

# 利用染料片吸收控制受激布里渊散射 功率限幅波形<sup>\*</sup>

吕月兰<sup>1)†</sup> 吕志伟<sup>2)</sup> 董永康<sup>2)</sup>

1) 哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

2) 哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

(2006 年 12 月 13 日收到, 2007 年 4 月 10 日收到修改稿)

理论研究了受激布里渊散射过程中功率限幅响应特性. 采用高斯型入射脉冲, 数值模拟了抽运参数(抽运峰值功率密度、抽运脉冲宽度)、介质参数(增益系数、声子寿命)和结构参数(聚焦透镜焦距、介质池长)等物理参数影响限幅输出波形中剩余峰的特性规律. 对如何控制剩余峰进行了理论分析. 研究表明, 声子寿命较小、增益系数大的布里渊介质光限幅响应较好, 声子寿命较大、增益系数小的布里渊介质光限幅响应较差. 无法单纯通过控制布里渊介质参数来完全消除剩余峰. 实验上采用染料片吸收剩余峰, 获得接近平顶的限幅输出波形.

关键词: 受激布里渊散射, 限幅波形, 响应特性

PACC: 4265C, 4225F

## 1. 引言

近年来, 光限幅器由于可以对人眼和光电敏感器件有防护作用<sup>[1-3]</sup>而越来越受到重视. 这是在战术激光武器迅猛发展刺激下发展起来的对抗技术. 战术激光武器作为定向能武器对飞机坦克等目标的软杀伤、硬破坏功能, 正逐渐被人们认识和接受. 到目前为止, 关于激光防护技术已有大量的文章发表, 无论是激光防理论论和基本特性, 还是激光防护技术的应用, 人们都进行了相当广泛的研究. 随着非线性光学基础研究的深入, 20 世纪 80 年代开始, 人们逐渐认识到采用非线性光学原理实现激光光限幅的潜在优势. 各国科研工作者进行了大量的理论和实验探索. 激光防护基本理论包括双光子吸收(多光子吸收)光限幅、反饱和吸收光限幅、自散(聚)焦<sup>[4,5]</sup>光限幅、非线性散射光限幅、含有纳米分散相的光限幅<sup>[6-8]</sup>. 近年来, 本研究小组开展了受激布里渊散射(SBS)光限幅机理及光限幅器研究<sup>[9-11]</sup>. 光限幅器的响应特性是衡量一个光限幅器是否理想的重要性指标之一. 因而研究 SBS 限幅输出波形响应特性是很有意义的. 本文根据数学计算模型, 模拟了 SBS

过程对纳秒脉冲功率限幅响应特性. 数值模拟了 SBS 光限幅响应参量——剩余能量随增益系数、声子寿命、聚焦透镜焦距、非聚焦情形介质池长等参数变化规律, 分析了各种布里渊参数影响剩余的峰微观本质, 并探讨实现对剩余峰控制可行性. 为构造基于 SBS 原理的理想光限幅器提供理论指导.

## 2. 影响 SBS 功率限幅响应特性参量

基于描述 SBS 过程的耦合波方程<sup>[12-14]</sup>, 给出了描述 SBS 光限幅过程的数学模拟结果. 计算中抽运脉冲采用高斯型时间和空间分布, 波长 1064 nm, 抽运脉冲宽度为 30 ns, 介质采用 CCl<sub>4</sub>, 增益系数  $g = 6 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ , 声子寿命  $\tau_p = 1 \text{ ns}$ , 布里渊介质池长  $L = 60 \text{ cm}$ , 聚焦透镜焦距  $f = 10 \text{ cm}$ . 抽运激光脉冲入射到布里渊介质池, 在激光的作用下, 通过电致伸缩效应而产生一种相干的声子场, 它与抽运激光脉冲耦合而产生相干辐射场——Stokes 光, 并沿反向传播. Stokes 光与后续抽运脉冲相互作用, 加强声子场, 声子场与抽运场相互作用又相干地加强 Stokes 光. 最后抽运光功率很大一部分转换到 Stokes 光场.

