

文章编号： 1001-4322(2003)05-0427-04

受激布里渊散射对纳秒激光脉冲光限幅规律^{*}

吕月兰, 吕志伟, 何伟明, 杨 2

(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究了受激布里渊散射对纳秒激光脉冲的光限幅效应。针对四氯化碳介质研究了受激布里渊散射对 2ns 激光脉冲的光限幅和稳定输出能量的特性,给出了光限幅特性及输出能量与光限幅介质的结构参数之间的关系。对于输入能量波动范围在 13% 的激光脉冲,实验获得输出能量波动范围为 7%,与理论分析的结果基本符合。

关键词: 受激布里渊散射; 光限幅; 能量稳定性

中图分类号: O437.2 **文献标识码:** A

在高功率强激光系统中,输出激光功率密度往往很高,以致于对激光系统中各种光学材料,例如光学晶体、透镜、各种光学镀膜造成损伤,这就需要对激光系统进行必要的光学安全防护。激光系统为了安全起见一般只能工作在低于额定功率的范围,因而使得激光系统的工作效率很低,如果防护措施得当,就可以让激光系统尽量工作在较高功率状态,以提高系统的工作效率,为此,激光光限幅器是较好的防护措施之一。人们研究了基于各种非线性效应的光限幅机制,例如双光子吸收及多光子吸收光限幅^[1],反饱和吸收光限幅^[2,3],非线性折射、非线性反射、衍射光限幅^[4,5]等等。这些光限幅机制因为破坏阈值比较低而无法应用于强激光的安全防护。针对强激光系统,我们研究了基于受激布里渊散射(SBS)原理的光限幅器。强激光系统一般都由若干个放大级构成,如果中间某一个放大级出现一个能量起伏,经过几级放大后能量起伏会被放大很多倍,以致于影响激光系统的稳定输出,如果我们将此光限幅器放置在某一放大级中,就可以对激光能量进行限幅输出,获得高稳定的能量输出^[6]。受激布里渊散射光限幅器之所以可用于激光系统是因为它具有比其他限幅机制明显的优点:SBS 限幅阈值及破坏阈值均很高,因而可承受的激光功率密度可以很大,适用于强激光系统;限幅幅值及透射率可控,可尽量减少激光系统能量损失。

在许多应用场合,如荧光寿命的测量,激光雷达,Thompson 散射的诊断等,一般需要几 ns 的激光脉冲。因而研究纳秒激光脉冲的光限幅特性是非常有意义的。本文利用 CCl₄ 介质研究了受激布里渊对 2ns 激光脉冲的光限幅特性。研究表明受激布里渊散射光限幅机制不仅可实现对激光系统的防护,而且还可以稳定系统输出能量,并可实现能量幅值在一定范围内连续可调。

1 理论模拟

1.1 理论模型

采用 Alexander^[7]等提出的受激布里渊散射噪声初始模型来描述受激布里渊动力学过程,它由方程

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} = i E_p E_s^* + f \quad (3)$$

来描述。式中: $E_p(z, t)$, $E_s(z, t)$ 代表 CCl₄ 介质中的泵浦光和斯托克斯光的振幅; g_B 代表布里渊增益系数; α 代表介质的损耗系数; n 是折射率; c 是光速; $\rho(z, t)$ 为介质密度; γ 是声子衰减速率; k 和 k^* 是布里渊耦合系数, $k = \omega_p / 4cn_0$, $k^* = \omega_s T^2 / 16$, ϵ 是电致伸缩耦合常数, ρ_0 是介质的平均密度, ω_p 为泵浦光频率, T 为介质温度, ω_s 为声子角频率; $f(z, t)$ 是引起布里渊散射的热噪声,它是标准的高斯型随机变量,即平均值为零,在时间

