激光技术
Vol.11,No.2

TEA CO_2 激光器放电参数的计算及测量

陈文红 李万荣 刘梅芳 丘军林
（华中工学院激光研究所）

本文针对Blumine型激励电路，对TEA CO_2 激光器的充电过程、预电离过程和主放电过程的电路参数作了理论计算，并通过实验测量了这些参数。理论与实验很好地吻合。

一、引　　言

自从第一台TEA CO_2 激光器问世以来[1]，人们对紫外预电离脉冲激光器进行了大量的研究。为了设计最佳的激励电路，预示激光器的工作特性，从理论上研究激光器的放电参数是非常重要的。本文针对Blumine型激励电路，对激光器的充电过程，预电离过程和主放电过程的电路参数作了详细的理论计算，并由实验得到了验证。

二、实验装置简述

实验所用激光器是我们自己设计的，阴阳极是用合金铝制作的Rogowski电极，放电体

图1　激光器结构横截面示意图。
1.有机玻璃圆筒；2.铝板；3.电极

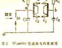

图2　Blumine型激励电路原理图

收稿日期：1986年10月16日。

积为600×38×30mm³，激光管是有机玻璃圆筒。为了形成均匀放电，采用了火花紫外预电离。预电离是在主电极两侧各装一排电容，电容器的一端与主电极相连，另一端与相应的另一电容器形成火花间隙，每个电容器的电容量为，$C_3=680pF$，共用电容器26×4=104个，如图1所示。

三、放电参数的计算

1、激励电路参数的计算

我们用Blumine型电路作为激光器的激励电路，其原理见图2。首先高压源通过电阻R_1和R_2分别向储能电容C_1和C_2充电。设高压源HV的电压为V_0伏，则充电回路方程为，

$$V_{C_1}(t)=V_0[1-\exp(-t/\tau)] \tag{1}$$

式中，$\tau=R_1C_1$ (2)

将 $R_1=51k\Omega$，$C_1=0.064\mu F$ 代入（2）式，得 $\tau=3.3ms$

当一触发脉冲使火花隙SG击穿时，C_1和SG组成一放电回路，即LC反转回路，其等效电路

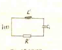

图3 LC反转回路

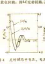

图4 反转回路中电压、电流波形

见图3，图中L'为回路分布电感及SG和C_1内感之和，即$L'=L_{C_1}+L_{SG}+L_{导线}$，R'亦为回路中各部分电阻之和，即$R'=R_{C_1}+R_{SG}+R_{导线}$。由于实验中重复率很低，可以为触发时刻$t=0$的电容C_1上的电压为V_0，则C_1上的电压、电流变化规律为[2]，

$$V_{C_1}(t)=V_0\csc\varphi_0\exp\left(-\frac{R'}{2L'}t\right)\sin(\omega t+\varphi_0) \tag{3}$$

$$i(t)=\frac{V_0}{\omega L'}\exp\left(-\frac{R'}{2L'}t\right)\sin(\omega t) \tag{4}$$

式中，

$$\omega=\left[\frac{1}{L'C_1}-\left(\frac{R'}{2L'}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5}$$

$$\varphi_0=\mathrm{tg}^{-1}\left[\sqrt{\frac{R'}{L'C_1}-\left(\frac{R'}{2L'}\right)^2}\Big/\left(\frac{R'}{2L'}\right)\right] \tag{6}$$

根据文献[3，4]，取$L_{SG}=40nH$，$R_{SG}=0.1\Omega$，导线电感和电阻远小于电容内感和内

阻，故忽略。经实测，$L_{C1}=0.0826\mu H$，$R_{C1}=0.23\Omega$，$L_{C2}=0.1165\mu H$，$R_{C2}=0.156\Omega$，故$L'=0.1226\mu H$，$R'=0.73\Omega$，$C_1=0.064\mu F$，$C_2=0.4\mu F$。