<sup>\*</sup>国家自然科学基金(批准号:10476009), 中国博士后科学基金(批准号:20060400230)和哈尔滨创新人才专项基金(批准号:2006RFQXG025)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: luyuelan1968@163.com

中,抽运脉冲功率受限.这里我们数值模拟给出脉冲宽度为 30 ns 激光脉冲经过布里渊介质  $\text{CCl}_4$  后限幅输出脉冲波形,如图 1 所示.

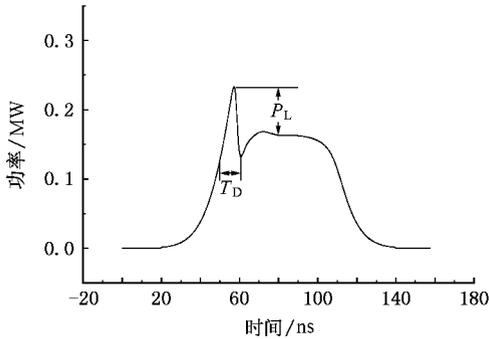


图 1 典型 SBS 光限幅输出波形

首先,由于进入池中抽运脉冲前沿的功率是逐渐上升的,在上升到 SBS 功率阈值之前,脉冲与 SBS 介质无相互作用,低于阈值功率的部分几乎无损失地穿过布里渊介质池,因而这部分抽运光线性透过,透射脉冲前沿几乎线性透过介质,因而透射波形在前沿保持抽运脉冲形状;而当抽运脉冲功率高出 SBS 阈值,抽运脉冲与 Stokes 光通过声子场相互作用,功率转移给 Stokes 光,而产生输出波形变形,介质显示出光限幅作用,表现为后沿限幅功率“平台”的建立.由于声子场的建立需要一定的时间,这样就在限幅输出脉冲前沿开始限幅的位置留下一个小尖峰,这是由于声子场建立的弛豫效应所引起的非限幅成分,我们称之为剩余峰.

研究表明,SBS 功率限幅的响应特性主要与以下参数有密切的关系:抽运脉冲峰值功率密度,抽运脉冲宽度,增益系数,声子寿命,聚焦透镜焦距,非聚焦情形下的介质池长.

为了定量描述透射功率限幅的响应特性,我们引入并定义如下几个物理参量:

1) 延迟时间  $T_D$ : 剩余峰的时间宽度,它表明 SBS 光限幅器的时间响应特性.

2) 剩余峰值功率  $P_L$ : 在透射脉冲限幅之前漏过的脉冲的峰值.这是由 SBS 弛豫效应造成的无法克服遗漏脉冲,它标志着该限幅机理的受限程度.

3) 剩余能量  $E_L$ :  $E_L = \frac{1}{2} T_D P_L$ , 近似等于剩余峰脉冲面积,其单位为能量单位,故称之为剩余能量.本小组在研究了延迟时间和剩余峰的控制问题中发现,延迟时间和剩余峰这两个量控制起来有时

是矛盾的.例如,要使得延迟时间较短,就应采用脉冲宽度较窄的抽运脉冲,而要使得剩余峰较低,就应采用脉冲宽度较宽的脉冲抽运.那么到底哪一个量是主要矛盾,必须综合考虑.剩余能量综合了两个物理参量的总变化趋势,因而,我们着重给出了剩余能量的变化规律和控制方法.

