

文章编号: 2095-4980(2016)02-0318-05

并联双晶体高速削波快脉冲源的设计

左方明^{1,2}, 王超², 党钊², 朱纪军¹, 谢旭东², 陈骥², 唐菱², 汪凌芳²

(1.东南大学 生物科学与医学工程学院, 江苏 南京 210096; 2.中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 设计了一种并联双晶体高速快脉冲源, 用于激光物理实验中预脉冲的高速削波。该削波脉冲源采用升压工作模式, 由光电转换模块、高压电源模块、开关器件及电路等部分组成。光电转换模块将光信号转变为开关通断信号, 用于控制高压脉冲输出; 集成的高压电源模块和开关器件简化了电路设计, 增加了该电源的可靠性; 设计合理的开关电路和元件参数, 保证稳定输出符合要求的高压脉冲波形。该快脉冲源的输出脉冲幅度大于4 000 V, 下降沿小于10 ns, 时间抖动小于1 ns, 已成功用于激光物理实验预脉冲的削波。

关键词: 高压快脉冲; 电光晶体; 光学削波; 时间抖动

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0318

Development of a fast parallel-double-crystal impulse source for clipping

ZUO Fangming^{1,2}, WANG Chao², DANG Zhao², ZHU Jijun¹, XIE Xudong²,
CHEN Ji², TANG Ling², WANG Lingfang²

(1.Department of Biomedical Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2.Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A fast impulse source with parallel-double-crystal for optical clipping is developed, which is used in laser physical experiment to chop pre-pulse. The impulse source works in a voltage-increased mode, and consists of photoelectric conversion module, high voltage supply module and switching circuit. Photoelectric conversion module transforms the optical signal to switching signal for control outputting high voltage pulse; integrated high voltage supply module and switching component simplify the circuit design, enhance the reliability; the reasonable circuit and parameter design ensure outputting satisfactory high voltage pulse steadily. The impulse source outputs negative high voltage pulse with amplitude > 4 000 V, falling edge < 10 ns and time jitter < 1 ns, which has been successfully applied to laser physical experiment to chop pre-pulse.

Key words: fast high-voltage pulse; electro-optical crystal; optical chopper; time jitter

激光物理实验中经常需要各种特殊波形的激光脉冲, 在一些激光物理实验中, 根据激光传输放大的需要, 在激光光路传输的前阶段需要采用双激光脉冲(预脉冲、主脉冲)进行激光脉冲功率的传输放大, 而在激光传输的后阶段, 需要将双激光脉冲进行预脉冲削波, 以保证激光光路仅输出主激光脉冲^[1]。利用电光开关产生的快前沿电脉冲进行预脉冲隔离消除是一种常用的光学削波方法^[2-3]。高速、高压电脉冲是电光开关必需的驱动脉冲源, 驱动脉冲的形状及稳定性决定了电光开关输出的形状和稳定性^[4]。陈静等利用功率MOS型场效应管的开关原理, 提出了功率MOS型场效应管的栅极“过”驱动技术, 研制出脉冲幅度大于4 000 V, 前沿小于10 ns的高压快脉冲驱动源^[5]。但该方法需要大电流驱动, 需高频响应的脉冲变压器和多管级联同时电压脉冲“过”驱动, 增加了外围电路的设计难度, 实现起来较为繁琐。缙永胜等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, 电脉冲幅度达到2 690 V^[6]。Thomas等研制了一种快上升沿的, 长脉宽的电光开关驱动源, 输出电平达到3 500 V, 脉冲上升沿为9 ns, 脉冲宽度可达12 μ s^[3]。本文阐述了一种用于驱动并联双晶体电光开关的快脉冲源的研制, 可双路输出高压负脉冲, 脉冲幅度大于4 000 V, 脉冲下降沿小于10 ns, 波形顶部不平度小于5%, 触发动抖动小于1 ns。

