

# 基于光限幅效应时域滤波的分析

程 坤 赵军普 胡东霞 代万俊 周 维 张 鑫 邓 武 蒋学君 张 崑 张小民 景 峰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 脉冲的时间调制严重威胁高功率聚变激光装置在高通量下运行的自身安全甚至使聚变点火失败, 因此必须根除或充分抑制。提出了一种基于光限幅效应时域滤波的方法, 光限幅效应是非线性光学过程, 可以通过材料实现低光强输入时透射率较高, 高光强输入时透射率较低。介绍了光限幅效应的主要机制、研究概况, 分析了适用于光路中的限幅机制, 最后讨论了该时域滤波方法在实际光路中的应用形式及发展前景。

**关键词** 非线性光学; 光限幅效应; 时域滤波; 反饱和和吸收

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.101901

## Analysis of Time Domain Filtering Based on Optical Limiting Effect

Cheng Kun Zhao Junpu Hu Dongxia Dai Wanjun Zhou Wei Zhang Xin  
Deng Wu Jiang Xuejun Zhang Kun Zhang Xiaomin Jing Feng

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The time modulation is detrimental to high power laser facility and even can prevent fusion ignition, which must be eliminated or substantially suppressed at least. Time domain filtering technology is proposed to eliminate such a time modulation based on optical limiting (OL) effect. OL is a nonlinear optical process by which a material displays high transmission for low input intensity and low constant transmission at high input intensity or fluence. Characters of the main OL mechanisms are introduced. In addition, the realization methods of time domain filtering based on OL devices and the application prospect are discussed.

**Key words** nonlinear optics; optical limiting effect; time domain filtering; reverse saturable absorption

**OCIS codes** 190.4710; 350.2450; 140.3360

## 1 引 言

自 1960 年激光问世以后, 科学家们提出了用激光加热引发核聚变的设想。激光聚变能够为人类提供近乎完美的能源, 然而实现激光聚变的难度超乎想象。实现靶丸的可靠压缩和点火对靶面辐照均匀性有着迫切需求。同时, 为了提高装置总体转换效率, 降低造价, 要求持续提高装置的运行通量<sup>[1]</sup>。为解决上述问题, 高功率激光装置的工作方式由传统的窄带脉冲向宽频带方向发展。目前国内外典型高功率激光装置普遍采用正弦调频的方式产生宽带光。但是正弦调频脉冲传输及频率转换过程中容易产生幅度时间调制<sup>[2~4]</sup>。时间调制对聚变激光装置的安全运行和点火的成功有着巨大危害。时间调制可能破坏各路光束的功率平衡, 靶的流体力学响应大约是 10 GHz<sup>[5]</sup>, 频率低于该值的调制必须消除。调制能够放大靶面等离子体的不稳定性(后向拉曼、布里渊散射)。等离子体响应时间约皮秒量级, 一般调制都会产生此不利影响。调制有可能使瞬时功率密度超过损伤阈值, 将光学元件破坏。因此, 为保证脉冲的传输放大和点火成功, 时间调制必须消

**收稿日期**: 2011-05-15; **收到修改稿日期**: 2011-06-07; **网络出版日期**: 2011-09-25

**基金项目**: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2009B0401045)资助课题。

**作者简介**: 程 坤(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事强激光非线性传输方面的研究。E-mail: kchengx@163.com

**导师简介**: 景 峰(1968—), 男, 研究员, 主要从事高功率固体激光物理和激光技术等方面的研究。

E-mail: jingfeng@my-public.sc.cninfo.net(通信联系人)

除或充分抑制。美国国家点火装置(NIF)针对增益窄化效应采用标准具进行补偿<sup>[6]</sup>,然而精细的光谱难以精确测量,标准具厚度的精确控制也存在困难。液晶空间光调制器(美国 Mercury 装置)补偿效果好<sup>[7]</sup>,但仅适用于分离谱的脉冲,并且技术难度较大。

鉴于此,本文提出了基于光限幅效应从时域滤除时间调制的方法。光限幅效应是一种非线性光学效应,在低光强(能量)激发下,介质具有较高的线性透射率,随着输入光强(能量)增大,输出光强(能量)近似线性增加,当光强(能量)达到一定阈值后,介质具有较低的非线性透射率,随输入光强增加,输出光强将被限制在一定范围内<sup>[8]</sup>。其具有带通滤波器的特点,不需要把信号转换到频域。发展限幅器的初衷是为保护人眼、光敏元件免受激光损伤,大多工作在可见光段。发展至今,限幅器的应用已扩展至脉冲整形、功率稳定和扩展光敏元件的动态范围。随着光通信的发展以及高功率 Nd:YAG 激光器的普遍存在,限幅器工作波段向近红外波段(1000~1600 nm)发展。应用领域的扩大对光限幅器提出了新的要求,需要充分的工作带宽和脉冲宽度范围,对光束质量的降低要达到可以忽略的范围,而且要有较高的损伤阈值。本文介绍了光限幅效应的主要机制和研究概况,分析了适合用于光路中的限幅机制,对光限幅效应时域滤波在实际光路中的应用形式进行了探讨。

