

高压下 XeCl 激光脉冲雪崩放电中的延迟效应

楼 祺 洪

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1984年8月28日收到

提 要

本文分析了高达 10atm 范围的 XeCl 激光脉冲雪崩放电过程,讨论了延迟效应对放电形成时间的影响,通过与 XeCl 激光脉冲雪崩放电实验结果比较,导出临界雪崩通道长度约为 1 mm.

雪崩自持放电已广泛应用于准分子激光器中,为了获得长脉冲大体积的高气压均匀辉光放电,对于这类放电物理过程的机理分析是十分重要的. 早期 Palmer^[1] 建立了一个简单的物理模型来估计高压下均匀辉光放电的最小预电离密度,在他的模型中,脉冲电压是作为阶跃上升函数加于放电电极的两端;稍后 Levatter 和 Lin^[2] 考虑了有限的电压上升时间对于放电过程的影响,其工作气压在 3 atm 以下. 本文分析高达 10atm 范围内的脉冲雪崩放电过程,讨论了延迟效应对放电形成时间的影响,通过与 XeCl 准分子脉冲雪崩放电的实验结果比较,导出脉冲雪崩放电临界长度约为 1 mm 左右.

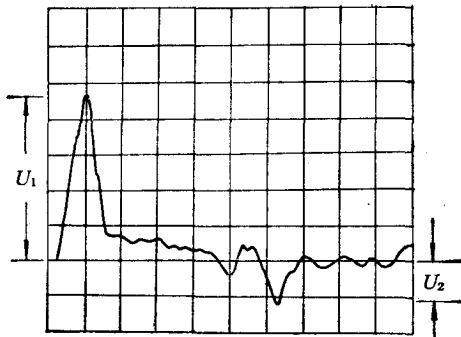


图1 显示阻抗匹配效应的 XeCl 激光脉冲雪崩放电电压波形(时标为 50ns/格;纵坐标为 6 kV/格)

根据放电回路分析,当负载阻抗 $R(t)$ 小于脉冲形成网络的特征阻抗 Z 时,电压波形是一个振荡衰减波,其第二个波峰的幅值 U_2 与第一个波峰的幅值 U_1 比为

$$-\frac{U_2}{U_1} = \frac{R-Z}{R+Z} \quad (1)$$

上式中左边的负号表示 U_2 和 U_1 两者符号相反. 图1给出气体比份为 Ne:Xe:HCl=

一、高压脉冲雪崩放电实验

实验所用的是一个 X 射线预电离脉冲形成网络驱动的小型放电装置,其具体结构及电压测试方法可见文献[3].

首先,我们用茹可夫斯基线圈测量了总气压为 5 atm 情况下的放电电压波形,脉冲形成网络由四根特征阻抗为 50Ω 的高压同轴电缆并联组成,其特征阻抗为 12.5Ω . 气体放电面积为 2 cm^2 ,电极间距为 1 cm. 根据

989:10:1 时的放电电压波形. 从 U_2 和 U_1 的比值可求得 R 的平均值约为 $0.67 Z = 8.4 \Omega$, 这与我们在文献[3]中测量的稳态阻抗为 7.6Ω 比较接近. 上述结果表明线路的失配并不严重.

在上述工作条件下, 我们测量了总气压为 2—10atm 下的电压波形. 由图 2 可见, 在 5 atm 以下, 电压波形与文献[2]分析的情况一致, 即当脉冲电压线性上升到一定值后, 很快使激光介质导通、过渡到准稳态放电. 如果我们将电压最大值到稳态之间的时间定义为放电形成时间 t_p , 那么当 $P \leq 5 \text{atm}$ 时, $t_p \leq 20 \text{ns}$. 当气压 P 大于 5 atm 以后, 电压波形发生了变化, 即加于放电间隙的电压快速上升阶段和气体导通阶段之间有一段延迟时间, 气压愈高, 延迟效应愈明显, 伴随着延迟效应的出现, t_p 亦随气压升高而增大. 图 2 中还标明了一些气压下的 t_p 范围, 为清楚起见, 仅标出总气压为 2, 6 和 10atm 下的 t_p 范围, 由于放电过程有一定的随机性, 图 2 给出的是一组典型的结果. 下面可以看到, 实验数据是取五个以上实验照片的平均结果.

