分别对应 PFN 放电脉冲宽度为 21.3, 50.1 μ s 的情形。可见两图展现出了同样的规律: 激光器输出脉冲能量随 PFN 充电电压升高而近似线性增长, 气压越高, 增长越快; 不同气压下, 激光器输出脉冲能量随 PFN 充电电压增长的斜率不同, 曲线有一个相交的区域, 在该区域, 激光器输出脉冲能量随气压的变化不是单调关系。从图 4(a), (b) 可见, 曲线相交区域大约处在 $V_{PFN} = 20 \sim 25$ kV 间。这个特别的区间, 不难分析出, 是近似满足(6)式的区域。

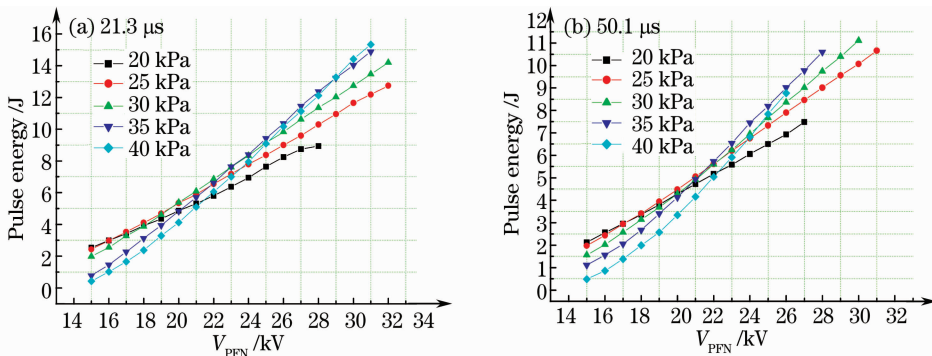


图 4 激光器输出脉冲能量随 PFN 充电电压的变化曲线

Fig. 4 Laser output pulse energy versus PFN charging voltage

图 5 给出了相同气压、不同 PFN 放电脉冲宽度下, 激光器输出脉冲能量随 PFN 充电电压变化的曲线。其中图 5(a), (b) 分别对应气压为 30 kPa 和

40 kPa 的情形。图 5(a) 中, 激光器在 50.1 μ s 放电脉宽下, 输出单脉冲能量大于 11.1 J, 相应 220 kW 的脉冲功率。可见, 气压相同时, 激光器输出脉冲能

量随 PFN 充电电压单调增长,PFN 充电电压相同时,脉冲宽度越宽,激光输出脉冲能量越小。这是因

为,脉冲宽度越宽,放电电流越小;放电电流越小,增益越小,激光输出能量相应变小。

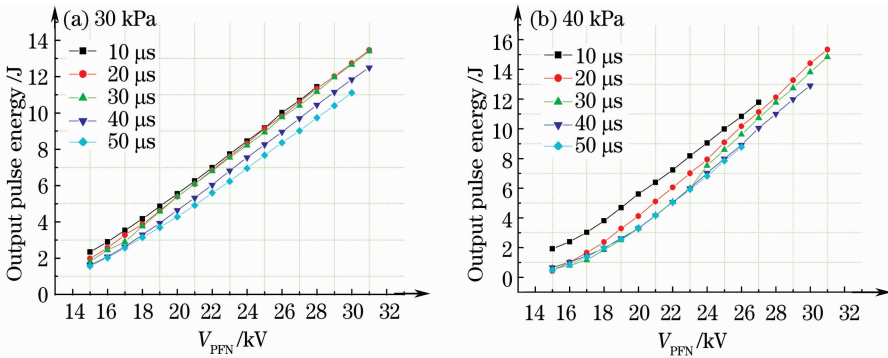


图 5 激光输出脉冲能量随 PFN 充电电压的变化曲线

Fig. 5 Laser output pulse energy versus PFN charging voltage

3.2.2 不同脉冲宽度下的光电转换效率

图 6 给出了 3 种 PFN 放电宽度下,不同混合气体气压时,激光器电光转换效率与 PFN 充电电压的关系曲线。图 6(a)~(c)分别对应放电脉冲宽度为 10.1,31.6 和 50.1 μs 的情形。图 6 表明在同一气

