

氙灯的瞬态放电特性研究*

张 华

(南通师范学院物理系 南通 226007)

范滇元

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

摘 要 建立了求解氙灯 LC 供电网络电路模拟计算程序,与以往的模型相比,我们在 MEH 理论的基础上考虑了氙灯放电过程中等离子体直径随时间的变化关系,因而可以更准确地研究大口径氙灯的放电特性。根据国内外的实验和计算结果对模拟程序进行了校核。结果表明:在氙灯放电开始时,等离子体放电柱的膨胀可以不受灯壁的影响;在放电后期,放电柱的膨胀要受灯壁的影响,因此,等离子体的膨胀过程对电流波形有影响。但在大能量长脉冲放电情况下,大口径氙灯的等离子体也可以充满内径。

关键词 惯性约束核聚变 氙灯放电 电流波形 MEH 理论

中图分类号 TM923.323 **文献标识码** A

1 引 言

随着惯性约束核聚变(ICF)的发展,对激光驱动器的要求越来越高,要求泵浦源具有比较高的泵浦能量密度和泵浦效率。因此,新一代钨玻璃激光放大器需要使用大口径的氙灯。在氙灯对钨玻璃的泵浦过程中,存在着两个相互竞争的过程:一方面钨玻璃吸收泵浦能量使得上能级的反转粒子数增加,另一方面自发辐射使得反转粒子数减小。上能级的储能效率与光泵脉冲宽度和形状有密切的关系,减小氙灯发光时间有利于提高储能效率。但是,光能量和氙灯直径一定时,减小发光时间会降低氙灯的光谱效率。而氙灯的发光波形、光谱分布取决于供电脉冲电流的时间波形、大小和脉宽。尽管在激光发展的早期就有许多工作研究了用于固体激光器的氙灯的放电特性^[1],但是无论是研究对象的规模还是研究的深度和精度,都不能满足 ICF 的发展要求。近年来,国际上若干著名实验室,如美国里弗莫尔国家实验室等在“国家点火装置”(NIF)的设计中继续深入研究了这一课题^[2,3,4]。

* 863 计划 416 主题青年基金资助项目

收稿日期:1999- 04- 23

修稿日期:1999- 06- 30

新一代钕玻璃激光放大器需要使用大口径的氙灯。在氙灯的放电过程中, 等离子体放电柱直径是随时间变化, 尤其在小能量放电情况下, 氙灯放电过程是一个动力学过程。而且, 由于氙灯侧壁的影响, 等离子体可能不能充满内径。这些特性在大口径氙灯的放电过程中尤其重要。

Dishington^[1]首先研究了氙灯放电过程中等离子体直径随时间的变化特性, 但其研究的对象为小口径氙灯在短脉冲小能量放电时的情况。本文建立了求解氙灯 LC 供电网络电路模拟计算程序, 与以往的模型相比, 考虑了放电过程中氙灯等离子体直径随时间的变化关系, 因而可以更准确地研究大口径氙灯的放电特性。并根据国内外的实验和计算结果进行了校核。结果表明: 在氙灯的放电过程中, 等离子体放电柱的膨胀过程对电流波形有影响, 但在大能量长脉冲放电情况下, 大口径的氙灯等离子体也可以充满内径。

2 氙灯泵浦的供电网络系统

2.1 LC 供电电路

钕玻璃放大器的脉冲氙灯采用 LC 供电网络和引燃管内触发点燃系统, 如图 1 所示。采用预电离电路, 能提高储能的利用率和工作稳定性。预电离的工作原理是在 LC 供电网络中增加一个小电容 C_p 和预电离开关 S_p 组成的回路, 在放电主脉冲到来之前约 200 μ s 预先提供一个高压低能的电脉冲使氙灯预先被击穿, 以增大主脉冲能量的转换率, 如图 1 和图 2 所示。

