

激光防护镜的研究、发展与现状

栾桂荣 谭强

(山东大学)

本文结合作者的工作,评述了自1964年至1987年国内外各种不同工作原理的激光防护镜的研究和发展状况。

The research, development and modern case of the laser protective eyewears

Luan Guirong, Tan Qiang
(Shandong University)

Abstract

Combining the work of the authors, research and development of laser protective eyewears acting on various principles at home and abroad from 1964 to 1987 are reviewed.

一、引言

眼睛是人类最重要的感觉器官,它能接受外来信息的80%以上。0.4~1.4 μm 的光辐射能够穿过角膜^[1],经晶状体聚焦后到达眼底,在视网膜上形成 $\phi 10\sim 20\mu\text{m}$ 的光斑被吸收^[2],光学增益为 10^5 倍;短于0.4 μm 和长于1.4 μm 的光辐射会被角膜全部吸收。

目前,激光这一特殊的光源已广泛应用于各个领域,激光辐射损伤人眼的事例在各国都不断出现^[3,4,5]。而且,激光致盲武器已研制成功,美国早在1972年就报导了激光致盲武器的研制情况^[6],并陆续在多项计划中分别进行研究和试验。因此,为保护人眼免受激光损伤,不仅极需激光防护镜,而且对激光防护镜的性能特征也应有较全面的认识。

二、激光防护镜的性能特征

1. 光学密度 (Optical Density)

标志激光防护镜对激光辐射能量的衰减程度,缩写符号OD,其定义式是:

$$OD = \lg \frac{I_0}{I_t}$$

或者

$$OD = \lg \frac{I_i}{I_t}$$

式中, T_i 为镜片对激光波长的透过率; I_i 为入射到镜片的激光强度; I_t 为透过镜片的激光强度。仅就衰减的含义而言, OD值愈大, 防护愈安全。

2. 透明度

指镜片对可见光的透过率。镜片对可见光应有足够高的透过率, 以保证激光技术人员在工作时能清楚地观察和操作, 以免发生事故。

3. 激光损伤阈值

标志镜片可承受的最大激光强度。激光束对物质的破坏机理与激光器的工作方式有关, 因而激光防护镜要经过连续和脉冲两种工作方式的激光破坏测试。

4. 防护角

指镜片对入射激光束所能达到的安全防护范围。此范围应覆盖人眼的视场角(约 60°)*。

5. 化学稳定性

6. 实用性

三、吸收式激光防护镜

这是国外最流行的激光防护镜, 镜片是由滤色玻璃或染色塑料制成, 它对某一波长或波段的激光辐射有很高的吸收率, 光学密度随厚度而增加, 但随光学密度的增加, 透明度会明显下降。

1. 滤色玻璃的吸收式激光防护镜

1964年, C.H.Wope和C.J.Koester 首次公布了由他们研究成功的吸收式激光防护镜^[8]。镜片采用Schott光学玻璃公司生产的牌号为BG-18的吸热滤色玻璃, 可用于防护钎玻璃激光($1.06\mu\text{m}$)辐射。镜片厚度4mm时, 按Bauger定律计算, 其光学密度 $OD=16$ 。研制过程中发现, BG-18镜片在5.5J钎玻璃激光束照射下即炸裂。改善的方法是采取将吸收率相对较低的BG-38镜片(9.5J时出现裂纹损伤)在前, BG-18镜片在后的组合方式, 组合式镜片对 $1.06\mu\text{m}$ 激光, $OD=11$ 。

1975年, 美国洛斯·阿拉莫斯国家实验室(LASL)主管激光安全的专家D.C.Winburn著文^[9]介绍Schott公司新研制成功的吸热滤色玻璃KG-3, 性能优于BG-18, 更适于做成防钎玻璃激光的护目镜, 同时, 利用BG-18制造防红宝石激光的护目镜。1978和1982年, D.C.Winburn又相继发表论文^[10, 11], 推荐以Schott公司产的多种牌号滤色玻璃制成的一系列吸收式激光防护镜并介绍其在LASL的使用情况。所采用的滤色玻璃, 计有BG-18、BG-38、BG-39、BG-40(以上蓝色)、GG-9(绿色)、OG-550(橙色)等。从兼顾光学密度和透明度两方面考虑, D.C.Winburn认为KG-3和KG-5最适宜制作防护近红外激光辐射的护目镜。

* International Standard ISO 6161, First edition 1981-02-15对多层介质防护镜规定的入射角为 30° , 即防护角 60° [7]。

