

用于紫外激光脉冲电光开关的驱动脉冲源

缙永胜^{1,3},王大辉²,刘百玉¹,赵学庆²,白永林¹,朱炳利¹,王博¹,白晓红¹,秦君军¹,徐鹏¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 条纹相机工程中心, 陕西 西安 710119;
2. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用雪崩晶体管作为高速开关器件、根据并联充电、串联放电原理设计了一种串并联相结合的 MARX 电路, 以该电路为基础设计了一种低抖动高压脉冲驱动源, 并将其应用于紫外激光脉冲的电光开关削波系统。通过同步调节器调节高压驱动脉冲和激光电光系统的时间匹配度, 获得了驱动电脉冲与电光开关耦合的最佳工作状态; 对匹配过程中的电光开关工作状态以及激光脉冲压缩过程进行了分析和研究, 当高压驱动电脉冲幅度为 2 690 V, 脉宽为 7.9 ns 时, 可以将脉宽为 7.1 ns 的紫外激光脉冲压缩至 2.1 ns, KDP 晶体的透光率达到了 92.2%, 电光开关的效率达到了 31.7%。

关键词: MARX 电路; 驱动电脉冲; 紫外激光脉冲削波; 电光开关

中图分类号: TN78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2661-05

Driving pulse source for ultraviolet laser pulse electro-optic switch

Gou Yongsheng^{1,3}, Wang Dahui², Liu Baiyu¹, Zhao Xueqing², Bai Yonglin¹, Zhu Bingli¹,
Wang Bo¹, Bai Xiaohong¹, Qin Junjun¹, Xu Peng¹

- (1. Streak Camera Center, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. The State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A MARX circuit was designed by connecting the avalanche transistors serially and parallel. A high-voltage pulse driving source with low jitter was developed based on this circuit, and it was applied on a electro-optical switch clipping system of ultraviolet laser pulse. The time matching degree between high-voltage driving pulse and laser electro-optic system was regulated by synchronous regulator to get the best work state of the driving electrical pulses coupling with the electro-optical switch; work state of the electro-optical switch and shaping process of the laser were researched while matching the working time, when the amplitude and pulse width of high-voltage driving pulse was 2 690 V and 7.9 ns, the UV laser pulse with 7.1 ns in pulse width can be compressed to 2.1 ns. Then the transmittance of KDP crystal is 92.2%, and the efficiency of electro-optic switch has reached 31.7%.

Key words: MARX circuit; driving pulse; UV laser pulse clipping; electro-optical switch

收稿日期: 2015-01-10; 修订日期: 2015-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(11205238); 西北核技术研究所激光与物质相互作用重点实验室基金

作者简介: 缙永胜(1984-), 男, 硕士, 主要从事超快电脉冲方面的研究。Email: yshgou@163.com

0 引言

准分子激光介质增益高,属于非存储性介质,在放大过程中 ASE(放大自发辐射)比较严重,特别是在时间占空比和空间填充率比较低的情况下,将使脉冲波形展宽甚至畸变^[1-2]。此时需要对激光脉冲进行整形,缩短脉冲宽度,提高峰值功率,消除激光脉冲前后沿的扩展部分对次级系统的影响。电光开关削波是用于激光脉冲整形的主要方法,但是在国内紫外激光脉冲削波电光开关的开关效率较低,脉冲宽度也很难压缩至 4 ns 以下,主要原因是驱动电脉冲与输入的激光脉冲在时间上不能很好匹配^[3]。文中基于 MARX 电路设计的高压电脉冲驱动源具有幅度可调、快速前后沿、波形稳定和信噪比高的特点,并且在电光开关削波系统中取得了良好的效果^[4-5]。

