

激光防护技术新进展

查子忠 王 骐

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨, 150001)

摘要: 较全面地论述了激光防护的必要性、任务、要求和最新进展。

关键词: 激光防护 非线性光学 相变

New progress of laser protection technology

Zha Zizhong, Wang Qi

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract In the paper, the necessity, task, requirement, recent progress of laser protection are comprehensively discussed.

Key words: laser protection nonlinear optics phase transition

一、激光威胁与激光防护

激光技术的发展促进了它在军事上的应用,从而出现了激光威胁。激光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。如激光测距、激光制导、激光侦察等。这些激光设备的主要任务是探测目标。由于它的高度准确性,比其他探测手段更具有威胁。其次,这些激光设备发出的激光束在近距离也能使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。它们的主要任务是在近距离对装备系统进行硬破坏,在远距离对人眼和光电传感器致盲。一旦人眼和光电传感器被致盲,士兵和装备系统就会失去作战能力和生存能力。

激光威胁的出现促进了激光防护技术的发展。激光防护任务主要包括两个方面内容:(1)采取防护措施,防止目标被对方激光探测到。(2)采取防护措施,保护士兵眼睛和装备系统光电传感器,不被激光致盲。其次,是对装备系统易损部位,如光学部件,采取抗激光加固措施,防止对方激光破坏。

本文主要介绍人眼和光电传感器的激光防护技术在最近几年的进展、存在问题和研究方向。

总的看,从第一台激光器问世以来,激光技术发展迅速,激光防护技术发展缓慢,在激光致盲与激光防护这一对矛与盾的斗争中,激光防护总是处于劣势地位。主要表现在用于各种激光武器的激光谱线越来越多,不但有各种分裂的单波长激光,如 YAG 激光, $\lambda = 1060\text{nm}$ 和 $\lambda = 530\text{nm}$, 还有宽带可调谐激光,如金绿宝石激光, $\lambda = 700 \sim 850\text{nm}$; 激光输出能量和功率越来越大;光束质量越来越好;致盲距离越来越远。而目前的激光防护根本无力对抗激光武器的致盲破坏。面对激光武器的发展,人们希望有一种较理想的激光防护,如图 1 所示。它应具有如下性能:

a. 足够宽的防护带宽 对于我们关心的各种谱线的激光, 包括可调谐激光, 均有需要的衰减能力。

b. 足够低的输出阈值 对足够强的入射激光, 输出能量和功率总低于人眼防护或光电传感器防护所要求的安全值。以保证在强激光照射同时, 人眼仍能安全地观察目标, 光电传感器照常接收信号。

c. 足够低的输入阈值 在足够低的激光能量和功率密度入射下, 就能把输出能量和功率限制在所要求的输出阈值以下, 无需在光路中引入其他光学元件, 以保证激光防护镜结构简单, 能像近视眼镜那样戴在眼睛上, 光电传感器防护不会影响原探测系统结构和性能。

d. 对弱辐射有高的线性透射率 以保证人眼对周围环境有足够高的可见度和光电传感器对信号接收的要求。

e. 快的响应时间 对脉宽为 ns 的高重复频率激光束来得及响应。

f. 大的破坏阈值 对于足够强的激光入射, 激光防护镜的性能不被破坏。

80 年代以来, 人们正是朝着这一方向, 努力探索激光防护的新原理、新方法和新材料, 并取得了可喜的进展。主要表现在探索出了一些新型激光防护原理、方法和材料, 它们都具有如图 1 相似的新型激光防护性能, 但各项防护指标尚未达到实用要求, 处于预研阶段。下面介绍的两种是目前研究最多的具有代表性的激光防护技术。

二、基于线性光学原理的激光防护^[1]

60~ 70 年代, 主要发展了三种激光防护:

