

激光探测小型化收发系统设计

韩 威, 郑 翔, 赵柏秦

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 针对激光探测小型化收发系统的设计难点, 提出了一种大视场小型化设计方案。将激光器与驱动电路集成在氮化铝基板上, 达到提高性能和压缩尺寸的目的。经过理论计算和 ZEMAX 光学仿真, 采用光纤、自由曲面阵列柱透镜及球面柱透镜实现光的整形和会聚, 减小轴向尺寸。设计了带放大电路的小体积接收模块。对小型化系统中脉冲电流带来的电磁干扰问题进行分析, 采用多种措施屏蔽电磁干扰。最后加工制作了原理样机并进行了测试实验, 结果表明: 该系统有效抑制了电磁干扰, 并能有效探测距离为 5 m 的目标, 验证了小型化技术的可行性。

关键词: 脉冲激光; 收发组件; 光学系统; 小型化; 电磁兼容

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0906008

Design of miniaturized transmitting-receiving system for laser detection

Han Wei, Zheng Xiang, Zhao Baiqin

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

Abstract: Aiming at the design difficulty of miniaturized laser transmitting-receiving detection system, a solution for large field of view, miniaturization was proposed. Laser chip and driving circuit were integrated on aluminum nitride substrate, which achieved the purpose of improving performance and dimension compression. According to theoretical calculation and ZEMAX optical simulation, the optical fiber, free surface array cylindrical lens and spherical cylindrical lens were used to realize shaping and convergence of light, which reduced the axial dimension. A small size receiving module with amplified circuit was designed. The electromagnetic interference caused by the pulse current was analyzed in the miniaturized system, further more, a variety of electromagnetic compatibility measures were adopted to shield electromagnetic interference. At last, the initial prototype was made and the experiment of measurement was done. Results show that the system can effectively suppress the electromagnetic interference, and detect the target at the distance of 5 m. Therefore, it verifies the feasibility of the miniaturization technology.

Key words: pulsed laser; transmitting-receiving module; optical system; miniaturization; electromagnetic compatibility

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-02-20

作者简介: 韩威(1989-), 男, 博士生, 主要从事激光探测技术及激光器封装方面的研究。Email: hbsjlcw@163.com

导师简介: 赵柏秦(1960-), 男, 研究员, 主要从事脉冲半导体激光器及应用模块等方面的研究。Email: bqzhao@semi.ac.cn

0 引言

激光脉冲探测技术,是一种利用重复激光脉冲主动探测目标,通过鉴别反射光信号达到探测目的的技术。这项技术在武器系统中已有广泛的应用,例如挪威的 NF2000M、PX581 迫弹,俄罗斯 Sosna 面空导弹以及英国 PARIER MARK2 导弹等,成为了新一代先进智能化武器的技术手段之一^[1-2]。限于小口径弹药应用的体积要求,小型化成为一项关键技术。小型化激光探测系统设计是在小体积内实现激光器的脉冲调制、光信号的采集放大、激光光斑的整形和有效聚光,并解决脉冲激光电源的电磁污染问题。调制光脉冲宽度决定了系统抗烟雾、雨雪等小散射体后向干扰的能力,光峰值功率、发散角、接收口径和电学增益等共同决定了激光探测距离与视场范围^[3-5]。在激光收发模块相距较近时,发射模块的瞬时脉冲大电流会对接收模块造成强烈的电磁干扰,影响接收回波信号的信噪比,提高系统电磁兼容性也尤为重要^[6]。

针对激光探测小型化技术,Xu Wei 等提出了通过接收透镜内嵌发射透镜,利用雪崩光电二极管(APD)接收光能量的办法,但收发间光干扰难以抑制,器件需加高压偏置,并且收发分离限制了结构的设计,增加了系统装调的难度^[7]。Xu Xiaobin 等提出了利用发射系统解体分离和短焦距单透镜实现发射小型化的方案,能有效缩小体积,但发射视场较小,需周向动态扫描装置^[8]。

