

锥度光纤受激布里渊散射相位共轭特性的参数优化

李通¹ 赵智刚¹ 陈军¹ 刘崇^{1*} 崔玲玲² 童立新² 高清松² 唐淳²

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
(² 中国工程物理研究院应用电子技术研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 对光纤中受激布里渊散射(SBS)的耦合波方程进行了合理的近似和简化,在瞬态 SBS 过程的耦合波方程的基础上,构建了数值计算的模型。特别是对变芯径锥度光纤中的 SBS 耦合波方程进行数值求解,得到了受激散射过程中抽运光和斯托克斯光的功率在传播过程中的变化规律,并比较了光纤参数对 SBS 的影响,优化了锥度光纤作为高功率高重复频率激光二极管抽运固体激光器中的相位共轭镜应用中的参数,为其在改善光束质量中的应用提供了系统的参数优化规律。此外,将模拟数据与实验数据进行对比,验证了模型的合理性。

关键词 非线性光学;激光器;锥度光纤;相位共轭;数值模拟

中图分类号 O437.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1102007

Parameters Optimization for the Phase Conjugation Performance with Stimulated Brillouin Scattering in a Tapered Fiber

Li Tong¹ Zhao Zhigang¹ Chen Jun¹ Liu Chong¹ Cui Lingling²
Tong Lixin² Gao Qingsong² Tang Chun²

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Reasonable approximations and simplifications of the coupled wave equations of stimulated Brillouin scattering (SBS) in fibers are carried out. Based on the coupled wave equations of transient SBS, a numerical model is built. As these coupled wave equations of SBS are solved, especially in the tapered fiber with variable core diameter, the powers of the pump wave and the Stokes wave in the process of SBS are obtained, including the variation laws of them and the distinctions of the SBS in the fibers with different parameters. Based on the analyses, the parameters of the tapered fiber, which is used as a phase-conjugating mirror in high power and high repetition rate laser diode pumped solid state lasers, are optimized. It provides parameter optimization rules of the system in the applications for beam quality improvement. In addition, the rationality of the model is verified by comparing simulation results with experimental results.

Key words nonlinear optics; lasers; tapered fiber; phase conjugation; numerical simulation

OCIS codes 190.4370; 190.2640; 190.5890; 140.3535

1 引言

1972 年, Ippen 等^[1]首次在光纤中观察到受激布里渊散射(SBS);其后在 1982 年, Baslev 在多模

光纤中观察到 SBS 的相位共轭现象后^[2], 光纤作为一种新型的 SBS 介质开始引起人们广泛的关注。由于光纤具有较长的作用长度和较高的能量密度,

收稿日期: 2011-06-06; 收到修改稿日期: 2011-07-20

基金项目: 国家自然科学基金中国工程物理研究院联合基金(10876037)和中国工程物理研究院应用电子学研究所技术开发项目(2010-685. YZ. V)资助课题。

作者简介: 李通(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与非线性光学方面的研究。E-mail: litongjdz@163.com

导师简介: 陈军(1946—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与非线性光学方面的研究。E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: chongliu78@hotmail.com

可以使 SBS 产生的阈值显著降低并获得较高的保真度。相比于传统的 SBS 介质,光纤不仅方便轻巧,而且无毒无污染,不会像液体或高压气体那样渗漏或者挥发,良好的柔韧性使其可在很小的空间内弯曲放置,符合激光器小型化的设计思想^[3-6]。光纤激光器由此开始飞速发展^[7-9]。

本研究小组多年来也对各种类型的光纤相位共轭进行了长期研究。陈军等^[10]曾在小能量下对多模光纤中的 SBS 进行了数值模拟分析,并提出了利用锥度光纤来改善相位共轭的想法。2004 年,他们在重复频率 100 Hz,注入能量 4.6 mJ 的情况下,使用芯径 200 μm 的石英光纤实现了最高 39% 的 SBS 反射率^[11]。2005 年,他们又在重复频率 100 Hz,注入能量 3 mJ 的情况下,使用从 200~400 μm 过渡的锥度光纤实现了最高 85% 的 SBS 反射率^[12]。2007 年,汪莎等^[13]利用芯径 600 μm 的光纤,采用熔石英棒-光纤结构的复合型光纤,在注入能量 41.9 mJ、100 Hz 的重复频率下获得了最高 42.05% 的 SBS 反射率。2010 年,赵智刚等^[14-16]基于固体 SBS 相位共轭镜的全固态高重复频率大能量单纵模主振荡功率放大(MOPA)激光系统,应用大口径熔石英锥度光纤(从 400~1000 μm)作为相位共轭镜,在注入能量 36.5 mJ、重复频率 400 Hz 时获得了超过 50% 的反射率^[14]的实验结果。本文将对最新实验研究中大功率下的锥度光纤中的 SBS 进行理论建模,并对照实验条件给出详细的数值解,归纳各种条件下的变化规律,从而实现参数的优化。

