

激光技术的应用与防护*

孟献丰, 陆春华, 倪亚茹, 张其土, 许仲梓

(南京工业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要:随着激光技术的飞速发展和广泛应用,激光已成为科学探测和现代军事战争中极为重要的工具之一,由此带来的激光损伤和激光威胁也日益严重。激光防护技术和激光防护材料的研究已受到世界各国的极大重视,也取得了很大进展。总结了激光技术在军事、国防、医疗等技术中的应用和激光对人眼及光电传感器的威胁,介绍了激光防护的方法及原理,对基于线性光学原理和非线性光学原理防护材料的优缺点进行了比较,最后提出了激光防护材料的发展趋势。

关键词:激光; 激光威胁; 激光防护; 非线性光学

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)02-0136-06

Application and protection of laser technology*

MENG Xian-feng, LU Chun-hua, NI Ya-ru, ZHANG Qi-tu, XU Zhong-zi

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: With the fast development and wide application, laser has been important tool in science exploration and modern military war, but laser damage and laser threat is more and more serious. The study of laser protection technology and laser protection materials has caused the attention of the world, and has gained the fairly progress. The application of laser technology in military affairs, national defence, medical treatment etc. and threat from laser on the eyes and photo electronic sensor are summarized. Protective methods and principles are reviewed, laser protection material advantage and disadvantage are compared based on linear optics principle and nonlinear optics principle, and finally the developing trends of laser protective materials are briefly respected.

Key words: Laser; Laser threat; Laser protection; Nonlinear optics

0 引言

由于激光具有单色性好、方向性强、相干性及亮

度高等优异性能,使其在工业、农业、医疗、国防、军事等领域得到了广泛应用,并成为当代科学技术中发展最快的科技领域之一。也正是由于激光的这些特点,

收稿日期:2004-03-12; 修订日期:2004-05-20

* 基金项目:江苏省“333工程”资助项目(JS2001-78);教育部优秀青年骨干教师基金资助项目(教技司[2000]65);江苏省高校自然科学计划项目资助(03kjb430046)

作者简介:孟献丰(1978-),男,河南周口人,博士生,从事激光防护材料的研究。

对人体和光电设备的传感器及光学系统构成了极大威胁,激光安全与防护日益紧迫,如何进行有效的激光防护已引起各国的极大重视,如美国国防部每年投资1亿美元研究抗强激光措施,并取得了很大进展^[1]。

1 激光技术的应用及威胁

1.1 激光技术的应用

随着现代光学技术的迅速发展,激光不仅在材料加工与制备、医疗、科研等领域得到了广泛应用,而且在激光测距、激光制导、激光通讯和激光致盲武器等方面也得到了越来越广泛的应用。在工业方面,激光主要用于激光钻孔、切割、表面热处理、导向、精密定位等,效率提高了几十甚至几百倍;在农业方面,激光主要用于激光育种和生物工程,如细胞融合、基因工程等,已取得了许多成果;在医疗上,手术、治疗、诊断等各方面都有重要的应用;激光在科研上的应用主要体现在激光同位素分离、激光生物工程、激光光谱学、激光全息技术等方面,已经成为科研测试中的重要技术之一^[2-4]。

激光技术在军事领域的应用和发展更为迅速,主要包括激光测距机、激光目标指示器、激光雷达、激光制导、激光致盲武器等。据报道,日本 NEC 公司研制了钕玻璃 5.4 μm 近红外 Q 开关手提式激光测距仪,实现了 10 km 测距;德国利用压缩甲烷的喇曼频移技术研制了 Nd:YAG 激光器,实现了 20 km 测距。美国研究的激光致盲武器种类最多、水平最高,如车载式的“鲑鱼”和“骑马侍从”,机载式的“花冠王子”以及步兵手持式的 AN/PLQ-5、眩目器和“眼镜蛇”等,这些激光武器的威力已经在海湾战争、马岛战争、以及伊拉克战争中得到了验证^[5,6]。

