

紫外准分子激光通过光纤传输 触发低抖动球隙开关

楼祺洪 祁建平 丁泽安 霍芸生 王润文

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文研究了紫外 XeCl 准分子激光(308 nm)在石英光纤中的传输特性。激光讯号通过光纤传输触发球隙开关的实验结果表明,激光触发的抖动时间小于 3 ns。用同一激光束通过两根光纤分别触发两个球隙开关,使两个球隙开关具有很好的同步特性。

一、引 言

高功率脉冲放电气体激光的泵浦源或予电离源一般由多级麦克斯发生器或传输线组成,它要求脉冲电压有很快的上升时间和较小的抖动时间,这就要求脉冲电压源中的球隙开关具有很好的工作特性和较小的抖动时间。在一般的高压放电技术中,普遍使用高压脉冲电讯号触发球隙开关,此时球隙开关的抖动时间强烈依赖于触发讯号的上升时间^[1],而获得快上升时间的触发讯号,要引入新的球隙开关或其他元件,使整个系统复杂化,另一方面,用电讯号触发的高压系统还很容易受到其他电讯号的干扰引起触发状态的不稳定。

强激光束可以用于触发球隙开关^[2],它具有不受高压放电脉冲的干扰、低抖动时间等优点,被应用于高压等离子体技术、加速器以及激光技术中。早期的研究工作采用可见和红外激光源,在大气中经准直聚焦到球隙开关,并要求精密的调整,这就限制了它的广泛应用。同时,紫外激光应比可见和红外激光具有更好的电离触发特性,利用光纤传输可以使高功率激光束直接进入球隙开关,从而省去在大气中的光学系统和精密调整。通过调整光纤的长度可以有效地控制触发的延迟时间,而且用同一激光束通过多根光纤可以同步触发几个球隙开关或者在同一球隙开关中引发几个通道,因而在实际应用中是十分有用的。

二、XeCl 准分子激光在石英光纤中的传输特性

测量 XeCl 准分子激光在石英光纤中的传输特性的实验装置如图 1 所示。X 光子电离脉冲放电泵浦的 XeCl 激光器,典型的激光脉冲宽度为 70 ns(FWHM),输出能量 0.1~1J,通过透镜 L 可将激光束耦合到石英光纤中,改变透镜和光纤入射表面之间的距离及激光输出能量,可以控制光纤的输入功率密度。分光板 B 是一块未镀膜的石英平板,用以监视入射激光的能量。通过计算激光在光纤入射端面上光斑的面积和光纤入射端截面积之比,可以

计算出进入光纤的能量。为精确起见,激光在光纤入射端面上光斑面积用光阑法确定,并取十次结果的平均值。

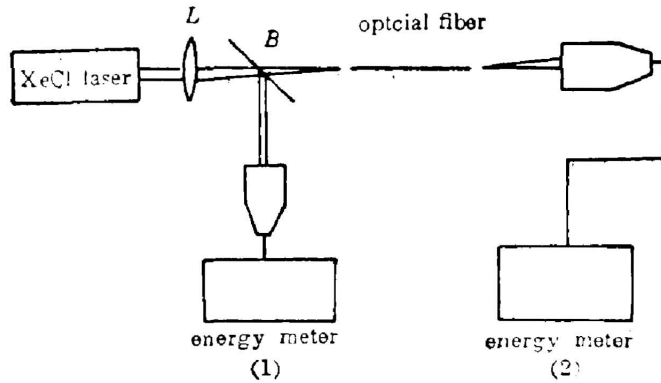


Fig. 1 Schematic of the experimental setup for measuring the XeCl laser transmission characteristics through an optical fiber