无论何种介质中的 SBS 过程,都可以通过声场与光场相互作用的波耦合方程来描述。由于 SBS

过程是由一组含时间的三维非线性偏微分方程组表示的,因此,对该方程组进行求解就成了人们研究的焦点之一。要对该偏微分方程组进行直接解析求解是很困难的,而精确求解也几乎不可能。人们通常根据所要解决的具体问题,提出一系列假设对方程组进行近似,并用计算机对其进行数值模拟,从而得到 SBS 随介质参数和抽运光参数变化的规律。对 SBS 耦合波方程组的数值求解,最成功的模型就是 Lemberg 的 BOUNCE 程序,基于此模型,推出了 Albuquerque 的 WJSA 单模一维模型和 TRW 的 BRIWON 模型^[17-19]。以上的模型均是稳态模型,即模型建立在相干长度大于增益长度的基础上,而光纤中增益长度远大于激光系统的相干长度。本文建立了光纤中瞬态 SBS 过程的模型,采用组合差分格式(即时间上隐式有限差分,空间上后向差分)对耦合波方程组进行数值求解。利用该方法对不同光纤中的 SBS 进行数值模拟,并与实际实验进行了比较分析。

2 实验装置及结果

实验装置如图 1 所示。所用的激光光源为单纵模 MOPA 激光系统。从种子激光器出射的单纵模(SLM)激光依次通过扩束装置和光学隔离器系统 I 后进入预放大器进行预放大。从预放大器出射的光束经由扩束装置、 $\lambda/2$ 波片(HWP)和隔离系统 II 后,进入主放大器进行进一步放大。从主放大器输出的光束经由 $\lambda/4$ 波片(QWP)和一个长焦距透镜会聚进入锥度光纤。当入射光的功率密度达到 SBS 阈值之后,SBS 发生。

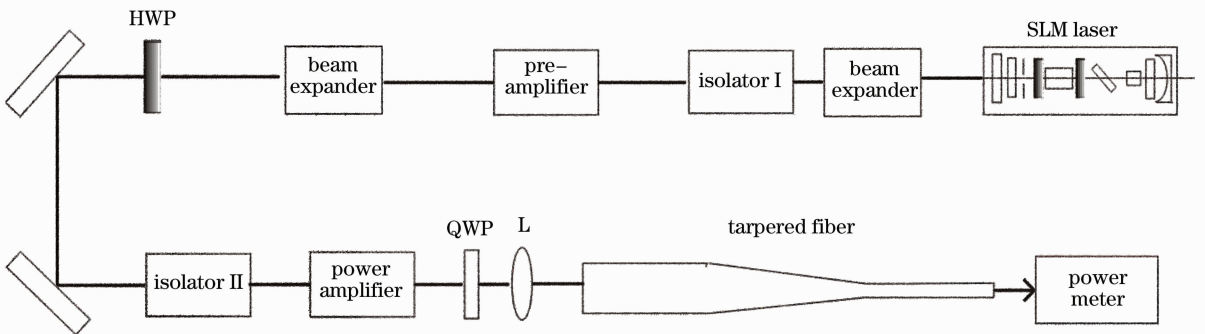


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental configuration

实验中测得当抽运脉冲宽度为 24 和 15 ns 时,芯径从 400~1000 μm 变化的锥度光纤的 SBS 反射率随注入光纤功率变化的曲线。在抽运能量约 40 mJ 时,

在抽运脉宽为 24 和 15 ns 时分别可得到最高约 70% 和 50% 的 SBS 反射率^[14]。在第 4 节将根据这一实验结果进行数值计算,并与实验结果进行对比。

