

# 应用于光子调制的 Pockels Cell 前馈驱动源 驱动脉冲传输时延的研究

郎佳红<sup>1</sup>, 蒋顺利<sup>1</sup>, 冯德仁<sup>1</sup>, 徐波<sup>1</sup>, 王世祥<sup>1</sup>, 梁昊<sup>2</sup>, 陈伟<sup>2</sup>, 雍海林<sup>2</sup>

(1. 安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽马鞍山 243032; 2. 中国科学技术大学物理学院, 安徽合肥 230029)

**摘要:**研制了一种基于直流调制技术应用于光子调制的 Pockels Cell 前馈驱动源, 针对线路中分布参数对行波传播的散射作用, 建立了驱动脉冲信号在电路中传输的等值电路模型, 分析了分布参数散射作用对功率开关器件触发导通延时的影响. 分析得出因电路分布参数对开关驱动信号的散射, 造成驱动脉冲信号前沿变缓, 进而导致功率开关器件触发导通延时以及功率脉冲波前沿上升时间增加, 从而在一定程度上增加了脉冲传输的时延的结论. 通过改进驱动电路、优化电路布线、添加 LC 网络匹配电路等措施, 改善了驱动脉冲传输时延的问题. 实验结果表明, 经综合改进后电路的驱动脉冲传输时延下降至 100 ns, 相比未改进前 300 ns 左右时延改进效果显著.

**关键词:** Pockels Cell 前馈驱动源; 电光开关; 脉冲传输延时; 分布参数

**中图分类号:** TN709      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.04.004

**引用格式:** Lang Jiahong, Jang Shunli, Feng Deren, et al. Study on pulse transmission delay of Pockels Cell feedforward driving source applied to photon modulation[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(4):278-284.

郎佳红, 蒋顺利, 冯德仁, 等. 应用于光子调制的 Pockels Cell 前馈驱动源驱动脉冲传输时延的研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(4):278-284.

## Study on pulse transmission delay of Pockels Cell feedforward driving source applied to photon modulation

LANG Jiahong<sup>1</sup>, JANG Shunli<sup>1</sup>, FENG Deren<sup>1</sup>, XU Bo<sup>1</sup>, WANG Shixiang<sup>1</sup>,  
LIANG Hao<sup>2</sup>, CHEN Wei<sup>2</sup>, YONG Hailin<sup>2</sup>

(1. Institute of Electrical and Information, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;

2. School of Physical Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract:** A Pockels Cell feedforward driving source based on DC modulation was proposed, which was applied to photon modulation. Aiming at the scattering effect of distribution parameters on wave propagation in circuit, an equivalent model circuit was built to simulate the pulse wave transmission in circuit and the influence of the scattering effect of distributed parameters on the triggered flow of the power switching device was analyzed. It was found that the scattering effect of distributed parameters on the switching drive signal resulted in a slower front edge of the drive pulse, which prolonged the triggered flow

**收稿日期:** 2013-10-18; **修回日期:** 2013-12-27

**作者简介:** 郎佳红(通讯作者), 男, 1972年生, 副教授. 研究方向: 电磁脉冲技术. E-mail: jhlang@ahut.edu.cn

delay of the power switching device and increased the rising edge of the power pulse, thus increasing the delay time of pulse transmission. Some methods, including driving circuit improvement, circuit wiring optimization, and augment of an LC network matching circuit, were adopted to improve drive pulse transmission time delay. Experiment results indicate the pulse transmission delay of the improved circuit dropped remarkably from 300 ns to 100 ns in comparison with the original circuit.

**Key words:** Pockels Cell feedforward drivers; electro-optic switch; driving pulse transmission delay; distributed parameter