1 电脉冲驱动电光开关的原理

电光开关是利用电脉冲改变晶体的折射率,控制入射光的穿透,如图 1 所示^[6]。入射光经过偏振片后成为线偏振光,在晶体上加载驱动电脉冲,当电脉冲幅度增加到某一值时,偏振光经过晶体后产生 $\frac{\lambda}{2}$ 的光程差,其相位差 $\delta=\pi$,光束的偏振方向正好旋转 $\frac{\pi}{2}$,此时透光率 $T=100\%$ 。改变电脉冲幅度时,输出光强将相应地有所变化。如果晶体上未加载驱动电脉冲,往返通过晶体的线偏振光的振动方向不变,此时透光率为 0。

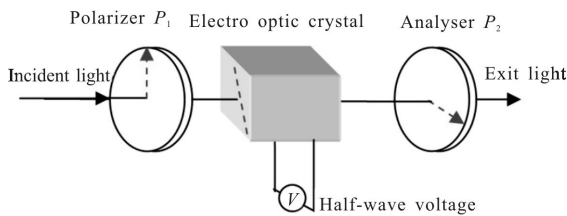


图 1 电光开关原理图

Fig.1 Schematic diagram of electro-optical switch

2 电光开关驱动脉冲源设计

驱动脉冲前后沿的快慢决定了晶体开关的响应速度和系统的消波对比度。因此驱动脉冲前后沿必须具有平滑无毛刺,顶部和底部纹波小的特点。同时

驱动脉冲的延时和抖动也对电光开关的工作状态有重要影响,如果驱动脉冲的抖动大于驱动脉冲的脉宽则意味着激光到来时开关可能处于开启状态也可能处于关闭状态,这种情况会使电光开关工作在不稳定状态,从而使电光开关失去意义。

和其他的开关器件相比雪崩晶体管具有使用方便、工作方式稳定、开关响应速度快等优点。基于这些优点笔者设计了一种串并联相结合的 Marx 脉冲电路。该电路具有供电电压低,分布电容小、串联电感小等优点,有助于缩短脉冲的前沿时间。电路的机理是并联充电,串联放电。电路原理如图 2 所示,脉冲幅度衰减 60 dB^[7-9]。

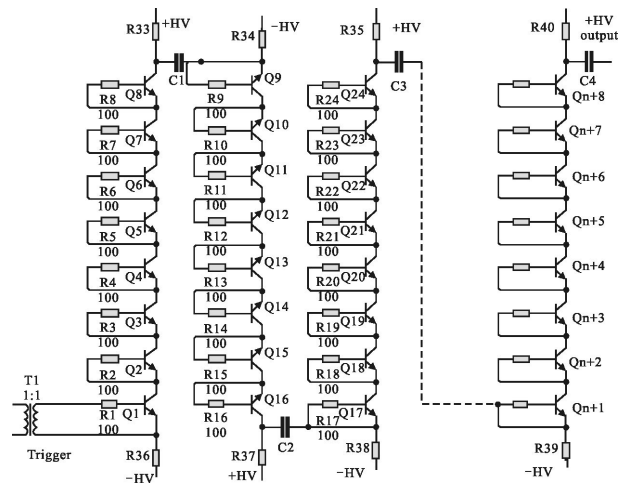


图 2 电路原理图

Fig.2 Schematic of MARX circuit

电路采用 50 Ω 微带传输线结构,利用电容将雪崩管串联成 S 型。这种结构不但降低了电路的杂散电感和分布电容,而且还相当于各级输出脉冲波形乘积,使雪崩管的导通内阻减小,基极注入电流增大,脉冲下降沿减小。

微带传输线结构如图 3 所示,利用微带线的特性阻抗公式(1)可以计算微带线的宽度 W,合适的结构参数可以减小分布电容和脉冲串扰,保证输出脉冲稳定。

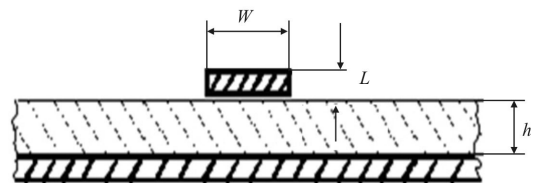


图 3 微带线结构图

Fig.3 Structural diagram of micro-strip line

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \frac{5.98h}{0.8w + L} \quad (1)$$