### 3. SBS 光限幅剩余能量随各种物理参数的变化关系

Miller<sup>[15]</sup>指出:响应特性是衡量一个光限幅器是否理想的重要指标.欲得到理想的限幅效应,就应该设法达到瞬时响应,即延迟时间趋于零,剩余峰趋于零,从而剩余能量趋于零,这样就需完全消除弛豫效应的影响.但实际上任何限幅机理都会受本身光学特性的影响,SBS 光限幅过程必然受到声子场建立时间的影响,声子场不可能达到完全瞬时,延迟时间必然存在,因而无法避免非限幅成分——剩余峰的存在,SBS 功率限幅特性也只能在输出脉冲的后沿实现接近理想的功率限幅波形,而在脉冲的前沿无法获得理想的功率限幅波形.本节分析了 SBS 光限幅响应参量——剩余能量随各种参数的变化关系,以此探讨 SBS 功率限幅波形的控制手段和方法.

由剩余能量的定义可知,它是延迟时间和剩余峰的乘积之半,综合了延迟时间和剩余峰的因素.我们可以根据剩余能量随各种参数的变化规律给出控制剩余峰的总原则.

图 2(a) 给出剩余能量随抽运峰值功率的变化关系.在抽运峰值功率密度较小时,剩余能量随抽运峰值功率密度增加而迅速降低.当抽运峰值功率密度较大后,SBS 耦合效率增强,功率提取效率增加,剩余能量降低.但是 SBS 耦合效率是有限度的,抽运峰值功率密度达到一定程度,剩余能量开始趋于某一个稳定值.图 2(b) 给出脉冲宽度影响剩余能量的变化规律.脉宽较窄则功率上升的较快,抽运脉冲上升的较快,剩余峰较高,剩余能量较高.脉宽较宽抽运脉冲上升的较缓,剩余峰较低,剩余能量较低.抽运脉宽较宽则抽运脉冲功率上升的缓慢,产生的反向散射场 Stokes 场将会与较低功率的后续脉冲进行耦合,具有较低的功率和能量提取效率,相应的剩余能量较低.图 2(c) 给出剩余能量随增益系数变化规律.表明剩余能量随增益系数的增加而接近反比例降低.分析认为,增益系数较小,则产生 SBS 阈值功率增大,因而剩余能量较高;而增益系数较大时,

