

Simulink 仿真指导放电准分子激光长脉宽的实验探究

刘冬生^{1,2}, 梁 勳², 林 颖², 徐一帆², 方晓东^{2,3}

1. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽合肥 230601;
2. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031;
3. 深圳盛方科技有限公司, 广东深圳 518100)

摘要: 针对医疗用 308 nm 准分子激光器长脉宽的实际需求, 提出 Simulink 仿真模型指导延长激光脉宽的方案, 并进行实验研究。首先建立并验证了典型准分子激光器放电激励回路仿真模型的有效性, 其次基于脉冲形成网络原理建立 4 级 LC 峰化回路的放电激励模型, 并进行了具体的激光器结构设计和参数选择。对一台储能电容为 60 nF, 工作电压范围在 20~29 kV 的 308 nm 准分子激光器进行实验, 通过改变激励回路的结构和参数, 激光脉宽由 30 ns 延长到 60 ns, 且当储能电容电压值为 28 kV 时, 输出能量达 407 mJ, 激光脉冲能量的转移效率由典型结构的 1.531% 提高至 1.73%, 实现了放电激励 308 nm 准分子激光长脉冲输出条件下的高能量转移率, 验证了 Simulink 仿真模型的有效性和指导意义, 为实用化长脉宽准分子激光的设计和應用提供基础。

关键词: 准分子激光; Simulink 仿真; 长脉宽; 转移效率

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210022

Simulink simulation guiding the experimental exploration of long pulse width of discharge excimer laser

Liu Dongsheng^{1,2}, Liang Xu², Lin Ying², Xu Yifan², Fang Xiaodong^{2,3}

1. Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;
2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3. Shenzhen ShengFang Tech Co., Ltd., Shenzhen 518100, China)

Abstract: Aiming at the actual demand for long pulse width of 308 nm excimer laser for medical use, a Simulink simulation model was proposed to guide the scheme of extending the laser pulse width, and experimental research was carried out. First, the effectiveness of the simulation model of the excitation circuit of a typical excimer laser discharge was established and verified. Second, the discharge excitation model of a 4-level LC peaking circuit was established based on the principle of pulse forming network, and the design and parameter selection of specific laser structure were carried out. Experiment with a 308 nm excimer laser, an energy storage capacitor of 60 nF and a voltage range of 20-29 kV was completed. By changing the structure and parameters of excitation circuit, the laser pulse width was extended from 30 ns to 60 ns, and when the voltage value of energy storage capacitor was 28 kV, the output energy was up to 407 mJ, the transfer efficiency of laser pulse

收稿日期:2020-12-29; 修订日期:2021-02-24

基金项目:中国科学院青促会资助项目(2018481); 深圳市科技计划资助项目(KQTD20170331115422184)

作者简介:刘冬生,男,硕士生,主要从事准分子激光技术方面的研究。

导师简介:梁勳,男,副研究员,硕士生导师,博士,主要从事激光和光电子技术及应用方面的研究。

方晓东,男,研究员,博士生导师,博士,主要从事准分子激光器以及功能性薄膜的激光制备等方面的研究。

energy was increased from 1.531% of the typical structure to 1.73%, and the high energy transfer rate under the condition of the long pulse output of discharge excitation 308 nm excimer laser was realized. It verifies the validity and effectiveness of the Simulink simulation model. The guiding significance is to provide the basis for the design and application of the practical long pulse width excimer laser.