由于氙灯等离子体在放电过程中, 其电阻存在非线性性质, Goncz 首先给出了氙灯上的电流和电压的关系:

$$V = K_0 I^{1/2} \quad (1)$$

$$K_0 = 1.3 \frac{S}{d} \left[\frac{P}{450} \right]^{0.2} \quad (2)$$

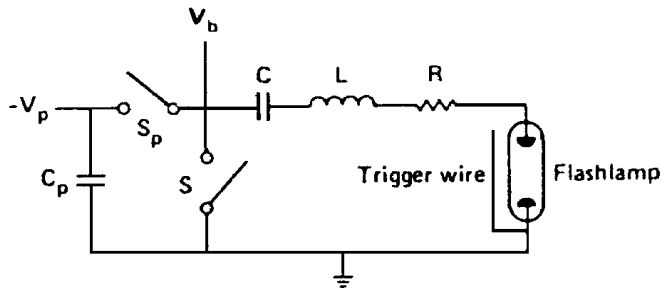


Fig. 1 Schematic diagram of the electrical circuit used to excite xenon flashlamp

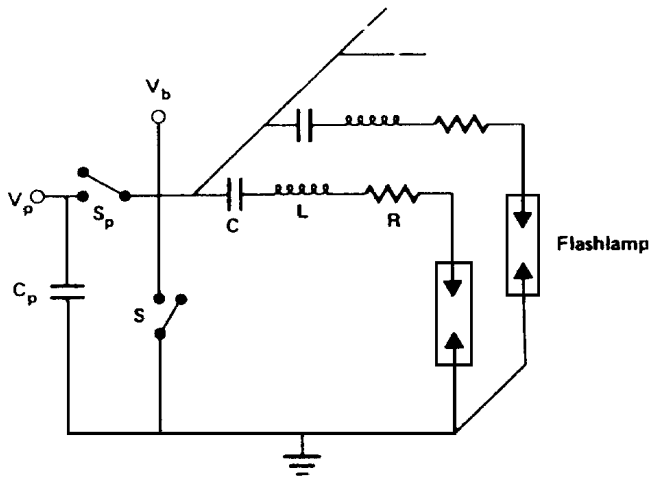


Fig. 2 Schematic of the flashlamp driving circuit including the preionization circuit, showing connections to high voltage supplies V . The subscript p designates preionization circuit components

K_0 是氙灯等离子体的非线性电阻系数, S 是指每一放电回路中串联灯的总弧长, d 是氙灯直径。单级 LC 电路的放电脉冲形状可以由电路阻尼系数 α 来描述:

$$\alpha = \frac{K_0}{(V \sqrt{L/C})^{1/2}} \quad (3)$$

当 α 等于 0.75 时电路处在临界阻尼下工作, 当 α 大于 0.75 时电路处在过阻尼状态, 当 α 小于 0.75 时电路在振荡下工作。

2.2 LC 成形网络电路的 MEH 理论

在不考虑氙灯的放电弧直径随时间变化的情况下, LC 成形网络电路的电流脉冲波形可以通过解完整的电路方程组得到, 简称为 MEH 理论^[5,6]。LC 成形网络电路的电路方程组为

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{d}{dt} \left(\sum_1^n i_m \right) + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt' + K_0 \sqrt{\sum_1^n i_m} + R_1 \sum_1^n i_m &= V_0 \\ L_2 \frac{d}{dt} \left(\sum_2^n i_m \right) + \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt' - \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt' + R_2 \sum_2^n i_m &= 0 \\ \dots\dots \\ L_n \frac{d}{dt} \left(\sum_n^n i_m \right) + \frac{1}{C_n} \int_0^t i_n dt' - \frac{1}{C_{n-1}} \int_0^t i_{n-1} dt' + R_n \sum_n^n i_m &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上式中 L_m, C_m, R_m 各支路的电路参数, 支路电流为 i_m , 电容的充电电压为 V_0 。方程(4) 可以用龙格库塔法求解。

