

双波长激光驱动接收专用集成电路设计

纪亚飞, 赵柏秦, 罗达新

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 双色激光引信在克服云烟干扰方面具有重要价值。为了减小引信体积, 保障导弹内部空间的充裕性, 设计了一种基于 BCD 工艺的双色激光引信专用集成电路芯片。首先, 对现有双色激光引信的结构和工作原理做出了详细介绍, 引出了单芯片设计的思路和方法, 并给出了该芯片集成的子电路的设计方法和仿真结果。该芯片使用 $0.25\ \mu\text{m}$ 的 BCD 工艺制造。经测试使用该芯片驱动双色激光器, 芯片供电电压 $5\ \text{V}$, 激光器支路供电电压 $27\ \text{V}$ 时, 红外激光器输出峰值功率可达 $30\ \text{W}$, 紫光激光器输出峰值功率达 $25\ \text{W}$, 脉宽 $50\sim 500\ \text{ns}$ 可调, 重复频率 $1\sim 100\ \text{kHz}$ 可调, 窗口时间 $1\sim 10\ \mu\text{s}$ 可调, 红外和紫光回波信号在接收部分实现了分离, 在功能上成功取代了原系统的 4 块芯片, 实现了系统的简化。

关键词: 双波长; 激光引信; ASIC; BCD

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0705004

Design of an ASIC for the driving and receiving part of dual-wavelength laser fuze

Ji Yafei, Zhao Baiqin, Luo Daxin

(Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Dual-wavelength laser fuze has significant value in the anti-interference of fog and aerosols. In order to decrease the size of the fuze, guarantee the adequacy of the inner space of the missile and optimize the performance of all the system, an ASIC chip for the dual-wavelength laser fuze based on BCD technology was proposed. First, the structure and working principles of the dual-wavelength laser fuze were presented in detail. Then, the design strategy of the chip was deduced and the simulation result of the sub-circuits of the chip was proposed afterwards. The chip is fabricated with a $0.25\ \mu\text{m}$ BCD process. Used in driving the dual-wavelength lasers, when the supply voltage of the chip is $5\ \text{V}$ and the supply voltage of the branch of the circuits with lasers is $27\ \text{V}$, the peak power of infrared laser reaches above $30\ \text{W}$, and the peak power of violet laser reaches above $25\ \text{W}$. The pulse width is adjustable in a range of $50\sim 500\ \text{ns}$. The repetition frequency is adjustable in a range of $1\sim 100\ \text{kHz}$. The time window is adjustable at a range of $1\sim 100\ \mu\text{s}$. The echo signals are separated at the receiving end. Replacing the role of the 4 chips, the dual-wavelength laser fuze ASIC can simplify the structure of the system and optimizes the function of the fuze.

Key words: dual-wavelength; laser fuze; ASIC; BCD

收稿日期: 2015-11-20; 修订日期: 2015-12-11

作者简介: 纪亚飞(1988-), 男, 博士生, 主要从事激光器驱动电路及激光器封装方面的研究。Email: jyfzrzh11988@sina.com

导师简介: 赵柏秦(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事新型光电子器件及传感器件方面的研究。Email: bqzhao@semi.ac.cn

0 引言

现有激光近炸引信有其局限性。由于在硝烟弥漫的战场上激光受到烟雾和尘埃微粒的散射,使激光近炸引信对烟雾、尘埃微粒与被攻击的实体目标不易分辨,因此容易引起误炸。因此迫切需要研制新型的激光近炸引信,提高激光近炸引信的抗干扰能力。

为了克服目前单一波长近红外激光近炸引信中的问题,文中^[1]提出研制采用紫光(410 nm)、近红外(860 nm)双波长激光复合引信。

其理论依据是:目标表面对激光信号的散射特性与波长基本无关,而云雾、烟雾以及尘埃微粒等引起的散射信号特性在紫光和近红外波长有很大差异,散射强度与波长有关。因此,利用烟雾、云雾对两种波长激光散射特性的差异性,可以将烟雾、云雾等干扰物与目标区别开来,提高激光近炸引信的抗干扰性能。

对于双色激光引信,其驱动接收部分的设计在双色激光引信整体架构设计中占有重要地位。如果采用多种芯片于 PCB 板上搭建实现该系统,由于导弹内部需要安装 4~6 组激光引信,如果安装的激光引信均为双色激光引信,则需要安装 8~12 组激光器管组。采用此种方案,内部空间严重不足。因此,只有采用微型化的芯片来实现该电路才能保证其在安放于导弹内的空间的充裕性。同时,除了上述提及的体积小的优势外,采用集成化芯片来实现该系统的方式还会带来如下优点:系统的