式中: ϵ_r 为介质的相对介电常数; Z_0 为微带线的特性阻抗电路中的阻抗为 50Ω , 所以 Z_0 取值为 50Ω , 设 $\epsilon_r = 5.0$ 、 $h = 1 \text{ mm}$ 、 $L = 0.035 \text{ mm}$, 代入公式(1)中, 可以计算 $W = 1.695 \text{ mm}$ 。

电路采用正负高压供电, 雪崩管采用 2N5551, V_{CBO} 为 400 V , V_{CEO} 为 300 V 。首先触发脉冲通过一个小的铁氧化磁环脉冲变压器(使两边的脉冲不共地)触发 Q_1 晶体管, 当 Q_1 导通时, Q_1 的收集结电位接近 $-HV$, 使第二个晶体管 Q_2 集电极和发射极之间的电压大于晶体管雪崩电压, Q_2 雪崩导通, 后面的雪崩管依次导通, 同时由于后面雪崩管的集电极和发射极之间依次承受越来越高的电压, 产生越来越短的上升时间, 直至最后一个晶体管 Q_{n+8} 导通。电路中的雪崩管从高压低电流状态转换为低压高电流, 瞬间电流流过整个回路, 达到一定程度后输出高压窄脉冲。理论分析如下: 触发脉冲触发后, 第一串雪崩管导通, 于是 C_1 左端电势等于 Q_1 射极电势, 设为 U 。

$$U_{\text{Cl-left}} = U_{\text{Q1-E}} = U \quad (2)$$

在电容充电后电荷不会瞬间放电完毕, 因而两端电势差几乎维持不变, 即有:

$$U_{\text{Cl-right}} = U_{\text{Cl-left}} + U = 2U \quad (3)$$

此时在 C_1 右端的瞬间电势为 $2U$, 瞬间电势加在后面雪崩管上, 也将发生雪崩导通, 以此类推, 雪崩管将依次导通, 获得高压窄脉冲。设晶体管串的级数为 N , 直流偏压为 400 V , 则输出脉冲幅度为:

$$U_N = N \times 400 \quad (4)$$

输出脉冲的上升沿主要取决于 MARX 电路的放电速度, 而电路的上升沿主要取决于雪崩晶体管的打开速度。输出脉冲的宽度主要由以上两个因素决定。可以通过改变电路中的电容大小进而改变回路的放电时间, 从而实现输出脉冲宽度的调整。输出窄脉冲时主要从 3 个方面采取措施: 一是保证触发脉冲的快沿触发, 使雪崩管的导通速度加快; 二是减小级间电容值, 刚好维持相邻几级雪崩晶体管开始雪崩, 使其电荷在级联雪崩过程中迅速释放完毕; 三是在电路末端串接一个小容值电容, 当其充满电荷后, 电容等效为开路, 输出脉冲将自行截止, 加快放电速度, 缩短脉冲后沿。

3 实验测试结果和分析

利用电路产生的高压电脉冲驱动电光开关削波系统, 并且使用同步调节器控制入射脉冲和驱动电脉冲的同步时间。入射脉冲为紫外激光脉冲, 脉宽为 7.1 ns , 波形如图 4 所示。用于驱动 KDP 电光开关的高压电脉冲如图 5 所示, 脉冲幅度为 2690 V , 脉宽为 7.9 ns , 前沿 643 ps , 后沿 3.6 ns , 抖动小于 1 ns 。