## 0 引言

Pockels Cell 是利用高压快脉冲源作用于电光晶体上,形成脉冲电场对光波不同方向的相位及延迟进行控制,改变光波的偏振方向,使光波得到控制从而使电光晶体起到类似“光开关”作用的器件,广泛应用于高速变化的激光中,如在调 Q 激光器中做调 Q 开关、电光隔离器、电光调制器等。由于电光晶体“开关”控制电场的形成较快(纳秒级),因此驱动源的前沿需达到纳秒级<sup>[1]</sup>,而且最初的触发脉冲与调制电路最终输出的高压脉冲电压之间的延迟时间应在 200 ns 以内。关于高压脉冲源技术,大多数研究都采用推挽式的脉冲输出方式,电路复杂、功率开关管功耗较大;直流调制式的脉冲发生电路不但电路原理简单而且适合任意宽度的脉冲,采用导通内阻在欧姆量级和导通时间在数 ns 的高金属氧化物半导体场效应管作为开关器件,满足 100 ns 左右的脉冲前沿。国内外的很多研究学者大多采用一些开通时间更短的真空器件,如用氢闸流管来实现 ns 级的快上升沿脉冲源;文献[2]提出了一种采用雪崩三极管组成的 Marx 电路输出的单极性脉冲;文献[3]提出了一种采用两级串联式的电光开关高压脉冲源;文献[4]提出了一种利用频率叠加方式的 Marx 电路产生高压脉冲源。信号传输延迟较小的快脉冲源在激光技术、核物理、高速摄影和探地雷达中有较广泛的应用,因此对于脉冲信号延迟的原因及其改善技术的研究具有非常重要的意义。

Pockels Cell 前馈驱动脉冲源由触发输入脉冲信号对直流调制产生并由前馈驱动源输出,因此驱动源脉冲时延主要由调制开关驱动电路传输时延、调制开关触发时延以及调制开关导通时延三部分组成,前馈驱动源的延时模型如图 1 所示。调制开关驱动电路传输时延主要包括器件传输时延与电路传输时延,前者是由于驱动电路的器件传输速率导致传输至前馈驱动源的同源信号整体延迟(普通光电隔

离驱动芯片 TLP250 的传输延迟时间为 150~500 ns),该时延受器件结构的影响,用户一般难以克服和改善;后者则是因电路结构中的分布参数对信号的散射作用造成脉冲信号上升前沿变缓,从而间接导致开关触发导通延时增加;调制开关触发时延、开关管导通时延与调制开关驱动电路传输时延都与调制开关自身特性相关(IRF830 的开通延迟时间  $t_{d(on)}$  约 10 ns,而上升沿  $t_r$  约 16 ns),不仅导致脉冲信号整体延迟,还拉长了脉冲的前沿和后沿,使最终输出的高脉冲与最初信号源提供的触发信号之间存在数百 ns 的时延。

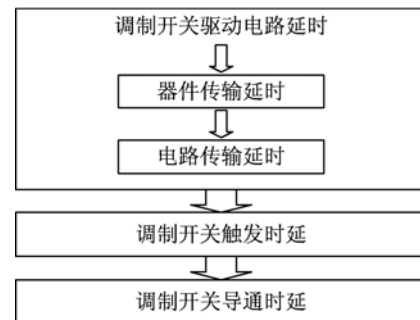


图 1 前馈驱动源时延组成模型

Fig. 1 Feedforward driving source delay model

本文基于脉冲传播的等值电路模型以及功率开关管驱动回路模型,分析了直流调制式 Pockels Cell 前馈驱动源电路分布参数对驱动脉冲传输时延的影响;针对 Pockels Cell 前馈驱动电源开关驱动电压脉冲传输时间延迟的影响因素,通过采用电流源式的驱动电路(current source driver, CSD)、优化 PCB 板布线和添加 LC 选频网络等措施,缩小了信号传输时延,为实现高重复频率、快上升沿、小信号传输延迟的高压快脉冲源的研制提供了借鉴。