1 激光脉冲削波原理

本实验中的激光脉冲削波示意图如图1所示,预脉冲与主脉冲的脉宽分别为5 ns与3 ns,脉冲之间间隔为20 ns。在预脉冲与主脉冲之间向晶体施加高压脉冲,由此来控制电光开关,削除预脉冲。电光开关的结构如图2所示,KD*P晶体在外加电场的作用下,折射率会发生变化,通过晶体不同偏振方向的光之间产生相位差,从而使光的偏振状态发生变化,且相位改变大小与外加电场成正比^[7]。电光晶体上未施加高压时,脉冲光束经过偏振片1变为平行X轴的线偏振光。由于偏振片2的偏振方向与偏振片1存在一个相位差 ϕ ,偏振光无法通过偏振片2。而电光晶体上施加一个高压电场时,晶体主轴变为 X',Y',Z ,平行于X轴的线偏振光在晶体表面分解为等幅度的 X' 和 Y' 方向的偏振光,两者折射率分别为 $\eta_{x'}$ 和 $\eta_{y'}$ 。经过晶体后,线偏振光已与原偏振光存在相位差 ϕ ,且偏振方向与偏振片2相同,即可穿过偏振片2。相位差 ϕ 在晶体确定的情况下,由外加电压的大小决定^[8-9],如式1所示。

$$\phi = \frac{2\pi vd}{c}(\eta_{y'} - \eta_{x'}) = \frac{2\pi v \eta_0^3 \gamma}{c} E d = \frac{2\pi v \eta_0^3 \gamma}{c} U \quad (1)$$

式中: v 为激光频率; c 为光速; d 为晶体长度; E 为外加电场强度; η_0 为晶体寻常光的折射率; γ 为该晶体的电光系数; U 为晶体两端的外加电压。当 $\phi = \pi$ 时,从晶体出射的线偏振光的偏振面旋转 90° ,此时的外加电压称之为半波电压 U_π 。

$$U_\pi = \frac{\lambda}{2\eta_0^2 \gamma} \quad (2)$$

相位差 ϕ 的值与外加电压大小成正比,通过匹配外加电压与偏振片2的偏振方向(本实验中 $\phi = \pi/2$,偏振面偏转 90° ,匹配的半波电压约为4 000 V),即可求得所需的外加电压大小。

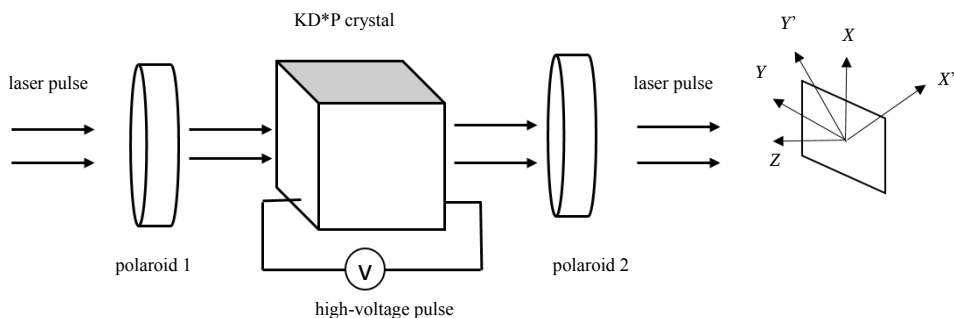


Fig.2 Sketch map of electro-optical switch
图2 电光开关结构示意图

2 电路原理设计

该激光削波脉冲源主要由光电转换模块、高压电源模块、开关器件及电路等部分组成,装置的电路原理设计图如图3所示。该电路采用升压工作模式,输出的脉冲波形为高压负脉冲波形,电光晶体在电路中等效于一个小电容^[10],电容值为20 pF左右。开关模块断开期间,储能电容充电完成,两端电压约为4 000 V;当光触发信号到达,开关模块导通,储能电容开始向晶体电容充电,晶体电容两端生成约4 000 V的高压负脉冲^[11]。

