

文章编号: 1001-3806(2011)05-0699-06

激光辐射多功能集成防护镜

罗振坤¹, 王秋华², 高光煌¹, 孙 嵘¹, 张桂素¹, 陈宗礼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: 为了减少和避免激光和微波辐射眼损伤, 设计研制了防激光、防微波、激光探测告警为一体的多功能防护镜。该防护镜由特定功能的光学部件和光电子模块组成, 包括多功能复合防护镜片、镜架和激光探测报警系统。进行了多功能防护镜复合技术研究和防护性能测试。结果表明, 该防护镜在激光波长 532nm, 1064nm, 790nm, 840nm 的光密度为 4.0~7.28; 可见光积分透过率为 18.7%; 微波衰减大于 20dB; 报警系统在 532nm, 1064nm 和 840nm 激光波长能提供自动检测和声光报警, 报警器的探测灵敏度为 10^{-7} J/cm²; 该防护镜可承受 1g 质量、300m/s~400m/s 速率的钢制球形破片的冲击; 防护镜总质量小于 200g, 该防护镜防护波段宽、对激光和微波的衰减倍率高、防护角大、可见波段透光性好、可分体和组合使用、体积小、重量轻、便于佩戴, 适用于个人佩戴防护和光电传感器的防护。在现代光学实验和各种激光与微波作业环境, 以及反恐和公共安全中是不可缺少的防护器材。

关键词: 激光技术; 激光防护镜; 激光-微波-激光探测告警; 多功能一体化; 性能测试; 复合防护技术

中图分类号: R852.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.033

Multifunction protection goggles against laser radiation

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

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

Abstract: In order to reduce and avoid damage form laser and microwave, multifunction protection goggles, incorporating protective systems against laser and microwave and an integrated warning system was developed. The goggles consist of some optical parts and photoelectron modules that perform a specific function, which include multifunction protective lenses, frames and laser detection-alarm systems. The key compounded technologies of multifunction protection were studied and protective performance of the spectacles was tested. The result shows that the optical density of this goggles is from 4.0 to 7.28 at the laser wavelength of 532nm, 1064nm, 790nm and 840nm; integral transmittance of visible light is 18.7%; attenuation value of microwave radiation is more than 20dB; the warning system can provides an automatic detecting and sound-light warning at the laser wavelength of 532nm, 1064nm and 840nm; detecting sensitivity of alarm is 10^{-7} J/cm²; this goggles can resist impact against steel-ball splinter whose mass is 1g, speed between 300m/s and 400m/s; gross weight of the goggles is less than 200g. In addition, the spectacles have characteristics of wide range of protection wavelength, higher attenuation rate for laser and microwave, bigger protection angle, higher transmittance for visible light, usage of separated type and combined type, smaller size, light-weight and convenience to wear. They not only can protect an individual operator against laser and microwave radiation, but also can protect photo-electric sensors. They are also necessary protection equipment in modern optical experiment as well as terrorism opposition and public safety.

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

引 言

激光作为一项实用性极强的高新技术, 已广泛应用于信息、能源、材料、航天航空、生命科学、环境科学

和国防科技等各个领域。激光作为能量和信息载体, 在激光加工、激光医疗、激光通信、激光测距、激光雷达探测、激光目标指示、激光制导等各个方面发挥着重要作用。在激光给人类带来巨大效益的同时, 也潜在着激光意外眼损伤的威胁。眼是人体的主要视觉通道, 又是对激光辐射最敏感的靶器官。激光以光和热的辐射形式传播, 并以高强度的辐射能致伤人眼及光电系统传感器, 使人眼在瞬间丧失视觉和观察能力, 使光电传感器系统致盲失灵或完全丧失性能。此外, 由于微