将上述值代入（3）～（6）式，得：

$$V_{C1}(t)=1.05\,V_0\exp(-2.98\times10^{6}t)\sin(10.9\times10^{6}t+1.26) \qquad (7)$$

$$i(t)=0.718\,V_0\exp(-2.98\times10^{6}t)\sin(10.9\times10^{6}t) \qquad (8)$$

根据上面两式作图4，图中周期为

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=0.576\ (\mu s) \qquad (9)$$

这时激光器预电离之前两极间电压为

$$V_{ba}(t)=V_0\left[1-\csc\varphi_1\exp\left(-\frac{R'}{2L'}t\right)\sin(\omega t+\varphi_1)\right] \qquad (10)$$

根据上式作图5，我们求得V_{ba}达到最大值所需时间为

$$t=\frac{1.5\pi-\varphi_1}{\omega}=0.317\,\mu s \qquad (11)$$

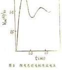

图5 预电离前电极两端电压

这时求得激光器电极两端所能得到的最大电压为

$$V_{ba\,max}=1.41V_0 \qquad (12)$$

实际上电极两端还没达到最大电压就开始了预电离。

2．预电离放电参数的计算

设在t_1时刻预电离开始，此时C_1上电压为V_{C1}，由于充电速率远小于放电速率，故认


图6 预电离回路

为放电期间充电对其无影响，这时放电回路如图6所示，各电流假定方向已在图中给出，根据基尔霍夫定理写出方程

$$L_{C0}\frac{d\,i_1(t)}{d\,t}+R_{C0}\,i_1(t)=R_{C1}\,i_2(t)+L_{C1}\frac{d\,i_2(t)}{d\,t}+\frac{1}{C_1}\int i_2(t)\,d\,t$$

$$=\left(\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_p}\right)\int i_3(t)\,d\,t+L_{C2}\frac{d\,i_3(t)}{d\,t}+R_{C2}\,i_3(t) \qquad (13)$$

将预电离开始的时刻定义为方程（13）的起始时刻，则初始条件为

$$\begin{cases} I_2(t=0) = \dfrac{V_s}{\omega L'}\exp\left(-\dfrac{R'}{2L'}t_1\right)\sin(\omega t_1) \overset{令}{=} I_s & (14) \\ L_{c1}\dfrac{di_2}{dt}(t=0) = V_{s1} & (15) \\ i_3(t=0) = 0 & (16) \\ L_{c2}\dfrac{di_3}{dt}(t=0) = V_s & (17) \end{cases}$$

运用以上初始条件，我们可以求得：

$$i_2(t) = \frac{V_{s1}}{\omega_1 L_{c1}}\exp(-nt)\sin(\omega_1 t + \varphi_{s1}) \quad (18)$$

$$i_3(t) = \frac{V_s}{\omega_s L_{c2}}\exp(-mt)\sin(\omega_s t) \quad (19)$$

式中，$\varphi_{s1} = \sin^{-1}(I_s\omega_1/V_{s1})$

$n = \left(2R_{ss}+R_{c1}\right)/\left[2\left(2L_{ss}+L_{c1}\right)\right]$

$\omega_1 = \left[4\left(2L_{ss}+L_{c1}\right)/C_1 - \left(2R_{ss}+R_{c1}\right)^2\right]^{1/2}$

$/\left[2\left(2L_{ss}+L_{c1}\right)\right]$

$m = \left(2R_{ss}+R_{c2}\right)/\left[2\left(2L_{ss}+L_{c2}\right)\right]$

$\omega_s = \left[4\left(2L_{ss}+L_{c2}\right)\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_p}\right)\right]^{1/2}$

$/\left[2\left(2L_{ss}+L_{c2}\right)\right]$

$C_p = 680\times 26 = 17680$ (pF) ——预电离总电容

代入已知值，可以得到

$$i_2(t) = 1.24V_{s1}\exp(-3.78\times10^6 t)\times\sin(9.04\times10^6 t+\varphi_{s1}) \quad (20)$$

$$i_3(t) = 0.5V_s\exp(-2.94\times10^6 t)\times\sin(17.06\times10^6 t) \quad (21)$$