3 光纤中 SBS 的数值模型

3.1 SBS 基本原理

布里渊散射是入射光场与介质内的弹性声波场相互作用产生的一种光散射现象。SBS 过程中的弹性声波场的产生是在强激光的作用下,介质通过电致伸缩效应而产生的,这一过程可以看作是光场与声场的相干散射。存在弹光效应时的麦克斯韦波动方程和介质内弹性声波的密度波动方程为^[20]

$$\begin{cases} (\nabla^2 + k_L^2) \mathbf{E}_L(\mathbf{r}) = \frac{\mu\omega_L^2}{2} \frac{\gamma}{\rho_0} \mathbf{E}_S(\mathbf{r}) \rho(\mathbf{r}) \\ (\nabla^2 + k_S^2) \mathbf{E}_S(\mathbf{r}) = \frac{\mu\omega_S^2}{2} \frac{\gamma}{\rho_0} \mathbf{E}_L(\mathbf{r}) \rho^*(\mathbf{r}) \\ \nabla^2 \rho - \frac{1}{V} \alpha_A \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \frac{\gamma}{2V^2} \nabla^2 (E^2) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{E}_L, \mathbf{E}_S$ 分别为入射激光和斯托克斯光的光场, k_L, k_S 分别为激光和斯托克斯光的波数, μ 为介质的磁导率, γ 是电致伸缩系数, ρ_0 为介质的平均密度, α_A 为介质内声波的衰减系数, V 是介质内声波的传播速度, ρ 是介质内的声场, ω_S, ω_L 分别为斯托克斯光和激光的角频率。

对方程式(1)做如下的近似:

1) 慢变振幅近似。考虑到光场振幅的变化与其时域和空间域频率的变化相比慢得多,略去空间的二阶导数项。

2) 理论研究表明,二阶时间导数项对计算的结果影响很小,尤其是从数值的变化趋势上看,几乎没有影响,故可以忽略。

可得到下述方程:

$$I(z) = \frac{P}{A_{\text{eff}}} = \frac{P}{\pi r^2(z)}, \quad (5)$$

式中 $r(z)$ 为光纤的半径,代入(4)式后得到

$$\begin{cases} \frac{\partial P_L(z,t)}{\partial z} = \frac{2P_L(z,t)}{r(z)} \frac{\partial r(z)}{\partial z} - [P_L(z,t)P_S(z,t)]^{1/2} S(z,t) \\ \frac{\partial P_S(z,t)}{\partial z} = \frac{2P_S(z,t)}{r(z)} \frac{\partial r(z)}{\partial z} - [P_L(z,t)P_S(z,t)]^{1/2} S(z,t) \\ \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{2\tau_B} \left\{ g \frac{[P_L(z,t)P_S(z,t)]^{1/2}}{\pi r^2(z)} - S(z,t) \right\} \end{cases}, \quad (6)$$

方程式(6)表达了在特定时间、特定位置的抽运光和斯托克斯光之间的耦合关系,它们之间的能量交换是通过声致光栅来实现的,而声场的增强是依靠抽运光和斯托克斯光的耦合实现的。

3.2 SBS 理论模型的数值求解方法

(6)式可以利用欧拉公式来求解数值解。如果

$$\begin{cases} \frac{\partial E_L}{\partial z} = -ig_1 \rho_A E_S \\ \frac{\partial E_S}{\partial z} = -ig_2 \rho_A^* E_L \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \Gamma_B \rho = ig_2 E_L E_S^* \end{cases}, \quad (2)$$

式中 Γ_B 为声子寿命的倒数, $\Gamma_B = 1/\tau$, 增益系数 g_1, g_2 分别为

$$\begin{cases} g_1 = \frac{\omega \gamma}{c n \rho} \\ g_2 = \frac{\omega^2 \gamma m}{8 \pi \Omega c^2} \end{cases}, \quad (3)$$

式中忽略了抽运波和斯托克斯波之间的微小频移,即 $\omega = \omega_S \approx \omega_L, \Omega$ 为声场频率。

若化成光强表示的形式,且假设相位匹配角为 0(此时斯托克斯波获得最大的增益), (2)式可化简成^[21,22]

$$\begin{cases} \frac{\partial I_L}{\partial z} = -(I_L I_S)^{1/2} S \\ \frac{\partial I_S}{\partial z} = -(I_L I_S)^{1/2} S \\ \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{2} g \Gamma_B (I_L I_S)^{1/2} - \frac{1}{2} \Gamma_B S \end{cases}, \quad (4)$$

