

150 ns 长脉宽 XeCl 准分子激光器的研究

谷怀民 赵震声 匡梅 奚居雄 胡雪金

(中国科学院安徽光机所 合肥 230031)

提要 通过采用多级 $L-C$ 峰化回路、增大输出镜反射率、改变 HCl 浓度的方法,使 XeCl 准分子激光的脉冲宽度达到 150 ns 以上(最大脉宽达 175 ns),单脉冲能量大于 120 mJ。同时对紫外准分子激光的光纤耦合系统进行了研究,直径为 0.4, 0.6, 0.8, 1.5 mm 的紫外石英光纤的耦合输出能量分别为 10, 29, 39, 58 mJ。

关键词 长脉宽, XeCl 激光, 光纤耦合

1 引言

长脉宽运行的准分子激光器因其峰值功率低,能够通过紫外石英光纤进行高能量传输,因而在一些涉及光纤耦合传输系统的应用,如心血管成形术的应用中特别具有吸引力^[1]。另一方面,长脉宽运行的准分子激光器增加了激光脉冲在谐振腔内的往返振荡次数,便于对激光的发散角、偏振状态和激光线宽^[2]等特征参数加以控制,在诸如高分辨率的光刻和 Doppler 激光雷达等一些应用领域中可充分利用长脉宽准分子激光器的这些优点。

但是,大多数准分子激光器都是采用低电感、快速放电回路运行,激光脉宽通常小于 50 ns。八十年代初,国外研究人员采用等离子体阴极预电离结构^[3]、尖峰信号发生器技术^[4-6]研制长脉宽准分子激光器,使 XeCl 准分子激光脉宽达到微秒量级。Taylor^[7]采用一台 KrF 激光器去诱导预电离另一台 XeCl 准分子激光器,并用多级磁性元件将尖峰信号从主放电电流和储能回路中分离出来,使 XeCl 激光脉宽超过 1 μ s。但是,这些获得长脉宽激光输出的装置大都结构复杂,体积庞大,对于其应用极为不便。

我们通过在激光器峰化放电回路中采用多级 $L-C$ 网络技术,改变主回路放电参数和电流分布,使回路的均匀放电的持续时间拉长,实现拉长脉宽的目的。还研究了激光介质中 HCl 浓度和输出窗的反射率等对输出激光脉宽的影响;同时对紫外激光光纤耦合系统也进行了研究。获得脉冲宽度大于 150 ns 的激光输出,输出能量大于 120 mJ; 光纤耦合输出达到 10~ 60 mJ。同时可根据需要改变放电回路参数,使激光器在 30~ 150 ns 的脉宽范围内运行。

2 实验装置、技术原理

拉长脉宽的激励方案很多,传统上主要分为两类:在第一类方案中,包含适当的匹配储能

线和预脉冲运行^[8]。其主要特征表现在:它将激活介质的击穿机能同能量储存机能区分开来,采用这类方案的激光器的总体光电转换效率高,但其回路复杂、体积庞大。第二类方案中,储能电容器 C_s 采用 $L-C$ 网络排列^[2]。这类器件整机结构简单,但其最大脉宽受到限制。还有一类方案是由 Sze^[9] 提出的采用分段式的电感稳定的电极,这种装置的放电回路特别简单,但其电极结构复杂。

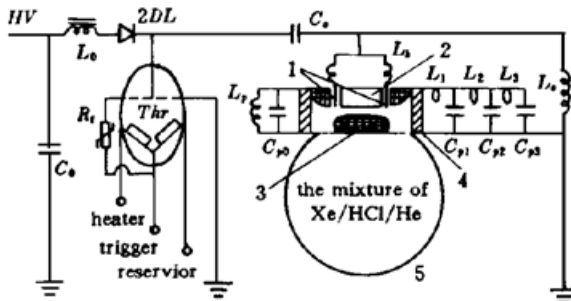


图 1 长脉宽 XeCl 激光器的激励电路图

1: 紫外火花针; 2: 阴极; 3: 阳极; 4: 激光腔体; 5: 储气筒; C_0 : 滤波电容器; C_s : 储能电容器; C_p : 峰化电容器; L_0 : 谐振电感; L_s : 充电电感; L_p : 旁路电感; L_h : 平衡电感; L_1, L_2, L_3 : 整形电感; Thr : 闸流管; R_1 : 压敏电阻

Fig. 1 Schematic diagram of a long optical-pulse duration XeCl laser and the excitation circuit

1: UV spark preionization pins; 2: cathode; 3: anode; 4: laser chamber; 5: gas cell; C_0 : filtering capacitor; C_s : storage capacitor; C_p : speak capacitor; L_0 : oscillating inductance; L_s : charge inductance; L_p : bypass inductance; L_h : equilibrium inductance; L_1, L_2, L_3 : forming inductance;

