

强度防护型激光防护机制

杜艳秋, 尚春雨

(黑龙江科技学院电气与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要:论述了非线性吸收、非线性折射、非线性散射等基于非线性效应以及基于相变效应的激光防护机制,分析了每种防护机制的优势和局限,指出了强度防护型激光防护技术的发展趋势。

关键词:非线性光学;激光防护;相变

中图分类号:TJ95 **文献标识码:**A

Principles of Laser Protective Technology Against Intensity

DU Yan-qiu, SHANG Chun-yu

(Automatic Engineering Department, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: The laser protective technology against intensity, which is based on the nonlinear optical effect and phase transition effect, can protect the human eyes and photoelectric sensors from the laser damage. The laser protective mechanism based on the nonlinear effects of nonlinear absorption, nonlinear refraction, and nonlinear scattering is expounded as well as the laser protective mechanism based on the phase transition effect, and the respective advantage and limitations are analyzed. Future directions for the laser protective technology against intensity are pointed out.

Key words: nonlinear optics; laser protection; phase transition

1 引言

激光设备及激光武器发出的高能激光会严重破坏军用光电传感器、致眩并致盲参战人员及仪器操作人员的眼睛。如何有效防护激光、保护人眼和光电传感器免受激光威胁成为各国极为关注的问题^[1]。传统的基于线性原理的防护技术只对所防护激光波长敏感,对光波强度不敏感,平等吸收或反射同一波长的强光和弱光,在阻止某一波长强激光破坏的同时,也阻止了该波长弱光的接收,由于这一特性,使得它只能防单波长激光,防护带宽窄;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。随着激光谱线的增多以及可调谐激光的出现,单纯的线性防护显得力不从心。近年来发展起来的非线性激光防护及相变防护技术可以克服这些缺点,基于此,本文对这两种激光防护技术的防护原理及发展趋势进行详细的探讨。

2 基于非线性效应的激光防护原理

这是20世纪80年代发展起来的一种激光防护方法,根据非线性光学原理,强光与物质相互作用时

产生非线性效应,这种非线性效应阻止强光穿过防护材料造成激光损伤,弱光不产生非线性光学效应,可以完全透过防护材料,因此在进行强激光防护的同时又不影响视场的亮度。而且如果材料对入射光的色散小,在原理上可实现对宽波段连续可调谐激光的防护。其防护原理主要是基于三阶非线性光学效应,包括非线性吸收、非线性折射、非线性散射和非线性反射。

2.1 非线性吸收

非线性吸收包括反饱和吸收(RSA)、双光子吸收(TPA)和自由载流子吸收。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(吸收系数随输入光强的增加而增大)^[2],宏观上表现为通过材料的输出光强随着输入光强的增加而非线性地增加,最后输出光强达到

基金项目:黑龙江科技学院引进人才启动基金项目(No. 06-33)资助。

作者简介:杜艳秋(1978-),女,博士研究生,助教,主要从事于光学非线性,空间激光对抗方面的研究。E-mail: hellen_q@126.com

收稿日期:2008-10-12

一钳位值,而可见光(弱光)线性的穿过防护材料,反饱和和吸收材料的输入能量与输出能量关系如图1所示。非线性反饱和吸收材料响应时间快(ps),适于对调Q和锁模激光的防护,但是器件的防护范围受介质激发态吸收饱和的限制^[3]。

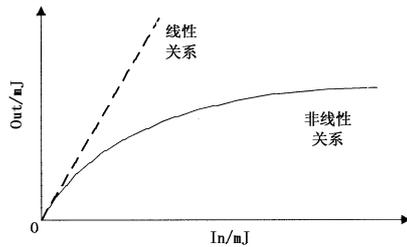


图1 反饱和和吸收材料输入能量与输出能量的关系

双光子吸收是指介质在强激光激发下,粒子同时吸收两个光子后,由基态经过一个虚中间态跃迁到高能态的一种高阶非线性光学过程,能量不需要转换到中间态而直接转到终态(高能态),其原理如图2所示。材料的吸收系数随着光强的增大而增大,双光子吸收系数与入射光强度的平方项成正比,利用这一点可以将它和其他效应区分开来。半导体经常出现此机制。