1.2 激光威胁

激光技术在军事上的广泛应用给人体和光电设备带来了极大威胁,主要来自两个方面:

(1)以激光束作为信息载体的各种激光设备。如激光制导、激光侦察等,这些设备因其高度准确性,比其他探测手段更具威胁,同时在近距离可以导致人眼和光电传感器致盲。

(2)以激光束作为能量载体的各种激光武器。其任务是在近距离对装备系统进行硬破坏,在远距离使

人眼和光电传感器致盲,从而使士兵和装备系统失去作战和生存能力。

激光对光学材料的破坏现象十分复杂,作用机理也不尽相同,对光电装置(如 CCD 摄像机),其光谱响应范围为 0.4~1.1 μm ,峰值波长为 0.9 μm ,激光器使 CCD 工作处于饱和状态,从而干扰产生白亮斑和带覆盖画面,白亮区出现处图像被淹没,以致出现暂时性失灵甚至永久性破坏^[7]。

激光对人眼的损伤过程主要有热损伤、光化学损伤和电离损伤等,由于眼球是很精细的光能接收器,它是由不同屈光介质和光感受器组成的极灵敏的光学系统。眼的屈光介质有很强的聚焦作用,将入射光束高度汇聚成很小的光斑,从而使视网膜单位面积内接收的光能比入射到角膜的光能提高 105 倍。视网膜光感受器是极灵敏的光敏组织,在蓝、绿光谱内只要 8~10 个光子就可以产生视觉,其能量相当于 $1.4 \times 10^{-5} \text{J}/\text{cm}^2$ 。因此,眼球是激光最敏感的器官,很容易受到激光的伤害。

激光对人眼的损伤主要受激光波长(如图 1 所示)、功率、脉冲、光束的发散度以及大气衰减等因素

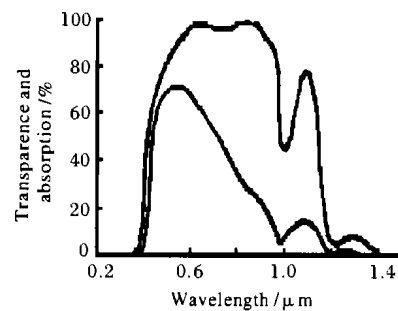


图1 眼球光透过率及眼底吸收率和光波长的关系

Fig.1 Eyeball transparency and eye ground absorption at different wavelength

影响,一般而言,0.4~1.4 μm 的激光对人眼威胁最大^[8]。常用的激光振荡波长从 0.2 μm 的紫外线开始,包括可见光、近红外光、中红外光和远红外光。从图中可以看出,大于 1.3 μm 的中远红外光基本上不能进入人眼内,能量在角膜表面层被吸收;远红外光主要损伤角膜;强可见光和 1.2 μm 的红外光对角膜晶状体和玻璃体有损伤,严重时会使视网膜破裂;而可见激光

主要损伤最脆弱的视网膜,尤以 0.53 μm 的绿光致盲效果最佳,如:Nd:YAG 倍频激光和 Nd:YAG 激光。从表 1 可以看出人眼对不同波长激光的吸收情况。

由于人眼很容易受到激光的严重损伤而且未来战场上的激光威胁日益严重,积极发展有效的激光防护技术和制备先进的激光防护材料已成为各国急待解决的问题。

表 1 人眼屈光介质的透射率与视网膜的吸收率^[8]

Tab.1 Eye dioptric medium transparence and retrial absorption^[8]

Laser types	Wavelength / μm	Retrial absorption/%	Dioptric medium absorption /%	Effective absorption /%
Nd-laser	1.06	12	42	5.4
Ruby-laser	0.69	56	96	53.7
Double frequency Nd-laser	0.53	74	88	65
Ar-laser	0.48~0.54	70	80	56

2 激光防护材料的性能指标

理想的激光防护技术及防护材料应有如下性能指标^[5]:

(1) 防护带宽足够宽。对人体和光学系统有害的各谱线激光均有所需要的衰减能力。

(2) 输出阈值足够低。应使入射的激光光强衰减至人眼所能接受的安全范围,对激光辐射能量的衰减程度,常用 OD 表示:

$$OD = \lg \frac{I_0}{I_t} = \lg \frac{I_0}{I_t} \quad (1)$$

式中 T_λ 为防护材料对波长为 λ 的入射激光的透射率; I_0 为入射到防护材料的激光强度; I_t 为透过防护材料的激光强度。

从公式(1)可以看出,若防护材料的光密度为 3,可使光强减弱到原来的 1/103,如果光密度为 6,可使光强减弱到原来的 1/106。

(3) 输入阈值足够低。在足够低的激光能量和功率密度入射下,能把输出能量和功率限制在所要求的输出阈值以下。

(4) 对弱辐射有较高的线性透过率。以保证人眼对周围环境有足够高的可见光和光电传感器对信号接收的要求。

(5) 响应时间快。对脉宽为纳秒的高重复频率激光束响应及时。

(6) 破坏阈值大。对于足够强的激光入射,有较高的破坏阈值,以防止防护器材损坏而失去防护能力。

激光技术的飞速发展对激光防护器材的要求越来越高,为了使操作人员的眼睛和光电设备的光电传感器得到有效的保护,科研人员开展了对激光防护原理、方法、材料的探索和研究,并取得了可喜的进展。从防护原理上分,激光防护材料主要有基于线性光学原理的激光防护材料、基于非线性光学原理的激光防护材料和基于相变光学原理的激光防护材料。

3 激光防护方法及防护原理

从光学原理上看,光与物质相互作用,使介质产生极化,宏观极化强度 P 和光场强度 E 的关系可用下式表示:

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3 + \dots \quad (2)$$

基于式中的线性项产生光学效应的激光防护材料,称为基于线性光学原理的激光防护材料,主要包括线性吸收型、反射型、衍射型、复合型以及相干型防护材料。

3.1 基于线性光学原理的激光防护材料

3.1.1 吸收型防护材料^[5,9,10]

目前国内外应用最广,实用化技术最高的激光防护材料,有塑料型和玻璃型两种。塑料型是在光学塑料中加入吸收激光的有机染料,优点是光密度高、质轻、价格低、制备方便,缺点是易老化、表面硬度低、耐化学试剂性差。玻璃型是在玻璃熔炼的过程中加入无机燃料制成,克服了塑料防护材料的缺点,但其光密度低、吸收波长少。目前实现多波段防护的激光玻璃的研究也取得了很大进展,南京工业大学研制的吸收

0.53 和 1.06 μm 的激光防护玻璃,光密度达到 4,可见光透过率 $T \geq 58\%$,基本满足激光防护的要求。

3.1.2 反射型激光防护材料

在玻璃基底上蒸镀多层介质膜,利用光的干涉原理,有选择地反射特定波长的激光,而使其他波长的激光绝大部分通过。与吸收型防护材料相比,反射型激光防护材料是反射激光,因此能经受更大的激光功率。

3.1.3 衍射型激光防护材料

在全息光学元件研究工作的基础上研制出新型激光防护材料,根据布拉格衍射原理($\sin\varphi = \lambda/2\Delta x$,式中 φ 为照射角; λ 为激光波长; Δx 为全息图干涉条纹间距),利用全息摄影方法,在塑料或玻璃基片上制作三维相位光栅,通过控制全息图干涉条纹间距,可以按防护要求反射特定波长的光,而使其他波长的光通过。

3.1.4 复合型激光防护材料

在吸收型防护材料表面再镀上反射膜,既能吸收某一波长的激光,又能利用反射膜反射特定波长的激光,在一定程度上改变了防护材料的防护性能,从而达到激光防护的目的。

3.1.5 相干型激光防护材料

由多层介电材料沉积在基片上制作而成,由于激光的高相干性,使得激光在通过相干防护材料后相干相消,起到滤光的作用。

上述基于线性光学原理的激光防护材料还存在着明显的缺点(如表 2 所示):只对光波波长敏感,对光波强度不敏感,对同一波长的强光和弱光的入射不加区分地平等吸收和反射,因而对同一波长的高光学密度和高透明度两个指标不能同时兼顾。