压下,激光器电光转换效率与 PFN 充电电压的变化先是单调上升,然后单调下降,存在最佳值;气压不同时,电光转换效率最佳值亦不相同;气压越高,最佳值越大。

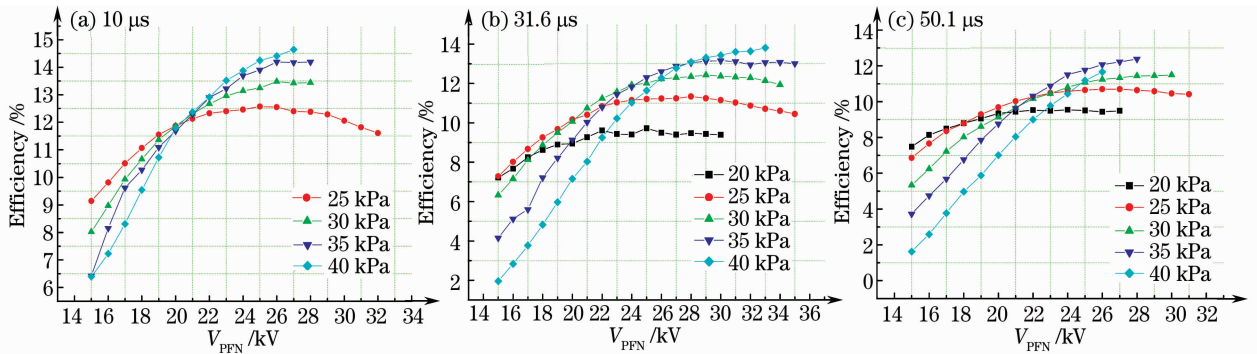


图 6 激光器电光转换效率与 PFN 充电电压的关系曲线

Fig. 6 Laser electro-optical conversion efficiency versus PFN charging voltage under various PFN discharge lengths and various mixture pressures

3.3 激光调谐特性

文献[11]对一台 1.17 L 放电体积的激光器的可调谐特性进行了研究,观察到一些很有意思的现象,如,即使放电参数相同,激光器输出激光脉冲宽度也随调谐波长不同而变化。这是因为不同激光跃迁谱线的增益不同。在这台 2.48 L 放电体积的激光器中,对此现象进行了进一步的观察。

量集中在隆起的脉冲拖尾之中。这是因为引起增益开关效应的 pulser 放电能量只占激光器全部注入能量的不到 10%,而这不到 10%的能量有相当部分消耗在预电离放电中。4 条谱线中,由于增益略有不同,激光建立的时间也略有不同,经示波器读数测量,相对于放电电流脉冲波形,9P(20),9R(20),10P(20)和 10R(20)线的激光建立时间分别约为 20.0,23.2,16.0 和 16.4 μs,激光脉冲宽度分别约为 24.8,20.0,30.0 和 26.6 μs。恰如预期,在相同的激励条件下,随着谱线的不同,激光脉冲宽度的宽度也不相同。

图 7 分别给出了 30 kPa 气压,31.6 μs PFN 放电脉冲宽度下, V_{PFN} = 25 kV 时,激光器输出的激光脉冲波形、放电电流波形的测量结果。其中图 7(a)~(d)分别对应跃迁谱线 9P(20),9R(20),10P(20)和 10R(20)。图中 ch2 为激光脉冲波形, ch1 为相应放电电流波形。从激光脉冲波形看,增益开关效应引起的尖峰脉冲都很小,大部分激光能

这种增益差异造成的输出激光脉冲宽度的差别可以通过增大注入能量(即提高 PFN 充电电压)的办法来弥补。例如,实验得到, V_{PFN} = 30 kV 时,

9P(20), 9R(20), 10P(20)和 10R(20)线的激光脉冲宽度分别约为 31.8, 26.6, 32.8 和 30.8 μs 。这时激光脉冲宽度基本与 PFN 放电脉冲宽度相当。然而, 增大注入能量即增大 sustainer 放电电流, 大的放电电流容易引起 sustainer 放电不稳定。另外, 对于弱

谱线, 由于其增益很小, 即使增大注入能量, 也难以使其激光脉冲宽度与 PFN 放电脉宽相当。如实验观察到, 9R(30)线的激光脉冲宽度在 $V_{\text{PFN}} = 25 \text{ kV}$ 时, 约为 10.0 μs ; $V_{\text{PFN}} = 30 \text{ kV}$ 时, 为 21.2 μs , 都远小于 PFN 放电脉冲宽度。

