



·前沿技术与交叉科学·

智能型多功能激光防护镜与自动探测告警复合装置*

罗振坤, 马 琼, 崔玉芳, 康宏向

(军事医学研究院 辐射医学研究所, 北京 100850)

摘 要: 设计研制智能型多功能激光防护镜与自动探测告警一体化复合装置, 主要用于各类激光辐射人眼损伤的防护和预警。对防护镜和探测告警系统及智能化复合防护技术进行研究和性能测试, 利用防护镜与告警装置的信号互联和联动作用, 使防护镜双镜复合, 并发出告警信号。结果表明, 当激光防护告警复合装置探测到激光入侵时均能以不同方式发出各种告警信号和复合防护响应, 包括不同颜色灯光闪烁、音响和振动告警, 驱使两个防护镜单元镜组复合, 对 532 nm、1 064 nm、470 nm、808 nm 和 700~2 000 nm 特定波长激光和超连续谱激光进行有效防护, 可通过无线信号互联实现集群联动告警和防护。该激光防护镜与探测告警复合装置具有智能化、模块化、多功能集成的特点, 各项性能符合设计要求。

关键词: 激光防护镜; 激光探测告警; 复合防护装置; 信号互联和集群联动; 超连续谱激光

中图分类号: R852.7

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230042

Composite device of intelligent multifunctional laser protective goggles and automatic detection and alarm

Luo Zhenkun, Ma Qiong, Cui Yufang, Kang Hongxiang

(Institute of Radiation Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850, China)

Abstract: A composite device of intelligent multifunctional laser protection goggles and automatic detection and alarm is designed and developed, which is mainly used for protection and early warning of human eye damage caused by laser radiation. The protection spectacles, detection and alarm system and intelligent composite protective technology are studied. The laser protection and detection and alarm performance of the composite device are tested. The signal interconnection and linkage between the protection spectacles and alarm device are used to combine the protection spectacles' double spectacles and send alarm signals. The results show that when the laser protection alarm compound device detects the laser irradiation, it can send out various alarm signals and compound protection response in different ways, including flashing lights of different colors, sound and vibration alarms, and drive the two protection spectacles to recombine. It can effectively protect human eyes from laser of specific wavelengths (532 nm, 1 064 nm, 470 nm, 808 nm and 700–2 000 nm) as well as from supercontinuum laser, and realize cluster linkage alarm and protection through wireless signal interconnection. The laser protection spectacles and detection and alarm composite device has the characteristics of intelligent, modular and multifunctional integration, and its performance meets the design requirements

Key words: laser protective goggles, laser detection alarm, composite protection device, signal interconnection and cluster linkage, supercontinuum laser

随着激光技术的快速发展, 各种类型和多种波长的激光器件及武器系统在激光医学、激光工业加工、环境工程检测、激光制导^[1-3]、激光测距^[4-5]、激光雷达探测^[6-8]、高能激光系统^[9-16]、反无人机激光系统^[17-20]、激光干扰、军事训练, 以及反恐、缉私和作战环境等各个领域的应用日益广泛, 激光辐射眼损伤的防护^[21-26]和激光告警^[27-32]越来越

* 收稿日期: 2023-02-28; 修订日期: 2023-07-14

联系方式: 罗振坤, luozhenkun@hotmail.com。

通信作者: 康宏向, khx007@163.com。

引起人们的重视,特别是短脉冲特定波长激光、超连续谱激光及可调谐激光对人眼的危害尤为严重,当激光来袭时,需要快速有效地做出预警并即时进行防护响应,为实现这一目标,本文设计和研制了一种智能型多功能集成激光防护镜与自动探测告警一体化复合装置。

1 多功能集成激光防护告警复合装置总体结构与工作原理

该防护镜复合装置设计为智能型防护结构,由激光防护镜和激光自动探测告警两部分组成,以激光防护镜为载体,告警装置位于防护镜上方,两者通过告警信号互联和失电型电磁铁实现复合联动,防护镜正常佩戴时,第二防护镜单元上翻,被电磁铁吸合,呈单镜组工作状态,此时防护镜可具有较高的可见光透过率,便于观察和目标识别,当激光来袭时,触发告警装置,驱动电路使电磁铁失去吸力,防护镜向下翻转,与第一防护镜单元复合,双镜组复合防护镜可扩展激光防护波段,提高防护镜的光密度,并由此实现多波长宽频带激光防护与激光探测告警联动的多功能一体化防护。多功能集成激光防护镜与激光自动探测告警复合装置的总体结构及原理见图1;激光防护镜与激光探测告警复合装置见图2。

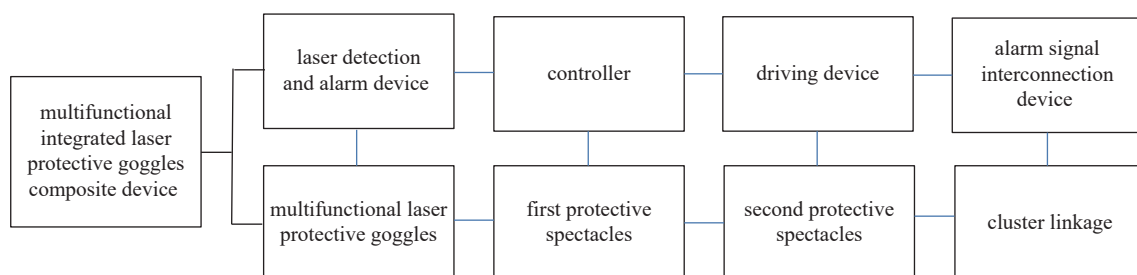


Fig. 1 Block diagram of multifunctional laser protection goggles and laser detection and alarm composite device

图1 多功能激光防护镜与激光探测告警复合装置框图

2 多功能激光防护镜设计与实现

通过对激光辐射眼损伤防护机制机理的分析,依据国家军用标准^[33]有关特定波长激光眼照射限值和人眼可能接受的最大允许激光辐照量和辐照度,以及不同激光照射条件下防护镜衰减量的要求,设计并确定激光防护镜的结构和性能参数,研究构建防护镜多波长宽波段激光复合联动防护体系和一体化防护装置。

2.1 激光防护镜选型与复合技术

基于国内外防护镜和防护材料研究成果和先进技术,开展激光防护镜设计、选型、样品试制、复合技术和防护性能实验测试研究,主要技术方法如下。

2.1.1 实验优选防护材料

实验优选对特定波长激光和超连续谱激光具有高吸收特性,且机械强度、损伤阈值较高的激光防护材料,包括特种光学塑料、有色光学玻璃和新型激光防护复合材料,对不同类别的防护材料及样品的有关光谱特性与物理化学性能进行分析、实验、试制和防护性能测试,掺杂有机或无机染料,展宽吸收带,实现对特定波长和超连续谱激光的防护,研究确定符合设计要求的激光防护材料、结构类型和复合技术。

