

TEA CO₂ 激光器不同放电电路放电过程的比较*

陈钰琦^{1,2}, 左都罗^{1,2}, 程祖海^{1,2}, 李 啸^{1,2}

(1. 华中科技大学 武汉光电国家实验室(筹)激光科学与技术研究部, 武汉 430074;

2. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 利用像增强 CCD 相机对脉冲 CO₂ 激光器的放电区进行观测, 获得了放电辉光的发展过程, 由此研究了长脉冲放电电路和短脉冲放电电路对放电过程的影响。发现普通电容放电电路(长脉冲放电电路)存在与自持放电阶段相对应的二次辉光; 采用磁压缩开关的短脉冲放电电路, 预电离出现较晚, 但预电离辉光峰值和主放电辉光峰值之间间距较短, 不存在自持放电阶段, 只观测到一次强辉光。长脉冲放电电路与短脉冲放电电路在放电的后期均存在一个阴极位降区形成的过程。短脉冲放电电路有利于产生更窄的脉宽和更高的峰值功率。

关键词: TEA CO₂ 激光器; 脉冲放电; 电容放电开关; 磁压缩开关; 阴极位降区

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

高效率的激光推进, 需要短脉冲的激光辐射。根据 Myrabo 等人的研究, 以空气呼吸模式, 脉宽在 0.3 s 以下时可以获得最高的冲量耦合系数^[1]; Pakhomov 的烧蚀激光推进也要求脉宽在 0.1 ns 量级或者更小^[2]。短脉冲的激光辐射对激光推进、激光测距、激光冲击强化、激光清洗有重要意义, 而短脉冲放电, 被认为是获得短脉冲激光的最佳方法之一。我们将 Lambda Physics 公司的准分子激光器 MCS 201 改造成脉冲 CO₂ 激光器进行短脉冲激光的初步探索。该激光器采用了磁压缩开关放电电路, 是一种典型的短脉冲放电方式。

在横向激励高压气(TEA)CO₂ 激光器发展的早期, Richardson 等人即用条纹相机拍摄了 TEA CO₂ 激光器不同参数下的放电区中间区域放电辉光演化照片, 对预电离系统的时间演化和作用进行了分析^[3], 得到了在初始体积预电离产生后, 主放电可延迟发生的最佳时间不超过 400 ns 的结论。时空分辨的放电辉光观测, 对了解放电发展过程有重要价值。使用条纹相机, 放电一次, 即可记录下放电辉光的时间演化, 但只能记录放电区某一条线上的放电辉光演化, 放电的空间分布信息不够丰富。ICCD 可进行精确的门宽控制, 每一次放电, 可取得整个放电区在某一时间切片(ns 量级)的信息, 对多次脉冲放电延时采样信息的组合, 即可得到一个完整的放电辉光的时空发展过程。本文将主要报道用像增强 CCD(ICCD)相机观测获得的放电辉光发展过程, 对磁压缩开关实现的短脉冲放电和普通的单电容放电的效果进行比较。

1 实验装置与实验方法

实验系统由 TEA CO₂ 激光器、ICCD 相机和触发信号产生装置组成, 如图 1 所示。将示波器探头接收到的 TEA CO₂ 激光器放电时产生的干扰信号接入示波器 TDS7154B 中以产生一个 ICCD 的同步触发信号(时间零点对应于放电开关触发时刻)。ICCD 采用 Princeton Instruments 公司的 PI-MAX-1300。

实验中分别研究了两种放电电路激励下的放电过程, 放电电路如图 2 所示。图 2(a)是普通电容放电电路, 其中 R_{ch} 和 L_{ch} 为充电电阻和充电电感, C_s 为储能电容(250 nF), SG 为球隙开关, C_{pre} 为预电离电容, 每一排的电容值为 28 nF, 等效的总预电离电容也是 28 nF。激光器放电的基本过程为: 球隙闭合瞬间, 储能电容上 C_s 上的高压同时加在主电极和预电离针上, 通过预电离的弧光放电产生一定数量的初始电子, 然后在主极板间开始较强的主