分布式电感、电容效应会相对减弱;对激光器的驱动能力会更强;抗震动,抗冲击,可靠性高,提升导弹在飞行过程中的稳定性;芯片使用会更方便,应用更广泛,未来的发展应用可不限于此系统。

由上述讨论可知,为了满足导弹内部空间的要求,需要将双色激光引信的驱动电路和接收电路中的预处理部分进行集成。

1 双色激光引信工作原理及其集成化设计

1.1 双色激光引信工作原理及其分时工作模式简介

紫光/近红外双波长激光复合近炸引信探测系统的工作原理^[1]如图 1 所示。

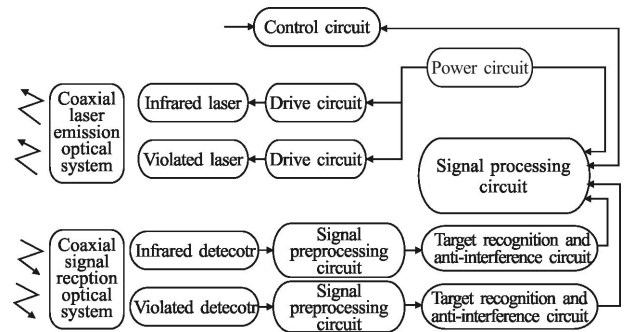


图 1 双色激光引信工作原理

Fig.1 Working principle of dual-wavelength laser fuze

在此工作原理下,原有的双色激光引信驱动接收多芯片系统设计如图 2 所示。该设计采用分时工

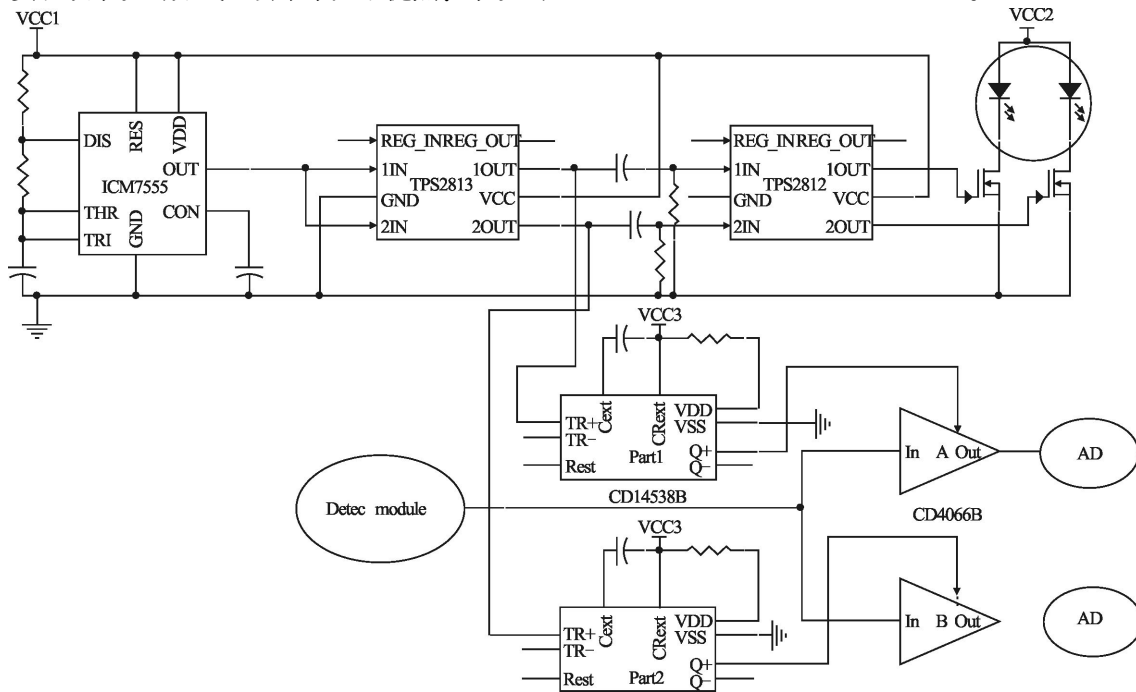


图 2 多芯片系统

Fig.2 Multi-chip system

作模式。驱动端由 7555 产生统一的时钟信号,经过 TPS2813 后产生频率相同,相差半个周期的双路时钟信号。这两路信号经由微分电路和 TPS2812 整形后可以驱动激光器供电回路上的 MOSFET 使激光器工作。接收端探测器信号经由两路窗口时间(由 CD14538B 产生)可控的传输门(CD4066B)可以分离成红外和紫光信号。由此产生的红外和紫光电信号可以被 AD 采样,然后送入 FPGA 进行进一步处理。