这里的增益为

$$g = \frac{\omega^2 \gamma^2}{c^3 n V \rho \Gamma_B}.$$

考虑光纤中的情况,在整个传播过程中光束截面等于光纤的截面积,所以可以将(4)式中的光强转换为光功率:

知道在位置 z 处、时间 t 的抽运光功率 $P_L(z,t)$, 则 $z + \Delta z$ 位置处、时间 t 的抽运光功率为

$$P_L(z + \Delta z, t) = P_L(z, t) + \Delta z \{-S(z, t) [P_L(z, t) P_S(z, t)]^{1/2}\}. \quad (7)$$

在瞬态 SBS 的情况下,无论是光纤内的声场分布还是光场分布都是不稳定的,要分析这个不稳定场的

变化就必须考虑(7)式中各变量关于时间的改变量。在算法上由 $P_L(z, t)$, $P_S(z, t)$ 及 $S(z, t)$ 算出下一时刻的声场功率分布 $S(z, t + \Delta t)$, 考虑抽运光和斯托克斯光的传播方向相反, 用 $P_L(z - \Delta z, t)$, $P_S(z + \Delta z, t)$ 作为下一时刻耦合前的抽运光和斯托克斯光

的功率值(其中 $\Delta t = n\Delta z/c$), 将其与 $S(z, t + \Delta t)$ 一起代入(6)式的前两式中计算出抽运光和斯托克斯光下一时刻耦合后的功率值, 芯径光纤 SBS 示意图如图 2 所示。这样循环计算即可得到整个光纤内任一点的耦合波功率值。

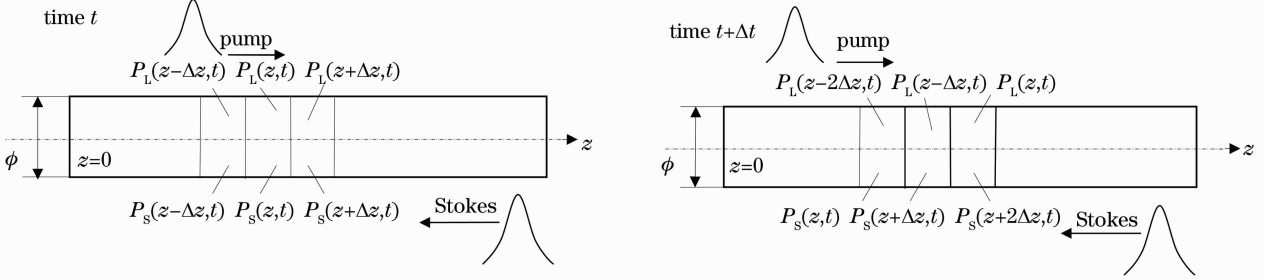


图 2 等芯径光纤 SBS 示意图

Fig. 2 SBS in common fiber with equal core diameter

假设光纤的长度为 L , 将光纤进行 N 等分, 假设在每一小段内的场强分布基本一致。如果知道 t_0 时刻在整个光纤长度内的抽运光、斯托克斯光和声场的分布 $P_L^m(t_0)$, $P_S^m(t_0)$ 和 $S^m(t_0)$, 则可得到在 $t_0 + \Delta t$ 时间的分布为

$$\begin{cases} \bar{P}_L(z, t + \Delta t) = P_L(z, t) + \Delta z \cdot \left\{ \frac{2P_L(z, t)}{r(z)} \frac{\partial r(z)}{\partial z} - [P_L(z, t)P_S(z, t)]^{1/2} S(z, t) \right\} \\ \bar{P}_S(z, t + \Delta t) = P_S(z, t) + \Delta z \cdot \left\{ \frac{2P_S(z, t)}{r(z)} \frac{\partial r(z)}{\partial z} - [P_L(z, t)P_S(z, t)]^{1/2} S(z, t) \right\}, \\ \bar{S}(t + \Delta t) = S(t) + \Delta z \cdot \left\{ \frac{1}{2\tau_B} \left\{ g \frac{[P_L(z, t)P_S(z, t)]^{1/2}}{\pi r^2(z)} - S(t) \right\} \right\} \end{cases} \quad (8)$$

