

# 透镜焦距对受激布里渊散射光限幅特性的影响<sup>\*</sup>

龚华平 吕志伟<sup>†</sup> 林殿阳 吕月兰

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

(2005 年 8 月 31 日收到, 2005 年 11 月 8 日收到修改稿)

采用受激布里渊散射(SBS)噪声起源理论模型,数值模拟了透镜焦距对SBS光限幅功率特性和能量特性的影响.结果表明,改变透镜焦距就可以方便的控制SBS光限幅的功率波形和输出能量.当采用焦距适中的透镜( $f = 15\text{cm}$ )时,可以得到较低的限制幅输出能量;当采用短焦距的透镜( $f = 5\text{cm}$ )时,可以得到较理想的限幅功率波形.在实验上将波长 1064nm、脉宽 8ns、能量 16mJ 的 Nd:YAG 激光脉冲聚焦到  $\text{CCl}_4$  介质中,研究了限幅功率波形和限幅输出能量随透镜焦距的变化规律.实验结果与理论模拟相符合.

关键词:受激布里渊散射,光限幅,数值模拟

PACC: 4265C, 4225B

## 1. 引 言

随着激光技术的发展和應用范围的扩大,激光防护日益受到重视.光限幅器由于具有保护光学敏感元件免受高功率强激光损伤的功能,在近 20 年得到了广泛的研究.人们研究了基于各种非线性效应的光限幅机制,例如双光子吸收<sup>[1]</sup>,反饱和吸收<sup>[2,3]</sup>,非线性折射、反射、衍射光限幅<sup>[4,5]</sup>等等.受激布里渊散射(SBS)作为一种非线性光学过程,也具有光限幅的特性.最近,吕月兰等人研究了激光脉冲在  $\text{CCl}_4$  介质和光纤中的传输特性,得到了透射光脉冲的能量和功率的变化规律,结果表明 SBS 过程具有对功率及能量的光限幅特性<sup>[6-9]</sup>.在基于 SBS 的光限幅器的实际应用中,对于特定的激光脉冲来说,聚焦透镜焦距是影响光限幅输出功率和能量的一个重要参数,改变透镜焦距就可以方便的控制限幅输出功率和能量.本文从理论和实验两方面研究了透镜焦距对 SBS 过程的光限幅特性的影响,并得到了限幅输出功率和能量随透镜焦距变化的规律,掌握这些规律对基于 SBS 的光限幅器的实际应用具有一定指导意义.

## 2. 理 论

### 2.1. 理论模型

SBS 光限幅的物理过程可以简单描述如下:抽运光和 Stokes 光分别沿  $z$  轴并以相反的方向通过长度为  $L$  的 SBS 池,抽运光在  $z = 0$  处入射, $z = L$  处离开 SBS 介质,Stokes 光沿  $z = L$  到  $z = 0$  方向传播.



图 1 基于受激布里渊散射的光限幅示意图

在缓变振幅近似条件下,一维瞬态 SBS 的耦合波方程可写为如下的形式<sup>[10]</sup>:

$$\left[ \frac{n}{c} \left( \frac{\partial}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \right] E_p = -\alpha E_p + iK\rho E_s, \quad (1)$$

$$\left[ \frac{n}{c} \left( \frac{\partial}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \right] E_s = \alpha E_s - iK\rho^* E_p, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\Gamma}{2} \rho = i\Delta E_p E_s^*, \quad (3)$$

其中  $E_p(z, t), E_s(z, t)$  代表介质中的抽运光和

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:10476009,60478020,60278033)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zw\_lu@sohu.com