## 1 时延对 Pockels Cell 前馈驱动电源的影响

Pockels Cell 前馈驱动电源用于产生高压开关

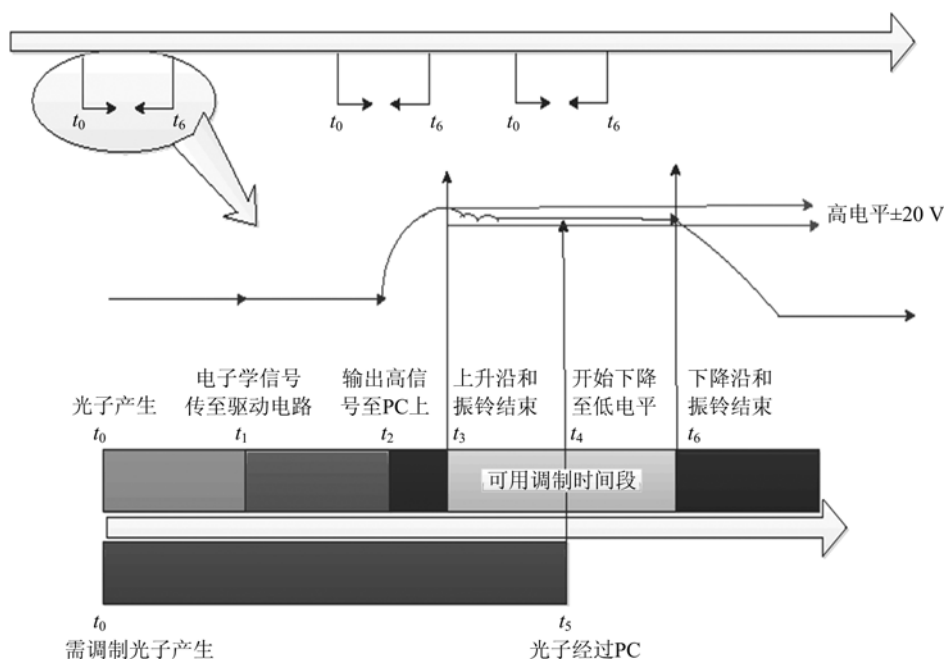


图 2 实验测试原理图

Fig. 2 Experiment testing schematic

脉冲,加在 Pockels Cell 气体放电腔的电极上,驱动 Pockels Cell 工作. Pockels Cell 前馈驱动电源的信号源的脉冲幅值一般在 3 V 以下,以输入触发信号的同源信号作为时间零点,经过一段同轴电缆显示到示波器上,从示波器上观察最终得到调制信号与输入触发信号,两个信号之间的延迟时间可以比较.该延迟时间是 Pockels Cell 前馈驱动源和 Pockels Cell 光学部分以及同轴电缆传输的总时延,其中 Pockels Cell 光学部分的时延约 13 ns(之前测距实验中测得值),该段时延较小,同轴电缆传输的时延为  $t=L/u$ ,式中  $L$  为同轴电缆长度, $u$  为信号传输速度,由于同轴电缆长度较小(一般为数米),所以该段延时也较小,剩下的数百 ns 则主要来自于驱动源本身. Pockels Cell 前馈驱动源产生高压脉冲信号来直接驱动 Pockels Cell,改变光子的极化方向,通过光探头后转换为电信号,再直接通过示波器来观察最终的调制结果,具体原理如图 2 所示.

由图 2 可知,高压脉冲信号的传输时延从触发脉冲产生时刻开始,到传输至 Pockels Cell 电极上为止.包括前馈驱动源驱动电路传输时延、调制开关触发时延以及功率开关管导通时延等.驱动源部分时延越长,则光学部分可用调制时间段就会越短,因此,为了给系统的调制留下充足的时间裕量,缩短驱动电路的时延以及驱动脉冲的上升沿具有重要的意义.

## 2 Pockels Cell 前馈驱动源原理及脉冲传输等值电路分析

直流调制式 Pockels Cell 前馈驱动源由电容器储能的脉冲产生电路向负载放电产生,产生电路原理如图 3 所示.这种脉冲转换电路原理简单,且适合于任意宽度的脉冲<sup>[5]</sup>.

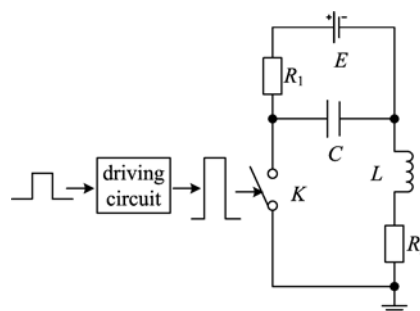


图 3 Pockels Cell 前馈源原理图

Fig. 3 Pockels Cell feedforward power schematic

图 3 中, $C$  为储能电容, $L$  为电路的分布电感, $R_L$  为电路的电阻,包括分布电阻、负载电阻等, $R_1$  为充电电阻, $K$  为开关(本文中采用 MOSFET 为具体开关器件进行分析), $E$  为充电电源,初始充电电压为  $V_0$ ,忽略电路的分布电感  $L$  易知当电容  $C$  充电电压为  $V_0$  时开关合上后,负载  $R_L$  上电流方程为