* 收稿日期:2002-07-01; 修订日期:2002-11-27

基金项目:1999 年教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金资助课题

作者简介:吕月兰(1968-),女,博士,副教授,主要从事固体激光及非线性光学研究;E-mail:Ellen8527@sina.com。

和空间上具有相关性,即

$$\langle f(z, t) \rangle = 0 \quad (4a)$$

$$\langle f(z, t) f^*(z, t) \rangle = Q(z - z') (t - t') \quad (4b)$$

Q 的值可以由热动力方程得到: $Q = 2k_B T_0 / v^2 A$, v 为介质声速, A 为相互作用截面。

对方程(3)积分后带入(1),(2)式可得

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_p + \frac{1}{2} E_p = \frac{g}{2} E_p \int_0^t E_p E_S^* e^{-i(t-t')} d + ik E_S \int_0^t f e^{-\frac{1}{2}(t-t')} d \quad (5)$$

$$\left(-\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_S + \frac{1}{2} E_S = \frac{g}{2} E_p \int_0^t E_p^* E_S e^{-i(t-t')} d + ik E_p \int_0^t f e^{-\frac{1}{2}(t-t')} d \quad (6)$$

利用梯形积分公式对(5),(6)式进行近似(在时间上使用隐式有限差分,在空间上使用后向差分格式^[8]),并对偏微分方程组离散化后可数值求解。在对受激布里渊散射动力学过程进行数值模拟时,介质选用的是声子寿命较小的 CCl_4 液体,泵浦激光波长为 $1.06\mu\text{m}$ 。其它参数取值如下: $n = 1.5$; $\rho = 1.595\text{g/cm}^3$; $\epsilon = 1.35$; $\omega = 1.7 \times 10^{10}\text{rad/s}$; $g = 8 \times 10^{-9}\text{cm/W}$, 为 SBS 稳态增益系数;吸收系数 $\alpha = 0$ 。在初始时刻的所有的场振幅都是已知的, $z = 0$ 处入射的放大泵浦光脉冲和噪声项 $f(z, t)$ 均采用高斯型,位相从 0 到 2π 随机分布,则边界条件为

$$P_p(L, t) = P_{\max} \exp\{-4\ln 2[(t - t_0)/t_p]^2\}, \quad E_S(0, t) = 0, \quad E_S(z, 0) = 0, \quad f(z, 0) = f_0$$

式中: L 为池长; P_p 为泵浦光功率; t_p 为泵浦光脉宽。

1.2 理论模拟结果

理论上求解方程(5),(6)可以得到泵浦光经过 CCl_4 介质后输出光的数值解,从而可以得到输出光的能量及波形。图 1 是泵浦激光经 CCl_4 介质受激布里渊散射后输入能量与输出能量的关系和相应透射率模拟结果。

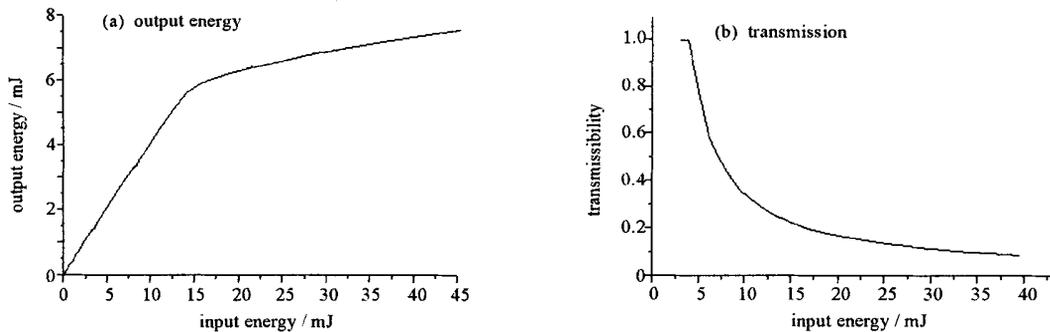


Fig. 1 Theoretical simulation of output energy and transmission in optical limiting in CCl_4

图 1 CCl_4 光限幅器的输出能量和透射率模拟计算结果

从图 1(a)可以看出,此 SBS 光学系统显示出很好的光限幅特性,输出脉冲能量随输入能量变化曲线明显的可分为两个区。线性区:当入射的泵浦光脉冲能量比较小时,不发生 SBS,光脉冲能线性通过 CCl_4 介质,介质此时是光学透明的,此时介质对纳秒光脉冲呈现高透过率,能量几乎无损失地通过 CCl_4 介质。非线性区:一旦达到某一个能量值(光限幅阈值),后向散射 Stokes 光迅速增长,反射率迅速增加,因而透射能量增加缓慢,并很快趋于饱和值,此后对于在很大范围内变化的入射能量,此光学系统给出高稳定的出射能量,具有很好的光限幅特性。图 1(b)给出了透射率依赖入射能量的变化关系。在低能区,透射率是线性的,可高达 100%,当入射能量达到限幅阈值,透射率呈非线性,并随入射能量的增加迅速衰减,因而使该光学系统透射能量受限,显示出光限幅特性。