3 氙灯的电弧动力学

在 MEH 理论中, 没有考虑氙灯的放电弧直径随时间的变化。但实际上在氙灯的放电过程中, 等离子体放电柱直径是随时间变化, 尤其在小能量放电情况下, 氙灯放电过程是一个动力学过程。Dishington^[1] 研究了氙灯放电过程中等离子体直径随时间的变化特性, 可用下面方程描述它们的变化规律:

$$\frac{d\bar{\delta}}{d\tau} = 1.2\alpha \overline{E_{in}} \left(\frac{1.5}{\bar{\delta}} \right)^{5/3} |I|^{3/2}, \quad \bar{\delta} \leq \bar{\delta}_c \quad (5a)$$

$$\frac{d\bar{\delta}}{d\tau} = 0.154\alpha \overline{E_{in}} \left(\frac{0.77}{\bar{\delta}} \right)^{13} |I|^{3/2}, \quad \bar{\delta} \geq \bar{\delta}_c \quad (5b)$$

上式中 $\bar{\delta} = d_a/d$ 是等离子体的归一化直径, $\bar{\delta} \cong 0.7d^{0.15}$, 表示当 $\bar{\delta} \leq \bar{\delta}_c$ 时等离子体的膨胀是不受氙灯侧壁影响的, 当 $\bar{\delta} \geq \bar{\delta}_c$ 时等离子体膨胀受到氙灯侧壁的限制, $\overline{E_m}$ 是进入到氙灯单位长度上的能量, α 是电路阻尼系数, $\tau = t/\sqrt{LC}$ 是归一化时间, $I = (Z_0/V_0) i$ 氙灯的归一化电流。将方程(5) 加入到方程组(4) 中, 同样用龙格库塔法求解, 可以解出电路的电流波形、氙灯放电弧的直径和氙灯的归一化的非线性电阻, 我们把这种方法称为 Dishington 理论。

为了校核计算程序, 将我们的计算结果与文献[1] 的计算结果进行了比较。图 3 给出了直

径为 0.635cm 氙灯的电弧波形, 点是文献[1] 的电弧波形, 实线是我们程序的计算结果, 可见两者是一致的, 证明计算程序是可靠的。虚线是用 MEH 理论计算的结果, MEH 理论的计算结果与 Dishington 理论的计算结果有明显的差异, 可见在这样的放电条件下等离子体的膨胀过程对电流分布是有影响的。等离子体未能充满氙灯内径, 从而使得 Dishington 理论计算的电流峰值比 MEH 理论的计算结果小。

图 4 是在两种不同的输入能量情况下, 归一化的峰值电流作为电路阻尼系数的函数, 氙灯直径 0.4cm, 因为电路阻尼系数描述了放电脉冲的形状, 可见放电脉冲的形状对电流峰值有影响。

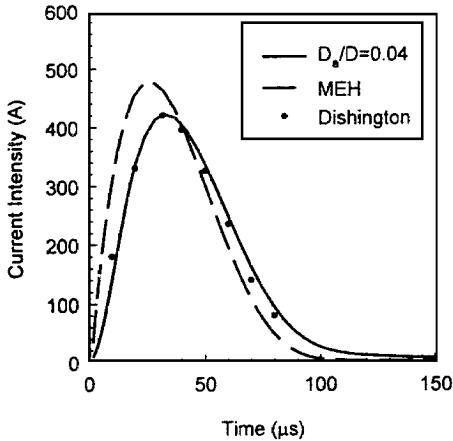


Fig. 3 Comparison of current pulses calculated by MEH and Dishington theory, lamp bore diameter is 0.635cm

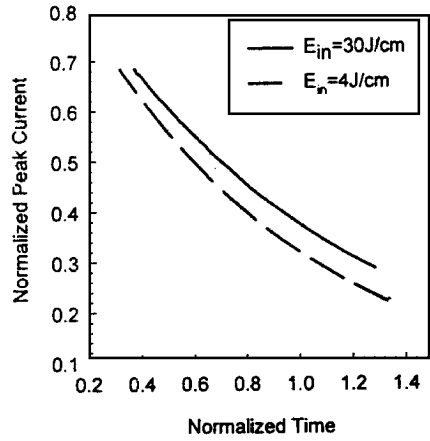


Fig. 4 The normalized peak current as a function of damp coefficient, diameter is 0.4cm