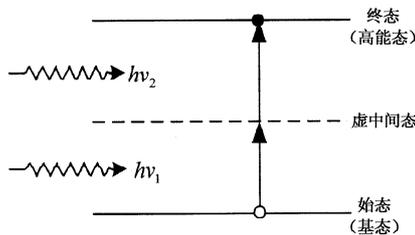


图2 双光子吸收示意图

自由载流子吸收是指在较高的泵浦强度(一般皮秒激发)下,金属纳米粒子或金属半导体纳米晶中导带电子会被激发^[4],产生电子-空穴对,从而在亚皮秒时间内,瞬态自由载流子吸收产生。而且,多光子所致电子喷溅也有可能产生电子-空穴对,再一次在亚皮秒时间范围内产生强自由载流子吸收。

2.2 非线性散射

基于非线性散射的光学材料在强光入射时非线性折射率起作用,散射效应急剧增强,透射光降低;在弱光入射时非线性折射率不起作用,无散射效应,输入光线性通过光学材料,透射较高,其基本原理如图3所示。这种现象仅发生在由两种不同的材料组成的非线性散射体中,两种介质的折射率相匹配得越好,对弱光的线性透过率越高,非线性折射率差值越大,对强激光的限制能力越强。这种非线性散射体可以由液体和微粒构成的悬浮液,也可以是由两种固体构成的固态混合介质。目前,较有应用前

景的是碳纳米管悬浮液的光致等离子体非线性散射^[5],可理解为悬浮液吸收高强度激光后产生的微等离子体迅速扩散到周围液体中,大量散射入射光,同时在液体中产生微气泡,进一步散射入射光,使透射光强受到极大限制。这种原理构成的防护器件阈值接近实用值,缺点是介质为液体,难于制成便携式器件,同时现有材料的非线性系数不够大,仍然不能达到实用要求。

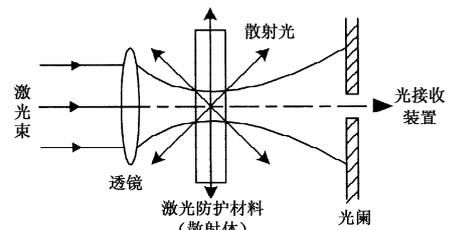


图3 非线性散射激光防护的基本原理

2.3 非线性折射

非线性折射包括光折变、自聚焦及自散焦三种。光折变效应是指在强光辐照下,介质的折射率发生改变的一种非线性现象,它是基于通过载流子的光激发和在宏观距离上的传输而产生的空间电荷累积,形成空间电荷场,并通过电光效应引起材料的折射率发生改变。自聚焦和自散焦是激光引起介质折射率变化而产生的一种光束自作用。在高斯光束的作用下,由于介质的光学非线性使其内部产生折射率的梯度变化。如果介质折射率变小,则折射率梯度使介质相当于一个凹透镜,通过它的光束将被发散,使入射激光在介质中产生自散焦,到达接收装置的光能量密度变小,从而避免强激光的伤害,基本过程如图4所示,图中虚线表示未放入非线性介质时的光路径,实线表示放入介质后的光路径;反之,产生自聚焦现象(如图5所示)。需要注意,对于自散焦的非线性材料应放置在透镜焦距以外的位置,而自散焦的介质应放置在焦距以内。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,而激光经过远距离传输后,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,入射到材料上的能量很难呈高斯分布,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。

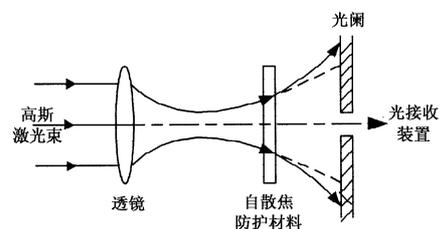


图4 自散焦激光防护的基本原理

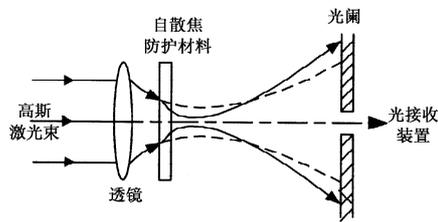


图5 自聚焦激光防护的基本原理

2.4 非线性反射

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。当弱光入射时,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,如图6所示。当然,由两种非线性符号相反的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。

