

XeCl 激光器的放电特性研究

陈建文 夏康民 刘妙宏 李立全 傅淑芬

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文介绍了利用放电电压和电流的测量结果,对 XeCl 准分子激光器的耦合功率与等离子体特性阻抗的研究。分析了特性阻抗的函数形式对放电过程的影响以及放电稳定性的分类等,对存在的问题也进行了讨论。

Discharge characteristics of XeCl lasers

Chen Jianwen, Xia Kangmin, Liu Miaohong, Li Liqun, Fu Shufen

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

Abstract: This paper presents the results on coupling power and plasma characteristic impedance of XeCl excimer lasers by measuring the discharge voltage and current. Influence of function form of the characteristic impedance on discharge process and classification of discharge stability are analyzed and problems are discussed.

一、引言

以往由于未能准确测量放电电流,常常只能近似地估计在稳态放电时的特性阻抗与功率耦合^[1];或者利用许多假设定性分析这些物理问题^[2,3]。由于不能了解放电过程中特性阻抗和耦合功率的实际情况,对器件的匹配状况、能量随时间分布、放电稳定性诸问题的深入了解也受到影响。

本文介绍我们利用放电电压和电流波形,对紫外预电离 Blumlein 型准分子激光器的耦合功率和等离子体特性阻抗的研究的一些结果。其中激光器件和放电电流测量装置已分别在文献[4,5]中作过介绍,电压测量

装置的主要部分是一组上升时间为 0.8 毫秒、耐压为 60 千伏的分压器。

二、放电过程的 $V-I-P-L$ 关系

所谓 $V-I-P-L$ 关系是指放电电压、放电电流、放电耦合功率与激光输出间的函数关系。图 1 是 XeCl 体系的 $V-I-P-L$ 关系图。在气体击穿的初始时刻,尚未形成高密度的电子数分布,气体的放电通道仍然保持较高量级的特性阻抗。因此,气体的着火电压必然低于放电电压的峰值。根据文献[1,3]等,气体在 $0.9U_0$ (电压峰值)幅值处击穿。这种时间关系使电流波形的主要部分都集中

收稿日期: 1982 年 10 月 5 日。

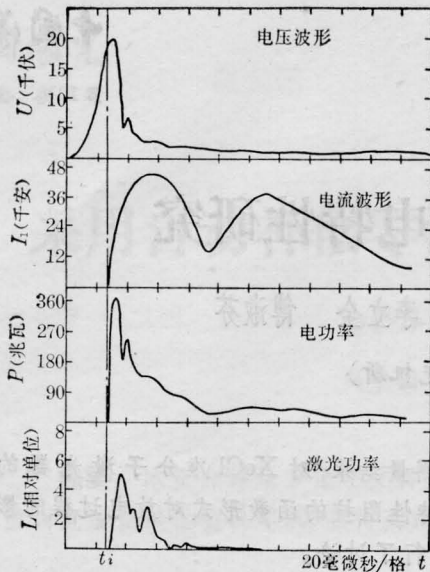


图1 XeCl体系的 $U-I_1-P-L$ 关系图

主放电: 34 千伏; 预电离: 42 千伏;
 气体比: HCl: Xe: He=3 托: 15 托: 2 大气压

在稳态放电区内, 于是, 气体击穿后强烈的电离过程除产生很高的电子数密度 N_e 外, 还使电子温度(能量) T_e 迅速下降。它表明本装置中准分子体系一般都具有较低的稳态特性阻抗值。

放电过程中的耦合能量 W 与电效率 η 分别为:

$$W = \int I_1(t) U(t) dt \quad (1)$$

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

$$\eta = \eta_1 \eta_2 = \eta_2 \left[\int I_1 U dt / \frac{1}{2} C_1 U_0^2 \right] \quad (2)$$

