

文章编号: 0258-7025(2003)06-0497-04

毛细管的阻抗特性研究

王 骐, 刘 鹏, 赵永蓬

杨大为

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001) (中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要 从国外实验放电结果出发, 推断了充气毛细管的阻抗特性。进行了充氩气毛细管负载下的放电实验, 获得放电电流的峰值为 34.3 kA, 上升前沿为 40 ns。实验结果表明充气毛细管阻抗由电阻项和电感项两部分构成, 且电阻项远小于电感项。

关键词 激光技术; 毛细管阻抗特性; 毛细管放电; X 光激光

中图分类号 TN 248 **文献标识码** A

Study of Capillary Impedance Characteristic

WANG Qi¹, LIU Peng¹, ZHAO Yong-peng¹, YANG Da-wei²

(¹*Institute of Opto-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China*)
(²*Atomic Energy Academy of Sciences of China, Beijing 102413, China*)

Abstract The capillary discharge experiment is proceed at capillary charge filled with Ar gas. Output current of 34.3 kA and current pulse rising edge of 40 ns are attained. It is showed that impedance of capillary filled with gas is consisted of resistance and inductance component. And resistance component is far less than inductance component.

Key words laser technique; impedance characteristic of capillary; capillary discharge; X-ray laser

1 引 言

近年来出现的毛细管放电抽运 X 光激光方案具有低激发阈值、高效率、小尺寸、低价格等优点, 因此引起世界各国科研机构的广泛关注, 研究已取得了很大进展。1999 年, 美国 Colorado 大学的 Rocca 小组用 34.5 cm 长陶瓷毛细管, 已获得重复频率 4 Hz, 平均输出能量 0.88 mJ 的类氩氩 46.9 nm X 光激光饱和输出^[1]。以色列的 A. Ben-Kish 研究小组^[2]在 1999 年, 以及日本的 G. Niimi 等^[3]在 2001 年也分别获得了毛细管放电类氩氩 46.9 nm X 光激光输出。我们也建造了一台毛细管放电 X 光激光装置^[4], 已完成了系统放电调试实验, 正在进行荧光光谱实验研究。

1998 年在进行毛细管放电 X 光激光装置的设计时, 我们查阅了 Rocca 小组从 1988 年以来的大量文献。但这些文献中只给出了毛细管放电电流幅值、半高宽等参数值, 而对 Marx 发生器的储能、毛细管阻抗特性等重要参数均未提及, 给设计工作带来了很大困难。特别是毛细管阻抗特性将决定放电后加在毛细管上的电压、电流波形及幅值, 是设计装置时所必须考虑的重要参数, 同时它对于寻找抽运 X 光激光的最佳放电条件也具有十分重要的作用。本文介绍了推断的充气毛细管的阻抗特性及充氩气毛细管放电的验证实验, 结果表明推断是正确的, 毛细管放电 X 光激光装置的物理设计是合理的。

2 毛细管阻抗特性的推断

通过综合分析国外几个实验的参数, 从放电结

收稿日期: 2002-02-05; 收到修改稿日期: 2002-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60038010)重点课题资助项目。

作者简介: 王骐(1942—), 男, 山东人, 教授, 博士生导师, 主要从事短波长激光, X 光激光及激光空间信息技术的研究。E-mail: qiawang@hope.hit.edu.cn

果出发进行反推,推断出了充气毛细管的阻抗特性,为毛细管放电 X 光激光装置的设计提供了依据。认为:在毛细管中充入一定量气体以后,毛细管不再是纯电阻负载,幅值较低的预脉冲电压已将毛细管中低气压气体电离为等离子体,等离子体电阻率很低,而细长的等离子体柱的电感却较大,因此毛细管负载实际相当于一个电感 $L(t)$ 和电阻 $R(t)$ 相串联。毛细管阻抗 $Z(t) = \omega L(t) + R(t)$,且 $R(t) \ll \omega L(t)$ 。 $L(t)$ 和 $R(t)$ 是随时间变化的。随着电流的增加,等离子体柱的直径减小,电感值 $L(t)$ 增大;而此时等离子体的电离度增加,电阻率减小,电阻 $R(t)$ 随之减小。在等离子体壳塌缩后,等离子体柱的直径增大,电感值减小,电阻值增大。