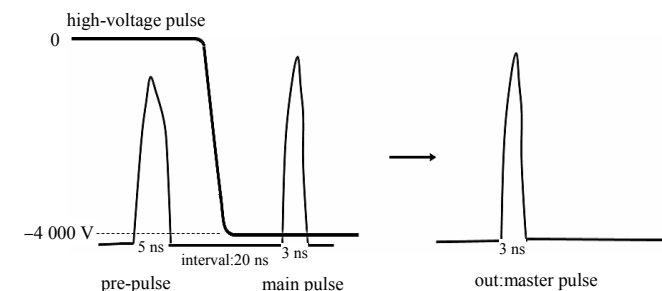


Fig.1 Chopper of laser pre-pulse
图1 激光预脉冲的削波

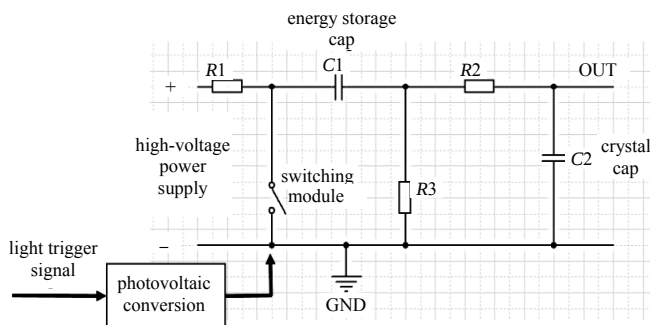


Fig.3 Design of parallel-double-crystal switching circuit for optical clipping
图3 并联双晶体削波开关电路原理设计

3 仿真设计

根据电路原理设计,对电路进行仿真设计,如图4所示。由于储能电容 $C1$ 远大于晶体电容 $C2, C3$,而且整个放电时间较短,因此放电过程中 $C1$ 的电压基本维持在4 000 V左右。 $C2, C3$ 的充电时间可由充电回路中的电阻 $R3$ 调节。根据设计要求,充电时间 $3R(C1+C2) < 10$ ns,即 $R < 200 \Omega$,综合考虑后, $R3$ 值为 130Ω ,晶体两端的电压 $U_{C2}(U_{C3})$ 可表达为: $U_{C2}=U_{C3}=-4\ 000(1-e^{-T/R(C2+C3)})$ 。 $R2$ 在电容 $C1$ 充电时作为对地的限流电阻,在开关电路停止工作时又作为晶体电容 $C2, C3$ 的泄放电阻,要求必须为高耐压,高功率^[9]。若不考虑电光晶体与开关器件连线上的分布电感和器件之间存在的分布电容,设计的电路与仿真结果如图4所示,图中 $U2$ 为晶体电容 $C2(C3)$ 两端电压(为方便电路图阅读,已省略电路中节点编号,下文同此)。为方便仿真,触发脉冲控制开关电路的通断用可设置开关时间的开关代替,导通时间为100 ns(10 ns至110 ns)。从仿真结果可以看出,开关闭合后输出端产生一个下降沿为9 ns的高压负脉冲,脉冲幅度大约为4 000 V,波形底部基本平滑,说明理想情况下该设计符合实验要求。