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研究。

E-mail: luozhenkun@hotmail.com

收稿日期: 2010-09-16; 收到修改稿日期: 2010-12-08

波技术和微波器材的不断发展和使用,微波辐射也会对人眼造成损伤和意外伤害。因此,以减少或避免激光和微波辐射损伤为目的的激光预警和防护研究^[1-8],已成为军事医学研究的重要内容。本文中介绍一种防激光、防微波、具有激光防护探测报警和高抗冲击强度的多功能防护镜与复合技术,并对其相关性能进行了测试。

1 多功能防护镜设计

该防护镜设计依据激光生物损伤和防护机理,结合光、机、电相关理论、防护材料特性、激光防护器材安全评价和标准化技术,并立足于国内外现有防护镜和防护材料研究基础上,综合利用防护镜研究最新技术、科研成果、技术优势及成型材料,按本设计指标,通过调研、选材、样品试制和实验测试,确定防护镜的材料、结构类型和技术途径,研究制备防激光、微波和激光探测报警为一体的、具有高抗冲击性能的多功能防护镜与复合技术^[9-13]。

(1)根据常用激光器和可调谐激光器的主要输出波长、激光生物损伤和防护机理,通过对不同激光发射方式、激光器辐射参量、激光照射条件和激光器材的分析研究,确定防护镜的多种激光防护波长、技术指标和结构参量。

(2)通过特定激光波长对眼损伤机制的分析,并依据国家军用标准有关眼照射限值及不同类型激光眼最大允许照射量和激光防护镜生理卫生防护要求^[14-15],计算并确定防护镜的光密度、可见光透过率、损伤阈值和激光防护探测报警阈值等防护指标及性能参量。

(3)根据激光防护材料特性和防护机理,并基于材料对特定波长激光的反射、吸收、干涉效应的线性衰减和反饱和效应的非线性限幅,实现对激光防护的原理,从光学、结构、工艺条件、复合技术、环境适应性等多个方面对其性能进行研究,优选对特定波长激光具有高衰减性能并具有良好的物理、化学、光学和机械特性的防护材料,包括光学塑料、玻璃、晶体和半导体材料等,通过实验测试,并查阅有关性能参量,确定其材料类型,制备性能优良的防护材料。

(4)根据微波辐射、微波生物损伤和防护机理,通过微波对人体损伤作用机理的分析研究,依据国家军用标准有关微波辐射安全限值和微波辐射安全要求^[16-17],确定微波防护性能指标,优选和制备对微波具有高衰减量、对复合基质材料有高附着力、机械强度高、光学透明度好、抗静电能力强的微波屏蔽材料,并基于材料的物理特性,确定相应的复合加工技术渠道。

(5)参照国家军用标准关于小质量钢质破片对人员的杀伤判据^[18],根据破片的发射特点、冲击速度和运行规律,通过对不同防护材料和不同结构类型防护镜的抗冲击性能实验,分析不同材料和防护镜构型的抗冲击强度、抗拉伸强度、硬度和可塑性等,并在此基础上,优选试制抗冲击强度高、光学和机械性能优良的防护材料,设计最佳防护镜复合结构,确定最佳镜片复合工艺和技术条件。

2 多功能集成防护镜技术

2.1 激光-微波-激光探测报警多功能防护复合技术

该项技术特点是利用防护镜复合结构的特点,将镜片按其功能合理组合,并通过真空热压复合技术,把防激光或微波的防护镜片与特种热塑材料粘合在一起,制成夹层式复合结构的防护镜组,利用其高强度的粘合作用、整体性与可塑性效果,增强防护镜片的抗冲击强度,并实现防激光、微波、破片和激光探测报警为一体的多功能综合性防护。

2.2 多波长激光防护材料复合技术

由于该防护镜利用染料吸收和介质膜反射原理对特种激光波长进行衰减,受材料特性的限制,单镜片仅能对有限波长进行防护且对激光的衰减倍率不够高。该技术利用镜片组复合结构的特点,通过优选对不同激光波长高衰减、且对可见光波段高透过的优质光学防护材料和制备技术,将镜片合理组合,制成复合结构的防护镜组,如此,既满足了多波长激光防护的要求,又增加了对激光防护波长的光密度。

