

文章编号: 1001-3806(2011)04-0486-06

激光辐射多功能集成防护镜光学特性与复合技术

罗振坤¹, 王秋华², 高光煌¹, 孙 嵘¹, 陈宗礼¹, 张桂素¹

(1. 军事医学科学院 放射与辐射医学研究所, 北京 100850; 2. 解放军总医院 南楼康复医学科, 北京 100853)

摘要: 为了对激光和微波辐射进行有效防护, 研究了防激光-微波-激光探测告警一体化的多功能防护镜与复合技术, 采用多功能防护材料与复合技术、夹层材料与真空热压复合技术、抗冲击防溅射眼防护技术、分体和组合式可调防护镜技术进行了多功能防护性能测试, 以及环境适应性能、生物效应和工效学测试。介绍了多功能防护镜复合技术特征、光学特性和相关技术参量。结果表明, 多功能防护镜的紫外辐射透射比为 0.0003 ~ 0.0005; 经环境试验并存放 10 年后的防护镜光密度相对偏差为 0.0024 ~ 0.035; 光密度非均匀性为 0.00059 ~ 0.0011; 0° ~ 30° 激光入射角光密度相对偏差为 0.0061 ~ 0.012; 不同偏振方向激光照射, 0° ~ 30° 激光入射角光密度相对偏差为 0.0019 ~ 0.014; 激光辐照量为 578.5 mJ · cm⁻² ~ 2405 mJ · cm⁻², 佩戴防护镜的兔眼未见损伤。该防护镜各项性能指标符合设计和使用要求, 并应用于科研、教学、生产、训练和医疗, 起到了良好的防护效果。

关键词: 激光技术; 激光-微波-激光探测告警; 多功能防护镜; 光学特性; 复合防护技术; 性能测试

中图分类号: R852.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.012

Optical characteristics and compound technologies of multifunction protection goggles against laser radiation

LUO Zhen-kun¹, WANG Qiu-hua², GAO Guang-huang¹, SUN Rong¹, CHEN Zong-li¹, ZHANG Gui-su¹

(1. Institute of Radiation Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850, China; 2. Department of Rehabilitation Medicine of Nanlou, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

Abstract: To achieve effective protection against laser and microwave radiation, the compound technologies incorporating laser and microwave protection and laser warning were studied and this kind of multifunction protection goggles were designed. The key technologies include multifunction protection materials and compounded technology, sandwich type lenses compounded technology by means of heat press in vacuum, eye protection technology of resisting the splash induced by impact, adjustable protection eyeglasses technology between separated type and combined type. Multifunction protection performances of the developed protection goggles were tested. In addition, environment adaptability, laser biology effect and human-machine work efficiency were tested. The optical characteristics and compound technologies of multifunction integration protection goggles as well as relative techniques parameters were introduced. The experimental results show that ultraviolet transmittance of multifunction protection goggles is 0.0003 ~ 0.0005; relatively deviation of optical density of the goggles passing environment test and stored for 10 years is 0.0024 ~ 0.035; non-uniformity of optical density of the spectacles is 0.00059 ~ 0.0011; relatively deviation of optical density of the spectacles at laser incident angle of 0° ~ 30° is 0.0061 ~ 0.012; relatively deviation of optical density of the spectacles at laser incident angle of 0° ~ 30° is 0.0019 ~ 0.014 for laser exposure at different polarization directions; rabbit eyes wearing with the spectacles were not damaged at laser radiant exposure of (578.5 ~ 2405) mJ · cm⁻². All performance indexes of this goggles accord with the demands of design and application. The multifunction protection goggles have good protective effect and can be used in the science research, teaching, manufacture, training and medical treatment.

Key words: laser technique; laser-microwave-laser detection alarm; multifunction protection goggles; optical characteristics; complex protective technology; performance test

引言

随着激光和微波技术日益广泛深入地发展和应

用,对激光和微波的辐射损伤防护问题也越来越受到人们的关注。众所周知,激光是波长为 180nm ~ 1mm 的电磁辐射,从远红外线、可见光到紫外线均有激光谱线,眼的屈光介质具有很强的聚焦作用,可将入射光束汇聚,从而使视网膜单位面积所接收的光能量,比入射到角膜的能量提高约 10⁵ 倍。近年来,国内外学者已广泛研究或使用多种类型及不同工作原理的激光防护镜和防护材料,除传统的吸收式、反射式、复合式等激