Stokes 光的振幅  $\alpha$  代表介质的损耗系数;  $\Gamma$  是布里渊散射线宽,  $\Gamma = 1/(2\tau_p)$ ,  $\tau_p$  为介质声子寿命;  $n$  是折射率;  $c$  是光速;  $\rho(z, t)$  为介质密度;  $K, \Delta$  是布里渊光子-声子耦合系数:  $K = \frac{\gamma^e \omega_p}{4cn\rho_0}$ ;  $\Delta = \frac{\gamma^e T^2}{16\pi\omega_a}$ ;  $\gamma^e$  是电致伸缩耦合常数,  $\rho_0$  是介质的平均密度,  $\omega_p$  为抽运光频率,  $T$  为介质温度,  $\omega_a$  为声子角频率. 一般认为 SBS 在池一端的噪声中建立起来, 因此噪声强度作为 Stokes 的边界条件, 取噪声为抽运脉冲峰值功率的  $10^{-11}$ . 假设抽运光脉冲在时间上是高斯分布的波形, 取为

$$E_p(0, t) = \sqrt{P_{\max}/S_0} \exp\{-4\ln 2[(t - t_0)/t_p]^2\},$$

其中  $S_0$  为入射端面的光束截面积,  $t_0$  是抽运光峰值功率对应的初始时间,  $t_p$  是脉冲宽度. 这样  $E_p(z=0, t), E_s(z=L, t)$  就构成上述方程组的边界条件, 利用有限差分法即可对此方程组数值求解<sup>[12]</sup>.

### 2.2. 数值模拟结果

由于数值模拟计算中与光振幅直接相关的物理量是光强  $I_{L,s} = \frac{nc}{8\pi} |E_{L,s}|^2$ , 首先计算高斯光束传输

过程中任意位置的光束截面  $S_j = \pi\omega_0^2 [1 + (j \times \Delta z - Z_0)^2/Z_r^2]$  其中  $Z_r = \frac{\pi\omega_0^2}{\omega_0^2}$ , 镜池间距  $Z_0 = 1\text{cm}$ . 介质为  $\text{CCl}_4$ , 池长  $L = 60\text{cm}$ . 焦点处的激光束腰半径,  $\omega_0 \approx f\theta$ ,  $\theta$  为激光束远场发散角, 取为  $0.8\text{mrad}$ . 抽运光参数取值如下, 波长  $1064\text{nm}$ , 脉宽  $t_p = 8\text{ns}$ , 峰值功率  $P_{\max} = 2\text{MW}$ . 依次改变透镜焦距  $f = 5, 7.5, 10, 15, 20, 30\text{cm}$ , 引入上述参数数值求解耦合波方程组一维瞬态解, 模拟出不同焦距下的透射脉冲波形 (图 2 所示).

不同焦距下的透射脉冲波形均显示出光限幅特性, 即脉冲后部均形成一个限幅功率‘平台’<sup>[6]</sup>. 其中焦距较小的, 例如  $f = 5\text{cm}$  的限幅功率‘平台’比较理想. 形成限幅功率‘平台’的原因是, 当入射的抽运光达到 SBS 阈值后, 激光脉冲与布里渊介质发生较强的 SBS 相互作用, 导致抽运光能量迅速地向散射光 Stokes 场转移, Stokes 场迅速增长, 抽运光能量被迅速耗尽, 因而透射脉冲后沿开始陡然下降, 继而由于后续脉冲的功率达不到产生 SBS 的阈值功率, 于是脉冲后沿功率就维持在一个功率‘平台’附近. 随着焦距增大, 限幅功率‘平台’的宽度逐渐变小, 而且透