2.1.2 纳米光学材料复合技术

采用多功能纳米光学材料复合技术,将无机纳米材料均匀复合于有机树脂或PC镜片中,制成的激光防护镜可防护多种波长激光,并具有光学性能好,重量轻,强度高,抗冲击等特点。

2.1.3 强激光限幅复合防护技术

利用VO₂薄膜热致相变和强光限幅复合技术^[34],将具有反饱和吸收及光限幅增强效应的非线性防护材料与VO₂薄膜复合,研究和选择强激光复合防护材料和强光限幅增强复合防护技术,复合方法之一是在专门的真空热压仓内用特种复合材料将防护基质与VO₂薄膜热压复合,制成光限幅复合材料和光限幅器,以提高对多波长宽光谱强激光的多功能集成防护性能。

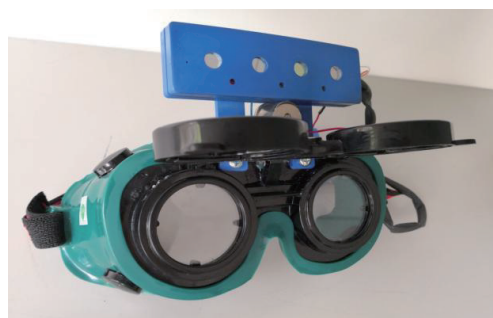


Fig. 2 Multifunctional laser protection goggles and laser protection detection and alarm composite device

图2 多功能激光防护镜与激光防护探测告警复合装置

2.1.4 镀制多层反射介质膜

利用真空镀膜技术,在选定的有色光学玻璃镜片表面镀制对特定激光波长有高反射率的高强度多层介质膜,实验优选合适的反射带宽,提高镜片的光密度和透射比。

2.1.5 增加防护材料强度

实验优选高强度防激光特种光学塑料和光学玻璃为防护镜复合材料,通过在防护材料中加入特殊的交联剂、丝网及强化复合材料,增强材料的抗冲击强度、硬度和耐高低温性能,以及在恶劣环境中对小质量低速破片及流沙的抗冲击防御能力和环境适应性能。

2.1.6 镜片复合结构

采用防护镜复合技术,将镜片组合为复合式结构,利用其结构特点、材料特性和镜片的可互换性有机组合对激光进行衰减,提高防护镜的防护性能和抗冲击防溅射能力,增加防护功能和实用效果。

2.1.7 激光防护性能实验测试平台构建

研究和构建多波长短脉冲激光、连续激光和超连续谱激光防护性能测试平台,以及相应的技术条件和测试方法,按设计要求,对激光防护镜样品的主要性能参数进行测试与评价。

2.2 激光防护镜复合结构与性能

该防护镜为分体与组合式可调结构,通过第一防护镜单元和第二防护镜单元的分体与组合,实现单元镜组对激光的复合防护及功能扩展。使用时,将第二防护镜单元上翻至水平位置,与第一防护镜单元呈 90° ,以使防护镜在无激光侵入时具有良好的透光比,提高能见度,当激光来袭时,在防护镜与激光告警装置的信号互联和联动作用下,使第二防护镜单元下落,与第一防护镜单元折合为一体,对特定波长和超连续谱波段来袭激光进行复合防护。为保证第一防护镜单元和第二防护镜单元的复合效果和稳固性,在两单元镜组的复合面上分别设置及嵌入永磁铁各一块,磁块1和磁块2相互吸合,将前后两个防护镜组紧密复合为一体。当激光威胁解除时,可手动将第二防护镜单元上翻复位,与失电型电磁铁吸合,恢复到初始状态。激光防护镜片可由掺杂染料的无机或有机光学玻璃、光学塑料、特殊结构的光学开关及不同防护机制机理的防护材料制成,可针对某特定波长或光谱波段激光,选择使用相应的防护镜片,进行镜片复合与互换,对不同类型激光器的多种波长激光进行防护。本研究选用对特定波长470 nm、532 nm、808 nm、1 064 nm激光和超连续谱700~2 000 nm激光衰减的防护镜片,以实现多波长宽光谱激光防护。多功能激光防护镜光学结构原理见图3。

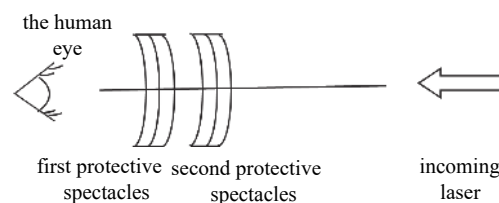


Fig. 3 Schematic diagram of optical structure of multifunctional laser protective goggles

图3 多功能激光防护镜光学结构原理图

2.3 激光防护镜单元配置

2.3.1 第一防护镜单元

在佩戴防护镜时,为保证人眼对目标观察的清晰度和分辨力,防护镜片须具有较高的可见光透过率,在无激光袭扰的情况下,利用第一防护镜单元进行目标观察和防护。第一防护镜单元选用透光性好的优质光学玻璃,目前可供选用的国内外不同牌号的有色光学玻璃有多种,如KG3或GRB3,可对波长为900~3 000 nm及以上光谱波段激光进行防护,光密度2~5,可见光透过率 $\geq 80\%$,或选用QB21,防护波段为700~1 200 nm,光密度3~5,可见光透过率 $\geq 75\%$,将KG3和QB21双镜片复合,防护波段可由700 nm扩展到3 000 nm以上,光密度3~8,可根据需要,选择单镜片或双镜片复合使用,双镜使用时,虽少量降低透光度,但可提高特定波长激光防护的光密度,本研究用Nd:YAG脉冲激光、脉宽10 ns、波长1 064 nm的近红外激光对该镜片进行测试,光密度 ≥ 8 。该镜片的主要特点是:可对宽光谱红外波段激光进行吸收衰减,同时可兼顾高光密度和高可见光透过率两项指标,防护角大,抗冲击和抗激光损伤能力较强,耐磨性好。

2.3.2 第二防护镜单元

第二防护镜单元作为增强防护复合单元,可采用特制光学塑料激光防护镜片,基质材料可选用聚碳酸酯、或聚甲基丙烯酸甲酯、或纳米复合光学材料,在基质材料中掺杂有机染料,通过调整配比和制备方法,对多种特定波长激光进行吸收衰减。本研究用Nd:YAG倍频脉冲激光、脉宽10 ns、波长532 nm的绿激光对所制备的防护镜片