式中上横线表示计算值。光在光纤中传播抽运光、斯托克斯光和声场还需满足下述变化规律:

$$\begin{cases} P_L^{m+1}(t + \Delta t) = \bar{P}_L^m(t + \Delta t) \\ P_S^{m+1}(t + \Delta t) = \bar{P}_S^m(t + \Delta t), \\ S^m(t + \Delta t) = \bar{S}^m(t + \Delta t) \end{cases} \quad (9)$$

除此之外还需考虑到, 在没有抽运光之前, 光纤内存在的斯托克斯场是由自发散射产生的, 这个值很小。如果假设初始的斯托克斯场和声场为零, 这样利用(9)式进行迭加的结果永远是零。因此将斯托克斯光分成两部分: 一部分是在弱抽运时的 P_{S0} , 满足 $P_{S0} = \gamma_0 P_L$, 另一部分是达到阈值后的受激散射 P_{SS} , 可通过(9)式来计算。于是(9)式可写成:

$$\begin{cases} \bar{P}_L(z, t + \Delta t) = P_L(z, t) + \Delta z \cdot \left\{ \frac{2P_L(z, t)}{r(z)} \frac{\partial r(z)}{\partial z} - \{P_L(z, t)[P_{S0}(z, t) + P_{SS}(z, t)]\}^{1/2} S(z, t) \right\} \\ \bar{P}_S(z, t + \Delta t) = P_S(z, t) + \Delta z \cdot \left\{ \frac{2P_S(z, t)}{r(z)} \frac{\partial r(z)}{\partial z} - \{P_L(z, t)[P_{S0}(z, t) + P_{SS}(z, t)]\}^{1/2} S(z, t) \right\} \\ \bar{S}(t + \Delta t) = S(t) + \Delta z \cdot \left\{ \frac{1}{2\tau_B} \left\{ g \frac{\{P_L(z, t)[P_{S0}(z, t) + P_{SS}(z, t)]\}^{1/2}}{\pi r^2(z)} - S(t) \right\} \right\} \end{cases} \quad (10)$$

通过(10)式方法就能够完整地计算整个光纤中的光场和声场的分布。同时, 对光纤入射端面的抽运光和斯托克斯光进行时间积分就可以得到抽运能量和斯托克斯光能量, 二者的商就是 SBS 反射率。在入射端面 and 出射端面, 抽运光和斯托克斯光的光强时间曲线也能得到。

4 数值模拟结果

4.1 等芯径光纤中的数值模拟结果

在进行锥度光纤数值计算前, 先对等芯径光纤中的 SBS 散射做简单的计算, 用以验证模型的正确性, 并与锥度光纤中的 SBS 进行对比。

当抽运脉冲的能量从零增大到阈值以上时, 将

会观察到沿抽运光原路返回的斯托克斯光脉冲,如图3中虚线所示。数值模拟中所用的参数为:布里渊增益系数 $g=5 \text{ cm/GW}$,声子寿命 $\tau=3.9 \text{ ns}$,脉冲宽度为 12 ns ,光纤长度为 10 m ,光纤的直径为 1 mm ,抽运脉冲能量为 100 mJ 。

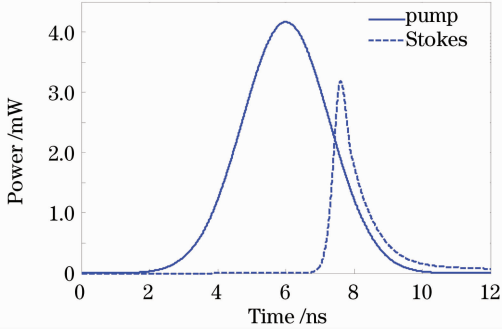


图3 等芯径光纤中SBS的数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation of SBS in common fiber with equal core diameter

从图3可以看出,反射回的斯托克斯光比抽运光的脉宽小,并具有很陡的上升峰。当抽运功率密度超过SBS的阈值以后,随着抽运能量的增大,斯托克斯光的波形和脉宽都会产生变化,能量反射率急剧增大,并很快达到饱和。

图4给出了SBS反射率在不同芯径条件下的变化。SBS反射率与芯径呈反比关系。小芯径光纤能获得较高的SBS反射率。但是小芯径的光纤其损伤阈值较低,不符合工程应用。同时也能看出SBS阈值和芯径的关系,小芯径光纤的SBS阈值较低,随着芯径的增大,SBS的阈值上升。