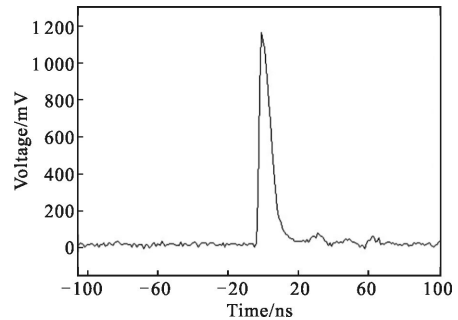


图 4 紫外激光脉冲波形

Fig.4 Waveform of 308 nm laser pulse

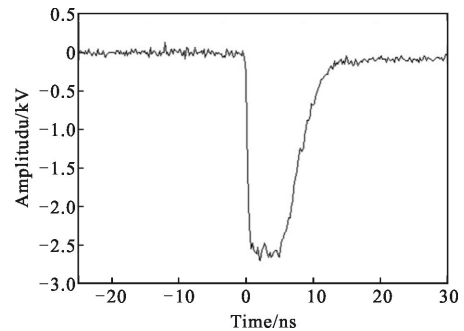


图 5 削波驱动脉冲波形

Fig.5 Waveform of clipping driving pulse

实验中当激光脉冲通过电光晶体时, 与驱动电脉冲的时间不同步, 加在电光晶体上的驱动脉冲没有达到半波电压, 使得电光晶体的透过率达不到 100%, 由小到大调节同步调节器的延时时间, 同时通过示波器监测脉冲信号的波形及脉宽的变化。在不同的同步时间内, 削波后的脉冲能量和幅度呈曲线变化, 如图 6~7 所示, 图 8 为脉宽压缩为 2.1 ns 时的波形。消波对比度为电光开关通断之间的能量比值, 是衡量驱动电脉冲控制开关通断性能的一个重要参数, 图 9 为实验中测得的消波对比度, 最大值为 2073 倍。

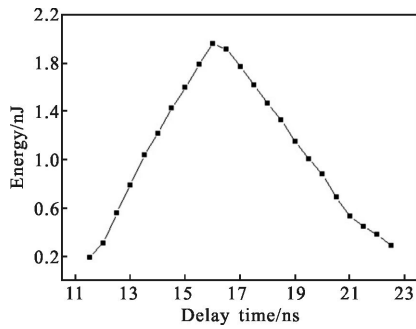


图 6 不同同步时间削波后的能量

Fig.6 Energy after clipping at different synchronization time

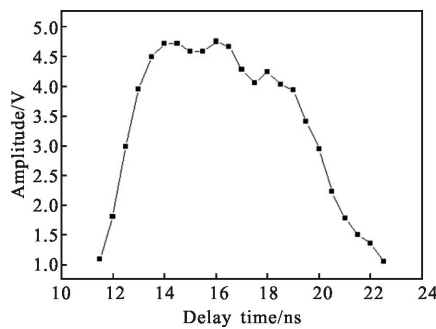


图 7 不同同步时间削波后的幅度

Fig.7 Amplitude after clipping at different synchronization time

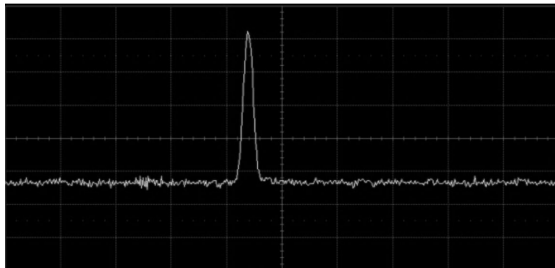


图 8 脉宽压缩至 2.1 ns 时的波形

Fig.8 Waveform of pulse at the time of pulse width reduced to 2.1 ns

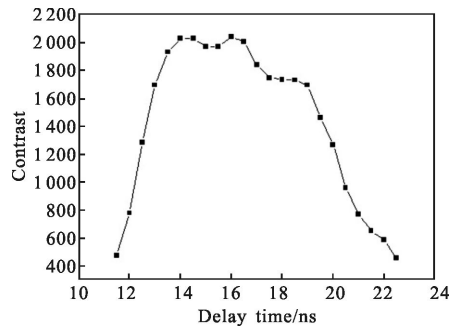


图 9 不同同步时间的削波对比度

Fig.9 Contrast after clipping at different synchronization time

驱动脉冲和激光脉冲的匹配度成一段曲线,从

图 6、7、9 可以分析出: 在延时 16 ns 时削波效果最好, 此时即为驱动电脉冲的最佳工作状态。实验中, 当削波对比度为 2 073 倍时, 利用能量计测得的一组数据见表 1。