其中 U_0 为充电电压, η_2 为主电容 C_1 储能与总储能之比。在图1所示的实验数据下, 分别得到:

$$W = 11.31 \text{ (焦耳)}, \quad P_{\max} = 3.66 \times 10^8 \text{ (瓦)}$$

$$\eta_1 = 57.4\%, \quad \eta = 41.2\%$$

同其他准分子体系比较^[5], XeCl体系的功率曲线表明, 大部分的耦合能量都集中在击穿后的前60毫微秒时间内, 峰值功率与实际耦合能量都达到了很高的量级, 并且, 能量分布中低于泵浦阈值的“无用”部分仅占据较

小的比率, 这种良好的功率随时间分布形式是XeCl体系获得高效率激光输出的最基本原因之一。

显然, 耦合功率随时间的分布形式是依赖于工作参数的。从图1可见, 激光脉冲的能量和脉宽又受到耦合功率分布形式的限制。因此, 改变器件的工作参数, 使耦合功率既含有高量值, 又具有较大的有效激励区间, 激光输出的能量与脉宽就会显著加大, 这一点已被实验证实^[6]。

三、放电过程的等离子体特性阻抗与电子密度分布函数

忽略放电室内的电感分量, 特性阻抗 $R_D(t)$ 可以根据每一瞬时的放电电压和电流值得到:

$$R_D(t) = U(t) / I_1(t) \quad (3)$$

而电子密度函数 $N_e(t)$ 可表示为^[7]:

$$N_e(t) = \frac{d}{e R_D(t) \mu A} \quad (4)$$

其中 d 为电极间距; A 为电极放电的有效面积; e 是电子电荷; μ 是电子迁移率, 对一定的气体成分和气体密度而言, μ 近似地是个定值, 例如, HCl: Xe: He=3 托: 15 托: 2 大气压, 可得到 $\mu = 9.24 \times 10^4$ (CGSE 制)。

分析 $R_D(t)$ 和 $N_e(t)$ 的函数关系, 可以了解器件的匹配状况、对能量分配的影响及放电稳定性等问题。图2是XeCl体系的 $R_D(t)$ 和 $N_e(t)$ 的函数曲线, 其中利用了图1中的时间关系。气体击穿后约10毫微秒到达稳态放电区, 稳态区持续 ~150 毫微秒, 其中幅值在 0.03 欧姆至 0.2 欧姆间起伏。

很清楚, 不同的气体成分(和电参数)将产生不同的特性阻抗与电子密度函数。图3和图4是另一气分比的XeCl体系和KrF体系的 $R_D(t)$ 与 $N_e(t)$ 的函数曲线, 它们间的差别是显然的。在不同的气体成分中, 形成离子的动力学过程不同, 这是特性阻抗

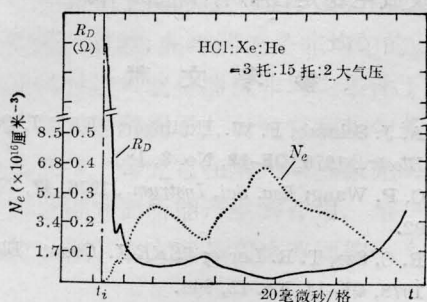


图2 XeCl体系的特性阻抗和电子密度函数曲线
主放电: 34千伏; 预电离: 42千伏

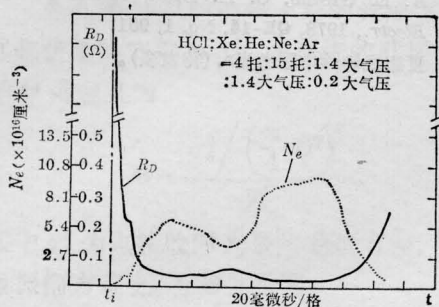


图3 XeCl体系的特性阻抗与电子密度函数曲线
主放电: 34千伏; 预电离: 42千伏

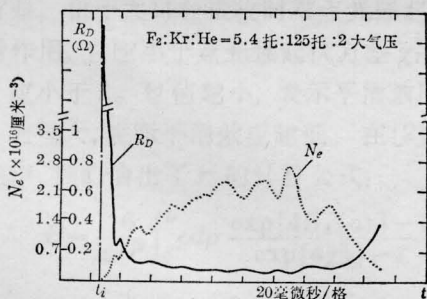


图4 KrF体系的特性阻抗与电子密度函数曲线
主放电: 40千伏; 预电离: 34千伏

函数关系不同的直接原因。宏观地看, $R_D(t)$ 的变化直接影响放电回路中主放电电流与形成电流的形成^[5], 随着 $R_D(t)$ 的降低 (例如在混合稀释气体成分中), 主放电电流 I_1 明显地升高, 而形成电流 I_2 则大幅度地降低^[8], 即它可以改变器件储能同放电过程中耦合能量之间的分配关系。同时, 特性阻抗函数形

