

紫外预电离 Blumlein 型准分子激光器 放电特性—能量耦合关系

夏康民 刘妙宏 李立全 陈建文

(中国科学院上海光机所)

提要: 介绍了用上升时间为 0.8 毫微秒, 耐压为 60 千伏的一组分压器和磁光法, 研究紫外预电离 Blumlein 型准分子器件能量耦合过程的结果; 最后对最佳耦合形式等问题进行了讨论。

Discharge characteristics of an excimer laser with Blumlein type UV preionization energy coupling relationship

Xia Kangmin, Liu Miaohong, Li Liqun, Chen Jianwen

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

Abstract: This paper presents the results on energy coupling process of an excimer laser of Blumlein type UV preionization, using a group of voltage divider with a rise time of 0.8 ns and voltgeresistanc of 60 kv and magneto-optic method. The problems on the optimum coupling form are discussed.

一、放电电压对能量耦合的影响

研究所用的激光器件见文献 [1], 电流测量装置见文献 [2]。其中使用 35 毫瓦 He-Ne 激光器、56AVP 光电倍增管、7904 型 (500 兆赫) 示波器测量放电电流波形。用 OK-19 型示波器及一组上升时间为 0.8 毫微秒, 耐压 60 千伏的分压器 ($D \approx 10, 30, 50$) 测量放电电压波形。信噪比 ≥ 10 , 电流和电压的时间误差与幅值误差分别为 $\Delta t_r' < 6\%$ 、

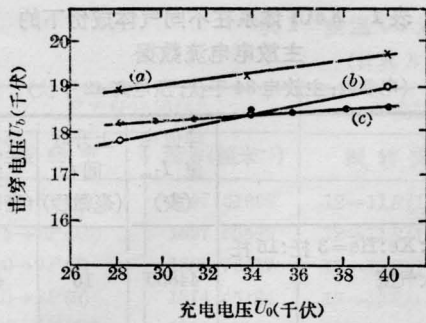
$\Delta A' \sim 10\%$; $\Delta t_r'' < 4\%$ 、 $\Delta A'' < 8\%$ 。

气体放电的能量耦合关系取决于放电电压和放电电流的特性。

一般而言, 能量耦合关系随装置工作参数 (电参数、气体成分等) 的改变而改变。对通常的气体放电来说, 放电电压依赖于气体成分、 pd 值等因素, 但对快脉冲过压击穿放电情况未必如此。

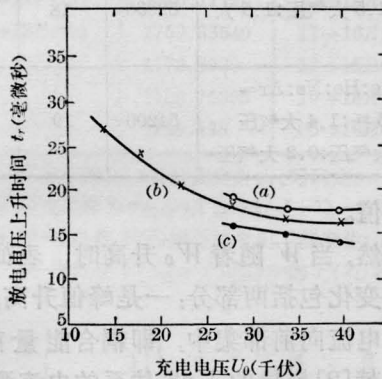
图 1 表示 XeCl 体系在不同气氛比情况下的 U_b 与 U_0 、 t_r 与 U_0 的函数关系。当较

收稿日期: 1982 年 7 月 21 日。



(a) XeCl 体系中击穿电压随充电电压的变化关系
(预电离约为 42 千伏)

- (a) —HCl: Xe: He = 5 托: 30 托: 3 大气压;
- (b) —HCl: Xe: Ne = 2 托: 15 托: 3 大气压;
- (c) —HCl: Xe: Ne: He = 6 托: 15 托: 1 大气压: 2 大气压



(b) XeCl 体系放电电压的上升时间
随充电电压的变化关系

- (a) —HCl: Xe: He = 5 托: 30 托: 2 大气压
- (b) —HCl: Xe: He = 4.5 托: 15 托: 3 大气压;
- (c) —HCl: Xe: He: Ne: Ar = 4 托: 15 托: 1.4 大气压: 1.4 大气压: 0.2 大气压

图 1

大幅度地改变充电电压值时, 准分子体系的放电电压特征没有作程度相应的变化, 例如 U_0 变化 10~20 千伏时, t_r 缩短 1~6 毫微秒。脉宽的变化类似于 t_r , 稳态放电区基本不变, 峰值升高仅 0.5~2 千伏。更换不同的准分子体系也得到类似的结果。图 2 是 KrF、ArF 体系中 U_b 与 U_0 的函数关系, 其他如 t_r 、FWHM 等参数的变化也基本上。这些实验结果和文献[3]的报导基本一致。