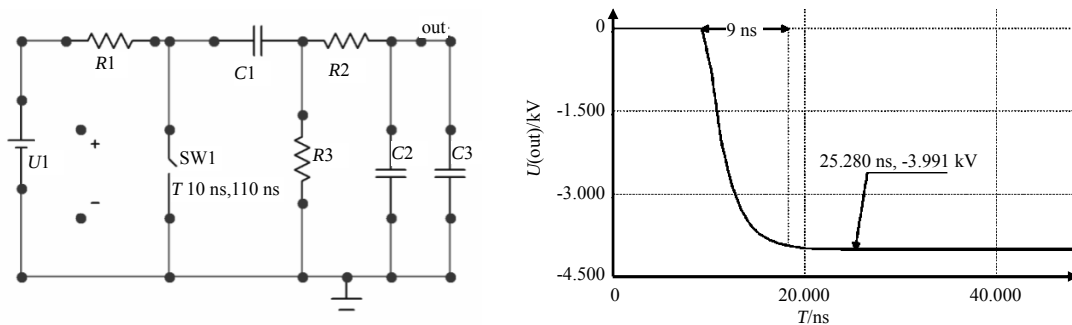


Fig.4 Circuit diagram and simulation without distributed parameters

图4 未考虑分布参数的电路设计仿真

对导线及元器件用LCR表测量 L, C, R 等参数,并根据电路板布线及经验估算,在仿真时设定高压端至电光晶体的电线电感 $L1$ 为150 nH,电光晶体至接地端的电线电感 $L2$ 为150 nH,另外电光晶体的两端对地、对电极各设置了导线电感,分别为 $L3, L4, L5, L6$,详见图5,脉冲图中 $U(10)-U(8)$ 即为晶体两端电压(晶体已封装,无法避开导线电感 $L3, L4, L5$ 和 $L6$ 进行测量)。考虑到各器件间的分布电容,添加了1 pF的电容 $C5$;电容 $C4$ 与高值电阻 $R5$ 为示波器探针的电容与电阻。从仿真结果可以看出,高压脉冲下降沿约为8 ns,由于分布电感与分布电容的存在,开关器件的放电瞬间会产生一定的过冲与振荡,过冲电压幅度约为4 300 V,波形顶部不平度满足 $<5\%$ 的要求。在实际电路板布线设计以及焊接过程中,导线电感和元器件参数与仿真参数的细微差别,以及电光晶体封装工艺导致不同晶体的等价电容、阻抗不同,对于电路仿真与真实波形的匹配都有影响。

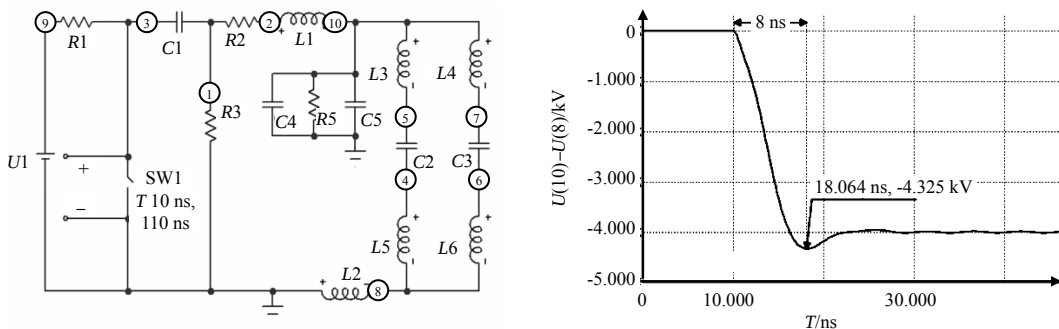


Fig.5 Circuit diagram and simulation with distributed parameters

图5 考虑分布参数的电路设计仿真

4 实验验证与改进

获得仿真结果后,进行实际电路的设计与电路板的制作,对电路板进行了调试,同时连接了2个不同参数的电光晶体,测试结果如图6所示。测试结果显示:下降沿均约为9 ns,负脉冲幅度约为4 000 V。由于导线电感与分布电容的存在,以及晶体封装时存在的空气间隙^[12],电压脉冲前沿附近存在一定的过冲与振荡,过冲电压

约为 4 300 V, 振荡幅度为 ± 200 V, 波形底部不平度较差。

采用 LCR 表测量双晶体的电容值, 发现由于并联双晶体封装工艺的局限, 2 个晶体的等效电容及品质因数 Q 并不相等, 因此 2 路高压脉冲会存在一定差异。双晶体充电使用的是同一 RC 回路, 这种方式在晶体差异较大的情况下会使 2 路脉冲偏离较大, 波形畸变严重, 实验中造成误差甚至导致实验失败。由于晶体已被封装, 晶体两端的真实电压脉冲波形无法测量, 通过仿真可以验证该结论。设置 2 个不同的晶体电容, 原电路晶体两端的仿真波形图如图 7 所示, $U(5)-U(4)$ 与 $U(7)-U(6)$ 分别是晶体电容 C_2, C_3 两端的电压, 可见不同的晶体电容导致波形振荡。因此, 对电路进行改进, 即 2 个晶体采用不同的充电回路。同样设置不同的晶体电容, 电路及仿真波形如图 8 所示, 可见晶体电容 C_3 异常导致过冲电压较大, 但是对 C_2 上的脉冲电压基本无影响。实验验证电路获得的快脉冲波形如图 9 所示。不同的 RC 充电电路使晶体间相互影响很小, 2 路脉冲电压波形基本保持正常状态, 电压过冲与振荡都有所改善。