2.3 微波防护材料复合技术

该技术是利用金属导电材料对微波的高性能屏蔽作用和原理,在玻璃基质材料上镀制高透明特种金属膜,制成抗电磁辐射镜片,其镀层被热压复合在组合镜片的夹层内,既可对微波产生良好的屏蔽衰减作用,又可避免划伤和各种环境因素对其产生的不良影响。

2.4 分体和组合式可调防护镜技术

防护镜分为前镜组和后镜组,前镜组主要防护可见和紫外波段激光,后镜组主要防红外波段激光、微波和破片冲击,通过折合,可单镜分体使用,也可双镜组合使用,单镜使用时可见光透过率较高,便于观察,可根据环境特点、激光作业或工作环境的实际需要,方便地进行选择。而且,由于前镜组为可置换的组合镜片,可利用镜片的可互换性,实现宽带多波长激光防护,或对特定波长激光及可调谐波段激光进行选择防护。

2.5 防溅射眼防护技术

选用和制备可塑性好、抗冲击强度高的光学塑料

防护镜片,与激光或微波防护镜片及夹层粘接材料热压复合后,置于防护境内靠眼睛一侧,利用镜组复合结构特点和镜片材料特性,增强镜组的抗冲击性能,并阻挡破片强烈冲击时由玻璃后表面所产生的溅射,从而保护人眼免受损伤。

2.6 激光防护探测报警技术

以多功能防护镜为平台,采用激光探测报警与防护镜组合方式,将报警器主机嵌置于防护镜的上方,对入射激光信号进行探测和声光报警,确定入射激光的方位和波长,并及时有效地实施防护。激光探测报警系统主要由激光接收、信号放大处理、声光报警和电源等部分组成,主机正面有3个光学接收器,分别用于探测不同波长的激光,一旦有满足探测阈值和响应波长的激光信号射入,电路就开始工作,弱激光信号经光电转换、放大器处理,驱动声光电路发声和闪光。激光探测报警系统框图见图1。

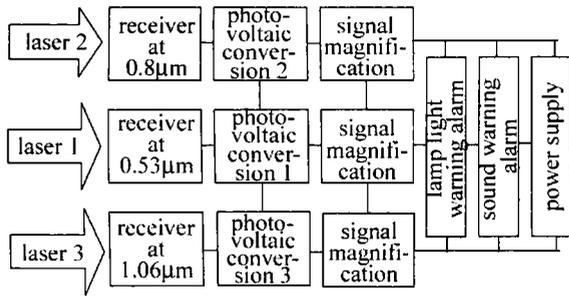


Fig. 1 Scheme of laser detection-alarm systems

2.7 多功能激光防护镜综合防护性能评价测试技术

该技术是对激光、微波、激光探测报警和抗冲击多功能防护性能是否能够达到防护要求并进行客观评价所必需的测试手段,建立了多项防护性能测试方法。其中,激光测试方法是:建立了以激光为光源,双光路分束实时监测的激光防护镜自动检定装置和测试方法^[19-20],此项技术可在紫外到红外光谱范围内,以多种发射频率对不同防护材料和器材进行准确测量,防护镜光密度测量不确定度小于2%,可测光密度值 $D \geq 8$;抗冲击性能测试方法是:建立了以56式7.62mm滑膛弹道测试装置、光电接收测速仪和装填球形钢制破片的特制发射弹为基本器具,以佩戴防护镜的模拟头形靶为目标的测试系统和测试方法。除此之外,还对多种测试方法进行了研究,并对有关防护性

能进行了测试。

3 多功能防护镜综合性能测试

按国家相关防护标准和国家军用标准要求^[14-18,21],对防护镜的多项性能参量进行实验测试,包括:激光防护性能、光学性能、微波屏蔽性能、激光防护探测报警性能、抗冲击性能、环境适应性能、激光生物效应、人-机工效学、抗激光损伤性能、室内和户外试用等。