据统计,美国约有八家公司生产的滤色玻璃和染色塑料为镜片的激光防护镜,主要的是: Freed Reed、Glendale和America光学公司。西德R+H光学公司在70年代也有该产品。苏联采用本国产的滤色玻璃C3C21、C3C22、透明度约25%。我国曾由美国引进LGS型滤色玻璃吸收式激光防护镜,因透明度太低,佩戴后影响工作。对型号为LGS-NDGA和LGS-R的镜片所做的可见光透过率测试和激光破坏试验表明,吸收式防护镜在透明度和抗激光损伤能力方面有显著的弱点^[12]。

据报导,美国TS-3375/VVG-1激光测距机配备的防护镜和国防总供应中心经营的防护镜以及Glendale公司的LGS型防护镜等,白光透过率略高于20%,在抗激光损伤方面,美国Buckbee Mears公司的激光安全负责人Ray Grosman对KG-3做过测试^[3],以Nd:YAG连续激光照射,功率密度 $22\text{W}/\text{cm}^2$,20s后镜片产生典型的裂纹。Schott公司的H. Hack和N. Neuroth对厚度5mm、20mm的KG-3、KG-5、BG-18等26种滤色玻璃及BK-7、BK-1等39种无色光学玻璃进行表面和体内激光破坏研究证实^[14],诸如BG-18、KG-3、KG-5等滤色玻璃的激光损伤阈值低于光学玻璃,体损伤阈值则更低。在化学稳定性方面,由Schott公司产品性质的介绍知^[15],"滤色玻璃对环境的适应性较差,耐酸能力也较差,所以容易出现斑点……"因而易在表面形成破坏中心。Schott公司滤色玻璃的化学稳定性依优劣分为四级,如:BG-18属第三级,KG-3最差,属第四级。此外,美国陆军环卫局1983年发现,用于激光防护镜的滤色玻璃,在高功率激光照射下会出现吸收饱和,也即高功率激光使滤色玻璃中分子吸收态发生变化,产生瞬时透明现象。Q开关、锁模激光造成吸收饱和的潜力都比较大。据美陆军阿伯特试验场激光部主任D. Sliney称,塑料中出现这一情况,早在60年代就已发现,但以前从未考虑过滤色玻璃的饱和问题。

在我国,用于激光防护镜的滤色玻璃是从80年代开始研制发展的。一种防 $1.06\mu\text{m}$ 激光的TFB型滤色玻璃,桔黄色,厚度3.5mm, $\text{OD} > 4$,在 $3800\sim 7600\text{\AA}$ 和 $5000\sim 6200\text{\AA}$ 的积分透过率各为40%和55%,又如防钕玻璃激光基频和倍频辐射的三种滤色玻璃:JFB₁在 $1.06\mu\text{m}$ 处 $\text{OD} = 4.5$;JFB₂在 $0.53\mu\text{m}$ 处 $\text{OD} = 5$;JFB₃在 $1.06\mu\text{m}$ 处 $\text{OD} = 3.5$,在 $0.53\mu\text{m}$ 处 $\text{OD} = 3$;镜片厚度皆为3.5mm。一种掺铁高硅氧玻璃,在 $<0.33\mu\text{m}$ 区截止,在 $1.1\mu\text{m}$ 处透过率5%;透明度80%;镜片厚度4.5mm。又据报导,LGS-1型激光防护玻璃是在硼硅酸盐、硅酸盐基质玻璃中掺入各种金属离子氧化物,对 $1.06\mu\text{m}$ 、 $0.53\mu\text{m}$ 和 $0.488\mu\text{m}$ 三种波长有防护作用。

2. 染色塑料的吸收式激光防护镜

此类吸收式镜片同滤色玻璃片相比较,共同点是光学密度高、透明度低,优点是轻便、价廉,但是,抗激光损伤性能较色玻璃还要差。据美国能源部出版的《严重事故》1986年1月的报告介绍^[13],在美国的劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL),一位激光科学家佩戴允许使用的塑料镜片护目镜工作时,因镜片被 $1.06\mu\text{m}$ 脉冲激光烧穿一个洞,遭致右眼视网膜严重烧伤。测试表明,该镜片在功率密度为 $16\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光束照射下,经25~30s即穿透。我国研制成一种在聚甲基丙烯酸甲脂(俗称有机玻璃)中添加染料制成的塑料防护镜片,防 5300\AA 激光, $\text{OD} > 4$ 。

吸收式防护镜最突出的特点是光学密度高,但是, OD 愈大则吸收愈强,镜片愈易炸裂。因而,可以说滤色玻璃或染色塑料镜片的高光学密度给人的安全感是不真实的。而且,在

$OD \geq 4 \sim 5$ 时, 其透明度已很差。

四、全反射式激光防护镜

其镜片是根据多层介质光学薄膜对不同波长的光波可以有选择地“全”反射和有选择地透射的特点, 在光学玻璃基片上镀以多层介质膜而制成。它对激光能量透过率很低, 而在视觉灵敏区有良好的透明度。