文中从光学结构、收发模块、电磁兼容方面进行讨论,并提出了适用于近距离脉冲探测的小型化设计方案。将激光器、驱动电路集成在氮化铝基板上,运用光纤微透镜、自由曲面阵列柱镜等光学系统实现大视场光学整形。通过激光器、探测器和电路、光学系统之间的整合,有效压缩了系统体积。同时,对小型化带来的电磁干扰问题进行了研究。

1 系统设计与分析

激光探测收发系统集成光机电为一体,其工作原理如图 1 所示。

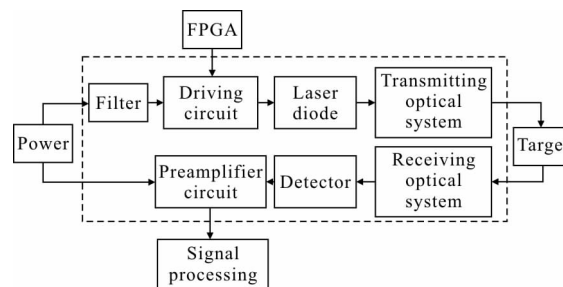


图 1 探测系统原理框图

Fig.1 Principle diagram of detection system

电源通电后,电源模块分配多路电压,经去耦滤波为各模块供电。为方便调整脉冲参数,由外部 FPGA 产生重频方波或编码信号,输入驱动电路调制激光器,通过发射光学系统整形后照射目标,部分反射光被接收光学系统收集在光探测器上,再经前置放大送入信号处理部分,从而获得目标信息。小型化原理样机示意图如图 2 所示,以下讨论具体设计要求并提出解决方案。

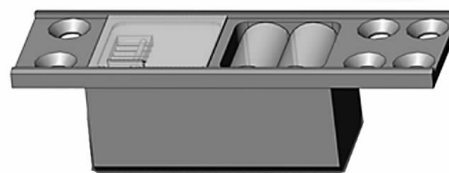


图 2 系统样机图

Fig.2 Diagram of the prototype

1.1 光学结构设计

半导体激光器出射光强服从高斯分布,其远场光斑发散。为了有效探测目标,系统光学结构设计主要实现以下作用^[9]:

- (1) 将激光器快轴方向光束准直压缩;
- (2) 将慢轴方向光束扩展到宽角度范围,实现大视场的目标捕获;
- (3) 将足够多的目标反射光会聚在探测器光敏面上,并滤除发射波长以外的杂散光。

由于成本和体积限制,并且对成像质量要求不高,光学结构应简单可靠,与系统整合为一体。根据以上需求,文中设计了将激光光斑准直扩束为窄长条形的大视场发射光路,使激光器的输出能量在快轴方向集中,在慢轴方向上覆盖大的探测范围。图 3(a)、(b)分别为该发射光学系统在两个方向的光束整形示意图。

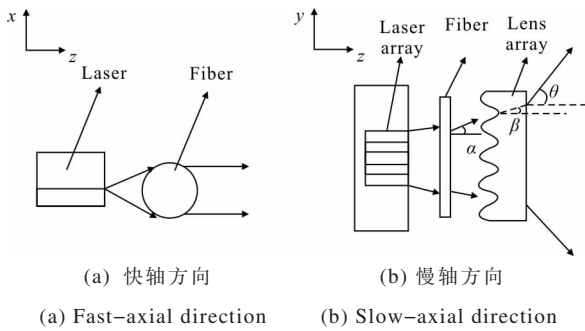


图 3 光学系统示意图

Fig.3 Diagram of optical system

激光器快轴方向光束采用光纤微透镜压缩, 光纤半径 R 为 0.4 mm , 折射率 n 为 1.45 。根据近轴条件, 可得焦距:

$$f = \frac{nR}{2(n-1)} \quad (1)$$

计算焦距为 0.64 mm , 根据高斯光束传播特性, 当高斯光束束腰在透镜焦平面上时, 准直后的发散角最小, 所以光纤应放在距离激光器 0.64 mm 处, 这一尺寸极小。