图 2 给出了不同结构参数下 CCl_4 介质的 SBS 光限幅特性。图 2(a) 是不同池长下限幅输出特性,当池长增加时,泵浦光与 Stokes 光的相互作用长度增加,导致 Stokes 场强增加,因而在较低的泵浦能量(限幅阈值)时就显示出光限幅特性,同时稳定限幅时的透射能量值(限幅幅值)也较低。2(b) 给出的是不同镜池间距时的限幅曲线。由图可知随着镜池间距的增加,限幅阈值及限幅幅值均降低。这是因为随着镜池间距的增加,上述有效的相互作用长度增加,因而 SBS 作用更有效,限幅阈值及限幅幅值均随之降低。图 2(c) 给出聚焦透镜焦距对限幅特性的影响,这种影响源于焦距对激光束腰尺寸的束缚。当焦距增加时,激光脉冲的束腰尺寸增加,因

而入射光脉冲的功率密度下降,这就导致限幅阈值及限幅幅值的急剧上升。

由于 SBS 光限幅特性依赖于各种参数,因而我们可以选择适当的参数使得光限幅系统工作的饱和区不仅具有光限幅作用,而且具有较高的能量稳定性,如图 2 所示,该系统在输入光能超过限幅阈值的一定区域内能保持较高输出能量的稳定性。改变介质参数(池长,镜池间距,聚焦焦距)就可以使得 SBS 光限幅介质针对不同输入能量的激光进行输出幅值可控的光限幅。理论计算结果显示,如果选取介质参数池长变短(为 4~10cm)聚焦透镜焦距变长(在 100~400cm 之间),SBS 完全可以对输出能量高达 1~10J 的强激光脉冲进行限幅,这里我们仅针对我们实验条件限制:只给出激光输出在几十 mJ 量级的理论计算结果。

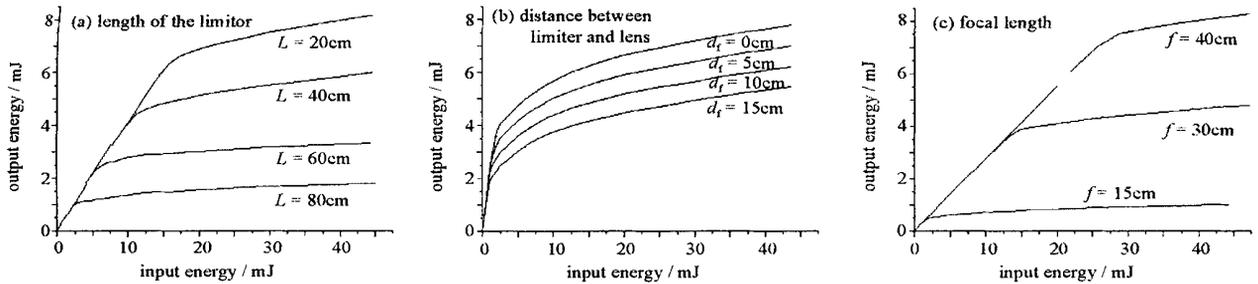


Fig. 2 Theoretical simulations of optical limiting in CCl₄ with different parameters