1.2 驱动接收芯片的系统架构

在此设计中,采用了 4 种不同功能的芯片。为了集成该系统,必须在其对应的单芯片设计中用同样功能的结构替代这 4 种芯片的功能。

在片上设计中,考虑用多谐振荡器的片上结构替代原系统产生时钟信号的 ICM7555,用特殊结构的输出 buffer 和施密特触发器的片上结构替代原系统的 TPS2812 和 TPS2813,用传输门的片上结构替代原多芯片系统的 CD4066B,用单稳态触发器的片上结构替代原系统的 CD14538B。对于驱动激光器的 MOS 管

CSD17571Q2,由于其要通过至少 7A 以上的瞬时大电流,无法集成入芯片。为了使其脉宽、重频等参数可调,需要将部分电阻外置。以上讨论如表 1 所示。

表 1 多芯片系统采用的芯片
Tab.1 Chips of the multi-chip system

| Chips of multi-chip system | Function | Corresponding structure |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| ICM7555(PHILIPS) | Providing clk signal | Multivibrator |
| TPS2812/TPS2813 (TI) | Driving MOSFET | Buffer & schmitt trigger |
| CD4066B(TI) | Receiving echo signal | Transmission gate |
| CD14538B(TI) | Providing window signal | Monostable trigger |
| CSD17571Q2(TI) | MOSFET | Cannot be integrated |

将以上所述的芯片替换成其片上结构即可得芯片的整体架构,如图 3 所示。

对于此芯片,表 2 给出了芯片的设计指标。

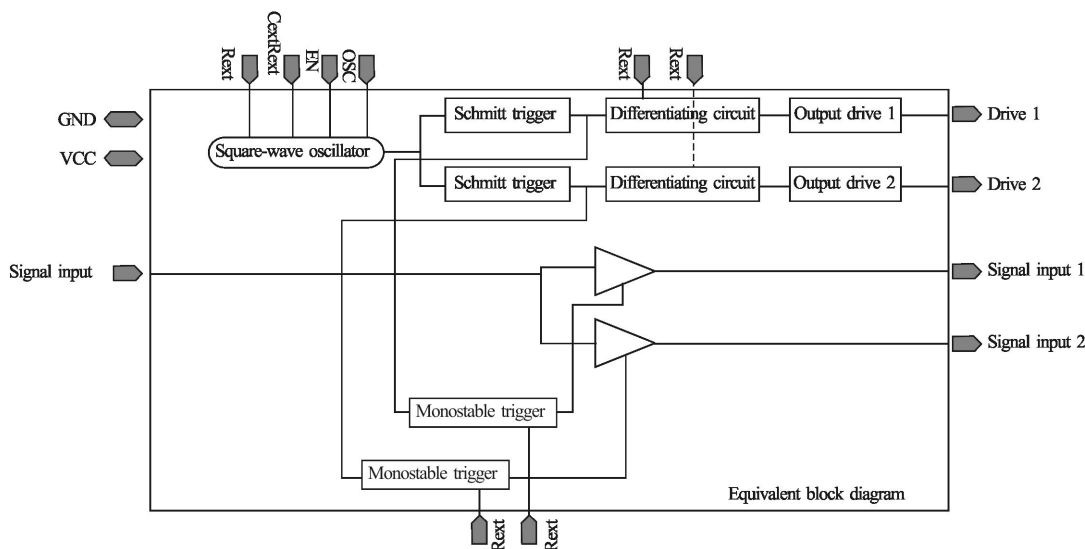


图 3 系统架构

Fig.3 Structure of the system

表 2 设计指标

Tab.2 Design index

| The driving circuit | | | | |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|
| | Frequency | Pulse width | Peak current | Rising and falling edge |
| Index of one channel | 10 kHz(adjustable) | 80-200 ns(adjustable) | >0.3 A | ≤20% |
| Index of the two channels | Time between the two channels | | | 1/2 period |
| Receiving circuit | | | | |
| Window time | | | 1-10 μs(adjustable) | |
| VDD | | | 5 V | |

1.3 芯片工艺的选择

由以上讨论可知此芯片需要集成施密特触发器、多谐振荡器、单稳态触发器、输出驱动单元等多种子电路。其中输出驱动部分由于需要驱动两个大功率 MOSFET, 因此须提供两路电压为 5 V, 瞬时电流达到至少 0.3 A 的脉冲驱动电流。传统标准 CMOS 工艺难以实现这种大驱动电流的器件。因此只有采用适合大电流驱动的 BCD 工艺才能实现该电路。