作者简介:罗振坤(1954-),男,副研究员,硕士生导师,主要从事激光医学、激光辐射防护和激光医学计量的研究。

E-mail: luozhenkun@hotmail.com

收稿日期:2010-09-29;收到修改稿日期:2010-11-02

光防护镜外,还开展了激光衍射技术、像差技术和多种非线性激光防护材料研究,如 C_{60} , C_{70} 和 VO_2 等,以实现对不同波长激光的防护^[1-12]。但受材料性能和制备技术的限制,许多材料尚处在研究阶段,达不到实际应用的要求。目前各类不同波长和不同发射原理的激光器多达数十种,而激光和微波辐射防护可供选择的防护镜却很少,而且仅能防护有限的激光波长,适用范围比较窄,作者基于激光辐射眼损伤和医学防护原理,设计研制了防多波长激光、防微波和激光探测告警为一体,并具有高抗冲击强度的多功能集成防护镜,对其光学特性与复合防护技术进行了研究。

1 多功能集成防护镜防护机制与复合技术

该防护镜由一个带护边的镜架及嵌入在镜架上的夹层复合式结构的镜片和激光探测报警系统组成,护边质轻柔韧,缀有4个钮扣式通气阀,并设有可调式弹性佩带,防护镜片分为两组,通过折合,可单镜分体使用,也可双镜组合使用,防护镜片为曲面平光,镜片直径50mm,防护镜总质量小于200g。

1.1 多功能防护镜实验流程

多功能防护镜的研究主要涉及到材料、复合技术和性能测试,从选材到制备,从防护机理到建立方法,从复合加工到技术整合,从选型到定型,从原理实验到综合性能检测,各项技术相互穿插交融,相辅相承,本项研究的实验流程见图1。

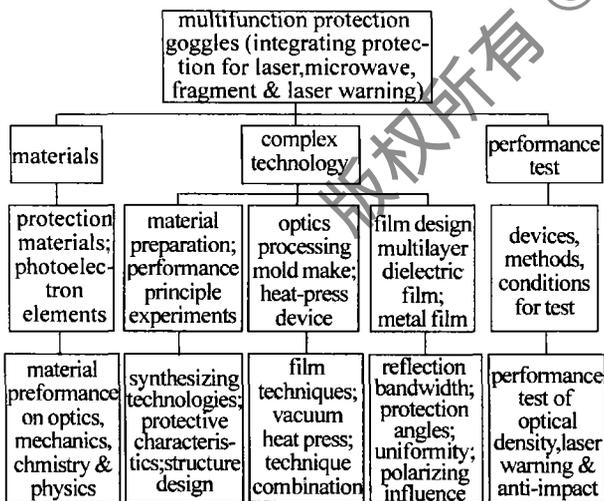


Fig. 1 Flow chart of multifunction protection goggles experiments

1.2 多功能复合防护材料与技术

由于染料吸收型防护滤光片对光的吸收带往往较宽,而镀介质膜的反射型防护滤光片可控制带宽,并可实现锐截止,因而采用染料吸收型滤光镜片衰减紫外和红外波段激光,而采用介质膜滤光镜片反射衰减可见光波段激光,从而获得多波长激光防护,并实现防护镜的高光密度和高可见光透过率两项指标的兼顾。可

选方案之一是以特种激光防护有色光学玻璃或掺杂钨盐和葱醌染料的聚碳酸酯或聚甲基丙烯酸甲酯光学塑料为防护镜基质材料,并根据需要,在其表面镀制对特定波长激光反射衰减的多层介质膜,制成多波长激光衰减的复合型防护镜片,防护波长包括532nm, 1060nm, 790nm, 840nm和近红外波段调谐激光,除特别研制的防护材料外,目前可供选择的国内外不同牌号的有色光学玻璃有多个品种,例如GRB3, KG3, QB21, BG38, BG23, C3C21等,如镜片厚度2mm,其光密度为2~4,可见光透过率90%左右,近红外光谱区的吸收带700nm~1100nm。微波屏蔽衰减片选用具有高透明度的光学玻璃为基质材料,在其表面镀制屏蔽作用强的防微波特种金属薄膜材料,而在另一表面镀制多层介质膜,从而起到了在一个镜片上防护激光和微波的双重作用。