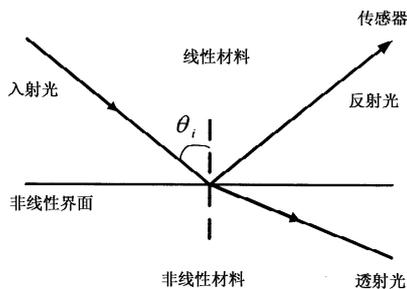


图6 非线性反射激光防护的基本原理

3 基于相变效应的激光防护原理

所谓相变效应是指某类激光防护材料在室温下是一种结构,对光波长呈透明状态,而在受到激光照射后,材料吸收热量温度上升到某一值后转变为另一种结构,即发生相变,相变后的材料由于自身结构的改变,其光学和电学性质均发生重大变化,对光波长呈现不透明状态。能够用于激光防护的相变材料主要是一些过渡金属氧化物,目前研究最广泛的主要是金属钒的诸多氧化物,氧化钒(VO_2)和五氧化二钒(V_2O_5)为主要代表。

在常温下, VO_2 薄膜具有单斜结构,呈半导体态,禁带宽度为0.7eV,相对应的截止波长约为 $1.8\mu\text{m}$,具有较高的电阻率和红外光波透过率。在激光照射下薄膜温度升高到相变温度(68°C)时,薄

膜的微观结构以及光电特性会发生突变,从低温的半导体态单斜相迅速转变为高温状态下的金属态四方相,电阻率迅速降低,自由电子对光的吸收引起光透过率(特别是红外波段)降低,而且这种温度相变过程是可逆的,经反复相变过程而不致损坏材料,图7给出了氧化钒薄膜的光谱透过率测试曲线^[6]。利用其红外波段光学特性突变性质可作为 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\mu\text{m}$,红外探测器的激光防护材料。将 VO_2 薄膜涂制在红外光电传感器及光电探测装置的窗口上,用于阻止大功率红外激光损害光学系统和光学元件,常温下薄膜对波长在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\mu\text{m}$ 范围的弱激光具有高透过率,光路畅通,探测器可顺利接收信号;当波长大于 $1.8\mu\text{m}$ 的强激光入射到窗口上时,转换薄膜吸收光能量温度迅速上升到相变温度点,薄膜迅速转变为金属态,光谱特性由较高的透射突变为较高的反射,从而迅速降低了进入光学系统的光能量,使得光学系统不至于饱和或烧毁,达到防护作用。美国已经研制成功氧化钒防激光涂层,用来保护卫星上的红外探测器免受激光武器的破坏。与 VO_2 相比较, V_2O_5 相变温度较高(257°C),应用上存在困难,已有关于其激光防护特性方面的报道^[7]。

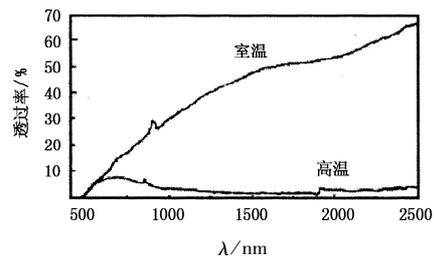


图7 氧化钒薄膜的光谱透过率测试曲线

基于相变效应的激光防护技术能够兼顾接收信号与抗激光致盲两种功能,也就是说允许某一波长弱光通过的同时防止该强光的破坏;并且能够实现宽带防护,在两态情况下,对 $\lambda < 1.8\mu\text{m}$ 的激光均呈低透射,在发生相变后,对 $\lambda > 1.8\mu\text{m}$ 激光也呈低透射。主要缺点是对于 $\lambda > 1.8\mu\text{m}$ 激光的防护,如果输入门限太高,响应时间太长,在相变发生之前输入的激光能量超过光探测器的破坏门限,就会使其烧毁或饱和起不到防护作用^[8];反之,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,光电传感器不能有效接收信号,因此,它不能做到在强激光入射同时照样接收信号的要求。这些缺陷可以通过改进薄膜制备工艺(如溶胶-凝胶技术、反应蒸镀技术、反应溅射技术和金属有机化合物化学气相沉淀技术等)、