另一方面, 我们的实验结果还表明, 延迟效应与脉冲放电电源的初始电压有关, 初始电压愈高, 延迟效应愈小. 但是如果使用过高的初始电压, 会使激光器的效率十分低, 在一般的横向放电准分子激光器中, 一般取初始电压在每厘米间隙 20—30 kV 范围, 以保持激光器在较高的效率下运转. 本文主要研究在上述条件下的延迟效应, 因此在实验中维持放电电源的初始电压不变, 在等电压条件下研究延迟效应.

以上实验结果表明, 当激光工作气体压力升高后, 脉冲雪崩放电过程具有其新的特征.

二、高气压下放电形成过程分析

根据气体放电的一般理论, 存在两种放电机理: 一种是慢过程, 又称汤生机理, 它不考虑带电粒子产生的空间电荷场; 另一种是快速流注过程, 又称通道机理, 它考虑强的空间电荷场, 并由一次电子雪崩直接过渡到流注放电, 这种放电如不加以控制, 很容易过渡到火花通道. 为了抑制火花通道的产生, 可采用预电离技术. 根据文献[2]的分析, 当外加电压上升为线性函数时, 开始击穿时电子雪崩头的半径 r_c 可近似表达为

$$r_c \cong (40\xi\lambda_c)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 ξ_c 为临界雪崩通道长度, λ_c 为电子的平均自由程. 为了获得均匀的放电, 就要求流

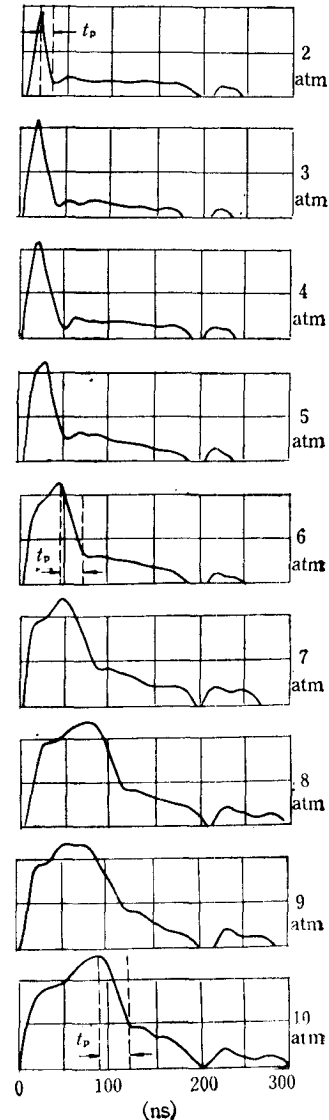


图 2 2—10atm 下, XeCl 激光脉冲雪崩放电电压波形(纵坐标为 13kV/格)

注放电在放电区的每一个部分均匀发展,此时要求阴极表面层内平均初始电子密度 n_{e0} 满足 $n_{e0} > (r_c)^{-3}$.

随着总气体压力的升高,电子平均自由程 λ_e 变小,使 r_c 随着气压的升高而变小. 作为近似这里忽略了 ξ_c 随气压的变化. 而放电形成时间 t_p 可表达为

$$t_p \approx \frac{\xi_c}{u_c}, \quad (3)$$

式中 u_c 为雪崩中电子的漂移速度. 根据 XeCl 准分子激光中玻耳兹曼编码的计算结果, u_c 是 E/n 的函数,当 E/n 从 $10^{-16} \text{V} \cdot \text{cm}^2$ 增长到 $5 \times 10^{-16} \text{V} \cdot \text{cm}^2$ 时, u_c 从 $8 \times 10^6 \text{cm/s}$ 增长到 $3.2 \times 10^7 \text{cm/s}$, 其增长关系可用近似的线性关系来表达. 在我们实验中,随着气压的增大,单位体积粒子数 n 增大;另一方面,由于击穿电压的升高以及延迟过程的拉长,

使气体工作物质在击穿前的平均电场强度 E 随气压增大而增大,但是 E 的增大速度远小于 n 的增大速度,使 E/n 值随气压增大而下降,进一步引起电子在雪崩中的漂移速度下降.

