

非线性光学限幅技术与激光防护*

宋瑛林 李淳飞

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

摘要 介绍了非线性光限幅技术的基本原理, 评述了单一型光限幅技术的发展以及复合型光限幅技术的最新成果.

关键词 非线性光学, 光限幅, 激光防护

Abstract We introduce the principle of nonlinear optical limiting and discuss the development of single optical limiting technology and new results of hybrid optical limiting.

Key words nonlinear optics, optical limiting, laser protection

1 前言

随着激光技术的发展与应用, 特别是激光武器的应用, 激光威胁日益严重, 激光安全与防护日益紧迫. 目前已有一些激光防护器投入应用. 这些器件基本上是基于线性光学的吸收、反射、衍射等原理研制而成的, 在一定的条件下, 对激光具有一定的防护效果, 但是这些器件也存在这样或那样的缺陷: 如可见光透射率较低, 防护波段范围小, 防护激光能量较低等. 虽然这些激光防护镜种类繁多, 但迄今为止还没有一种能够普遍适用的材料和结构, 来与波长、能量、脉冲速率多变的激光系统相对抗. 在波长可调谐的高能激光面前, 上述线性器件都将失去作用. 为研制出宽带、快速、高透射的高能激光防护器, 以期实现对短脉冲、可调谐的激光防护, 某些大国加紧了新型防护器件的研制. 目前国外的激光防护研究的趋势是应用非线性光限幅技术^[1].

2 非线性光限幅技术

非线性光学限幅效应, 是指当激光激发介质时, 在低光强下, 介质具有较高的线性透射

率, 输出光强随入射光强的增加而近似线性增加; 而在高光强下, 由于介质的非线性光学效应使透射率下降, 当入射光强达到一定的阈值后, 输出光被限制在一定的范围内而不改变光强的非线性光学现象, 简称光限幅. 图 1 为理想光限幅的示意图. 在低光强下, 输出能量随输入能量的增加而线性增加; 当输入能量达到一定阈值 E_{th} 后, 随输入能量的增加, 输出能量被限制在一定值 E_C , 这个阈值 E_{th} 称为光限幅的输入阈值, E_C 被称为限幅的输出箝位值, E_D 为器件的损伤阈值.

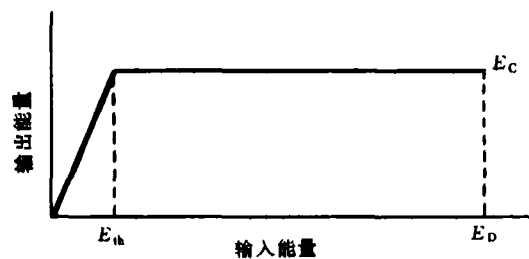


图 1 光限幅示意图

同线性器件相比, 光限幅器的优点在于防护动态范围大, 响应波段宽, 速度快, 可见光透射率高, 因而引起了研究人员的极大兴趣. 从 1967 年观察第一次光限幅现象到现在, 已研究

* 1995 年 3 月 31 日收到初稿, 1995 年 7 月 10 日收到修改稿.

了多种材料及基于各种非线性光学效应的光限幅效应。光限幅的研究进展与非线性光学以及非线性光学新材料的发展是紧密相关的。光限幅的原理已由早期的自聚焦^[2]发展到双光子吸收^[3]、激发态吸收^[4]、光折变^[5]、非线性散射^[6]、非线性反射^[7]、光学双稳性等。限幅材料由半导体^[8]、液晶^[9]发展到有机材料^[10]，最近人工合成的富勒烯材料又引起人们的注意^[11]。虽然光限幅效应种类比较多，材料、结构丰富多样，但是从原理上分，可分为单一型和复合型两种。单一型是指应用一种非线性光学效应的光限幅；复合型是指应用两种或两种以上非线性光学效应的光限幅。

