

气体脉冲放电等离子体阻抗的参量研究*

陈 钢 潘佰良 姚志欣

(浙江大学物理系 杭州 310027)

(2002 年 10 月 28 日收到, 2002 年 11 月 26 日收到修改稿)

在纯净氦气条件下,对高频纵向脉冲放电的等离子体动态阻抗进行了实验研究.测量了放电等离子体阻抗随放电电压、频率以及气体压强之间的变化关系,表明等离子体阻抗随频率和电压的增加而下降,随气压的升高而增大.定性分析了这些宏观参量与等离子体阻抗变化之间的关系,拟合出等离子体阻抗随电压、频率、气压变化的经验公式,并对数值模拟与实验结果进行了比较研究.

关键词:等离子体阻抗,气体脉冲放电

PACC:4255H

1. 引 言

对纵向脉冲放电激励的气体激光器(包括金属蒸气激光器)而言,放电等离子体阻抗是一个随工作条件而变的重要参量,是设计获取最大激光功率输出和最佳激光性能的主要依据之一.从已经报道的反映激光微观参量变化和激光动力学过程的有关计算机模拟的文献中^[1-3],可以看出最难确定的参量就是等离子体阻抗,在不同的文献中给出了不同的阻抗表达形式^[1-3],较多用的是一种采用微观量的复杂表达式,但却不能直接反映宏观物理参量的影响,对实验缺乏指导意义.在长期的实验研究中,我们观察到在稳定的脉冲放电期间,通过测量放电管两端的放电电压和通过的电流,经过实时运算后得到放电管内的等离子体动态阻抗是一条相对稳定的随时间呈指数衰减的曲线,拟合衰减系数的方法已经被广泛用于研究激光器的等离子体阻抗^[4,5],文献[5]曾用拟合的阻抗表达式进行过电路参量最佳化的模拟,得到了与实验相一致的结果.

从实验参量的变化来研究等离子体阻抗的报道还很少见.本文从实验上详细研究了等离子体阻抗随电压、频率、气压等参量的变化关系,分析了它们之间的内在联系,再通过对数据进行拟合比较,给出了等离子体阻抗随这些宏观参量变化的经验公式.

2. 实验与结果

实验装置类似于以前文献^[6]中的报道,不同之处在于放电管中没有放置激光工作物质,而只是缓冲气体,这一方法经常被同行采用^[7],其优点在于纯净的缓冲气体较能维持稳定的放电和获得相对准确的实验结果.采用具有峰化电容的谐振倍压充放电电路,开关元件是闸流管,型号为 ZQM-2000/25,储能电容和峰化电容之比为 1500pF:500pF.放电电压用 Tektronix P6015A 高压探头跨接于放电管电极测量(阳极接地),放电电流用 Pearson Model 410 脉冲电流转换器套接在放电管阳极引线上探测,等离子体阻抗由放电电压和电流脉冲通过示波器的实时运算得到.测量时仔细估算并校正信号在电路中的延时,将脉冲电压、电流信号和示波器实时运算得到的阻抗值同时显示在 Tektronix TDS754C 四通道数字存储示波器上.

实验是按三个参量分别变化进行的,分别测量了阻抗随电压、频率、气压之间的变化关系,在两个参量不变的情况下改变另一个参量.根据我们以往的经验,电压的变化范围从 3.0 到 5.5kV,气压从 1.3 到 25.5kPa,频率从 5.6 到 17.7kHz,放电都能稳定进行.当提高电压和频率时,放电管内的温度会上升,为了避免温度积累效应对等离子体阻抗的影响,

* 国家自然科学基金(批准号:10004008 和 19974037)资助的课题.

实验前请选择较低的电压或频率,测量该条件下的边界温度,并以这个值为参考点,每次测量时都控制温度在不超过该值 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 范围内.在放电稳定时通过示波器存储电压、电流、等离子体阻抗的实验数据,最后在计算机上用 origin 6.0 对实验数据进行作图处理,如图 1 至图 3 所示.其中实验选取的等离子体阻抗是在电流峰值 10% 范围内的值.由于计算模拟的初始阻抗值对计算结果影响不大,均取作 1000Ω ,类同文献 [3] 中的等离子体阻抗初值.选用双坐标系:左下坐标系的下横轴是时间坐标,左纵轴表示整个放电过程中等离子体阻抗变化范围;右上坐标系的上横轴是不同参量的变化范围,右纵轴是在电流最大时不同参量下的阻抗值.