采用较长光纤的原因是便于将来的实际应用,可以使激光器远离球隙开关,也便于用同一激光束同时触发位置相距较远的两个球隙开关。激光束通过光纤的衰减主要来源于 Rayleigh 散射和 Raman 散射,在较强的泵浦水平下,一般认为 Rayleigh 散射占主导因素。根据 D. A. Pinnow 等人的分析,光散射系数可表达为^[3,4]:

$$\alpha = \frac{8}{3} \frac{\pi^3}{\lambda^4} (n^8 p^2) (kT) \beta_T,$$

式中, λ 为光波长, n 为光纤的折射率, p 为光弹性系数, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, β_T 为材料的绝热压缩系数。当波长为 308 nm 时,可以估算出 $\alpha \sim 0.09$ dB/m。由图 2 可以求得输入功率密度为 20~40 MW/cm² 时,光纤的损耗系数为 0.2 dB/m。而当输入功率增加到 200 W/cm² 时,光纤的损耗系数为 0.25 dB/m。实验值与 Rayleigh 散射理论的预期值有差别,是由于 Raman 散射和光纤中的杂质吸收所引起的。

在以上实验中,为了计算功率密度,还要测量激光脉冲宽度和激光通过光纤以后脉冲宽

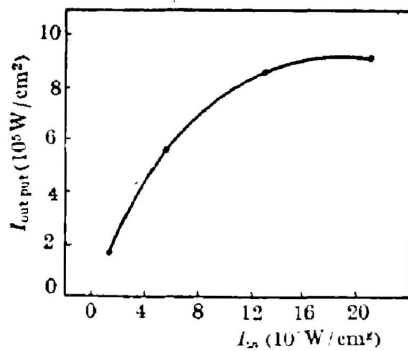


Fig. 2 Input intensity of XeCl laser versus output intensity. The optical fiber is 9.6 m long

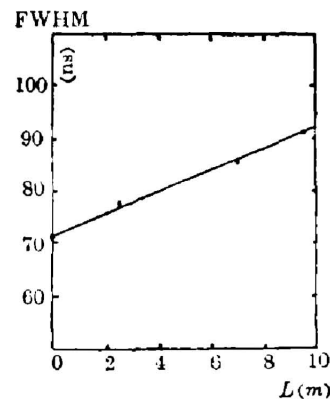
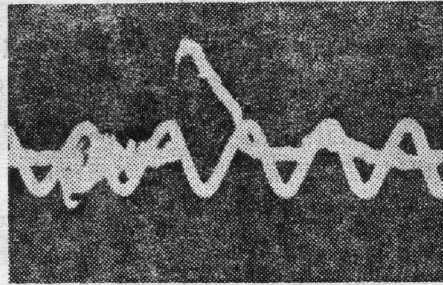
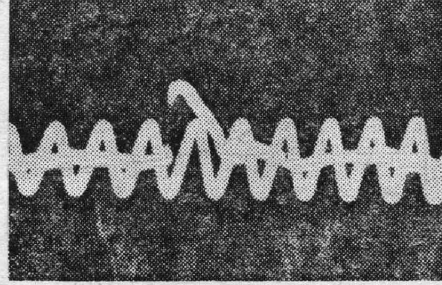


Fig. 3 FWHM of the laser pulse output from the optical fiber as a function of the fiber length

度的变化。图 3 给出光纤输出激光脉冲宽度随光纤长度的变化, 输出激光脉冲宽度比输入光纤的激光脉冲宽度增大 28%, 典型的 XeCl 激光脉冲波形和通过 9.6 m 长光纤后的光脉冲波形分别由图 4(a)和(b)给出。为了使接收器处于线性状态, 两者之间相对值不成比例, 这是使用了不同透过率的衰减片所致。



(a) XeCl laser output pulse waveform



(b) Waveform of the laser output pulse from the 9.6 m long optical fiber

(Time scale is 10MHz)

Fig. 4

三、XeCl 激光通过光纤传输触发球隙开关

XeCl 紫外准分子激光通过光纤传输触发球隙开关的实验装置如图 5 所示。在用激光束输入两根光纤同时触发两个球隙的线路之前, 先进行单球隙的特性测量。球隙由两个球状电极组成, 其中一个电极中间开有一个小孔, 让光纤直接插入, 球隙间距约为 5 mm 左右。电容 C 的容量为 8.1 nF, 负载电阻 R_1 和 R_2 为 10~35 Ω 量级。球隙击穿电压波形由 R_3 和 R_4 组成的分压器及 OK-19 高压示波器检测, 光纤的长度为 2.5~7 m 左右。由紫外光电二极管和快速示波器组成的接收系统用以检测入射到光纤的激光波形, (同时检测负载电阻 R_1 上的波形可以求得激光触发球隙的延迟特性和抖动特性)。这里我们定义延迟时间为球隙导通时负载电阻上电压和注入光纤端激光波形两上升起点之间的时间间隔。