$$i = \frac{V_0}{R_L} e^{-\frac{t}{R_L C}} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,负载  $R_L$  上的电流是一个随时间常数呈指数衰减的函数,假设在很短的时间内,将函数截断,则可以得到一个近似矩形波形的放电波形,其波形顶降  $\delta$  可以用

$$\delta = \frac{i(0) - i(\tau)}{i(0)} = 1 - e^{-\frac{\tau}{R_L C}} \approx \frac{\tau}{R_L C} \quad (2)$$

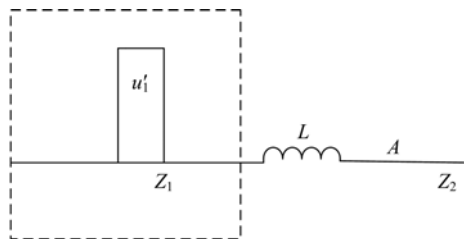
表示.式中,  $\tau$  为放电时间.可见,通过合理选择  $R_L$  与  $C$ ,在误差范围内,所获得的脉冲与方脉冲相当接近<sup>[6]</sup>.

快上升沿的电压脉冲在电路中以行波的形式传播,线路之间某些集中参数元件( $R, L$  或  $C$  等)会破坏电路的均匀性,当行波投送到这些节点时,必然会引起电压、电流和能量的重新调整分配,即行波的折射和反射问题,而电路中最常见的分布参数就是分布电感和分布电容.下面从波沿含分布参数的线路中传播的角度,讨论行波在均匀性遭到破坏的节点上的传播问题.

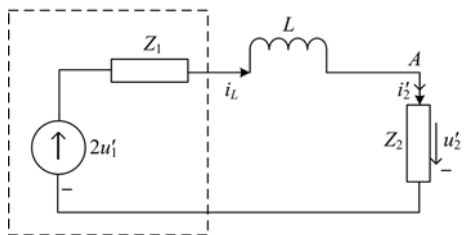
图 4(a) 为行波穿过电感示意图,依据彼德逊法<sup>[7]</sup> 则该过程可以等效成如图 4(b) 所示的电路.由该图可以看出,  $i_L = i'_2$ , 因而可以写出回路方程:

$$2u'_1 = i'_2(Z_1 + Z_2) + L \frac{di'_2}{dt} \quad (3)$$

式中,  $Z_1, Z_2$  分别为  $L$  前后线路的波阻抗.解上式可得行波穿过电感  $L$  时 A 点的电流与电压分别为



(a) 行波穿过电感示意图



(b) 行波穿过电感等效电路图



(c) 矩形穿过电感后的折射波

图 4 脉冲电压传输的等值电路

Fig. 4 The transmission equivalent circuit of pulse

$$i'_2 = \frac{2u'_1}{Z_1 + Z_2}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_L}}) = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} i'_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_L}}) \quad (4)$$

$$u'_2 = i'_2 Z_2 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u'_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_L}}) = \alpha u'_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_L}}) \quad (5)$$

式(4), (5)中,  $\tau_L = L/(Z_1 + Z_2)$  是回路的时间常数,  $\alpha = 2Z_2/(Z_1 + Z_2)$  是没有电感时的电压折射系数.

由式(5)可见,电压折射波  $u'_2$  的幅值为  $\alpha u'_1$ , 与没有串联电感时相同;电压折射波的波前陡度为

$$a = \frac{du'_2}{dt} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u'_1 \frac{1}{\tau_L} e^{-\frac{t}{\tau_L}} = \frac{2Z_2 u'_1}{L} e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (6)$$

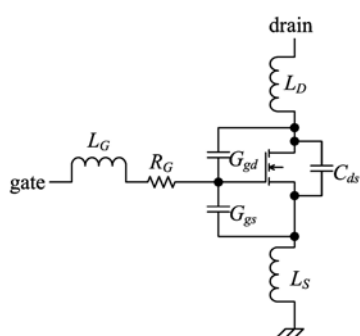
由此可见,直角波穿过电感后,其波前将被扯平,变成指数波前如图 4(c) 所示.这样无疑相当于增加了脉冲波电流上升的时间,从而在一定程度上增加了脉冲传输的时延.同理当直角波旁过电容时,其波前也将变成指数波前.