利用阵列柱透镜均匀扩展慢轴方向光束, 透镜前表面是自由曲面, 后表面为平面。激光器阵列(LDA)的发光单元周期排列, 可等效为周期排布的均匀线光源。简化起见, 将激光器输出高斯光束考虑为平行光束进行计算。首先, 建立光源与从透镜出射光线的映射关系。再对每个周期的线光源进行离散, 每 dy 光线通过透镜时都会向 $d\theta$ 角度偏折, 则根据光能量守恒确定出射角度 θ 与纵向坐标 y 之间的对应关系为:

$$\int_L P dy = \int_M I d\theta \quad (2)$$

式中: P 为激光器线功率密度; L 为阵列透镜周期半宽, 与光源周期相匹配; I 为从透镜出射的单位角度光能量; M 为扩束角半宽。

利用 Snell 定律可将前表面曲线斜率表示为:

$$\frac{dy}{dz} = \frac{\sin\alpha - n_2 \sin\beta}{\cos\alpha - n_2 \cos\beta} \quad (3)$$

光线通过透镜后表面的几何关系表示为:

$$n_1 \sin\theta = n_2 \sin\beta \quad (4)$$

式中: n_1 为空气折射率 1 ; n_2 透镜折射率 1.58 ; α 、 β 分别为透镜前表面入射、折射光线与 z 轴的夹角。联立公式(2)~(4), 可得曲线坐标 (y, z) 一一对应的微分

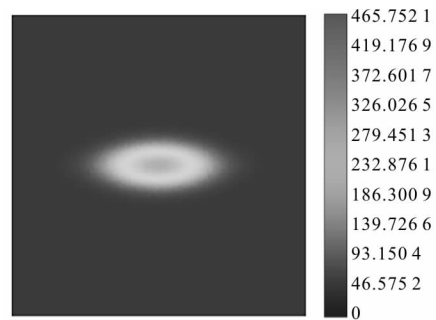
方程, 运用 Runge-Kutta 方法求得微分方程数值解, 该数值解集合便是曲线的离散点, 对其拟合得到平滑的曲线线型表达式。在阵列周期为 1.6 mm , 扩束角为 90° 时, 计算得到:

$$z = 0.843y^2 + 0.173y^4 \quad (5)$$

对文中所使用管芯的发散角进行实际测量, 快轴半功率发散角约为 30° , 慢轴发散角约为 12° 。实际高斯分布光强 $1/e^2$ 处发散角 φ 与半功率点发散角 θ_{fwhm} 对应关系为:

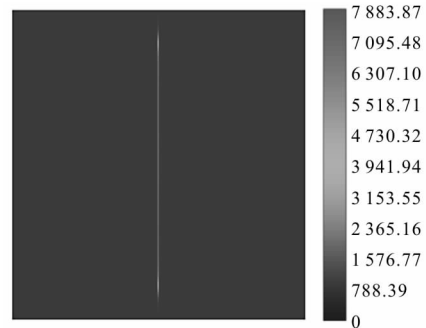
$$\varphi = \frac{\theta_{fwhm}}{\sqrt{2\ln(2)}} \quad (6)$$

根据以上获取的光学结构参数, 通过 ZEMAX 光学软件非序列模式光线追迹进行计算。对比激光通过发射光学系统前后的辐射强度分布如图 4 所示。



(a) 整形前辐射强度的分布

(a) Distribution of radiant intensity before shaping



(b) 通过光学系统后辐射强度的分布

(b) Distribution of radiant intensity through optical system

图 4 激光辐射强度分布图

Fig.4 Distribution of laser radiant intensity

探测面尺寸为 $120^\circ \times 120^\circ$, 激光器原光斑为椭圆形, 光束发散, 中心辐射度为 $4.6575 \times 10^2\text{ W/sr}$ 。在准直扩束后能量集中为线状, 中心辐射度为 $7.8839 \times 10^3\text{ W/sr}$, 辐射强度明显增加, 发散角优化效果十分