另外,当 Marx 发生器对 Blumlein 线充电时,相当于电源对传输线电容 C_B 充电,而当 Blumlein 线对毛细管负载放电时,相当于电容 C_B 对毛细管电感 L_C 和电阻 R_C 串联短路放电,可看成一个线性电路中的过渡过程,因此毛细管放电必然符合 $C-L-R$ 短接放电规律。由于只有在电阻上才能消耗能量且 $R(t) \ll \omega L(t)$,因此只有通过多次振荡后,才能将存储在 Blumlein 线上的能量损耗掉,故毛细管电流应为多次阻尼衰减振荡波形,而对抽运 X 射线激光有用的只是第一个电流脉冲。经过仔细估算后,确定毛细管电感 $L(t)$ 的变化范围为 $200 \sim 300$ nH,而毛细管电阻 $R(t) < 1 \Omega$ 是一个小电阻。

以上推断是否正确,需要用充氩气毛细管的放电实验来验证。

3 充氩气毛细管的放电实验装置

充氩气毛细管负载的放电实验装置如图 1 所示。

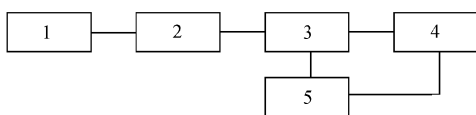


图 1 毛细管放电实验装置

- 1: Marx 发生器; 2: Blumlein 线及主开关;
3: 毛细管放电室; 4: 测量系统; 5: 真空系统

Fig. 1 Experimental setup of capillary discharge
1: Marx generator; 2: Blumlein line and main switch;
3: capillary discharge cell; 4: measurement system;
5: vacuum system

Marx 发生器由 10 级电容器组成,每级电容由 2 台油介质电容器 ($0.01 \mu\text{F}$, 30 kV) 并联而成,

Marx 发生器串联电容为 16.0 nF 。采用正负充电方式,5 个火花隙开关的导通由外加触发电压控制。Marx 发生器串联电感约 $2 \mu\text{H}$,串联放电电阻约 3Ω 。整个 Marx 发生器固定在绝缘支架上,并装入充以氮气的钢筒内。

Blumlein 线阻抗采取等阻抗形式,内外线阻抗相等 $Z_1 = Z_2 = 5 \Omega$;总阻抗 $Z_B = Z_1 + Z_2 = 10 \Omega$;输出脉冲半高宽 $\tau = 35 \text{ ns}$ 。Blumlein 线的绝缘介质为去离子水。电阻率 $\rho \approx 1 \sim 2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$,相对介电常数 $\epsilon_r = 80$ 。Blumlein 线等效电容 $C_B = C_1 + C_2 = 7.3 \text{ nF}$ 。主开关为圆环—圆盘型气体开关,充入 $0.2 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 氮气。

毛细管放电室内放置采用聚乙烯材料制成的毛细管,其内径为 4 mm ,外径为 14 mm 。采用了在固定长度毛细管中插入不同长度铜棒来获得各种长度毛细管气柱的方法,铜棒电感还可以对毛细管总电感起一定补偿作用。

测量系统主要包括 TDS380 低压数字示波器、硫酸铜电阻分压器和回流器。硫酸铜电阻分压器用于测量毛细管电压信号,其分压比为 2518 倍。回流器即低欧姆的电阻器,用于测量毛细管放电电流,其阻值为 $0.784 \text{ m}\Omega$ 。

真空系统由 FB450 型涡轮分子泵和 2XZ-8 型直联旋片真空泵组成。实验时,首先把毛细管处真空抽到 10^{-4} Pa 量级,再充入氩气,使毛细管内压强达到 80 Pa 左右进行实验。

4 实验结果及分析

图 2 为充氩气毛细管放电实验的结果。实验条件:毛细管长 10 cm ,Marx 发生器输出电压约 224 kV ,毛细管内氩气气压 $70 \sim 90 \text{ Pa}$ 。R1 通道为实测的