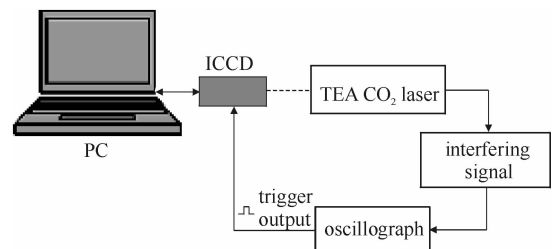


Fig. 1 Schematic drawing of experimental setup

图 1 实验装置示意图

* 收稿日期: 2008-01-25; 修订日期: 2008-04-09

基金项目: 国家重点基础研究项目

作者简介: 陈钰琦(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事高功率气体激光器研究; chenyuqilaser@163.com

联系作者: 左都罗(1966—), 男, 博士, 主要从事高功率气体激光器研究; zuoduluo@mail.hust.edu.cn.

放电,完成放电过程。图 2(b)采用了磁压缩开关放电电路,其中 $L_1 \sim L_6$ 为回路电感。磁开关 SI 是利用电感线圈中的铁磁材料的非线性制成的可饱和电感线圈。磁不饱和时电感很大,磁开关在电路中表现为开路状态;磁饱和时,电感低了几个量级,磁开关在电路中表现为闭合状态。储能电容 C_{s1} 和 C_{s2} 的值均为 64 nF,预电离电容排 C_p 为 31.2 nF,放电时等效的总储能电容为 32 nF,总预电离电容为 62.4 nF。开始工作时,储能电容 C_{s1} 和 C_{s2} 分别充电到 V_0 ,氢闸管 Thy 导通前, C_{s1} 和 C_{s2} 两端电压相等, L_2 两端电压降为 0,磁开关 SI 因电感很大,呈开路状态。Thy 导通后, C_{s1} 储存的电荷通过由氢闸管闭合后形成的 $L_1(C_{s1} + C_{s2})$ 回路振荡放电。此时,SI 未饱和,仅有一漏电流经 SI 流向预电离针对 C_p 缓慢充电,而该漏电流使 SI 逐渐饱和。在半谐振周期时 C_{s1} 上的电压反向与 C_{s2} 上的电压形成倍压叠加,此时 SI 正好饱和,呈闭合状态,则储能电容 C_{s1} 和 C_{s2} 上的电荷迅速向 C_p 中转移,这样所输入的宽脉冲传输到负载时形成了窄脉冲。

利用 Tektronic 公司的高压探头 P6015A 和示波器 TDS7154B 测量了主电极间放电电压。激光脉冲波形用滨松公司光子牵引探测器 B749 探测。

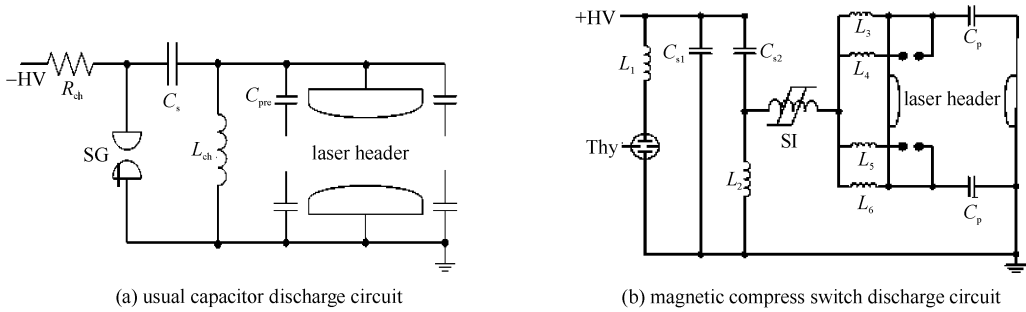


Fig. 2 Schematic drawings of laser discharge circuits

图 2 两种激光器放电电路示意图

2 实验结果

实验中 ICCD 采用序列模式拍摄,采样门宽 10 ns,相邻两次采样间的延时为 10 ns。两种放电电路下随时间分辨的典型放电照片如图 3 所示。照片中左侧为阳极,右侧为阴极。分别选取了预电离开始时刻、主放电最强时刻、主放电之后的典型照片。从图 3(a)中可以看出,对于普通电容充放电电路(长脉冲放电电路),强放电辉光出现后会再次出现放电辉光的次峰(二次辉光)。从图 3(a)和(b)中均可看出,主放电形成后,随着放电的