图 2 不同参数下限幅特性理论模拟曲线

由上面的理论分析可知,我们可以根据实际激光系统的安全防护值,来设计 SBS 光限幅器,使得该限幅器对特定的激光系统实现安全防护并能得到高稳能量输出。

2 实验内容

实验采用图 3 所示的 SBS 光学系统。泵浦光源为 Nd:YAG 激光器,输出能量 90mJ,波长 1.064μm,脉冲宽度为 7ns,重复频率为 1Hz。在激光系统中加入小孔光阑(2mm)以控制激光输出为单模输出,偏振片 P₃ 作为起偏器,以便获得偏振光输出。为了防止后向散射光进入激光系统,采用了偏振片 P₁ 和 1/4 波片组成的隔离器。放大器输出 7ns 脉宽的 P 偏振光,经过 1/4 波片进入双池 SBS 脉冲压缩系统。压缩为 2ns 脉宽的 Stokes 波,Stokes 波又一次经过 1/4 波片,变成 S 偏振光被偏振片 P₁ 反射。经过一全反射,此即为实验所用泵浦光。我们用一个衰减器来断续地衰减泵浦光的能量以实现输入脉冲能量可变。此时,我们开始研究该泵浦光经过 SBS 限幅介质(SBS limiter)光非线性传输特性。经 SBS 限幅器产生后向散射的 Stokes 能量 E_S,经过 1/4 波片,变成 P 偏振光经偏振片 P₂ 出射,并由 ED3 接收。泵浦光和透射光的能量 E_p 和 E_t 分别由能量计 ED1, ED2 探测。实验中,脉冲波形由强流管 2835C 探测(响应时间小于 300ps),能量及波形均由数字示波器 TDS684A 记录。同实验室的激光能量在 10mJ 量级,我们只能对理论模拟计算的区域进行实验。实验中分别选用 30,50,80cm 的 SBS 限幅池池长,聚焦透镜选用 5,10cm,实验布置如图 3 所示。

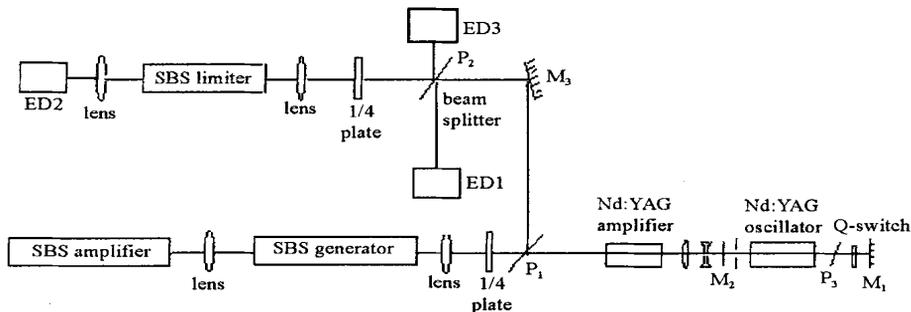


Fig. 3 Experimental setup for optical limiting

图 3 光限幅实验装置图

3 实验结果及分析

图 4 给出了对应不同池长的输出能量随输入能量变化时的实验数据(实心点),并与理论模拟曲线(实线)比较,从图中我们可以看到理论模拟结果与实验规律符合得很好。随着输入能量增加,输出能量开始时线性增

加,增加到一定值(SBS 阈值),可观察到布里渊散射 Stokes 光。此时可开始观察到 SBS 限幅介质末端输出的光限幅特性。继续增大输入能量,实验发现输出能量很快呈现饱和,在输入能量变化很大的范围内,激光系统输出能量值将在一个很窄的范围内波动,显示出 SBS 系统具有能量稳定作用。为了考察该光学系统的能量稳定度,我们在某一能量值(30mJ)附近人为扰动输入激光脉冲 500 个,纪录了相应系统输出脉冲能量值,并由图 5 给出能量波动情况。为了便于比较,输入脉冲及输出脉冲能量均对自身能量平均值进行归一化。当输入激光脉冲的能量相对波动范围为 $\pm 13\%$ 时,获得输出脉冲能量的波动范围为 $\pm 7\%$ 。

