

文章编号: 0258-7025(2003)11-0998-05

单模光纤中受激布里渊散射对纳秒激光脉冲的光限幅特性

吕月兰, 吕志伟, 杨 琨, 何伟明

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 采用2 m长, 100 μm 纤径单模光纤, 研究了受激布里渊散射对纳秒激光脉冲的光限幅特性。从耦合波方程出发, 利用计算机模拟了光纤中瞬态受激布里渊散射过程的光传输特性。理论模拟的能量及光强度的变化规律表明光纤系统对纳秒激光具有很好的光限幅特性。根据理论分析给出所讨论范围内的实验结果, 实验结果证明此光学系统对纳秒激光脉冲具有光限幅特性及脉宽压缩特性, 对于输入能量在100~400 μJ 变化的纳秒激光脉冲, 给出输出能量稳定在65~85 μJ 范围内, 与理论分析的结论符合得很好。

关键词 非线性光学; 光纤; 受激布里渊散射; 光限幅

中图分类号 TN 247; O 437 **文献标识码** A

Optical Limiting of Nd:YAG Nanosecond Laser Pulses by Stimulated Brillouin Scattering in Single-mode Fiber

LÜ Yue-lan, LÜ Zhi-wei, YANG Jun, HE Wei-ming

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

Abstract In this paper, optical limiting effect is studied based on the stimulated Brillouin scattering (SBS) in a single-mode fiber. Nonlinear propagation has been numerically analyzed and computationally treated in the transient SBS progress. Optical limiting, stabilization and output pulse shape have been demonstrated when high-power laser pulses enter a fiber when SBS occurs. Experimental investigation of optical limiting performances predicted by theory has been conducted using a 100 μm -diameter fiber. The input optical signals are Nd:YAG nanosecond laser pulses which widths are 16 ns, superior constant output energy was gained when the intensity of input pulse change in experimental regime. When the input energy varied between 100~400 μJ , the fiber system gives relative stable output energy between 65~85 μJ . So the experiment results showed the optical limiting performance based on SBS in a fiber.

Key words nonlinear optics; fiber; stimulated Brillouin scattering; optical limiting

1 引言

利用光纤来传输高功率的短脉冲激光具有广泛应用, 例如军事上远距探测、油田测井及光学参量振荡等。近年来, 人们开始越来越注意光纤光限幅器的研究。所谓光限幅器就是对一个在很大范围内变化的输入信号给出高稳定输出^[1~3]。光纤光限幅器有很多潜在的应用: 在光互连领域需要一种多功能

外部控制的光学器件——传输器和分配器, 以实现两个集成光路的芯片之间及同一芯片上不同位置之间的互连。这就需要对光束进行限幅放大: 即对于输入功率在一定范围内变化的光束给出稳定在一定值附近的输出, 简称光限幅放大器。它还可以用来补充由于离网络终端距离不同所造成的功率损失。W. I. Way^[4]研究了掺铒光纤的光限幅放大特性, 其动态范围为30 dBm。它是由三个掺铒光纤放大

收稿日期: 2002-06-14; 收到修改稿日期: 2002-08-09

作者简介: 吕月兰(1968—), 女, 哈尔滨工业大学航天学院光电子技术研究所, 博士, 主要从事固体激光及非线性光学研究。

E-mail: ellen8527@sina.com.cn

器三阶串联得到的。对于输入功率从 30 dBm 到 1.5 dBm 变化信号光束给出 12.9 dBm 稳定输出。Sohn-Ling 等^[5]研制了多波限幅-放大色散补偿器。它不仅对多种波长的信号实现限幅放大,而且对于由非线性效应引起的色散提供色差补偿。该多波限幅-放大色散补偿器能将动态范围从 17 dBm 至 0.1 dBm 信号以内连续变化的功率,给出 16.4 dBm 的高稳定输出,同时系统只有小于 0.3 dBm 的功率损失。该系统设计结构有助于光网络的研究和发展。