Key words: excimer laser; Simulink simulation; long pulse width; transfer efficiency

0 引言

准分子激光是目前紫外波段输出功率最大的激光,具有峰值功率高、光子能量大、波长短、脉宽窄等特点^[1-3]。308 nm 的 XeCl 准分子激光的单光子能量达到 4.0 eV,而大多数生物分子的键能小于 3.5 eV,因此,308 nm 准分子激光足以打断生物分子的化学键,产生与生物组织作用的特殊机理——光化学分解作用^[4],作用过程光热损伤小,在激光医学里有一些独特的应用。例如,308 nm 准分子激光经光纤引入血管内,汽化病变的血管阻塞物,不仅能成功地消融血栓或动脉粥样硬化斑块,且切割边缘光滑平整,没有热损伤^[5]。首都医科大学谷涌泉^[6]、北京大学人民医院马玉良^[7]等将 308 nm 准分子激光消融术 (excimer laser atherectomy, ELA) 用于临床研究和治疗,大量病例的手术治疗效果都很好。

308 nm 准分子激光血管内消融需要通过多束小直径 (~100 μm) 的固体 UV 光纤进行激光脉冲传输,光纤的使用寿命及传输效率受传输激光的能量密度和功率密度的影响。典型放电结构的准分子激光虽然能量不大、平均功率不高,但是由于脉宽仅有 20~30 ns,峰值功率达到 10^7 W 量级,如聚焦至多束光纤 (例如 50 根直径 100 μm 的石英光纤),功率密度将达到 10^9 W/cm² 量级,接近石英光纤的损伤阈值^[8],会在数个激光脉冲内形成光纤的端面或纤芯损坏,造成传输率的迅速下降,无法满足医疗应用的正常进行。如能实现激光脉宽的延长,使得脉冲峰值功率降低一半以上,将大大降低光纤传输过程中的损伤概率,有可能满足实际使用需求。

延长激光脉宽的方法有很多,光学方法通过改变光路可以实现脉宽的拉长^[9],但是其结构复杂,体积庞大,通常应用在科学装置实验中,不适用于医疗设备实际应用。由于准分子激光采用放电激励,因此可以在电路结构上调整,储能电容采用 L-C 结构延长激励脉宽,从而获得拉长的激光脉冲输出,这种方法整机

结构简单,但是最大脉宽受到限制^[10];Sze 提出采用分段式的电感稳定的电极^[9],这种装置的放电回路简单,但是电极结构复杂;日本 Sasaki 教授团队,采用多级 LC 峰化回路获得准分子激光脉宽的拉长^[11]。20 世纪末,国内对长脉宽准分子激光器进行实验研究^[12-13],但一直处于实验状态且能量传输效率低。实用化高性能长脉宽准分子激光器的研发一直没有合适的指导方法。

文中基于典型准分子激光器放电激励回路,结合 RLC 脉冲形成网络原理^[14-15],建立长脉宽准分子激光器研究的 Simulink 仿真模型,指导 308 nm 准分子激光脉宽拉长实验。对一台实验室自研的储能电容为 60 nF,电压范围在 20~29 kV 的 308 nm 准分子激光器进行实验,该激光器的工作气体是由 0.18% 的 HCl, 3.3% 的 Xe 和 96.52% 的 Ne 组成的,总气压为 3 000 mbar (1 mbar=100 Pa),出光口为氟化钙单晶基片,反射窗为 308 nm 的 0°全反,放电区域约 22 mm×8 mm。在仿真模型的指导下,通过改变激励回路电路结构和参数,激光脉宽由 30 ns 拉长到 60 ns。在储能电容电压值 28 kV 时,输出能量 407 mJ,输出能量相比典型结构的准分子激光器提高 13.1%,能量转移效率达 1.73%,激光峰值功率由 18.8 MW 降低到了 8.4 MW。延长了激光脉宽,提高了能量转移效率,同时降低了激光的峰值功率,为医疗用长脉宽准分子激光器的进一步理论探究提供一种指导方案。

1 Simulink 仿真模型的建立

1.1 典型放电激励结构仿真模型的建立

典型准分子放电激励回路如图 1 所示,工作过程为:首先高压电源 HV 通过电感 L 给储能电容 C 充电,当充电到一定的电压值时,闸流管开关 S 导通,储能电容经过均流电感和火花预电离放电通道后,向放电电容 C_d 转移能量。在这个过程中发生预电离针和预电离条之间的火花放电,其产生的紫外光照射卤素工

