

用非线性光学原理实现激光防护*

查子忠 胡 易

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨, 150001)

摘要: 较全面地介绍了近几年发展起来的用非线性光学原理实现激光防护的方法, 分析了这一方法的优点和传统的线性光学方法的缺点, 论述了激光防护技术的发展方向, 对激光防护材料——非线性光学材料, 提出了基本要求。

关键词: 非线性光学 激光防护

Realization of laser protection using nonlinear optics principles

Zha Zizhong, Hu Yi

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology)

Abstract: This paper introduces the various methods of realizing the laser protection by employing nonlinear optics principles, which have been developed recent years. The advantages of these new methods and disadvantages of the conventional linear optics methods for laser protection are analyzed. The developing tendency of laser protection technology is also discussed and set the basic demands on the nonlinear optical materials for laser protection mirrors.

Key Words: nonlinear optics laser protection

一、引言

随着激光技术的发展和应用范围的扩大, 激光防护日益受到重视。不仅众多的民用领域需要, 随着激光致盲武器的出现, 军用领域各兵种对激光防护的需求更为迫切。美国国防部每年投资一亿美元发展激光防护措施。

无论是民用还是军用, 激光防护的主要对象是人的眼睛和装备系统中的光电传感器。因为不管是人还是装备, 这两个部位最容易受到激光伤害。

二、激光防护技术的种类及原理

目前, 国内外实用的激光防护技术, 归结起来主要有以下三种:

* 本文得到了国防科委基金资助。

1. 吸收式激光防护镜。它的主要原理是采用对某种激光波长有强吸收的材料(例如滤色玻璃和染色塑料)作激光防护镜以达到对某种波长激光防护目的。

2. 反射式激光防护镜。它的主要原理是在基质材料上蒸镀反射膜,使该膜对某种波长激光具有高反射率,以达到对某种波长激光的防护目的。

3. 复合式激光防护镜。这是把吸收和反射两种功能结合在一起的激光防护镜。它在一定程度上可以改善激光防护性能。

上述三种方法均可称为线性光学方法或传统光学方法。因为从光学原理上说,光与物质相互作用结果,使介质产生极化,宏观极化强度 P 和光场强度 E 的关系可表示为:

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

上述三种方法均基于线性项产生的光学效应(线性吸收和线性反射),即基于线性光学原理或传统光学原理。

用线性光学原理构成的激光防护镜的特点是:激光防护镜只对光波波长敏感,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的平等吸收或平等反射,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受。因而对同一波长光的高光学密度(对强光的阻止本领)和高透明度(对弱光的透过能力)两个指标不能同时兼顾,两者是矛盾的。

三、探索新的激光防护原理和技术

随着激光技术的发展和和应用范围的扩大,这种线性激光防护镜越来越不能满足需要,尤其在军用领域显得更为突出。具体表现在以下两个方面:(1)在某些军用领域例如激光测距、激光制导、激光雷达等作为装备系统中保护光电传感器的激光防护镜,都要求在阻止来自敌方激光致盲武器破坏的同时,能保证自身发出的与敌方发出的激光波长相同的激光信号(弱激光)的接受。线性光学原理构成的激光防护镜是不可能满足这一要求的。(2)随着激光谱线的增多和宽波段连续可调谐激光的出现,在未来战场上,很难预先知道敌方致盲武器用的是什么激光光源,因此,作为保护人眼的激光防护镜,要求在整个可见光光谱区($\lambda=4000\sim 7800\text{ \AA}$)对强激光都有足够的防护能力,而对自然光有足够的透明度,要满足这一要求,线性防护镜也是无能为力的。这就要求我们探索新的激光防护原理和技术。

随着非线性光学基础研究的进展,从 80 年代开始,科学家们逐渐认识到采用非线性光学原理实现激光防护在原理上可以克服线性光学方法的缺点。因为根据非线性光学原理,只有强光与物质相互作用才能产生非线性光学效应,而弱光不能产生非线性光学效应。非线性光学材料对强光和弱光的入射是区别对待的,产生的效果是不同的。因此,用非线性光学原理构成的激光防护镜在原理上可以实现同一波长处,对强光的高光学密度和对弱光的高透明度两个指标的统一和兼顾。基于上述思想,几年来,各国科学家进行了大量的理论和实验探索,发表了大量学术论文,有的已达到实用水平,申报了专利。

目前,采用非线性光学原理实现激光防护方案很多,主要是利用三阶非线性光学效应。我们可以把这些方案大致归结为四大类:即非线性吸收,非线性折射,非线性反射和非线性散射。下面对一些典型方案作一介绍,它们的原理都可用 P 与 E 关系式的非线性项解释。

1. 反饱和吸收体(reverse saturable absorbers)^[1,2,6]

这是一种非线性吸收方案。已经发现一些高分子有机材料具有反饱和吸收特性。即低光

强入射时,吸收少,呈高透射;高光强入射时,吸收多,呈低透射。由于其非线性吸收一般来自电子机制,响应速度快,响应时间一般为 ps 量级。其原理可由五能级系统解释^[2]。目前发现的材料有阴丹士林(indanthrene),某些金属有机化合物,C₆₀等。它们的特性如图 1 所示。