本文着重研究了单模光纤中利用受激布里渊散射(SBS)实现对激光纳秒脉冲进行限幅放大的可行性。关于光纤中受激布里渊散射虽已有很多研究,但这些研究大都以后向散射 Stokes 波的动力学特性为主要研究目标,很少有人研究此时的透射光特性。本文通过分析 SBS 这一光学非线性过程,尝试给出了该光学系统光学限幅放大特性及相应的波形压缩特性。

2 理论模拟

2.1 理论模型

在单模光纤中,为了描述受激布里渊动力学过程,采用 Alexander 等^[6]提出的受激布里渊散射噪声初始模型,可以用下面三个方程描述

$$\left[\frac{n}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \right] E_l = -\alpha E_l + ik\rho E_s \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\Gamma}{2} \rho = i\Lambda E_l E_s^* + f \quad (3)$$

这里 $E_l(z, t), E_s(z, t)$ 代表光纤中的抽运光和斯托克斯光的振幅, α 代表光纤的损耗系数, n 为折射率, c 为光速, $\rho(z, t)$ 为介质密度, Γ 为声子衰减速率, k ,

Λ 为布里渊耦合系数, $k = \frac{\gamma \omega_L}{4cn\rho_0}, \Lambda = \frac{\gamma K^2}{16\pi\omega}, f(z, t)$

为引起布里渊散射的热噪声。 $f(z, t)$ 为标准的高斯型随机变量,即平均值为零,在时间和空间上具有 δ 相关性,即

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

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

Q 的值可以由热动力方程得到: $Q = 2k_B T\rho_0 \Gamma/v^2 A$, ρ_0 为 SBS 介质的平均密度, v 为介质声速, A 为相互作用截面。对方程(3) 积分代入(1), (2) 得

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_l + \frac{1}{2} \alpha E_l =$$

$$\frac{g\Gamma}{2} E_l \int_0^t E_l E_s^* \exp[-\Gamma(t - \tau)] d\tau + ikE_s \int_0^t f e^{-\frac{1}{2}\Gamma(t-\tau)} d\tau \quad (5)$$

$$\left(-\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_s + \frac{1}{2} \alpha E_s = \frac{g\Gamma}{2} E_l \int_0^t E_l^* E_s \exp[-\Gamma(t - \tau)] d\tau + ikE_l \int_0^t f e^{-\frac{1}{2}\Gamma(t-\tau)} d\tau \quad (6)$$

这里, $g = 4k\Lambda/\Gamma$, 为 SBS 稳态功率增益系数。利用梯形积分公式对(5), (6)式中时间进行近似,在时间上使用隐式有限差分法,在空间上使用后向差分格式对偏微分方程组离散化并数值求解,数值模拟了光纤中受激布里渊动力学过程。所用石英光纤对于 1.06 μm 的波长,各参数取值如下: $n = 1.5$, $\rho_0 = 2.595 \text{ g/cm}^3$, $\gamma = 1.35$, $\omega = 1.7 \times 10^{10} \text{ rad/s}$, 受激布里渊散射增益系数 $g = 4g_1 g_2/\Gamma = 5 \times 10^{-9} \text{ cm/W}$, 吸收系数 $\alpha = 0$ 。在初始时刻($t = 0$) 的所有的场振幅都是已知的,包括在 $z = 0$ 处入射的放大抽运光脉冲采用高斯型分布,噪声项 $f(z, t)$ 也采用高斯型,位相从 0 到 π 随机分布,则边界条件为

$$P_L(L, t) = P_{\max} \exp\{-4\ln 2[(t - t_0)/t_p]^2\}$$

$$E_s(0, t) = 0, \quad E_s(z, 0) = 0, \quad f(z, 0) = f_i$$

2.2 理论模拟结果

2.2.1 基于 SBS 的能量限幅特性

利用理论模拟程序求解方程(5), (6), 可以得到抽运光经过光纤后透射波的数值解,从而可以得到透射波的能量特性及波形特性。经计算机模拟给出相应理论曲线,图 1 所示为计算机模拟透射能量随输入的抽运光脉冲能量的变化规律。