BCD 工艺起源于 20 世纪 80 年代中期, 能够在同一芯片上制作双极管 Bipolar、CMOS 和 DMOS 器件。其中 CMOS 器件集成度高, 功耗低, 可用来实现芯片的逻辑部分。DMOS 器件由于其器件结构决定其漏端能承受大电流驱动, 可用来实现输出驱动单元。BCD 工艺较好地契合了该芯片的设计要求, 能最大化地集成该系统, 因此该芯片拟采用 BCD 工艺加以实现。

2 芯片子电路的设计

在 BCD 工艺条件下, 该芯片需要设计施密特触发器、多谐振荡器、单稳态触发器、输出驱动单元等多种子电路, 以下将分别加以讨论。

2.1 非稳态多频振荡器和单稳态多频振荡器

实际设计中需要片上提供一个低频 10 kHz、占空比 1:1 的时钟信号, 且其振荡周期可控。图 4 所示的电路即可完成此功能。

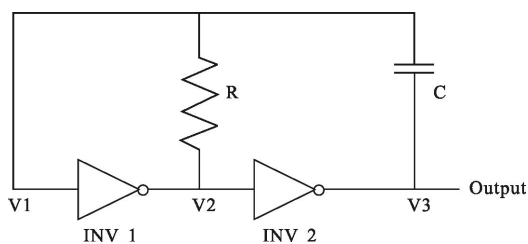


图 4 非稳态多频振荡器电路图

Fig.4 Circuit of square-wave oscillator

设计时其振荡频率遵守如下公式:

$$F_{osc} = \frac{1}{2.2RC} \quad (1)$$

式中: F_{osc} 为其震荡频率, 具体公式推导可见参考文献[2]。实际设计中将电阻置于片外便于控制其振荡频率。

其仿真结果如图 5 所示, 该电路产生了一个占空比 1:1 的方波时钟信号。

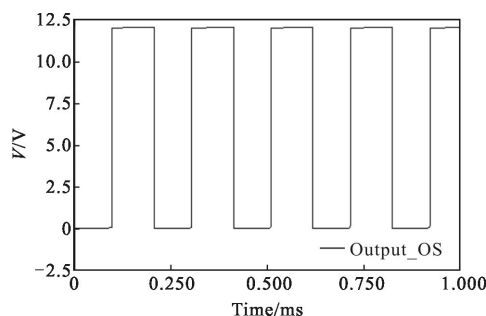


图 5 振荡器仿真结果

Fig.5 Simulation result of square-wave oscillator

芯片中单稳态触发器用于产生一个脉冲宽度可控的窗口时间信号。其具体电路如图 6 所示。

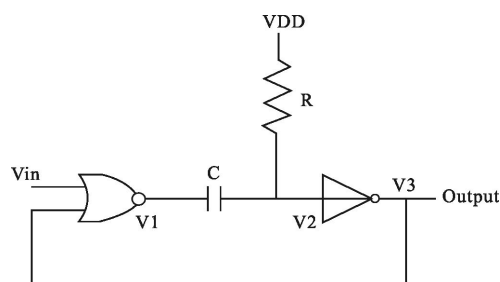


图 6 单稳态触发器电路图

Fig.6 Circuit of monostable trigger

设计时其输出脉冲宽度可以按如下公式估算:

$$t = RC \quad (2)$$

式中: t 为输出脉冲宽度, 具体公式推导可见参考文献[2]。其仿真结果如图 7 所示, 当输入一个方波信号时, 输出产生一脉冲宽度可调的窗口时间信号。

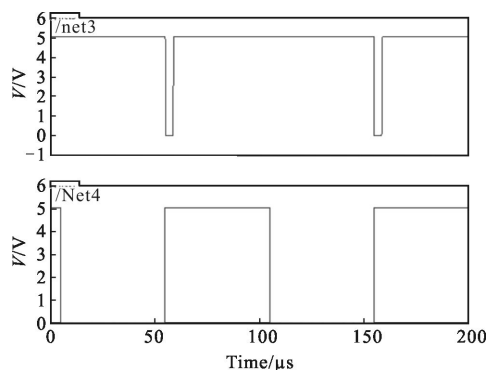


图 7 单稳态触发器仿真结果

Fig.7 Simulation result of the monostable trigger

2.2 施密特触发器

施密特触发器在芯片中对脉冲波形有整形作用。其具体电路如图 8 所示。

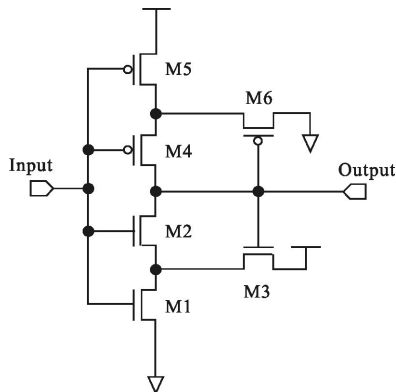


图 8 施密特触发器电路图

Fig.8 Circuit of schmitt trigger

设计时需遵守如下公式：

$$\frac{W3L5}{W5L3} = \left(\frac{V_{dd} - V_{sph}}{V_{sph} - V_{thn}} \right)^2 \quad (3)$$

$$\frac{W2L4}{W4L2} = \left(\frac{V_{spl}}{V_{dd} - V_{spl} - V_{thp}} \right)^2 \quad (4)$$