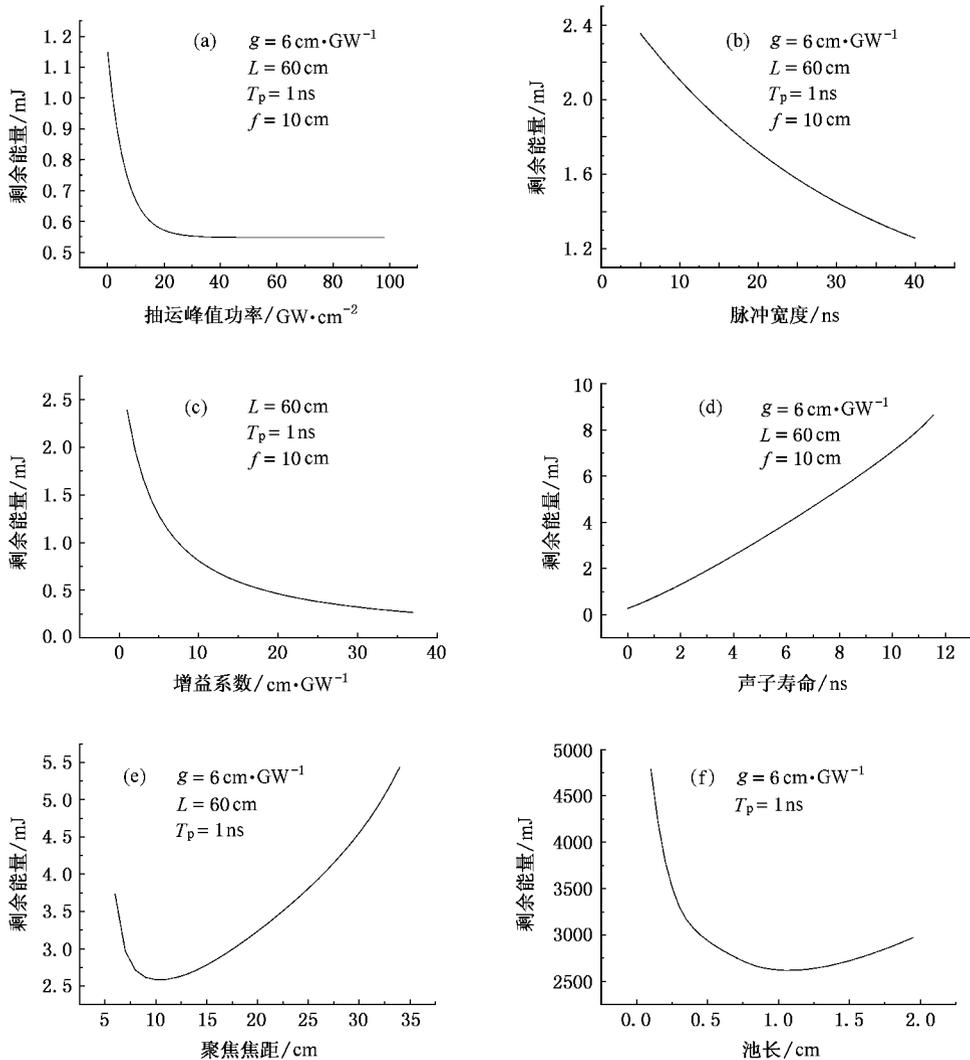


图2 剩余能量随各种参数的变化关系 (a)峰值功率密度 (b)抽运脉冲宽度 (c)增益系数 (d)声子寿命 (e)聚焦焦距 (f)非聚焦池长

SBS 产生功率阈值较小,因而剩余能量较低.选择增益系数大的介质可以降低剩余峰对 SBS 功率限幅特性的影响.图 2(d) 给出声子寿命对剩余能量影响的变化规律.声子场提供了 Stokes 场与抽运场之间的能量交换的媒介,在抽运脉冲作用下,达到 SBS 阈值需要一定时间.声子寿命越小,建立时间越短,剩余峰越低,剩余峰影响越小.因而,应选择声子寿命较小的布里渊介质作为 SBS 光限幅介质.由图 2(e) 可见剩余能量随聚焦透镜焦距变化存在极值.这是因为聚焦焦距对限幅特性的影响是两方面:相互作用长度和束腰尺寸,在焦距较短时,影响 SBS 光限幅特性的主要是相互作用长度.随聚焦透镜焦距增加,抽运光与 Stokes 光的相互作用长度增加,SBS 耦合效率升高,导致 SBS 转换效率增加,因而,剩余能量就

随着焦距增加而变低.而当聚焦焦距进一步增加,聚焦焦距对限幅特性的影响主要体现在激光束腰尺寸的影响.随着焦距的进一步增加,束腰尺寸迅速增加,使得抽运功率密度迅速下降,SBS 耦合效率降低.焦距过长会使得剩余能量增加.因而聚焦透镜焦距选取适当时,剩余能量最低.图 2(f) 给出非聚焦短池剩余能量随池长的变化规律.当池长在 1 cm 以下,剩余能量随池长的增加而迅速降低;当池长在 1 cm 以上,剩余能量随池长的增加而缓慢升高.可见对于非聚焦短池,应选择池长在 1 cm 左右.