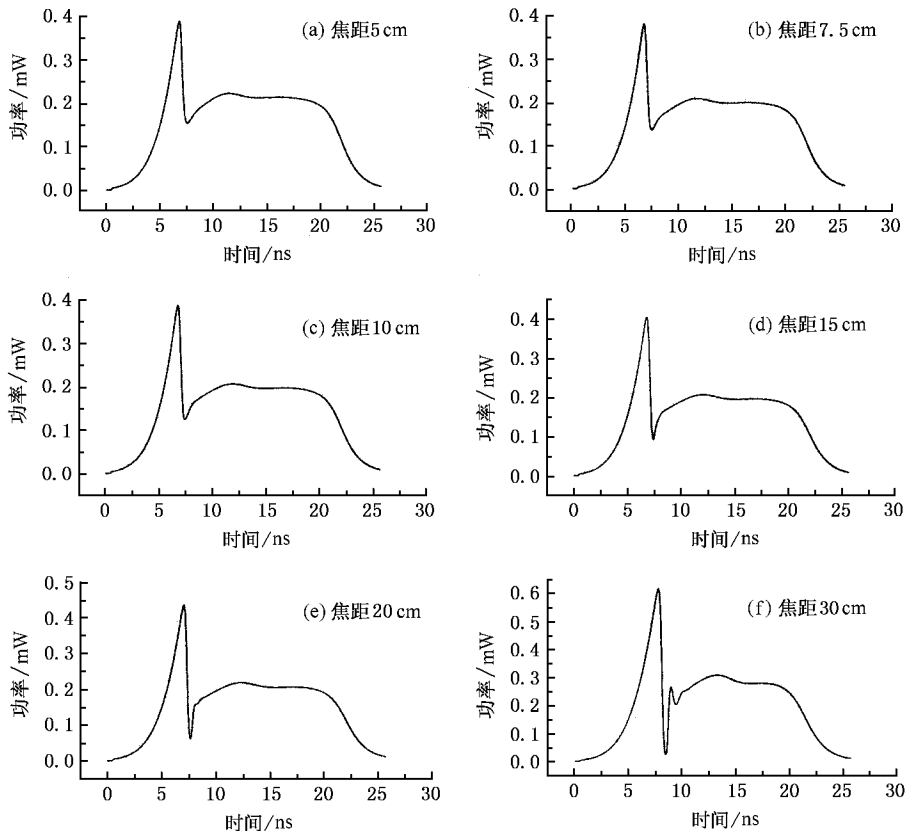


图 2 理论模拟不同焦距下的透射脉冲波形

射光剩余峰功率逐渐变大,这主要是由于焦距增大导致焦点处功率密度变小,于是SBS的阈值提高造成的.由图2中还可以看出,焦距较长(例如 $f=30\text{cm}$ )的波形存在明显的调制,调制深度较深和调制持续的时间也较长.SBS的产生伴有强烈的阈值振荡,根据文献[13]理论可知,此振荡与声子场的振幅有关,该振幅强烈地依赖于抽运脉冲的功率密度.短焦距将导致焦点处有高的功率密度,因而产生高功率声子场,作为强声子场作用结果,Stokes场振幅抵达峰值后不会很快下降,这样会使得调制时间变短,因而限幅透射脉冲调制持续的时间也相应变短.相反的,长焦距将导致焦点处的功率密度较低,产生低功率声子场,Stokes场振幅抵达峰值后会很快下降,这样会使得调制深度较深,调制过程持续的时间也较长.

限幅输出能量随焦距变化的规律如图3中的实

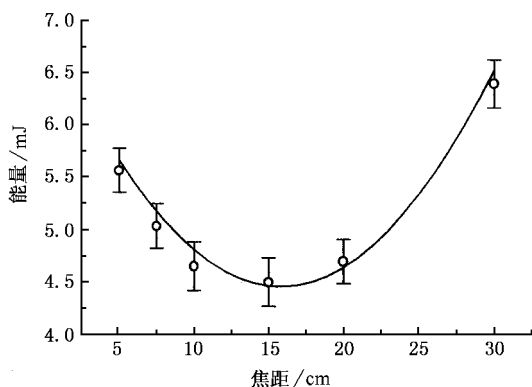


图3 限幅输出能量随透镜焦距的变化(数据点为实验值,实线为理论曲线)

线所示,其中能量是通过透射脉冲波形进行积分得到的.由图中可看出,限幅输出能量随焦距的变化并不是单调的,而是在焦距为15cm时具有最小值.当焦距从5cm变到15cm,由于相互作用长度的增加,SBS作用增强,抽运光会有较多能量向Stokes光转移,因而限幅输出能量变得较低.当焦距增加到有效作用长度后,再增加焦距(从15cm变到30cm),对

相互作用长度的影响就很小了,此时影响较大的是光束截面,由于光束截面变大,抽运光的功率密度降低,SBS作用减弱,抽运光的能量向Stokes光转移得较少,从而导致限幅输出能量变高.