1.3 多层介质膜技术

利用真空镀膜技术,在选定的基质材料上镀制对特定激光波长反射衰减的多层介质膜,在镀膜技术中常出现的一个问题是防护角较小,镜片的光密度值往往随入射角度的增大而降低,当激光 0° 入射时,由于介质膜的厚度是指定防护波长的 $1/4$,这时光干涉最强,反射光相互加强,透射光减弱,衰减效果最好,而入射光偏转一个角度后,激光在介质膜中的光程大于 $1/4$ 波长,光的干涉逐渐消弱,随着角度增大,衰减效果变差,为了保证防护效果,本研究通过精密的膜系设计,采用交替镀制高低折射率的方法,并试验选定合适的带宽,从而扩展了防护角,使特定波长激光在 $\pm 30^\circ$ 入射角内可进行有效衰减,同时,又保证可见光波段具有高透过率。为了减少镜片界面对可见光的反射损耗,可在镜片的表面镀3层增透介质膜(减反射膜),膜层的厚度分别为 $\lambda/4, \lambda/2, \lambda/4$,镀膜材料分别为 CeF_3, ZrO_2, MgF_2 ,在可见光区域内(420nm~650nm)可达到宽带减反射,平均反射率为0.5%。

1.4 夹层复合防护材料与复合技术

防护镜夹层材料选用可塑性好,透明度高、粘附力强的聚乙烯醇缩丁醛(polyvinyl butyral, PVB)胶片材料,它具有优良的光学和机械性能,其透光率为85%~91%,拉伸弹性模量24GPa~28GPa,拉伸强度28MPa~59MPa,悬臂梁缺口抗冲击强度63J/m²,最高使用温度115℃,特别是对玻璃、介质膜、金属膜等材料的高强度粘合作用,使复合镜片在受到很大的冲击力时仍能粘住镜片而不分离。利用这一特性,将其作为防护镜夹层的粘接材料,采用真空热压技术,将微波屏蔽衰减片和吸收-反射激光防护滤光镜片组合压制为一体,利用其高强度的粘合作用与整体效果,增强防护镜片的抗

冲击性能,并实现防激光、微波、破片为一体的综合性防护效果;镜片上所镀制的金属膜和介质膜被分别复合在组合镜片的夹层内,从而避免或减少了各种环境因素所引起的机械、物理及化学损伤,如:磨擦、雨淋、光损、盐雾、霉菌和腐蚀性化学物质等,保证了膜层和防护基质材料的正常功效,从光学层面考虑,玻璃吸收滤光片的折射率为 1.53,而 PVB 胶片的折射率为 1.50,其折射率系数非常接近,使复合后的镜片避免或减少了由不同介质的界面所产生的反射光损耗,从而提高了镜片的透光度。

镜片热压复合的具体工艺是这样的,在真空高压仓内,将组合镜片叠放于专用的层压模具中,逐渐提高仓内温度并同时镜片增加压力,仓内温度为 120℃ ~ 150℃、压力为 10kg/cm² ~ 15kg/cm² 时,夹层式组合镜片即可压制而成,为了解决胶片与不同功能材料之间的化学相容性和热膨胀问题,对不同材料选取了不同的加热加压条件和温度场,以及粘合材料在熔融和固化过程中所需要的真空条件,以加强粘合力,并制止气泡的形成。此外,热压复合所用夹具的光洁度也是至关重要的,它直接影响到热压后镜片的最后质量,层压复合技术就是将不同功能防护镜组件进行无应力复合,制成能在不同激光-微波和复杂作业环境下使用的高强度多功能防护镜。

1.5 抗冲击复合材料与技术

Table 1 Testing results of optical performance parameters of multifunction protective spectacles

test item	transmittance of violet irradiation	focal power D	prism deviation Δ	performance of anti-impact	haze	performance of anti-abrasion of eyeglasses
standard demand	250nm ~ 380nm, ≤ 0.05	$\leq \pm 0.13$	perpendicular prism deviation ≤ 0.18 , level prism deviation ≤ 0.50	no mar of eyeglasses after impact	$< 2.0\%$	weight of abrasive 200g, rate of surface attrition $< 5\%$
result of actual measurement	1* 0.0003 2* 0.0005 3* 0.0005	+ 0.07 ~ - 0.11	0.06 ~ 0.09 0.17 ~ 0.24	no mar of eyeglasses	0.80% ~ 1.10%	1.0%
conclusion	eligibility					