#### 4. 实验结果及讨论

实验装置如图 3 所示,其中虚线中部分为

Nd:YAG激光脉冲振荡级输出.由全反镜  $M_1$  和未镀膜的玻璃平片  $M_2$ (反射率 8%)构成 Nd:YAG 振荡级的谐振腔,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,激光器输出重复频率 1 Hz,波长 1064 nm,脉冲宽度 10 ns.为了使激光器稳定地单纵模输出,使用  $M_2, M_3$  组合为光学共振反射器作为 Nd:YAG 振荡器的耦合输出腔镜,三面共振反射器具有规则的反射峰调制结构,因而它具有很强的选纵模能力,为获得稳定的单纵模光滑脉冲输出,振荡器宜在阈值附近工作,以充分发挥共振反射器的选纵模能力.实验上振荡器获得了光滑单纵模脉冲,光滑脉冲出现概率大于 97%.在激光系统中加入小孔光阑(直径 2 mm)限制输出光的横向模式,使输出光为基横模.偏振片  $P_2$  与 1/4 波片构成隔离器,使反射回来的 Stokes 光不会耦合到振荡器中,而是反射至  $M_6$ ,经  $M_6$  反射后由接收器  $D_2$  接收.输出激光经  $M_4, M_5$  改变光路,再经过一组衰减器后,经聚焦透镜聚焦到 SBS 限幅池(池长 60 cm,介质  $CCl_4$ )中,池前端使用焦距  $f = 30$  cm 的透镜聚焦,经限幅器透射光脉冲时间波形由接收器  $D_1$  接收, $D_1$  为快响应

光电二极管(上升沿时间小于 1 ns),然后由 DS684A 数字示波器显示.

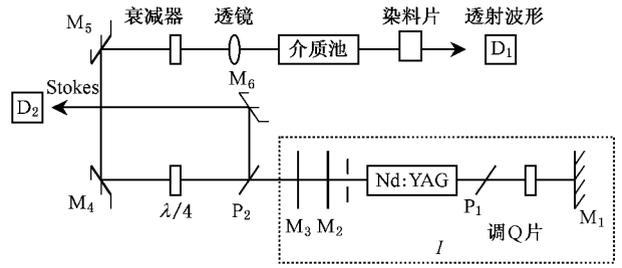


图 3 实验装置图

在考虑 SBS 功率限幅应用背景后,应关心的是透射脉冲后部的限幅输出功率“平台”.如果能够设法将脉冲前部的剩余峰滤掉,透射脉冲的限幅输出功率恒定,那么,就可以得到功率稳定的平顶限幅输出波形.而前面的理论研究表明,我们无法通过控制布里渊介质参数来完全消除剩余峰,必须考虑利用其他非线性光学效应和 SBS 结合,基于两种非线性效应获得功率稳定平顶限幅波形的办法.我们利用染料片吸收 SBS 限幅所产生的剩余峰,从而获得接