作气体,使工作气体发生光电离,产生大量的初始电子。当两极板电荷积累到一定程度,气体被击穿产生激光。

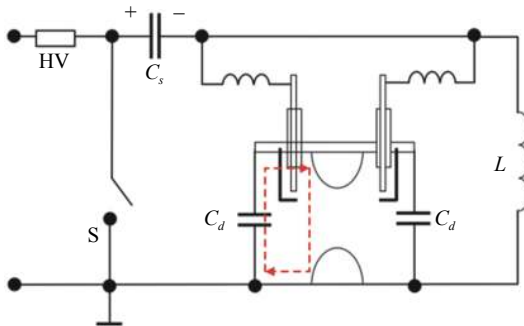


图 1 典型放电激励回路

Fig.1 Typical discharge excitation loop

308 nm XeCl 准分子激光器典型放电激励回路仿真模型如图 2 所示。

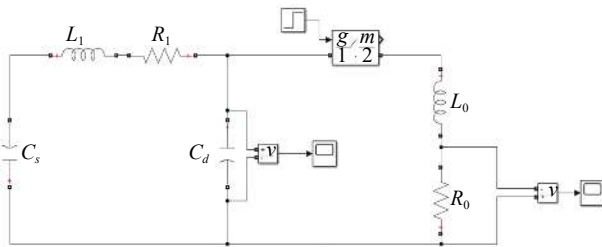


图 2 典型放电激励回路仿真模型

Fig.2 Simulation model of a typical discharge excitation loop

在该模型中： C_s 为储能电容，电容向放电电容充电的电路中存在寄生阻抗和寄生电感； L_1 、 R_1 分别为寄生电感和阻抗； C_d 为放电电容； L_0 为放电回路等效电感； R_0 为腔体等效电阻。

将图 1 放电激励电路中红框标注的气体击穿过程进行等效处理,由放电电容、工作气体、均压电感组成 RLC 等效电路。实测放电电容的电压值来近似计算工作气体发生击穿时的等效阻抗。通过基尔霍夫定律,计算得到 308 nmXeCl 准分子激光器腔体等效电阻 $R_0 = 0.24 \Omega$, 电感 $L_0 = 8.51 \text{ nH}$ 。

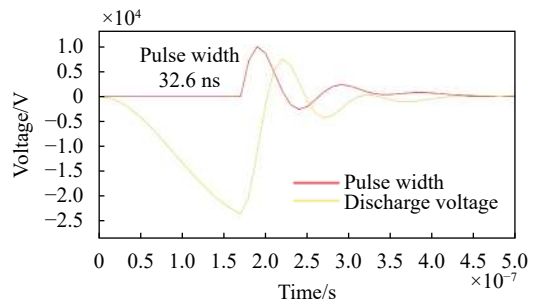
通常 308 nm 准分子激光器工作电压范围大致为 20~29 kV, 结合实验用准分子激光器的特点, 在典型放电激励回路等效模型中, 忽略储能电容 C_s 的充电过程, 给定初值 60 nF/27 kV; 放电电容 C_d 值为 40 nF, L_0 、 R_0 为等效计算值; 腔体等效电阻接入电路的时间受理想开关控制, 在其他实验条件不变的情况下, 308 nmXeCl

准分子激光器发生气体击穿的击穿条件用电极两端的电压值近似等效处理, 典型结构下实测值为 24 kV, 电荷转移所需时间为 t_1 (160 ns)。在放电电容发生放电时, 其能量经过一段时间 t_2 (10~20 ns) 沉积到气体中, 之后形成激光输出。理想开关导通时间 t 的参考值为 t_1 和 t_2 的和, 在放电激励等效仿真模型中, 理想开关经过 $t_1 + t_2$ (170 ns) 时间后导通, 将腔体的等效阻抗接入电路。