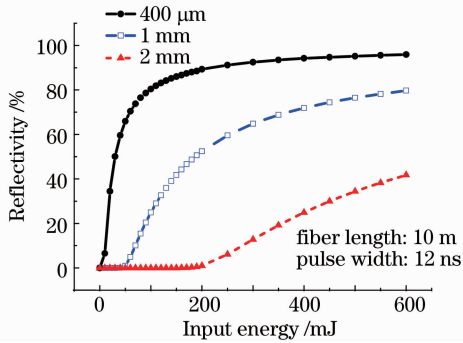


图4 不同芯径下SBS反射率随抽运能量的变化

Fig. 4 Dependency of the SBS reflectivity and pump energy with different radii

光纤的长度对SBS的反射率也会产生影响,随着光纤长度的增加,反射率也会随之增加且趋向饱和,当光纤长度增大到一定值后,反射率不再变化,如图5所示。同样也能看出SBS阈值与光纤长度成反比,短光纤具有较高的SBS阈值,长光纤在小

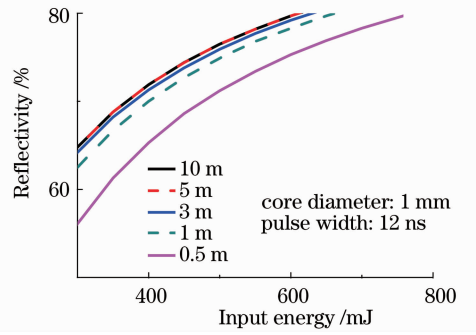


图5 不同光纤长度下SBS反射率的变化

Fig. 5 Dependency of the SBS reflectivity and pump energy with different fiber lengths

入射能量的时候更易发生SBS。

图6给出了抽运光脉宽对反射率变化的影响,脉冲宽度越宽,越容易得到较高的SBS反射率。同样也能看出宽脉冲输入更易在小能量输入时发生SBS,短脉冲输入的SBS阈值较高。

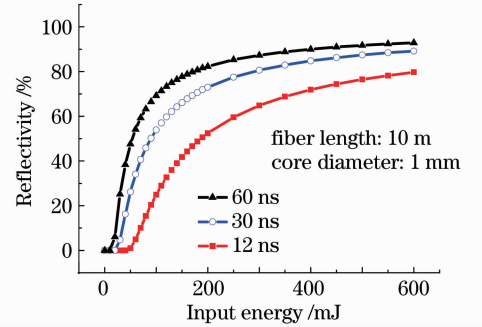


图6 抽运光脉宽不同时反射率的变化

Fig. 6 Dependency of the SBS reflectivity and pump energy with different pulse widths

4.2 锥度光纤中的数值模拟结果

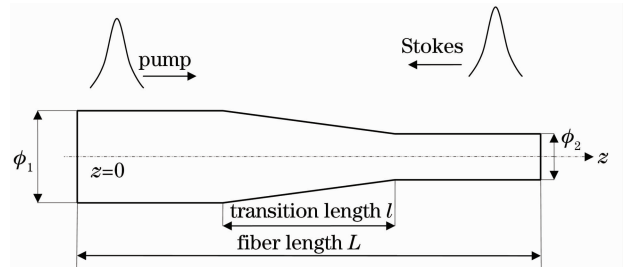


图7 锥度光纤中SBS示意图

Fig. 7 SBS in the tapered fiber

4.2.1 与实验对比

数值模拟中所用的参数与图1中实验相同:布里渊增益系数 $g=5 \text{ cm/GW}$,声子寿命 $\tau=3.9 \text{ ns}$,光纤长度为 3 m 。锥度光纤的芯径为 $\phi_1=1000 \mu\text{m}$, $\phi_2=400 \mu\text{m}$,过渡区长度为 $l=0.5 \text{ m}$,入射端到过渡区长度为 1 m 。数值模拟结果与实验测得数据基本符