进行测试,光密度 3~7,截止波长 540 nm,可同时紫外和蓝绿波段激光进行有效衰减,可见光透过率 60%~80%。此外,也可选用吸收和反射复合式防护镜片对来袭激光进行防护,本研究采用吸收型光学玻璃为基质材料,在其表面镀制对 532 nm 和 1 064 nm 特定波长激光反射衰减的多层介质膜,充分利用染料吸收型防护镜片对光的吸收带较宽,镀介质膜反射型防护镜片带宽可控,并可实现锐截止的特点,对多波长激光进行吸收和反射衰减,从而获得宽光谱多波长激光防护,吸收型防护镜片主要对红外宽光谱波段激光进行防护,镀介质膜反射型防护镜片主要对 532 nm 和 1 064 nm 特定波长激光进行防护,光密度 ≥ 4 ,可根据需要,选取对应波长的防护镜片与之复合,提高光密度,扩展光谱带宽。

2.3.3 可置换复合式防护镜

利用激光防护镜片的可互换性,在第一和第二防护单元配置不同防护原理和防护性能的组合式防护镜片,以满足不同激光波长、不同发射方式、不同照射强度,以及各种复杂作业环境的激光防护需求。各镜片具有不同的防护波长和光密度,可根据来袭激光波长和辐射强度,以及特定防护需求,选择对应的防护镜片,在两个防护单元放置单镜片、双镜片,或多镜片组合放置,在保证激光防护效果的前提下,尽量提高防护镜的可见光透射比,减轻防护镜重量。本项研究中,对不同类型、不同材料、不同防护机理和多种波长的激光防护镜进行了实验优选、设计制作和防护性能测试,优选出部分防护镜片,作为可置换的复合式防护镜片使用。实验中,对部分 10 多年前老镜片的激光防护性能进行复测和比较,其光密度值无明显差异,例如,对 532 nm 和 1 064 nm 激光衰减的某吸收型塑料防护镜片原光密度值分别为 4.43 和 4.20,复测后的现光密度值为 4.31 和 4.11,其相对偏差为 2.78% 和 2.19%,可见光透过率基本无变化,表明该类防护镜片的光学性能及物理化学性能比较稳定,对某些正规牌号或技术比较成熟的吸收型玻璃防护镜片和镀介质膜的复合型防护镜片亦如此。在原材料样本和技术成果的研究基础上进行设计、改良和制备新型激光防护材料不失为一条捷径。本设计的两个防护单元,其功能可作为激光防护的观测和屏蔽窗口,也可作为镜片互换和随机组合的技术平台。本研究所采用的镜片及组合方式,仅为满足本项目的设计要求而设置,其实可采用的技术方案有很多,可根据实际需要进行选择。此外,对于特殊环境和不同防护需求,还可采用对激光波长和光强都敏感的快响应非线性光学防护材料、光限幅防护材料、光致变色材料、光学开关、衍射型激光全息防护镜片,以及复合防护薄膜的夹层式防护镜片等,这些防护材料有其各自的优势和特点,但某些技术尚不够成熟,应用存在一定的局限性。目前市场和应用环境所佩戴或使用的激光防护器材仍以传统的线性防护材料和防护装备为主,而非线性防护材料和技术尚在研究和快速发展,某些瓶颈技术有待解决。伴随各种新型激光器件和装备的不断涌现,对激光防护的综合性能也提出了新的要求。因此,研究具有高新技术特征的智能型、快响应、多波长和多功能集成的高性能激光防护器材是未来激光防护技术的一个重要发展方向。

3 激光防护自动探测告警装置设计与实现

3.1 激光探测告警装置单元配置

激光防护探测告警装置可用于对不同类型激光装备的多种激光波长进行探测识别,并发出联动告警信号。该装置位于激光防护镜的上方,由探测器和电源两部分组成。探测器功能组件主要包括四个激光接收光学系统、六组接收放大电路、六组阈值电路、六组整形电路、信号处理与控制系统、声光告警电路。四个光学接收窗口分别对应四种激光波长(532 nm、1 064 nm、470 nm、808 nm)和宽光谱激光。采用高灵敏度快响应的激光探测器光电子元件和电路系统,经过信号接收放大处理,对特定波长来袭激光进行声光和振动告警,驱动镜片复合和收发无线联动信号。电源部件主要包括电池、充电器、电源变换器、振动马达、防护镜联动驱动电路、振动告警电路和无线收发机。电源盒侧面装有电池电压指示器和开关,可通过五只 LED 指示灯,提示当前电压大小,可与充电器连接充电。激光防护探测告警系统与电路框图见图 4。

3.2 激光防护探测告警机理与功能实现

激光防护自动探测告警是通过多路激光接收光学系统、信号放大处理电路和控制系统,分别探测激光器所发出的不同波长的激光。一旦探测到激光信号,信号处理电路对信号进行处理和激光波长识别,识别完成后,立即启动镜片关合驱动电路,驱使激光防护镜组在联动装置的作用下折合,形成双镜复合防护,从而避免来袭激光对眼的伤害。与此同时,系统驱动声光告警电路和振动告警电路,进行声光告警或振动告警。声光告警和振动告警可通过开关进行切换,根据环境和实际需要进行选择。声光告警信号是通过不同颜色的指示灯闪烁和蜂鸣器发出的声音进行告警,不同颜色的灯光闪烁,提示有不同波长的激光入侵,例如,目前最常用 Nd:YAG 脉冲激光器所发出的