## 2 光限幅机制

光限幅效应可起源于多种非线性机制,如非线性吸收、非线性散射和非线性折射。根据能量的限制方式,光限幅机制可分为散布型和吸收型。散布型机制如自聚焦、自散焦、受激散射、受激折射等,将入射能量在空间上重新分配。因此,散布型限幅器使用时需结合光阑将偏离的光束阻挡掉,这不可避免地使系统复杂,不利于系统的集成化。与此不同,吸收型限幅器通过反饱和和吸收(RSA)、双光子吸收(TPA)降低高入射能量时的透射率,无需光阑,引起广泛的研究兴趣。RSA 可分为 2 个过程,基态电子吸收光子跃迁至激发态(GSA),由于激发态吸收截面大于基态吸收截面,激发态电子吸收能量向高能态跃迁(ESA),并且 GSA 特指单光子吸收(1PA)。TPA 过程中,2 个光子几乎同时(约  $10^{-15}$  s)被吸收,瞬时性是主要特征,因此 TPA 过程与入射脉冲强度有关,在短脉冲(不大于皮秒量级)或高能脉冲下容易发生。对于 ESA,处于激发态的电子吸收光子继续向高能态跃迁,由于某一时刻的激发态吸收与之前的激发态电子布居有关,不再是瞬时过程。在激发态寿命长于入射脉冲宽度的情况下,物质的吸收取决于脉冲流量。

RSA 材料在特定波段下具有限幅作用,可用多个振动加宽的电子能级模型描述。一般情况下,常采用五能级模型,3 个单重态能级与 2 个三重态能级耦合。RSA 材料参数与脉冲参数之间应满足一定的关系,Harter 等<sup>[9]</sup>利用五能级模型(图 1)进行了讨论。其中, $S_0$  为基态, $S_1$ 、 $S_2$  分别为单重态第一、第二激发态, $T_1$ 、 $T_2$  为三重态第一、第二激发态, $N_p$  为  $p$  能级的电子数, $\sigma_{pq}$  为  $p$  能级到  $q$  能级的吸收截面, $\tau_{pq}$  为  $q$  能级到  $p$  能级的衰退时间。激发态吸收截面必须大于基态吸收截面  $\sigma_{12} > \sigma_{01}$ ,这是 RSA 材料的基本特征;基态吸收截面足够大以至于入射光能快速使第一激发态  $S_1$  能级饱和;参与 RSA 过程的任一激发态在 RSA 过程中不会衰退至其它能级,即  $\tau_{10}$ 、 $\tau_{30} > \tau_p$  (脉冲宽度);受激辐射可以忽略, $\tau_{11} \ll \tau_p$ ,否则会降低吸收效率甚至将后续脉冲放大。

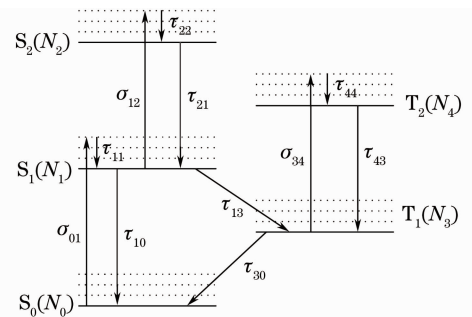


图 1 反饱和吸收体的五能级模型

Fig. 1 Five-level energy manifold schematic of an reverse saturate absorber

## 3 光限幅效应研究概况

自 1967 年 Leite 等<sup>[10]</sup>首次观察到光限幅现象至 20 世纪 90 年代以前主要以半导体材料为研究对象,是光限幅材料的发现和理论发展阶段。20 世纪 90 年代后,有机分子材料成为光限幅材料开发的物质基础。有机分子材料易于加工,使用成本相对较低,激光损伤阈值高,能够通过合成控制和计算化学的方式“裁剪”

出满足特定功能需求的材料。含有共轭  $\pi$  电子的有机材料还具有三阶非线性光学系数大、响应速度快的显著特点,根据分子中离域  $\pi$  电子可以自由运动的维度,有机非线性光学材料分为一维  $\pi$  电子结构、二维  $\pi$  电子结构和三维  $\pi$  电子结构。此类材料是重点关注对象。