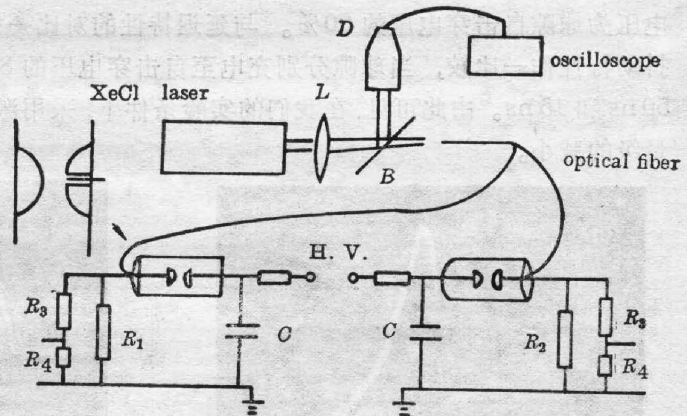


Fig.5 Schematic of the experimental setup for triggering the spark-gap switch by a XeCl laser through optical fiber

改变注入光纤中的激光功率密度会使延迟时间 T_D 发生相应的变化。由图 6 可见, 当注入激光功率密度较低时 (50 MW/cm²), T_D 约为 700 ns 左右。当注入激光功率密度增大到 100 MW/cm² 时, T_D 减小到 100 ns 量级。此时, 球隙开关的充电电压约为自击穿电压的 70% 左右。当球隙电压充至自击穿电压的 90% 时, 延迟时间 T_D 下降到 20 ns 量级。我们

还对用高压电脉冲触发的球隙作了比较,采用上升前沿为 $400 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 的触发脉冲。当球隙充电至自击穿电压的 70% 时,延迟时间约为 460 ns ,而当球隙充电至自击穿电压的 90% 时,

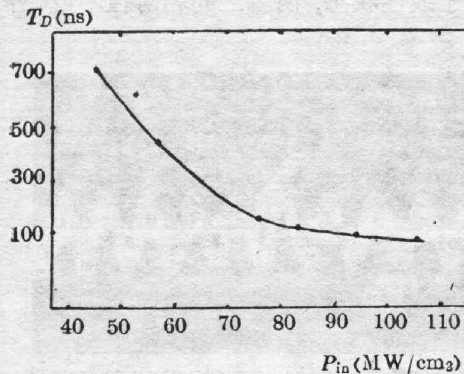


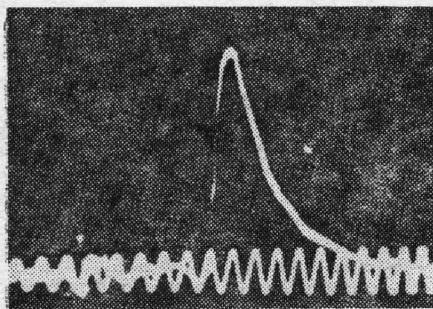
Fig. 6 Input intensity of XeCl laser versus delay time T_D

时, T_D 约为 100 ns 。由此可见,在我们的实验条件下,采用激光触发球隙的延迟时间比用电讯号触发的延迟时间减少 4~5 倍。

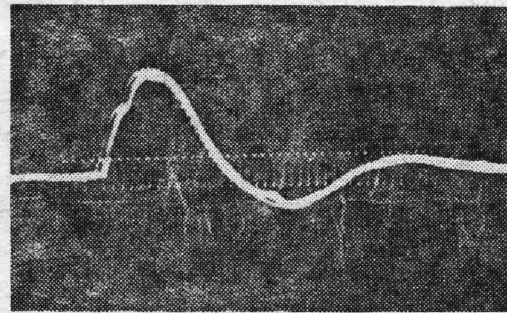
用同一张底片多次拍摄激光触发球隙开关在电阻 R_1 上的电压波形,其时间基准是激光脉冲波形的上升起点。可以求得多次脉冲的平均延迟时间 \bar{T}_d ,而每个脉冲的实际延迟时间为 T_{di} ,定义每个脉冲的抖动时间为 $\Delta_i = T_{di} - \bar{T}_d$,则均方根抖动时间可表达为 $\bar{\Delta}_i$