1. 吸收型 选择对特定波长呈强吸收, 而对其他波长呈高透射的透明材料构成激光防护镜, 以实现特定波长激光的防护。

2. 反射型 在透明材料基底上蒸镀对特定波长呈高反射, 而对其他波长呈高透射的薄膜, 作为激光防护镜, 以实现特定波长激光的防护。

3. 吸收/反射型 它是将上述两种方法结合在一起的一种激光防护镜, 以改善激光防护镜的某个性能。如增加防护激光波长。

从光学原理上看, 上述激光防护均基于线性光学原理, 它只对波长敏感, 对强度不敏感, 对波长相同强度不同光辐射具有同样的透射率, 如图 2 所示, 由于这一特性, 使得它只能防单波长激光, 防护带宽窄, 如果人眼戴上能防 400~ 760nm 激光防护镜, 则什么也看不见了。当激光波长与光电传感器工作波长相同时, 光电传感器就不能接收信号, 反之, 要接收信号就不能防激光致盲, 两种功能不能同时兼顾。面对激光谱线众多的激光武器, 它已失去了在战场上的使用价值。只能用于实验室内已知波长的单波长激光防护。

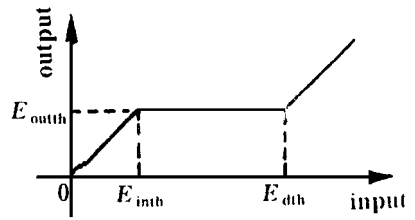


Fig. 1 Scheme of an ideal laser protection properties
 E_{outh} —output threshold
 E_{inth} —input threshold
 E_{dth} —damage threshold

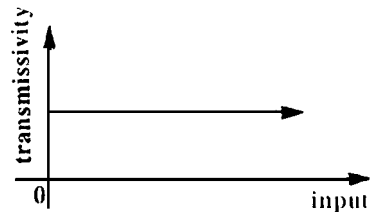


Fig. 2 Scheme of laser protection properties based on linear optical principle

三、基于非线性光学原理的激光防护

这是 80 年代发展的一种新型激光防护。它主要利用三阶非线性光学效应。目前研究较多的有下列几种方案:

1. 非线性吸收 它包括反饱和吸收和双光子吸收。

(1) 反饱和吸收^[2]。这是目前研究最多、材料性能最好的一种方案。当材料的激发态吸收截面大于基态吸收截面时,在强激光作用下,将出现反饱和吸收效应,即低光强入射时基态吸收起主要作用,呈弱吸收,高透射,高光强入射时激发态吸收起主要作用,呈强吸收,低透射特性。目前发现的反饱和吸收材料主要是一些有机材料,C₆₀是最近几年研究最多的一种反饱和吸收有机材料^[2]。

(2) 双光子吸收^[3]。最初发现一些半导体材料具有双光子吸收效应,最近又在有机材料中发现了双光子吸收现象。当半导体的禁带宽度和入射光子能量满足 $h\nu < E_g \leq 2h\nu$ 关系时,在强激光作用下,可出现双光子吸收效应。即价带载流子吸收两个光子能量跃迁到导带,而在弱辐射下,不出现双光子吸收。由于在这种材料中,不存在单光子吸收,故对弱辐射的线性透射率明显高于反饱和吸收,这是它的突出优点,但目前发现的材料,双光子吸收系数小,故对强激光的限制能力远不如反饱和吸收。

2. 非线性折射^[4] 包括自聚焦和自散焦两种非线性光学效应。由于产生自聚焦和自散焦的必要条件之一是入射到材料上的空间能量分布是高斯分布。而激光束经过数公里的传输,光束截面扩大很多,空间能量分布趋于均匀化,而激光防护镜截面相对很小,入射到防护材料上的空间能量分布难以呈高斯分布,自聚焦和自散焦效应难以产生。故这种方案不适合战场上的激光防护,只能用于实验室内光电传感器的激光防护。

3. 非线性散射^[5] 由线性折射率相匹配而非线性折射率不同的两种介质构成的非线性光学材料,在强激光作用下具有非线性光学效应。当弱辐射入射时,非线性折射率不起作用,材料对弱辐射是光学均匀的,对入射光不产生散射,故对入射光呈高透射,当强辐射入射时,非线性折射率起作用,材料对强辐射是光学不均匀的,对入射光呈强烈散射,故对入射光呈低透射。两种介质的线性折射率匹配得越好,对弱辐射的线性透射率越高,非线性折射率差值越大,对强激光的限制能力越强。