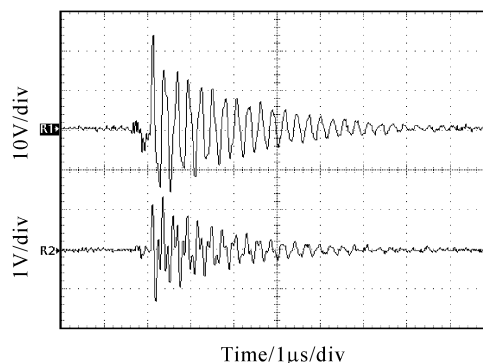


图 2 充氩气毛细管负载下的电流及电压波形

Fig. 2 Waveform of output current and voltage for Ar gas capillary load

毛细管放电电流波形, R_2 通道为毛细管电压波形。

显然, 毛细管放电电流及电压波形均为快速振荡衰减波形, 符合装置设计时的推断。电流波形比电压波形要滞后一些, 因为在毛细管负载上先有电压降后才产生电流。从图中可测得放电电流峰值 34.3 kA, 半高宽 60 ns, 上升前沿 40 ns。电压波形半高宽 50 ns。即电流波形的半高宽比电压波形有所展宽。这是因为在电压波形上升前沿阶段, 等离子体处于低电离态, 等离子体电阻率较高。但当电压达到峰值后处于下降沿阶段, 等离子体已达到高电离态, 其电阻率减小, 虽然此时电压逐渐降低, 但电流仍然较大, 毛细管阻抗中的电感项也阻止电流的减小, 因此电流脉冲宽度有所展宽。

在毛细管设计时, 为了使放电回路的总电感基本不变, 采用了在 25 cm 长毛细管中插入不同长度铜棒来补偿电感的办法。因此, 毛细管负载的总电感器由气柱电感和铜棒电感两部分组成, 可由下式计算

$$L_C = L_0 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (1)$$

其中 L_0 为 $t = 0$ 时的毛细管的总电感, 包括气柱电感和铜棒电感。 r_0 为 $t = 0$ 时气柱外径, r 为 t 时的气柱半径, μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。气柱半径 $r_0 = 2$ mm, 设气柱长 $l = 10$ cm, 则铜棒长 15 cm, 可用圆柱形导体电感近似公式分别计算得气柱电感 $L_{\text{gas}} = 77.1$ nH, 铜棒电感 $L_{\text{bar}} = 127.8$ nH, 则 $L_0 = 204.9$ nH。选择气柱被箍缩到最细时为 t 时刻, 取 $r = 200$ μm , 将这些参数代入式(1), 可得 L_C

$= 251$ nH。

下面估算毛细管电阻的大小。由于毛细管电阻在放电电流到来前电阻值较大(预脉冲起作用, 低价等离子体电阻率较高), 而在放电过程中不断变化, 因此只计算毛细管等离子体被箍缩到最小半径时的电阻值。由放电电流波形可以看出: 当 $t = 8$ μs 时, 电流幅值趋于零, 即 $e^{-\frac{R_C}{2L_C}t} = e^{-4} = 0.02 \rightarrow 0$, 则有 $-\frac{R_C}{2L_C}t = -4$, 所以可计算出毛细管电阻 $R_C = 0.25$ Ω , 的确是一个小于 1 Ω 的小电阻阻抗, 符合装置设计时的推断。

另外, 由传输线电容 $C_B = 7.3$ nF, 可得毛细管放电过程的特征阻抗 $Z_0 = \sqrt{\frac{L_C}{C_B}} = 5.9$ Ω , 由于毛细管电阻 $R < 2Z_0 = 11.8$ Ω , 因此毛细管放电过程是阻尼衰减振荡过程, 放电电流波形必为阻尼衰减振荡波形。如设 T' 为放电电流波形的振荡周期, 则可计算出 $T' = 2\pi\sqrt{L_C C_B} = 269$ ns。而从图 2 中可实际测得放电电流波形的振荡周期 $T' = 4140$ ns/15 = 276 ns, 与理论计算值相差很小, 误差小于 5%。考虑可能存在的系统误差及测量误差, 可以认为非常吻合, 同时也说明把毛细管放电过程看成是电容 C_B 对毛细管电感 L_C 和电阻 R_C 短接放电过渡过程是合理的。

按照上述方法, 可对不同气柱长度的毛细管分别进行计算, 表 1 给出了不同气柱长度的毛细管的初始电感、箍缩后电感及毛细管电阻等参数的比较。

表 1 不同长度毛细管电感及电阻对照

Table 1 Compression of inductance and resistance of different length capillary

Gas column length/cm	10	12	14	16	18	20	22
Initial inductance/nH	77.1	96.9	117.3	138.4	159.9	181.9	204.3
Inductance after pinch/nH	123.2	152.2	181.8	212.1	242.8	274.0	305.6
Copper rod length/cm	15	13	11	9	7	5	3
Copper rod inductance/nH	127.8	107.1	86.9	67.5	49.0	31.6	15.9
Initial total inductance/nH	204.9	204.0	204.2	205.9	208.9	213.5	220.2
Total inductance after pinch/nH	251.0	259.3	268.7	279.6	291.8	350.6	321.5
Resistance after pinch/ Ω	0.251	0.259	0.269	0.280	0.292	0.306	0.322