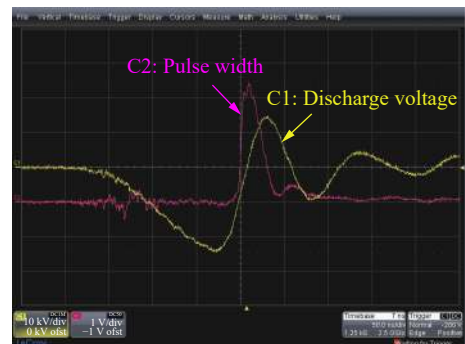
1.2 典型放电激励结构仿真模型的验证

根据典型 308 nmXeCl 准分子激光器放电激励回路等效模型得到腔体等效电阻两端的电压波形和放电电容两端的电压波形, 如图 3(a) 所示。

由仿真结果可以看出, 仿真模型得到放电电容两端的电压波形与实测电压波形 (图 3(b)C1 通道) 吻合; 腔体等效电阻两端电压半峰宽约为 32.6 ns, 该值为腔体等效电阻两端的电流持续时间的半峰宽, 实测激光脉冲宽度 (图 3(b)C2 通道) 约为 30 ns, 仿真结果与实测结果接近, 验证了用 Simulink 仿真模型获得激光脉宽参考值的方法的有效性。



(a) 仿真波形
(a) Simulation waveform



(b) 实测波形
(b) Measured waveform

图 3 腔体等效电阻电压波形和放电电容电压波形
Fig.3 Waveform of cavity equivalent resistance voltage and discharge capacitor voltage

1.3 长脉宽放电激励结构仿真模型的建立

脉冲形成网络原理为长脉宽准分子激光器的研究提供了理论基础^[6],由电感和电容组成的电路可以产生在时间轴上传播的脉冲波形,电路的特征阻抗可以认为是 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ 。当负载与电路的阻抗匹配时,在终端不会发生波反射,电流在脉冲持续时间内将能量全部消耗在负载上,流过负载的电流波形为矩形冲击电流,脉冲持续时间为 $2n\sqrt{LC}$ 。

长脉宽放电激励仿真模型的建立需要考虑激光器实际结构的搭建,结合脉冲形成网络原理,从调整 LC 峰化回路级数及回路参数两个变量来建立仿真模型。

1.3.1 3 级 PFN 结构的仿真模型

脉冲持续时间与峰化回路的级数成正比关系,文中先设计了 3 级 LC 峰化回路的等效模型,在阻抗匹配情况下,建立如图 4 所示的仿真模型。

在该模型中: R 、 L 分别为寄生阻抗和寄生电感; $C_{d1} \sim C_{d3}$ 为放电电容; $L_1 \sim L_4$ 为峰化回路电感; C_s 、 L_0 、 R_0 的含义同图 2。

在等效模型中,忽略储能电容 C_s 的充电过程,给定初值 60 nF/27 kV;考虑激光器实际结构的搭建,设定峰化回路参数: $C_{d1}=C_{d2}=16.8$ nF, $C_{d3}=11.2$ nH,在阻抗匹配的条件下, $L_1 \sim L_4$ 均为 1 nH, L_0 、 R_0 为等效计算值;当 Simulink 仿真模型不接入腔体等效阻抗时,仿真得到第四级放电电容电压值到达 24 kV 的时间 $t_1=160$ ns,能量沉积时间 $t_2=10$ ns,仿真模型理想开关参考值为 $t_1+t_2=170$ ns。

