

受激布里渊散射光限幅输出波形控制研究^{*}

吕月兰^{1)†} 董永康²⁾ 吕志伟²⁾

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)

(2005 年 7 月 14 日收到, 2005 年 11 月 17 日收到修改稿)

数值模拟了种子场诱导受激布里渊散射光限幅过程的限幅输出波形特性. 得到利用种子场控制限幅脉冲波形的规律. 选取种子场脉冲宽度为抽运脉冲宽度的五倍, 抽运脉冲相对于种子脉冲的延迟时间控制在与抽运脉冲宽度相当时, 限幅输出波形最佳. 限幅输出波形同时受抽运功率影响, 随抽运能量的增加, 限幅脉冲功率不断下降, 直至趋于 0.

关键词: 受激布里渊散射, 限幅输出波形, 注入种子

PACC: 4265C, 4225F

1. 引 言

随着激光技术的发展和应用范围的扩大, 激光防护日益受到重视^[1-3]. 而对于激光尤其是脉冲激光, 对人眼和装备系统中的光电传感器造成伤害的往往是其较高的功率密度而不是它的能量. 一般的限幅机理仅仅考虑了对能量的限幅而没有考虑功率限幅及脉冲波形输出特性^[4-6]. 1998 年, Miller^[7]指出, 各国光限幅领域的研究者, 都没有对光限幅器输出的时间波形给予足够的重视. 我们研究的受激布里渊散射(SBS)光限幅是针对高功率激光系统的安全及稳定性防护, 这要求在限幅的同时有高质量的波形输出, 因而我们特别关注布里渊散射光限幅输出波形^[8-11]. 以往 SBS 理论的研究对 SBS 过程透射脉冲波形特性很少有深入的研究, 特别是对于 SBS 池的各种参数对 SBS 透射脉冲波形影响的研究更少. 有些文章即使对 SBS 透射特性进行过数值模拟, 也未对变化的原因给出清楚的解释. 本文数值模拟了种子场诱导下的受激布里渊散射光限幅过程中的脉冲波形传输特性, 得到了利用种子场有效的控制限幅脉冲波形的规律.

2. 种子场诱导下 SBS 数值计算模型

首先, 由一个装有布里渊介质的 SBS 池产生一个强抽运光, 由另外一个装有相同布里渊介质的 SBS 池产生一个弱 Stokes 种子光. 种子光和抽运光反向传播进入限幅池^[12, 13]. 由于种子光的存在, Stokes 光将优先从种子光场, 而不是噪声中生长, 以确保限幅池中 Stokes 是对种子场的放大, 使得 SBS 过程瞬时建立, 光限幅输出波形变好.

由上述物理模型可以看出, 受激布里渊散射是一个三波参量混频过程. 两个辐射场: 入射抽运光场与 Stokes 种子场, 一个声波场. 抽运光场与 Stokes 种子场通过介质声波场的电致伸缩过程耦合, 在慢变振幅近似下, 满足如下耦合波方程:

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial E_L}{\partial t} = -ig_L \rho E_S + \frac{\alpha}{2} E_L, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} = ig_S \rho^* E_L - \frac{\alpha}{2} E_S, \quad (1b)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{2} \Gamma \rho = ig_a E_L E_S^*, \quad (1c)$$

E_L 是入射抽运光场强度, E_S 为 Stokes 场强度, ρ 为介质声子场相对密度值. 其中

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10476009)资助的课题.

[†] E-mail: luyuelan1968@163.com

$$g_L = \frac{\gamma\omega_L}{4cn\rho_0}, g_S = \frac{\gamma\omega_s}{4cn\rho_0}, g_a = \frac{\gamma \cdot q^2}{16\pi \cdot \Omega}, \quad (2)$$

令 $g_L \approx g_s = g_2$, $g_a = g_1$, 由(1c)式得

$$\alpha(z, t) = ig_1 \int_0^t E_L E_s^* \exp[-\Gamma(t - \tau)] d\tau,$$

把上式代入(1a)(1b)式得

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right] E_L = \frac{g\Gamma}{2\sigma} E_s \int_0^t E_s E_L \exp[-\Gamma(t - \tau)] d\tau + \frac{1}{2} \alpha E_L, \quad (3a)$$