综上所述,因线路间某些集中参数元件( $R, L, C$  等)破坏电路的均匀性,使行波投送到这些节点时被散射,波前均被拉平,直接增加了输出功率脉冲波前沿上升的时间,从而在一定程度上增加了脉冲传输的时延.对于形如图 3 所示的直流调制式 Pockels Cell 前馈驱动源脉冲产生电路,由于驱动脉冲波前沿上升的时间增加,使功率开关器件也出现开启时延.

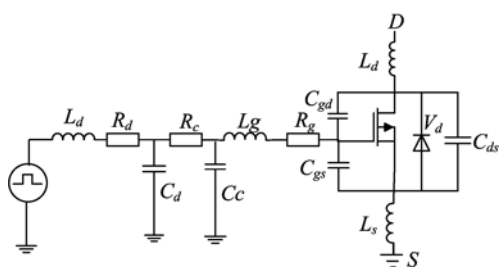
### 3 功率 MOSFET 电路模型及其开关过程分析

MOSFET 是三端电压控制型功率开关器件,由栅、源极间的正电压控制漏极电流导通.由于管脚引线的存在,实际电路中的 MOSFET 都存在寄生参数, MOSFET 的每一极都存在一个寄生电感,图 5(a) 是考虑分布参数的功率 MOSFET 模型,由图可知,驱动回路可看作一个 RLC 电路.

MOSFET 管的直流输入阻抗高,当一个理想的阶跃电压驱动源(上升时间为 0,内阻为 0)作用于 MOSFET 的 G 极和 S 极时,驱动源就会通过  $C_{ds}$ ,  $L_d$  和  $L_s$  对  $C_{gs}$  充电,同时 D 极电压剧烈变化,因此驱动源还要对  $C_{gd}$  充电,这样就会产生米勒效应(Miller effect), MOSFET 功率管导通的过程可以等效为对该电容进行充电的过程,当栅极电容电压超过阈值电压  $V_{Th}$  时 MOSFET 管就开始导通,因此米勒效应即栅极电容是引起 MOSFET 导通延迟的主要原因,这在高压应用场合表现得更为明显.由于



(a) MOSFET model consider distribute parameters



(b) Driving model of MOSFET

图 5 MOSFET 模型分析

Fig. 5 MOSFET model

存在这种充电过程,使得栅源上的电压有一个上升时间;此外,MOSFET 导通过程中,漏极电流剧烈上升,这个电流流过  $L_s$ ,其上产生一个感应电压反过来作用于驱动回路,会降低栅源上的驱动电压,进一步延长 MOSFET 的导通时间.这在上一节讨论行波在电路中旁过电容时的情形类似.同时,由于电路分布参数的散射作用,导致脉冲功率器件的脉冲前沿变缓,会相应增加脉冲信号的上升时间,具体如图 6 所示.若不考虑散射作用,当脉冲电压上升至  $t_1$  时便达到功率开关器件的门极开启电压,但由于电路分布参数散射作用的存在,驱动脉冲的前沿变缓,直到  $t_2$  点才达到开关管的开启电压,两者之间存在一段延迟时间  $t_d$ ,这也在一定程度上增加了系统的时延.

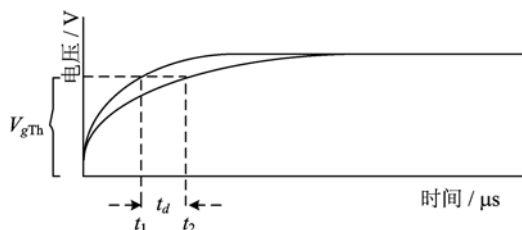


图 6 电路散射导致的功率开关器件门极导通时延

Fig. 6 Gate breakover delay because of circuit scattering

## 4 脉冲传输延时的改善方法

针对 Pockels Cell 前馈源驱动电路脉冲输出产

生时延的原因,主要可以从以下几个方面采取措施,从而有效减小延时,提高系统性能.主要改进措施及效果如表 1 所示.