从表 1 可以看出, 当毛细管气柱半径从 2 mm 被箍缩到 200 μm 后, 其电感值有不同程度的增大。且毛细管气柱长度越大, 其增幅越大。在放电电流没有到来(预脉冲阶段)时, 不同气柱长度的毛细管总电感值范围为 204~220 nH, 相差不大, 可以认为

不同长度毛细管的放电初始条件是相同的。但气柱被箍缩后毛细管总电感值范围为 251~321 nH, 相差较大。可见固定铜棒电感的加入只能在一定程度上补偿毛细管回路的总电感, 并不能完全保证回路总电感保持不变, 这将使不同气柱长度的毛细管放

电电流波形产生差别。应设法减小这种差别,如改变铜棒的材料、结构和外径等。另外,从表中还可以看出,毛细管电阻的确是一个小电阻,其变化范围为 $0.251\sim 0.322\ \Omega$,而 $T'=276\ \text{ns}$, $\omega=2.2753623\times 10^7$,则 ωL 的变化范围为 $5.7\sim 7.3\ \Omega$,显然 $R\ll\omega L$,符合装置设计时的推断。因此毛细管总阻抗特性将主要取决于电感项 $\omega L(t)$ 。

参 考 文 献

- 1 C. D. Maxxhietto, B. R. Benware, J. J. Rocca. Generation of millijoule-level soft-x-ray laser pulses at a 4-Hz repetition rate in a highly saturated tabletop capillary discharge amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16):1115~1117
- 2 A. Ben-Kish, R. A. Nemirovsky, M. Shuker *et al.*. Parametric investigation of capillary discharge experiment for collision excitation X-ray lasers [C]. *SPIE*, 1999, **3776**:166~174
- 3 G. Niimi, Y. Hayashi, M. Nakajima *et al.*. Observation of multi-pulse soft X-ray lasing in a fast capillary discharge [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34**:2123~2126
- 4 Liu Peng, Yu Qi-qi, Wang Qi *et al.*. A device in capillary discharge pumped table-top X-ray laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(12):1071~1074 (in Chinese)



第九届中国国际激光及光电子产品展览会 (ILOPE 2003)

由国务院批准创办的“中国国际激光及光电子产品展览会”(英文简写“ILOPE”)是中国最早创办,最具代表性和影响力的国际专业光电贸易展会。2003年10月22~25日,第九届中国国际激光及光电子产品展览会将在中国北京国际展览中心举行。

主办单位 中国国际贸易促进委员会,中国光学光电子行业协会,中国国际展览中心集团公司

承办单位 中国光学光电子行业协会,中展集团北京华港展览有限公司

支持单位 信息产业部,国家科学技术部,中国科学院,中国兵器工业集团公司,亚太经济合作组织

展品大类 光电材料和元件,激光器与应用,光通讯产品,显示技术及设备,光信息产品,光学仪器,红外、传感技术等相关应用

展位规格及价位表

类 型	国内企业	国外企业
	及国内产品	及国外产品
标准展位(起租 9 m ²)	¥6750 元/9 m ²	US \$ 3600 元/9 m ²
室内光地(起租 18 m ²)	¥650 元/m ²	US \$ 350 元/m ²

优惠办法 (1) 凡在6月15日前报名的企业可享受5%的优惠。(2) 凡参加过ILOPE2002,2001和ILOPE2000的企业以及中国光学光电子行业协会的会员单位均可享受5%的优惠(可累加)。

联系方式

中展集团北京华港展览有限公司:

方 芳,刘宝存,梁 晨,李 超

电话:(010)84600341,84600339,84600335

传真:(010)84600325,84600346

电子邮件:fang@ciec-exhibition.com,

lc@ciec-exhibition.com

中国光学光电子行业协会:

所洪涛,吕玉华

电话:(010)64362211-490

传真:(010)64347322

电子邮件:COEMA@PUBLIC2.BTA.NET.CN

展会网址:www.ilope-expo.com

Http://ilope.ciec-exhibition.com