### 3.1 $C_{60}$ 和碳纳米管

$C_{60}$  属于三维  $\pi$  电子共轭体系,具有单重态和三重态结构<sup>[11]</sup>,高能态(单重态或三重态的激发态) $C_{60}$  分子的瞬态吸收谱表明, $C_{60}$  分子的吸收机制为 RSA<sup>[12]</sup>。1993 年,美国科学应用国际公司(SAIC)McLean 等<sup>[12]</sup> 和美国海军实验室合作研究了  $C_{60}$  甲苯溶液 532 nm 处的非线性吸收性能。实验采用了 Nd:YAG 倍频脉冲,经调 Q、锁模,脉宽分别为 8 ns、30 ps。溶液摩尔分数为 2.59 mmol/L,盛放于通光长度 1 mm 的石英池中,线性透射率 62% (不包括石英池表面反射损失)。非线性透射率数据如图 2 所示。图 2 中实线为利用五能级 RSA 模型对实验进行模拟计算的结果。从图中看出,通量略低于  $1 \text{ J/cm}^2$  时,实验数据和理论结果符合很好,表明吸收机制为 RSA。而通量略高于  $1.4 \text{ J/cm}^2$  时,纳秒脉冲的数据与理论结果严重偏离,并且随着通量的进一步提高输出能量趋于 0,表明发生了其他吸收机制,比如非线性散射、非线性折射,使出射光偏离通光路径,以至于探测不到能量。

从图 2 中可以看出 RSA 过程的特征。在脉宽相差 2 个量级的情况下,透射率相差不到一半,表明 RSA 过程是通量依赖型的。与此不同,多光子吸收尤其 TPA 是强度依赖型的。同时  $C_{60}$  甲苯溶液对皮秒脉冲限幅效果明显优于纳秒脉冲。这是由于  $C_{60}$  具有单重态和三重态结构,系间弛豫时间 1.2 ns,在皮秒脉冲激发下,单重态第一激发态至三重态的第一激发态系间跃迁时间及三重态寿命远大于入射脉冲宽度,故三重态上分子布居数很小,单重态激发态吸收占主导地位;而在纳秒脉冲激发下,由于系间跃迁时间比脉冲宽度小,当入射激光脉冲能量比较大时,三重态分子布居数较大,三重态吸收起主要作用,同时由于单重态第一激发态吸收截面大于三重态的吸收截面,所以  $C_{60}$  甲苯溶液的单重态激发态非线性比三重态强,使得  $C_{60}$  对皮秒脉冲的限幅效果好<sup>[13]</sup>。接入取代基可以调整  $C_{60}$  的限幅性能。2009 年,Chi 等<sup>[14]</sup> 制备了一种包含  $C_{60}$  衍生物的共聚混合物,该混合物在 750~900 nm 的限幅能力强于已报道的有机限幅材料,适用于飞秒到纳秒量级脉冲宽度范围。

但是  $C_{60}$  以及衍生物在 1064 nm 几乎没有限幅能力<sup>[15]</sup>,1053 nm 也未见报道。碳纳米管在 532 和 1064 nm 具有良好的限幅效果,作为一种宽带防护材料在光限幅领域应用广泛。碳纳米管是由片层结构的石墨卷成的无缝、中空的同轴管体,两端各有半个富勒烯球的帽子,形成一种同轴密封的管型结构<sup>[16]</sup>。其直径在几纳米到几十纳米,长度可达微米量级。按组成碳纳米管的片层结构,可将其分为单壁和多壁碳纳米管,多壁碳纳米管层与层之间的距离约为 0.34 nm。

