

短谐振腔准分子激光输出的脉冲特性研究

钱育军 上官诚

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

蔡英时

(上海科技大学物理系)

提 要

用腔长为7.5 cm~20 cm的紫外光预电离 Blumlein 横向放电泵浦 XeCl 准分子激光器可产生半宽为1.8 ns~5 ns的短脉冲输出。速率方程的计算机模拟所给出的激光振荡初始尖峰和实验结果做了比较。

关键词: 阻尼弛豫振荡; 短谐振腔; 准分子激光。

一、引 言

高功率, 窄脉宽紫外相干光在快速动力学过程, 短寿命原子分子的光学泵浦, 增强非线性光学效应等方面的研究中有着广泛应用潜力。一般紫外光预电离, Blumlein 横向放电泵浦的准分子激光器具有1 m左右腔长, 脉冲半宽为10~20 ns, 峰值功率10 mW量级。短脉冲商品准分子激光器件可输出半宽为5 ns, 峰值功率1 mW的XeCl激光脉冲^[1]。在短脉冲技术中, 短腔技术是最直接方便的, 可有效地获得单个短脉冲。

短腔技术利用的是短腔的可控谐振瞬态效应。在一定条件下, 腔内光场产生阻尼弛豫振荡, 用其最尖锐的初始尖峰来压缩激光脉冲, 其物理依据是激活介质的超阈值粒子数反转与电磁场光子间的相互作用。这种现象首先在固体脉冲激光中观察到, 以后逐渐在半导体、染料激光中获得^[2], 并进行了相应的理论研究^[3]。1984年, 文献[4]将上述理论和实验推广至准分子XeCl激光器, 获得了半宽为1 ns的激光振荡输出。本文对准分子激光短腔技术作较详细的实验和理论研究, 说明用7.5 cm~20 cm长的谐振腔, 紫外光预电离, Blumlein 横向放电泵浦的XeCl准分子激光器可产生1.8 ns~5 ns半宽的短脉冲输出。实验结果与理论模拟计算符合得较好。

二、短腔激光振荡理论

用二能级模型来描述准分子激活介质, 有如下速率方程^[4]:

$$\frac{dn}{dt} = W(t) - \sigma nq - n/\tau, \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt} = \sigma nq - q/t_0, \quad (2)$$

其中 n 是准分子密进; $W(t)$ 是放电泵浦速率; σ 是受激辐射截面; q 为腔内光子数密度;

收稿日期: 1986年7月9日; 收到修改稿日期: 1986年12月29日

t_0 是腔内光子寿命; τ 是自发辐射寿命; c 是在介质中的光速。由于准分子激光下能级可视为是空的,故 n 亦表示准分子粒子反转数密度。因短腔的特点是 t_0 很小,输出脉冲半宽要远大于 t_0 ,所以方程中未考虑传输效应。

在小信号近似下,可从方程 (1), (2) 中推得产生弛豫振荡的条件是^[3]: $\tau/t_0 > [m^2/4(m-1)]$, $m = W_0 c \sigma t_0 \tau$ 。其中 W_0 是 $W(t)$ 的最大值, m 是超阈值泵浦比。上式可以变成:

$$\frac{2\tau}{t_0} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{t_0}{\tau}} \right] < m < \frac{2\tau}{t_0} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{t_0}{\tau}} \right] \quad (3)$$

从中可知弛豫振荡的必要条件是 $t_0 \leq \tau$ 。参量 t_0, W_0 决定了输出激光的脉冲性质。

为了计算方便,将 (1), (2) 式化成无量纲方程:

$$dN/dT = P(M - N) - PNQ, \quad (4)$$

$$d\theta/dT = (N - 1)Q_0 \quad (5)$$

其中 $T = t/t_0, N = n/n_t, M = W(t)/W_t, Q = q/q_0, P = t_0/\tau, n_t = 1/(c\sigma t_0)$ (阈值粒子数反转密度); $W_t = 1/(c\sigma t_0 \tau)$ (阈值泵浦速率); $q_0 = 1/c\sigma\tau$ (平均光子数密度)。用有限微元法: $du(l)/dT = [U(l) - U(l-1)]/\Delta T, (\Delta T \rightarrow 0)$, 进行逐步迭代来实现计算机数值模拟。计算中给定初始条件是: $N(1) = 0, Q(1) = c\sigma\tau$ (从一个光子开始计算), 并认为泵浦脉冲是半宽为 τ_0 的高斯脉冲, 即:

$$M(l) = m \cdot \exp\{-4 \ln 2 [(l-1)\Delta T \cdot t_0/\tau_0 - 2]^2\} \quad (6)$$

其中 $\Delta T = 4 \cdot \tau_0 / M_0 t_0$ 。计算中取如下参数: $\tau = 1.4 \text{ ns}, \sigma = 4.8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2, c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}, M_0$ 是最大取点数。计算结果及分析见下, 其中 $A_3 = m, A_4 = \tau_0 (10^{-9} \text{ s}), A_5 = t_0 (10^{-9} \text{ s})$ 。图中 Q 指 q , 单位 cm^{-3} , G 指 N, EM 指 m 。未标明的图形指高斯泵浦脉冲波形。

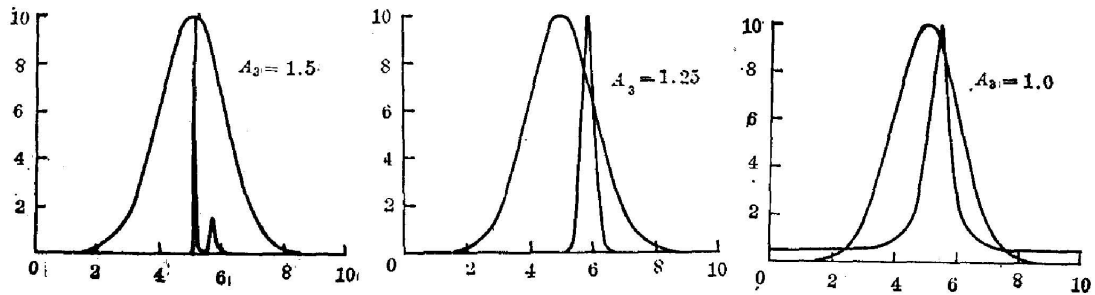


Fig. 1 Oscillating pulse shapes

$A_4 = 10, A_5 = 0.028$

1. $t_0 = 0.028 \text{ ns}$, 此时 M_0 取 1000 才能获得正常解。各波形变化图见图 1, 图 2。从中可知: A. 随泵浦水平的提高, 弛豫振荡越来越明显, 振荡波数增多, 初始尖峰变窄。振荡脉冲间隔相对固定, 可认为是振荡周期, 脉冲总轮廓是近似指数衰减的。B. 在相同泵浦水平下, 泵浦脉冲宽度对激光脉冲波形产生很大影响。 A_4 越大, 则弛豫振荡越明显。 $A_4 = 5$, 激光半宽为 0.2 ns , $A_4 = 20$, 激光半宽为 0.4 ns 。

2. 计算并得到了 $t_0 = 0.18 \text{ ns}, 0.33 \text{ ns}, 0.6 \text{ ns}, 0.9 \text{ ns}$, 时的激光输出脉冲波形, 取 $M_0 = 400$ 。其中 $t_0 = 0.18 \text{ ns}$ 时的波形参见图 3, 可以看出, 随泵浦水平的提高, 激光脉冲前沿急骤变陡, 后沿呈现后续脉冲, 越来越强, 此时初始尖峰半宽变化甚微。随 t_0 的增加, 后续脉冲