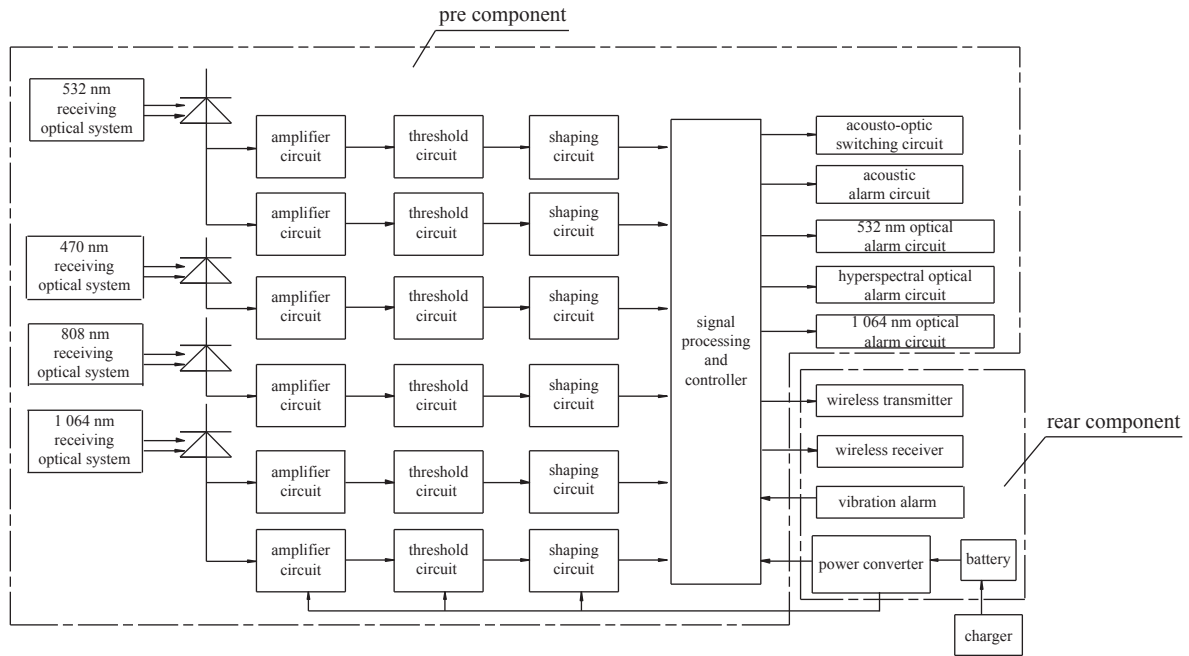


Fig. 4 Block diagram of laser detection and alarm circuit

图 4 激光探测告警电路框图

基频 1064 nm 近红外激光和倍频 532 nm 绿色激光, 当绿色灯光闪烁时, 提示有 532 nm 波长激光入侵, 当红色指示灯闪烁, 提示有 1064 nm 波长激光入侵, 如 532 nm、1064 nm、470 nm、808 nm 四个探测窗口同时探测到宽光谱激光信号, 则白色指示灯闪烁, 蜂鸣器发出的音频告警信号为间歇性蜂鸣声, 根据激光照射强度的不同, 会发出平缓或急促的告警声。如果选择了振动告警, 则声光告警无响应, 振动器发出振动告警信号, 使电源盒剧烈振动, 提示有激光入侵, 应予以警觉和采取相应防护措施。如果激光威胁仍然存在, 振动会再次启动。本研究激光告警装置还具有无线发射和接收功能, 如果作业区域同时存在多名人员, 当激光来袭时, 只要其中一人的激光告警装置探测到激光信号, 就会通过无线发射机自动发送告警信号给周围的同事或战友, 周围人员佩戴的告警装置中的无线接收机就会接收到来袭激光的告警信号, 并形成信号互联, 同时触发周围战友的告警和防护联动装置, 启动告警, 并驱使两个激光防护镜单元复合, 起到防护和警示作用。该激光防护自动探测告警装置探测灵敏度高 (10^{-7} J/cm^2), 响应速度快(光电机制), 可在激光入侵时即时做出响应, 除系统自动探测告警联动防护功能外, 还可通过人的视觉、听觉、震动感知和手动操作, 判断来袭激光的方位、波长和照射强度, 并采取有效防护措施。

性能参数如下:

探测激光波长 532 nm、1064 nm、470 nm、808 nm;

探测激光脉宽 10~1000 ns;

探测告警阈值 10^{-7} J/cm^2 ;

探测光学孔径 8 mm;

探测波长带宽 20~35 nm;

告警与联动响应 灯光闪亮 10 次, 蜂鸣声 10 次, 振动 5 次(约 10 s), 两单元镜组复合, 信号互联与集群联动;

探测视场 $\geq \pm 30^\circ$;

无线收发距离 ~30 m;

工作电压 2.7~5 V;

工作温度 $-10 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$;

重量 探测部件 90 g, 电源部件 145 g(含电池);

外形尺寸 探测器 103 mm×33 mm×15 mm, 电源 76 mm×50 mm×18 mm。

3.3 激光防护告警联动复合结构与性能

多功能激光防护镜的分体与复合联动防护功能是通过一个失电型电磁铁与防护镜单元前端安装的一个直角金属导板来完成吸合和分离动作。失电型电磁铁又称自保持吸盘电磁铁, 根据电磁原理, 采用了与普通吸盘式电

磁铁相反状态的工作方式,即在失电状态下,内置超强吸力的永久磁铁产生强大的吸持力,能将金属负载吸合,而在通电的状态下,因施加的直流电所产生的磁力与内置永久磁铁的固有磁性极性相反,吸力相互抵消使电磁铁不产生吸持力,从而释放所吸载物。失电型电磁铁安装在防护镜架的前上方,由螺钉固定或强力胶粘结与防护镜架相连,金属导板(电工纯铁)安装在可折合的单元防护镜组上方,在未通电状态下,电磁铁与金属导板吸合,使第二防护镜单元上翻至水平位置,当来袭激光触发报警器件工作时,系统电路闭合,使电磁铁极性转换而无吸力,第二防护镜单元利用自身重力下落,与第一防护镜单元复合,从而实现激光告警与单元防护镜组联动复合防护功能。失电型电磁铁的主要特征:微型吸盘式,直流电源,圆盘形强吸力保持式,间歇式通电消磁,在断电时有吸力,通电时无吸力,安全省电,吸力强劲,外壳及铁芯为优质电工纯铁,线圈为一级纯铜线。

失电型电磁铁主要参数如下:

工作电压(DC) 12 V;

电流 0.08 A;

直径(D) 15 mm;

高度(H) 15 mm;

固定螺孔 M4;

吸持板厚度 2 mm;

标准功率 2 W;

通电率 10%(消磁时间 <10 s);

净重 15 g;

最大吸力 2 kg;

强磁耐温强度 80 °C (N35 钕铁硼材质);

工作环境温度 $-5\sim 45$ °C;

工作环境相对湿度 20%~85%。

3.4 激光告警电源和无线收发机

激光告警装置的可插拔式供电电源采用 12 V 锂电池,与无线收发机一起,可放置于防护镜头带后方,以保持防护镜的重力平衡,也可放置在衣袋内,以减轻防护镜的重量,便于开关和充电操作,并可随时更换。

4 多功能防护镜激光防护与告警性能测试

4.1 测试平台与测试方法的构建

在本单位建立的激光防护镜自动检定装置^[35-36]的研究基础上,进一步研究构建了多波长脉冲激光、连续激光和超连续谱激光防护镜防护性能的测试系统、测试方法和测试平台,主要包括: Nd:YAG 脉冲激光、多波长半导体激光、超连续谱激光、系列宽量程激光能量功率测量仪器和多功能光学组件构成的测试系统。多波长激光防护镜防护性能测试系统光路见图 5;连续激光和超连续谱激光防护性能测试平台见图 6;脉冲激光防护和告警性能测试平台见图 7。