1999 年,新加坡国立大学 Chen 等<sup>[17]</sup> 研究了碳纳米管的原子排列、电子结构和非线性光学特性。图 3 为碳纳米管乙醇溶液(圆圈)、 $C_{60}$  甲苯溶液(加号)和炭黑蒸馏水悬浮液(实心三角)的限幅能力比较。3 种溶液 532 nm 处线性透射率均为 50%,测试条件完全一致。测试光源为脉宽 7 ns,532 nm(倍频后)、1064 nm Nd:YAG 激光器,能流小于  $0.06 \text{ J/cm}^2$  时,透射率为常数,大于  $0.06 \text{ J/cm}^2$  时,透射率随能流的增大而下降。限幅阈值定义为透射率降至线性透射率的一半时的入射能流。碳纳米管的限幅阈值为  $1.0 \text{ J/cm}^2$ ,比  $C_{60}$  和石墨的低。从图 3(b)可以看出在 1064 nm 处,碳纳米管依然具有良好的限幅能力,炭黑限幅阈值变得很高,而  $C_{60}$  几乎没有限幅能力。图 3(a)中的插图为碳纳米管和  $C_{60}$  的线性吸收谱。 $C_{60}$  在 532 nm 处存在吸收峰,因此能够将电子激发到激发态,从而发生 RSA,与  $C_{60}$  的主要限幅机制为 RSA 相符。在 1064 nm 处不存在吸收峰,不具备限幅能力。碳纳米管在 532、1064 nm 处均没有吸收峰,基态电子无法跃迁到激发态,因此限幅机制非 RSA。与碳纳米管结构相似且线性透射率接近的炭黑限幅机制为非线性散射,考虑到碳纳米管的结构特点,推断碳纳米管限幅机制为非线性散射。

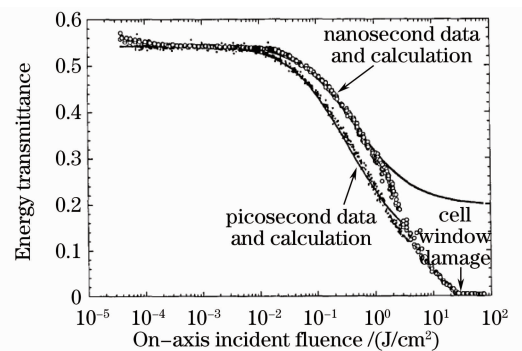


图 2  $C_{60}$  甲苯溶液能量透射率

Fig. 2 Transmittance of  $C_{60}$  toluene solution

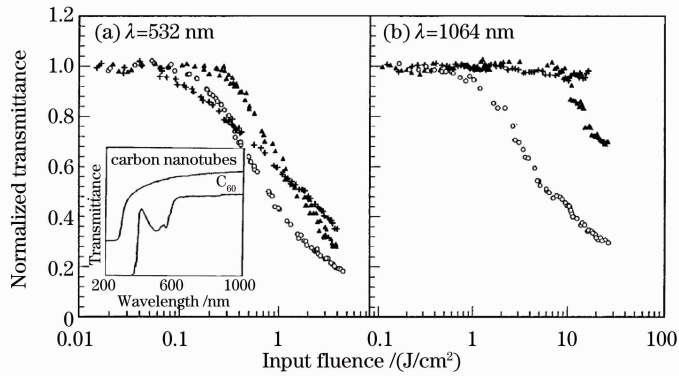
图3 碳纳米管、C<sub>60</sub>和炭黑的532、1064 nm限幅能力比较

Fig. 3 Optical limiting performance of carbon nanotube, C<sub>60</sub> and carbon black at 532 and 1064 nm

### 3.2 酞氰染料金属络合物

酞氰染料属于二维 $\pi$ 电子共轭体系, $\pi$ 电子可以沿大的共轭环运动。酞氰分子除了具有一个大的环状共轭电子结构外,还有众多小的环状共轭电子结构,其外围又有各处支链接入处,可以接入各种取代基。其中心位置可由非金属原子或Cu、Ni、Pt、Pa、Si等原子取代。外围接入和中心取代可以改变酞氰分子的限幅能力和溶解性。酞氰染料的限幅能力随中心取代原子原子序数的增大而增强,且吸收光谱红移<sup>[17]</sup>。酞氰染料非线性吸收系数大,化学稳定性和热稳定性好,获得了广泛研究。

1993年,美国海军实验室 Shirk 等<sup>[19]</sup>研究了 PbPc(CP)<sub>4</sub> 氯仿溶液的限幅特性,实验装置如图4所示。图中 WP 为波片,Pol 为偏振片,二者组合以控制入射激光能量;A1 为光阑,用于屏蔽杂散光;A2 和 A3 组成  $f/5$  光学系统;L1 为三片型显微镜物镜;reference 和 detection 为用于测量输入和输出脉冲的能量计。