仿真得到如图 5 所示的脉冲波形,半峰宽为 45 ns,该脉冲持续时间较短,考虑在这基础上加一级峰化回路优化仿真模型拉长脉宽。

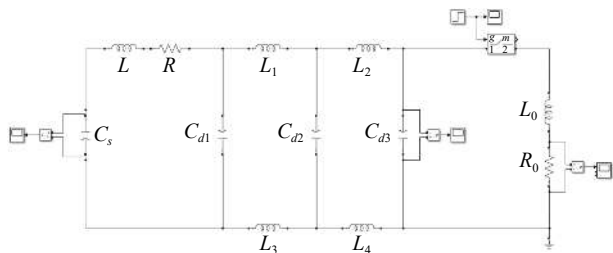


图 4 3 级 PFN 结构的放电激励回路仿真模型

Fig.4 Simulation model of discharge excitation circuit with 3-level PFN structure

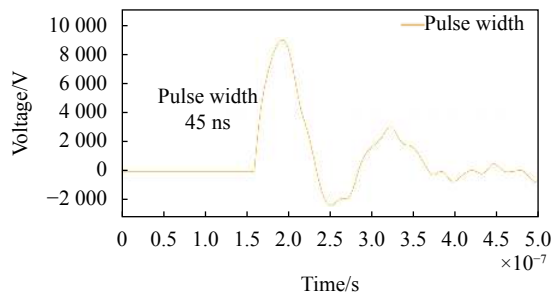


图 5 3 级 PFN 结构的仿真波形

Fig.5 Simulation waveform of 3-level PFN structure

1.3.2 4 级 PFN 结构的仿真模型及参数调整

在 3 级 PFN 结构仿真模型建立的基础上,设计并建立了 4 级 LC 峰化回路的长脉宽准分子激光器放电激励回路等效模型,在储能电容不变的条件下,结合激光器的实际结构保证实验的可行性,建立了如图 6 所示的仿真模型。

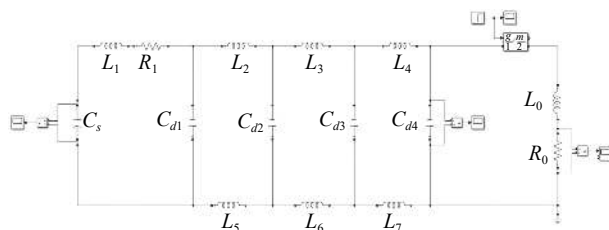


图 6 4 级 PFN 结构的放电激励回路仿真模型

Fig.6 Simulation model of discharge excitation circuit with 4-level PFN structure

在该模型中: $C_{d1} \sim C_{d4}$ 为放电电容; $L_2 \sim L_7$ 为峰化回路电感; C_s 、 L_0 、 R_0 、 L_1 、 R_1 的含义同图 2。其中储能电容给定初值 60 nF/27 kV,理想开关时间的设定依据同 3 级 PFN 电路仿真模型,调整 LC 峰化回路的参数,建立模型进行对比实验。

激光器的实际结构导致峰化回路中靠近放电电极端的电容值不易调整,同 3 级 PFN 仿真模型,设定参数为 11.2 nF。首先调整电容参数,在阻抗匹配时,确定该电容值下的电感参数,仿真结果如表 1 所示。

由仿真结果可以看出:电容值越大,脉冲宽度越长,但激光器的结构设计决定了电容的值无法再增加,所以电容值无法再进行调整。考虑激光器在实际运行时,激励回路存在能量的损耗,理论指导下,电感越大,脉冲宽度也越长。仿真已经得到电容值为 16.8 nF 时,脉冲宽度最长,在这基础上,增加电感值再进行对比实验,仿真结果如表 2 所示。

表 1 不同峰化电容值的脉冲宽度

Tab.1 Pulse width with different peaking capacitance values

Item	Capacitance/nF		
	14	15.4	16.8
Inductance/nH	0.8	0.9	1
Pulse width/ns	48	52	54