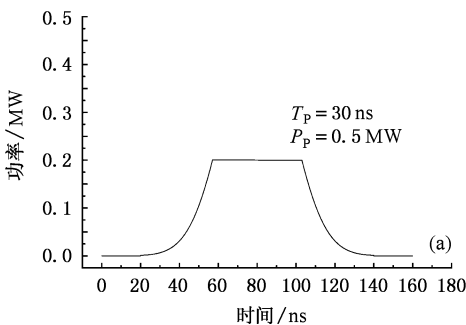
$$\left[\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right] E_s = \frac{g\Gamma}{2\sigma} E_L \int_0^t E_L E_s \exp[-\Gamma(t - \tau)] d\tau - \frac{1}{2} \alpha E_s, \quad (3b)$$

其中 $g = 2g_1 g_2 / \Gamma$, 功率 $P_L = |E_L|^2$, $P_S = |E_S|^2$. 边界条件为 $E_S(z=0, t) = E_{S0}$ 和 $E_L(z=L, t) = E_L(t)$, 这样构成完整的数学模型. 在空间上采用向后差分, 时间上采用隐格式有限差分, 对(3)式进行离散化和数值求解.

3. 种子场对受激布里渊散射光限幅输出波形影响的数值模拟

3.1. 受激布里渊散射光限幅波形

输出脉冲波形变化直接影响到激光脉冲的进一步应用, 因而研究光限幅情形下的时间波形变化是非常有意义的. 从输出波形的角度看, 理想的光限幅输出波形如图 1(a)所示: 峰值功率为 0.5 MW, 脉宽为 20 ns. 激光脉冲经过光限幅器时理想限幅输出波形, 显然理想的功率限幅系统满足如下条件: (1) 抽运功率低于限幅阈值时输出功率呈线性变化; (2) 抽运功率达到或超过限幅阈值后呈稳定限幅输出特性, 输出脉冲功率稳定地保持在某一确定的限幅输



出功率水平(3)只要抽运功率达到限幅阈值, 不需要经过弛豫过程和延迟时间, 功率限幅机制立即建立, 限幅具有瞬时性.

图 1(b)给出高斯型脉冲抽运时的典型限幅输出波形. 由于透过布里渊介质的限幅透射脉冲前沿功率较低, 线性透过介质, 使得透射脉冲的前沿低于阈值功率的部分几乎无损失的穿过 SBS 介质池, 因而透射脉冲前沿保持抽运脉冲形状, 而当抽运脉冲功率高出 SBS 阈值后, SBS 过程开始建立, 该过程基于介质中声子场的建立. 而声子场的建立必定有一定的弛豫时间, 在这段弛豫时间内, 抽运脉冲将保持较高的功率透过率, 维持较高的功率水平, 因而在限幅输出脉冲的前沿造成一个小的剩余尖峰脉冲, 我们称之为剩余峰. 而后稳定的 SBS 建立后, 由于 Stokes 光脉冲迅速抽空抽运光, 透射脉冲功率迅速下降, 输出波形后沿被压缩成稳定的功率输出.

剩余峰是由 SBS 产生的阈值效应造成的, 是无法克服的遗漏脉冲, 它标志着该限幅机制的响应特性. 如果能够设法将脉冲前部的剩余峰滤掉, 就可以得到功率稳定的理想 SBS 限幅输出波形. 这里我们在介质中首先引入种子场, 让种子场优先在限幅介质池中产生振荡, 对于后入射的介质中的抽运光场就无需 SBS 阈值, 直接建立布里渊放大过程, 因而就可以尽可能的降低由于阈值效应所引起的剩余峰对输出脉冲的影响. 我们选择种子光场及抽运场一些参数进行计算, 试图得到输出功率稳定的限幅输出脉冲波形, 为利用 SBS 功率限幅器输出理想的限幅脉冲波形做好理论准备.