3 单一型光限幅

单一型光限幅主要有自聚焦(自散焦)、激发态吸收、双光子吸收、光折变、非线性散射、非线性反射光限幅等。

3.1 自散焦(自聚焦)光限幅

自散焦(自聚焦)是一种由于光致折射率变化所引起的光束自作用。在高斯光束的作用下，由于介质的光学非线性使介质内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，通过它的光束将被扩束，使入射激光在介质中产生自散焦；反之，产生自聚焦现象。如果在样品后面选择适当的位置放置一个小孔，就可以限制激光的输出功率。当入射光功率比较小时，随输入光功率的增加，输出功率线性增加。当输入光功率增大到一定阈值后，由于介质的自散焦非线性，光束强烈地发散，只有一部分光通过小孔，输入光功率越大，光束发散越厉害，通过小孔的光不再线性增加，此时限幅器工作在非线性区。当输入光功率大到一定阈值时，随输入光功率的增加，输出光功率被限制在一定范围内不再增加。实际上，自散焦光限幅的实质是通过光束发散来降低输出光功率密度，介质的光致非线性越大，输出光束发散就越厉害，输出光功率密度就越低，光限幅效果就越好。自散焦

是最早研究的非线性光学现象之一，自散焦光限幅也是研究最早的光限幅效应。1964年就已预言自聚焦光限幅的存在。1967年，R.C.C. Leit等人第一次观察到了硝基苯的热自聚焦光限幅现象^[2]。由于热非线性的响应速度慢于电子非线性，后来人们更多地研究电子非线性机制的自聚焦光限幅。1980年，M.J. Soileau等人研究了CS₂自聚焦限幅特性。自聚焦起源于克尔效应^[12]；此后该研究小组又研究了CS₂在不同波段对不同脉冲宽度的激光的自散焦光限幅特性。1991年，T.J. Bunning等人研究了Diphenyl polyenes的电致伸缩自聚焦光限幅效应^[13]。最近，热自散焦光限幅研究又引起了人们的注意。

3.2 双光子吸收(TPA)光限幅

双光子吸收是指介质同时吸收两个光子向高能级跃迁。双光子吸收与光强成平方关系：

$$dI/dz = \alpha I + \beta I^2, \quad (1)$$

其中 α 为线性吸收系数， β 为双光子吸收系数。一般条件下， α 比较小，在低光强下吸收很弱，介质高度透明，但是在高光强下是增强吸收，从而实现限幅特性。双光子吸收光限幅研究多采用半导体材料。早在1969年，J.W. Ralston等人第一次研究了半导体材料的双光子吸收光限幅特性^[5]。半导体光限幅的优点在于结构简单，对应红外探测器的“窗口”，对于红外探测器的防护具有特别重要的意义，因而半导体的双光子吸收光限幅研究比较活跃。随着研究的深入，人们发现半导体材料的损伤阈值较低，限制了器件的动态范围。为了提高器件的动态范围，1986年E.W. Van Stryland等人研究了厚样品的光限幅特性^[14]。他们把激光聚焦到半导体的内部，由于双光子吸收等非线性效应的作用，导致了半导体内部的光强低于材料的损伤阈值，从而扩大了半导体材料的光限幅器的动态范围。1987年，他们进一步研究了自防护型半导体光限幅效应^[15]。

3.3 光折变光限幅

光折变光限幅简单地说就是利用光折变效应引起的散射光放大，使入射光向散射光转移

了能量,从而在入射光方向上限制了透射光能量的大小.这种光散射本质上不同于通常由大量散射中心或材料的不均匀引起的光散射,它起因是入射光与光折变材料中的缺陷引起的散射光相干涉,写入了噪音相位光栅,通过光栅的衍射,使入射光向散射光转移了能量.1985年,M.C.Golomb等人首先研究了光折变光限幅效应^[5].

虽然光折变光限幅的阈值和输出幅值比较小,但一般的光折变材料的损伤阈值比较低,响应速度较慢.

3.4 非线性散射光限幅

目前主要研究光致等离子体散射光限幅.光致等离子体散射光限幅一般是指液态非线性介质吸收高强度激光后,蒸发周围液体产生气泡以及形成等离子体,由于等离子体和气泡对光的散射,使透射光强受到限制.