式中： V_{sph} 为高转换点电压； V_{spl} 为低转换点电压； $W2$ 、 $W3$ 、 $W4$ 、 $W5$ 分别为对应 MOS 管的宽度； $L2$ 、 $L3$ 、 $L4$ 、 $L5$ 分别为对应 MOS 管的长度，调节对应 MOS 管的宽长比可以调节对应的施密特触发器的高转换点电压和低转换点电压。

施密特触发器仿真结果如图 9 所示，一个正弦波经施密特触发器后转换成为了方波。

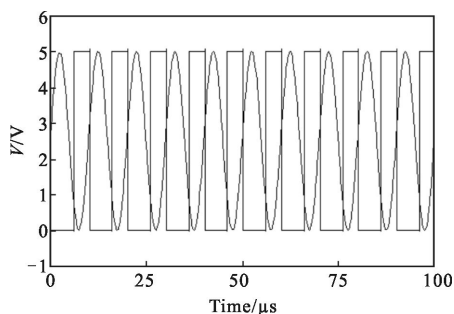


图 9 施密特触发器仿真结果

Fig.9 Simulation result of schmitt trigger

2.3 输出 buffer

芯片的输出 buffer 直接驱动 MOSFET，需要提供 0.3 A 的驱动电流。其实际电路如图 10 所示。

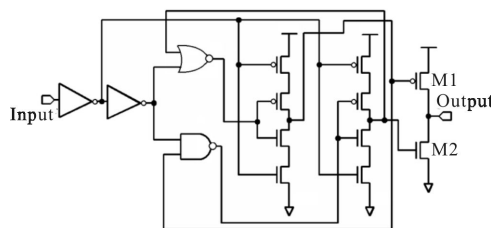


图 10 输出 buffer 电路图

Fig.10 Circuit of the output buffer

该电路保证了输出级的尺寸较大的 MOS 管 M1 和 M2 不会同时导通，避免了 dead time 的出现且能提供足够的驱动电流，驱动对应的 MOSFET。

仿真中，采用 1nf 的电容作为负载，测试该电路的驱动能力。其仿真结果如图 11 所示，如图可见其上升时间、下降时间大致在 20 ns 左右，符合设计要求。

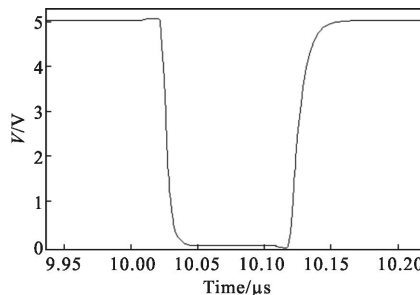


图 11 驱动能力仿真结果

Fig.11 Simulation result of driving capability

2.4 版图仿真及测试结果

芯片制作采用了某公司的 0.25 μm 的 BCD 工艺实现，版图如图 12 所示。

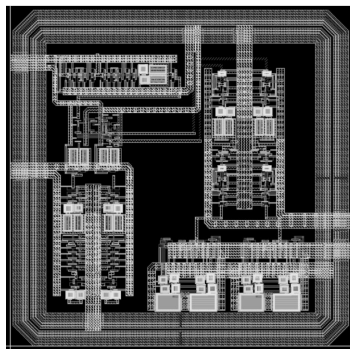


图 12 芯片版图

Fig.12 Layout of chip

对其进行时序仿真，满足实际需求，仿真结果如

图 13 所示。

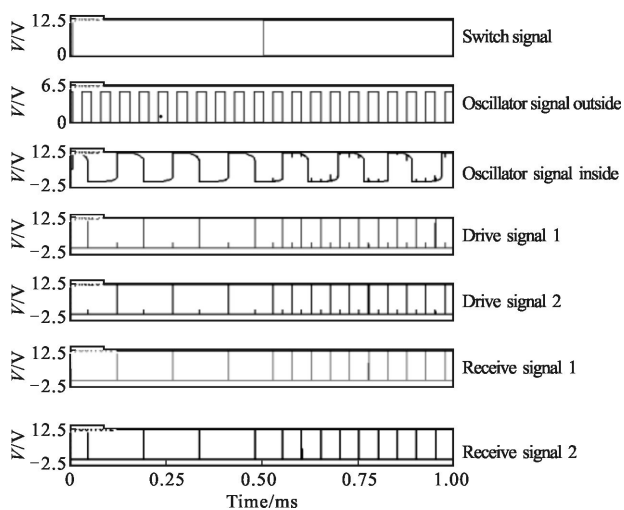


图 13 仿真结果
Fig.13 Simulation result

3 芯片测试及其结果

图 14 为加工出的芯片,大小为 5 mm×5 mm。

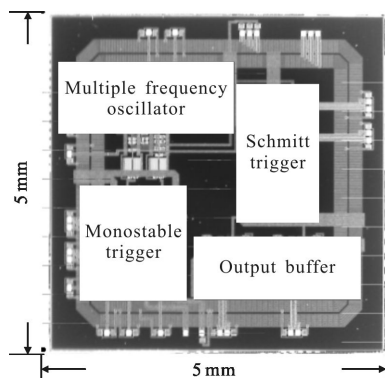


图 14 显微镜下的芯片
Fig.14 Chip under the microscope

芯片的测试分为驱动端端口信号驱动能力的测试,驱动部分时序测试,驱动双色激光器测试及接收端口测试。

3.1 驱动能力测试

图 15 为芯片驱动端口分别接 100 pF、330 pF、500 pF、1 nF 负载电容时的驱动波形,由图可见,电源电压 5 V 时驱动电容,上升下降时间在 15~20 ns 左右,驱动能力满足了设计要求,信号上升下降沿均达到了设计指标。

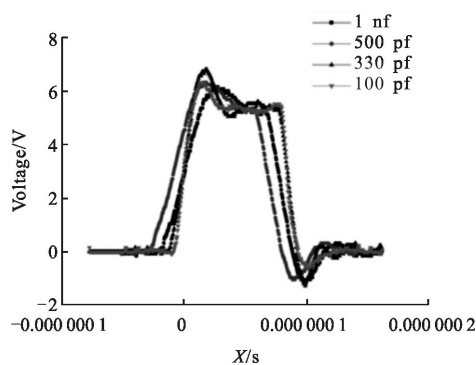


图 15 驱动能力测试结果
Fig.15 Test result of the driving capability

3.2 驱动部分时序测试

如图 16 可见,对一个输出端口进行时序测试,在每个时钟信号下降沿(另一输出端口则是在时钟的上升沿),此输出端就产生一个脉冲信号驱动 MOSFET,与设计完全吻合。