Thr : thyatron; R_1 : sensitiving resistance

均匀放电的持续时间拉长,激光脉宽拉宽。同时,在主放电导通瞬间,储能电容 C_s 继续通过闸流管和预电离火花隙向主放电注入能量,对激光有所贡献。

3 实验结果和分析

3.1 放电回路的电参数对激光脉冲宽度的影响

在通常的横向放电激励的准分子激光器的放电回路中,采用快速充放电回路,回路电感值越小越好,回路电感 $L_1 = L_2 = L_3 = 0$,总的峰化电容 $C_p = C_{p0} + C_{p1} + C_{p2} + C_{p3}$ 。当 $C_s \cdot C_p = 2 \cdot 1$ 时,获得了大于 200 mJ 的激光输出,此时激光脉宽为 30 ns 左右。

当储能电容 C_s 固定不变,我们逐步减小峰化电容 C_p 的总电容量,激光能量随之下降,脉冲宽度也随之拉长。当 $C_s \cdot C_p = 15 \cdot 1$ 时,激光能量下降 50% 以上,激光脉宽达到 70 ns 左右。显然,峰化电容的减小,使回路的充电时间常数变短,电流上升前沿变陡,使储能电容 C_s 上的能量不能实现一次性向峰化电容上转移,其大部分电能直接通过闸流管注入到主放电中。储能电容的慢放电使得均匀放电的持续时间变长,激光脉宽拉宽^[10],激光能量下降。

我们在峰化回路中采用多级 $L-C$ 网络的激励方案。研究装置结构和激励电路如图 1 所示。

充电电路为 $L-C(L_0, C_s)$ 谐振倍压充电电路,峰化回路由多级 $L-C$ 网络组成,图中 L_1, L_2, L_3 为电感量极小的电感,用于调整放电回路的放电参数。根据实际需要,综合调整电容 $C_{p0}, C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}$ 和电感 L_1, L_2, L_3 的大小或改变峰化回路的 $L-C$ 级数,来改变回路放电时间参数,使均匀放电持续时间拉长,达到拉长脉宽的目的。

在通常的能量转移激励方案中,当作为高压开关元件的接地栅闸流管导通时,储能电容 C_s 上的电荷通过两排并联的预电离火花隙全部转移到峰化回路电容器 C_p 上,主放电导通。然后由峰化回路电容器 C_p 向主放电通道注入能量。

在我们的激励回路中,峰化电容 C_p 比储能电容 C_s 的容量小得多,储能电荷不能一次性转移到峰化回路中。在储能 C_s 通过闸流管向峰化回路 C_p 转移能量的过程中,当峰化电容 C_p 上的电压达到激光气体的击穿电压时,主放电导通,形成均匀放电。由于峰化回路采用了多级 $L-C$ 成形网络,使均

我们将 L_1, L_2, L_3 改为电感量很小的电感, 采用多级 $L-C$ 峰化回路, 同时综合调整 L_1, L_2, L_3 及 $C_{p0}, C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}$ 的大小, 使激光脉宽进一步拉宽。在我们的研究中发现, 当峰化回路采用三级 $L-C$ 回路, 且 $C_{p0} \cdot C_{p1} \cdot C_{p2} \cdot C_{p3} = 3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2$, C_{p0} 大约为 1500 pF, 同时采用反射率为 30% 的输出窗时, 激光脉宽大于 150 ns (最大值达到 175 ns), 激光能量大于 120 mJ, 脉冲波形平滑 (见图 2)。显然, 峰化回路的多级 $L-C$ 网络使均匀放电的持续时间延长, 激光脉宽拉宽。但是, 由于 C_p 远远小于 C_s , 能量不能实现一次性转移, 总体电光转换效率降低, 从而使激光能量下降。另一方面我们发现, 峰化回路 $L-C$ 级数太少时, 难以得到最大激光脉宽, 但若增加太多时, 最多时我们加了 6 级 $L-C$ 回路, 对进一步拉长激光脉宽并无明显效果, 同 3 级 $L-C$ 网络的结果接近。

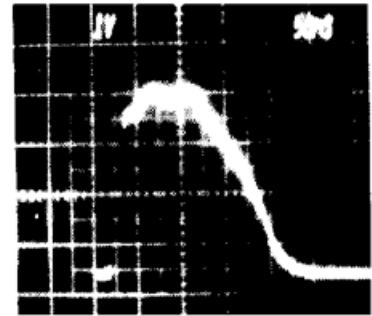


图 2 150 ns XeCl 激光脉冲波形照片
Fig. 2 Photograph of waveform for a 150 ns XeCl laser pulse