明显,得到了较好的准直效果,并且具有达 90°的扩束范围,相较于其他多级非球面透镜具有尺寸小、便于装调的优点。

在目标距离远远大于接收窗口尺寸时,可认为经目标反射到达接收窗口的是平行光,通过球面柱镜会聚能满足探测需求。当采用单球面柱镜结构时,其焦距减小,透镜曲率将增大,不利于窗口尺寸压缩,所以文中采用了双球面柱镜以缩短轴向距离,焦距为 9.1 mm。在柱镜表面镀带通滤光膜滤除中心波长以外的杂散光。

1.2 发射模块设计

激光发射电源为 LD 提供驱动与保护,要求激光输出具有稳定的重频、窄脉冲宽度和高功率。发射模块小型化利于减小分布参数,优化激光输出性能^[10-11]。

文中发射系统由双通道栅极驱动器、功率 MOSFET、储能电容、LDA 组成。利用高速栅极驱动器推挽输出控制 MOSFET 周期性开关,在栅极电压达到阈值时,耐高压高容值的储能电容放电为激光器提供电流,从而输出激光脉冲。栅极驱动器采用 QFN 封装,面积小,具有较强的电流驱动能力,快速上升和下降时间典型值为 7 ns 和 6 ns。在驱动 MOSFET 负载时,驱动输出端易产生振荡,利用 BLM 系列片式磁珠的高频衰减特性和电容补偿抑制振荡幅度,提高驱动电路的稳定性。

传统驱动电源与激光器相分离,体积较大,仅激光器封装占用长度达 5 mm,引入的分布参数对驱动端波形和激光器注入脉冲电流波形有影响,因此实验中采用了将激光器管芯和驱动电路元器件组装在 AlN 基板上的方式,基板同时作为电路载体和过渡热沉,一方面省去激光器封装工艺,大大减小布线及金丝等的线路阻抗,另一方面降低了模块热阻。经过优化后,发射模块峰值功率超过 60 W,尺寸压缩为 10 mm × 12 mm。将光纤压合于 AlN 基板边缘,自由曲面阵列柱透镜与管壳粘贴,和激光器的位置相匹配。发射模块通过螺钉与壳体固定,贴于管壳内侧利于散热。

1.3 接收模块设计

接收模块实现目标反射光能量到电压信号的转换。PIN 光电二极管和 APD 是最常用的两种光电探测器件,APD 的雪崩增益大、灵敏度高,但需要高压

偏置和温度补偿等额外元件,且成本昂贵。与 APD 相比,PIN 探测器具有成本低、偏压低的优势,更适用于近距离探测小型化系统。

图 5 为文中采用的接收模块局部结构示意图,探测器与放大电路间通过键合金丝相连,接收透镜紧贴 PIN 探测器,使光敏面处于照射光斑成像位置,整个接收窗口尺寸为 14 mm × 13 mm。

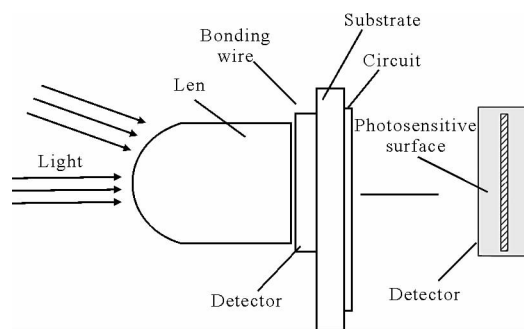


图 5 接收模块结构

Fig.5 Layout of receiving module

图 6 给出了将电流信号转换为电压信号的放大电路原理图,包括自举电路、跨阻放大(TIA)、隔直耦合电路、反向比例放大和高通滤波输出级,该电路结构使用了较少的元器件。实验中采用的 TIA 具有带宽高、压摆率大、低噪声、体积小特点,为避免 TIA 负反馈环路上极点造成的不稳定性问题,在运放输入输出间增加电容 C_F 进行补偿。耗尽型 MOSFET Q1 起到源级跟随器的作用,使探测器两端信号电压相同,减少结电容的分流,从而提高了电流电压转换带宽,MOSFET 夹断电压为 -3 V,可同时为 PIN 探测器提供反向偏置电压。 R_x 在环路内补偿容性负载提高稳定性, R_3 为平衡电阻。通过 R_F 、 C_F 和 R_5/R_4 控制跨阻放大倍数,调节 C_F 、 R_x 、 R_3 、 R_4 、 R_5 参数获得较低的输出噪声和保证时域的信号完整性。