表 1 改进措施及效果一览表

Tab. 1 Improved methods and results

比较项	延时因素		
	开关开启延时	器件传输延时	杂散参数散射
改进措施	增加驱动能力	采用电流源式驱动	电路匹配
改进效果	大幅度减小	大幅度减小	小幅度减小

### 4.1 CSD 驱动电路及 PCB 板布线优化

由图 5(b)可知,栅极驱动脉冲的上升与下降的瞬态过程实际上可以近似为一个 RLC 的充放电过程.因此,MOSFET 的快速开启,需要有较大的栅极电流,所以整个驱动电路的基本设计包括:较大的输出电流、较低分布参数以及较强的抗干扰能力等.

由第 3 节的分析可知,MOSFET 在充电过程中,栅源两端电压  $U_{gs}$  以及栅极充电电流  $i_g$  的变化图如图 7(a) 所示,在  $t_0$  时刻,栅极电流  $i_g$  达到峰值,随后快速下降,因米勒效应的存在,在  $t_1 \sim t_2$  时间内  $U_{gs}$  不变,  $i_g$  可近似认为常数;这段时间导致 MOSFET 的米勒效应明显,随着  $i_g$  的减小,驱动能力减弱<sup>[8]</sup>,导致开关时间长,开关损耗大.为了减小米勒电容效应,采用一种电流源驱动电路<sup>[9]</sup>,在 MOSFET 开启和关断时,产生一个近似恒流的电源给其供电,从而达到缩减开关时间、减小损耗的目的.图 7(b)为电流源与电压源的比较图,图中显示,电流源形式的驱动电路在门极开启的整个过程中,其门极平均电流都是近似不变的,这样可以有效地减小开关管开启的时间.

图 8(a)是 CSD 的基本原理图,电路由  $VS_1$ ,  $VS_2$ ,  $C_1$ ,  $L_1$  以及供电电源  $U_c$  组成,通过控制  $VS_1$ ,  $VS_2$  的开关时序,得到一个近似恒流的电源,从而控制 MOSFET 的快速开通和关断,控制方式如图 8(b)所示.为减小分布电感,采用大面积铺地的方法,在 PCB 板的底层形成完整的地平面,这样可以保证高速信号的返回路线在其输入路线的正下方,从而整个回路面积最小,电感也就最小.

### 4.2 直接驱动型高速驱动电路

直接驱动型的高速驱动电路可以有效地减少由于功率开关芯片开通时产生的系统延迟.本文中功率开关芯片选用 IRF830,其  $t_r$  典型值仅 16 ns,大大缩减了因器件问题造成的开通延迟.而光电隔离芯片由于其经过电-光-电的转换,增加了传输时间,应

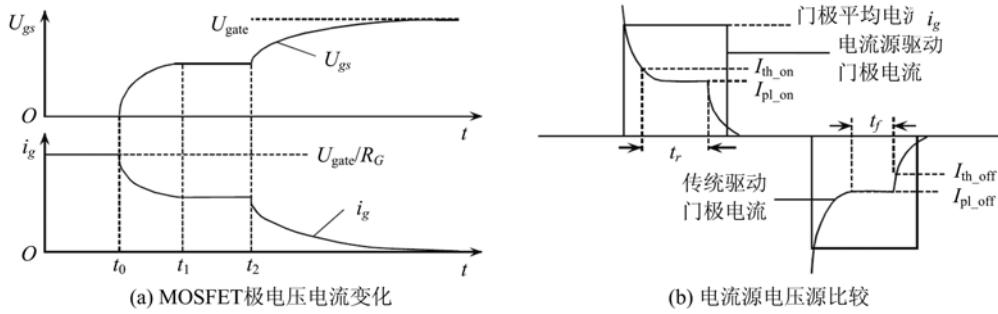


图 7 MOSFET 栅极充电 电压、电流和电流源与电压源的比较

Fig. 7 Charge voltage and current of MOSFET grid and the comparison of voltage source and current source