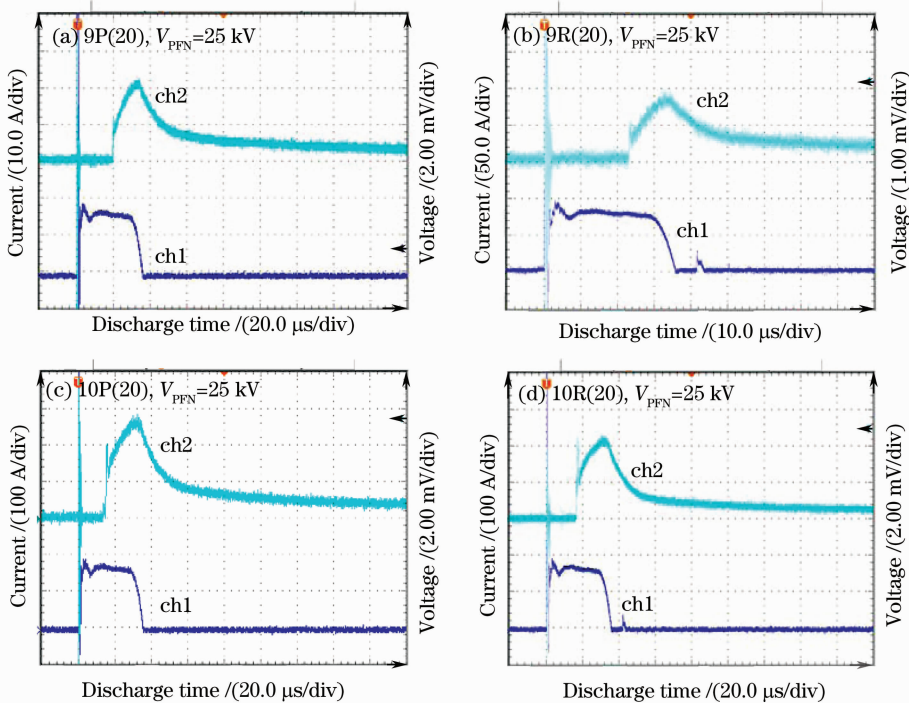


图 7 30 kPa, 31.6 μs PFN 放电宽度下, 4 条主要跃迁谱线的激光脉冲波形(ch2)和放电电流波形(ch1)

Fig. 7 Laser pulse profiles of four main transition lines under 30 kPa mixture pressure and 31.6 μs PFN discharge length(ch2: laser pulse profile; ch1: discharge current)

3.4 重复频率运转特性

图 8 给出了 30 kPa, 31.6 μs PFN 放电脉宽情况下, 激光器输出平均功率随脉冲重复频率的变化曲线。可见, 激光器输出平均功率与脉冲重复频率有近似正比关系, 表明不同脉冲重复频率下, 激光器输出脉冲能量稳定。 $V_{\text{PFN}} = 30 \text{ kV}$ 时, 脉冲重复频率 100 Hz 以上工作时, 激光器起弧很多, 放电不稳定加剧。这是因为, 随着放电电流增大, 稳定辉光放电对电极间电场均匀条件要求越高, 气流循环对放电区气体造成的扰动很容易破坏稳定放电条件, 高重复频率运转时, 这种破坏变得尤其突出。

经测量, $V_{\text{PFN}} = 28 \text{ kV}$, 重复频率为 150 Hz 时, 激光器输出平均功率达 1.52 kW, 相应平均脉冲能量 10 J, 脉冲功率超过 330 kW。

图 9 展示的是该激光器在 $V_{\text{PFN}} = 25 \text{ kV}$ 下, 以 110 Hz 重复频率运转时, 输出激光束经 $R = 6 \text{ m}$ 凹面镜聚焦后将厚 3 mm 有机玻璃烧穿的照片。可

见, 激光束光斑为较规则的方形。这样尺寸的光斑下, 完全烧穿 3 mm 厚有机玻璃片约用时 40 s。据图 9 亦可计算出激光束发散角约为 12 mrad。

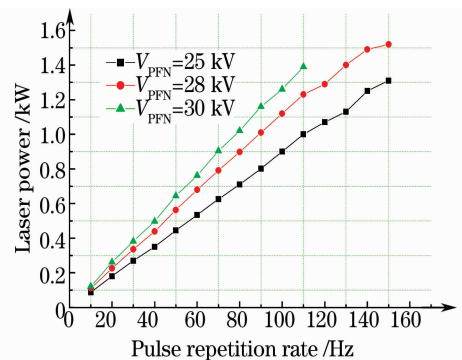


图 8 30 kPa, 31.6 μs PFN 放电脉冲宽度下, 激光输出平均功率与脉冲重复频率的关系曲线

Fig. 8 Laser average power versus pulse repetition rate under 30 kPa mixture pressure and 31.6 μs PFN discharge length