### 3. 实 验

实验采用图4所示的实验装置.由全反镜 $M_1$ 和部分反射镜 $M_2$ 构成Nd:YAG振荡级的谐振腔,染料片调Q,偏振片 $P_1$ 作为起偏器,以便从Nd:YAG振荡级获得偏振光输出.激光系统中加入小孔光阑以控制激光单模输出.为了防止后向散射Stokes光脉冲进入激光系统,采用了偏振片 $P_2$ 和 $\lambda/4$ 波片组成的隔离器.激光器输出能量16mJ,波长1064nm,脉冲宽度约为8ns,重复频率为1Hz. $L_1$ 为聚焦透镜,将激光聚焦到布里渊介质池中,采用 $\text{CCl}_4$ 为介质,池长60cm. $M_3$ 为部分反射镜,经其反射的光进入能量计ED200,测量透射光的能量,经 $M_3$ 透射的光进入PIN光电二极管(响应时间约1ns),探测透射光的波形,并由数字存储示波器TDS3032B纪录.

依次改变聚焦透镜焦距 $f=5,7.5,10,15,20,30\text{cm}$ ,实验测得不同焦距下的透射光波形,如图5所示.从图中可以看出,实验波形与理论模拟的很相似,脉冲后部有明显的限幅功率“平台”,而且随着焦距增大,“平台”宽度逐渐减小,剩余峰功率逐渐变大.实验波形和理论模拟波形不一致的地方在于,实验波形中透射脉冲的剩余峰与“平台”的高度相差很小,而理论模拟波形中两者相差较大.造成这种差异的原因是,理论模拟计算中SBS的能量提取效率较高,而实验中由于损耗和其他非线性效应的影响等因素导致SBS的能量提取效率下降,脉冲后部向Stokes光转移的能量较少,于是透射脉冲波形中的“平台”高度较高.另外,实验波形和理论模拟波形还有一点不同的地方,在焦距为30cm时理论模拟波形有调制现象,而实验波形中并没有调制现象,这可能

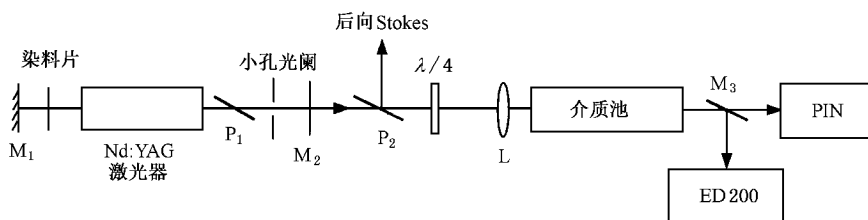


图4 实验装置

是由于探测透射光波形的 PIN 管的响应时间不够快和示波器 TDS3032B 带宽(300MHz)不够宽造成的。

图 3 中的数据点为限幅输出能量在不同焦距下的实验值,在实验误差范围内,限幅输出能量随焦距

的变化规律与理论模拟相一致,当焦距从 5cm 增大到 15cm 时,限幅输出能量逐渐减小;当焦距从 15cm 增大到 30cm 时,限幅输出能量又逐渐变大.其原因已在数值模拟部分说明,在此不再赘述。