表 2 不同峰化电感值的脉冲宽度

Tab.2 Pulse width for different peaking inductance values

Item	Inductance/nH					
	1	1.5	2	2.5	3	4
Pulse width/ns	54	59	64	70	73	80

增加峰化回路中的电感值造成负载脉冲宽度拉长。电感值增加到 4 nH 时,负载上的脉冲波形开始出现畸形,如图 7 所示,表明已经牺牲了过多的阻抗匹配,4 级 LC 峰化回路下不能再进行电感参数的调整。兼顾脉宽拉长和尽可能实现阻抗匹配,当电感值为 2 nH 时,脉冲宽度拉长的同时负载脉冲波形接近光滑,如图 8 所示。此时,腔体等效阻抗两端的电流

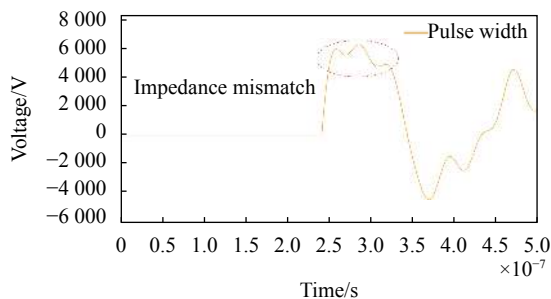


图 7 4 级 PFN 结构阻抗不匹配的仿真波形

Fig.7 Simulated waveform of impedance mismatch of 4-level PFN structure

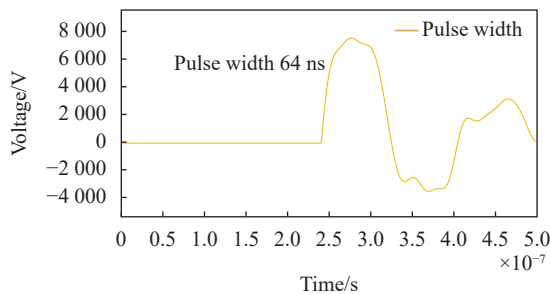


图 8 调整后的 4 级 PFN 结构的仿真波形

Fig.8 Adjusted simulation waveform of 4-level PFN structure

持续时间为 64 ns。将此仿真结果指导长脉宽准分子激光器实际结构的设计,即 $C_{d1}=C_{d2}=C_{d3}=16.8$ nF, $C_{d4}=11.2$ nF, $L_2 \sim L_7=2$ nH。

2 实验分析

实验用 308 nm 准分子激光器为实验室自研,其主要参数:储能电容为 60 nF、工作电压范围为 20~29 kV,该激光器的工作气体由 0.18% 的 HCl, 3.3% 的 Xe 和 96.52% 的 Ne 组成,总气压为 3 000 mbar。出光口为氟化钙单晶基片,反射窗为 308 nm 的 0°全反,放电区域约 22 mm×8 mm。在典型激光器放电激励回路结构上进行多级 LC 放电激励回路的改进设计,测试激光脉宽,同时分析长脉宽激光各参数。

2.1 长脉宽准分子激光器结构原理图的设计及脉宽测试

在建立的长脉宽准分子激光器放电激励回路仿真模型的指导下,设计出脉宽拉长的准分子激光器放电激励回路,其结构原理图如图 9 所示。

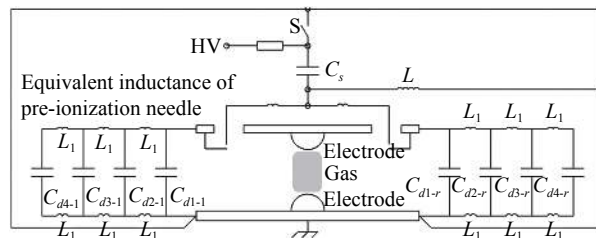


图 9 长脉宽激光器结构原理图

Fig.9 Schematic diagram of long pulse width laser structure

图中 HV 为高压充电电源, S 为高压开关管闸流管, L 为充电回路电感, Cs 为储能电容;两放电电极间为 308 nm 准分子激光器的工作气体,击穿后的工作气体是等效电阻的来源;4 级 LC 峰化回路对称分布在放电电极两端。在该结构下测量激光脉宽,获得的激光脉宽波形图如图 10 所示。