3.1 不同波长激光防护性能测试

3.1.1 532nm 和 1064nm 波长激光防护性能测试

采用本项目研制的激光防护镜自动检定装置与测试技术^[19-20],激光照射光源为Nd:YAG重复率固体激光器,一级振荡,加一级放大,基频输出1064nm激光,倍频激光532nm,脉冲宽度约10ns,光束直径5mm,对入射激光辐照量进行分束实时监测,并在倍频输出光路中加入1064nm高倍衰减片滤除基频激光,测试仪器使用两台宽量程EP1000D型激光能量/功率计,配置系列激光能量/功率探测器,分别用于直测和监测激光能量,单脉冲激光照射,重复频率1Hz,每组重复测量读数 $n \geq 6$ 次,用计算机测控软件进行程序控制、自动数据采集、统计运算处理,并给出测量结果。多功能防护镜见图2;激光防护镜自动检定装置光学系统见图3;表1和表2分别为多功能防护镜防1064nm和532nm波长激光测试结果。

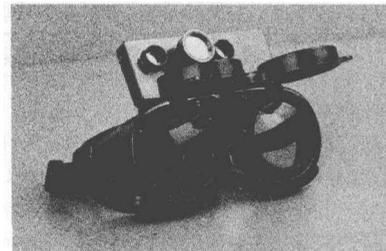


Fig. 2 Multifunction protective goggles



Fig. 3 Optical system of automatic verification device for laser protective spectacles

Table 1 Test of optical density of multifunction protective spectacles for laser at 1064nm

number	laser exposure energy/mJ	laser transmission energy/J	optical density average value D_A	relatively standard deviation/%
01-01	136.40	1.46×10^{-6}	4.97	0.31
01-02	131.88	6.30×10^{-7}	5.29	0.13
01-03	132.38	5.53×10^{-7}	5.38	0.39
01-04	133.62	9.59×10^{-8}	6.11	0.08
01-05	135.48	7.21×10^{-7}	5.27	0.21

continue

number	laser exposure energy/mJ	laser transmission energy/J	optical density average value D_{λ}	relatively standard deviation/%
01-06	133.58	1.72×10^{-7}	5.89	0.32
01-07	139.62	1.52×10^{-6}	4.96	0.05
01-08	135.67	1.09×10^{-6}	5.10	0.83
02-01	137.42	2.53×10^{-8}	6.73	0.08
02-02	133.82	8.34×10^{-8}	6.21	0.78
02-03	134.34	2.52×10^{-8}	6.73	0.34
02-04	134.41	5.46×10^{-8}	6.39	0.20
02-05	138.62	6.24×10^{-7}	5.35	0.07

Table 2 Test of optical density of multifunction protective spectacles for laser at 532nm

number	laser exposure energy/mJ	laser transmission energy/J	optical density average value D_{λ}	relatively standard deviation/%
01-01	31.06	9.00×10^{-8}	5.54	0.17
01-02	83.34	5.21×10^{-7}	5.20	0.31
01-03	86.44	5.23×10^{-7}	5.22	0.13
01-04	88.23	5.54×10^{-7}	5.20	0.24
01-05	85.33	5.56×10^{-7}	5.19	0.43
01-06	84.25	3.85×10^{-7}	5.34	0.06
01-07	89.35	4.43×10^{-7}	5.30	0.26
01-08	89.37	5.48×10^{-7}	5.21	0.56
02-01	89.03	4.87×10^{-6}	4.26	0.18
02-02	87.35	4.03×10^{-6}	4.34	0.84
02-03	89.25	3.84×10^{-6}	4.37	0.56
02-04	85.56	3.13×10^{-6}	4.44	0.79
02-05	85.76	3.36×10^{-6}	4.41	0.84