从图 1 可以看出,当入射的抽运光脉冲能量比

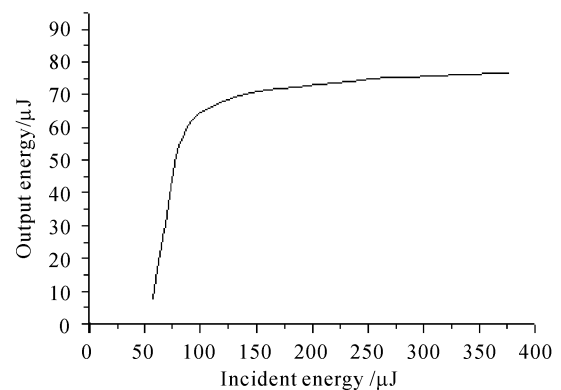


图 1 透射能量随输入能量变化的理论模拟曲线

Fig. 1 Variation of output energy with incident energy predicted by Eqs. (5), (6)

较小时,不发生 SBS,抽运光脉冲能线性通过光纤,此时光纤是光学透明的,光纤对纳秒光脉冲呈现高透过率,能量几乎无损失或损失很少地通过光纤。一旦达到 SBS 阈值,后向散射 Stokes 光迅速增长,反射率迅速增加,在一定范围内,透射能量很快趋于饱和,即随入射能量增加出射能量变化非常缓慢,几乎稳定于某一个确定值,因而可以肯定该系统具有很好的能量限幅特性。

2.2.2 基于 SBS 的光强度限幅特性

在分析了光纤中的能量限幅特性的同时,还研究了光强度限幅特性。基于方程组(5),(6)的数值解,模拟出透射脉冲的功率密度即光强度随输入抽运脉冲功率密度的变化曲线,如图 2 所示。当光强度较小时,透射光强度以相同的速率随入射光强度增加而增加,此时属于线性区。当光强度进一步增加,透射光强度增长速度明显减慢,其量值也渐趋于饱和,由于透射脉冲波形变窄,因而光强度饱和区曲线不如能量饱和区曲线平直。

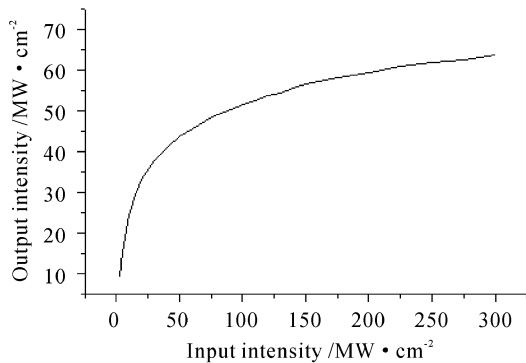


图 2 透射光强度随输入光强度变化的理论模拟曲线

Fig. 2 Variation of output intensity with incident intensity

2.2.3 SBS 过程对脉冲波形的影响

随着输入激光脉冲的能量增加,透射脉冲波形也随之发生明显变化。根据耦合波方程,对于标准的高斯型分布输入脉冲,计算了 SBS 发生时反射的 Stokes 波形及透射脉冲波形。为了便于分析,抽运脉冲与透射脉冲用的是同一时间轴,而将反射的 Stokes 波形进行了平移,即与前两者分属于不同时间轴。由图 3 可见,当抽运脉冲进入光纤时由于前沿能量较低,透射脉冲与抽运光脉冲波形轮廓相近,保持准高斯型。当能量开始增加一定值时,SBS 发生,产生反射的 Stokes 脉冲,由于它是对抽运脉冲前沿的陡然放大,因而具有很陡的前沿。Stokes 脉冲是峰值很强的窄脉冲,且脉冲宽度变化缓慢。此