在激光器实际结构设计中,激励电路中的电感用导电铜皮制作,铜皮尺寸通过扁平导体条电感的理论计算得到,实际接入电路的电感由于电路结构的影响,与仿真模型的理论值会有偏差。图 10(a) C2 通道为激光脉宽波形,可以看出波形有明显的锯齿状波动,这是峰化回路的电路阻抗与工作气体发生击穿时的阻抗不匹配造成的,此时各级 LC 峰化回路的理论电感值均为 2.75 nH。仿真模型可以分析这种情况是



(a) 阻抗不匹配
(a) Impedance mismatch



(b) 阻抗匹配
(b) Impedance match

图 10 实测电压波形及光脉宽波形

Fig.10 Waveform of measured voltage and optical pulse width

峰化回路中靠近电极端电感值偏大造成的,通过减小 LC 峰化回路该级的电感值,将靠近电极端的理论电感值减小为 2.25 nH,其他电感值保持不变,优化峰化回路,获得图 10(b) C1 通道的激光脉宽波形图,波形变得光滑,但不是完美的矩形状,这是因为电路中实际电感值与理论值的偏差导致不能做到绝对的阻抗匹配。通过实验结果的反馈进行实际结构优化的过程很好地体现了 Simulink 仿真模型的有效性。

实测激光脉冲宽度约为 61 ns,在整个工作电压范围内,激光脉宽稳定在 60 ns 左右,储能电容的电压值对激光脉宽的影响不大。第四级放电电容电压波形与仿真模型的电压波形图基本吻合,说明文中提出的 Simulink 仿真模型对准分子激光脉宽拉长实验具有有效的指导。

2.2 能量及转移效率测试及分析

在 308 nm 准分子激光器的工作电压范围内,对标准和拉长脉宽下的准分子激光器激光输出能量进行测试,分析能量转移效率。实验数据如表 3 所示。

典型结构的准分子激光器,通常采用一定的放电电容/储能电容比来获得高的电压增益,但同时会牺牲能量转移效率,实验激光器的储能电容为 60 nF,充电电压范围在 20~29 kV 之间,其能量转移效率稳定在 1.5% 左右。

长脉宽放电激励回路采用多级 LC 放电回路,电荷转移时间拉长,能量沉积,放电气体的时间增加。在能量转移时,放电激励回路结构更加复杂,使典型结构存在较大的能量损耗,但是由于放电电容的增加,当工作电压同样超过阈值时,储存的电荷量提高,且阻抗匹配时,多级 LC 能量转移的损耗低于典型结构电容比造成的能量损耗,这意味着整体的能量转移效率会有所提高,实验结果可以很好地验证这一点。当工作电压为 25 kV 时,能量转移效率较典型结构的准分子激光器低 0.14%;随着电压的提高,输出能量效率逐步提高,当电压高于 27 kV 时,多级 LC 峰化激励回路的激光器能量转移效率高于典型回路,并且在 28 kV 时,激光输出能量达 407 mJ,转移效率达 1.73%,提高了 0.2%,激光峰值功率由 18.8 MW

表 3 不同激光脉宽的实验数据

Tab.3 Experimental data of different laser pulse widths

Voltage/kV	Energy/mJ		Energy transfer efficiency	
	Typical structure (Pulse width 30 ns)	Pulse width elongated structure (Pulse width 60 ns)	Typical structure (Pulse width 30 ns)	Pulse width elongated structure (Pulse width 60 ns)
25	296	270	1.579%	1.44%
26	323	307	1.593%	1.514%
27	342	362	1.564%	1.655%
28	360	407	1.531%	1.73%
29	388	428	1.538%	1.696%