应用碳素墨水可以实现气体等离子体散射光限幅效应,但输出箝位值可以达到 μJ 量级^[6].

3.5 反饱和吸收光限幅

反饱和吸收是最近才发展起来的一个新的非线性光学研究课题.与通常的饱和吸收相反,反饱和吸收是一种吸收系数随入射激光光强的增加而增加的非线性现象^[4].这样在激光泵浦下,在低光强时,介质的吸收系数近似为线性的;而在高光强下,介质的吸收系数随输入光强的增加而增大,从而实现光限幅.反饱和吸收一般发生在非共振或近共振区,因而这种光限幅可以具有高的线性透射率.同时反饱和吸收起源于有机材料的激发态吸收,其时间特性决定于材料的激发态寿命.由于激发态寿命以及系际跃迁寿命比较快,因而反饱和吸收光限幅的开关速度可以很快.此外反饱和吸收光限幅还具有器件结构简单、防护波段宽等优点,对于研制轻便型防护镜具有重要意义,所以引起研究人员的注意,并测量了各种酞菁类、卟啉类金属有机化合物的反饱和和吸收光限幅特性.1992年,李淳飞等人研究酞菁类金属有机化合物的反饱和和吸收的稳态和动力学特性.研究结

果表明,在不同脉冲宽度激光的激发下,反饱和和吸收分别起源于单重态吸收和三重态吸收^[16].最近,具有三维 π 电子共轭体系的 C_{60} 和 C_{70} 材料的光限幅特性引起了研究人员的极大兴趣^[11],并研究了富勒烯溶液、掺杂聚合物以及胶体的激发态吸收光限幅特性.

反饱和吸收型光限幅器的缺点在于器件的防护范围受介质的激发态吸收饱和的限制.

3.6 非线性反射光限幅

非线性反射光限幅效应是通过介质的非线性折射率的改变,导致在界面上发生非线性反射来实现的^[7].图2为非线性反射光限幅效应示意图.非线性介质(n_a)和线性介质(n_b)面结合时,非线性介质折射率为

$$n_a = n_b + \Delta n(I), \quad (2)$$

其中 $\Delta n(I) > 0$.在低入射光强下, $\Delta n(I)$ 很小,光全部通过;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,从而实现了光限幅.1992年,R.R.Michael等人研究了碳悬浮颗粒的非线性界面的非线性反射光限幅^[7].

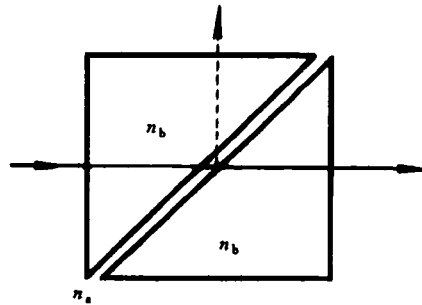


图2 非线性反射光限幅示意图

4 复合型光限幅

虽然单一型光限幅研究不断取得新进展,但是目前还没有一种材料的单一型光限幅器的限幅箝位值可以达到人眼的照射极限,以真正实现宽带、短脉冲激光的防护.最近复合型光限幅技术又受到注意.

4.1 激发态吸收增强热限幅

1993年, B.L. Justus 等人研究了新型复合光限幅效应, 即激发态吸收增强热限幅^[17]. 光限幅是由于激发态吸收和热自散焦共同作用的结果. 在一定的光强范围内, 光限幅主要来源于介质的激发态吸收; 当光强达到一定阈值后, 激发态吸收增加, 增强了材料的热自散焦非线性, 从而增强了光限幅特性. 激发态吸收增强的热效应同普通热效应的区别在于: 普通的热致非线性主要由基态吸收引起的; 激发态吸收增强热效应是由于基态吸收和激发态吸收共同作用的结果, 而且激发态吸收的作用比较大. 因而激发态吸收增强热限幅器具有较高的线性透射率.