根据（21）式，作出预电离电流图如图7所示。

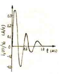

图7　预电离电流波形图

3．主电极放电参数的计算

随着预电离的进行，主放电区里很快积累了大量的带电粒子，使主电极达到击穿条件。当主电极击穿后，放电回路如图8所示。由于辉光放电的电阻较大，且随时间变化，我们设放电阻抗为 $R_L(t)$，忽略其电感和电容，写出方程

图8　主放电放电回路

$$V_L(t) + R\,i(t) + \frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt - V_{ab}(0) + L\frac{d\,i(t)}{d\,t} = 0 \qquad (22)$$

$$i(t) = eAU_e n_e(t) \qquad (23)$$

式中，$n_e(t)$为电子密度，U_e为电子漂移速度，$V_L(t)$为电极压降，A为放电面积，$L=L_{C1}+L_{C2}+L_{导线}$，$R=R_{C1}+R_{C2}+R_{导线}$

电子密度满足下面方程[3]：

$$\frac{d\,n_e(t)}{d\,t} = (\alpha - a)U_e n_e(t) - \gamma n_e^2(t) \qquad (24)$$

式中，α、a 和 γ 分别为电子电离、附着和复合系数。E/N 值在 $1\times10^{-15}Vcm^2$～$4\times10^{-15}Vcm^2$时，其表达式为[3]：

$$\alpha = N\,10^{-5.015(\log x)^2 - 166.8(\log x) - 1240.8} \qquad (25)$$

$$a = N\,10^{-3.309(\log x)^2 - 99.85(\log x) - 772.2} \qquad (26)$$

$$U_e = 10^{0.6729(\log x) + 17.24} \qquad (27)$$

式中，x = E/N，N为电子密度。

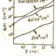

图9　$E/N = 2.5\times10^{-15}Vcm^2$，$E = 6000Vcm^{-1}$时电子密度随t的变化曲线

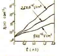

图10　$n(0) = 5\times10^{8}cm^{-3}$，$E = 7200Vcm^{-1}$时电子密度随t的变化曲线

方程（24）可用数字法解[4]，设 t 时刻的电子密度为 $n_e(t)$，$(t+\Delta t)$ 时刻的电子密度为 $n_e(t+\Delta t)$，并假设 α、a、U_e 和 r 为常数，则

$$n_e(t+\Delta t)=\frac{K\,n_e(t)\exp(K\Delta t)}{K-r\,n_e(t)[1-\exp(K\Delta t)]} \tag{28}$$

式中，$K=(\alpha-a)U_e$，r 为复合系数，它与气压无关[5]，取 $r=10^{-7}\ cm^3s^{-1}$。图9、10和11是用计算机计算得到的电子密度随 t 的变化曲线。

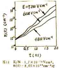

图11　E/N＝1.7×10⁻¹⁵Vcm²，n(0)＝8.05×10¹³cm⁻³时电子密度随 t 的变化曲线

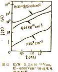

图12　E/N＝2.5×10⁻¹⁵Vcm，E＝6000Vcm⁻¹时放电电流波形图

已知　$A=600\times38mm^2$，$e=1.6\times10^{-19}$ 库仑代入（2）式得，

$$I(t)=3.648\times10^{-17}U_e n_e(t) \tag{29}$$

这时我们得到与图9、10和11对应的电流曲线如图12、13和14。

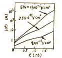

图13　E＝7200Vcm⁻¹，n(0)＝5×10⁸cm⁻³时，放电电流波形图

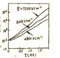

图14　E/N＝1.7×10⁻¹⁵Vcm²，n(0)＝8.05×10¹³cm⁻³时放电电流波形图

根据（22）式，再代入已知数据$L=0.1991\mu H$，$C=0.055\mu F$，$R=0.386\Omega$，取$V_{0s}(0)=1.41V_s$，简化得，

$$V_1(t)=1.41V_s-7.26\times10^{-14}kU_s n_s(t)+7.26\times10^{-31}U_s n_s^2(t)-1.818\times10^7\int_0^t i(t)dt-0.386\,i(t) \qquad (30)$$