式的变化也直接影响到耦合功率随时间的分布形式, 对激励准分子而言, 有效激励时间与耦合能量中高于泵浦阈值的“有用”部分比率都会变化, 即 $R_D(t)$ 也决定耦合能量同其中“有用”能量间的分配关系。这两种影响是特性阻抗对气体放电的最重要影响。

$N_e(t)$ 的函数曲线表明, 在稳态放电区的前期仍然存在很高量级的电子密度分布。放电后期的电子温度一般均很低, 这时的电子能量已不能满足准分子态的激励要求, 因此, 它是电耦合能量中的主要损耗来源; 并且, 这种电子密度的函数形式对提高激光能量和拉长激光脉宽的限制也是显然的。不仅如此, 在放电后期气体中仍保持很高的电导率, 突然出现电子密度上升会促使放电非稳性发展, 电弧的形成就常常出现在这个区域。

四、放电稳定性

根据放电电压与电流随工作参数的变化^[8], 以及 $R_D(t)$ 、 $N_e(t)$ 的函数形式所产生的作用, 可以将非稳性分作两类: 一类是由外界随机因素 (例如空间场强非均匀分布、电极附着杂质、放电污染等) 产生的, 这种非稳性可以通过预电离装置消除或改善; 另一类是由 $N_e(t)$ 的函数形式引起的, 它和预电离的使用与否无关, 只有改变 $N_e(t)$ 的函数形式, 才能降低这种非稳性的影响。

在第二类非稳性中, 放电过程的电离速率的作用明显的。当添加具有低电离电位的气体成分, 或改变其他工作参数使放电的电离速率 (电子数增长率) 加大时, 随着放电耦合能量的增加, 放电稳定性变差。这种现象在添加过量的低电离电位气体成分时尤其突出, 如在 $\text{Ne} + \text{Xe} + \text{HCl}$ 体系以及在 $\text{He} + \text{Ne} + \text{Xe} + \text{HCl}$ 中添加较多 Ar 就是这种情况。不仅稀释气体成分如此, 工作气体成分也有这种影响。

输出及放电稳定性都有不良影响。

五、讨 论

放电电流的阻尼系数 $\gamma \sim R/L$, 有可能通过改变 γ 值来进一步改善放电的耦合性能。图 1 中的功率曲线表明, 要得到更好的耦合性能, 不仅希望提高稳态放电区的电压幅值, 而且放电电流应有较大的 γ 值, 使其主要部分集中在第一个峰内。因此, 进一步降低 L 值, 则放电电压与电流的上升速率将提高(例如从 10^{12} 量级增加到 10^{13} 量级), 电流随时间的分布形式也会改变, 从而使放电的耦合状况得到改善。当然, 特性阻抗值不应太低, 过低的 $R_D(t)$ 值对放电耦合特性、激光

参 考 文 献

- [1] A. J. Schwab, F. W. Hollinger; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1976, **QE-12**, No. 3, 183.
- [2] C. P. Wang; *Rev. Sci. Instrum.*, 1976, **47**, No. 1, 92.
- [3] R. C. Sze, T. R. Loree; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1978, **QE-14**, No. 12, 944.
- [4] Chen Jianwen *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**, 883.
- [5] 夏康民等;《激光》, 1982, **9**, No. 8, 529.
- [6] 陈建文等;《光学学报》, (待发表).
- [7] A. E. Greene, C. A. Brau; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1978, **QE-14**, No. 1, 951.
- [8] 夏康民等;《中国激光》, (待发表)。

