

# 在 $\text{XeCl}^*$ 放电激光器中的回路电感效应

郑承恩 曹弘敏\* 刘波\* 魏运荣 丁爱臻 楼祺洪

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 本文研究了电子雪崩放电  $\text{XeCl}^*$  准分子激光器放电回路电感对放电特性与激光脉冲输出能量的影响。

## Effect of discharge circuit inductance on laser output energy and discharge properties in an avalanche discharge $\text{XeCl}^*$ excimer laser

Zheng Chengen, Cao Hongmin, Liu Bo, Wei Yunrong, Ding Aizhen, Lou Qihong

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

**Abstract:** Effects of additional inductance in discharge circuit on discharge properties and laser output energy have been investigated in an avalanche discharge  $\text{XeCl}^*$  excimer laser. Based on these results, we have obtained laser output pulse energy of 0.6 J (0.7~0.8 J/L. atm) by using film and paper capacitors as laser discharge power supply.

为在极短的时间内在气体中均匀储入尽量多的放电能量, 除了对放电电极有特殊的均匀场面型设计要求外, 还需使整个放电回路, 包括放电能源、开关元件以及在电源与放电室之间的连接部分具有尽量小的电感。这些要求给这类器件的设计与制造带来一些比较复杂的问题。本文从这个问题出发研究了在放电回路中引入不同电感量后对激光放电特性与激光输出能量所引起的变化。结果表明, 在本实验所用的放电回路中, 电感量的增加对放电电压前沿影响不显著; 另一方面, 虽然也观察到激光能量随放电回路附加电感  $L$  的增加而减小, 但是只要  $L$  不大于 0.1 微亨, 激光输出能量仍保持原来最大能量的 2/3 以上。基于这个结果, 我们在同一放电

装置中, 用国产纸膜混介电容代替原来的水电容作放电能源, 得到了几乎相同的激光能量。

图 1 是实验装置示意图, Lin 等人以前曾使用过此回路<sup>[1]</sup>。图 1 中  $D_0$  是激光放电室, 有效放电体积  $\sim 2 \times 1.5 \times 70$  厘米<sup>3</sup>;  $R$  是

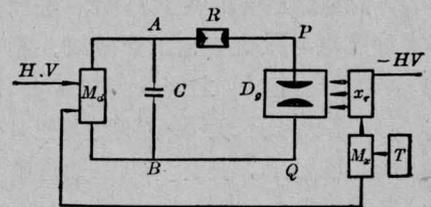


图 1 实验装置示意图

收稿日期: 1983 年 11 月 22 日。

\* 南京工学院 1983 年届毕业生。

轨道开关,这是由两条长 80 厘米的平行排列的黄铜电极装置在一个充氮气的玻璃钢小室内组成的,极间距 2 厘米。电极相对凸出部分截面的曲率半径约 5 毫米。在一只电极凸面中心位置,沿电极面镶嵌了一条长度也是 80 厘米、0.03 毫米厚的钼箔,箔的边刃高出电极面  $\sim 5$  毫米。随放电次数增多,箔的突出部分因放电溅散逐渐变短,但未观察到此现象对激光输出有任何影响; $C$  是主放电电容; $T$  是触发器; $M_a$  是输出容量 100 毫微法的两级 Marx 发生器,系对主放电电容脉冲充电用; $X_r$  为大面积 X 光发生器,供放电气体预电离用; $M_x$  是输出电压可在 60~150 千伏变化的 Marx 发生器,作 X 光发生器电源用;该装置其它参数细节可参阅[2]。工作时首先通过触发器  $T$  使  $M_x$  动作,引起  $X_r$  发生 X 光辐射,同时由  $M_x$  引出一部分高压讯号触发  $M_a$ ,使  $M_a$  对  $C$  充电,当充电到一定的电压水平时轨道开关  $R$  自动多通道击穿,使电压加到放电电极上发生放电。

为了研究放电回路(即  $ABQP$  段部分)电感对放电特性与激光输出的影响,开始先把放电回路的电感尽量减小。主放电电容采用总容量为 52 毫微法的水电容,这是由三块间距 2.5 厘米、面积  $80 \times 120$  厘米<sup>2</sup> 的镀镍铝板浸在去离子水中并联组成的。在  $C$  与  $D_0$  之间的电学连接均采用宽度 80 厘米的铝板并间隔以约 4 毫米厚的聚乙烯绝缘层紧压而成。在这个低电感放电回路装置中,可以稳定获得  $(0.7 \sim 1)$  焦耳/升·大气压的  $XeCl(\lambda = 3080 \text{ \AA})$  的激光输出能量密度。在研究回路电感对放电与激光输出的影响时,把轨道开关  $R$  与放电室  $D_0$  之间的连接部分(即  $P$  段)换为数目不等、长为 50 厘米、直径 2 毫米的铜导线并联而成。由计算可以知道这些铜导线的电感。