用计算机求得伏安特性见图15，计算表明，在E/N和E确定的情况下，初始电子密度越高，动态负阻效应越显著。

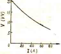

图15　放电伏安特性

四、放电参数的测量

我们用小信号电阻$R_s=2.5\times10^{-3}\Omega$串联到回路中来测电流波形，示波器用10：1的衰减探头。

图16　预电离及预电离极C_1中电流波形，$V_s=14.4kV$，5V/格，500ns/格

当只有SG和C_1形成回路时，电容C_1上电流波形见图16，测得周期为0.5μs，理论计算（见9式）为0.57μs，通过改变气压，使预电离发生而主电极不能击穿，测量C_1中电流，波形见图16中后半部分，测得周期为0.4μs，理论计算为0.37μs$\left(\frac{2\pi}{\omega_1}\right)$实测最大峰值电流为

图17　辉光放电时放电电流波形，1V/格；5μs/格

图18　弧光放电时放电电流波形，5V/格；5μs/格

4×10^3A，计算最大峰值电流为7.6×10^3A。

图17和图18分别是主电极放电为辉光放电和弧光放电情况下的放电电流波形。我们看到，当主放电是弧光放电时，出现了振荡波形，当主放电是均匀的辉光放电时，波形就没有振荡了。注意图17中后来的振荡波形是预电离电容C_1的余放电。我们常常见到主放电结束后火花间隙还会有微弱的放电现象。将图17和图18比较知道，弧光放电的峰值电流远大于辉光放电的峰值电流，说明等离子体的负阻效应是娇害的。

最后感谢龚志伟、袁好、罗小兵和赵锐渝等同志对我们工作的帮助。

参考文献

[1] A.J.Beaulieu Appl.Phys.lett., 1970, Vol.16, P.504.

[2] 王月珠等.《应用激光杂志》, 1982年, 第2卷, 第4期, 第48页。

[3] U.Nandy et al., Appl.Phys.Lett., 1981, Vol.38, No.2, P.69.

[4] 杨大林.《激光杂志》, 1985年, 第5期, 第33页。

[5] J.J Lowke et al., J.Appl.Phys., 1973, Vol.44, P.4664.

Computation and measurement of the discharge parameters for TEA CO_2 laser

Chen Yihong, Li Wanyong, Liu Yangman and Qiu Junlin

(Institue of Laser, HUST)

Abstract

The electrical parameters of the charge, preionization and main discharge processions have been computed theoretically and measured experimentally for a TEA CO_2 laser excited by the Blumine circuit. The theoretical results are in very good agreement with the experimental results.

（上接第61页）

脉冲辐照之前接通磁场。

为了进行编写数据存储，已成功地研制出了袖珍式磁光光盘及其驱动装置样机。就现在研制的结果来看，该驱动装置也可以用于现行的一次性写入光学光盘。此种已研制成的直径为12cm的光盘可容纳550M字节的数据，或者说其存储容量是13.34cm普通软塑料光盘的500倍。使用误码校正编码，可把比特误码率提高到10^{-12}，这就使该系统像现在使用的磁盘和磁带一样的可靠。当需要增加软塑料光盘或小型硬盘的功能时，由于该系统小巧的结构尺寸和大的存储容量，从而使它在个人用计算机和办公室自动化应用中成为一种理想的存储装置。

参考文献（略）

译自　Appl.Opt., 1986, Vol.25, No.4, P.483～489.

王俗敏 译　封鸿渊 校