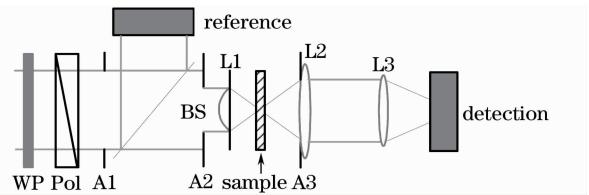


图4 美国海军实验室 PbPc(CP)<sub>4</sub> 氯仿溶液  
实验装置示意图

实验利用脉宽 8 ns 的 Nd:YAG 倍频光(532 nm)测试了材料的透射率。限幅材料为 PbPc(CP)<sub>4</sub> 氯仿溶液,摩尔分数为 0.043 mol/L,置于溶液透光长度 30  $\mu$ m 的容器中。线性透射率 68%,限幅阈值(8 $\pm$ 2) nJ,光斑直径(1/e<sup>2</sup> 峰值处全宽度)2.2 $\pm$   $\mu$ m。当输入 20000 nJ 时,输出小于 250 nJ,透射率约为 1%。但是,只有输入能量低于 1000 nJ 时,限幅能力是可重复的。高能量(大于 3500 nJ)下,材料发生光化学反应,在焦斑处产生沉淀阻碍后续脉冲通过,从而加强了限幅能力。PbPc(CP)<sub>4</sub> 氯仿溶液限幅机制为反饱和吸收。简并四波混频(DFWM)实验表明,1064 nm 处酞氰铅也具有限幅能力<sup>[20]</sup>。

Fig. 4 Scheme of PbPc(CP)<sub>4</sub> chloroform solution optical limiting experiment setup of Naval Research Laboratory of USA

2006年,印度科钦科技大学 Santhi 等<sup>[21]</sup>研究了酞氰化锌(ZnPc)的二甲基甲酰胺(DMF)溶液 532、1064 nm 处的限幅特性,低光强下,532 和 1064 nm 的线性透射率分别为 67%、81%。还对材料非线性吸收系数的光谱(520~686 nm)依赖性进行了研究。材料在 527~576 nm 发生 RSA,非线性吸收系数  $\beta$  为负,波长由低吸收到高吸收区域改变到 Q 带附近的高吸收区域,非线性响应从 RSA 转变为饱和吸收(SA),非线性吸收系数  $\beta$  为正。波长移动到红外(1064 nm)时,SA 变为 RSA。2010 年,哈尔滨工业大学 Shui 等<sup>[22]</sup>研究了 500~600 nm PbPc(CP)<sub>4</sub>/DMF 溶液的非线性特性,通过拟合实验数据得到了该波段非线性吸收、折射系数为正值并与波长成指数关系,验证了该波段内吸收机制为 RSA。由于吸收系数具有波长依赖性,

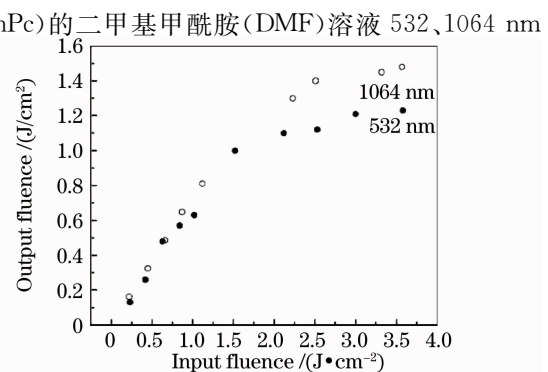


图5 532、1064 nm 处 ZnPc 限幅能力  
Fig. 5 Optical limiting performance of ZnPc at  
532 and 1064 nm

在不同波段应用时需要重新测量吸收系数并分析动力学过程。该课题组还设计了测量材料非线性光学特性的新技术。2008年, Li等<sup>[23]</sup>报道了一种时间分辨的抽运-探针光技术, 该技术包含了相位物体成像技术, 能够同时测量动态非线性吸收与非线性折射。更重要的是该技术能够同时获取非线性光学系数、能级和分子运动动力学的数值(含符号)信息。2010年, Li等<sup>[24]</sup>报道了修正的双 $4f$ 成像系统, 该系统可以有效消除用于测量的光参量产生激光脉冲的空间分布不稳定性。

### 3.3 TPA 材料

由于RSA材料基态吸收为1PA, 线性吸收不可忽略, 且工作波段限制在单光子共振吸收区, 工作带宽受到限制。TPA材料可以解决线性透射率较低的问题。TPA材料中, 单光子能量低于材料带隙, 线性透射率高, 在光限幅领域有重要地位。另外, TPA材料广泛应用于安全、高精度诊断工具、各种癌症的有效治疗、非线性吸收体、生物探测、三维微加工、荧光成像系统以及光存储等领域, 是一种重要的功能材料<sup>[25]</sup>。2005年, 美国SAIC公司Sutherland等<sup>[26]</sup>研究了有机发色团AF240、AF350、AF450(统称为AFX)的TPA和激发吸收特性。实验测量了AFX的TPA截面, 并用测得的吸收截面理论计算, 在实验的能量范围内计算结果和实验符合很好。实验使用的脉冲为光参量振荡可调谐激光器输出的高斯脉冲, 脉宽3.2 ns, 波长800、820 nm, 焦斑直径( $1/e^2$ 峰值处全宽度)18.4~18.9  $\mu\text{m}$ 。AFX的四氢呋喃(THF)溶液摩尔分数为0.02 mol/L, 通光长度1 mm, 线性透射率可达90%, 限幅阈值约为10  $\mu\text{J}$ , 限幅机制为TPA+ESA。其中TPA将电子从基态激发到激发态, ESA在非线形吸收中起主要作用。