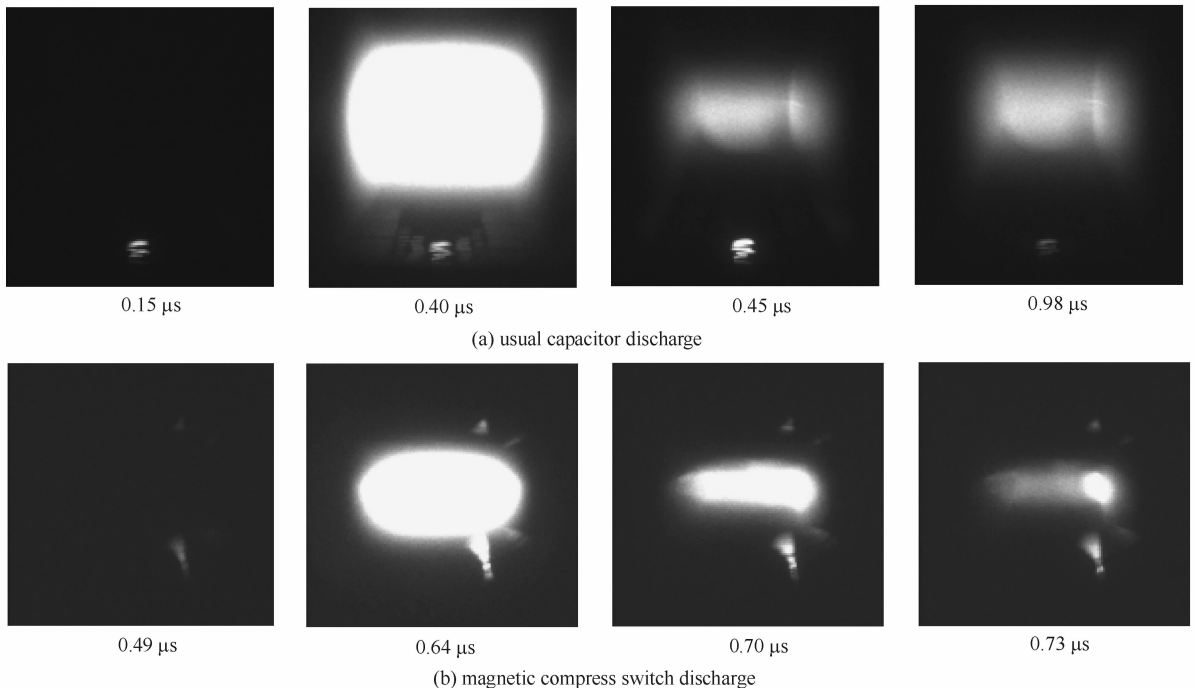


Fig. 3 Time-resolved photos of pulse discharge

图 3 普通电容放电电路与磁压缩开关放电电路的随时间分辨的典型放电照片

发展,阴极附近逐渐形成一流光(图 3(a)中 0.45 μs 以后;图 3(b)0.70 μs 以后)。只有阴极处的电场很强时才会有流光的形成,这说明阴极位降区的形成需要一定的时间,无论长脉冲还是短脉冲放电,阴极流光均出现在放电发展起来之后。这一实验结果与 Macheret^[4]以及 Osipov^[5]等人对脉冲放电过程的模拟结果相吻合:在放电初期,极间电场强度近似均匀;随着放电的进一步发展,极间电位不再线性分布,在靠近阴极的区域出现了阴极位降。