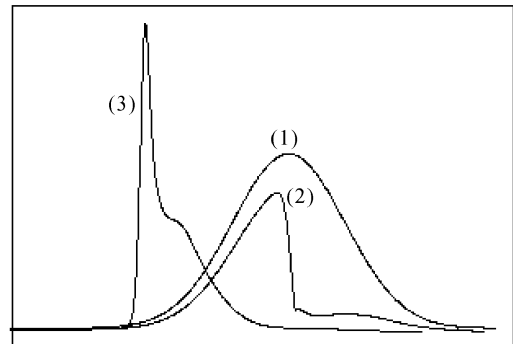


图 3 理论模拟给出的波形图

(1) 抽运光脉冲;(2) 透射光脉冲;(3) 反射 Stokes 脉冲

Fig. 3 Various theoretical pulse shapes

(1) the waveform of pump pulse; (2) the waveform of transmitted pulse; (3) the waveform of Stokes pulse

时由于抽运光能量明显地被耗尽,因而透射脉冲前沿与反射 Stokes 波形刚好相反,其后沿开始陡然下降,待抽运光后继脉冲过来时又有一定的能量输出,因而透射光脉冲后部都被挖去了一部分,只留下一个较低的能量平台。由理论计算知,抽运光能量越大,透射脉冲波形越窄,即光脉冲功率受限程度越大。

3 实验内容

实验采用图 4 所示典型的 SBS 光学系统。抽运源为 Nd:YAG 激光器,输出能量 10 mJ,工作在 1064 nm,脉冲宽度为 16 ns,重复频率为 1 Hz。光纤采用纤径为 100 μm 的单模光纤,长度为 2 m,利用焦距为 15 cm 聚焦透镜将经过衰减片的激光聚焦到光纤里。在激光系统中加入小孔光阑(0.2 mm)以控制激光输出为单纵模。为了防止后向散射光进入激光系统,采用了偏振片和 $\lambda/4$ 波片组成的隔离器。抽运光、后向散射 Stokes 光和透射抽运光的能量 E_p , E_s 和 E_t 分别由能量计 2835C 探测,快响应 PIN 光电二极管(响应时间约 1 ns)探测脉冲波形,

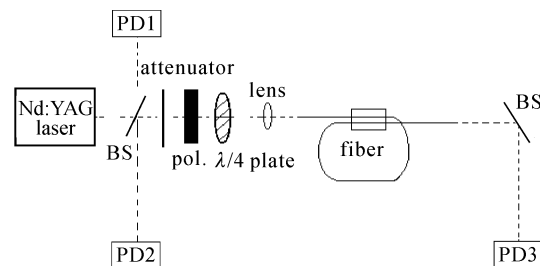


图 4 光纤限幅实验装置图

Fig. 4 Experimental setup for optical limiting in fiber

并由数字示波器 TDS684A 记录,出射抽运光和入射抽运光的平均脉宽分别记为 W_i 和 W_p 。

实验中首先在 SBS 理论阈值附近进行探测,从而确定 SBS 产生的实验阈值。实验测得的受激布里渊散射阈值处在 $104 \mu\text{J}$,与理论预测结果具有同一个数量级。显然当抽运光能量低于此值时,光线性通过光纤,高于此值时,光非线性通过光纤。然后在此范围通过衰减片衰减抽运光的能量来实现抽运光能量的改变。每转动衰减片一次,都要重新准直光路,使得抽运光能耦合进光纤。保持抽运光能量和脉宽 16 ns 不变,然后衰减抽运光能量,使得抽运光从 $50 \mu\text{J}$ 到 $400 \mu\text{J}$ 变化。在实验中,入射抽运光、光纤末端的输出抽运光能量都是多次测量的平均值。有一点需要说明,在理论计算时忽略了耦合效率的影响,相当于假定耦合效率为 100% ,而实际耦合效率不可能为百分之百。实验中首先就是标定该光纤系统的耦合效率,经测量实验所用的光纤系统的耦合效率为 75% 。实际耦合进入光纤的抽运光能量近似等于聚焦透镜前抽运光能量乘以耦合系数。上述 $50 \mu\text{J}$ 到 $400 \mu\text{J}$ 的抽运光能量是折算后的实际进入光纤的能量。