3.1.2 790nm 和 840nm 波长激光防护性能测试 照射光源为掺钛蓝宝石可调谐激光器,调谐波长分别为 790nm 和 840nm,单脉冲宽度 12ns,光斑直径 3mm;测试仪器为 LPE-IB 型激光能量计,Rj7200 型激光能量辐射

计,NJ-J₁ 型激光能量计,采用分束监视方法,实时监测照射能量,监视比值为 6 次测量数值平均值,其标准偏差系数小于 2%。表 3 为多功能防护镜防 790nm 激光的测试结果,表 4 为防护镜防 840nm 激光的测试结果。

Table 3 Test of optical density of multifunction protective spectacles for laser at 790nm

number	laser exposure energy/mJ	laser transmission energy/ 10^{-7} J	optical density average value D_{λ}	relatively standard deviation/%
01-01	7.80	0.34	5.37	0.20
01-02	7.74	0.23	5.52	0.22
01-03	7.83	0.23	5.53	0.15
01-04	7.76	0.26	5.47	0.26
01-05	7.65	1.25	4.79	0.20
01-06	7.91	0.58	5.14	0.06

Table 4 Test of optical density of multifunction protective spectacles for laser at 840nm

number	laser exposure energy/mJ	laser transmission energy/ 10^{-8} J	optical density average value D_{λ}	relatively standard deviation/%
01-01	5.76	0.077	6.86	0.27
01-02	5.76	0.034	7.28	1.42
01-03	5.55	0.042	7.13	0.83
01-04	5.18	0.043	7.13	0.95
01-05	5.50	0.160	6.53	0.21
01-06	5.33	0.140	6.60	1.13

3.2 微波辐射防护性能测试

采用同轴法测试系统和配套仪器,对多功能防护镜进行测试,结果显示,500MHz ~ 7GHz,平均衰减 23dB; 4GHz ~ 6GHz,衰减 22.5dB ~ 25.3dB。

3.3 多功能防护镜抗冲击性能测试

采用 56 式 7.62mm 滑膛弹道测试装置、光电靶、计时器和配套辅助设备,实射测试所用球形破片为直径 6mm、质量 1.0425g 的钢珠,结果显示,该防护镜在承受

312m/s ~ 391m/s 速率的破片冲击后,镜片弹着点发生明显塑性内凹,凸出部位高度约4mm,镜片未被穿透;当防护镜在承受334m/s ~ 404m/s 速率的破片冲击后,镜片弹着点同样发生明显塑性内凹,镜片仍未被穿透,当防护镜在承受480m/s 速率的破片冲击后,镜片被击穿,破片停留在镜后木质靶架的表层,深度3mm,镜片呈临界穿透状态,据此计算,该防护镜临界穿透动能为120J左右,比动能为 $4.0 \times 10^2 \text{ J/cm}^2$ 左右。

3.4 激光防护探测告警性能测试

照射光源为倍频 Nd:YAG 脉冲激光器和掺钛蓝宝石可调谐激光器,测试波长分别为532nm,840nm 和1064nm,单脉冲宽度12ns,光纤导光,系列衰减片衰减光束,限束光阑孔径10mm;测试仪器为Rj7200型激光能量计,NJ-J₁型激光能量计,采用分束实时监视方法测量激光照射能量,监视比值为6次测量数值平均值,当3种波长激光辐照量分别为 $1.324 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$, $2.632 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$ 和 $1.092 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$ 时,激光防护探测报警装置进行自动检测和声光报警^[22],报警器的探测灵敏度为 10^{-7} J/cm^2 ,接收器光学孔径分别为20mm,12mm 和12mm,探测视场为 $\pm 30^\circ$ 。