3.2 基于非线性光学原理的激光防护材料^[11,12]

自从 Leite 等人首次观察到光限幅现象至今,人们对基于非线性光学理论的激光防护研究一直有着浓厚的兴趣,并取得了很大进展,1994 年美国首次报道了一种全波段防护式的宽带热散焦液态光限幅器。基于非线性光学原理的激光防护技术是 20 世纪 80 年代发展起来的新型激光防护技术,利用了三阶非线性光学效应,主要有非线性吸收、非线性折射、非线性散射和非线性反射。

3.2.1 非线性吸收型^[13,14]

非线性吸收型包括反饱和吸收和双光子吸收,从目前的研究成果看,研究最多、性能最好、可接近实用化的方案是非线性反饱和吸收,它是一种吸收系数随入射光强增加而增加的现象,特点是响应时间快,一般为皮秒量级,适于对调 Q 和锁模激光的防护。其原理可由 5 能级系统解释。在弱光照射时的吸收主要是

表 2 基于线性光学原理的激光防护材料
优缺点比较

Tab.2 Comparison of laser protection material
advantage and disadvantage based on
linear optics principle

Laser protection material types	Advantages	Disadvantages
Absorption type	Plastic type High light density, low price, preparation facility	Easy destroyed, not good light sharp cut-off capability and low visible light permeation
	Glass type High light density, excellent wearing, high rigidity	
Reflection type	Fine resisting laser capability and sharp cut-off capability	Suffering defend angle confine, $>30^\circ\text{C}$ arising "blue shift", defend capability decreasing
Diffraction type	High light density, narrow filter bandwidth and sharp cut-off capability	Light density of special wavelength rely on incidence laser angle
Multiplex type	Possessing capability of absorption type and reflect type	High cost, visible light permeation fall obviously
Correlative type	High light density and fine filter capability	Filter light capability confined by incidence laser angle

单重基态 1S_0 的吸收,介质的透射光强可用下式表示:

$$I_{\alpha} = I_0 \exp(-N_0 \sigma_0 L) \quad (3)$$

式中 N_0 、 σ_0 及 L 分别为介质的电子数密度、单重态基态吸收截面及激光与样品的作用长度。随着入射光能量的增加,电子由基态跃迁到单重激发态 1S_1 ,并很快通过无辐射跃迁转移到三重态的 3T_1 上,随着其上粒

子布居数增加,并且由 3T_1 到 3T_2 的跃迁有大的吸收截面 σ_1 ,因此,强激光照射时,三重态的吸收起主要作用。此时介质的透射光强为:

$$I_{ex} = I_0 \exp(-N_1\sigma_0 - N_2\sigma_1)L \quad (4)$$

式中 N_1, N_2 分别为 $^1S_0, ^3T_1$ 上的粒子布居数密度。

图 2 为反饱和吸收的光限幅效应,在低入射光时,介质的透过率保持一常数,因此透过光能量随入射光能量的增加而增大。随后由于三重态的吸收,造成样品透过率随光强的增加而减小,使得透过介质的能量保持一定值,起到阻挡激光的作用,这一过程即为反饱和和吸收过程。目前研究较多的该类材料主要有阴丹士林类化合物、C60 类化合物、金属酞菁类化合物等有机材料。