TPA材料线性透射率高, 但是TPA为瞬时响应, 对短脉冲限幅效果好, ESA等伴随效应的发生使长脉冲非线性透射率明显降低, 并且受到激发态弛豫时间的影响, 长脉冲的非线性响应系数也将减小, 因此TPA材料的工作带宽和脉宽均受到限制<sup>[13]</sup>。为解决这一矛盾, 科技工作者采用了2种不同的方法。2008年, 台湾大学Tai等<sup>[27]</sup>设计了耦合非线性等离激元波导(CNPW), 该波导工作在非共振区域, 在较大的带宽内线性透射率高于85%, 响应速度快, 对飞秒脉冲有效<sup>[26]</sup>。此外, CNPW适用的能量密度范围较宽, 单纯发生光克尔效应时限幅阈值约250  $\text{GW}/\text{cm}^2$ , 波导内嵌入TPA材料时为42.69  $\text{GW}/\text{cm}^2$ 。2009年, 佐治亚科技大学Hales等<sup>[28]</sup>合成了一种聚合物卟啉铅, 该聚合物TPA与ESA吸收带交叠, 工作带宽覆盖1050~1600 nm, 适用于75 fs~40 ns的脉冲。

### 3.4 光限幅效应时间特性研究进展

当前多数的光限幅研究仅考虑了对能量的限制, 大量文献中在量化限幅效果时是采用能量透射率随注入能量的变化曲线来描述, 而较少考虑对脉冲时间波形的影响。2000年, 英国的国防评估研究处(DERA)Robertson等<sup>[29]</sup>首次关注了脉冲通过限幅材料后的空间分布, 并指出仅由非线性吸收的理论模型无法再现实验结果。1998年Miller等<sup>[30]</sup>在SPIE会议的特邀报告中指出, 光限幅器输出的时间波形对于光限幅器实际应用的影响不可忽略。国内, 哈尔滨工业大学研究了受激布里渊散射(SBS)机制的限幅效应, 并已经开始关注光限幅过程限幅输出时间波形的特性<sup>[31~33]</sup>, 计算表明限幅输出波形除前沿的剩余峰外可将脉冲削平。

## 4 光限幅效应时域滤波的实现方式

非线性折射与非线性散射等能量散布型机制需结合光阑使用, 并且杂散光对光路危害巨大。RSA材料具有单重态、三重态结构, 能够用于皮秒到纳秒量级脉冲, 不需结合光阑即可用于集成光学系统<sup>[34]</sup>。但RSA材料基态吸收为1PA, 线性吸收不可忽略, 线性透射率相对较低, 且工作波段限制在单光子共振吸收区附近, 工作带宽较窄。而在TPA材料中, 单光子能量低于材料带隙, 线性情况下对单光子的吸收很弱, 可以解决线性透射率较低的问题。此外, TPA具有瞬时特性, 响应速度快, 并且输出光束保持较高的光束质量。然而由于瞬时特性TPA材料适用于短脉冲或高能量脉冲, 同时ESA等伴随效应的发生使长脉冲非线性透射率明显降低, 并且受到激发态弛豫时间的影响长脉冲的非线性响应系数将减小, 因此TPA材料的工作带宽和脉宽受到限制<sup>[14]</sup>。限幅波段宽、脉宽范围大是限幅器是激光光源发展以及应用领域扩大的需求。1PA或TPA吸收带与ESA吸收带交叠, 1PA与TPA吸收带交叠的材料为顺应这一需求的新趋势, 是时域滤波应用的首选材料。

一般的光限幅实验中, 材料溶液置于石英池内。这种形式可以应用到实际光路内, 在光路的适当位置放

置装有有机材料溶液的密封容器,如图6所示。材料置于可移动的底座上,通过改变离焦量控制入射光斑面积。鉴于非线性吸收过程具有通量或强度依赖性并且与溶液浓度和通光长度有关,可通过移动容器改变入射光斑面积、溶液浓度或通光长度的方式控制限幅阈值,从而使不同调制深度的时间调制得到改善。