3.5 可见光积分透射比

经测试,多功能防护镜的可见光积分透射比为18.7%,透射比光谱曲线见图4。

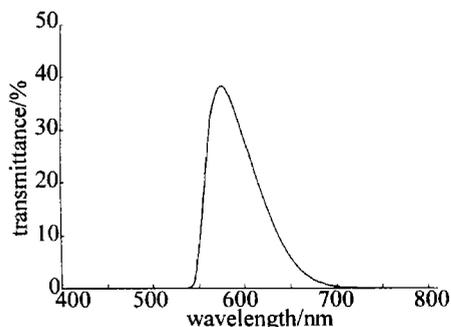


Fig. 4 Curve of transmittance of multifunction protective spectacles

3.6 多波长激光防护

由上述测试结果和图4光谱曲线可以看出,该防护镜除可对532nm,1064nm,790nm,840nm 4种测试的激光波长进行有效防护外,对其光谱范围内的其它激光波长,如193nm,222nm,266nm,308nm,325nm,332nm,350nm,353nm,441.6nm,488nm,514.5nm,700nm ~ 900nm,905nm,950nm 等也有一定的衰减防护作用。

3.7 抗激光损伤性能

采用掺钛蓝宝石可调谐激光器,调谐波长790nm,单脉冲宽度150ns,照射光束通过焦距 $f = 30\text{mm}$ 透镜聚焦,在离开焦点位置用直径3mm光阑限束,防护镜片紧贴光阑,光斑面积 $S = 0.071 \text{ cm}^2$,当照射能量为

536.8mJ (峰值功率密度为 $5.04 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$) 时,镜面未见损伤;照射能量为549.1mJ (峰值功率密度为 $5.16 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$) 时,镜面出现刚可见损伤斑。

3.8 防护镜称量

采用 HC-TP11-10 普通药物天平称量,该防护镜总质量小于200g。

此外,多功能防护镜还进行了光学性能、环境适应性性能、激光生物效应、人-机工效学等项目的实验测试,限于篇幅,部分内容另文叙述。

4 结论

该防护镜已在科研院所、大专院校、激光器研制生产等有关单位试用,在科研、教学、工业生产和医疗中起到了很好的安全防护作用,有效地防止了激光和微波对人眼的损伤,消除了激光意外损伤的心理负担,该防护镜的主要特性是防护波段宽、可对多波长激光进行有效防护、对激光和微波的衰减倍率高、防护角大、可见波段透光性好、可分体和组合使用,除可防激光和微波外,还具有激光探测报警和抗冲击性能,并可用于防风沙、强光、紫外和红外辐射,可提供个人佩戴防护和光电传感器的防护,功能多,实用性强,室内和户外均可使用,在现代光学实验和各种激光作业环境,以及反恐和公共安全中是不可缺少的防护器材。

参 考 文 献

- [1] COLEMAN J L. Human response to nuclear and advanced technology weapons effects, AD-A309511 [R]. Fort Belvoir, Virginia, USA: Defence Technical Information Center,1996: 1-79.
- [2] JEZIOR B, BLACKWELL C L, LESHER L L, *et al.* User evaluation of laser ballistic sun, wind and dust goggle lenses, AD-A243245 [R]. Fort Belvoir, Virginia, USA: Defence Technical Information Center,1991:1-93.
- [3] MENENDEZ A R, SMITH P A. Model for predicting the effects of laser exposures and eye protection on vision, AD-A219697 [R]. Fort Belvoir, Virginia, USA: Defence Technical Information Center, 1990:1-14.
- [4] KANG R N, LAPAGE C S, CORA S R. Effect of haze in advanced laser eye protection visors on contrast acuity, AD-A304208 [R]. Fort Belvoir, Virginia, USA: Defence Technical Information Center, 1996:1-19.
- [5] MATHEWS S J, CHAITANYA K S, GIRIBABU L, *et al.* Large third-order optical nonlinearity and optical limiting in symmetric and unsymmetrical phthalocyanines studied using z-scan [J]. Optics Communication,2007,280 (1):206-212.
- [6] SIGNORINI R, MENECHETTI M, BOZIO R. Optical limiting and non linear optical properties of fullerene derivative s embedded in hybrid sol-gel glasses [J]. Carbon, 2000,38(11):1653-1662.
- [7] DUAN Q, WANG L J, ZHOU Y. Development of laser protection new plastics [J]. Laser Technology, 1994,18 (5):306-309 (in Chinese).
- [8] ZHA Z Z, HU Y. Realization of laser protection using nonlinear optics principles [J]. Laser Technology, 1994,18 (2):69-73 (in Chinese).