$$\bar{\Delta}_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

图 7(a) 给出负载电阻为 35Ω 时, 10 个脉冲的重叠波形。可以看到 10 个脉冲完全重合,此时时标为 10 MHz 。为了测量抖动时间,我们将时标扩展到 100 MHz ,并将负载电阻减小到 12.5Ω ,使整个回路处于弱阻尼状态,在一张底片上记录的 10 个脉冲如图 7(b),由此计算得到的均方根抖动时间约为 3 ns 左右。由于在 OK-19 示波器上激光波形的起始本身有 3 ns 左右的起伏,激光触发的球隙开关抖动时间要小于 3 ns 。在上述实验中注入光纤的激光功率密度为 $158 \text{ MW}/\text{cm}^2$,球隙开关的充电电压为球隙自击穿电压的 90%。与延迟特性的对比一样,我们将上述结果与电触发球隙的抖动特性作一比较,当球隙分别充电至自击穿电压的 80% 和 90% 时,抖动时间分别为 50 ns 和 15 ns 。由此可见,在我们的实验条件下,采用激光触发的球隙开关使抖动时间有数量级的减小。



(a) Dummy load resistor is 35Ω



(b) Dummy load resistor is 12.5Ω

Fig. 7 Voltage waveform on dummy load

按照图 5 的布置,激光束可以同时触发两个球隙开关。此时两组电容分别通过两个球隙对负载电阻放电,两根同样型号的光纤端面放置于同一平面内,调整激光束的照明系统并保证两根光纤入射的激光强度一样为 $160 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 。将两个分压器测得的球隙放电讯号分别输入 OK-19 示波器上两个同步扫描的示波管上,观察两组电压波形相互之间的抖动时间,实验结果表明两者的均方根抖动时间小于 3 ns ,这表明激光触发几个球隙具有很好的同步特性。

四、结 论

我们用紫外 XeCl 准分子激光束测量了国产石英光纤的传输特性, 测得对于波长为 308 nm, 脉冲宽度为 70 ns 的激光束, 当入射到光纤功率密度在 20~200 MW/cm² 范围内, 传输损耗为 0.2~0.25 dB/m, 此值接近于根据 Rayleigh 散射理论的估算值 0.09 dB/m。

紫外激光束通过光纤传输以后用以触发球隙开关, 在球隙开关充电至自击穿电压的 90% 时, 其抖动时间小于 3 ns, 用同一激光束通过两根光纤分别触发两个球隙开关, 使其具有非常好的同步特性。这种技术可应用于高能脉冲放电气体激光、自由电子激光、高能加速器以及短脉冲激光的振放系统。

参 考 文 献

- [1] J. M. Meek and J. D. Craggs; *«Electrical Breakdown of Gases»*, (New York Wiley, 1978).
- [2] A. H. Guenther and J. R. Bettis; *J. Phys. (D)*, 1978, **11**, No. 12 (Aug), 1577.
- [3] D. A. Pinnow; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**, No. 10 (May), 527.
- [4] Y. Itoh *et al.*; *JAP*, 1983, **54**, No. 6 (Jun), 2956.

UV excimer laser used in triggering low-jitter spark gaps through fiber

LOU QIHONG, QI JIANPING, DING ZIAN, HUO YUNSHENG AND WANG RENWEN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 22 October 1985; revised 23 January 1986)

Abstract

The transmission characteristics of the radiation from a UV XeCl excimer laser through fused quartz fibers have been investigated. The laser beam transmitted via optical fiber was used to trigger a spark gap. Experimental results show that the triggering jitter is less than 3 ns. With use of two fibers, the same laser was used to trigger two spark gaps synchronously.