图 5 是氙灯放电过程中归一化的电弧直径和氙灯的归一化非线性电阻与归一化时间的关系曲线。从图 5(a) 可见在放电过程中等离子体柱直径随时间变化, 开始时增加很快, 但在这样的放电条件下, 即使在放电结束时等离子体也未能充满氙灯内径。从图 5(b) 可见放电开始时氙灯的非线性电阻很大, 而且迅速减小, 这是因为开始时电流很小。

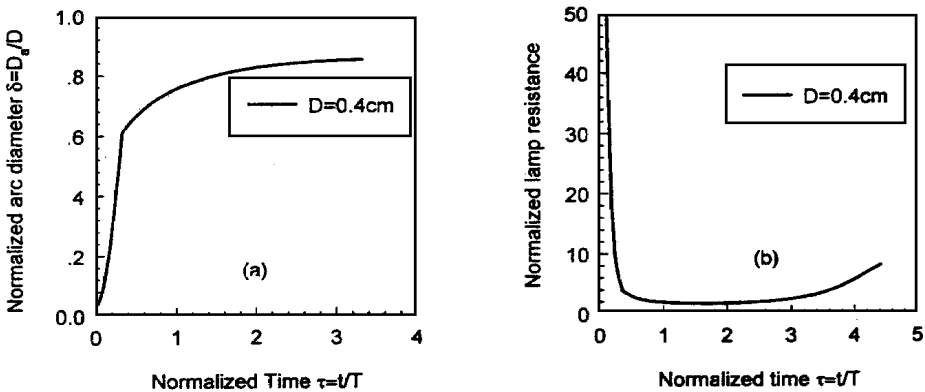


Fig. 5 Normalized arc diameter and lamp resistance vs normalized time, $T = (LC)^{1/2}$

图 6 神光装置 D100 片状放大器 ($D = 1.62\text{cm}$) 在单位长度上的输入能量为 84J/cm 和 30J/cm 两种情况下氙灯的电流波形, 对应的氙灯爆炸因子分别为 0.2 和 0.07, 给出了考虑等离子体柱直径随时间变化计算得到的电流与 MEH 理论计算结果的比较, 可见在小能量放电的情况下, 两者是有差别的, 在大能量放电的情况下, 两者计算结果差别很小, 表明在这种情况下氙灯侧壁对电弧直径影响很小, 等离子体可以充满氙灯内径。图 7a 和 7b 同时给出了直径为 1.6 和 3.2cm 在几种输入能量情况下归一化的等离子体柱直径随时间的变化, 可见在大能量放电情况下, 等离子体是可以充满氙灯内径的。

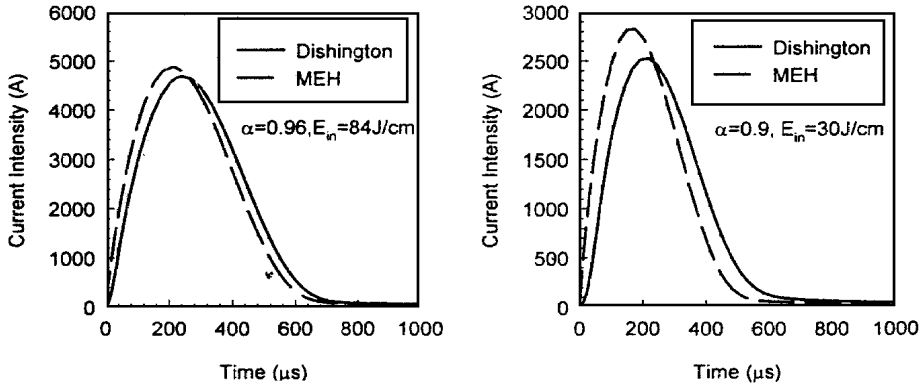


Fig. 6 The comparison of currents calculated by MEH and Dishington theory in the case of different input energy, lamp bore diameter is 1.62cm