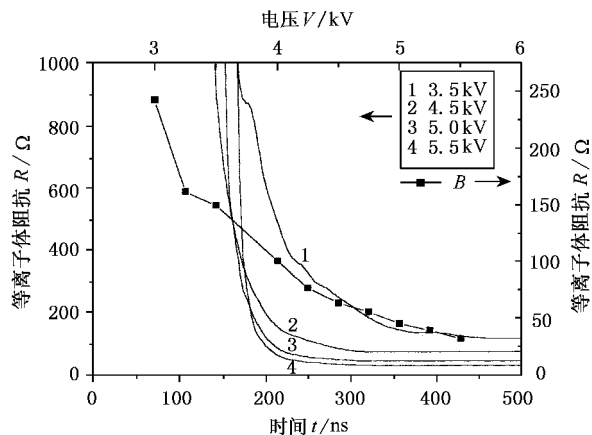


图 1 等离子体阻抗随电压变化曲线

图 1 给出固定频率为 15.5kHz ,气压为 4.7kPa 时,不同电压下等离子体阻抗的变化曲线.电压的改变范围在 3.0 至 5.5kV 之间.图 1 只给出 3.5 , 4.5 , 5.0 和 5.5kV 时的 4 条曲线,实验点的电压间隔为 0.25kV ,在进行每个实验点的测量前先将电压调节到 3.0kV ,待边界温度下降到预定值时,再迅速增加电压到下一个值.从图 1 可以看出,阻抗的下降速率随电压增加而增大,其最终的稳定值随电压增加而减小,即曲线 1—4 表明从 117Ω 下降到 30Ω ;从曲线 B 上可以明显地看出阻抗随电压增加而下降,这是在激光器工作时提高电压能明显增加功率的一个原因^[8].从微观角度分析,电压提高致使放电管内电场强度增强,从而提高放电电子的能量,导致等离子体阻抗的下降和导电能力的提高.

图 2 给出固定电压为 4.8kV ,气压为 4.7kPa 时,不同频率下的等离子体阻抗变化曲线.实验中频率在 5.6 — 17.7kHz 范围变化,由于频率的改变难以精

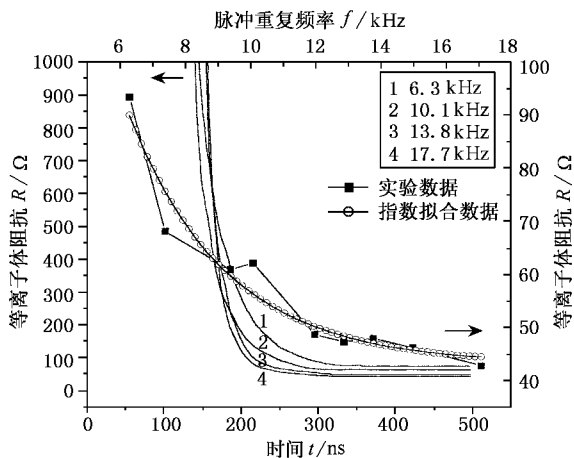


图 2 等离子体阻抗随频率变化曲线

确调节并且对放电稳定性有影响,所以实验点的频率间隔并不是相等的,约为 1 或 2kHz .同样在进行每个实验点的测量前先将频率恢复到 5.6kHz ,待边界温度下降到预定值时,再迅速增加频率到下一个值.图 2 中选取了 4 条曲线进行比较研究,曲线 1—4 分别为频率为 6.3 , 10.1 , 13.8 和 17.7kHz 时的阻抗变化.由图 2 可知,虽然 4 条曲线的变化趋势一致,但它们的下降速率随频率的增加而增大,而导通后的阻值则随频率的增加而减小(阻抗从 74Ω 下降到了 42Ω).右上坐标系更清晰地反映了这一变化趋势,其中一条曲折连是实验数据,另一条则是指数拟合结果.从微观角度分析,在其他参量相对稳定时,频率的增加亦即脉冲间隔的缩短,使得脉冲开始时的残存电子密度显著增加,从而导致等离子体电导率的增加和阻抗的下降.