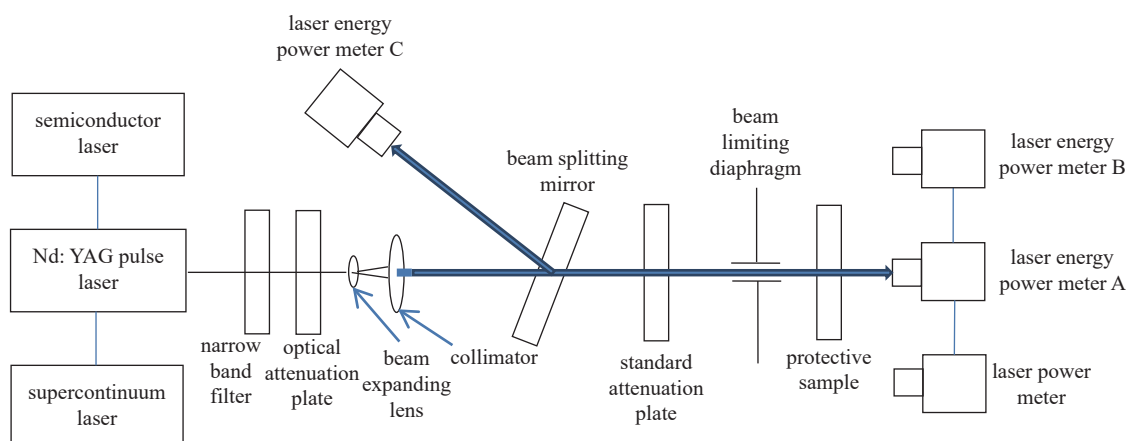


Fig. 5 Optical path diagram of laser protection performance test

图 5 激光防护性能测试光路图

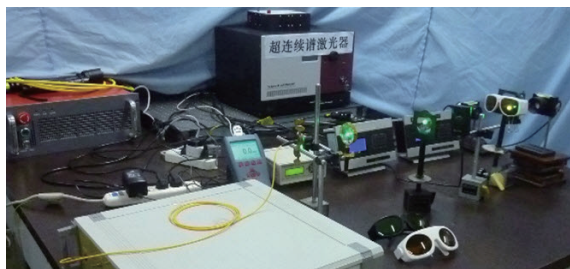


Fig. 6 Continuous laser and supercontinuum laser protection performance test platform

图 6 连续激光和超连续谱激光防护性能测试平台



Fig. 7 Pulse laser protection and alarm performance test platform

图 7 脉冲激光防护与告警性能测试平台

测试系统中,采用脉冲和连续输出两种发射方式的激光源,其中,Nd:YAG倍频脉冲激光器输出波长为532 nm和1 064 nm,脉冲宽度10 ns,重复频率1~20 Hz;两台半导体激光器分别输出连续激光,激光波长分别为532 nm、470 nm和808 nm;超连续谱激光器输出波长400~1 750 nm,重复频率2.0~80 MHz。由激光器发射的光束,经扩束、准直、直径5 mm光阑限束,照射防护样品,用宽量程EP1000D型系列激光能量功率计和PD300-3W-V1激光功率计分别测量激光能量和功率,采用双光路实时监测方法,对激光防护样品的防护与告警性能进行测试,每组测量10次,取平均值和相对标准偏差。

4.2 多波长激光防护镜防护性能测试

采用本研究构建的多波长激光防护镜防护性能测试系统和相应的测试方法,对研制和优选的激光防护材料、防护样品、复合式激光防护镜的防护性能进行测试,其防护样品的防护原理、材料特性、防护波长和防护性能各异,镜片为曲面,镜片厚度约2 mm,分别采用脉冲和连续两种不同发射方式的激光照射,激光波长为532 nm、1 064 nm、470 nm、808 nm,分别给出不同波长单镜片、复合镜片和复合式防护镜左右镜组的光密度和相对标准偏差。多波长激光防护镜防护性能测试结果见表1。复合式多波长激光防护镜防护性能测试结果见表2。

4.3 超连续谱激光防护镜防护性能测试

采用上述激光防护镜防护性能测试系统和方法,分别对所研制的两副复合式防护镜样品的左右镜组及分镜片进行超连续谱激光防护性能测试,由PD300-3W-V1激光功率计设定各激光波长,分别对各波长激光防护性能进行测量,每个波长为1组,每组测量10次,取其各组测量数据的平均值,计算防护样品的光密度平均值和相对标准偏差平均值。复合式超连续谱激光防护镜防护性能测试结果见表3。超连续谱激光防护镜分镜防护性能测试结果见表4。

上表1~4为本研究收集、改进、优选和研制的激光防护镜样品的测试数据,通过不同样品的性能测试,展示各类激光防护镜的材料特性、防护原理、防护性能及特点,为防护镜的选用、组合、互换及使用提供参考,并提供相应的数据依据和技术平台。其中,表1中的A~H表征不同类型、不同材料、不同防护机理的激光防护镜对不同波长和不同发射方式激光的防护性能;表2表征复合式激光防护镜在不同激光照射条件下对特定波长激光的防护性能;表3、表4表征复合式激光防护镜及其分镜对超连续谱激光的防护性能。复合式激光防护镜是按设计要求优选的2镜片或3镜片组合而成,每个镜片具有不同的波长选择和激光衰减倍率,以及不同的光学特性及功能。不同的镜片组合,分别构成防护镜的第一单元和第二单元,不同单元镜组分别对应于不同的防护波长和光谱波段,以实现多波长宽波段激光的有效防护。不同类型的防护镜及组合方式适用于不同的激光作业环境和不同激光照射条件,可根据具体的防护需求进行选择和使用。该防护镜架构和组合变换模式能够满足本设计多功能激光防护需求,结构新颖、设计合理、使用方便、机动灵活、便于操作。

4.4 激光防护探测告警性能测试

利用上述激光防护镜测试平台,对所研制的两副多功能复合式激光防护镜样品的激光防护探测告警性能进行测试。Nd:YAG激光器输出脉冲激光,脉冲宽度10 ns,重复频率1 Hz,波长532 nm和1 064 nm,光路中加入光学衰减片,调节激光照射能量,分别测量0°、±15°、±30°不同入射角的激光防护告警性能,各组测量10次,取平均值。激光防护探测告警性能测试结果见表5。