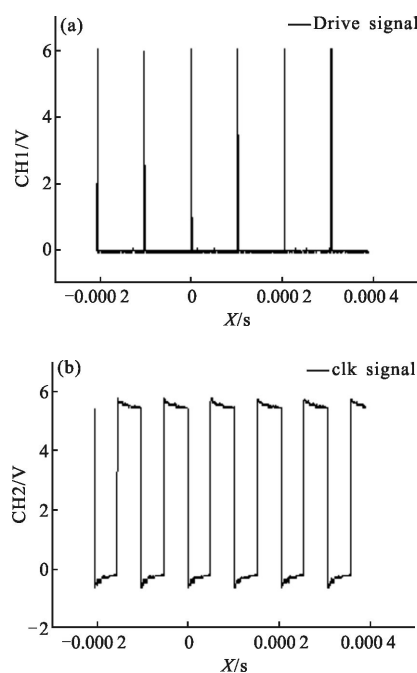


图 16 驱动部分时序
Fig.16 Time sequece of driving part

3.3 驱动双色激光器测试,接收端口测试及其串扰讨论

3.3.1 测试条件

如图 17 所示,对系统进行整体测试,光电探测器采用自带前置放大器的光电探测组件。驱动激光器的 MOSFET 采用 TI 的 csd1751Q2,其输入电容

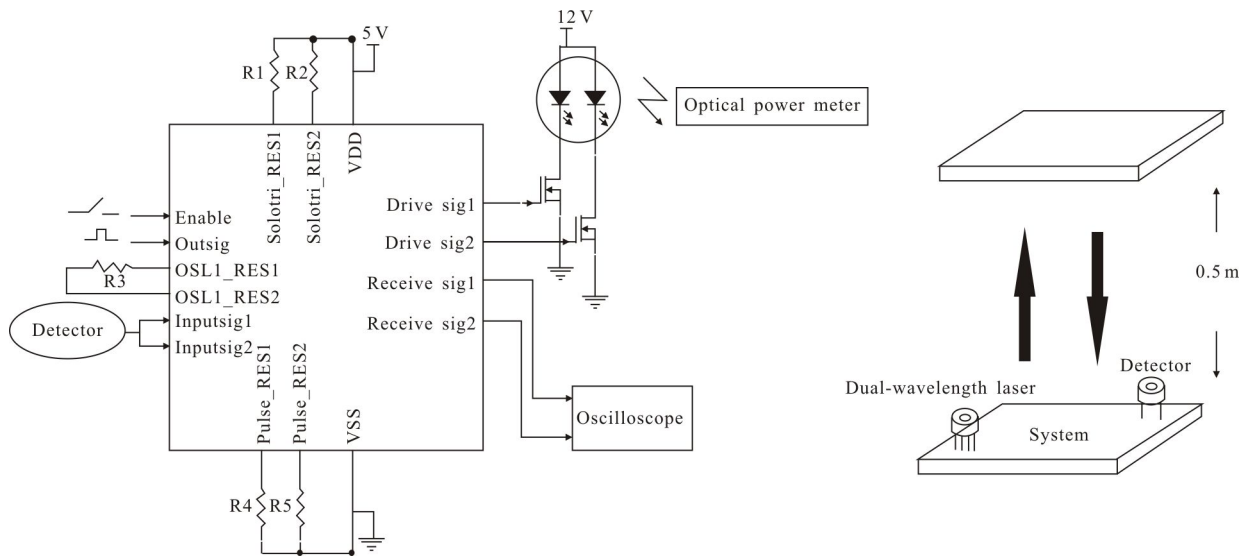


图 17 系统整体测试电路

Fig.17 Test circuit of the entire system

的典型值为 260 pF, 小于设计时的 1 nF。Enable 端口为外部信号和内部时钟信号的切换引脚。通过调整 R1、R2 阻值可以调制窗口时间, 调整 R3 阻值可以调制重频频率, 调整 R4、R5 阻值可以调制脉宽。实际测试中, R3 为 1 MΩ 时, 频率为 10 kHz 左右, R4、R5 为 1 kΩ 时, 脉宽为 100 ns 左右, R1、R2 为 300 kΩ 时, 窗口时间为 2 μs 左右。

3.3.2 驱动双色激光器测试结果