这种方案的优点是:1)结构简单、使用方便,2)响应时间快,适合对调 Q 和锁模激光的防护。最大缺点是由于靠对强激光的非线性吸收实现激光防护,故抗激光损伤阈值一般较低。最大难点是具有实用价值的新的分子材料的设计和制备。它需要高分子化学工作者和物理学工作者的密切协作。

2. 自聚焦(self-focusing)和自散焦(self-defocusing)^[3,4]

这是一种非线性折射方案,它利用非线性光学的自聚焦或自散焦原理。只要材料的非线性折射率系数 n_2 (或 $\chi^{(3)}$) 足够大,对一定强度的激光就有明显的自聚焦或自散焦效应。当 n_2 为正值时,采用自聚焦方法,当 n_2 为负值时,采用自散焦方法。它的响应时间取决于材料的非线性机制,电子机制一般为 ps,热机制一般为 μs 或 ms。它们的结构和特性如图 2 和图 3 所示。

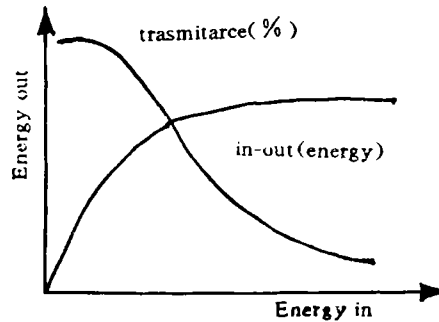
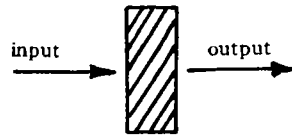


Fig. 1 Reverse saturable absorber and its characteristics

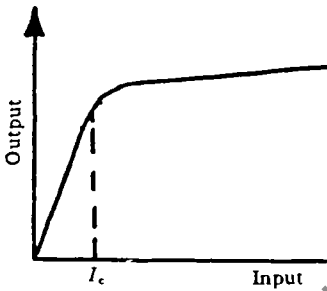
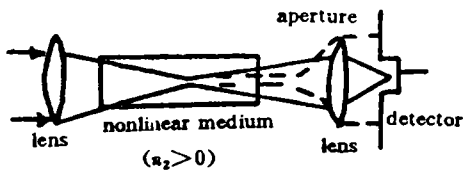


Fig. 2 Self-focusing device and its characteristic

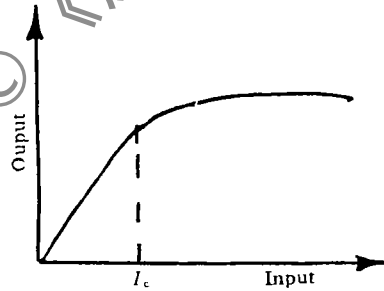
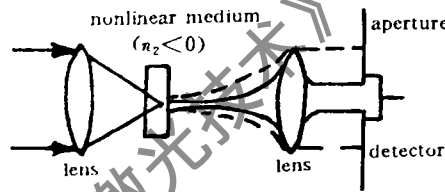


Fig. 3 Self-defocusing device and its characteristic

图中实线为弱光行进光路,虚线为强光行进光路。由图看到,对同一波长的强光与弱光入射,它们在防护镜中的行进光路不同。当入射光强小于自聚焦或自散焦阈值时,不产生自聚焦或自散焦效应,防护镜呈线性的高透射特性,当入射光强达到阈值时,防护镜呈非线性低透射特性,并将透射光强稳定在某一个值。稳定值的大小可根据需要,通过材料选择或结构设计实现。

这种方案只适合室内防护,不适合战场需要,因为实现自聚焦或自散焦,除了 n_2 大的非线性光学材料外,入射到材料中的光强分布必须是高斯分布。由于来自敌方的强激光经过数公里的传输,光斑面积扩大很多,而防护镜面积相当小,材料中的光强分布趋向均匀化,难以形成自聚焦或自散焦。

3. 非线性界面(nonlinear interface)^[5,6]

这是一种非线性反射与非线性折射相结合的方案。由线性材料和非线性材料构成的光学界面称为非线性光学界面,简称非线性界面。它也是利用材料的三阶非线性效应。其结构与特性如图 4 所示。

图中 n_0 和 n_0' 分别是线性材料和非线性材料的线性折射率, n_2 是非线性折射率系数, I 是非线性材料中的光强。光从线性材料入射到界面上,选择 $n_0 > n_0'$, $n_2 > 0$, 入射角 $\theta_i > \theta_c$ (全反射临界角)。当弱光入射时,由于 $n_2 I \approx 0$, 界面满足全反射条件,弱光无损失地被全反射进入光探测器。当强光入射时, $n_2 I > 0$, 由于非线性介质中消失场的存在,当光强增加到一定强度时, $n_0 \leq n$, 全反射条件被破坏,入射光被全透射或部分透射。从而呈现弱光入射时高反射,强光入射时低反射特性。当然,通过材料参数和入射方式的选取,也可实现弱光入射时呈高透射,强光入射时呈低透射特性。