C.H.Swope 等人在 1964 年的论文中, 对反射式激光防护镜持怀疑态度^[8], 他认为“要使镜片做到在正入射时具有 99.9% 的反射率是困难的, 更困难的是对其它入射角都达到这样高的反射率, 因此, 不会提供有效的防护”。这一观点影响很深, 致使美国的著名实验室和光学公司一直在致力研制新的吸收材料, 发展吸收式激光防护镜; 日本的激光防护专家也赞同这种观点。限于 60 年代初期研制光学薄膜器件的技术水平, 对上述观点是可以理解的, 但是到了 70~80 年代仍坚持这一看法, 便不符合实际了。我们结合实际工作, 自 1973 年开展把光学介质薄膜应用于激光防护的研究, 1974 年制成功全反射式激光防护镜^[12]; 目前产品可分别用于掺钕钇铝石榴石、五磷酸钕、钕玻璃、砷化镓、红宝石、氦氛、铜蒸汽、氮镉、氮分子等连续或脉冲激光辐射。

对于反射式激光防护镜的技术性能, 我们是从以下几方面来考察的: 镜片本身的抗激光破坏能力、不同入射角度的激光能量透过率、可见光透过率、光学均匀性、化学稳定性、动物效应实验等。从批量生产的镜片中任意抽取样品, 以 Nd:YAG、钕玻璃、红宝石等连续和调 Q 激光束对镜片测试, 如: 以 Nd:YAG 激光连续输出, 功率密度 72 W/cm^2 , 照射 1 min, 镜片完好无损, 明显优于 Ray Grosman 对 KG-3 滤色玻璃镜片所做的测试结果。关于光学密度, 因现代的介质薄膜技术已容易做到 $OD = 3$, 采用适当的工艺措施可以提供 $OD = 3 \sim 6$ 范围的不同镜片, 这样的光学密度, 对于在实验室、研究室中大量使用的危险激光器和军用激光测距机以及激光致盲武器等足以提供安全可靠的防护。须指出, 用户对光学密度的选择并非愈高愈好, 而应根据激光器的种类、工作方式、输出能量等进行合理选择。例如, 常用于准直的氦氛激光器, 输出功率一般为 $1.5 \sim 3 \text{ mW}$, 选 $OD = 2.5$ 的防护镜就足够了。关于镜片的透明度, 按照人眼视觉灵敏特性^[16, 17], 选取 $5300 \sim 5800 \text{ \AA}$ 为人眼视觉最灵敏区, 我们以镜片对此范围的透过率表示透明度。测试表明, 防 $1.06 \mu\text{m}$ 近红外辐射的防护镜, 其透明度可高达 90%, 远超过滤色玻璃的吸收式镜片。

从理论上讲, 多层介质膜堆仅对一个辐射波长具有最大反射率, 也就是如 C.H.Swope 所认为的“斜入射时不能提供有效防护”。事实上, 研制者在 1974 年已解决了这一问题, 并用 Nd:YAG 和红宝石激光分别对镜片做了在不同入射角下的动物效应实验, 如: 调 Q Nd:YAG 激光器, 脉宽 20 ns, 输出 704 mJ/cm^2 , 取 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的不同入射角测量镜片对激光能量的透过率, 并透过镜片照射放大瞳孔后的青紫兰灰兔眼底, 观察视网膜损伤情况。实验表明, 镜片对兔眼防护安全可靠, 直至入射角为 60° 并加大照射量一倍时, 对青紫兰灰兔视网膜才观察到“可发现”的损伤, 并且超过 International Standard ISO 6161, 1981-02-15 中对多层介质膜反射式防护镜所规定的安全入射角范围 ($0^\circ \sim 30^\circ$)。一篇论文的作者称, 测试发现, 防红宝石激光的反射式防护镜在 $6943 \pm 1000 \text{ \AA}$ 的范围内均有防护作用。另外, 从眼睛生理学的角度分析, 斜入射造成的危险性要小于正入射。

此外，镜片还在自然环境中经受了长期的时效考验，在耐湿、耐酸等方面均超过Schott公司滤色玻璃片的标准；防护镜眼罩是用有机硅橡胶制成，无毒、稳定、舒适、轻便，不妨碍原来佩戴的视力矫正镜，并可防止来自侧后方光线产生的眩光。

据《世界发明》报导，设在瑞士列支敦士登的巴尔蔡斯公司1983年研制成功并生产了一种多层介质膜的反射式激光防护镜，防护波长为694.3nm和1.06 μ m，但是，只有在入射角为0°时才具有良好的防护作用。