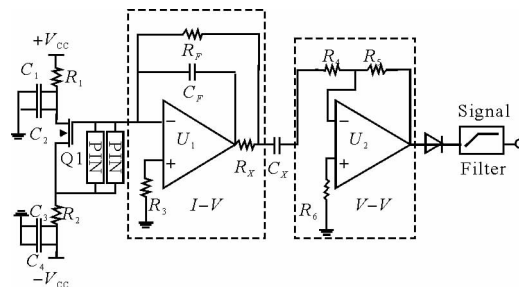


图 6 接收电路原理图

Fig.6 Schematic of receiving circuit

根据激光回波功率方程,当激光光斑快轴方向长度小于目标长度时,可将回波信号电压幅度表示为:

$$V_r = \frac{\rho A R K P_e L A_r}{2\pi r^3 M} \quad (7)$$

式中: ρ 为目标反射率; A 为跨阻增益; R 为响应度; K 为光学系统透过率; P_e 为发射功率; L 为目标宽度; A_r 为有效光接收面积; M 为半扩束角度; r 为探测距离。设 $K P_e = 50 \text{ W}$, $L = 40 \text{ cm}$, $R = 0.5 \text{ A/W}$, $A_r = 100 \text{ mm}^2$, $r = 5 \text{ m}$, 则由公式(7)可得到在回波信号电压为 1 V 时,跨阻增益应为 $128 \text{ dB}\Omega$ 。

图 7 为放大电路跨阻增益仿真曲线, -3 dB 总跨阻达到 $128 \text{ dB}\Omega$, 可满足探测需求。

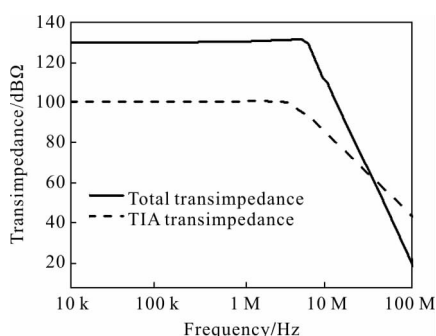


图 7 跨阻增益

Fig.7 Transimpedance gain

1.4 电磁兼容设计

在小型化系统设计初期,进行了电磁干扰测试,发现收发同时工作时的干扰十分明显。系统中激光发射部分对接收回路造成干扰的原理如图 8 所示,各回路充放电频繁,电流变化率很大。主要存在的干扰有:(1) I、III 驱动回路的脉冲电磁辐射;(2) 电源传导及电源线缆辐射 II;(3) 地线的公共阻抗耦合干扰。小型化系统共用电源,接收模块更加靠近干扰源,须研究适用的电磁兼容技术。

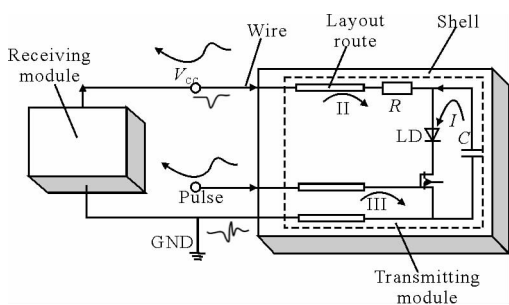


图 8 干扰原理

Fig.8 Interference principle

电磁屏蔽是抑制辐射的有效手段,所以在系统结构设计中把收发模块嵌入金属管壳的不同腔体内,将地线与管壳良好接触,通过金属壳体进行电磁屏蔽。金属的屏蔽效能 E 可由吸收损耗、反射损耗、多重反射损耗综合评估。文中脉冲大电流信号产生的主要是频率分布广泛的近磁场干扰。对于近磁场源,吸收损耗是屏蔽的主要机理,但在近磁场的低频段,吸收损耗往往较小,可使用高磁导率材料分流磁通量的方法衰减电磁辐射,所以金属外壳选用了高磁导率的铁镍合金(壁厚 2 mm)实现电磁屏蔽。除此以外,接收模块还采用了大面积铜箔覆盖的多层屏蔽设计,进一步衰减 TIA 环路受到的电磁干扰。