合,在输入 40 mJ,脉宽 24 ns 时获得 73% 的最高反射率。

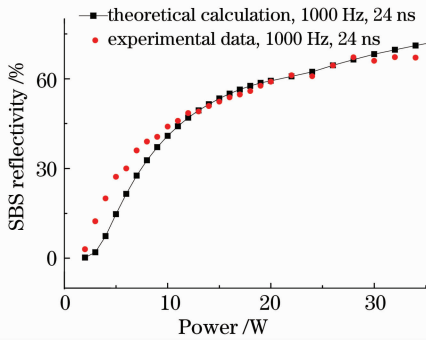


图 8 实验测得数据与实验相同参数下数值模拟的结果
Fig. 8 Results of experiment and numerical simulation with the same parameters

4.2.2 影响 SBS 反射率的参数

与等芯径光纤相比,锥度光纤的入射端的芯径可以比较大,这样损伤阈值能提高,提高入射抽运光的最大能量;小芯径及尾纤能够保证获得有效的 SBS 反射。对比等芯径光纤和锥度光纤中的 SBS 情况,如图 9 所示,锥度光纤明显能够获得更大的 SBS 反射能量。

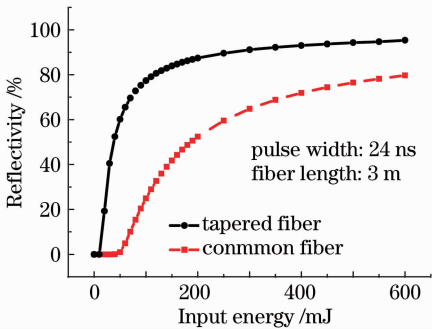


图 9 普通光纤和锥度光纤中 SBS 反射率的对比
Fig. 9 Comparison of the SBS reflectivity in common fiber and tapered fiber

1) SBS 反射率与光纤总长的关系。保持锥度光纤的芯径不变,仅改变光纤的总长,可以得到 SBS 反射率在不同光纤总长时的变化如图 10 所示。可以看出,锥度光纤的总长的增长对 SBS 反射率的影响与等芯径光纤一致,随着光纤长度的增长 SBS 反射率增大,但是当增长到一定值时,SBS 的反射率趋于稳定。

2) SBS 反射率与光纤锥度的关系。保持锥度光纤芯径从 $400 \sim 1000 \mu\text{m}$ 不变,改变过渡区的长度,即改变锥度光纤锥度的变化率,得到图 11。过渡区的减小能使 SBS 反射率得到提高,即锥度光纤锥度区变化越大,SBS 反射率越高。

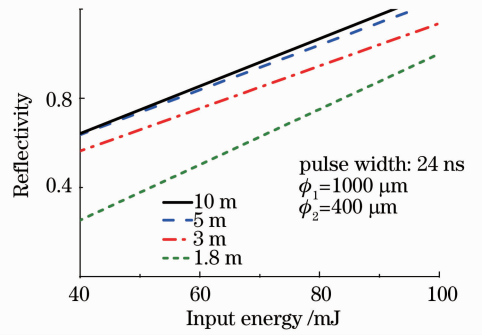


图 10 不同总长的锥度光纤中 SBS 反射率与输入能量的关系

Fig. 10 Dependency of the SBS reflectivity and pump energy with different fiber lengths in tapered fiber respectively

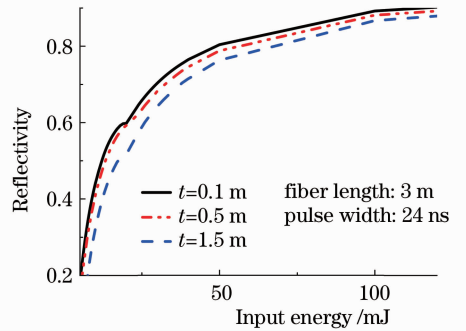


图 11 不同过渡区总长的锥度光纤 SBS 反射率

Fig. 11 Dependency of the SBS reflectivity and pump energy with different lengths of transition regions in tapered fiber

3) SBS 反射率与光纤芯径差的关系:保持光纤的总长及过渡区长度不变,在锥度光纤两端芯径大小改变情况下得到 SBS 反射率与注入能量的关系如图 12 所示。锥度光纤两端芯径差越大,SBS 的反射率越大且有较显著的影响。在高能量情况下,最高 SBS 反射率趋于一个极限值。