3.2. 限幅输出波形随种子光脉冲峰值功率的变化规律

本文计算的抽运脉冲及种子光脉冲均采用高斯型的时间和空间分布. 针对波长为 1064 nm 的 YAG 激光脉冲进行计算. 布里渊介质采用 CCl_4 池

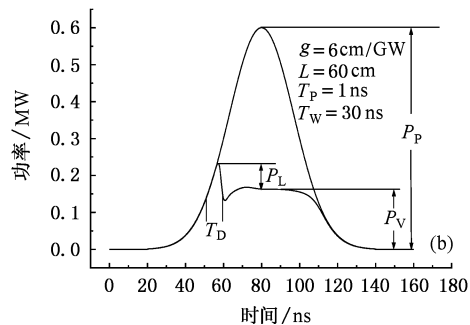


图 1 理想 SBS 限幅输出脉冲波形(a)及 SBS 光限幅输出波形(b)

长 $L = 60\text{cm}$ YAG 激光脉冲宽度 20ns . 采用确定的布里渊参数, 例如增益系数 $g = 6\text{cm/MW}$, 声子寿命 $\tau_p = 1\text{ns}$. 聚焦透镜焦距 $f = 10\text{cm}$. 图 2 (a) 给出种子场峰值功率不同时, 的限幅输出波形. 其中, 抽运场峰值功率与种子场峰值功率保持确定的比例: $P_{\text{pump}} = 300P_{\text{seed}}$. 随着种子场峰值功率的逐渐增加, 限幅程度不断的增强, 表现在限幅脉冲的输出功率逐渐下

降, 这是由于两者功率越大, SBS 效率越高, 抽运功率被抽空的功率就越多, 限幅输出功率水平就越低.

图 2 (b) 给出限幅输出功率值随种子场峰值功率的变化关系. 由图可知, 两者接近线性递减关系, 随种子场峰值功率的增加, 限幅平台功率水平线性降低. 由此可见, 控制种子场的峰值功率, 可以很好的控制限幅输出波形的功率水平.

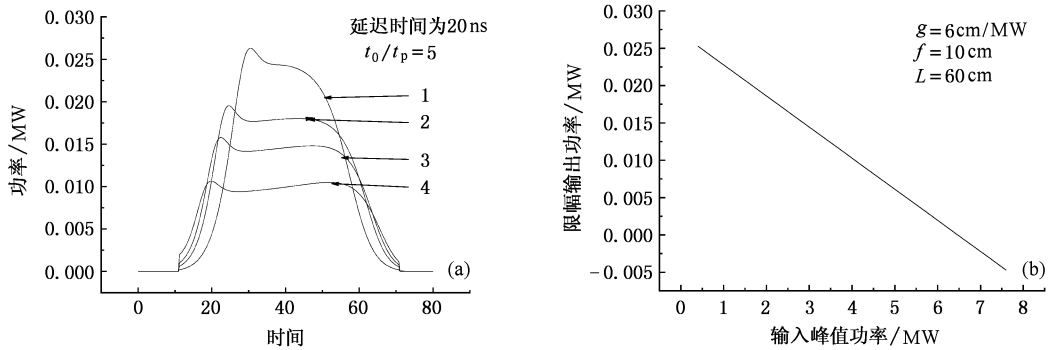


图 2 不同种子光功率峰值时限幅输出脉冲波形 (a) 及限幅输出功率随种子场峰值功率的变化规律 (b)

3.3. 限幅输出脉冲波形随延迟时间的变化规律

图 3 (a) 给出 SBS 限幅输出波形随延迟时间的变化规律. 延迟时间定义为抽运脉冲滞后种子光脉冲的时间. 首先在 SBS 介质池引入种子光, 使其在 SBS 池中优先建立振荡, 随后引入抽运脉冲, 这样可以使 SBS 过程无阈值地建立起来, 并很好的消除限幅输出脉冲峰前沿的小尖峰. 种子场与抽运脉冲选为 20ns 的高斯型脉冲. 由图可知, 延迟时间等于 20ns 时的限幅输出波形最为理想, 这意味着种子光

脉冲的峰值与抽运脉冲的峰值相遇, 此时 SBS 作用最强, 种子脉冲对抽运脉冲能量提取效率最高, 而延迟时间越短, 种子脉冲与抽运脉冲相遇时两者相互作用越充分, 功率提取和能量提取效率越高, 限幅功率平台越低, 因此欲得到稳定且功率水平不太低的功率平台, 应选用延迟时间 20ns . 当延迟时间超过 20ns 时, 种子光的脉冲后沿与抽运脉冲相互作用, 显然, 由于后沿功率水平较低, SBS 作用不断减弱, 功率及能量提取效率都变差, 于是限幅输出脉冲后沿功率平台变得渐渐凸起来.