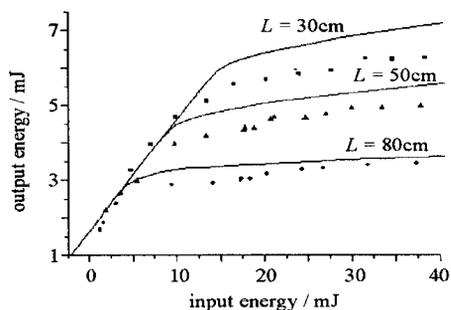


Fig. 4 Average output energy vs input energy with different limiter length

图 4 不同池长下平均输出能量随输入能量的变化

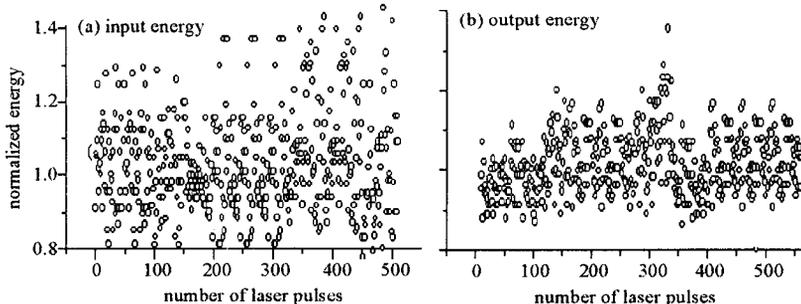


Fig. 5 Experimental result of output energy stability in SBS limiter

图 5 SBS 限幅器系统输出能量稳定性实验结果

4 结 论

本文从实验和理论两方面研究了基于受激布里渊散射的光限幅效应及稳定能量特性。正如理论预研的那样,实验结果显示 SBS 非线性介质具有光限幅特性。为了将该限幅机制用于强激光系统的安全及稳定防护,我们详细研究了光限幅输出能量幅值与各种激光系统结构参数的关系,以实现对该光限幅系统有效的控制。该限幅机制可用于激光系统安全防护及稳定输出能量,即对在较大范围内变化的输入能量光限幅系统能保证高稳输出。该限幅系统限制能量输出的同时,能保持激光系统的较高透过率。由于该限幅系统具有高功率工作状态及高破坏阈值的优点,使得它非常有希望被用于高功率强激光系统的防护和稳定能量输出。

参考文献:

- [1] Mishra S R, Rawat H S, Laghate M. Nonlinear absorption and optical limiting in metalloporphyrins[J]. *Opt Comm*, 1998, **147**(15):328.
- [2] Kamanina N V. Reverse saturable absorption in fullerene-containing polyimides:applicability of the forster model[J]. *Opt Comm*, 1999, **162**(4):228—232.
- [3] Perry J W, Mansour K, Marder S R. Enhanced reverse saturable absorption and optical limiting in heavy-t omsubstituted phtalocyanines[J]. *Opt Lett*, 1994, **19**(9):625—627.
- [4] Khoo I C, Li H. Nonlinear optical propagation and self-limiting effect in liquid-crystalline fibers[J]. *Appl Phys B*, 1994, **59**:573—570.
- [5] Francois L, Mostafavi M, Belloni J, et al. Optical limitation induced by gold clusters:1 size effect[J]. *Phys Chem B*, 2000, **104**:6133.
- [6] He G S, Yuan L X, Bhawalkar J D, et al. Optical limiting, pulse reshaping and stabilization with a nonlinear absorptive fiber system[J]. *App Opt*, 1997, **36**(15):3387—3392.
- [7] Alexander L G, Boyd R W. Stochastic dynamics of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber[J]. *Phy Rev A*, 1991, **44**(5):3205.
- [8] 丁迎春, 吕志伟, 何伟明. 受激布里渊散射相位共轭激光束束规律[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(3):353—356. (Ding Y C, L ÜZ W, He W M. Study of beam combinatin by stimulated Brillouin scattering. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3):353—356)

Optical limiting of nanosecond laser pulses by stimulated Brillouin scattering

L ǎ Yue-lan, L ǎ Zhi-wei, HE Wei-ming, YANG Jun

(Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Optical limiting effect of nanosecond laser pulses by stimulated Brillouin scattering is investigated. Optical limiting performances and energy stabilization of 2ns Nd: YAG laser pulses were studied both theoretically and experimentally in a nonlinear SBS medium CCl₄, the influence of parameters of SBS limiter cell on optical limiting effect predicted by theory were conducted, and superior constant output energy was gained with input energy changing in experimental regime. For the $\pm 13\%$ relative fluctuation of input energy of laser pulses, $\pm 7\%$ relative fluctuation of the transmitted signals was obtained. The experimental results were in good agreement with the predictions by theoretical simulation.

Key words: Stimulated Brillouin scattering; Optical limiting; Energy stabilization