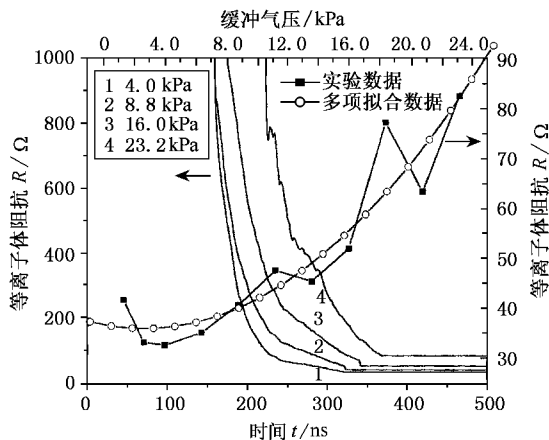


图 3 等离子体阻抗随气压变化曲线

图 3 给出气压变化时的阻抗变化曲线.实验是

在维持放电电压 5.0kV, 频率 13.4kHz, 缓冲气体缓慢流动条件下进行的. 由于气压调节较难控制, 所以实验时气压是从最低开始, 逐步增加, 在调节到一个数值后, 等待约 5min, 等气压稳定后再进行数据测量. 曲线 1—4 为气压分别为 4.0, 8.8, 16.0 和 23.2kPa 时的 4 条阻抗变化曲线. 从图 3 可知, 随气压的上升, 放电管导通时间后延, 最后稳定时的阻抗值则从 32.5Ω 上升到 82.5Ω. 右上坐标系反映的是阻抗随气压增大而上升的变化情况, 从实验数据的拟合曲线来看, 等离子体阻抗是随气压的增加而增大, 这可解释为气压的增加, 使得电子与氦原子的碰撞频率增加, 从而导致阻抗的增加.

虽然放电等离子体阻抗是设计获取最大激光功率输出和最佳激光性能的重要依据, 但是由于放电等离子体阻抗同时受到放电电压、脉冲重复频率、缓冲气体压强等多种宏观参量的影响, 所以在进行不同类型的金属蒸气激光器件设计时, 必须综合考虑它们对放电电压、脉冲重复频率、缓冲气体压强的不同要求. 比如自终止跃迁类型激光(如铜激光)主要是原子激光, 对放电电流的要求主要是前沿陡峭, 适合采取低气压和普通的谐振倍压电路^[5]; 而辐射复合类型激光(如镨激光), 主要是离子激光, 对放电电流的要求主要是后沿陡峭并消除二次谐波, 适合采取高压和 Blumlein 4 倍压电路, 而且缓冲气体只能采用氦气^[5].

3. 模拟比较

实验时每组参量研究都测量了 10 组数据, 从图 1 至图 3 中等离子体阻抗变化曲线看, 等离子体阻抗的变化趋势是指数衰减型的, 因此取等离子体阻抗表达式为 $R_d = 1 \times 10^3 \times \exp(-t/t_s) + R_0$ ^[5], 然后对每组数据进行指数拟合, 计算出每组参量的时间因子 t_s 和最小阻抗 R_0 . 计算结果发现这两个参数和电源充电电压 V (kV)、缓冲气体压强 P (kPa)、脉冲重复频率 f (kHz) 之间基本呈现线性关系. 于是可以假设 $t_s = A_1 P + B_1 V + C_1 f + D_1$, $R_0 = A_2 P + B_2 V + C_2 f + D_2$, 然后根据每组参量拟合出来的 t_s 和 R_0 求解方程, 计算出这些参数. 经过大量的计算与比较, 在我们的实验条件下给出了一组与实验比较符合的计算等离子体阻抗的参数值, 即选取 $t_s = 1.7P - 1.05f - 14.14V + 91.77$, $R_0 = 2.90P - 3.08f - 44.80V + 300$, 拟合结果如图 4 所示. 为了检验经验

公式的准确性, 我们利用已有的计算模型^[5], 对该实验的三组参量变化分别进行了计算模拟, 图 4 给出两组参量的图形进行比较.

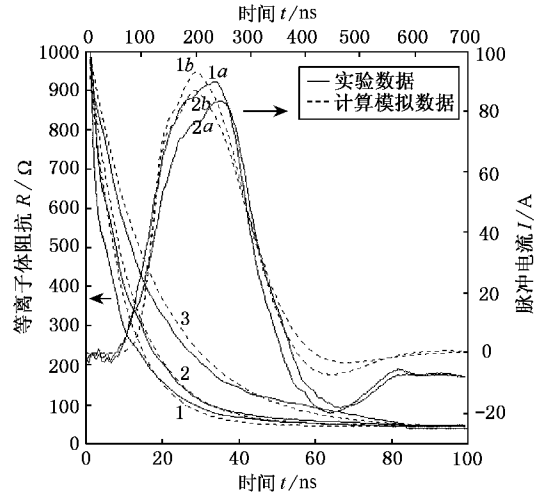


图 4 放电电流和等离子体阻抗模拟结果

图 4 中实线是实验数据, 虚线是计算模拟的结果. 下横轴是阻抗变化的时间坐标, 由于示波器采集数据不是从零时刻开始, 所以图 1 至图 3 中阻抗的变化都不是从零时刻开始, 但计算模拟必须从零时刻开始, 为此已经将实验数据的时间坐标进行了转换, 以便于对比研究. 从阻抗变化曲线可以看出, 在起始的 80ns 内, 等离子体阻抗呈指数衰减, 随后到达一个较小的稳态阻抗(几十欧姆), 直至放电结束. 考虑到脉冲电流的延续时间要大于等离子体阻抗有效变化的时间尺度, 所以采用上面的横坐标, 其时间变化范围相对较宽. 纵坐标左边是等离子体阻抗, 右边是放电电流, 其中等离子体阻抗曲线 1—3 的实线和虚线分别是电压、频率和气压变化时测量和拟合的结果, 其实验参数分别是 (5.0kV, 4.7kPa, 15.5kHz), (4.8kV, 4.7kPa, 13.8kHz) 和 (5.0kV, 8.8kPa, 13.4kHz). 从拟合结果来看, 经验公式与实验数据符合得很好, 能够反映等离子体阻抗的变化趋势和大小.