4.2 热散焦/散射光限幅

1994年, B.L. Justus 等人研究了热散焦/散射非线性光限幅效应^[18]. 在低光强下, 光限幅主要是由宽带吸收染料聚苯胺的热散焦; 在高光强下, 当样品池的内表面是粗糙表面时, 产生了一附加的散射限幅效应. 研究表明, 散射产生是由于在高光强下, 液体发生了汽化, 从而使界面发生折射率失配, 导致非线性散射. 这种复合的光限幅要优于纯热散焦限幅两个数量级.

4.3 双光子吸收/自散焦光限幅

由于双光子吸收诱导光致载流子, 导致材料的折射率发生变化, 产生自散焦现象, 从而实现复合光限幅效应. 这种光限幅效应在半导体中可以实现^[19].

4.4 激发态吸收/无规界面非线性散射光限幅

1994年, 作者研究了具有无规界面的 C₆₀ 甲苯溶液的光限幅实验^[20]. 该实验结果表明, 对于具有无规界面的 C₆₀ 甲苯溶液, 在低光强下, 界面处于高透射状态, 限幅主要起源于介质的激发态吸收; 但在高光强下, 由于介质的激发态吸收和其他非线性效应, 导致界面的失配增大, 界面由高透射状态转变为低透射状态, 从而使界面的散射逐渐增强, 进而降低了限幅箝位值, 这时限幅效应主要起源于界面的散射和介质的激发态吸收. 这是一种新型光限幅效应,

对于实用器件具有重要意义.

5 展望

本文从非线性光学原理出发总结了光限幅技术的发展, 30年来, 光限幅技术已由单一型发展到复合型, 限幅箝位值进一步降低. 目前在实验室条件下已获得了低于人眼照射极限的限幅箝位. 随着非线性光学限幅技术的发展, 一种宽带、快速、高透射轻便型激光防护器将以实用.

参 考 文 献

- [1] J.A. Hermann, *J. Opt. Soc. Am. B*, **1**(1984), 729.
- [2] C.C. Leits, S.P.S. Porto and P.C. Damen, *Appl. Phys. Lett.*, **10**(1967), 100.
- [3] J.W. Ralston and K.R. Chang, *Appl. Phys. Lett.*, **15**(1969), 164.
- [4] J. Messier, F. Kajzar and P. Prasad, *Organic Molecules for Nonlinear Optics and Photonics*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, (1991), 369.
- [5] C. Golomb and A. Yariv, *J. Appl. Phys.*, **57**(1985), 4906.
- [6] M.M.J. Soileau and E.W. Van Stryland, *J. Opt. Soc. Am. B*, **9**(1992), 1100.
- [7] R. Michael and C.M. Lawson, *Opt. Lett.*, **17**(1992), 1055.
- [8] E.W. Van Stryland et al., *J. Opt. Soc. Am. B*, **5**(1988), 1980.
- [9] I.C. Khoo, H. Li, P.G. Lopresti et al., *Opt. Lett.*, **19**(1994), 530.
- [10] S. Lo, S.A. Jenekhe and S.T. Wellinghoff, *SPIE*, **824**(1987), 162.
- [11] L. Tutt and Alan Kost, *Nature*, **356**(1992), 255.
- [12] M.J. Soileau, *J. Opt. Soc. Am. A*, **70**(1980), 1051.
- [13] T.J. Bunning et al., *Appl. Opt.*, **30**(1991), 4341.
- [14] D.J. Hagan et al., *J. Opt. Soc. Am. A*, **3**(1986), 105.
- [15] D.J. Hagan et al., *Opt. Lett.*, **13**(1988), 315.
- [16] Li Chunfei et al., *Phys. Rev. A*, **49**(1994), 1149.
- [17] B.L. Justus, Z.H. Kafafi and A.L. Huston, *Opt. Lett.*, **18**(1993), 1603.
- [18] B.L. Justus, A.J. Campillo and A.L. Huston, *Opt. Lett.*, **19**(1994), 673.
- [19] E.W. Van Stryland et al., *Opt. Eng.*, **24**(1985), 613.
- [20] 宋瑛林等, 激光与光电子学进展, No. 7(1995), 81.