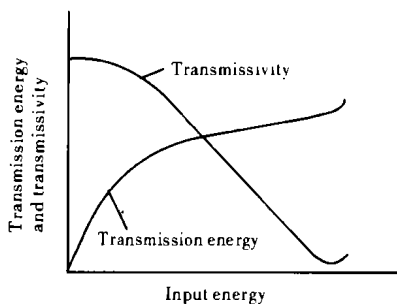


图 2 反饱和吸收的光限幅效应

Fig.2 Optical limiting effect of reverse saturable absorption

粒的线性折射率为 n_0' ,选择 $n_0=n_0'$,两种材料有一种为非线性光学材料,其折射率为 $n = n_0(n_0') + n_2I$, n_2 为非线性折射率系数, I 是悬浮液中的光强。弱光入射时, $n_2I \approx 0$,悬浮液的光学性质是均匀的,光通过悬浮液不出现非线性散射,呈高透射特性;强光照射时, $n_2I \neq 0$,悬浮液的光学性质是非均匀的,光通过悬浮液时出现非线性散射,呈低透射特性。

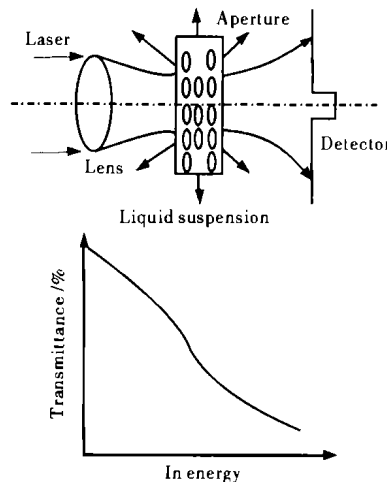


图 3 非线性散射的光限幅效应

Fig.3 Optical limiting effect of nonlinear scattering

3.2.4 非线性反射^[16]

非线性反射包括非线性界面和反射双稳态,线性材料和非线性材料之间的界面称之为非线性界面。其光限幅器原理如图 4 所示。非线性介质 (n_a) 和线性介

3.2.2 非线性折射型^[15]

非线性折射型包括自散焦和自聚焦两种非线性光学效应,是指在高斯光束作用下,非线性材料内产生折射率的轴对称变化,非线性折射率与光强的关系为:

$$n = n_0 + n_2I \quad (5)$$

式中 n_0, n_2, I 分别为线性折射率、非线性折射率系数和光强。其防护原理为,当入射光的光强小于自聚焦和自散焦阈值时,材料呈现出高透射性;当入射光强达到或超过自聚焦或自散焦阈值时,材料呈现低透射,并使出射光强基本稳定在某一值。

3.2.3 非线性散射型

图 3 为由某种液体和微粒构成的悬浮液非线性散射体的结构和特点,若液体的线性折射率为 n_0 ,微

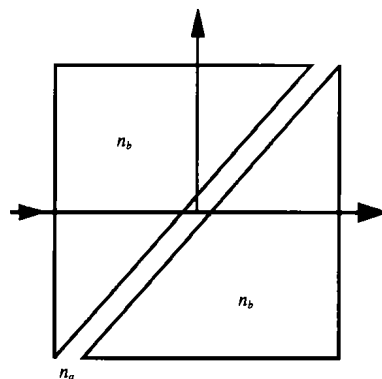


图 4 非线性反射光限幅示意图

Fig.4 Optical limiting effect of nonlinear reflection

质(n_b)面结合时,非线性介质折射率为:

$$n_a = n_b + \Delta n(I) \quad (6)$$

式中 $\Delta n(I) > 0$ 。在低入射光强下, $\Delta n(I)$ 很小,光将部

分或全部透射;当光强达到一定阈值后,非线性介质的折射率增大,入射光发生非线性反射,从而实现光限幅。1992年,R.R.Michael等人研究了碳悬浮颗粒的非线性界面的光限幅原理。

3.3 基于相变原理的激光防护材料^[17,18]