五、其它类型的激光防护镜

1. 复合式

这是把“吸收”与“反射”功能相结合的一种防护镜结构。美国B & L公司于1973年开始销售这种防护镜^[18]，其前镜片为镀有多层介质膜的二向分光膜系，对激光的反射率为98%（一说80%），经一层空气间隙与滤色玻璃片组成一个整体。入射激光能量大部分被前镜片反射，从而使滤色玻璃镜片大大减少了被激光损伤的危险。但这种镜的透明度很低。一项美国专利介绍的复合式防护镜片，是采用两片厚度皆为3mm的滤色玻璃OG-5和BG-18相组合，其中一片表面镀有17层的介质膜堆，从光谱曲线分析，多层膜堆为窄带滤光膜系。这种结构的镜片，除在5800Å左右有一很窄的透过带以外，可阻挡从紫外到红外的所有激光辐射，虽能同时防多种波长激光，但透明度已极低。1972年，在威尼斯召开的国际薄膜会议上，一篇论文提出的复合式激光防护镜的镜片是由两片介质薄膜反射板和夹在中间的一片滤色玻璃胶合而成^[19]。每片介质膜板由27层交替的TiO₂和SiO₂膜组成，镜片总厚度为3.5~4mm。一种镜片用于防护633和694nm激光，另一种可防1060nm激光，OD=10，可见光透过率65~70%。我国于1985年研制出一种复合式防护镜，可同时防1.06和0.53 μ m波长激光，但未公布透明度指标。

复合式防护镜的制做需具备真空镀膜和齐全的冷加工这两方面的设备和组织，故成本高且生产周期长。镜片透明度特低。

2. 全息技术用于激光防护

美国休斯飞机公司曾于1976~1979年进行“眼睛的激光防护”研究，采用全息技术为飞机驾驶员研制装配在头盔面罩上部的激光防护镜片以替代吸收式防护镜。全息式激光防护镜片是在玻璃或塑料基底上涂敷重铬酸盐明胶作为记录材料制得的全息图，利用全息图对激光的衍射来阻止有害激光辐射；同时，由于它对激光的衍射带很窄，因而不阻挡其它波长的光透过镜片，所以透明度高。理论上，全息式镜片的防护效率可达99.9%以上，透明度可达90%。但据休斯飞机公司1982年的报导，防护效率50~60%，目前达到的效率最高为60~70%^[20]，不足以用于激光安全防护。

3. 其它防护镜

其它型式的激光防护镜如：爆炸式、光电式、化学反应式及变色微晶玻璃等，按各自的原理均有防护作用；但是，由于各自的弱点，如：对激光辐射的延迟效应、不可重复使用或笨重不便等，至今仍未得到发展。

参 考 文 献

(1) RCA HANDBOOK OF LASER WITH SELETED DATA ON

OPTICAL TECHNOLOGY, 1973.

- (2) E.O.S.D., 1978, Vol.10, No.8, P.32.
- (3) Laser Focus, 1983, Vol.19, No.6, P.5.
- (4) Laser Focus, 1981, Vol.17, No.11, P.14.
- (5) Laser Focus, 1982, Vol.18, No.4, P.128.
- (6) Laser Weekly, 1972, No.17, P.6.
- (7) International Standard ISO 6161, First edition 1981—02—15.
- (8) Appl Opt., 1965, Vol.4, No.5, P.523.
- (9) E.O.S.D., 1975, Vol.7, No.10, P.46.
- (10) E.O.S.D., 1978, Vol.10, No.11, P.30.
- (11) Laser Focus, 1982, Vol.18, No.17, P.65.
- (12) 栾桂荣、谭强, 《兵器激光》, 1982年, 第3卷, 第6页。
- (13) Laser Focus, 1987, Vol.23, No.4, P.136.
- (14) Appl Opt., 1982, Vol.21, No.18, P.3239.
- (15) 《光学玻璃汇编》, 机械工业出版社, 1972年。
- (16) American Institute of Physics Handbook, New York, McGraw-Hill, 1957.
- (17) Lampe and Lighting, 1972.
- (18) Laser Focus, 1973, Vol.9, No.9, P.22.
- (19) Thin Solid Film, 1972, Vol.13, No.2, P.291.
- (20) 美国ORIEL公司样本。

*

*

*

作者简介: 栾桂荣, 女, 1939年出生。副教授。现从事光学薄膜技术与应用。
谭强, 男, 1938年出生。工程师。现从事光学薄膜技术与应用。

收稿日期: 1988年2月6日。

· 简 讯 ·

美国国家航空航天局与Quantex 公司签订高能粒子探测合同

美国国家航空航天局的戈达德宇航飞行中心与Quantex公司签订为期8个月、价值50万美元的合同, 以便研制大面积高能核粒子探测器。当新星和超新星释放高能粒子之际, 科学家们能研究关于星球和星球演变的基本数据资料, 从而导致对宇宙更多的了解。

译自 Laser & Optronics, 1988, Vol.7, No.9, P.16.

张贤义 译 刘建卿 校