- nese).
- [9] LUO Zh K, GAO G H, ZHANG G S, *et al.* Multifunction spectacles: China, 98109985. 8[P]. 2000-05-18(in Chinese).
- [10] GAO G H, ZHANG G S, CHEN Z L, *et al.* Study on laser protective eyeglasses performance indexes[J]. *Laser Technology*, 1996, 20(4):193-197(in Chinese).
- [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] GAO G H, CHEN J, LUO Zh K, *et al.* Medical protection of laser irradiation damage [M]. Beijing: Press of Military Medical Sciences, 1998; 127-147(in Chinese).
- [13] SUN R, LUO Zh K, ZHAO Y X, *et al.* Effect of laser speckle-homogeneity on protective measurement[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2010, 31(2):21-23(in Chinese).
- [14] 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).
- [15] GAO G H, ZHANG G S, CHEN Z L, *et al.* GJB1762-93 Physiological hygeian protection requirements for laser protective eyewear [S]. Beijing: Standards Press of China, 1994(in Chinese).
- [16] The 54th Institute of Department of Chinese Mechanism and Electron industry. GB 12638-90 Safety requirements of radiation for microwave and ultrashort wave communication equipment[S]. Beijing: Standards Press of China, 1991(in Chinese).
- [17] Institute of Spaceflight Medicine Engineering of National Defence Science and Technology Industry Committee. GJB476-88 Measurement method of microwave radiation in inhabitant region[S]. Beijing: Standards Press of China, 1988(in Chinese).
- [18] CAO R Y, XIE L P, LI Z X, *et al.* GJB20450-97 Wounding criteria of the attack of personnel for small steel fragment[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998(in Chinese).
- [19] LUO Zh K, LIU H F, SUN R, *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 (in Chinese).
- [20] 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).
- [21] ZHANG G S, CHEN Z L, GAO G H, *et al.* GJB 2408-95 Testing method of protecting performances for laser protective eyewear[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995(in Chinese).
- [22] 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).

(上接第 638 页)

- [4] WU J, ELIM H I, HE J. Photophysical and nonlinear-optical properties of a new polymer: hydroxylated pyridyl para-phenylene[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 2003, B107(40): 11043-11047.
- [5] TANG G Sh, LI X H, XIAO F Zh. Characterization of N-nitride C₆₀ derivatives and its optical limiting properties[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2002, 29(1): 68-70 (in Chinese).
- [6] LI L, JIA R L, TANG G Sh, *et al.* Optical nonlinearities and optical limiting properties of C₆₀ derivatives [J]. *Journal of Xinxiang University (Natural Science Edition)*, 2009, 26(4):36-37(in Chinese).
- [7] ZHOU C J, WONG W Y, CUI D M. Large optical-limiting response in some solution processable polyplatinaynes[J]. *Chemistry of Materials*, 2005, 17(20): 5209-5217.
- [8] ZU J F, GAO Y Ch, WANG Y X, *et al.* Optical limiting of nanocomposite based on fullerence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(9): 1099-1101(in Chinese).
- [9] WANG Z Q. Research in chemistry open-cage of the fullerenes and preparation of open-cage fullerenes derivatives[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2005;33-55(in Chinese).
- [10] FENG Y, LIN J, DING Y Ch. Study of z-scan of polyaniline-multiwalled carbon nanotubes doped polyvinylalcohol composite[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6):598-600(in Chinese).