实验中使用 4 大气压  $HCl/Xe/Ne$  混合气体,其比分为  $HCl/Xe/Ne = 0.5/1/98.5$ ;主放电 Marx 发生器直流充电电压 33 千伏;

激光能量测试采用经过标定的 JN-1 型碳斗与检流计;激光放电电压与电流波形用仿 OK-19M2 示波器记录,分压器是经过标定的电阻分压器,电流测量用矩形线圈法<sup>[3]</sup>。

图 2 给出了激光能量与放电能量随着放电回路附加电感  $L$  的变化。图中对应 0.128 微亨的电感是在放电回路  $P$  段用 16 根长 50 厘米、直径 2 毫米的铜导线并联得到的。用一只 80 厘米宽的铝板代替这些铜导线即得图中所示输出能量最高的点。

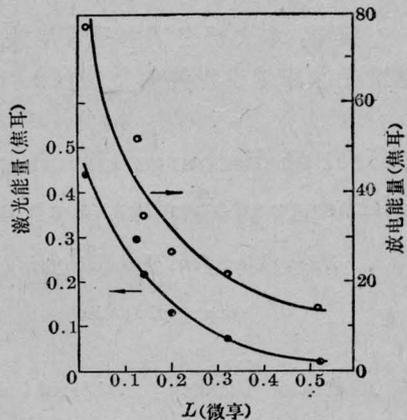


图 2 激光能量与放电能量随放电回路附加电感  $L$  的变化

进一步研究表明,这种情况是由两方面因素造成的。其一是激光放电功率随电感增加而降低。图 3 是放电功率随时间与附加电感的变化,这是根据同步测量的放电电流与电压波形计算得到的。其二,激光固有效率(定义为激光能量与放电能量之比值)随放电回路附加电感  $L$  的增加而降低,如图 4 所示。

分析在不同的回路附加电感  $L$  情况下的电压波形与电流波形可以看出,在本实验所示的放电回路中,随着  $L$  的增加,放电电压波形幅度变化并不显著。图 5 是在放电回路附加电感  $L$  分别为 0.141 微亨与 0.521 微亨时测得的放电电压与电流波形。另一方面,在  $L$  变化时,由于  $E/N$  近似不变,说明电子能量分布大致相同,而电感  $L$  变大引起放电电流减小又反映了放电电子密度降低,这造成

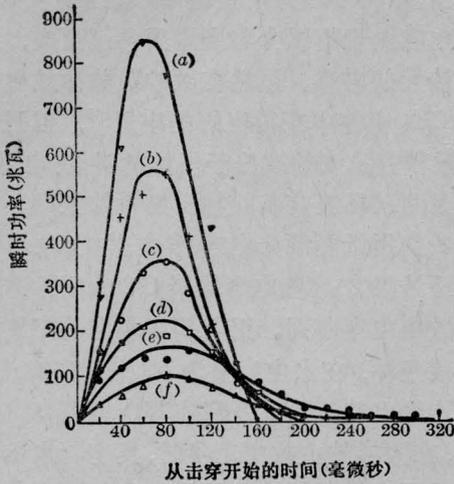


图3 放电瞬时注入功率随时间的变化  
轨道开关气压为 2.5 大气压  
电感量: (a)—0.072 微亨; (b)—0.128 微亨;  
(c)—0.141 微亨; (d)—0.201 微亨;  
(e)—0.322 微亨; (f)—0.521 微亨。

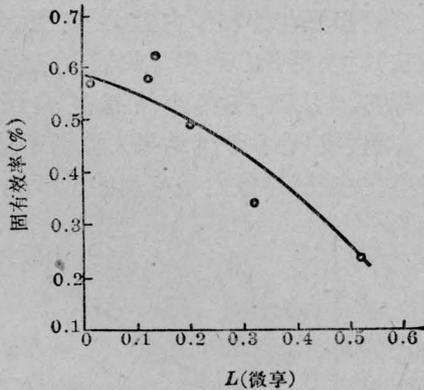


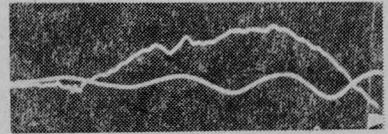
图4 激光固有效率随放电回路附加电感  $L$  的变化

了在激发某些种类的粒子时,反应速度变低,图4所示的固有效率随电感  $L$  的变化,可能主要由这个原因造成。

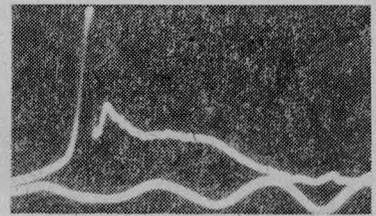
轨道开关在放电回路中起了重要的作用。一方面它锐化了放电电压前沿,另一方面其击穿电压数值在一定程度上决定了放电电压的大小。适当升高开关气压,可以提高其击穿电压,对升高放电电压与激光能量是有益的。图6就是轨道开关气压对激光输出能量影响的测量结果。