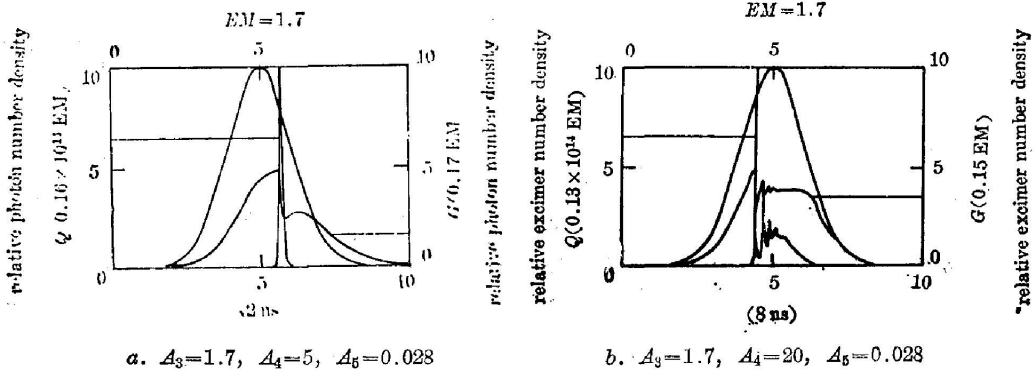


Fig. 2 Pulse shapes

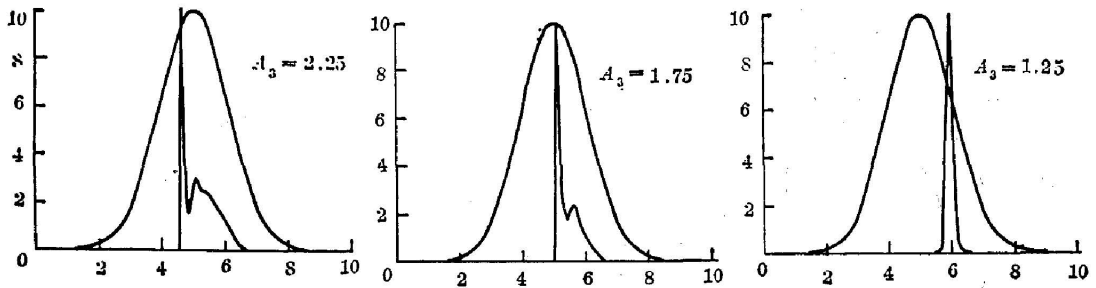


Fig. 3 Oscillating pulse shapes
 $A_4=20, A_6=0.18$

更高更宽, 尖峰变得不明显。

3. $t_0=2.8 \text{ ns}$, 此时 $P=t_0/\tau=2$, 故而根据(3)式在小信号近似下, 不可能产生弛豫振荡。计算结果见图 4, 图 5。也表明不能产生尖峰现象, 激光脉冲前沿较陡, 后沿则与泵浦脉冲一致。不呈现明显压缩效应。