4. 非线性反射 包括非线性界面和反射双稳态。

(1) 非线性界面^[6]。最初把线性材料和非线性材料构成的界面称为非线性界面。如果非线性材料折射率符号为正,则要求线性材料折射率大于非线性材料的线性折射率,光从线性材料入射到界面,入射角满足全反射临界角条件。当弱辐射入射时,由于满足全反射条件,入射光被全反射进入光电传感器,当强激光入射时,由于非线性材料折射率变大,全反射条件被破坏,一部分光能量被透射,反射光强被减弱,达到保护光电传感器目的。当然,由两种非线性符号相反的两种非线性光学材料构成的非线性界面也可以达到激光防护目的,而且由于折射率变化更大,效果更好。这种方案的最大优点是对弱辐射有 100% 的反射,这是其他方案难以实现的,主要缺点是由于材料的非线性小,在强激光作用下,折射率变化小,使反射光损耗小,难以达到对强激光限制的要求。

(2) 反射双稳态^[7]。由非线性光学材料构成的光学双稳态,在弱辐射下,透射光呈低透射态,反射光呈高反射态,将反射光引入光电传感器,保证光电传感器对信号接收,当入射光达到

光学双稳态临界值时,透射光呈高透射态,反射光呈低反射态,进入光电传感器的反射光被减弱,达到保护光电传感器目的。这种方案对弱辐射的线性透射率不如非线性界面高,对强激光的衰减也只能达到百分之几十,离实用要求较远。

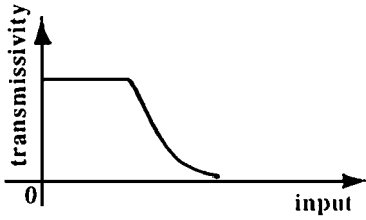


Fig. 3 Scheme of laser protection properties based on nonlinear optical principle

上面分析看到,基于非线性光学原理的激光防护的共同特点是,它不但对波长敏感对光强也敏感,对波长相同,强度不同光辐射呈不同的透射率(或反射率),对弱辐射,不出现非线性光学效应,介质对入射光呈高透射(或高反射),对强辐射,产生非线性光学效应,入射光不同程度地被吸收、折射、散射、反射。偏离被保护的人眼或光电传感器。介质对强激光呈低透射。如图 1 和图 3 所示。由于这一特性使得它在原理上可以实现宽带可调谐激光防护,如果人眼戴上能防 400~760nm 激光防护镜,

既能防该波段内任意波长激光,又能保证人眼对周围环境可见度。当激光波长与光电传感器工作波长相同时,能兼顾光电传感器接收信号与抗激光致盲两种功能。我们采用非线性散射方案,由墨汁中提取的碳颗粒构成的非线性悬浮液^[8]和研制的铁茂类四聚体 $[\text{Fe}(\text{CO})_2\text{CP}]_2$ 有机金属化合物反饱和和吸收材料,经可调谐激光测试,对 400~700nm 波段任选的波长激光均有大约 10^3 的衰减,而在分光光度计上测得的 400~760nm 波段平均透射率接近 70%。这一实验结果,虽然未达到实用要求,但它表明,基于非线性光学原理的激光防护可以实现宽带可调谐激光防护,关键是性能优良的宽带非线性光学材料。

这一研究,目前存在的问题是: a. 目前的研究仍停留在单波长激光防护上,如 $\lambda = 1060\text{nm}$ 和 $\lambda = 530\text{nm}$ 。 b. 材料输出阈值 $> 0.5\mu\text{J}/\text{cm}^2$, 达不到人眼防护安全值。 c. 由于材料的非线性小,使得材料的输入阈值较高,一般为每平方厘米几十毫焦至每平方厘米几百毫焦。为了把入射能量密度提高到材料需要的输入阈值,要在输入光路上加会聚透镜。透镜的引入使人眼不能观察目标,必须设计一个含防护材料的光学成像装置,构成所谓的激光防护器件,以保证人眼对目标的观察。这样的激光防护器件戴在眼睛上是不方便的,限制了它的使用范围。 d. 国内对材料的研究基本上处于跟踪国外的水平,缺乏创新。