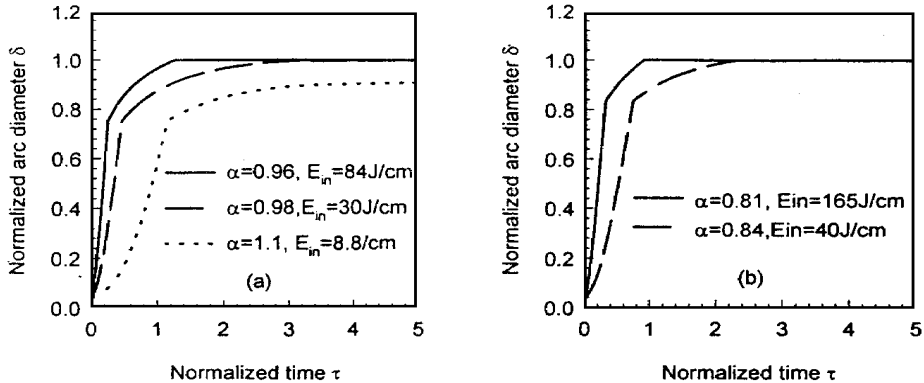


Fig. 7 The normalized arc diameter vs normalized time (a) lamp diameter is 1.62cm and (b) lamp diameter is 3.2cm for different input energy

4 电流和功率波形的实验测量

图 8 给出了神光装置上 $\varnothing 100\text{mm}$ 片状放大器的氙灯电流波形和灯光波形。图 8(a) 是电流波形, 图中的实线和点分别是计算结果和实验测量结果, 实验结果与理论计算结果一致, 微小的差异主要是由于计算过程中没有考虑输电线路的分布电感。图 8(b) 是理论计算的输入功率和实验测量的灯光波形。图中的实线和点分别是理论计算的输入功率和实验测量的灯光

波形, 计算的输入功率与测量的灯光波形之间存在时间延迟, 表明氙灯等离子体的辐射需要一个时间响应过程。

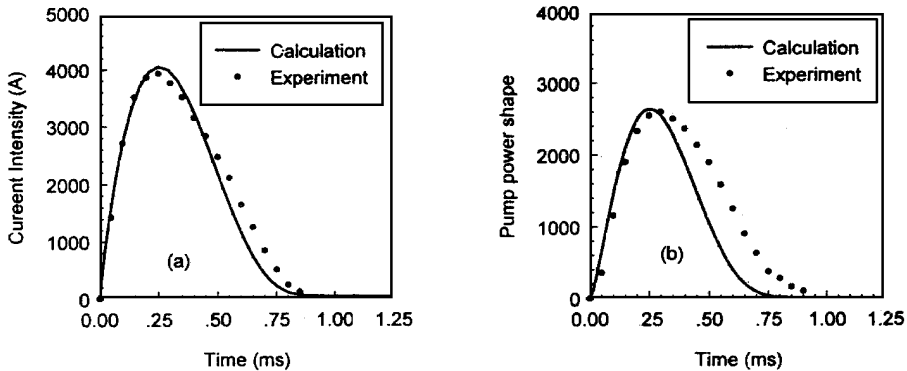


Fig. 8 (a) The calculated and experimental current pulse (b) The calculated and measured pump power shape for D100 xenon flashlamp in Shenguan facility, the circuit parameters are $L = 450\mu\text{H}$, $C = 96\mu\text{F}$, $V = 20\text{kV}$, $R = 0.028\Omega$

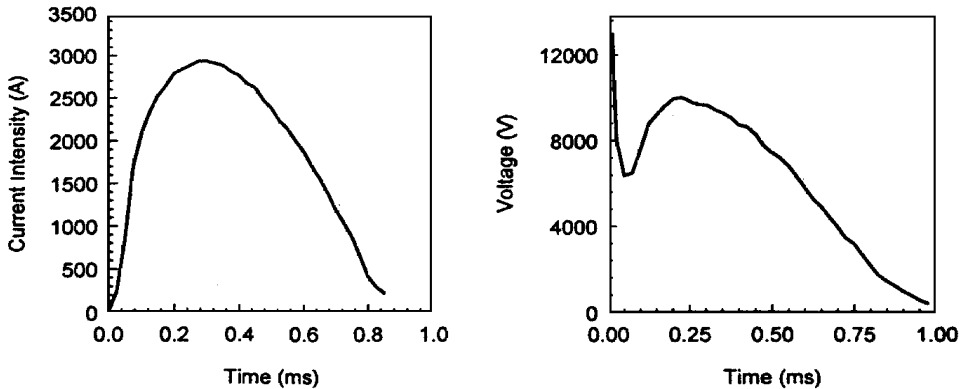


Fig. 9 The measured current and voltage of flashlamp in D100 amplifier, LC circuit is charged to 20kV