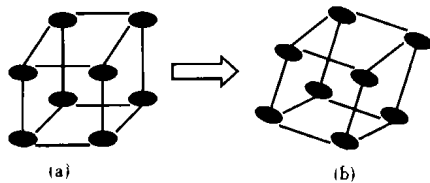


图5 VO_2 从四方晶系相变到单斜晶系

Fig.5 VO_2 from tetragonal lattice to monocline

这是20世纪80年代发展起来的新型防护材料,是利用热致相变材料,在室温下为一种结构,呈透明态。受到激光照射后,材料产生温升,当温度上升到一定高度时转变为另一种结构,变成不透明状态。目前研究最多的相变材料是 VO_2 薄膜, VO_2 晶体相变时,从高温四方晶系相变到低温的单斜晶系,如图5所示。据报道,美国西屋电器公司按照美国防部的保密计划,研制成功一种 VO_2 防激光膜,其开关作用可保持25年之久。

上述基于非线性光学原理的激光防护材料的共同特点是,不仅对波长敏感,对光强也敏感,对同一波长的强光和弱光入射时的作用是不同的。在原理上克服了线性光学防护方法的缺点,同时兼顾了同一波长的高光学密度和高透明度两个指标,是国内外激光防护研究的趋势和热点之一。

4 结束语

激光技术的飞速发展,对激光防护材料的性能要求更加苛刻,传统的激光防护技术和防护材料已无法满足现代军事激光防护的要求。因此,加强激光防护技术和激光防护原理、方法和器材的研究势在必行。激光防护材料的发展趋势是实现全波段、高光密度、高透过率、高损伤阈值、低防护阈值和快速响应的新一代激光防护材料。

参考文献:

- [1] 孙万林. 美国国防部巨资研究抗激光防护措施和防护材料[J]. 国防科技要闻, 1990, 25: 1-4.
- [2] 余辉, 谭胜. 高能激光武器的发展和应用前景[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 267-271.
- [3] 何淑文. 激光技术的现状及其应用前景[J]. 广西科学院学报(自然科学版), 1994, 10(1): 45-49.
- [4] 郝建华, 曾峦. 激光多周期测距方法[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 109-112.
- [5] Herrington F J. Plastic film capable of absorption at specific spectral wavelengths[R], AD-385081. New York, 1991.
- [6] 葛强胜, 龚亦坤. 车载激光侦察告警系统的研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 248-250.
- [7] 陈德章, 卿光弼, 张承轻, 等. 激光对 CCD 固体摄像机饱和干扰效应[J]. 激光技术, 1997, 21(3): 146-148.
- [8] 胡富根, 徐碣敏, 徐贵道, 等. 复合型激光防护镜的激光防护效应观察[J]. 激光技术, 1986, 16(3): 50-53.
- [9] 常青, 叶红安. 光限幅材料与激光防护[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2002, 19(4): 70-72.
- [10] 刘大军, 何兴权, 段潜, 等. 激光防护材料的研究现状[J]. 激光杂志, 2002, 23(6): 5-6.
- [11] Leite R C C, Porto S P S, Damen T C. The thermal lens effect as a power-limiting device[J]. Appl Phys Lett, 1967, 35(1): 100-101.
- [12] Perry J W, Mansour K, Lee I S, et al. Organic optical limiter with a strong nonlinear absorptive response[J]. Science, 1996, 273(5281): 1533-1536.
- [13] Tutt L W, McCabon S W. Reverse saturable absorption in metal cluster compounds [J]. Opt Lett, 1990, 15(12): 700-702.
- [14] Tutt K A. Optical limiting performance of C60 and C70 solution [J]. Nature, 1992, 356(14): 255.
- [15] Bjorkholm J E, Smith P W, Tomlinson W J, et al. Optical bistability based on self-focusing [J]. Opt Lett, 1981, 6(178): 345-347.
- [16] Michael R, Lawson C M. Optical bistability and differential amplification in a tapered fiber coupler-microsphere resonator with nonlinear medium[J]. Opt Lett, 1992, 17(349): 1052-1057.
- [17] 王玫, 崔敬忠. 磁控溅射制备的氧化钒薄膜的结构研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1999, 35(1): 62-66.
- [18] Adler D. Mechanisms for metal-nonmetal transitions in transition-metal oxide and sulfides[J]. Rev Mod Phys, 1968, 40(252): 711-718.