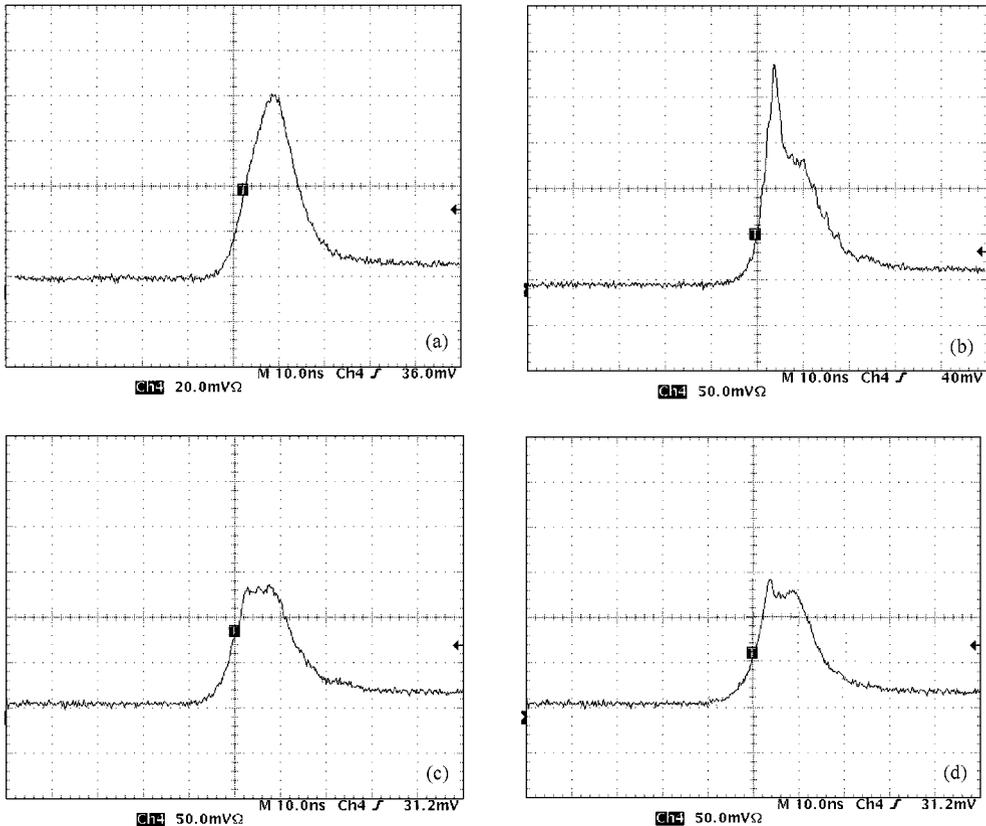


图 4 利用染料片吸收控制 SBS 限幅波形的剩余峰 (a)抽运光波形 (b)SBS 作用限幅输出波形 (c)(d)同时经过 SBS 和染料片限幅输出波形

近平顶的限幅输出脉冲波形.染料片采用的是天津激光研究所提供的 BDN 染料片,其响应时间小于  $1 \text{ ns}^{[16]}$ .

采用图 3 实验装置图,在布里渊介质池后面加上一片染料片,这样先经 SBS 过程限幅,然后进入染料片.透射波形的前沿首先进入染料片,由于染料片是一种饱和吸收体,而透射脉冲前沿的剩余峰功率密度较高,瞬间将染料片漂白,脉冲后部的平台就接近线性的透过染料片,从而得到较理想的接近平顶的限幅输出脉冲波形.实验在不同的抽运能量下进行,抽运能量的变化范围为  $5\text{--}60 \text{ mJ}$ .实验对比给出了布里渊介质后加染料片和不加染料片功率限幅输出波形.实验所用抽运脉冲宽度为  $10 \text{ ns}$ ,波形如图 4(a)所示.实验记录抽运激光脉冲仅经过布里渊介质限幅所得到的限幅波形, SBS 限幅输出波形记录如图 4(b)所示(抽运能量为  $10 \text{ mJ}$ ),可以看出限幅输出波形有明显的功率限幅特性——脉冲后沿的限幅功率“平台”,同时在前沿有明显非限幅成分——剩余峰.然后我们在布里渊池后加入染料片,得到经过两种限幅机理后的功率限幅输出波形(图 4(c)和(d)).限幅输出波形有明显改善:在抽运能量较低时( $10 \text{ mJ}$ )获得较为理想的接近平顶限幅输出脉冲(图 4(c)),在抽运能量较高时( $55 \text{ mJ}$ ),剩余峰

没有完全滤掉,限幅输出波形仍留有较低的剩余峰.这是因为实验室所用的染料片吸收存在饱和,因而对剩余峰吸收不完全,仍留下较小的尖峰.但总的来说染料片吸收还是在一定程度上改善了限幅输出波形.

## 5. 结 论

研究了 SBS 过程功率限幅的非线性响应特性规律.采用高斯型入射脉冲,数值模拟了抽运参数(抽运峰值功率密度、抽运脉宽),介质参数(增益系数、声子寿命)和结构参数(聚焦透镜焦距、介质池长)等物理参数变化时的限幅剩余峰随各种布里渊参数的变化规律.考察了 SBS 限幅输出响应特性变化规律,并对其变化规律进行了深层的理论分析.研究表明:要得到较好限幅输出波形,应选择声子寿命较小、增益系数大的布里渊介质;与此相反,声子寿命较大、增益系数小的布里渊介质光限幅输出波形较差.但是单纯控制布里渊介质参数还不能完全消除剩余峰.因而实验上我们采用染料片吸收 SBS 限幅输出脉冲前沿的剩余峰,从而获得较为理想的接近平顶的限幅输出脉冲波形.这表明可以利用染料片吸收来有效地控制受激布里渊散射功率限幅输出波形.