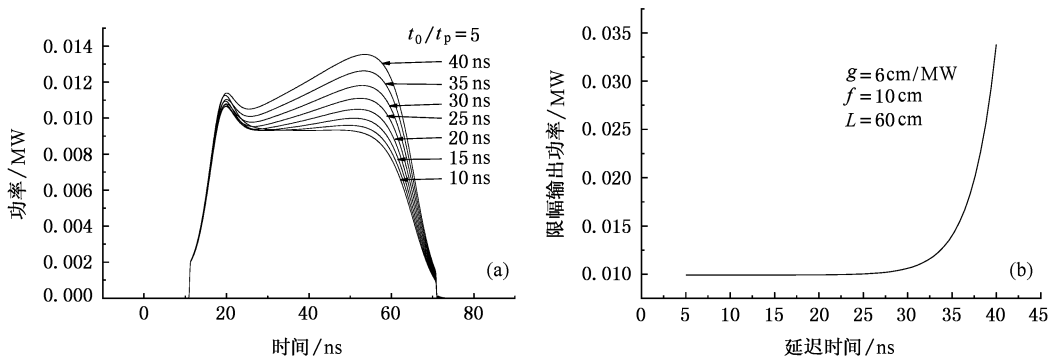


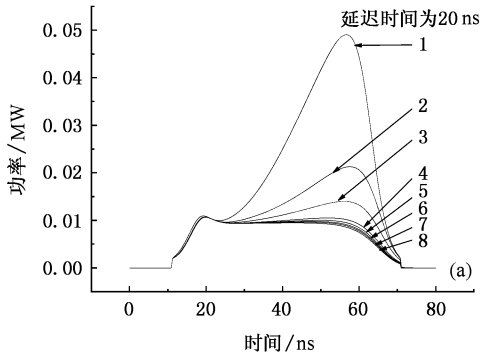
图 3 不同延迟时间时限幅输出波形 (a) 及限幅输出功率随延迟时间的变化规律 (b)

图 3 (b) 给出限幅输出脉冲功率随延迟时间的变化关系. 由图可知, 两者接近指数递增关系, 即随延迟时间的增加, 限幅输出功率水平指数增加. 由此可见, 控制延迟时间, 可以很好的控制限幅功率水平.

3.4. 限幅输出脉冲波形随种子光脉冲宽度的变化规律

图 4 (a) 给出种子光脉冲宽度与抽运脉冲宽度

之比 T_{seed}/T_{pulse} 不同时的限幅输出波形. 由图可见, 当种子光脉冲宽度与抽运光脉冲宽度相当, 即脉宽比为 1 时, 由于延迟时间为 20ns 的种子光脉冲后沿与抽运脉冲前沿相遇, 因而抽运脉冲的前沿与种子光之间相互作用, SBS 耦合作用明显, 脉冲前沿功率被限幅; 而抽运脉冲后沿来临时, 种子光脉冲已过



去, 抽运脉冲后沿没有 SBS 过程, 输出脉冲后部分保持高斯波形. 而当种子脉冲宽度变宽以后, 种子光场脉冲可以与抽运脉冲整个相遇, 相互作用充分, 功率在较宽的范围内得到限幅作用. 由图可见, 种子光的脉宽选取为抽运脉宽的 5 倍就足够了.

图 4(b) 给出限幅输出功率值随脉宽比的变化

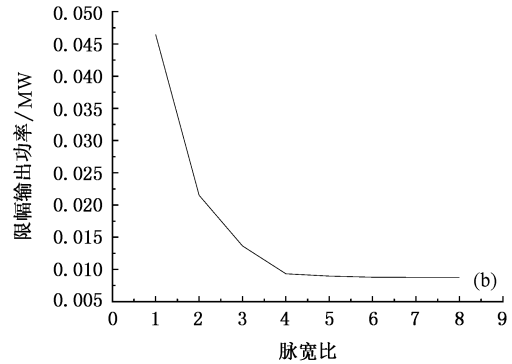


图 4 限幅输出脉冲波形 (a) 及限幅输出功率 (b) (a) 曲线 1—8 分别对应脉宽比 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10

关系. 由图可知, 当种子脉宽和抽运脉宽两者可比拟时, 种子脉宽明显影响功率限幅特性, 限幅输出功率随该比值接近指数递减关系. 当脉宽比增加到一定程度, 例如 5 倍以上时, 限幅输出功率趋于稳定. 由此可见, 在一定范围内, 控制种子脉宽可以控制限幅功率水平.