4 实验结果与讨论

图 5(a)中每一个点代表对应不同抽运脉冲功率密度下输入光强度与透射光强度的实验点。随着输入光强度增加,透射光强度开始时线性增加,增加到 SBS 产生阈值,可观察到布里渊散射 Stokes 光。此时开始观察光纤末端透射光脉冲的输出特性,实验发现透射光强度呈现饱和,即随着输入光强度增加,透射光强度增加缓慢,渐趋于一个稳定值,因而系统透射光强度呈现限幅特性。显然对于一定范围内变化的入射激光脉冲,透射光强度由于非线性效应而受限,其波动范围将远小于输入光脉冲强度的波动范围,这与理论预言的光强度限幅特性一致。同时考察了 700 个激光脉冲的能量限幅特性。对于输入能量在 $100 \sim 400 \mu\text{J}$ 的强激光脉冲,透射能量稳定在 $65 \sim 85 \mu\text{J}$ 范围内。同时可测得透射脉冲变窄,脉冲宽度的压缩率随抽运激光的功率增加而接近线性增加。这可以由理论模型进行很好的解释:当入射抽运光强达不到阈值时抽运光脉冲不发生非线性作用,线性通过光纤;一旦超过 SBS 产生阈值,激光脉冲与介质相互作用,将导致激光能量向 Stokes 光转移。在 Stokes 光放大的过程中,脉冲前

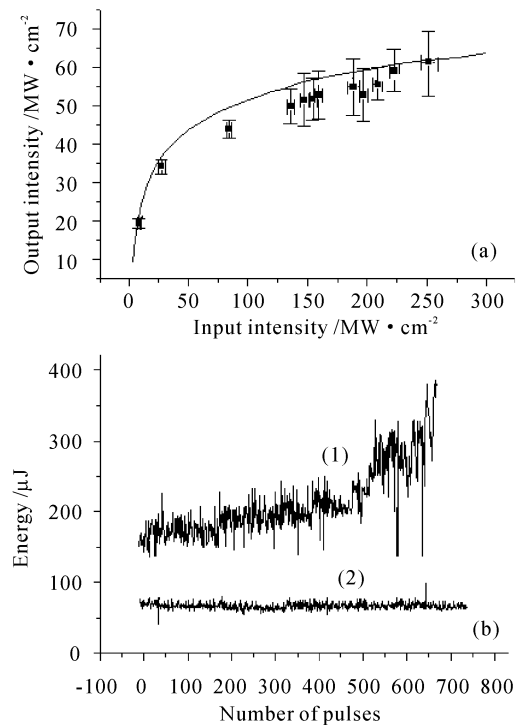


图 5 (a) 实验透射光强度随输入光强度的变化(实点)及理论模拟曲线(实线);(b) 输入脉冲(1)及透射脉冲(2)的能量波动情况

Fig. 5 (a) Measured transmitted energy varying with input energy (dot) and the theoretical curve (solid); (b) fluctuation of input energy and transmitted energy

沿由于增益饱和而上升很快,因此,在脉冲得到完全放大后,抽运激光脉冲能量几乎全部转移到了一个很窄的后向脉冲中,一小部分能量透射出去,从而实现能量及光强度限制即光限幅。

同时由于抽运激光脉冲能量的转移,透射脉冲必定被压缩(实验波形如图 6(a)~(d)所示),当抽运能量进一步增加时,将导致更大的抽运光能量向 Stokes 波的转移,因而使得透射波形进一步压缩。实验上测出的反射 Stokes 脉冲前沿较陡,而透射脉冲后沿较陡,这与理论模拟曲线分析较好地吻合。由于抽运脉冲波形相对稳定,因而只给出一个抽运波形。理论曲线与实验曲线也略有不同,一方面是由于理论计算忽略了吸收及其他非线性效应对 SBS 过程的影响,另一方面实验上由各种偶然因素也会造成透射率下降,从而透射能量降低,这两者均会造成透射光强度实验曲线低于理论计算曲线。实验波形与理论波形相比较实验波形明显变化缓慢,这与能量曲线的解释同出一辙。实验探测波形时为了保