- [1] Morela Y, Zaccarob J, Ibanezb A, Baldecka P 2002 *Opt. Commun.* **201** 457
- [2] Wasylak J, Ozga K, Kityk I V, Kucharski J 2004 *Infrared Physics & Technology* **45** 253
- [3] Giorgetti E, Toci G, Vannini M, Giammanco F 2003 *Opt. Commun.* **217** 431
- [4] Guo Q, Tian Y, Liu C Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1057 (in Chinese)[郭旗、田野、刘承宜 物理学报 **51** 1057]
- [5] Huang Y, Gong Q H, Yang J S 1990 *Acta Phys. Sin.* **39** 67 (in Chinese)[黄勇、龚旗黄、杨葭荪 1990 物理学报 **39** 67]
- [6] Hirano A, Kataoka T 1998 *Electron Lett.* **14** 1410
- [7] Qu S L, Chen Y, Song Y L 2001 *Chin. Phys.* **10** 1139
- [8] Jeong T M, Kang E C 1999 *Opt. Commun.* **166** 95
- [9] 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]

- [10] Lü Y L, Dong Y K, Lü Z W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5247 (in Chinese)[吕月兰、董永康、吕志伟 2006 物理学报 **55** 5247]
- [11] Lü Y L, Lü Z W, Yang J 2003 *Chin. Phys.* **12** 507
- [12] He W M, Yang J, Lü Y L, Lü Z W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 468 (in Chinese)[何伟明、杨、吕月兰、吕志伟 2004 物理学报 **53** 468]
- [13] Alexander L G, Robert W B 1991 *Phys. Rev. A* **44** 3205
- [14] Gong H P, Lü Z W, Lin D Y, Lü Y L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2735 (in Chinese)[龚华平、吕志伟、林殿阳、吕月兰 2006 物理学报 **55** 2735]
- [15] Miller M J, Mott A G, Ketchel B P 1998 *Proc. SPIE* **3472** 24
- [16] Yao G Q, Wu F T 2004 *Journal of Huaqiao University* **25** 137 (in Chinese)[姚关清、吴逢铁 2004 华侨大学学报 **25** 137]

# Controlling the optical limiting shape in stimulated Brillouin scattering by dye absorption<sup>\*</sup>

Lü Yue-Lan<sup>1)†</sup> Lü Zhi-Wei<sup>2)</sup> Dong Yong-Kang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*

<sup>2)</sup> *Institute of Opto-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

( Received 13 December 2006 ; revised manuscript received 10 April 2007 )

## Abstract

On the basis of computing models of stimulated Brillouin scattering (SBS), the optical limiting response characteristics in SBS process are investigated theoretically. Dependence of limiting parameter —— residual energy on pump parameters ( input power density, pulse duration ), medium parameters ( gain, phonon life time ) and configuration parameters ( focusing length, cell length ) are analyzed. Response characteristics of SBS limiting are given by studying the variation of delay time, residual peak power and residual energy. Ideal response system can be obtained by choosing a medium with larger gain and shorter phonon life time. But the residual energy could not be got rid of by choosing SBS medium parameters only. In experiment, we obtained flat-roofed optical limiting pulse shapes in SBS process using dye absorption.

**Keywords** : stimulated Brillouin scattering, limiting pulse shape, response characteristics

**PACC** : 4265C, 4225F

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10476009 ), China Postdoctoral Science Foundation ( Grant No. 20060400230 ) and Harbin Foundation for Innovation Talents ( Grant No. 2006RFQXG025 ).

<sup>†</sup> E-mail : luyuelan1968@163.com