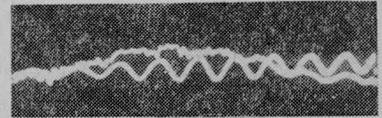
(a)  $L=0.141$  微亨



(b)  $L=0.141$  微亨



(c)  $L=0.521$  微亨



(d)  $L=0.521$  微亨

图5 在不同的放电回路附加电感  $L$  的条件下,测得的放电电压波形[(a)与(c)]和放电电流波形[(b)与(d)]

(图中正弦波形为仿 OK-19 M2 示波器时标,除(d)  $f=120$  兆赫外,其余  $f=10$  兆赫)

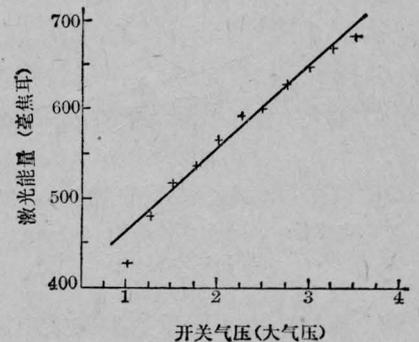


图6 开关气压对输出的影响

图7是附加电感对放电电压前沿与电流前沿影响的测量结果。虽然  $L$  增大到  $\sim 0.5$  微亨,但电压前沿仅增加到约 30 毫微秒,放

电电流前沿却有较大的数值，此时达到 $\sim 320$ 毫微秒。这在很大程度上由放电室阻抗与轨道开关特性决定。在这种放电回路中，放电电压前沿主要由放电室击穿前的回路特性决定，而电流前沿则主要由放电击穿后的回路特性决定。图8给出放电室阻抗随时间的变化。

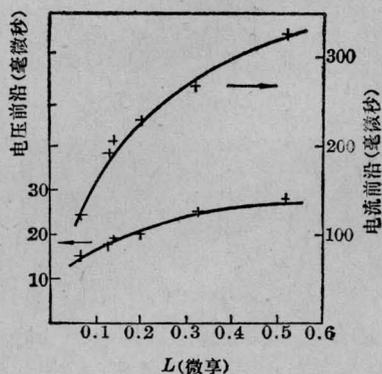


图7 电感对放电前沿的影响

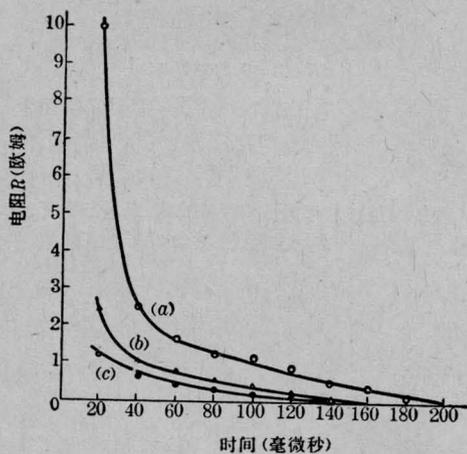


图8 电阻随时间的变化

电感量: (a)—0.072 微亨; (b)—0.128 微亨; (c)—0.521 微亨

综上所述，图1所示类型的放电回路具有较好的放电电压前沿特性，而且由图2可见，当回路附加电感大到0.1微亨时，仍能保持原有能量的 $2/3$ 以上，这意味着可以放宽对放电电容 $C$ 的低感要求。基于这种想法，我们用纸膜混介电容作为主放电电容 $C$ 进行