2.2 光密度非均匀性测试

防护镜片的厚薄不均或膜层不匀是引起光密度(optical density, OD)不均匀的主要原因。标准要求除镜片边缘 5mm 外,各处光密度非均匀性应小于 3.0%。实验中采用本课题组研究和建立的激光防护镜自动检定装置和分束实时监测方法^[17-18],以 532nm

高透明的聚碳酸酯材料可掺杂染料或镀制多层介质膜,制成对特定波长激光具有高吸收或高反射衰减作用的防护滤光镜片,聚碳酸酯材料具有较高的抗冲击强度、重量轻、可塑性高、其重量比玻璃镜片轻 50%,将它与其它功能镜片热压复合,置于防护镜内靠眼睛一侧,能避免破片或击打物强烈冲击时由玻璃后表面的溅射而引起的眼损伤,可抵御小质量低速钢制破片的冲击,此外,组合镜片还包括可置换的防护镜片,在对不同波长激光进行防护,或当镜片受损时,可选择性地使用和更换防护镜片。

2 多功能防护镜光学特性

按国家相关防护标准和医疗卫生装备要求^[13-16],已对所研制的多功能防护镜的防激光、防微波、抗冲击和激光探测报警等主要技术指标和性能其量进行综合测试与评价,相关测试结果已另有叙述,这里主要介绍多功能防护镜的光学特性及环境适应性能、防护镜光密度均匀性、不同激光入射角光密度、不同偏振方向光密度、防护带宽、激光生物效应和工效学测试,并给出相应的测试结果。

2.1 光学性能测试

测试项目包括紫外辐射透射比、光焦距、棱镜偏差、雾度、抗冲击、镜片耐磨性能,测试结果见表 1。

和 1064nm 激光为照射光源,脉冲宽度约 10ns,重复频率 1Hz,光束直径 5mm,用计算机测控软件进行程序控制,数据自动采集和统计处理,每组重复测量读数 $n \geq 6$ 次。结果显示,532nm 和 1064nm 激光照射多功能防护镜光密度非均匀性分别为 0.059% 和 0.11%,测试结果见表 2。

Table 2 Testing results of non-uniformity of optical density of multifunction protective spectacles for laser

laser wavelength/nm	532					1064				
	center	upside	downside	left	right	center	upside	downside	left	right
laser incidence position	center	upside	downside	left	right	center	upside	downside	left	right
optical density D_λ	5.27	5.30	5.25	5.28	5.24	5.87	5.82	5.47	5.93	5.62
standard deviation/%	0.36	0.14	0.32	0.35	0.40	0.96	0.76	0.43	0.83	0.16
non-uniformity of OD/%	0.06					0.11				

2.3 不同激光入射角光密度测试

反射型和复合型防护镜镀有高反射介质膜,由于介质膜光谱带宽的限制,当激光入射角超过一定角度后,其反射比下降,透射比增加,从而导致光密度降低。标准要求,在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 激光入射角范围内,反射型或复

复合型防护镜的光密度值相对偏差不超过3.0%。本实验中采用激光防护镜自动检定装置和相应测试方法,对多功能防护镜不同激光入射角光密度进行测试,结果表明,多功能防护镜在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 激光入射角的光密度相对偏差为0.61%~1.22%,测试结果见表3。

Table 3 Test of optical density of multifunction protective spectacles at different angle of laser incidence

angle of laser incidence/ $(^{\circ})$	532nm laser			1064nm laser		
	optical density average value D_{λ}	relatively standard deviation/%	relatively deviation/%	optical density average value D_{λ}	relatively standard deviation/%	relatively deviation/%
-70	5.55	0.28	0.18	5.65	1.23	15.31
-60	5.51	0.47	0.54	5.47	0.26	11.63
-50	5.54	0.51	0.07	5.17	0.92	5.51
-40	5.52	0.30	0.36	5.03	1.45	2.65
-30	5.49	0.64	0.78	4.96	0.25	1.22
-20	5.50	0.49	0.69	4.95	0.28	1.02
-10	5.51	0.17	0.56	4.95	0.33	1.02
0	5.54	0.55	0.00	4.90	0.52	0.00
+10	5.54	0.53	0.02	4.93	0.63	0.61
+20	5.54	0.31	0.02	4.93	0.40	0.61
+30	5.51	0.51	0.54	4.96	0.91	1.22
+40	5.49	0.32	0.89	5.01	0.56	2.24
+50	5.49	0.30	0.85	5.16	0.64	5.31
+60	5.53	0.91	0.11	5.47	1.14	11.63
+70	5.63	1.40	1.63	5.62	0.56	14.69