另外, 研究了放电电压对预电离强度的依赖关系。实验表明, 关闭预电离装置或改

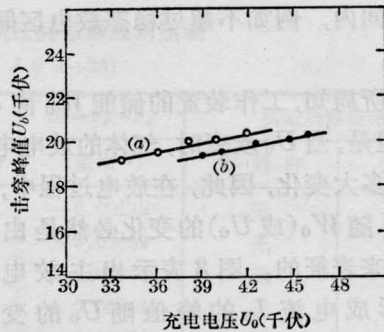


图 2 KrF 和 ArF 体系中击穿电压
随充电电压的变化关系

- (a) ArF—F₂: Ar: He = 4.5 托: 250 托: 1.6 大气压
- (b) KrF—F₂: Kr: He = 5.4 托: 125 托: 2 大气压

变其强度值时, 各体系的放电电压特征基本不变, 但放电的稳定性发生变化。

根据这些实验结果, 可以建立快脉冲过压击穿放电与线路构造之间依赖关系的概念。由于快脉冲放电的击穿特性主要依赖于脉冲的上升速率 v_t , 而 v_t 是与线路的结构和参数(如 L 、 C 值、开关参数、电极材料及几何参数等)有关, 因此, 只有改变回路的结构参数才能显著地改变气体放电的放电电压特征。

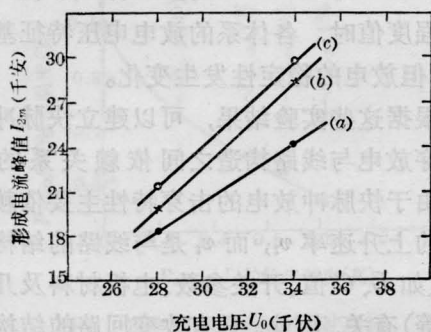
在回路中引入一小电感(10 匝小线圈), 电压波形的 t_r 值被拉长至约 500 毫微秒; 改变 C 值, 电压波形也有明显改变, 这证实了上述论点。所以, 快放电的能量耦合关系随工作参数的变化不取决于放电电压波形的变化。

二、放电电流对能量耦合的影响

在电耦合功率随时间的分布形式中, 按照泵浦功率值是否高于阈值可将它划分为“有用”部分和“无用”部分。由于快放电型准分子器件的稳态放电区形成较快, 幅值较低且持续时间较短, 这往往造成电耦合能量中“无用”部分的比率增大, 使得器件的能量耦合效果不好。所以, 放电电流随时间的分布形式应当有足够快的上升速率 i_t 。足够高的峰值 I_m , 并且它的主要部分应集中在较短的

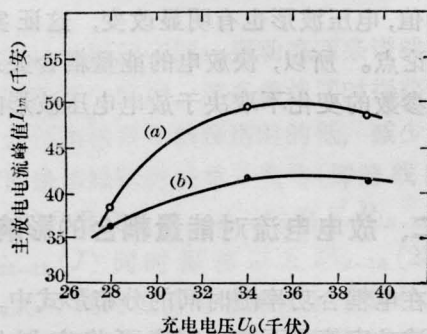
时间区间内, 例如不超过稳态放电区间的全宽。

众所周知, 工作装置的储能 W_0 同 U_0 成正比, 但是, 当 U_0 改变时, 气体的放电电压波形没有多大变化, 因此, 在放电过程中, 耦合能量 W 随 W_0 (或 U_0) 的变化必然是由放电电流 I 来表征的。图 3 表示出主放电电流 I_1 与形成电流 I_2 的峰值随 U_0 的变化关系^[9]。当 U_0 升高时, 电流峰值 I_m 近似线性地变化, 电流的上升时间缩短, 前两个峰的 FWHM 加大。



(a) XeCl 体系的形成电流峰值随充电电压的变化关系

- (a) —HCl: Xe: He: Ne = 6 托: 15 托: 2 大气压: 1 大气压;
 (b) —HCl: Xe: He = 5 托: 30 托: 2 大气压;
 (c) —HCl: Xe: He = 3 托: 15 托: 2 大气压



(b) XeCl 体系的主放电电流峰值随充电电压的变化关系

- (a) —HCl: Xe: He: Ne = 6 托: 15 托: 2 大气压: 1 大气压
 (b) —HCl: Xe: He = 5 托: 30 托: 2 大气压

图 3

表 1 列出在同样的充电条件与总气压下, 四个不同气体成分的 I_{1m} 绝对值。添加低电离电位的稀释气体, 显著地加大了放电

表 1 XeCl 体系在不同气体成份下的主放电电流数据

(电参数: 主放电 34 千伏; 预电离 42 千伏)