护探头,将抽运光和透射光进行了不同程度的衰减,因而抽运光波形与透射光的波形峰值并不代表任何

意义。

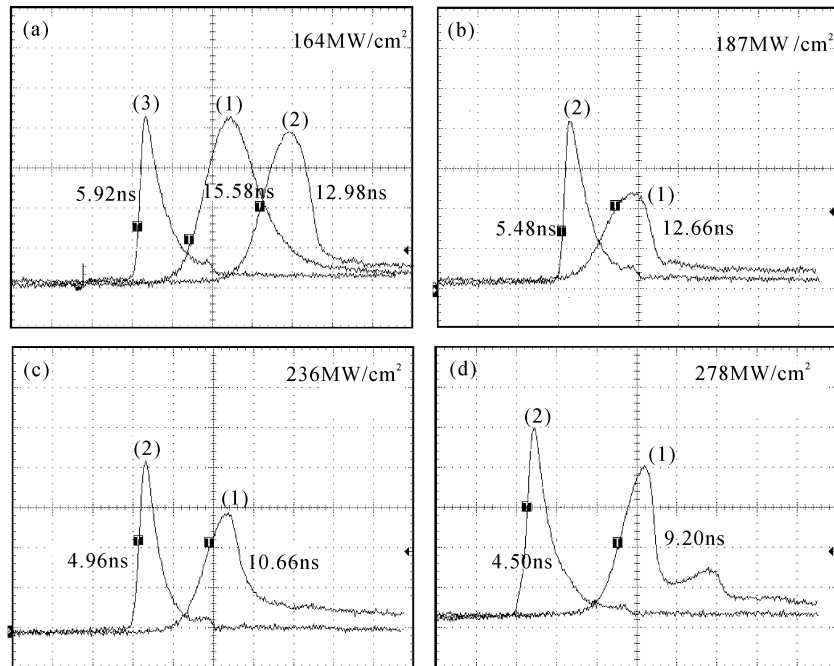


图 6 (a)~(d) 不同抽运脉冲功率密度下的实验脉冲波形

(a) 1: 抽运脉冲波形, 2: 透射脉冲波形, 3: 反射 Stokes 波形; (b)~(d) 1: 透射脉冲波形, 2: 反射 Stokes 波形

Fig. 6 (a) 1: pump pulse, 2: transmitted pulse and 3: Stokes pulse in experiment;

(b)~(d) 1: transmitted pulses and 2: Stokes pulses

5 结 论

本文利用瞬态 SBS 理论,分析了光纤中基于 SBS 过程的非线性传输行为,并证明该过程显示出光限幅特性。为了验证理论预言的光限幅规律,由实验给出随着抽运功率变化,透射及反射 Stokes 能量和波形的变化规律,结果表明光纤系统的 SBS 过程具有光强度及能量的光限幅特性。实验波形的变化规律也与理论预言的波形变化趋势一致。这为设计和制作基于 SBS 过程的光纤光限幅器提供了一定的理论基础。

参 考 文 献

- 1 William H. Steier, Jayant Kumar, Mehrdad Ziari. Infrared power limiting and self-switching in CdTe [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(10):840~841
- 2 Kai Dou, Joshua Y. Du, Edward T. Knobbe. Nonlinear absorption and optical limiting of fullerene complex $C_{60}[W(CO)_{3diphos}]$ in toluene solutions and sol gel films [J]. *Journal of Luminescence*, 1999, **83~84**:241~246
- 3 I. C. Khoo, H. Li. Nonlinear optical propagation and self-limiting effect in liquid-crystalline fibers [J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **59**(6):573~580
- 4 W. I. Way, D. Chen, M. A. Saifi. High gain limiting erbium-doped fibre amplifier with over 30 dB dynamic range [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **37**(3):211~213
- 5 Sohn-Ling Tzeng, Hung-Chen Chang, Yung-Kuang Chen. Limiting-amplified multiwavelength dispersion compensator incorporating chirped fiber gratings and optical amplifier for DWDM systems [J]. *Opt. Comm.*, 1999, **169**(1):81~86
- 6 Alexander L. Gaeta, Robert W. Boyd. Stochastic dynamics of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber [J]. *Phy. Rev. A*, 1991, **44**(5):3205~3208