值得注意的是,在储能电容 C 充电的瞬间,还会造成回路 II 中管壳外部电源线缆、管脚间的串扰,以及电源电压 V_{CC} 的剧烈波动。由于收发共用一组电源,且管脚间距很小,这就需要限制每个周期内电源线缆的充电电流变化,并将收发供电输入端隔离。对电源板进行处理,设计的电压二次分配方案如图 9 所示。

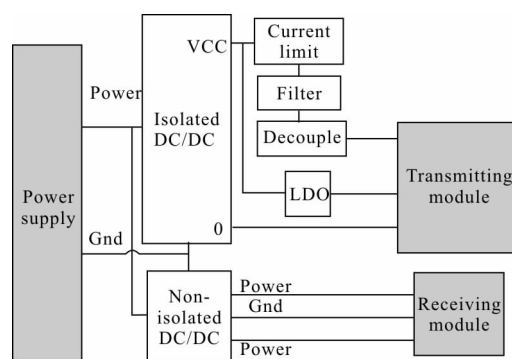


图 9 电压分配方案

Fig.9 Schematic of voltage distribution

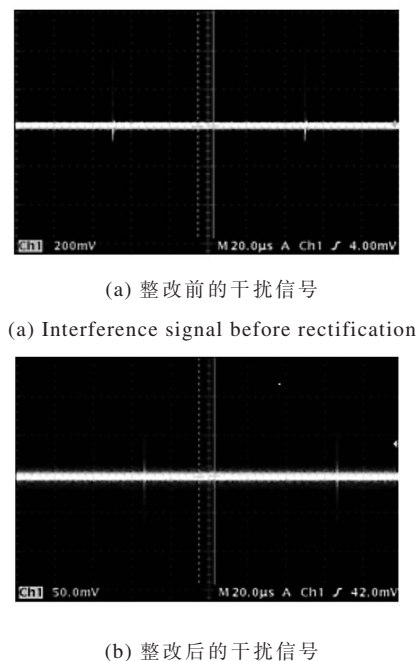
文中采用了贴片化设计的隔离式 DC-DC-1W 模块、非隔离 DC-DC 双路输出模块和低压差线性稳压源(LDO)TL751 实现共用电源的电压分配和噪声隔离。隔离端为发射模块提供供电回路,利用限流电阻与 EMI 滤波器共同减缓充电电流的瞬间变化,EMI 滤波器由共模扼流圈、差模电感、滤波电容组成,并且通过多个小电容并联去耦降低发射模块放电时的压降幅度。

2 系统测试及结果

根据文中设计加工了小型化探测系统原理样

机,激光中心波长为 860 nm,发射脉冲频率 10 kHz,脉宽 30 ns,峰值电流 38 A。接收端输出信号通过同轴电缆输入到 TEK3052B 示波器(带宽 500 MHz)。

图 10 为电磁兼容设计前后接收输出端的干扰波形。从图中可知,采用电磁兼容设计后,接收模块输出信号的电磁干扰噪声幅值由 500 mV 下降到约 50 mV,降低了 450mV,收发间的电磁干扰被有效抑制。



(a) 整改前的干扰信号
(a) Interference signal before rectification
(b) 整改后的干扰信号
(b) Interference signal after rectification

图 10 电磁干扰信号

Fig.10 Electromagnetic interference signal

采用五维精密调节台和自研的光学夹具实现光学系统的装调。在距光源 2 m 处贴上标有 1 cm 宽横格的 A4 纸,利用红外观察仪监测光斑如图 11 所示。利用光学旋转台测得快轴发散角为 1°,慢轴发散角约为 90°。