	峰值电流 I_{1m} (安)	上升时间 t_r (毫微秒)	第一峰半宽度 F (毫微秒)
HCl: Xe: He = 3 托: 15 托: 2 大气压	44850	16	40
HCl: Xe: Ne: He = 6 托: 15 托: 1 大气压: 2 大气压	50130	28	35
HCl: Xe: Ne: He = 4 托: 15 托: 1.5 大气压: 1.5 大气压	52830	18	39
HCl: Xe: He: Ne: Ar = 4 托: 15 托: 1.4 大气压: 1.4 大气压: 0.2 大气压	54200	19	36

电流幅值。

显然, 当 W 随着 W_0 升高时, 表征它的电流的变化包括两部分: 一是峰值升高; 另外是放电电流向前部集中, 即耦合能量前移。比较文献[2]报导的 KrF 体系的电流测量结果, XeCl 体系的电流随时间分布形式具有幅值高和时间宽度较窄的优点, 所以能量耦合的量值高及“有用”部分的比率大, 这应是本装置上 XeCl 准分子体系的效率及激光输出远大于其他体系的主要原因之一。

放电过程的电(耦合)效率 η 也随工作参数而变化, 一般它可表示为:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \quad (1)$$

其中 η_2 是主电容储能与总储能之比, 在特定装置上, η_2 是个定值。本装置的 $C_1 = 34.01$ (毫微法), $C_2 = 13.34$ (毫微法), 所以:

$$\eta_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = 71.8\%$$

另外, 耦合能量 $W = \int I_1(t) U(t) dt$

$$\eta_1 = \frac{W}{W_0} = \frac{\int I_1(t) U(t) dt}{\frac{1}{2} C_1 U_0^2} \quad (2)$$

我们可将 I_{1m} 值表示成 U_0 值的幂级数形式:

$$I_{1m} = K_0 + K_1 U_0 + K_2 U_0^2 + \dots \quad (3)$$

式中系数 K_i 依赖于气体成分, 当 $i \geq 2$ 时, K_i 很小, 一般可忽略。例如 XeCl 体系 (HCl: Xe: He = 2.8: 15: 2 大气压) 中, $K_0 = 32059.6$, $K_1 = 0.544$, $K_2 = -0.469 \times 10^{-6}$, ……, 所以, 可将 (3) 式简化为线性关系式:

$$I_{1m} \approx K_0 + K_1 U_0 \quad (4)$$

(14 千伏 $\leq U_0 \leq 40$ 千伏)

(4) 式中 U_0 的取值范围依据于实验结果, 仅对本装置中 XeCl 体系而言。

对同一气体体系, 放电电流在不同充电参数下的形状是相似的。当上升速率很快, 而且仅考虑放电电流的主要部分时, 可将电流波形近似看作三角形, 这时,

$$I'_{1m}/I_{1m} \sim I'_1(t)/I_1(t) \quad (5)$$

于是, 充电电压分别为 U_{10} , $U'_{10} = AU_{10}$ ($A > 1$) 时, 电效率为:

$$\eta_1 = \frac{\int I_1(t) U_{10}(t) dt}{\frac{1}{2} C_1 U_{10}^2}$$

$$\eta'_1 = \frac{\int I'_1(t) U'_{10}(t) dt}{\frac{1}{2} C_1 U_{10}^2 A^2}$$

根据上节结果, $U'_1(t) \sim U_1(t)$, 所以

$$\frac{\eta_1}{\eta'_1} = A^2 \frac{\int I_1 U_1 dt}{\int I'_1 U'_1 dt}$$

$$\eta_1 - \eta'_1 = \frac{\int (A^2 I_1 U_1 - I'_1 U'_1) dt}{\int I'_1 U'_1 dt} \eta'_1$$

又因为:

$$I'_{1m}/I_{1m} = \frac{K_1 U_{10} A + K_0}{K_1 U_{10} + K_0} < A$$

故:

$$\eta_1 - \eta'_1 > 0$$

(4) 式保留 U_0^2 项时, 此结果仍成立。所以, 当耦合能量随着储能增加时, 一般电效率将随之下降。若希望获得高效率, 就需要控制充电电压的量值。兼顾能量输出和效率, 则必然存在一个最佳耦合问题。

电效率随气体成分的变化可从放电电流的相应变化中得到。显然, 具有较低电离电位的混合稀释气体体系具有较高的电耦合效率。

陈必椿同志参加了实验工作。

参 考 文 献

- [1] Chen Jianwen et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**, 883.
- [2] 夏康民等; 《激光》, 1982, **9**, No. 8, 529.
- [3] R. C. Sze, T. R. Loree; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1978, **QE-14**, 944.
- [4] R. A. 米夏兹等; “高压毫微秒脉冲的形成”, 原子能出版社, 1975 年。