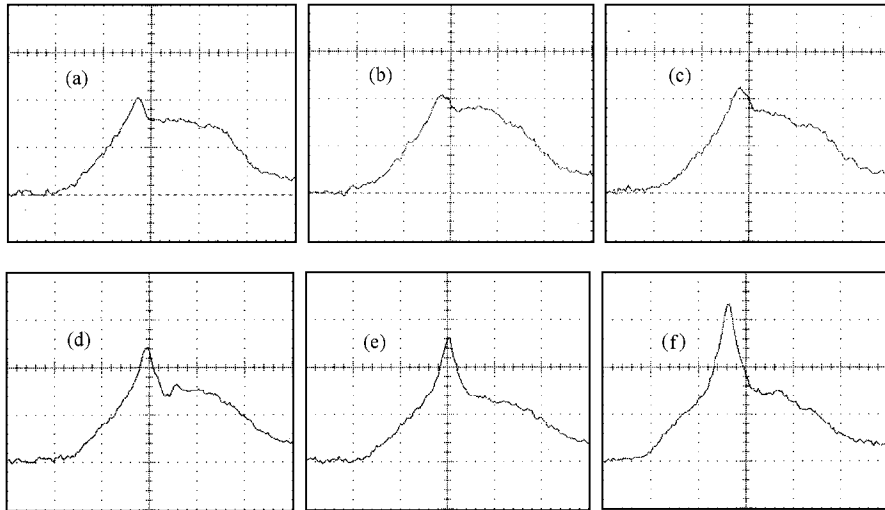


图 5 不同焦距下的透射脉冲波形 (a)–(f) 焦距  $f$  依次为 5, 7.5, 10, 15, 20, 30cm

## 4. 结 论

理论模拟了透镜焦距对 SBS 光限幅功率特性和能量特性的影响,并从实验上进行了验证.实验结果与理论模拟基本一致.由理论模拟和实验结果可知,

改变透镜焦距就可以方便的控制 SBS 光限幅的功率波形和限幅输出能量.在实际应用中,如果要求较低的限幅输出能量,就需要采用焦距适中的透镜(例如  $f = 15\text{cm}$ ),而如果要求较理想的限幅功率波形,就必须采用短焦距的透镜(例如  $f = 5\text{cm}$ ).

- [ 1 ] Hermann J A 1984 *J. Opt. Soc. Am.* B **1** 729
- [ 2 ] Kamania N V 1999 *Opt. Commun.* **162** 228
- [ 3 ] Joseph W P, Kamjou M, Marler S R 1994 *Opt. Lett.* **19** 625
- [ 4 ] Khoo I C, Li H 1994 *Appl. Phys.* B **59** 573
- [ 5 ] Yu D B, Sun X Q, Wang Z R 1999 *Laser Technology* **23** 262 (in Chinese) [ 余大斌、孙晓泉、王自荣 1999 激光技术 **23** 262 ]
- [ 6 ] Lü Y L, Lü Z W, Dong Y K 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2170 (in Chinese) [ 吕月兰、吕志伟、董永康 2004 物理学报 **53** 2170 ]
- [ 7 ] Lü Y L, Lü Z W, He W M 2004 *Acta Optica Sinica* **24** 168 (in Chinese) [ 吕月兰、吕志伟、何伟明 2004 光学学报 **24** 168 ]
- [ 8 ] Lü Z W, Lü Y L, Yang J 2003 *Chin. Phys.* **12** 507
- [ 9 ] Lü Y L et al 2003 *Chinese Journal of Lasers* **30** 998 (in Chinese) [ 吕月兰等 2003 中国激光 **30** 998 ]
- [ 10 ] Alexander L G, Robert W B 1991 *Phys. Rev.* A **44** 3205
- [ 11 ] Chen J 1999 *Optical phase Conjugation and its applications* (Beijing: Science Press) p128 [ 陈 军 光学位相共轭及其应用 北京: 科学出版社, 1999. p128 ]
- [ 12 ] Lü Z W, Ding Y C, He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 (in Chinese) [ 吕志伟、丁迎春、何伟明 2002 物理学报 **51** 1286 ]
- [ 13 ] Shabraam Afshaarvhid, Vladyros Devrelis, Jesper Munch 1998 *Phys. Rev.* A **57** 3961

# Dependence of optical limiting characteristics on focal length in stimulated Brillouin scattering <sup>\*</sup>

Gong Hua-Ping   Lü Zhi-Wei<sup>†</sup>   Lin Dian-Yang   Lü Yue-Lan

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

( Received 31 August 2005 ; revised manuscript received 8 November 2005 )

## Abstract

Adopting noise initiation mode of stimulated Brillouin scattering (SBS), the influence of focal length on optical limiting power and energy is numerically simulated. It shows that the characteristic of limiting power and energy are controlled by focal length. When focal length is moderate, say 15cm, the limiting energy is lowest. When focal length is short, say 5cm, the characteristic of limiting power is close to ideal. In experiment, focusing 8ns, 1064nm, 16mJ pulses into CCl<sub>4</sub> medium, the variation of limiting power and energy versus focal length is investigated. The experimental results are in good agreement with the conclusions predicted by the simulations.

**Keywords** : stimulated Brillouin scattering , optical limiting , numerical simulation

**PACC** : 4265C , 4225B

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10476009 , 60478020 , 60278033 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail zw\_lu@sohu.com