测试中使用激光功率计对激光器的功率进行了测试。芯片供电电压 5 V, 激光器支路供电电压 27 V 时, 红外激光器峰值功率可达 30 W 以上, 紫光激光器峰值功率达 25 W 以上。

3.3.3 接收端口测试

如图 18 为系统接收到的双路信号。符合设计时将信号通过时间窗口分开成双路信号的时序要求。但是同时也可观察到驱动对接收端是有一定干扰的。以下将对该串扰进行讨论。

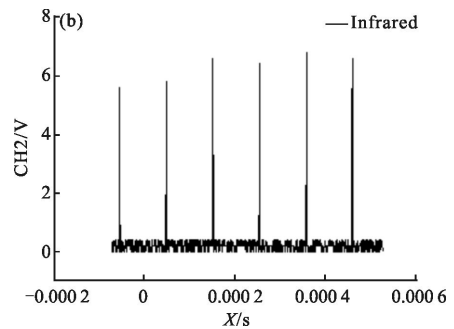


图 18 接收端信号

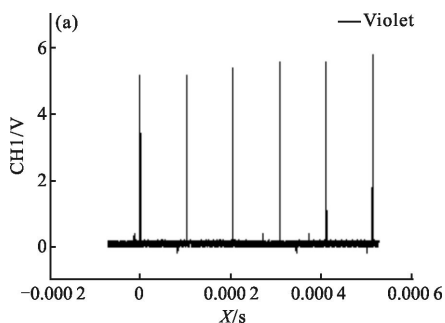
Fig.18 Received signals

3.3.4 驱动端对接收端串扰讨论

驱动电路对接收电路的干扰由两部分组成。一部分为芯片内部回路对接收端的干扰, 一部分为板级电路双色激光器供电部分对接收端的串扰。这里只讨论芯片内部回路对接收端的干扰。

为了保证接收端不受双色激光器供电部分的串扰, 进一步观察芯片内部回路对接收产生的串扰, 将输入信号空载, 驱动负载接一 1nF 的电容。对接收端口进行测试。

测试结果如图 19 所示, 驱动部分在接收端产生了一个幅度 500 mV 的持续约 100 ns 的周期性脉冲串扰。可以观察到噪声有两个峰值, 一者发生在驱动信号上升沿, 为对 MOSFET 输入电容充电造成, 一者发生在驱动信号下降沿, 为对 MOSFET 输入电容放电造成。