了实验，获得了较好的输出结果。众所周知，这类电容由于用纸介与金属箔卷制而成，故具有较大的电感。虽然在微秒级脉冲放电的TEACO<sub>2</sub>器件中获得很好的应用<sup>[4]</sup>，但用于0.1微秒数量级的准分子气体脉冲放电中，尚未见到获得很高脉冲输出能量的报导。图9是我们用纸膜混介电容作主放电电容 $C$ 的实验结果。这些电容均属C804型脉冲高压放电电容序列。用与图9相同的充气放电实验条件，在水电容量为52毫微法时，激光平均输出能量约640毫焦耳。由图9可以看出，在同样的主放电电容时，具有与水电容情况差不多相同的输出能量。这条实验曲线电容量的变化是用0.002微法/30千伏电容串联为一组，然后多组并联得到的；图中能量较低的一组为多只0.01微法/50千伏电容直接并联的结果。另外，用4只0.047微法/30千伏分别串联与并联作主放电电源( $C=47$ 毫微法)时获得340毫焦耳的输出，这在图9中未标出。从这些实验结果显然还可看出，多组(或只)并联的结果，降低了总的电感，这对快速脉冲放电是有利的。

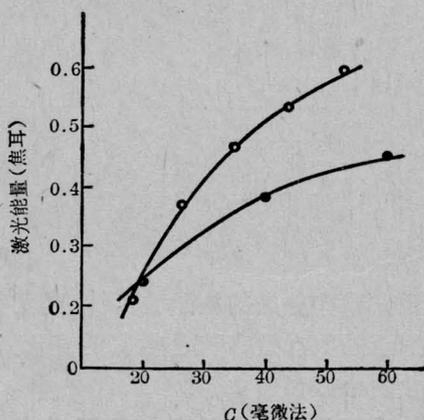


图9 放电电容量的变化对激光能量的影响

○ 用电容C804型0.0022微法/30千伏串并联  
● 用电容C804型0.01微法/50千伏并联

本文关于放电回路附加电感对放电特性与激光输出影响的研究结果，是在预电离电子密度 $n_e$ 在 $(10^9 \sim 10^{10})$ 个/厘米<sup>3</sup>的范围内

取得的<sup>[2]</sup>。

轨道开关在本实验中起关键作用。我们曾把此开关短路，此时放电电压前沿长达0.4微秒，它使激光输出能量降为使用轨道开关情况的1/4左右。实际上，这时的放电电压前沿主要由对主放电电容充电的 Marx 发生器  $M_d$  的充电电压前沿决定。我们估计，使用一般的小型充气或空气开关，亦有可能获得一定水平的输出能量，但是我们未进行这种实验。

## 附 录

$m$  根导线并联后的总电感  $L$  可按下列方程计算：

$$\left. \begin{aligned} L_{11}\dot{I}_1 + L_{12}\dot{I}_2 + \dots + L_{1m}\dot{I}_m &= L\dot{I}, \\ L_{21}\dot{I}_1 + L_{22}\dot{I}_2 + \dots + L_{2m}\dot{I}_m &= L\dot{I}, \\ \dots & \\ L_{m1}\dot{I}_1 + L_{m2}\dot{I}_2 + \dots + L_{mm}\dot{I}_m &= L\dot{I}, \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_m &= \dot{I}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $I_i$  是第  $i$  根导线中流过的电流，

$$\dot{I}_i = \frac{d}{dt} I_i;$$

$I$  是流过  $m$  根导线的电流和， $I = I_1 + I_2 + \dots + I_m$ ,

$$\dot{I} = \frac{d}{dt} I;$$

$L_{ii}$  是第  $i$  根导线的自感系数； $L_{ij}$  是第  $i$  与  $j$  根导线间的互感系数 ( $i \neq j$ )。由于我们处理的是  $m$  根长度与直径均相同的细长导线，平行并联，故可用下列公式计算互感与自感系数，

$$L_{ij} = 0.002l \left[ \ln \left( \frac{l}{d_{ij}} + \sqrt{\frac{l^2}{d_{ij}^2} + 1} \right) + \frac{d_{ij}}{l} - \sqrt{\frac{d_{ij}^2}{l^2} + 1} \right] (\text{微亨}),$$

$$L_{ii} = 0.002l \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right) (\text{微亨}),$$

式中  $l$  与  $r$  是导线长度与半径，单位厘米； $d_{ij}$  是第  $i$  根与第  $j$  根导线的距离，单位厘米。

方程组 (1) 中，共  $(m+1)$  个方程，未知数亦为  $(m+1)$  个，即  $L$ ,  $(\dot{I}_1/\dot{I})$ ,  $(\dot{I}_2/\dot{I})$ ,  $\dots$ ,  $(\dot{I}_m/\dot{I})$ ，由此在微处理机上可以计算出  $m$  根导线的总电感  $L$ 。

## 参 考 文 献

- [1] S. C. Lin, J. I. Levatter; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**, No. 7, 505.
- [2] 郑承恩等;《电子学报》, 1983, **11**, No. 2, 110.
- [3] 郑承恩等;《电子学报》, 1982, **10**, No. 6, 90.
- [4] 楼祺洪等;《激光》, 1979, **6**, No. 4, 27.