表5表征复合式激光防护镜与激光探测告警一体化装置的激光防护探测告警性能及其联动防护功能。表中显示所研制的两副防护镜在入射角±30°范围内532 nm和1 064 nm两种特定波长激光防护告警的性能参数,其

表 1 多波长激光防护镜防护性能测试结果

Table 1 Protection performance test results of multi-wavelength laser protective spectacles

sample number	emission mode	average optical density value				relative standard deviation/%			
		532 nm	1064 nm	470 nm	808 nm	532 nm	1064 nm	470 nm	808 nm
A-SL4-001	M	4.31	4.11			0.48	1.69		
A-SL4-002	M	4.98	4.00			2.51	1.61		
A-SL4-003	M	4.01	3.97			1.55	1.81		
B-BL10-001	M		4.72				0.28		
B-BL10-002	M		4.51				2.59		
B-BL10-003	M		4.46				1.39		
B-BL15-001	M		5.24				0.11		
B-BL15-002	M		4.60				0.22		
B-BL15-003	M		4.61				0.20		
C-FXX1-001	M		1.87				0.55		
D-NM1-001	M	4.05	4.00			0.38	1.61		
D-NM7-001	M	2.56	4.15			0.74	1.25		
E-JZF1-001	M	4.98	4.72			0.58	0.63		
E-JZF1-002	M	4.83	4.18			0.64	0.79		
F-JT1-001	M	5.93	4.51			0.52	0.76		
G-GD-01-001*	M	5.83	4.76			0.07	0.06		
G-GD-02-002**	M	4.72	4.74			0.28	0.07		
H-QX1-001	M	2.24				0.89			
A-SL1-001	L	4.07		4.06		0.04		0.46	
A-SL1-002	L	4.05		4.16		0.51		0.34	
A-SL1-003	L	3.96		4.08		0.52		0.62	
A-SL4-001	L	4.65		4.34	1.99	1.36		0.03	0.52
A-SL4-002	L	4.66		5.05	2.11	1.37		1.16	0.34
A-SL4-003	L	4.31		4.25	2.15	0.58		0.35	0.67
B-BL10-001	L				1.67				0.27
B-BL15-001	L				5.96				2.70
B-BL1-001	L	3.53				0.24			
B-BL3-001	L	4.65				0.20			
D-NM3-001	L	3.28		3.44		0.48		0.78	
D-NM4-001	L	3.25		3.38		0.68		0.77	
D-NM7-001	L	2.73		3.12		0.22		0.31	

Note: M – pulse laser; L – continuous laser; * static; ** dynamic

A – optical plastic absorption type (SL);

B – colored optical glass absorption type (BL);

C – nonlinear optical material absorption type (FXX);

D – nano-composite optical material absorption type (NM);

E – glass absorption + dielectric film reflection compound type (JZF);

F – polycarbonate absorption type (JT);

G – photoelectric switch polarization attenuation type (GD);

H – holographic grating diffraction attenuation type (QX).

中, 激光照射能量范围为 18.03~68.76 nJ, 平均激光辐照量为 $(0.92\sim 3.51)\times 10^{-7}$ J/cm², 相对标准偏差为 0.52%~2.94%。依据中国国家标准(GB7247.1-2001)和国家军用标准(GJB 470A-97)关于激光眼损伤照射限值和眼最大允许照射量的要求, 设定探测告警阈值为 10^{-7} J/cm², 在此激光照射条件下的告警和防护能有效保护人眼安全, 避免激光眼损伤。

表 2 复合式多波长激光防护镜防护性能测试结果

Table 2 Protection performance test results of composite multi-wavelength laser protective spectacles

sample number	emission mode	average optical density value				relative standard deviation/%			
		532 nm	1064 nm	470 nm	808 nm	532 nm	1064 nm	470 nm	808 nm
SL4-BL10-BL15 *	M	5.33	6.72			0.14	0.12		
SL4-BL10-BL15 **	M	5.32	6.71			0.26	0.31		
SL4-BL10-BL15 #	M	5.18	6.33			0.37	0.15		
SL4-BL10-BL15 ##	M	5.18	6.33			0.14	0.06		
SL4-BL10-BL15	L	4.43		4.18	5.55	0.95		0.39	1.42
SL4-BL10--001	L	4.58		4.76	5.33	1.56		0.35	0.62
SL4-BL15--001	L	4.45		4.85	5.49	1.04		0.89	2.71

Note: M – pulse laser; L – continuous laser

* protection spectacles 1 left; ** protection spectacles 1 right; # protection spectacles 2 left; ## protection spectacles 2 right

表 3 复合式超连续谱激光防护镜防护性能测试结果

Table 3 Protection performance test results of composite supercontinuum laser protective spectacles

sample number	OD		S		OD		S		OD		S		OD		S		mean optical density	mean relative standard deviation/%
	532 nm	1064 nm	470 nm	808 nm	1400 nm	1700 nm	1800 nm											
SL4-BL10-BL15 *	2.10	0.46	2.08	0.92	2.26	0.21	2.29	0.48	4.12	0.62	3.72	0.11	3.79	1.04	2.91	0.55		
SL4-BL10-BL15 **	2.08	0.72	2.05	0.70	2.26	0.37	2.31	0.48	3.99	1.12	3.80	0.58	3.84	0.44	2.90	0.63		
SL4-BL10-BL15 #	2.13	0.85	2.06	0.55	2.32	0.35	2.35	0.43	4.14	0.33	3.88	1.15	3.81	0.68	2.96	0.62		
SL4-BL10-BL15 ##	2.11	0.47	2.07	0.49	2.30	0.46	2.37	0.55	4.12	1.07	3.84	0.78	3.82	0.89	2.95	0.67		

Note: OD – optical density; S – relative standard deviation (%); * protection spectacles 1 left; ** protection spectacles 1 right; # protection spectacles 2 left; ## protection spectacles 2 right

表 4 超连续谱激光防护镜分镜防护性能测试结果

Table 4 Test results of protection performance of supercontinuum laser protective spectacles

sample number	OD		S		OD		S		OD		S		mean optical density	mean relative standard deviation/%
	532 nm	1064 nm	470 nm	808 nm										
SL-4	1.06	0.19	1.69	0.48	1.09	0.20	1.19	0.20	1.26	0.27				
BL10	0.69	1.39	1.39	0.32	0.69	0.27	0.69	0.23	0.87	0.55				
BL15	1.20	0.35	2.04	0.40	1.20	0.35	1.33	0.17	1.44	0.32				

Note: OD – optical density; S – relative standard deviation (%)