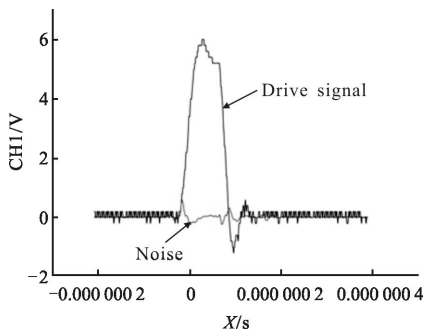


图 19 接收端干扰

Fig.19 Noise at the receiving end

此串扰信号在时域上与回波信号并不重合。如图 20 可见,光信号在时间轴 160 ns 左右处转化为电信号,而驱动端噪声在时间轴 100~120 ns 左右处已经结束,两者在时域上并不重合,所以在 FPGA 里进行信号处理时在时域上能很容易过滤掉 120 ns 以前的噪声信号,而对回波信号并无影响。(图 20 的探测组件响应时间已将信号通过 MOSFET 的延迟时间和激光出光延迟时间计算在内)。

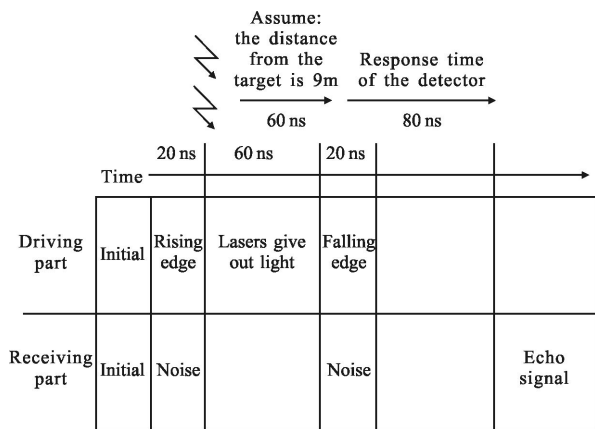


图 20 光信号和电信号

Fig.20 Optical signals and electric signals

在实际应用中,要保证驱动端对接收端的干扰尽量小,还需要考虑到板级电路为双色激光器供电部分对输入端的影响。由于篇幅问题,文中并不加以讨论。

4 结论

双色激光引信驱动接收 ASIC 是一款用于双色激光引信的芯片,其集成了双色激光引信驱动和接收部

分的主要有源无源器件,将 4 款不同功能的芯片集成到一起。相对于多芯片实现该系统,只需采用一个芯片并外接少量部件即可完成整个系统搭建。使用该芯片驱动双色激光器,芯片供电电压 5 V 时,激光器支路供电电压 27 V 时,红外激光器输出峰值功率可达 30 W 以上,紫光激光器输出峰值功率达 25 W 以上,脉宽 50~500 ns 可调,重复频率 1~100 kHz 可调,窗口时间 1~10 μs 可调,红外和紫光回波信号在接收部分实现了分离,并在接收端接收到分离的两路信号。其设计可以大大减小整个系统的体积,克服导弹内部空间不充裕这一问题,使系统具有更好的实用性。

参考文献:

- [1] Zhang Haojun, Zhao Jianlin. Dual-wave technology used in laser-fuze anti-interfere[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1070-1074. (in Chinese)
张好军, 赵建林. 采用双色技术的激光引信抗干扰技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1070-1074.
- [2] Jacob Baker R. CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation [M]. 2th ed. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2008: 473-475. (in Chinese)
R. 雅各布. 贝克. CMOS 电路设计、布局与仿真[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社, 2008: 473-475.
- [3] Zhang Hao, Jia Xiaodong, Yu Weixin, et al. Semi-physical simulation and performance certification system for laser proximity fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1010-1015. (in Chinese)
张浩, 贾晓东, 于伟新, 等. 激光引信半实物仿真与性能验证系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1010-1015.
- [4] Chen Zuntian, Ma Jun. Dual wavelength laser fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2008, 30(5): 1-3. (in Chinese)
陈遵田, 马军. 双波长复合激光引信[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(5): 1-3.
- [5] Sang Huiping, Deng Jiahao, Hu Xiujuan. Study on digital detection technique of weak echo signals in pulse laser fuzes [J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(4): 420-423. (in Chinese)
桑会平, 邓甲昊, 胡秀娟. 脉冲激光引信微弱回波信号数字检测技术研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(4): 420-423.
- [6] Li Jing, Huang Zheng. Analysis on echo waveform processing method of laser fuze[J]. *Communications Technology*, 2009, 42(11): 217-221. (in Chinese)
李静, 黄峥. 激光引信回波信号处理方法分析研究[J]. 通信技术, 2009, 42(11): 217-221.