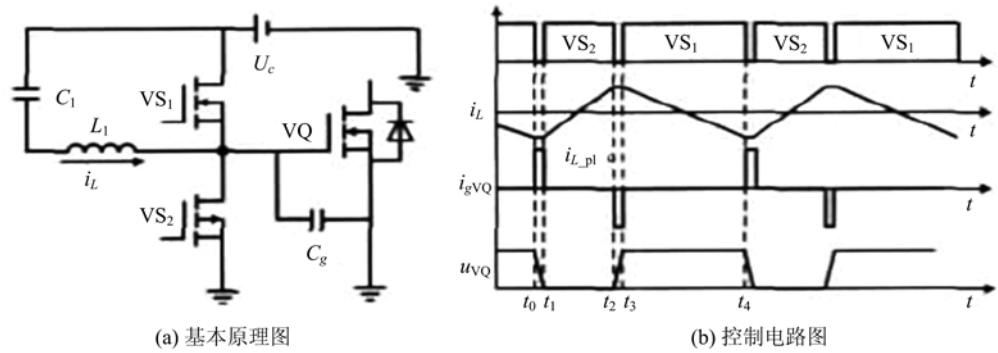


图 8 CSD 原理图与驱动电路相关控制波形

Fig. 8 The schematic of CSD and control waveform of driver

避免使用. 同源脉冲信号经隔离芯片驱动后与直接驱动的信号之间的区别, 如图 9 所示. 其中 CH<sub>1</sub> 为直接输出的触发信号, CH<sub>2</sub> 为经过驱动芯片 TLP250 后的驱动信号 (TLP250 供电电压 15 V), 从图 9 可以看出, 信号经过 TLP250 后, 不但与原触发信号之间存在 200 ns 的延迟时间, 脉冲的上升沿也由之前的 20 ns 左右上升至 200 ns, 缓慢的上升前沿也在一定程度上增加了驱动传输时延.

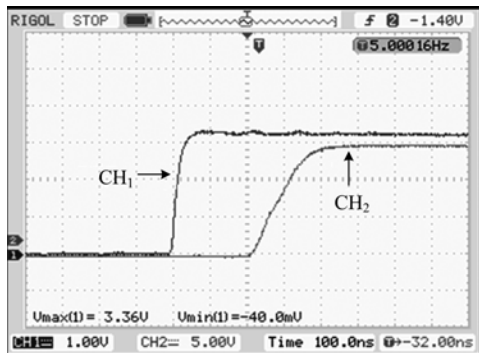


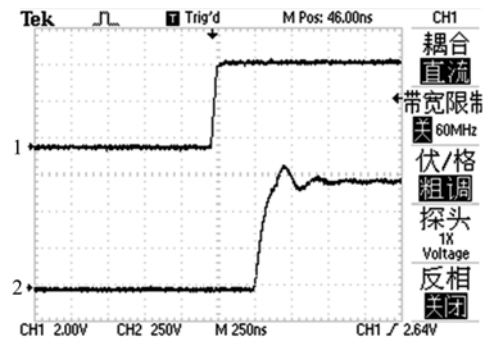
图 9 直接驱动信号与经过光电隔离后信号对比

Fig. 9 Direct drive signals contrast with isolated signals

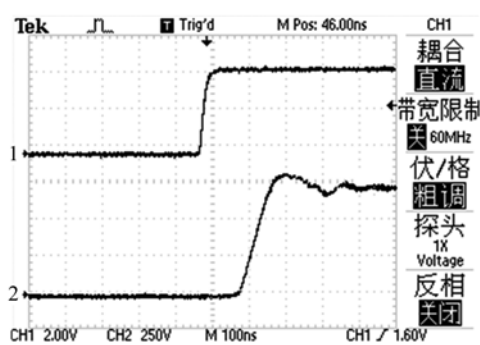
### 4.3 LC 网络匹配电路

同轴电缆作为一种传输损耗最低的传输线路,

广泛用于传输各种高频信号. 在 PCB 板上大面积采用同轴传输方式显然不现实, 但在线路中人为加入 LC 网络匹配电路, 模拟同轴电缆的传输模型, 可以取得最优的信号传输结果, 降低线路中因介质损耗和阻抗不匹配等原因造成波的散射与反射而导致信号的畸变和衰减, 增加有效幅值, 从而相对减小脉冲上升延时. 图 10(a), (b) 是采用电流源放大电路后并加入了 LC 网络匹配电路的脉冲信号与加入前的信号对比图. 其中 CH<sub>1</sub> 为最初的触发信号, CH<sub>2</sub> 为高压源输出的脉冲图. 由图可以看出, 改进前两个脉冲之间有近 300 ns 的延迟, 改进后, 触发脉冲与最终输出的脉冲之间的间隔仅 100 ns 左右.