比较电路模拟得到的电流波形(曲线 1b 和 2b)和实验结果(曲线 1a 和 2a), 可以认为其脉冲宽度基本符合, 电流波形的前沿和上升速率也与实验结果一致, 其中曲线 1a 和 2a 的实验条件分别为 (5.0kV, 4.7kPa, 15.5kHz) 和 (5.0kV, 4.0kPa, 13.4kHz). 从图 4 还得知, 电流上升到峰值所需时间约为 100ns, 这和等离子体阻抗下降到稳态值所需时间基本一致, 表明在电流最大时, 等离子体阻抗下降

到一个较小的稳态值. 曲线 1a 和 1b 以及 2a 和 2b 的差异主要存在于电流的后沿, 一方面因为我们采用的电路主要是针对自终止跃迁类型激光模型设计的, 该类型激光仅要求电流前沿比较陡峭, 对后沿并没有特殊要求, 所以模型的重点是电流前沿的计算与模拟. 另一方面是模型中放电管和放电回路的电感量很难精确测量, 多次计算的结果表明电感的大小对电流后沿的修饰作用非常明显, 我们也有过专门的研究讨论这一现象^[5]. 拟合表明该模型得出的电流模拟结果是准确的, 从而也验证了给出的等离子体阻抗经验公式对实验研究工作具有可靠的参考价值.

4. 结 论

本文选取纯净氦气作为缓冲气体, 对其在高频

纵向脉冲放电下的等离子体动态阻抗进行了详细的参量研究. 表明等离子体阻抗随电压、频率的上升而明显下降, 随气压的上升而明显增加, 将这些宏观物理参量的变化和微观的等离子体阻抗的变化联系起来, 从而给出了其变化的定性解释. 对等离子体阻抗变化的认识有助于改善纵向脉冲放电, 进而达到提高激光器功率和最佳激光性能的目的.

对 30 组实验数据进行了计算程序处理, 进而给出了等离子体阻抗随电压、频率、气压的定量变化经验公式, 该经验公式的模拟计算结果与实验结果相当一致, 表明其比较真实地反映了等离子体阻抗的变化, 对气体激光器件设计具有参考价值.

[1] Cheng C and Sun W 1995 *Acta Phys. Sin.* **44** 1734 (in Chinese)
[程 成、孙 威 1995 物理学报 **44** 1734]

[2] Yin X H *et al* 1992 *Chin. J. Lasers* **19** 263 (in Chinese) [尹宪华等 1992 中国激光 **19** 263]

[3] Kushner M J and Culick F E C 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 3020

[4] Cheng C and He S L 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 713 (in Chinese)
[程 成、何赛灵 2000 物理学报 **49** 713]

[5] Pan B L *et al* 2002 *J. Optoelectron · Laser* **13** 667 (in Chinese) [潘佰良等 2002 光电子·激光 **13** 667]

[6] Pan B L *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 259 (in Chinese) [潘佰良等 2002 物理学报 **51** 259]

[7] Astadjov D N and Sabotinov N V 1999 *Meas. Sci. Technol.* **10** 67

[8] Pan B L *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1290 (in Chinese) [潘佰良等 2001 物理学报 **50** 1290]

Parametric study of plasma resistance in gas pulsed discharges^{*}

Chen Gang Pan Bai-Liang Yao Zhi-Xin

(*Department of Physics , Zhejiang University , Hangzhou 310027 China*)

(Received 28 October 2002 ; revised manuscript received 26 November 2002)

Abstract

The dependences of dynamic plasma resistances on discharge voltage , repetitive frequency and buffer gas pressure are studied and measured. It is found that the plasma resistance reduced with the increase of discharge voltage and repetitive frequency , but increased with enhancing buffer gas pressure. The experimental formula of plasma resistance depending on discharge voltage , repetitive frequency and buffer gas pressure was proposed and the pulsed discharge current was simulated using the experimental formula of plasma resistance.

Keywords : plasma resistance , gas pulsed discharges

PACC : 4255H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10004008 and 19974037) .