2.4 不同偏振方向光密度测试

实际应用中,激光对人眼的辐射方向是变化不定的,对于同一种线偏振光,激光入射面与偏振面正交或平行时,其防护效果是不一样的。反射型或复合型防护镜在不同偏振方向的激光作用下,应确保防护镜的

有效防护性能。本实验采用激光防护镜自动检定装置和相应测试方法,对不同偏振方向激光照射多功能防护镜光密度进行测试,结果表明,多功能防护镜在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 激光入射角的光密度相对偏差为0.19%~1.36%,测试结果见表4。

Table 4 Test of optical density of multifunction protective spectacles at different laser polarization direction

angle of laser incidence/ $(^{\circ})$	level polarization		perpendicular polarization		relatively deviation/%
	optical density average value D_{λ}	relatively standard deviation/%	optical density average value D_{λ}	relatively standard deviation/%	
-40	5.21	0.41	5.16	0.35	0.97
-30	5.20	0.33	5.13	0.46	1.36
-20	5.20	0.41	5.15	0.45	0.97
-10	5.20	0.38	5.17	0.47	0.58
0	5.19	0.37	5.18	0.41	0.19
+10	5.16	0.46	5.18	0.27	0.39
+20	5.14	0.33	5.18	0.47	0.78
+30	5.13	0.46	5.19	0.26	1.17
+40	5.13	0.37	5.19	0.18	1.17

2.5 环境适应性性能实验

环境适应性性能试验所用的主要设备包括101-3型高温箱、TC-800S低温箱、CS-301恒温恒湿箱,多功能防护镜在不同的环境试验条件下进行高温、低温和湿热试验,其中高温试验(60 ± 2) $^{\circ}\text{C}$,保持2h;

低温试验(-55 ± 3) $^{\circ}\text{C}$,保持2h;湿热试验温度(40 ± 2) $^{\circ}\text{C}$,湿度(93 ± 2)%,保持48h,环境试验后,对多功能防护镜进行光密度测试,并与环境试验之前所测光密度值进行比对,为了检验防护镜片的稳定性和抗老化性能,在相隔10年后采用激光防护镜自

动检定装置和方法对普通条件下保存的防护镜片进行抽样检测,结果表明,经过环境试验并存放10年

后的防护镜光密度相对偏差为0.0024~0.035,测试结果见表5。

Table 5 Comparison of optical density of multifunction protective spectacles before-after environment experiment for laser at 1064nm

number	laser exposure energy/mJ	laser transmission energy/ 10^{-8} J	optical density average value D_{λ}	relatively standard deviation/%	relatively deviation/%
02-01*	121.44	4.58	6.42	0.32	2.18
02-01#	161.49	4.4	6.57	0.53	2.44
02-01##	137.42	2.53	6.73	0.08	3.54
02-02*	124.83	8.54	6.17	0.94	1.78
02-02#	161.71	8.3	6.28	0.44	1.11
02-02##	133.82	8.34	6.21	0.78	0.24

* group before environment experiment; # group after environment experiment; ## group after 10 years; 5mm of light spot diameter of laser exposure

2.6 激光生物效应试验

照射光源为脉冲Nd:YAG激光器、开关翠绿宝石激光器、GaALAs半导体激光器,输出波长为1064nm,532nm,755nm,810nm,脉冲宽度4ns~45ns,光斑直径2mm~6mm。测试仪器为RJ7200型激光能量辐射计、EP1000D型激光能量/功率计、LM-93 II标准激光功率计,眼科检查仪器为拓普康50X型眼底照相机、YZ6E1检眼镜,实验动物选用青紫蓝灰兔,散瞳,轻度麻醉,兔瞳孔孔扩至7mm,分别于佩戴防护镜和裸眼状态进行激光照射。结果表明,青紫蓝灰兔80只(160眼),激光辐照量为 $578.5\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}\sim 2405\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,当兔眼佩戴多功能防护镜时,防护镜片和眼屈光介质及眼底均未见损伤,当摘去防护镜,裸眼接受辐照量为 $(578.5\pm 26.5)\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的激光照射后,兔眼视网膜出血,玻璃体形成棉絮状血团,直径约2mm,裸眼接受辐照量为 $(2405\pm 113)\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的激光照射后,兔眼视网膜出现不规则团状出血,面积约 $4\text{mm}\times 5\text{mm}$,1min后,大片血团进入玻璃体,几乎覆盖整个眼底,裸兔眼激光损伤实验照片见图2。