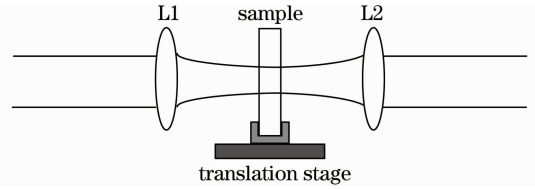


图6 光限幅器时域滤波的应用形式

Fig. 6 Setup for time domain filtering with optical limiter

## 5 总结与展望

激光聚变领域,脉冲波形的时间调制对点火的成功与激光装置的安全运行有着致命的影响。光限幅效应具有带通滤波器特征和在时域降低脉冲的时间尖峰的潜力,从而避免预补偿方式光谱精确测量与补偿器件精细加工的技术难度。本文介绍了光限幅效应的研究概况并分析了适用于时域滤波的材料。1PA或TPA吸收带与ESA吸收带交叠,1PA与TPA吸收带交叠的材料,线性透射率高、响应速度快、输出光束质量高并且限幅效果更可靠,工作波段宽,适用脉宽范围大(皮秒到纳秒量级),成为实际应用中的首选材料。将材料溶液置于石英池中,借鉴光限幅的实验方法将限幅器置于光路中实现时域滤波。更为重要的是有机溶液限幅器不存在加工的困难并且成本较低,可以通过化学产品的合成控制和计算分子设计的方式“裁剪”有机分子获得所需的特定功能。基于新材料新机制的新型激光元器件是发展第三代激光驱动器的需求。随着材料科学、化工技术和微加工技术的发展,元件功能主动控制也是新型激光器件的发展趋势,相关的工作还在不断地创新和发展。

## 参 考 文 献

- 1 Fan Dianyuan, Zhang Xiaomin. Laser fusion and high power laser: history and progress[J]. *Physics*, 2010, **39**(9): 589~596  
范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光:历史与进展[J]. *物理*, 2010, **39**(9): 589~596
- 2 Steve Hocquet, Denis Penninckx, E. Bordenave. FM-to-AM conversion in high-power lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(18): 3338~3349
- 3 J. E. Rothenberg, D. F. Browning, R. B. Wilcox. Issue of FM to AM conversion on the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 51~61
- 4 Xu Dangpeng, Wang Jianjun, Li Mingzhong. Weak etalon effect in wave plates can introduce significant FM-to-AM modulations in complex laser systems[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(7): 6621~6627
- 5 J. D. Lindl, P. Amendt, R. L. Berger *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on National Ignition Facility[J]. *Phys. Plasmas*, 2004, **11**(2): 339~491
- 6 P. J. Wisoff, M. W. Bowers, G. V. Ebert *et al.*. NIF injection laser system[C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 146~155
- 7 A. J. Bayramian, P. Armstrong, R. J. Beach *et al.*. Activation of a temporal, spectral, and spatially-shaped front end for the Mercury laser[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2005, MB38
- 8 M. Etienne. *Nonlinear Optical Spectroscopy and Imaging of Photonic Materials and Nanostructures*[D]. New York: City University of New York, 2007, 15~16
- 9 D. J. Harter, M. L. Shand, Y. B. Band. Power/energy limiter using reverse saturable absorption[J]. *J. Appl. Phys.*, 1984, **56**(3): 865~868
- 10 R. C. C. Leite, S. P. S. Porto, T. C. Damen. The thermal lens effect as a power-limiting devices[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **10**(3): 100~101
- 11 Chen Wei, Zeng Heping. Recent developments in nonlinear optical properties of C<sub>60</sub> and its derivatives[J]. *Chin. J. Org. Chem.*, 2007, **27**(1): 8~16  
陈 薇, 曾和平. C<sub>60</sub>及其衍生物非线性光学材料的研究进展[J]. *有机化学*, 2007, **27**(1): 8~16
- 12 D. G. Mclean, R. L. Sutherland, M. C. Brant. Nonlinear absorption study of a C<sub>60</sub>-toluene solution[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11): 857~858
- 13 Song Yinglin, Yang Miao, Wang Ruibo *et al.*. Performance of optical limiting in C<sub>60</sub> with ps pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **21**(8): 653~656