恰当地进行膜系结构设计以及掺入杂质降低相变温度来加以克服。采用两步法(低温溅射和后退火)工艺制备的纳米结构氧化钒的相变温度已经下降到 34°C ^[9]。

4 结束语

目前比较成熟的激光防护技术是利用基于线性效应原理制成的吸收型、干涉型和衍射型防护装置来实现。这些器件大多只在较少的特定波长上有防护作用,停留在单波段防护阶段。随着激光谱线的增多以及调谐技术的发展,对可调谐、高功率、多波长激光器的防护将成为激光防护重要的发展方向。非线性效应的防护可以实现光强防护,目前对光学非线性材料各种限幅机理的研究已经很深入,但对材料的实用化研究仍很薄弱,应大力开展薄膜、高聚物等固态化方面的研究。对于相变防护材料,其薄膜的响应时间和相变温度以及光学特性的变化强烈地依赖于薄膜的制备条件,可提高制备技术制备出高质量的 VO_2 薄膜,进而提高其实用性、降低其相变温度、增大相变前后透过率的变化,更好地实现激光防护。

参考文献:

[1] 王骥,范金荣. 红外制导武器抗激光致盲技术纵横谈

[J]. 现代防御技术,2001,29(6):47-50.

- [2] 耿耀辉,李华军,傅石友,等. 两种无机巢形金属团簇的非线性吸收及光限幅特性研究[J]. 中国激光,2003,30(6):505-508.
- [3] Song Ying lin, Wang Yu xiao, Zhang Qian feng, et al. Excited state nonlinearity and optical limiting response of cubane-like shaped metal clusters $\text{WSe}(\text{MPPh}_3)_3\text{Cl}$ ($\text{M} = \text{Ag}, \text{Cu}$) [J]. Materials Letters, 2001, 51(1):85-87.
- [4] 曲士良,杜池敏,宋瑛林,等. 基于C60结构的金纳米粒子合成物的非线性折射与光限幅[J]. 中国激光,2002,29(4):335-338.
- [5] 骆永全,王伟平,李剑峰,等. 碳纳米管悬浮液的光限幅特性实验研究[J]. 强激光与粒子束,2006,18(6):895-898.
- [6] 王宏臣,易新建,陈四海,等. 氧化钒薄膜的制备及其光电特性研究[J]. 中国激光,2003,30(12):1107-1110.
- [7] 骆永全,王伟平,罗飞. V_2O_5 薄膜在连续激光防护中的应用研究[J]. 应用激光,2005,25(6):381-383.
- [8] 宁永刚,孙晓泉. 二氧化钒薄膜在激光防护上的应用研究[J]. 红外与激光工程,2005,34(5):530-534.
- [9] 王宏臣,易新建,陈四海,等. 非制冷红外探测器用氧化钒多晶薄膜的制备[J]. 红外与毫米波学报,2004,23(1):64-66.

中国光协秘书长工作会议在宜兴召开

3月31日~4月3日,中国光学光电子行业协会在江苏省宜兴市召开了秘书长工作会议。理事长特别助理、总会秘书处、7个分会秘书处负责人及其代表近20人出席了会议,上海激光学会、《激光与红外》杂志社、华港展览公司有关负责人列席了会议。

会议由中国光协副秘书长所洪涛主持,理事长特别助理薛峰代表理事长杨定江讲话。他说:中国光协秘书处的工作很重要,目前工作量大,但行业发展不平衡,还需进一步增强凝聚力,继续创新工作模式和工作方法,加强对企业需求的了解和服务,同时指出应协调发展提升秘书处的地位,加强管理,提升服务,发挥好桥梁和纽带作用。

各分会秘书处分别介绍了去年的工作情况和今年的工作安排,集中讨论了总会秘书处今年的重点工作任务,并对今后工作的开展,加强总会与各分会秘书处的联系,构建行业协会与企事业单位之间的关系,特别在促进产业联合、充分发挥中国光协国家队正规军的地位和作用等方面进行了热烈的讨论。与会代表原则同意由总会秘书处负责,在原《中国光学光电子行业名录》的基础上组织编写《中国光电产业大全》(暂定名);大家一致表示积极组织会员单位参加总会今年10月举办的“北京光电周”有关活动,切实做好第十四届激光·光电子国际展览会的组织落实工作;会议代表还建议充分发挥总会地处北京、作为政府和企业之间的桥梁纽带作用,加大光学光电子行业最新科研成果和产品的宣传推广力度。

会上,本社常务副社长彭圣也发了言,表示本社一定积极发挥《激光与红外》杂志作为总会会刊和中国中文核心期刊的作用,密切与各会员单位的关系,为推动光电产业发展积极做好媒体的宣传推动工作。

这次会议得到了江苏省宜兴市经济开发区的大力支持,与会代表还参观了宜兴市经济开发区和部分光电企业,与开发区管委会负责人进行了座谈。

(本刊通讯员)