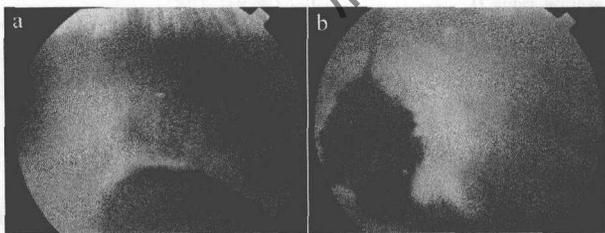


Fig. 2 Laser damage of naked rabbit eyes without the spectacles

2.7 防护镜人-机工效学测试

测试仪器采用500型视功能检测仪、NT-2000型非接触式眼压计、动眼视野测试装置等,结合户外环境试用,进行工效学试验测试,主要测试项目包括近远距视力、双眼融合、动态视力、立体视觉、对比敏感度、视野、色觉、眼压、眩光视觉和佩戴舒适度感知等,受试人员19人,均经体格检查,年龄19岁~29岁,裸眼视力

5.1以上,结果表明,各项测试指标符合工效学要求,该多功能防护镜适合于个人佩戴使用。

2.8 多波长宽带激光防护性能测试

采用HP-8453紫外-可见光谱仪和美国伯乐公司的Bio-Rad FTS-65A傅里叶变换红外光谱仪,对多功能防护材料的光学性能进行测试。结果表明,该防护镜具有较宽的防护光谱范围,防护波段可包括紫外200nm~400nm、红外700nm~25 μm ,除常用的Nd:YAG激光器输出波长1060nm和532nm外,还包括金绿宝石可调谐激光器的调谐波长701nm~815nm,掺钛蓝宝石激光器的调谐波长700nm~900nm,其峰值波长为790nm,CO₂激光器输出波长10600nm,氧碘激光器输出波长1315nm,脉冲铜蒸气激光器的510.6nm及脉冲氟化氙激光器的350nm等。

2.9 抗老化性能

经检验,所研制和使用的多功能防护镜和防护材料性能稳定,与10年前光密度测试结果相比较无明显差异,可见光透过率无变化。

3 小结

对高防护性能的激光、微波、激光探测报警和高抗冲击强度的多功能集成防护镜、防护材料与复合技术进行了研究,利用真空热压技术,将多功能镜片组合压制为夹层式复合结构,综合利用吸收、反射、电磁屏蔽、材料特性与复合结构特点,最大程度地衰减多波长激光和微波辐射,增强防护镜的抗冲击强度,提高了防护镜在各种环境条件下对多波长激光、微波、破片,以及风沙、强光、紫外与红外辐射的多功能防御能力并进行激光预警。实验测试结果表明,该防护镜能够提供激光-微波-破片多功能一体化防护和激光防护探测报警^[19],各项性能指标符合设计和使用要求,并应用于科研、教学、生产、训练和医疗,起到了良好的防护效果。