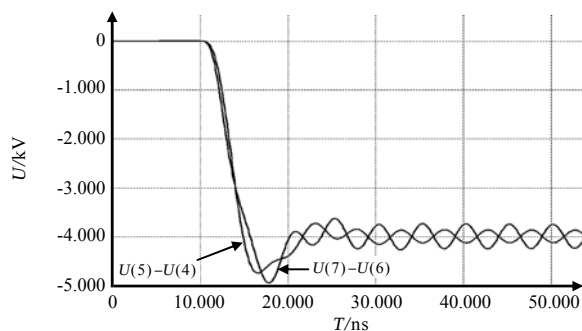


Fig.7 Simulated waveforms for high voltage pulse of crystal capacitor
图 7 晶体电容两端电压仿真波形图

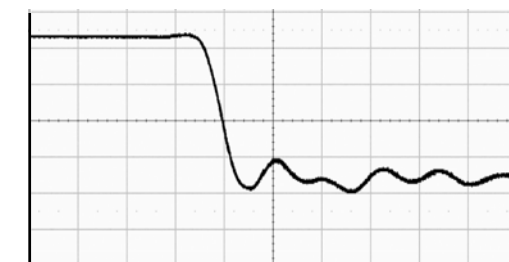


Fig.6 Negative high voltage pulse of parallel-double-crystal
图 6 并联双晶体上获得的高压负脉冲波形图

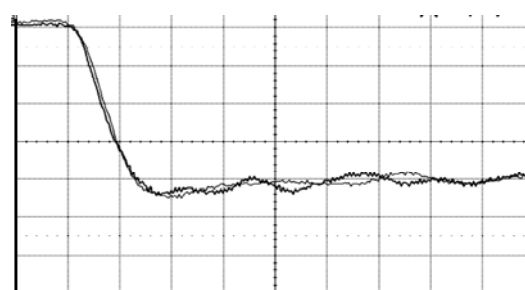


Fig.9 Negative high voltage pulse of parallel-double-crystal after amelioration
图 9 电路改进后在并联双晶体上获得的高压负脉冲波形

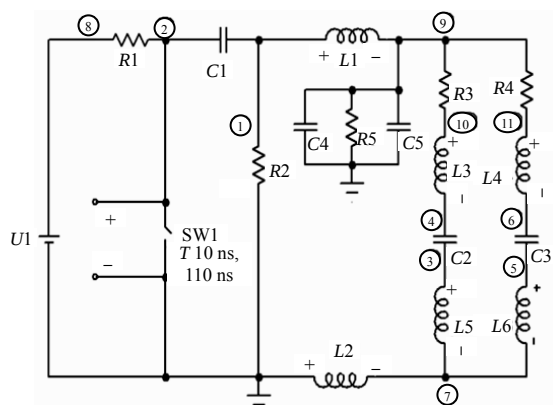


Fig.8 Circuit diagram and simulation results after amelioration
图 8 电路改进后的仿真设计

5 结论

本文描述了一种并联双晶体高压削波快脉冲源的设计研制, 将电路仿真设计与实验验证相结合, 针对电路分布电感与分布电容对高压快脉冲的影响进行了前期的分析与预测, 以便对电路的设计做出改进与分析, 获得了 2 路脉冲幅度大于 4 000 V、下降沿小于 10 ns 的高压快脉冲。另外, 对于实验中出现了的问题进行了分析并提出改进措施, 将双晶体的充电电路区分开来, 从而获得可靠性更高的高压快脉冲源。目前, 该设计已经成功地用于削波电光开关脉冲源的工程化研制, 使用情况良好。