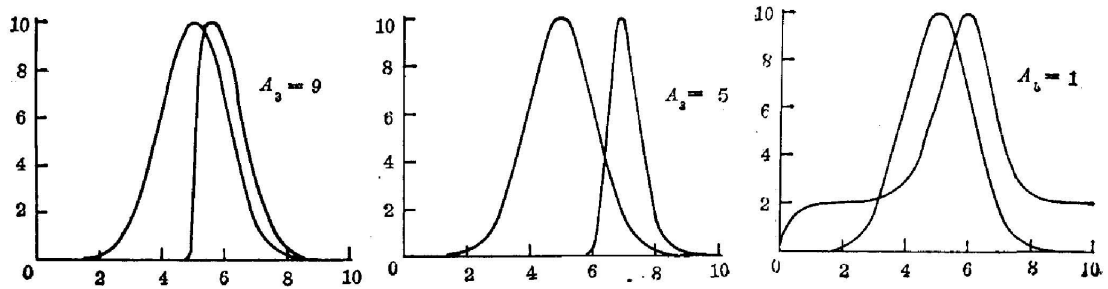


Fig. 4 Output pulse shapes
 $A_4=20, A_6=2.8$

三、短腔准分子激光短脉冲实验及结果

1. 实验

XeCl 放电管是内径为 $\phi 84$, 外径 $\phi 120$, 长为 10.5 cm 的环氧筒。预电离放电电极采用

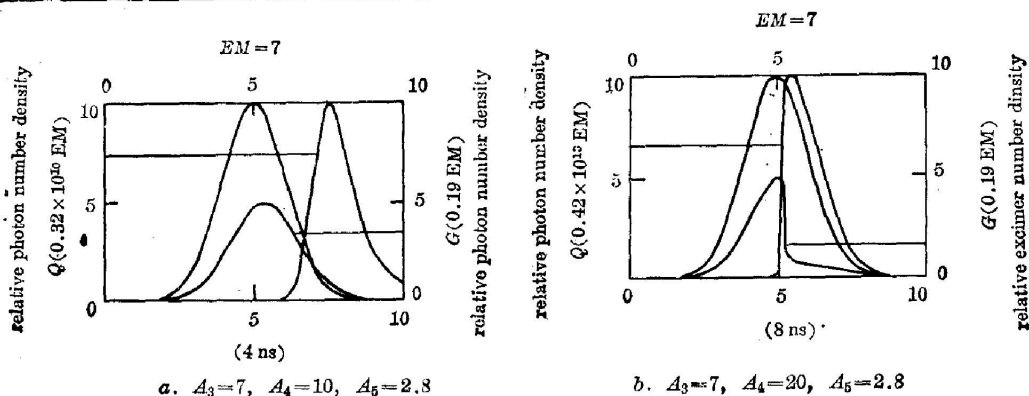


Fig. 5 Pulse shapes

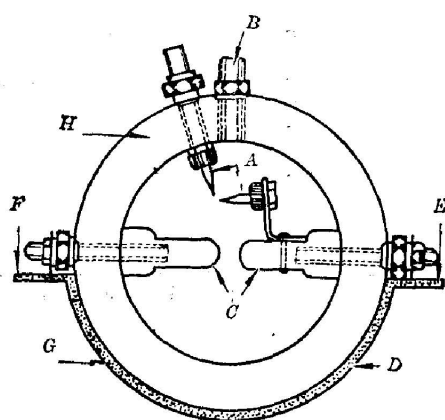


Fig. 6 Diagram of discharging tube cross section

两对放电针,能产生两个强火花隙,以提供足够强度的紫外光预电离。放电火花隙间距1.5 mm,离主放电电极的高度为15 mm,以防止对主放电电极的直接放电。主放电电极间距为7 mm,有效放电体积为 $50 \times 7 \times 2 \text{ mm}^3$ 。螺孔均用O型橡胶圈密封。为了使腔长尽量缩短,采用内伸式腔头结构,腔长最短可达74 mm,此时电极与镜片间隔7 mm,故腔长不能再缩短,否则将引起电极与镜片间的高压击穿。

要获得短脉冲输出,除使 t_0 尽可能小外,还必须减小放电的脉宽,其重要环节是尽可能的减小放电回路的电感。为此实验中使用金属压板式三极球隙开关,放电间距5 mm,气压为1.2 atm N_2 。主放电球隙开关间距为3 mm,4 atm N_2 。平板式电容厚为0.6 mm 介质为聚脂薄膜,宽为50 mm。混合气体总气压高达5 atm,放电电压为25 kV左右。放电电路为一般的Blumlein放电电路。