这种方案优点是弱光透明度高,缺点是强光入射时,可能有相当一部分光能进入光探测器,对强光衰减难以达到要求。

4. 非线性散射(nonlinear scattering)^[7]

由某种液体和微粒构成的悬浮液,液体的线性折射率为 n_0 , 微粒的线性折射率为 n_0' , 选择 $n_0 = n_0'$, 两种材料中任何一种(或两种)是非线性光学材料,其折射率为 $n = n_0(n_0') + n_2 I$, n_2 为非线性折射率系数, I 是悬浮液中的光强。当弱光入射时, $n_2 I \approx 0$, 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,当强光入射时, $n_2 I \neq 0$ 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,呈现低透射特性。当然两种混合的固态介质构成的非线性散射体也会呈现上述特性。非线性散射体的结构和特性如图 5 所示。

这种方案优点是抗激光损伤阈值高,结构也比较简单。但液态的悬浮液不是最好的方案。除上述四种类型的方案以外,还有一些其他类型的方案。因篇幅关系,不再重述。随着研究工作的深入,还可能出现新的更有效的方案和材料。

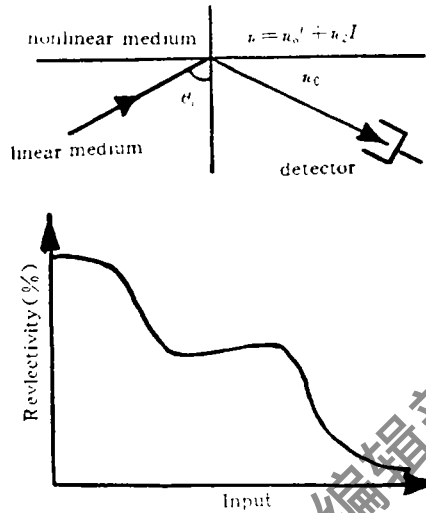


Fig. 4 Nonlinear interface and its characteristic

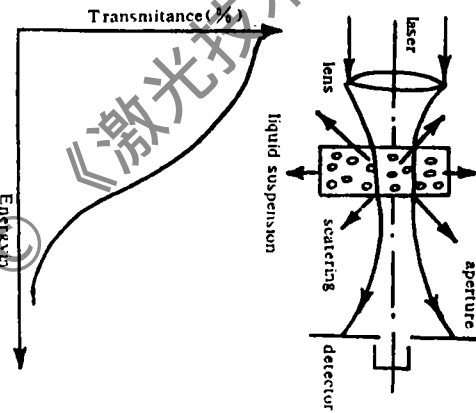


Fig. 5 Liquid suspension and its characteristic

四、结 论

由上面看到,不管哪种方案,只要是用非线性光学原理构成的激光防护镜,不仅对波长敏感,对光强也敏感,它对同一波长的强光和弱光的入射是区别对待的,产生的效果是不同的,它在原理上可以克服线性光学方法的缺点,它可以同时兼顾同一波长的高光学密度和高透明度两个指标。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。

一个理想的激光防护镜在要求的波段范围内,对强光和弱光的入射必须有区别对待的功能。在阻止强光破坏的同时,允许同一波长弱光的透射。只有这样的激光防护镜才能适应激光技术的发展和范围扩大的需要。可以说,采用非线性光学原理实现激光防护是激光防护技术发展中的一个方向。

用非线性光学原理实现激光防护的关键是性能优良的非线性光学材料。它对非线性光学材料的主要要求是:(1)大的非线性光学系数特别是大的三阶非线性光学系数 $\chi^{(3)}$ (或 n_2),因为利用三阶非线性光学效应构成的激光防护镜是全光的,它不需要外加场(电、磁、应力、温度等)的作用,给制造和使用带来方便。(2)快的非线性响应时间,以便适应对调Q和锁模激光的防护。(3)高的抗激光损伤阈值。(4)稳定的物理化学性能,以保证各种环境下使用的可靠性。(5)材料容易制备,价格低廉。

可见,发现、研制性能优良的非线性光学材料特别是三阶非线性光学材料对这一新的应用领域是至关重要的基础工作。

参 考 文 献

- 1 Hoffman R C, Stetyick K A, Potembe R S. J O S A, 1989;B6(4):722
- 2 Tutt L W, McCabon S W. Opt Lett, 1990;15(12):700
- 3 Soileau M J, Williams W E, Stryland E W V. IEEE J Q E, 1983;QE-19(4):731
- 4 Boggett T F, Moss S C, Boyd L W. Opt Lett, 1984;9(7):291
- 5 Smith P W, Tomcinson W J. IEEE J Q E, 1984;QE-20(1):30
- 6 Simoni F. Opt Lett, 1988;13(10):886
- 7 Guha S, Chen W P. Opt Commun, 1987;61(6):425
- 8 Tutt L W, Kost H. Nature, 1992;356(19):225

作者简介:查子忠,男,1936年10月出生。副研究员。现从事激光应用与非线性光学研究工作。

胡 易,女,1965年11月出生。助教。现从事普通物理课教学和非线性光学研究。

收稿日期:1993-05-08 收到修改稿日期:1993-07-15