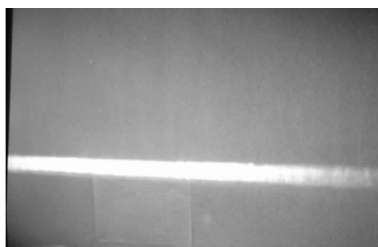


图 11 激光光斑
Fig.11 Laser spot

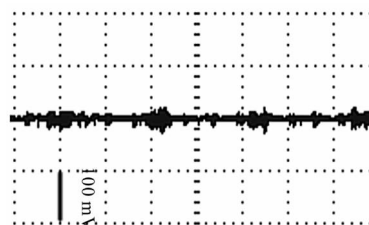
系统测试在空旷场地内进行,原理样机置于实

验测试台上,将直径 40 cm 的金属圆筒作为模拟目标放置在 5 m 处,测试场景如图 12 所示。



图 12 模拟目标
Fig.12 Simulated target

图 13(a)为没有放置目标时,测量的接收信号,存在较低的周期电磁干扰噪声和幅值 20 mV 的基底噪声,无明显背景光噪声和收发间光干扰。图 13(b)是在放置模拟目标后测得的回波信号波形,回波信号十分明显,但信号幅度低于预设值 1 V,这是由于实际目标有效反射面积等参数低于估计值造成的,可通过进一步增大发射功率和跨阻增益提高信号幅度。测试结果验证了以上小型化系统设计的可行性。



(a) 无信号
(a) No signal



(b) 目标在 5 m 处
(b) Target at 5 m

图 13 接收信号

Fig.13 Received signal

3 结论

文中设计了一种新型激光脉冲探测系统,打破

了传统收发分离使用的结构,对激光收发模块、光学系统进行设计,采用体积较小的光纤、自由曲面阵列柱镜、球面聚焦柱镜等光学系统实现光学整形和有效接收,达到了大视场小型化的目的,提高了系统的集成度和可靠性。对收发间的电磁干扰问题进行了研究,并提出了解决方案,接收输出端电磁干扰噪声得到有效抑制。最后实验验证了小型化系统的可行性。文中内容为在体积受限环境中的应用创造了条件,可作为激光脉冲收发小型化系统研发和设计的参考。

参考文献:

- [1] Zhang Zhenghui, Yang Ming, Xu Shiwen. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35 (6): 700–704. (in Chinese)
- [2] Tan Zuojun, Chen Haiqing, Kang Jingran. Research and test of receiver module in laser fuze[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 2742–2746. (in Chinese)
- [3] Xiong Xianming, Li Sanlong, Zhang Wentao, et al. Design of driving laser diode for ladar ranging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (2): 0206004. (in Chinese)
- [4] Wang Jinhua, Yao Hongbao, Liu Zixing. Analysis of laser emitting circuit with high-power and short pulse [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (6): 1050–1054. (in Chinese)
- [5] Yang Yan, Yu Dunhe, Wu Yaofang, et al. Design of a novel drive power for narrow pulse laser diode [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38 (2): 0202003. (in Chinese)
- [6] Feng Ying, Zhang He, Zhang Xiangjin. Electromagnetic interference technique of transmitter and receiver modules for pulsed laser fuze [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23 (1): 249–254. (in Chinese)
- [7] Xu Wei, Chen Qian, Gu Guohua, et al. Research on miniaturization of laser proximity fuze [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(10): 1212. (in Chinese)
- [8] Xu Xiaobin, Zhang He, Zhang Xiangjin. Miniaturized transmitting technology of laser circumferential detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45 (3): 0314005. (in Chinese)
- [9] Wang Lei, Zhao Haibin, Yu Jizhou, et al. Passive and active combined LADAR system design and simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (S): 68–72. (in Chinese)
- [10] Chen Yanchao, Zhao Baiqin, Li Wei. High peak power semiconductor laser module for producing nano second pulse [J]. *Optics Precision Engineering*, 2009, 17 (4): 695–699. (in Chinese)
- [11] Cui Jinglin, Liu Xiaoke, Geng Zhixiang. Integrative driving circuit and its layout of pulsed laser diode[J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(5): 5–10. (in Chinese)