图 4(a)和(b)分别为两种放电电路下拍摄的整个放电区域放电辉光强度峰值随时间变化的曲线和放电电压波形。

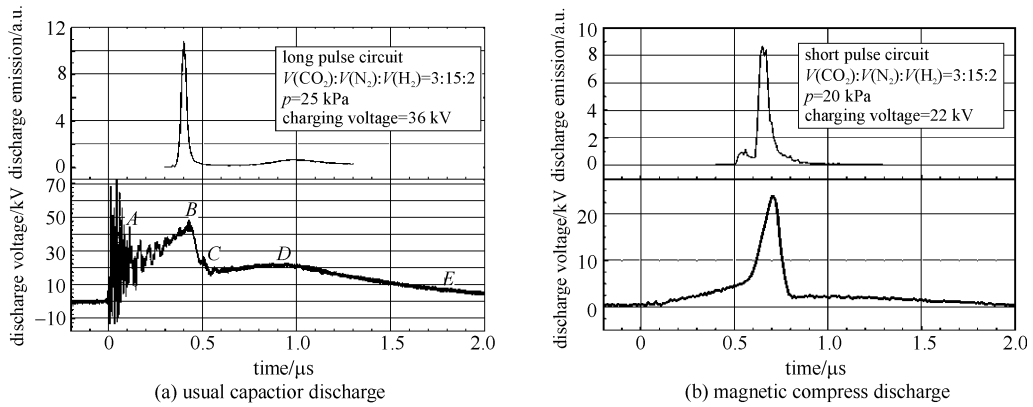


Fig. 4 Voltage waveform and peak value of discharge glow intensity as a function of time

图 4 普通电容放电电路与磁压缩开关放电电路的放电辉光强度峰值随时间分布曲线及放电电压波形

从图 4(a)普通电容放电电路放电电压波形中可以看出,开始时预电离针间隙击穿,主放电电极板间电压逐渐上升,但放电辉光只在电压接近峰值时急剧上升,电压的极大值对应于强辉光。主极板间电压达到最高点 B 后,主极板间隙开始击穿,主放电开始。之后进入自持放电阶段,如图 4(a)中的 CDE 阶段。此时放电辉光强度迅速减小,发光很暗。自持放电电压在 D 点达到峰值,该点与放电辉光的二次峰值相对应。自持阶段的形成,是因为储能电容接近预电离电容的 10 倍,高压开关导通至放电开始,储能电容上的电荷仅有一小部分转移到预电离电容上。

从图 4(b)中看出,磁压缩开关未导通时,仅有漏电流通过,主放电电极电压缓慢上升,在半谐振周期时,形成倍压,磁压缩开关导通,主放电电极间电压快速上升,随后主放电开始,电压急剧下降,形成一个很窄的放电电压脉冲,电压脉冲的半峰值全宽(FWHM)约为 120 ns,强辉光对应于放电电压的窄脉宽阶段。最强的主放电辉光持续时间与长脉冲放电电路区别不大,均为 40 ns 左右。之后回路中电容电感形成振荡,但此时主放电已经结束,从放电的辉光照片上来看也没有放电辉光的次峰出现。不出现自持放电阶段和二次辉光,主要是因为总的等效预电离电容是放电时的等效储能电容的 2 倍,在主放电形成时,储能电容上的电荷可基本上转移到预电离电容上。

ICCD 相机观测到的辉光是脉冲放电等离子体在近紫外和可见光波段的发光。这种发光来源于气体分子的电子激发态之间的跃迁,只有当电子能量(电子温度)较高时才有较大的可能性。这就是辉光强度峰值与放电电压峰值存在对应关系的原因。