(a) 改进前触发波形与最终驱动波形



(b) 改进后触发波形与整体驱动波形

图 10 改进前后比较

Fig. 10 Comparison of driving pulse

## 5 结论

触发脉冲信号的功率驱动电路及功率 MOSFET 的导通延时是造成脉冲传输时延的主要原因. 通过改进驱动电路、优化电路布线、加入 LC 网络匹配电路等措施, 改善了驱动脉冲传输时延的问题. 采用电流源式的驱动电路, 在整个 MOSFET 导通期间, 以近似恒定的电流对栅极电容进行充电, 有效降低了功率 MOSFET 的开通时间和整个系统的时延. 目前国内外大多数采用双极性互补对称式方法电路<sup>[10]</sup>, 这是一种类似电压源的驱动电路, 其驱动电流类似于图 7(b) 中的  $i_g$ , 不能有效应对 MOSFET 的米勒效应. 在驱动电路的 PCB 板布线时, 采用大面积铺地的方法, 保证 PCB 板的底层形成完整的地平面, 确保高速信号的返回路线在其输入路线的正下方, 从而整个回路的面积最小, 回路电感也最小. 这样可以有效地减小由于脉冲驱动电路部分造成的系统时延. 在电路中加入 LC 网络匹配电路, 最大限度地减小了波形的畸变和衰减, 实现了信号的最优与最小延时传输.

### 参考文献 (References)

[1] Lu Jingping, Zheng Kuixing, Zhang Xiongjun, et al. Study on large aperture plasma-electrode pockels cell electro-optical switch[J]. High Power Laser&Particle Beams, 2000, 12(S1): 137-140.  
鲁敬平, 郑奎兴, 张雄军, 等. 大口径等离子体电极普克尔盒电光开关研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(S1): 137-140.

[2] Yuan Xuelin, Ding Zhenjie, Yu Jianguo, et al. Research on high-stability pulse based on avalanche transistor Marx circuit[J]. High Power Laser and

Particle Beams, 2010, 22(4): 757-760.

袁雪林, 丁臻捷, 俞建国, 等. 基于雪崩管 Marx 电路的高稳定度脉冲技术[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 757-760.

[3] Yang Qing, Huo Yujing, He Shufang. Development of a high-voltage fast pulsed source for two-stage cascaded electro-optic switch [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 43(1): 79-84.

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.

[4] Zhang Wei, Liu Baiyu, Ruan Chi, et al. High-repetition frequency high-voltage narrow pulse source achieved by frequency superposition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1 257-1 262.

张伟, 刘百玉, 阮驰, 等. 利用频率叠加的方法实现高重复高压窄脉冲源[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1 257-1 262.

[5] Xu Yucun, Wang Xiangqi, Feng Deren, et al. Fast solid modulator technique based on MOSFET with  $6 \times 10$  cells[J]. High Power Laser&Particle Beams, 2008, 20(6): 1 043-1 047.

徐玉存, 王相綦, 冯德仁, 等. 基于 MOSFET 的  $6 \times 10$  单元快速固态调制器[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(6): 1 043-1 047.

[6] Wang Xiangqi, Feng Deren, He Ning, et al. Test principle research for solid-state modulator technique with sub-micro second based on MOSFETS [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(1): 99-103.

王相綦, 冯德仁, 何宁, 等. 基于 MOSFET 亚微秒固态调制器技术的试验研究[J]. 中国科技大学学报, 2007, 3(1)7: 99-103.

[7] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[8] Cheng Zongxiang, Shu Lin, Liu Yanfei, et al. Analysis of MOSFET loss model based on current source driver [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 50-53.

陈宗祥, 束林, 刘雁飞, 等. 基于电流源驱动的 MOSFET 管损耗模型及其分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 50-53.

[9] Fu Jizhen, Zhang Zhiliang, Liu Yanfei. A new high efficiency current source driver with Bipolar gate voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 985-997.

[10] Merensky L M, Kardo-Sysoev A F, Flerov A N, et al. A low-jitter 1.8kV 100-ps rise-time 50-kHz repetition-rate pulsed-power generator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(09): 1 855-1 862.