为了解决上述问题,可从下面几个方面着手: (1) 研究材料分子结构与激光防护性能之间关系,探索它们之间规律,研制宽带巨非线性光学材料。(2) 利用复合机制,降低材料的输入和输出阈值,如果一种材料含有一种以上的非线性光学效应,则两种以上材料构成的复合材料将具有多种非线性光学效应,可增强对强激光的限制能力,降低材料的输入、输出阈值^[9]。(3) 采用线性方法和非线性方法相结合方案扩展防护带宽。对人眼防护,在 400~760nm 可见光波段采用非线性光学方法实现激光防护,在紫外和近红外波段采用线性光学方法,以解决宽带非线性光学材料的缺乏。因此,可见光波段的宽带非线性光学材料是至关重要的,紫外和近红外波段强吸收,高截止的线性光学材料也是不可缺少的。

四、基于相变原理的激光防护^[10]

这是 80 年代发展的一种新型激光防护。目前研究最多的相变材料是 VO_2 薄膜。这是因为 VO_2 相变温度最接近室温,使 VO_2 薄膜发生相变需要的激光能量小,输入阈值低的缘故。

VO_2 薄膜是一种热致相变材料,在室温附近,为单斜结构,呈半导体态,禁带宽度 0.7eV,

对应截止波长 $\lambda \approx 1800\text{nm}$, 当温度上升到 68°C 时, 转变为正交结构, 呈金属态。随着相变发生, 其电学与光学性质, 特别是红外波段的光学常数发生突变, 利用其红外波段光学特性突变性质可作为 $3000\sim 5000\text{nm}$ 和 $8000\sim 12000\text{nm}$ 红外探测器的激光防护材料。

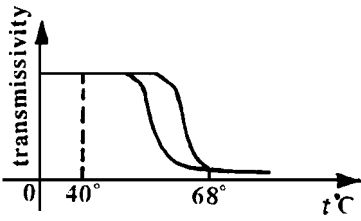


Fig. 4 Scheme of laser protection properties based on phase transition principle in VO_2 films

我们采用反应蒸发沉积方法, 用硅做基底材料, 镀制的单层 VO_2 薄膜, 在未镀增透膜条件下, 经可加温的分光光度计测试, 在 $\lambda = 2500\sim 12000\text{nm}$ 波段, 在 25°C 时的透射率为 55% , 在 $\geq 68^\circ\text{C}$ 时的透射率为 15% , 透射谱为一平坦曲线^[11]。在镀增透膜条件下, 两态的透射率可分别达到 85% 和 1% ^[4], 可见, VO_2 薄膜在很宽波段内, 在不同温度下具有不同透射率。如图 4 所示。

VO_2 薄膜在激光照射下, 吸收激光能量, 温度上升, 当温度升高到相变温度时, 需要吸收的激光能量与环境温度和 VO_2 膜层热容量有关, 当环境温度为 20°C 时, 对 $\lambda < 1800\text{nm}$ 的红宝石激光, 输入阈值为 $90\text{mJ}/\text{cm}^2$, 响应时间 20ns ^[12], 我们用 TEA CO_2 激光实验结果, 在热偏置温度为 52°C 情况下, 输入阈值为 $150\text{mJ}/\text{cm}^2$, 响应时间为 50ns 。输入阈值与膜系结构和镀膜工艺有关, 好的膜系结构和镀膜工艺, 输入阈值将会小于上述测量值。从上述结果看出, 对 $\lambda < 1800\text{nm}$ 的激光, 由于吸收系数大, 输入阈值低, 对 $\lambda > 1800\text{nm}$ 激光, 由于吸收系数小, 输入阈值高。所以这种方案的难点在于 $\lambda > 1800\text{nm}$ 激光的防护, 因为过高的输入阈值可能造成 VO_2 薄膜自身的破坏, 也可能在相变发生前, 透射能量超过光电传感器的破坏阈值。