分别分析放电照片中的主放电区域和预电离区域,得到主放电和预电离区域的放电辉光强度峰值的曲线,如图 5 所示。从图 5(a)中可以看出,长脉冲放电电路在 150 ns 开始出现预电离放电辉光,预电离峰值点约 200 ns 后主放电区放电辉光开始出现,此时由于预电离电容和储能电容一起对主极板放电,预电离电流反向,预电离区域辉光也逐渐增强,这与前人对于主放电电压和预电离电流等波形的模拟相吻合^[6]。而对于短脉冲放电电路,由于开始时磁压缩开关未导通,感抗很大,因而仅有一漏电流流经预电离电容,预电离辉光出现的时间也较长脉冲放电电路晚,从 490 ns 开始预电离区域才开始逐渐形成辉光,此后约 100 ns 后磁脉冲开关导通主放电开始,主放电区形成强辉光。因此,从两种电路等离子体辉光的发展过程来看,短脉冲放电电路出现预电离以及主放电的时间晚于长脉冲放电电路,并且由于快速放电不存在放电的自持阶段,整个等离子体辉光的持续时间也短于长脉冲放电电路。

图 6 给出了利用光子牵引探测器获得的两种放电电路对应的激光脉冲波形。长脉冲放电电路的激光脉冲

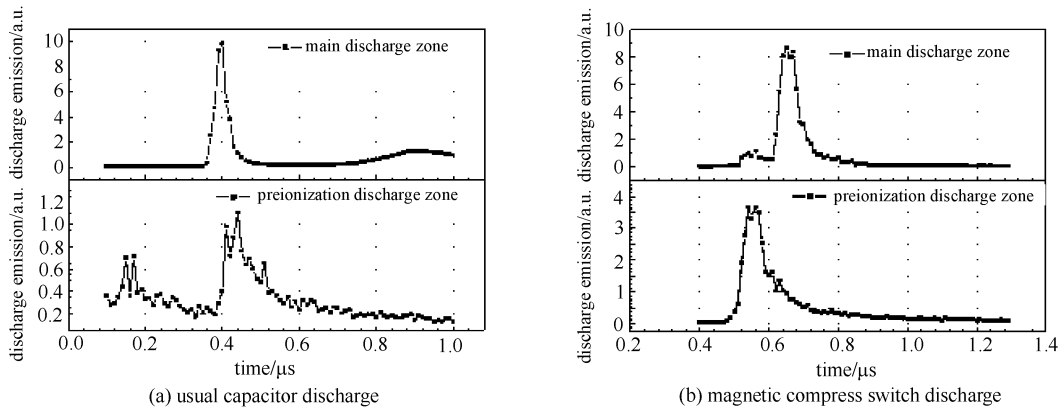


Fig. 5 Peak value curves of discharge glow intensity with different discharge zones

图 5 主放电区域和预电离区域放电辉光强度峰值曲线

半峰值全宽为 $0.06 \mu\text{s}$, 10% 高度全宽为 $1.94 \mu\text{s}$, 磁压缩开关放电电路的半峰值全宽为 $0.04 \mu\text{s}$, 10% 高度全宽为 $0.16 \mu\text{s}$ 。从 10% 高度全宽来衡量激光脉冲波形来看, 短脉冲放电电路获得的放电脉宽明显小于长脉冲放电电路, 短脉冲放电电路有利于产生更高的峰值功率。

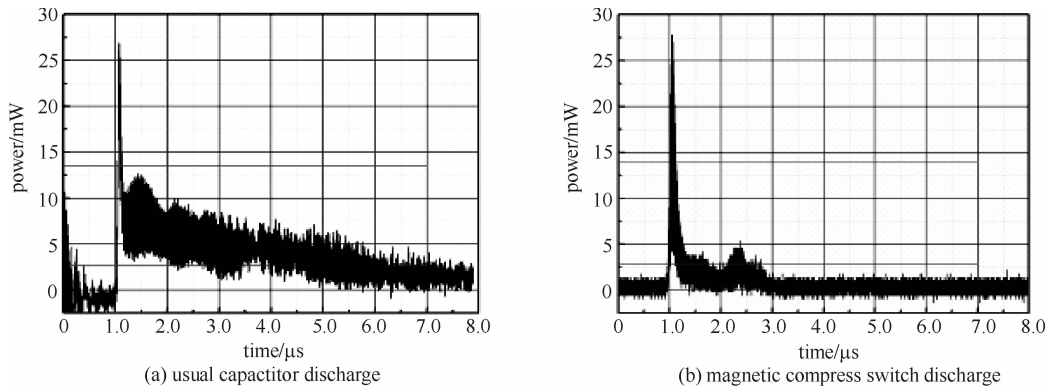


Fig. 6 Laser pulse shapes of capacitor discharge circuit and magnetic compress switch discharge circuit