图 9 是神光装置 $\varnothing 100\text{mm}$ 片状放大器的电流和电压绝对值的实验测量结果, 图中的纵坐标是电流和电压的绝对测量值, 电容器充电电压为 20kV, 电容量为 96 μF 。在放电的开始氙灯两端的电压迅速下降, 是因为氙灯电阻迅速减小。根据图中数据我们计算得到的从电容器储能到进入氙灯的能量传输效率为 67%, 因此这样的能量传输效率是很低的, 能量损失的主要原因是引燃管和氙灯低电位的电压降。根据图 9 测量得到的电流和电压计算出的氙灯电阻(图略), 在放电开始时电阻很大, 然后迅速减小。

5 结 束 语

本文建立了求解氙灯 LC 供电网络电路模拟计算程序, 与以往的模型相比, 考虑了放电过程中氙灯等离子体直径随时间的变化关系, 因而可以更准确地研究大口径氙灯的放电特性。并根据国内外的实验和计算结果进行了校核。结果表明: 在氙灯的放电过程中, 等离子体放电柱的膨胀过程对电流波形有影响, 但在大能量长脉冲放电情况下, 大口径的氙灯等离子体也可

以充满内径。这套模拟计算程序已经成功地运用于我国新一代高功率固体激光系统的设计之中,进一步修改之后将为我国激光核聚变的发展作出贡献。

参 考 文 献

- 1 Dishington R H, Hook W R, Hilberg R P. Flashlamp discharge and laser efficiency. *Applied Optics*, 1974, 13: 23002312
- 2 Powell H T, Erlandson A C, Jancaitis K S. Flashlamp pumping of Nd:glass disk amplifier. *Proc SPIE*, 1990, 1277: 103120
- 3 Powell H T, Erlandson A C, Jancaitis K S. Characterization of high power flashlamp and application to Nd:glass laser pumping. *Proc SPIE*, 1986, 609: 7894
- 4 Murrar J E, Powell H T, Woods B W. Optimized flashlamp pumping of disc amplifiers. *Flashlamp Pumped Laser Technology*, *Proc SPIE*, 1986, 609: 95
- 5 Markiewicz J P, Emmett J L. Design of flashlamp driving circuits. *IEEE J Quant Electron*. 1966, QE-2: 707
- 6 Holzrighen J E, Emmett J L. Design and analysis of a high brighters flash lamp. *Appl Opt*, 1969, 8: 1459

Transient Property of Xenon Flashlamp Discharge

ZHANG Hua

(*The Department of Physics, Nantong Teachers College, Nantong 226007*)

FAN Diarr Yuan

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

Abstract

The paper presents an improving computer code of solving the LC net circuit used in inertial confinement fusion and accurately indicates the instantaneous property of large bore flashlamp discharge. We considered the expansion of plasma arc during a pulse basic on the well-known MEH theory. It is shown that the early part of the expansion is independent of the lamp diameter. However, at some point in the expansion, the presence of the flashlamp wall becomes important, and the current pulse is dependent of the arc expansion. But under the condition of large energy and long pulse the plasma arc may fill the flashlamp bore.

Key words: Inertial confinement fusion (ICF), Flashlamp discharge, Discharge current pulse, MEH theory

张 华 男, 1964 年出生, 博士, 副教授, 现任教于南通师范学院, 从事用于激光核聚变的高功率钨玻璃激光系统的优化设计研究, 曾多次参加国家高技术 863 计划项目的研究。现主持一项国家 863 计划青年基金项目和多项江苏省教委自然科学基金项目的研究。共发表论文十八篇, 其代表作有“钨玻璃放大器氙灯泵浦的优化设计”(光学学报, 1998 年第 12 期), “钨玻璃激光放大器优化设计的研究现状与展望”(物理, 1999 年第 2 期) 等。