从上面分析还可看出, VO_2 薄膜突出优点是: 1. 当激光波长与光电传感器工作波长相同时, 能兼顾接收信号与抗激光致盲两种功能; 2. 宽的防护带宽, 在两态情况下, 对 $\lambda < 1800\text{nm}$ 的激光均呈低透射, 在发生相变后, 对 $\lambda > 1800\text{nm}$ 激光也呈低透射。主要缺点是从金属态恢复到半导体态需要一定恢复时间, 在恢复时间内, VO_2 薄膜对红外辐射呈低透射, 光电传感器不能接收信号。因此, 它不能做到在强激光入射同时, 照样接收信号的要求。

五、结 论

80 年代以来, 发展了一些新型激光防护技术, 它们不同程度地具有我们希望的激光防护性能, 克服了传统激光防护技术的缺点, 但目前离实用要求尚有一定距离。当前的关键是提高材料性能, 使之达到实用程度。

参 考 文 献

- 1 陈宗礼. 激光技术, 1989; 14(2): 8~ 12
- 2 Tutt L W, Kost A. Nature, 1992; 356(19): 225~ 226
- 3 He G S, Xu G C, Prasad N. Opt Lett, 1995; 20(5): 435~ 437
- 4 Boggess T F, Moss S C, Boyd *et al.* Opt Lett, 1984; 9(7): 291~ 293
- 5 Guha S, Chen W P. Opt Commun, 1987; 61(6): 425~ 431
- 6 Michael R R, Lawson C M. SPIE, 1993; 1692: 44~ 54
- 7 Rana R S, No He D D. Opt Lett, 1992; 17(19): 1385~ 1387
- 8 查子忠, 王 军, 赵晓彦 *et al.* 光学学报, 1997; 17(6): 799
- 9 Justus B L, Kafafi Z H, Huston A L. Opt Lett, 1993; 18(19): 1603~ 1605
- 10 Hele C C H, Orr J S, Gordon H. SPIE, 1990; 1270: 222~ 235
- 11 查子忠, 王 骐, 李学春 *et al.* 光学学报, 1996; 16(8): 1173~ 1176

新型全固化 Nd YAG 激光器

蓝信钜 黄维玲 刘耀兰

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 介绍了激光二极管泵浦 Nd YAG 激光器(DPL)的优点和近期进展情况; 还讨论了 DPL 的基本原理和不同的结构型式。

关键词: 激光二极管泵浦 Nd YAG 激光器

Novel all solid Nd YAG lasers

Lan Xinju, Huang Weiling, Liu Yaolan

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: Starting from the point of the advantages and recent progress of laser diode pumped Nd YAG laser (DPL), this paper summarizes the fundamental principles and various structures of DPL recently developed.

Key words: laser diode pumped Nd YAG laser

一、引言

全固化 Nd YAG 激光器即是采用激光二极管(LD)取代传统的气体放电光源(闪光灯)作为泵浦源,从根本上消除了气体放电光源泵浦时热效应的影响,而且去掉了庞大的电源和水冷系统,从而实现了 Nd YAG 激光系统的全固体化。

采用激光二极管作为泵浦源有如下优点:

第一,激光二极管与非相干的闪光灯相比,主要是它的体积小、重量轻、效率高、寿命长,LD 的电光转换效率约为 25%,在 200mW 的平均输出功率情况下,耗散在管子上的功率只有瓦级,故采用自然空气冷却即可,这为激光系统小型化提供了有利条件。

第二,LD 的发射光谱与 Nd YAG 的吸收光谱基本上相重合,而且 LD 的波长可用温度调谐到固体激光的中心波长处。由于 Nd YAG 的量子效率比较高,进入激活介质的热能很少,因此无需水冷却,这就大大简化了机械装置。而且 LD 输出的光能准直和聚焦,若采用纵向端面泵浦,可与固体激光的 TEM₀₀模体积相匹配,无需腔内光阑就可以获得基模输出。

12 Roach W R, Balbexg. Solid State Commun, 1971;(9): 551~ 555

* * *

作者简介: 查子忠,男,1936年10月28日出生。教授。现从事激光防护研究。

收稿日期: 1996-05-09 收到修改稿日期: 1996-06-16