表 5 激光防护探测告警性能测试结果

Table 5 Test results of laser protection detection and alarm performance

sample number	incidence angle	E			H			S			laser alarm response				
		532 nm	1064 nm	light	sound	vibration	dual-spectacles recombination	cluster linkage							
LZK-01	+30	49.53	2.53	1.78	18.32	0.93	0.58	Y	Y	Y	Y	Y			
	+15	49.48	2.52	2.94	18.03	0.92	1.20	Y	Y	Y	Y	Y			
	0°	41.94	2.14	0.79	20.01	1.02	0.52	Y	Y	Y	Y	Y			
	-15	48.09	2.45	2.14	18.59	0.95	2.21	Y	Y	Y	Y	Y			
	-30	48.33	2.47	1.45	18.48	0.94	2.12	Y	Y	Y	Y	Y			
LZK-02	+30	68.34	3.49	0.69	43.31	2.21	1.54	Y	Y	Y	Y	Y			
	+15	68.29	3.48	1.08	43.69	2.23	2.25	Y	Y	Y	Y	Y			
	0°	66.08	3.37	2.89	44.33	2.26	0.85	Y	Y	Y	Y	Y			
	-15	68.43	3.49	0.93	43.55	2.22	1.84	Y	Y	Y	Y	Y			
	-30	68.76	3.51	0.67	44.16	2.25	0.93	Y	Y	Y	Y	Y			

Note: E – average laser irradiation energy (nJ); H – average laser radiant exposure (10^{-7} J/cm²); S – relative standard deviation (%); Y – responsive; N – no response

研究表明,当激光防护告警复合装置探测到激光入侵时均能以不同方式即时发出各种告警信号和复合防护响应,包括不同颜色灯光闪烁、音响和振动告警,驱使两个防护镜单元镜组复合,对 532 nm、1 064 nm、470 nm、808 nm 和 700~2 000 nm 特定波长激光和超连续谱激光进行有效防护,可通过无线信号互联实现集群联动告警和防护。该复合装置的主要功能及特点是:多波长超连续谱双镜复合激光防护、激光防护自动探测告警信号互联和集群联动多功能一体化;不同类别多种波长激光防护镜片置换与组合;多种激光防护探测告警响应方式、灵敏度高、响应速度快、视场角大、功耗低、告警方式可切换、信息共享;防护告警复合装置功能多、结构紧凑、重量轻、便于佩戴、便捷实用。

5 结 论

设计研制了智能型多功能激光防护镜与激光防护自动探测告警装置一体化样机 2 部,对不同类型、不同材料、不同防护机理的激光防护镜和多种信号互联的激光防护自动探测告警系统进行了设计制作、实验优选、性能测试和功能整合,完成了多种激光告警信号响应和多波长宽光谱激光防护镜复合联动的告警防护功能设计与实现。该防护告警复合装置可对来袭激光进行声光和振动告警,驱使双单元防护镜组复合,对多种特定波长激光和超连续谱激光进行有效防护,实现无线信号互联和集群联动自动探测告警与防护。该防护镜复合装置具有智能化、模块化、多功能集成的特点,结构合理、模式新颖、技术可行,各项性能符合设计要求。

参考文献:

- [1] 赵志刚,刘虎,尚乾,等. 激光驾束制导弹药发展现状及在俄乌冲突中的应用[J]. 激光与红外, 2022, 52(12): 1747-1751. (Zhao Zhigang, Liu Hu, Shang Qian, et al. Development status of laser beam riding guidance munitions and its application in Russia Ukraine conflict[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(12): 1747-1751)
- [2] 宋振之,韩道文,吴中伟,等. 激光半主动制导导弹作战效能影响分析[J]. 激光与红外, 2022, 52(2): 253-258. (Song Zhenzhi, Han Daowen, Wu Zhongwei, et al. Analysis of operational effectiveness of laser semi-active guided missile[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(2): 253-258)
- [3] 曹晓荷,朱斌,尚建蓉,等. 激光制导伪随机编码信号解码技术[J]. 激光技术, 2021, 45(2): 155-161. (Cao Xiaohu, Zhu Bin, Shang Jianrong, et al. Decoding technique of laser-guided pseudo-random coded signals[J]. Laser Technology, 2021, 45(2): 155-161)
- [4] 张小龙,徐广平,曹昌东. 舰面光电制导设备远程激光测距技术问题研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(8): 1177-1181. (Zhang Xiaolong, Xu Guangping, Cao Changdong. Research on long-range laser ranging technology of ship surface photoelectric guidance equipment[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(8): 1177-1181)
- [5] 张德斌,江清波,王晔,等. 国外地面激光测距目标指示器的发展现状[J]. 激光技术, 2021, 45(1): 126-130. (Zhang Debin, Jiang Qingbo, Wang Ye, et al. The abroad development of laser target designation[J]. Laser Technology, 2021, 45(1): 126-130)
- [6] 朱峻可,李丽娟,林雪竹. 激光雷达测量系统的测量场规划研究[J]. 激光技术, 2021, 45(1): 99-104. (Zhu Junke, Li Lijuan, Lin Xuezu. Research on the measurement field planning of Lidar measurement system[J]. Laser Technology, 2021, 45(1): 99-104)
- [7] 梁晓峰,杨泽后,王顺艳,等. 基于差分吸收激光雷达有毒有害气体遥测进展[J]. 激光技术, 2021, 45(1): 53-60. (Liang Xiaofeng, Yang Zehou, Wang Shunyan, et al. Development of toxic and harmful gas remote sense based on differential absorption Lidar technology[J]. Laser Technology, 2021, 45(1): 53-60)
- [8] 罗振坤,王秋华. 化学/生物战剂激光雷达探测技术[J]. 医疗卫生装备, 2011, 32(1): 81-84. (Luo Zhenkun, Wang Qiuhua. Lidar detection technology for chemical/biological agents[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2011, 32(1): 81-84)
- [9] Shi L K, Pei Y, Yun Q J, et al. Agent-based effectiveness evaluation method and impact analysis of airborne laser weapon system in cooperation combat[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(4): 442-454.
- [10] Jabczyński J K, Gontar P. Impact of atmospheric turbulence on coherent beam combining for laser weapon systems[J]. Defence Technology, 2021, 17(4): 1160-1167.
- [11] 易亨瑜,齐予,易欣仪,等. 美国舰载激光系统的成熟度评估[J]. 应用光学, 2021, 42(1): 9-15. (Yi Hengyu, Qi Yu, Yi Xinyi, et al. Technology readiness level assessment on ship-borne laser weapon system[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(1): 9-15)
- [12] 任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(9): 62-69. (Ren Guoguang. Current situation and development trend of high energy laser weapon[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(9): 62-69)
- [13] 刘小强,杨修林,陆培国,等. 激光武器控制系统研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(8): 1238-1245. (Liu Xiaoqiang, Yang Xiulin, Lu Peiguo, et al. Analysis of control system for high energy laser system[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(8): 1238-1245)
- [14] 罗磊,谭碧涛. 舰载激光武器作战运用研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(7): 1058-1063. (Luo Lei, Tan Bitao. Research on operational application of shipborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(7): 1058-1063)
- [15] 易亨瑜,锁兴文,易欣仪,等. 美国运输机机载激光系统研制进展[J]. 激光技术, 2021, 45(2): 174-181. (Yi Hengyu, Suo Xingwen, Yi Xinyi, et al. Development of AC-130J AHSL system[J]. Laser Technology, 2021, 45(2): 174-181)
- [16] 李朝龙,崔旭涛,赵寒,等. 战术激光武器陆战场运用思考[J]. 激光与红外, 2020, 50(11): 1298-1302. (Li Chaolong, Cui Xutao, Zhao Han, et al. Research on the use of tactical laser weapons in the field[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(11): 1298-1302)
- [17] 吴玲,卢俊霖,许俊飞. 激光武器反无人机集群建模与效能评估[J]. 激光与红外, 2022, 52(6): 887-892. (Wu Ling, Lu Junlin, Xu Junfei. Modeling and effectiveness evaluation on UAV cluster interception using laser weapon systems[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(6): 887-892)