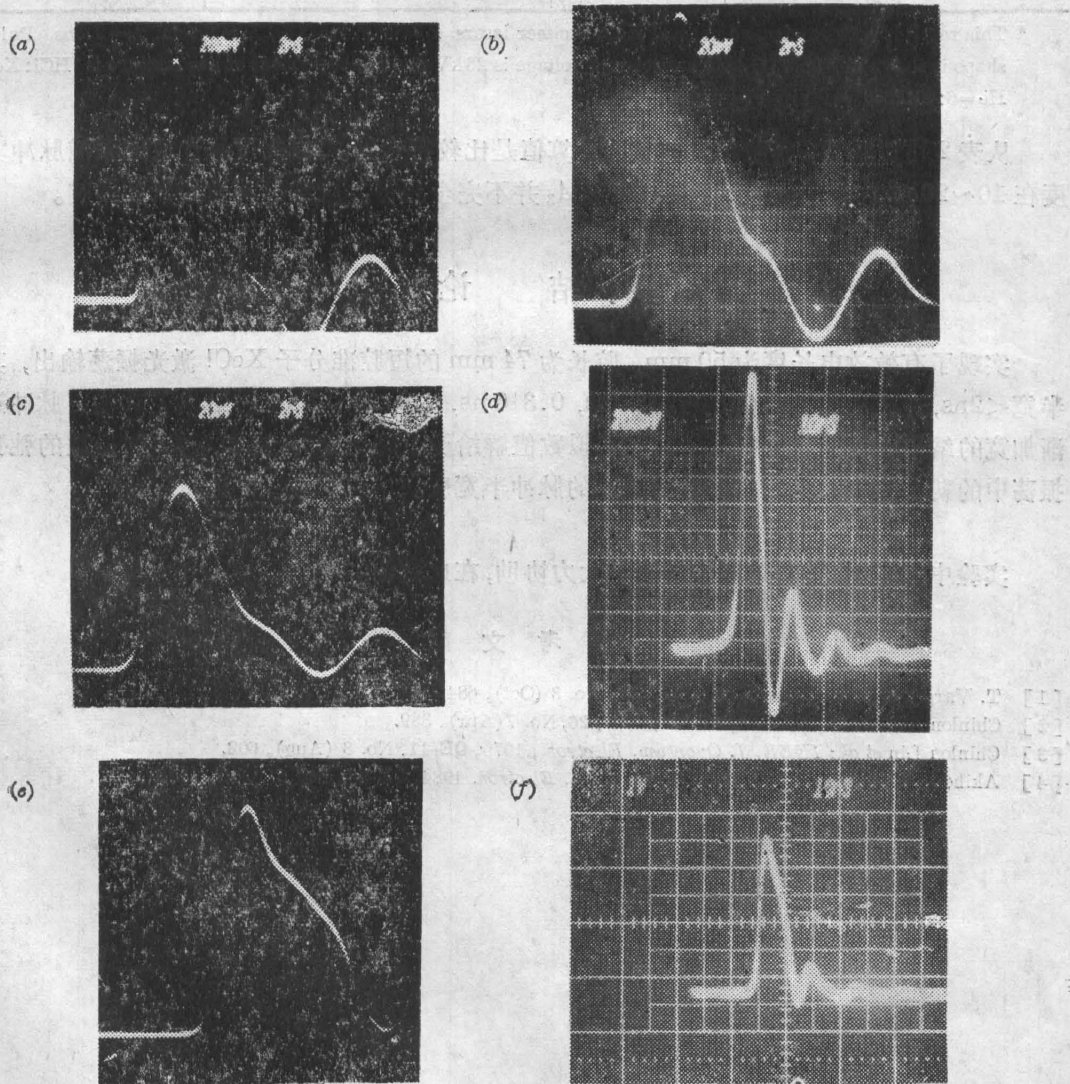
2. 结果

用GD-5强流光电管作光电转换探测器,存储式400 MHz示波器记录观察,探测系统响应时间为1.5 ns左右。

实验了五种不同 t_0 的短脉冲准分子XeCl激光器。电容参数如: $C_1=0.6 \text{ nF}$, $C_2=0.3 \text{ nF}$, $C_3=10 \text{ nF}$ 。按 $t_0 = -2L_0 / [C \ln(r_1 r_2)]$ 计算,其中 L_0 为激光腔长, r_1 、 r_2 为前后镜片反射率。气体比例为 $\text{HCl}:\text{Xe}:\text{He}=5.5:50:3860 \text{ Torr}$ 。结果见表1。