参 考 文 献

- [1] STAMPER D A, STUCK B E, MASTROIANNI G R, *et al.* The effect of ballistic laser protective goggles on TOW missile launcher tracking[R]. Fort Belvoir, VA: Defence Technical Information Center, 1990: 1-38.
- [2] SMITH H A, MANNING M J, HEALY E M. Laser filter inserts for goggles, sun, wind and dust[R]. Fort Belvoir, VA: Defence Technical Information Center, 1994: 1-26.
- [3] COLEMAN J L. Human response to nuclear and advanced technology weapons effects[R]. Fort Belvoir, VA: Defence Technical Information Center, 1996: 1-79.
- [4] WALLS J J, Jr, FREY T J, TUCKER R J. Ocular protection from laser hazards[R]. Fort Belvoir, VA: Defence Technical Information Center, 1991: 1-31.
- [5] KOLOLUOMA T, OKSANEN J A I, RAERINNE P. Dye-doped sol-gel coatings for near-infrared laser protection[J]. *Journal of Materials Research*, 2001, 16(8): 2186-2188.
- [6] SIGNORINI R, MENECHETTI M, BOZIO R. Fullerene derivatives embedded in hybrid sol-gel glasses: nonlinear optical properties and optical limiting performances[J]. *Journal of Sol-gel Science and Technology*, 2001, 22(3): 245-253.
- [7] LUO Zh K, GAO G H, ZHANG G S, *et al.* Multifunction spectacles: China, 98109985.8 [P]. 2000-05-18 (in Chinese).
- [8] LUO Zh K. The safe-protection techniques for laser [J]. *Laser Journal*, 2000, 21(3): 4-5 (in Chinese).
- [9] LUO Zh K, WANG Q H, LIU H F, *et al.* VO₂ films optical Limiting mechanism based on phase transition and protective technology for strong light[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2010, 31(8): 27-29 (in Chinese).
- [10] LIU H F, LUO Zh K, ZHANG J. Study of laser ocular effect and damage[J]. *U. S. Chinese Health and Hygiene Journal*, 2005, 8(3): 66-68.
- [11] LUO Zh K. Research and development of the techniques of laser radiation protection and optoelectronic countermeasures [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(5): 423-427 (in Chinese).
- [12] LUO Zh K, GAO G H, CHEN Z L, *et al.* Research of the multi-wavelength laser protective spectacles [C]//*Photodynamic Therapy and Laser Medicine*. Dalian: Liaoning Science and Technology Press, 1998: 69-70 (in Chinese).
- [13] GAO G H, ZHANG G S, CHEN Z L, *et al.* GJB470A-97 Control and protection for military laser hazard[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998 (in Chinese).
- [14] GAO G H, ZHANG G S, CHEN Z L, *et al.* GJB1762-93 Physiological hygienic protection requirements for laser protective eyewear [S]. Beijing: Standards Press of China, 1994 (in Chinese).
- [15] Institute of Spaceflight Medicine Engineering of National Defence Science and Technology Industry Committee. GJB475-88 General public (or inhabitant region) exposure limits to microwave radiation [S]. Beijing: Standards Press of China, 1988 (in Chinese).
- [16] XUE Z Y, WU C R, LIU P F, *et al.* GJB150.3-86 Environmental test method for military equipments, high temperature test[S]. Beijing: Standards Press of China, 1986 (in Chinese).
- [17] LUO Zh K, LIU H F, SUN R. Development of automatic verification device for laser protective spectacles[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2010, 37(10): 307-311 (in Chinese).
- [18] LUO Zh K, SUN R, WANG Q H, *et al.* Evaluation of uncertainty in measurement of the automatic verification device for laser protective spectacles[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2009, 30(12): 8-11 (in Chinese).
- [19] LUO Zh K, GAO G H, WANG J R, *et al.* Development and testing of an integrated laser protection and warning system[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2005, 26(11): 9-10 (in Chinese).
- [2] STRAUME-LINDNER A G, INGMANN P, ENDEMANN M. Status of the Doppler wind lidar profiling mission ADM-aeolus [EB/OL]. (2006-04-26) [2010-09-15]. http://www.eumetsat.int/Home/Main/AboutEUMETSAT/Publications/ConferenceandWorkshopProceedings/2006/SP_1232459095413615-en
- [3] FLESIA C, KORB C L. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(3): 432-440.
- [4] KORB C L, GENTRY B M, LI S X, *et al.* Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(15): 3097-3104.
- [5] SHEN F H, DONG J J, SUN D S, *et al.* Calibration of Rayleigh Doppler wind lidar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(6): 881-884 (in Chinese).
- [6] McCLATCHEY R A, D'AGATI A P. Atmospheric transmission of laser radiation[R]. Hanscom: Air Force Geophysics Laboratory, 1978: 24.
- [7] CHANIN M L, GARNIER A, HAUCHECORNE A, *et al.* A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, 16(11): 1273-1276.
- [8] XU Zh J. Monte-Carlo method[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 102-112 (in Chinese).
- [9] LAI D, CHEN Y, ZHOU D F, *et al.* Beam scanning of lidar and the simulation of the improved VAD inversion methods[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 584-586 (in Chinese).
- [10] SOUPRAYEN C, GARNIER A, HERTZOG A, *et al.* Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. II. Mie scattering effect, theory, and calibration[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2422-2431.
- [11] FLESIA C, KORB C L, HIRT C. Double-edge molecular measurement of lidar wind profiles at 355nm[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(19): 1466-1468.

(上接第485页)