降低到了 8.4 MW, 在 308 nm 准分子激光延长脉冲宽度的条件下, 激光峰值功率降低的同时实现了激光输出能量和转移效率的提高, 取得了良好的实验效果。

3 结 论

文中针对长脉宽准分子激光的实际应用需求, 首先通过 Simulink 建模对典型准分子激光器放电激励回路进行近似等效, 验证了典型结构下 Simulink 模型的有效性; 其次在脉冲形成网络原理的指导下, 设计了 4 级 LC 峰化电路的长脉宽准分子激光器放电激励仿真模型, 并用模型指导激光器的结构设计和参数确定, 对一台储能电容为 60 nF, 电压范围在 20~29 kV 之间的 308 nm 准分子激光器进行实验。通过改变激励回路电路结构和参数, 激光脉宽由 30 ns 拉长到 60 ns, 并且当储能电容电压值 28 kV 时, 输出激光脉冲能量达 407 mJ, 相比典型结构的准分子激光器提高 13.1%, 整体的能量转移效率达 1.73%, 激光峰值功率由 18.8 MW 降低到了 8.4 MW, 达到激光脉宽延长的同时获得高脉冲能量输出和高能量转移效率的目的, 为实用化长脉宽准分子激光器提供了有效的仿真模型和理论基础。

参考文献:

- [1] Yu Y S, You L B, Liang X, et al. Progress of excimer lasers technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2253-2270. (in Chinese)
- [2] Lou Q H. Progress of excimer lasers and its applications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1994, A21(5): 361-364. (in Chinese)
- [3] Pan N, Liang X, Lin Y, et al. Transmission method of analog signal in excimer laser system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0905003. (in Chinese)
- [4] Zhao Z S, Zhang H, Gu H M, et al. Medical application of excimer laser [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 1996, 5(1): 806-809. (in Chinese)
- [5] Lu E B, Liu Z M. Recent research on laser treatment of cardiovascular diseases [J]. *Journal of Norman Bethune University of Medical Science*, 1987, 13(4): 378-380. (in Chinese)
- [6] Gu Y Q, Guo L R, Qi L X, et al. Treatment of 3 cases of chronic ischemia of lower extremity artery with excimer laser ablation combined with drug balloon [J]. *Journal of Interventional Radiology*, 2017, 26(1): 10-14. (in Chinese)
- [7] Ma Y L, Cao C F, Jiang W N, et al. Application of excimer laser coronary ablation in complicated coronary artery disease [J]. *Chinese Circulation Journal*, 2019, 34(2): 134-138. (in Chinese)
- [8] Zhao X H, Gao Y, Xu M J, et al. Studies on nanosecond laser induced damage to silica fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8): 5027-5034. (in Chinese)
- [9] Sze R C. Inductively stabilized rare-gas halide minilaser for long-pulsed operation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(3): 1224-1227.
- [10] Sugii M, Ando M, Sasaki K. Simple long-pulse XeCl laser with narrow-line output [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 24(9): 1458-1460.
- [11] Sugii M, Okabe M, Watanabe A, et al. Single-stage high-beam-quality XeCl laser with a phase-conjugate brillouin mirror [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 24(11): 2264-2269.
- [12] Wang G C, Zhang Z P, Chen Y R, et al. The characteristic studies of a long pulsed XeCl laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1996, 13(6): 513-516. (in Chinese)
- [13] Gu H M, Zhao Z S, Kuang M, et al. Study of a 150 ns long pluse XeCl excimer laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(4): 297-301. (in Chinese)
- [14] Wang W C, Zhao J C. Research on the discharge characteristics of pulse forming network (PFN) [J]. *Modern Electronic Technology*, 2015, 38(1): 144-146. (in Chinese)
- [15] Hughes T H, Morelli A, Smith M C, et al. On a concept of genericity for RLC networks [J]. *Systems & Control Letters*, 2019, 134: 104562.
- [16] Bluhm H. Pulsed Power System Principles and Applications[M]. Jiang Weihua, Zhang Chi, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)