Table 1 Short pulse experimental results using short cavities

L_c (cm)	r_1 (%)	r_2 (%)	t_c (ps)	discharge voltage U (kV)	shape Fig.	FWHM (ns)	real FWHM resulted from deconvolution (ns)
74	90	8	187.5	26	Fig. 7a	2.3	1.8
74	90	23	316	24	Fig. 7b	3.1	2.7
132	90	8	334	24	Fig. 7c	3.3	2.9
132	90	23	600	24	Fig. 7d	3.7	3.35
200	90	23	954	24	Fig. 7e	4.3	4



a. $t_c=187.5$ ps, 2ns/div; b. $t_c=316$ ps, 2ns/div; c. $t_c=334$ ps, 2ns/div; d. $t_c=600$ ps, 20ns/div;
e. $t_c=954$ ps, 2ns/div; f. $t_c=2.5$ ns, 20ns/div.

Fig. 7 XeCl laser pulse oscillogram

实验结果与理论计算结果列于表 2。

Table 2 Comparison of results

t_c (ns)	$A_4=10\text{ns}$ theoretical value		$A_4=20\text{ns}$ theoretical value		experimental value (ns)
	A_3	FWHM (ns)	A_3	FWHM (ns)	
0.18	2	1	2	1	1.8
0.33	3.5	1	3.5	1.24	2.9
0.6	3.5	2	3.5	2.8	3.35
0.9	3.5	4	3.5	5.2	4
2.8	7	6.4	7	10.8	8.5*

* This result is obtained from a general XeCl excimer lasers. $r_1=85\%$, $r_2=8\%$, $L_c=100\text{cm}$, $t_c=2.5\text{ns}$. Pulse shape is shown in Fig. 7(f). Main discharge voltage is 26kV and the component of gas mixture is HCl:Xe:He=6:40:2280

从表 2 可以看出, 实验结果与理论计算值是比较符合的。由此可估计放电泵浦脉冲宽度在 10~20 ns 内。但实验 A_3 值与理论 A_3 并不完全相符。应考虑其他因素的影响。

四、结 论

实现了有效放电长度为 50 mm, 腔长为 74 mm 的短腔准分子 XeCl 激光振荡输出, 其半宽 $< 2\text{ns}$, 并在当腔长变化, $t_c=0.33\text{ ns}$, 0.316 ns , 0.6 ns , 0.9 ns 时给出了其输出脉冲逐渐加宽的结果。用速率方程的计算机模拟数值解给予了理论解释, 由于 $t_c \ll \tau$ 时呈现的弛豫振荡中的初始尖峰大大压缩了输出激光的脉冲半宽度。

实验中陈钰明, 窦爱荣同志给予了大力协助, 在此致谢。

参 考 文 献

- [1] T. Varghese; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**, No. 8 (Oct), 684.
- [2] Chinlon Lin *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**, No. 7 (Apr), 389.
- [3] Chinlon Lin *et al.*; *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1975, **QE-11**, No. 8 (Aug), 602.
- [4] Akihiko tokahashi *et al.*; *IEEE J. Quantum. Electron.* 1984, **QE-20**, No. 10, (Oct), 1196.

The investigation of the output pulses properties of short oscillating cavity excimer laser

QIAN YUJUN, SHANGGUAN CHENG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

CAI YINGSHI

(Department of Physics, Shanghai University of Science and Technology)

(Received 9 July 1986; revised 29 December 1986)

Abstract

The UV light preionized, Blumlein transversely discharge pumped XeCl excimer laser with cavity lengths of 7.5 cm, 20 cm can produce short laser pulses output with FWHM 1.8ns, 5ns. The laser oscillation initial spiking given by the computer simulation of the rate equation is used to compare the experimental results.

Key Words: damped relaxation oscillation; short oscillation cavity; excimer laser.