研究中还发现, 在保持电感 L_1, L_2, L_3 不变的情况下, 增大 C_{p0} 的电容量, 则激光脉冲波形的前部波峰上升, 反之则下降。增大 C_{p2} 或 C_{p3} 的值, 则光脉冲波形的后部波峰上升, 反之则下降。所以, 在实际应用时, 应根据需要合理调整 $C_{p0}, C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}$ 的值, 使激光脉冲波形平滑、脉宽最大。另一方面, 我们还研究了激光脉冲波形与激励电压的关系, 发现激励电压升高时, 激光脉冲波形的后沿有明显的上升。这可能是由于在激励电压升高时, 沉积到激光介质中的能量密度提高, 在脉冲后期仍有较高的粒子数反转存在。所以, 要使脉冲波形平滑, 应选取适当的激励电压。

3.2 HCl 含量对激光脉宽的影响

HCl 含量对激光脉宽的影响很大。在拉长脉宽线路运行的激光器中, 当 HCl 浓度太高时, 放电变得不稳定, 激光脉宽变窄, 激光能量降低。研究表明, 当 HCl 含量由 1.0% 变为 1.5% 时, 激光脉宽由 160 ns 降到 100 ns 左右, 能量由 120 mJ 降到 90 mJ 左右。这是由于 HCl 是一种负电性物质, 有很高的电子吸附率。电子吸附反应过程



的反应速率是随 HCl 浓度的变化而加快^[11]。当 HCl 浓度提高时, 电子数密度下降, 因而放电阻抗率增大, 放电稳定性变差, 使均匀放电提前终止, 从而导致激光脉宽和激光能量的下降。

另一方面, HCl 浓度也不能过低。研究中发现, 当 HCl 含量由 1.0% 下降到 0.4% 时, 激光能量由 120 mJ 下降到 80 mJ 左右, 激光脉宽却呈饱和状态, 仍为 160 ns 左右; 但当 HCl 含量继续下降时, 脉宽也随之下降。根据有关稀有气体卤化物(RGH)的动力学模型预言, 卤素的降低将限制可能获得的最大激光脉冲宽度^[11]。因为 XeCl^* 的主要形成过程是一个三体离子复合过程:



另一个次要的形成过程是一个中性途径:



所以, 当 HCl 含量太低时, 放电形成的 XeCl^* 粒子数也随之下下降, 从而导致激光能量下降, 激光脉宽变窄。在我们的研究中, 当 HCl 浓度选择在 0.9% 到 1.1% 之间时, 激光能量和激光脉宽达到一个最佳值, 既能保证激光脉宽达到 150 ns 以上, 又能保证激光能量大于 120 mJ。

3.3 输出镜反射率对激光脉宽的影响

输出镜反射率对激光脉宽和激光能量均有一定的影响。当采用正常的横向放电激励回路

时,随着输出镜反射率的增大,激光输出能量下降,脉宽拉长。这是由于对激光而言,腔内光强 $I(t)$ 随时间的变化规律为

$$I(t) = I_0 \exp(at) \quad (1)$$

如果激光腔的长度为 L ,则经过一次往返振荡后,光强为

$$I = I_0 \exp(2aL/c) \quad (2)$$

另一方面,根据激光介质的小信号增益系数 g_0 的定义,激光经过谐振腔往返一次后,光强为

$$I = I_0 R_1 R_2 \exp(2g_0 l) \quad (3)$$

其中 R_1, R_2 为谐振腔的窗口反射率, l 为激光放电区的长度。所以

$$a = \{c/2L\} * \{\ln(R_1 R_2) + 2g_0 l\} \quad (4)$$

定义光强 I 从初始强度 I_0 增长到饱和光强 I_s 之间的时间 t_0 为激光脉冲建立的时间,则得到

$$t_0 = \{(2L/c) \ln(I_s/I_0)\} / \{2g_0 l + \ln(R_1 R_2)\} \quad (5)$$

显然,由上式可知,提高输出镜的反射率 R_2 使激光振荡建立的时间提前,能够尽可能多地利用 XeCl 上能级的粒子数,使激光脉冲的前沿上升,于是输出激光脉冲的脉宽拉宽。但是,输出镜的反射率的提高,使谐振腔的内损耗增大,激光输出能量下降。我们的研究表明,当输出镜反射率由 8% 增大到 50% 时,正常激励回路的激光脉宽由 30 ns 上升到 60 ns 左右,激光能量由 200 mJ 下降到 100 mJ 左右。