在 Ne:Xe:HCl = 989:10:1 条件下,我们从图 2 求出不同气压下的 t_p 实验值随气压的变化,为了精确起见,取五组类似的实验照片取平均值,其结果在图 3 中用虚线表示;另一方面,计算不同气压下的 E/n 值,并计算出不同气压下的 u_c 值,令人感兴趣的是不同气压下 τ_p 和 u_c 的乘积

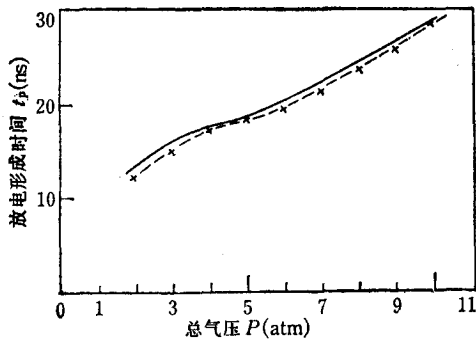


图 3 放电形成时间与总气体压力的关系曲线
实线为理论计算;虚线为实验结果

基本保持不变,这意味着临界长度 ξ_c 随气压变化并不灵敏(在我们以上实验条件内). 令 $\xi_c = 1 \text{mm}$, 用(3)式计算不同气压下的 t_p 计算值也画于图 3, 比较表明两者能很好地符合.

三、结 束 语

以上分析结果表明,当总气压大于 5 atm 后,放电起始的延迟效应对放电形成时间有较大的影响,这种延迟效应具有统计性质,延迟时间反比于一次电子建立起雪崩的几率 W . 而 W 随着间隙中过电压的增大而增大. 以上的实验为了保持恒定的储能,维持电源电压不变. 为了减少这种延迟效应的影响,在高气压情况下必须增大电压,使工作在较好的过电压状态,但这将大大增加电源储能,降低激光器的效率,为了克服以上矛盾,可采用双脉冲技术,即首先用一个过电压高脉冲减小延迟效应,紧接着一个低电压脉冲,来提高器件效率,这方面的实验已获得成功.

另一方面,通过以上理论及实验之间的比较,确定了准分子 XeCl 脉冲雪崩放电的临界雪崩通道长度约为 1 mm, 这与文献[2]中给出的 XeF 激光混合气体中,在电压上升时间为 10—20ns 范围内, $\xi_c = 1—2 \text{mm}$ 的结果符合,从而提供了一个确定 ξ_c 的间接方法.

何麒生同志参加了实验工作, 谨此致谢.

参 考 文 献

- [1] A. J. Palmer, *Appl. Phys. Lett.*, **25**(1974), 138.
- [2] J. I. Levatter and S. C. Lin, *J. Appl. Phys.*, **51** (1980), 210.
- [3] Q. H. Lou, Q. S. He and S. C. Lin, *Appl. Phys. Lett.*, **41** (1982), 514.

THE DELAY EFFECT OF PULSE AVALANCHE DISCHARGE PROCESSES OF XeCl LASER AT HIGH GAS PRESSURE

LOU QI-HONG

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

ABSTRACT

We analysed the pulse avalanche discharge processes of XeCl laser at high gas pressure up to 10 atm. The influences of delay effect on the discharge formation time were discussed. By comparing the calculated results with experimental data observed in the XeCl laser pulse avalanche discharge, the critical avalanche track length was obtained as $\xi \cong 1$ mm.