图 6 普通电容放电电路与磁压缩开关放电电路的激光脉冲时间波形

3 结 论

ICCD 相机对 TEA CO_2 激光器的脉冲放电辉光观测结果显示, 放电辉光与放电电压波形存在对应关系, 电压峰值对应于强辉光。这说明脉冲放电时电子温度随放电电压波形同步变化, 电压峰值对应于高电子温度, 可激发气体分子较高的电子激发态, 从而形成强的近紫外-可见光辉光。长脉冲放电电路, 由于储能电容接近预电离电容的 10 倍, 形成了明显的自持放电, 观测到与自持放电相应的二次辉光; 短脉冲放电电路, 预电离电容接近储能电容的 2 倍, 并且采用了磁压缩开关, 不存在自持放电阶段, 仅观测到一次强辉光。分别考察预电离辉光和主放电辉光, 发现短脉冲放电电路预电离出现较晚, 并且预电离辉光峰值和主放电辉光峰值间距较短。从放电辉光的空分布, 可以发现长脉冲放电电路与短脉冲放电电路在放电的后期均存在一个阴极位降区形成的过程。短脉冲放电激光器激光脉冲的 10% 高度全宽近 $0.16 \mu\text{s}$, 约为长脉冲放电电路激光器的 1/10, 短脉冲放电电路有利于产生更窄的脉宽和更高的峰值功率。

参考文献:

- [1] Myrabo L N. Brief history of the lightcraft technology demonstrator (LTD) project[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2003, **664**: 49-60.
- [2] Pakhomov A V, Thompson M S, Gregory D A. Laser ablation for space propulsion: the concept and its dynamic characteristics[C]//Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics. 2001, **1**: I314-I315.
- [3] Richardson M C, Alcock A J, Leopold K, et al. A 300 J multigigawatt CO_2 laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1973, **9**(2): 236-243.
- [4] Macheret S O, Shneider M N, Miles R B. Modeling of air plasma generation by repetitive high-voltage nanosecond pulses[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, **30**(3): 1301-1314.

- [5] Osipov V V, Lisenkov V V. Development of a self-sustained gas volume discharge[J]. *Gas Discharge Plasma*, 2000, **70**(10):27-33.
- [6] 李小芬, 左都罗, 程祖海. 紫外预电离 TEA CO₂ 激光器放电过程的数值模拟[J]. *激光技术*, 2004, **28**(5):476-479. (Li X F, Zuo D L, Cheng Z H. Numerical simulation of discharge processes of a UV-preionized TEA CO₂ laser. *Laser Technology*, 2004, **28**(5):476-479)

Comparison of discharge between different circuits of TEA CO₂ laser

CHEN Yu-qi^{1,2}, ZUO Du-luo^{1,2}, CHENG Zu-hai^{1,2}, LI Xiao^{1,2}

(1. *Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*; 2. *Institute of Optoelectronics Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

Abstract: Time-resolved photos of the discharge of TEA(transversely excited atmospheric pressure) CO₂ laser taken by IC-CD camera were analyzed. Quantitative data on the spatial distribution and the temporal development of the discharge were given. Second glow originated from the self-sustained discharge was found in the case of usual capacitor discharge circuit (long pulse discharge circuit). The light emission of the preionization with a short pulse discharge circuit using a magnetic compress switch formed later, but the interval between preionization and main discharge was shorter. For both long pulse discharge circuit and short pulse discharge circuit, the formation of cathode sheath occurred in the late stage of discharge. Short pulse discharge circuit has advantages to obtain shorter pulse duration and higher peak power.

Key words: TEA CO₂ laser; Pulse discharge; Capacitor discharge circuit; Magnetic compress switch; Cathode sheath