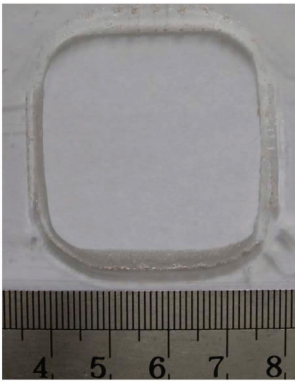


图 9 激光烧穿有机玻璃照片

Fig. 9 Picture of the beam pattern burned on a plexiglass plate

4 结 论

展示了一台 2.48 L 放电体积的新型长脉冲 TE CO₂ 激光器在不同气压、不同 PFN 放电脉冲宽度下的详细运转特性,给出了典型的实验曲线和数据。可以看到,这种结构的激光器,在 20~40 kPa, 10~50 μ sPFN 放电宽度范围内均能获得稳定辉光放电和大能量长脉冲激光输出。尤其是激光器以 31.6 μ sPFN 放电宽度,150 Hz 高重复频率运转时,输出平均功率达 1.52 kW,相应每个脉冲平均能量超过 10 J。另外,当激光器以光栅谐振腔获得可调谐输出时,激光输出脉冲宽度会随激光跃迁谱线的不同而变化,这种激光脉冲宽度随谱线的变化可以在一定程度上通过改变注入能量来改变。这台激光器成功运转的数据再次表明,将这种获取长脉冲输出的技术应用于更大的放电体积以获取更大脉冲能量也是可行的。

参 考 文 献

- James P. Reilly. Pulsar/sustainer electric-discharge laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(8): 3411~3416
- A. Chakrabarti, J. Reid. Long pulse transversely excited ¹²CO₂ and ¹³CO₂ lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(1): 37~42
- M. R. Harris, D. V. Willetts. Transversely excited CO₂ laser with long pulse duration discharge [J]. *Opt. Commun.*, 1991, **83**(3-4): 227~230
- P. K. Bhadani, A. Sylvan, R. G. Harrison. Efficient switchless multi-joule TE-CO₂ laser [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(6): 1404~1407
- A. Sylvan, P. K. Bhadani, R. G. Harrison. Small solid-state switched pulser-sustainer TEA CO₂ laser [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1991, **2**(2): 49~53
- P. K. Bhadani, R. G. Harrison. Efficient long pulse TE CO₂ laser using magnetic-spiker sustainer excitation [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(12): 5543~5545
- Y. Okita, K. Yasuoka, A. Ishii *et al.*. Long pulse, high repetition rate transversely excited CO₂ laser for material processing [C]. *SPIE*, 1994, **2118**: 22~28
- Zhang Zhao, Wu Jin, Wang Donglei *et al.*. Long pulse TE CO₂ laser with ultraviolet-preionization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1599~1604
张 昭, 吴 谨, 王东蕾等. 长脉冲紫外预电离 TE CO₂ 激光器 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1599~1604
- Jin Wu, Zhao Zhang, Donglei Wang *et al.*. Novel long pulse TE CO₂ laser excited by pulser-sustainer discharge [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(4): 701~704
- Wang Xunzhong, Wu Jin, Wang Donglei *et al.*. Long pulse TE CO₂ laser with a novel excitation scheme [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2008, **19**(6): 746~750
汪训忠, 吴 谨, 王东蕾等. 采用新型激励方式的长脉冲 TE CO₂ 激光器 [J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(6): 746~750
- Wang Yunfei, Wu Jin, Liu Shiming *et al.*. Tunable long pulse TE CO₂ laser with pulser/sustainer excitation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1185~1189
王云飞, 吴 谨, 刘世明等. 基于 Pulser/sustainer 技术的可调谐长脉冲 TE CO₂ 激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1185~1189
- Wu Jin, Wang Donglei, Liu Shiming *et al.*. Performance investigation on repetition-rate long-pulse UV-preionized TE CO₂ laser utilizing pulser/sustainer technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1062~1067
吴 谨, 王东蕾, 刘世明等. 基于 Pulser/sustainer 技术的高重复频率长脉冲紫外预电离 TE CO₂ 激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1062~1067
- Wu Jin. Novel long pulse TE CO₂ laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(2): 43~45
吴 谨. 新型长脉冲 TE CO₂ 激光器 [J]. *激光与光电子进展*, 2009, **46**(2): 43~45
- Lu Yuanian, Wu Jin, Wang Donglei *et al.*. Long pulse TE CO₂ laser with high energy [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(9): 1437~1440
卢远添, 吴 谨, 王东蕾等. 大能量长脉冲 TE CO₂ 激光器 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(9): 1437~1440
- Wu Jin, Wan Chongyi. Calculation of the glow discharge impedance of a UV-preionized self-sustained TE(A) CO₂ laser [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(2): 15~17
吴 谨, 万重怡. 紫外预电离 TE(A) CO₂ 激光器自持辉光放电的阻抗计算 [J]. *激光杂志*, 2002, **23**(2): 15~17
- L. J. Denes, J. J. Lowke. V-I characteristics of pulsed CO₂ laser discharges [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(3): 130~133