表 1 电光削波系统中不同位置测得的脉冲能量值
Tab.1 Measured pulse energy value at different

	1	2	3	4	5	6
P_1 origin energy/ μ J	12.48	12.02	12.55	12.16	12.13	12.27
P_1 shaped energy/ μ J	7.39	6.98	7.33	7.08	7.18	7.19
P_2 origin energy/ μ J	7.04	6.63	6.45	6.31	6.70	6.63
P_2 shaped energy	1.99	1.86	1.89	2.05	1.93	1.944
Max energy/ μ J	Energy was measured after pulse was splitted					

根据表中的脉冲能量数据, 通过公式可以计算出电光开关中 KDP 晶体的透过效率和开关效率。

$$\eta_{\text{KDP}} = \frac{P_{2\text{前}}}{P_{1\text{后}}} = 92.2\%$$

$$\text{开关效率 } \eta = \frac{P_{2\text{后}} \times 2}{P_{1\text{前}}} = 31.7\%$$

4 结 论

实验结果表明: 基于 MARX 电路设计的高压脉冲在削波实验中取得了良好的效果, 使 KDP 晶体透过效率达到 92.2%, 开关效率达到 31.7%, 大幅度提高了紫外激光脉冲削波系统的效率。在后续的研究中可以通过两种措施提高驱动电脉冲的驱动效果: 一是改变电路中级联电容的容值, 改善波形平整度; 二是改善 MARX 电路中的分布参数, 降低寄生感抗和容抗, 提高驱动脉冲后沿的速度。目前, 该高压驱动电脉冲源已成功应用于多路激光打靶系统。

参考文献:

[1] Xiang Shiqing, Dong Jingxing, Mang Yanping, et al. Generation of 2-10 ns XeCl laser pulses by direct wave

- clipping with an electro-optical switching [J]. *Chinese J Lasers*, 1995, A22(9): 675–680. (in Chinese)
- 向世清, 董景星, 莽燕萍, 等. 电光开关削波产生 2~10 ns 准分子激光输出脉冲[J]. 中国激光, 1995, A22(9): 675–680.
- [2] Pronko S, Deniz A V. Subnanosecond switching, plasma electrode Pockels cell for high-contrast imaging with partially coherent light [J]. *A ppl Opt*, 1998, 37(9): 1659–1665.
- [3] Zhang Fangpei, Lou Qihong, Dong Jingxing, et al. Laser induced plasma shutter for wave clipping of 355 nm radiation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(6): 759–764. (in Chinese)
- 张芳沛, 楼祺洪, 董景星, 等. 355 nm 脉冲激光诱导等离子体开关削波[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 759–764.
- [4] Benzel D M, Pocha M D. 1000–V, 300–ps pulse-generation circuit using silicon avalanche devices [J]. *Rev Sci Instrum*, 1985, 56(7): 1456–1458.
- [5] Kalisz J, Poniecki A, Rozyc K. A simple, precise and low jitter delay/gate generator [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 74(7): 3507–3509.
- [7] Bishop A I, Barker P F. Subnanosecond pockels cell switching using avalanche transistors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(4): 044701.
- [8] Feng Zongming, Gao Ping, Xie Min, et al. Driving system of electro-optical switch with plasma electrodes [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(9): 1171–1174. (in Chinese)
- 冯宗明, 高平, 谢敏, 等. 离子体电极电光开关驱动电源系统[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(9): 1171–1174.
- [9] Fan Min, Lu Jingping, Wu Guannv, et al. Investigation of pulse generator driving electro-optical switch with plasma electrodes[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(1): 112–116. (in Chinese)
- 范敏, 鲁敬平, 吴关女, 等. 驱动等离子体电极电光开关脉冲发生器研究[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(1): 112–116.