- 宋瑛林, 杨 森, 王瑞波 等.  $C_{60}$  对 ps 光脉冲的限幅效应[J]. 中国激光, 1994, **21**(8): 653~656
- 14 Sanhui Chi, J. M. Hales, M. Cozzuol *et al.*. Conjugated polymer-fullerene blend with strong optical limiting in the near-infrared[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 22062~22072
- 15 Niu Yanxiong, Zhang Peng, He Chenjuan *et al.*. Investigation of solubilized carbon nanotubes in optical limitation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3661~3664
- 牛燕雄, 张 鹏, 何琛娟 等. 可溶性碳纳米管光限幅特性的实验研究[J]. 物理学报, 2005, **54**(8): 3661~3664
- 16 Zhang Peng, Niu Yanxiong, Guo Zhixin *et al.*. Application of carbon nanotube in optical limiting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(11): 51~56
- 张 鹏, 牛燕雄, 郭志新 等. 碳纳米管在光限幅中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2004, **41**(11): 51~55
- 17 P. Chen, X. Wu, X. Sun *et al.*. Electronic structure and optical limiting behavior of carbon nanotubes[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(12): 2548~2551
- 18 J. W. Perry, S. R. Marder, K. J. Perry. Enhanced reverse saturable absorption and optical limiting in heavy-atom-substituted phthalocyanines[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(9): 625~627
- 19 J. S. Shirk, R. G. S. Pong, F. J. Bartoli. Optical limiter using a lead phthalocyanine[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(14): 1880~1882
- 20 J. S. Shirk, J. R. Lindle, F. J. Bartoli *et al.*. Third-order nonlinear optical properties of phthalocyanines [J]. *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.*, 1992, **4**(1): 699~726
- 21 A. Santhi, V. V. Naboodiri, P. Radhakrishnan. Spectral dependence of third order nonlinear optical susceptibility of zinc phthalocyanine[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(5): 053109
- 22 Min Shui, Xiao Jin, Junyi Yang *et al.*. Third-order nonlinearity measurements of  $PbPc(CP)_4/DMF$ [J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(9): 095203
- 23 Li Yunbo, Pan Guangfei, Yang Kun *et al.*. Time-resolved pump-probe system based on a nonlinear imaging technique with phase object[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 6251~6259
- 24 C. W. Li, Y. X. Wang, M. Shui *et al.*. Characterization of signs change of nonlinear refraction in ZnSe based on a modified double  $4f$  imaging system with a phase object[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(6): 1124~1128
- 25 Evgueni Parilov, M. J. Potasek. Generalized theoretical treatment and numerical method of time-resolved radially dependent laser pulses interacting with multiphoton absorbers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(9): 1894~1910
- 26 R. L. Sutherland, M. C. Bran, J. Heinrichs. Characterization and effective three-photon absorption model of two-photon-induced excited state absorption in organic push-pull[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(9): 1939~1948
- 27 C. Y. Tai, S. H. Chang, T. C. Chiu. Significant enhancement of broadband optical limiting behavior using off-resonant sub-wavelength coupled plasmonic waves[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 14979~14986
- 28 J. M. Hales, M. Cozzuol, T. E. O. Screen *et al.*. Metallporphyrin polymer with temporally agile, broadband nonlinear absorption for optical limiting in the near infrared[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 18478~18488
- 29 J. Robertson, P. Milsom, J. Duignan *et al.*. Spatial redistribution of energy in a nanosecond laser pulse by an organic optical limiter[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(17): 1258~1260
- 30 M. J. Miller, A. G. Mott, B. P. Ketchel. General optical limiting requirements[C]. *SPIE*, 1998, **3472**: 24~29
- 31 Lü Yuelan, Lü Zhiwei, He Weiming *et al.*. Optical limiting of nanosecond laser pulses by stimulated Brillouin scattering [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(5): 427~430
- 吕月兰, 吕志伟, 何伟明 等. 受激布里渊散射对纳秒激光脉冲光限幅规律[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5): 427~430
- 32 Lü Yuelan, Dong Yongkang, Lü Zhiwei. Study on the control of optical limiting of pulse-shape in stimulated Brillouin scattering process[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5247~5251
- 吕月兰, 董永康, 吕志伟. 受激布里渊散射光限幅输出波形控制研究[J]. 物理学报, 2006, **55**(10): 5247~5251
- 33 Gong Huaping, Lü Zhiwei, Lin Dianyong *et al.*. Optical power limiting effect of stimulated Brillouin scattering in  $CS_2$  media under non-focusing pump[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(9): 5263~5268
- 龚华平, 吕志伟, 林殿阳 等. 非聚焦条件下  $CS_2$  介质中受激布里渊散射光限幅特性的研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(9): 5263~5268
- 34 J. W. Perry. Organic and Metal-Containing Reverse Saturable Absorbers for Optical Limiters[M]. H. S. Nalwa, S. Miyata. *Nonlinear Optics of Organic Molecules and Polymers*. Boca Raton: CRC Press, 1997. 813~840