在拉长脉宽的激励回路中,保持其它条件不变,当输出镜反射率由 8% 向 20%, 30% 变化时,激光脉宽显著增大,由 130 ns 增加到最佳值 175 ns 左右,但是,当反射率继续由 30% 向 50% 变化时,激光脉宽无明显变化,但能量却有所下降。我们选择 $R = 30\%$ 的输出镜,使激光脉宽最大到 170 ns 以上,激光能量达到 120 mJ 以上。

3.4 光纤耦合输出

激光脉宽的拉长,使得激光脉冲的峰值功率降低,不易损坏光纤,能够增大光纤耦合输入端的能流密度,提高输出能量。我们对长脉冲准分子激光的光纤耦合也进行了一系列研究,采用精密的插入式紫外石英光纤耦合系统,使光纤耦合输出能量和使用寿命均大大提高。各种规格光纤的耦合输出能量见表 1。

表 1 不同芯径的光纤的耦合输出能量和耦合效率

Table 1 Output energy and coupling efficiency of optical fibers with different diameters

Diameter of optical fiber (mm)	Output energy (mJ)	Degree of unstability	Coupling efficiency
0.4	8	-	15%
0.6	29	3.50%	30%
0.8	39	3.60%	40%
1.5	58	2.70%	60%

4 结 论

我们采用多级 $L-C$ 峰化回路、增大输出镜反射率、改变 HCl 含量的方法,虽然损失了部分激光能量,但达到了拉长脉宽的目的。而且电激励回路和机械结构特别简单。在与正常激励回路变换时,器件无需作内部机械改装,只要更换外部电子线路,即可使器件在 30 ns 到 150 ns 之间运行。而且整机体积小、操作方便。紫外准分子激光光纤耦合输出能量及其稳定性的提

高,为国产准分子激光器在激光医学领域的应用,特别是在激光血管成形术研究和临床手术方面的应用迈出了可喜的一步。

致谢 本组的袁廷海、贺龙海、张 虎、陈永荣、殷宝龙等同志参加了本项目的部分研究工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 D. L. Singleton, G. Parskevopoulos, R. S. Taylor *et al.*. Excimer laser angioplasty: tissue ablation, arterial response, and fiber optic delivery. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1987, **QE-23**: 1772~ 1782
- 2 M. Sugii, M. Ando, K. Sasaki. Simple long-pulse XeCl laser with narrow-line output. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1987, **QE-23**: 1458
- 3 S. V. Melchenko, A. N. Panchenko, V. F. Tarasenko. Electric-discharge XeCl laser emitting pulse of 1 msec duration. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1984, **14**: 1009
- 4 W. H. Long, Jr., M. J. Plummer, E. A. Stappaerts. Efficient discharge pumping of an XeCl laser using a high-voltage prepulse. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**: 735~ 737
- 5 R. S. Taylor, K. E. Leopold. Magnetically induced pulse laser excitation. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**: 335~ 337
- 6 C. H. Fisher, M. J. Kushner, T. E. DeHart *et al.*. High efficiency XeCl laser with spiker and magnetic isolation. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**: 1574~ 1576
- 7 R. S. Taylor, K. E. Leopold. Microsecond duration optical pulse from a UV-preionized XeCl laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**: 81~ 83
- 8 R. S. Taylor, K. E. Leopold. Ultralong optical-pulse corona preionized XeCl laser. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**: 22~ 29
- 9 R. C. Sze. Inductively stabilized rare-gas halide minilaser for long-pulsed operation. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**: 1224~ 1227
- 10 Dong Hwan Kim, Hong Chu, Young Min Jhon *et al.*. Controllable pulse duration of a XeCl laser. *Rev. Sci. Instrum.*, 1994, **65**(12): 3634~ 3638
- 11 H. Hokazono, K. Midorikawa, M. Obara *et al.*. Theoretical analysis of a self-sustained discharge pumped XeCl laser. *J. Appl. Phys.*, 1984, **56**: 680~ 690

Study of a 150 ns Long-pulse XeCl Excimer Laser

Gu Huaimin Zhao Zhensheng Kuang Mei Xi Juxiong Hu Xuejin

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract XeCl laser pulse durations longer than 150 ns have been achieved by using a multiple stage $L-C$ sharpening circuit, increasing reflectivity of the output coupler, and adjusting concentration of HCl in the mixture of Xe/HCl/Ne. The longest pulse duration was up to 175 ns. The output energy per pulse was above 120 mJ. The study on optical fibers coupling of UV excimer laser was made. The coupling output energies of 0.4, 0.6, 0.8, and 1.5 (Diameter mm) UV silica optical fibers were 10, 29, 39, and 58 (mJ), respectively. It has made encouraging the first attempt for China-made excimer laser applications in laser-medicine field, particularly in laser angioplasty.

Key words long-pulse, XeCl laser, optical fiber coupling