4. 结 论

对种子场诱导下的 SBS 光限幅脉冲波形随着种子场各种参数的变化规律进行了数值模拟, 提出利用种子光控制 SBS 光限幅输出波形的设想. 理论计算在 SBS 池中引入种子光场, 依赖不同种子场参数的波形变化规律. 当种子场与抽运场峰值功率较高时, SBS 作用明显加强, 种子场迅速抽空抽运场功率, 产生类似于平顶脉冲的光限幅输出波形, 限幅透射脉

冲的后沿能够保持稳定功率的时间较长, 但限幅输出功率较低. 输出波形随延迟时间变化规律表明, 延迟时间等于抽运脉冲宽度时的限幅输出波形最为理想, 此时意味着种子光脉冲的峰值与抽运脉冲的峰值相遇, SBS 作用最强, 限幅输出脉冲后沿较为理想. 输出波形随种子脉宽变化规律表明: 当种子光脉冲宽度与抽运光脉冲宽度相当, 即脉宽比为 1 时, 由于延迟时间为 20ns, 种子光脉冲后沿与抽运脉冲前沿相遇, 因而抽运脉冲的前沿有限幅作用, 而抽运脉冲后沿到来时, 种子光已过去, SBS 耦合作用失去, 输出脉冲无限幅输出. 当种子脉宽较宽时, 由于种子光可以与抽运光脉冲充分作用, SBS 耦合作用明显, 抽运脉冲功率被限幅. 这些功率限幅随种子光脉冲峰值、延迟时间和种子脉宽的变化规律表明, 可以通过控制种子光实现受激布里渊散射光限幅输出波形的有效控制.

- [1] Morela Y, Zaccaro J, Ibanez A, Baldecka P L 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] Ang H G, Sun B W, Yang G Y, Lee Y M K, Lee Y W. 2002 *Proc. SPIE* **4798** 222

- [5] Ang S G, Ang H G, Wei H, Sun B W, Lee M K Y, Lee Y W, Yang G Y 2002 *Proc. SPIE* **4798** 195
- [6] Hu A T, Wang W Y, Chen J R, Liu L C, Tai C H, Wei T H 2004 *Dyes and Pigments* **62** 11
- [7] Mary J M, Andrew G M, Brian P K 1998 *Proc. SPIE* **3472** 24
- [8] Lan L Y, Wei L Z, Kang D Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2170
- [9] Lü Z W, Lü Y L, Yang J 2003 *Chin. Phys.* **12** 507
- [10] He W M, Yang J, Lu Y L, Lu Z W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 468

- [11] 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]
- [12] Ding Y C , Lü Z W , He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2767 (in Chinese] 丁迎春、吕志伟、何伟明 2002 物理学报 **51** 2767]
- [13] Yang J , Lü Z W , He W M Lü Y L 2005 *China Phys.* **14** 343

Study on the control of optical limiting of pulse-shape in stimulated Brillouin scattering process *

Lü Yue-Lan^{1)†} Dong Yong-Kang²⁾ Lü Zhi-Wei²⁾

1) (Harbin Engineering University , Harbin 150001 , China)

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

(Received 14 July 2005 ; revised manuscript received 7 November 2005)

Abstract

Based on the numerical models of stimulated Brillouin scattering (SBS) limiting, the influence of seed pulse duration, induced time and seed power on transmitted pulse shape in SBS optical limiting process is theoretically investigated. By seeding a Stokes pulse into the SBS optical limiting system, the SBS induced by this seeded Stokes pulse can reshape the transmitted limited pulse profile. By choosing suitable physical parameters, the best limited temporal profile can be obtained. The theoretical simulation shows that limited pulse shape can be controlled. When seed pulse duration is chosen as five times the length of the pump pulse duration and the delay time is just the same as the pump pulse duration, the limited pulse shape levels off, and the higher the seed power is, the lower the limited power steps. Optical limiting of pulse-shape can be controlled by introducing a seed to a stimulated Brillouin scattering cell.

Keywords : stimulated Brillouin scattering , limiting pulse-shape , seed

PACC : 4265C , 4225F

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10476009).

† E-mail : luyuelan1968@163.com