- [18] 杨剑波, 宗思光, 陈利斐. 舰载激光武器对典型无人机蜂群目标毁伤距离研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(5): 745-751. (Yang Jianbo, Zong Siguang, Chen Lifei. Research on destruction distance of shipborne laser weapon to typical UAV swarm target[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(5): 745-751)
- [19] 王喆, 许凌飞, 顾村锋. 针对复合材料无人机的激光武器系统杀伤效能仿真计算[J]. 空天防御, 2018, 1(1): 63-68. (Wang Zhe, Xu Lingfei, Gu Cunfeng. Simulation of damage effect of laser weapon system against composite unmanned aerial vehicle[J]. Air & Space Defense, 2018, 1(1): 63-68)
- [20] 徐国亮, 赵书斌, 王勇. 舰载激光武器拦截无人机技术指标分析[J]. 现代防御技术, 2015, 43(5): 12-17. (Xu Guoliang, Zhao Shubin, Wang Yong. Technology analysis of shipborne high energy laser weapon systems intercepting UAVs[J]. Modern Defense Technology, 2015, 43(5): 12-17)
- [21] 马琼, 范应威, 梁洁, 等. 超连续谱激光可见光谱段致人眼眩目效应研究[J]. 激光生物学报, 2020, 29(1): 75-79. (Ma Qiong, Fan Yingwei, Liang Jie, et al. Research on dazzling effects of human eyes induced by the visible band irradiation of supercontinuum laser[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2020, 29(1): 75-79)
- [22] Coffey K, Abel L, Karas R, et al. Effect of laser eye protection devices on color perception[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2023, 40(3): A9-A15.
- [23] Zhang Q, Ma Z, Gao L H, et al. Laser stealth and laser protection properties of oxide-carbide coatings prepared by atmospheric plasma spraying[J]. Ceramics International, 2022, 48(21): 31389-31396.
- [24] Xu Z, Zhang L, Bai G H, et al. Hybrid effect of nanoparticles-containing atomization system for highly efficient angle-independent laser protection[J]. Materials Letters, 2022, 325: 132845.
- [25] Legall H, Schwanke C, Bonse J, et al. X-ray radiation protection aspects during ultrashort laser processing[J]. Journal of Laser Applications, 2020, 32: 022004.
- [26] 罗振坤, 王秋华, 高光煌, 等. 激光辐射多功能集成防护镜光学特性与复合技术[J]. 激光技术, 2011, 35(4): 486-491. (Luo Zhenkun, Wang Qiuhua, Gao Guanghuang, et al. Optical characteristics and compound technologies of multifunction protection goggles against laser radiation[J]. Laser Technology, 2011, 35(4): 486-491)
- [27] Shi J, Zhang R, Niu J Q, et al. Research on two-dimensional laser warning integrated detection technology[J]. Optik, 2022, 270: 170034.
- [28] Tayel M, Shehata M, Mohamed A, et al. Robust design and analysis for opto-mechanical two array laser warning system[J]. Defence Technology, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.12.009>.
- [29] Zhang R, Yang X M, Shi J, et al. Integrated optical system design for large-field-of-view and broad-spectrum laser warning[J]. Applied Optics, 2022, 61(14): 4187-4194.
- [30] Wojtanowski J, Jakubaszek M, Zygmunt M. Freeform mirror design for novel laser warning receivers and laser angle of incidence sensors[J]. Sensors, 2020, 20: 2569.
- [31] El-Sherif A F, Ayoub H S, El-Sharkawy Y H, et al. The design and implementation of photoacoustic based laser warning receiver for harsh environments[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 385-396.
- [32] 刘彤宇, 闫秀生, 王恒立. 国外机载导弹逼近告警装备发展趋势分析[J]. 激光与红外, 2022, 52(8): 1107-1111. (Liu Tongyu, Yan Xiusheng, Wang Hengli. Analysis on the trend of foreign airborne missile approach warning technology[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(8): 1107-1111)
- [33] GJB 470A-97, 军用激光器危害的控制和防护[S]. (GJB 470A-97, Control and protection for military laser hazard[S])
- [34] 罗振坤, 王秋华, 刘海峰, 等. 基于VO₂薄膜相变的强光限幅机制与复合防护技术[J]. 医疗卫生装备, 2010, 31(8): 27-29. (Luo Zhenkun, Wang Qiuhua, Liu Haifeng, et al. Optical limiting mechanism and protective technology for strong light based on phase transition of VO₂ film[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2010, 31(8): 27-29)
- [35] 罗振坤, 刘海峰, 孙嵘, 等. 激光防护镜自动检定装置与技术研究[J]. 医疗卫生装备, 2009, 30(7): 17-20. (Luo Zhenkun, Liu Haifeng, Sun Rong, et al. Research of the automatic verification device and testing technology for laser protective spectacles[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2009, 30(7): 17-20)
- [36] 罗振坤, 孙嵘, 王秋华, 等. 激光防护镜自动检定装置测量不确定度的评定[J]. 医疗卫生装备, 2009, 30(12): 8-11. (Luo Zhenkun, Sun Rong, Wang Qiuhua, et al. Measurement uncertainty evaluation of automatic verification device for laser protective spectacles[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2009, 30(12): 8-11)