参考文献:

- [1] 孙志红,夏彦文,董军,等. 等离子体削波纳秒激光脉冲波形测量[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(8):1846-1850. (SUN Zhihong,XIA Yanwen,DONG Jun,et al. Temporal measurement of nanosecond laser pulse based on wave clipping of plasma[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(8):1846-1850.)
- [2] 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. (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.)
- [3] UTTE T P,WILD N,VEITCH P J. Fast rise time,long pulse width,kilohertz repetition rate Q-switch driver[J]. Review of Scientific Instruments, 2007,78(7):073108-1-073108-2.
- [4] 时利勇,刘百玉,欧阳娴,等. 一种用于电光开关的高速、高压电脉冲的产生[J]. 光子学报, 2006,35(10):1501-1504. (SHI Liyong,LIU Baiyu,OUYANG Xian,et al. High-speed and high-voltage electrical pulse generation for electro-optical switch[J]. Acta Photonica Sinica, 2006,35(10):1501-1504.)
- [5] 陈静,陈敏德. 基于功率MOS型场效应管的4 kV纳秒脉冲源[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2008,6(3):230-232. (CHEN Jing,CHEN Minde. 4 kV nanosecond pulser using metallic oxide semiconductor field effect transistor[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2008,6(3):230-232.)
- [6] 侯永胜,王大辉,刘百玉,等. 用于紫外激光脉冲电光开关的驱动脉冲源[J]. 红外与激光工程, 2015,44(9):2661-2665. (GOU Yongsheng,WANG Dahui,LIU Baiyu,et al. Driving pulse source for ultraviolet laser pulse electro-optic switch[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015,44(9):2661-2665.)
- [7] 周炳琨,高以智,陈侔嵘,等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2013:220-227. (ZHOU Binkun,GAOYizhi,CHEN Tirong,et al. Laser Principle[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2013:220-227.)
- [8] 朱小磊,唐昊,李小莉,等. 高重复频率电光调Q全固态激光武器研究进展[J]. 中国激光, 2009,36(7):1654-1659. (ZHU Xiaolei,TANG Hao,LI Xiaoli,et al. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-switch[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009,36(7):1654-1659.)
- [9] 金光勇,范薇,王超,等. 固体激光高重复率电光Q开关研究[J]. 红外与激光工程, 2007,36(z):39-41. (JIN Guangyong, FAN Wei,WANG Chao,et al. Research on solid laser high-repetition-rate electro optical Q-switch[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007,36(z):39-41.)
- [10] 杨清,霍玉晶,何淑芳. 两级串联式电光开关高压快脉冲源的研制[J]. 激光与红外, 2013,43(1):79-84. (YANG Qing, HUO Yujing,HE Shufang. Development of a high-voltage fast pulsed source for two-stage cascaded electro-optic switch[J]. LASER & INFRARED, 2013,43(1):79-84.)
- [11] MELNIKOV K. Electro-optic Q-switch driver design specifics[C]// Proc. SPIE7822. Laser Optics, 2010.
- [12] 张雄军,吴登生,郑奎兴,等. 280 mm × 280 mm 口径单脉冲过程电光开关[J]. 光学学报, 2006,26(2):254-258. (ZHANG Xiongjun,WU Dengsheng,ZHENG Kuixing,et al. Electro-optical switch with 280 mm × 280 mm aperture driven by one-pulse process[J]. Acta Optica Sinica, 2006,26(2):254-258.)

作者简介:



左方明(1992-),男,浙江省衢州市人,在读硕士研究生,主要从事激光器件相关电子电路系统的研究.email:zjuzfm2010@163.com.

王超(1983-),男,西安市人,主要从事高速快电子电路方面的研究。

党钊(1970-),男,四川省射洪县人,研究员,主要从事高功率固体激光驱动器精密同步及控制技术研究。