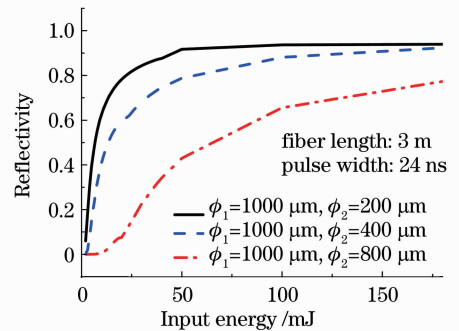


图 12 锥度光纤两端芯径不同大小对 SBS 反射率的影响
Fig. 12 Dependency of the SBS reflectivity and pump energy with different radii of both ends in tapered fiber

4) SBS 反射率与输入激光脉宽的关系:保持光纤的总长 3 m 不变,过渡区长度 0.5 m,输入端至过渡区的长度为 1 m,光纤两端的芯径分别为 $\phi_1 = 1000 \mu\text{m}$, $\phi_2 = 400 \mu\text{m}$,仅仅改变输入脉宽,可得到 SBS 反射率与输入激光脉宽的关系如图 13 所示。类似于等芯径光纤,更长的输入脉冲更易获得较高的 SBS 反射率,同时阈值也比短输入脉宽低。

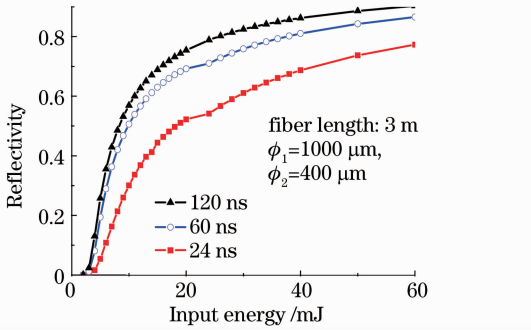


图 13 不同脉宽对锥度光纤中 SBS 反射率的影响

Fig. 13 Dependency of the SBS reflectivity and pump energy with different pulse widths in tapered fiber

4.2.3 极限情况下锥度光纤中的 SBS

在极限情况下,可以拉出如图 14 所示的锥度光纤。比较 3 种光纤中 SBS 的情况如图 15 所示,模拟中所用参数 $\phi_1 = 1000 \mu\text{m}$, $\phi_2 = 400 \mu\text{m}$,布里渊增益系数 $g = 5 \text{ cm/GW}$,声子寿命 $\tau = 3.9 \text{ ns}$,光纤长

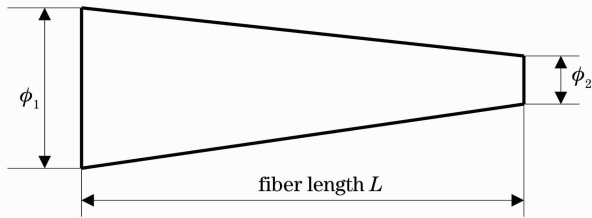


图 14 锥度光纤的极限情况

Fig. 14 Tapered fiber in extreme case

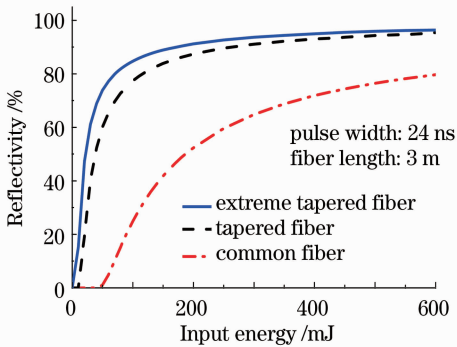


图 15 3 种光纤中 SBS 情况的对比

Fig. 15 Compare of the SBS reflectivity with three different kinds of fiber

度为 3 m。图 14 所示的锥度光纤比图 7 中所示的锥度光纤能够获得更大的 SBS 反射率,且有着更低的阈值。

此种光纤可以看作是图 7 中锥度光纤的极限情况,入射端到过渡区的距离减为 0,且过渡区为整个光纤总长。若增大两端芯径的差值,SBS 反射率还能获得提高。如果在光纤尾部加上一段较长的且与直径相匹配的尾纤,经模拟能获得更高的 SBS 反射率,如图 16 所示。这种情况就是经过优化后得到的最佳的光纤结构和参数。在输入功率为其他要求的情况下,也可以通过以上方法进行优化,得到最佳的结构和参数。

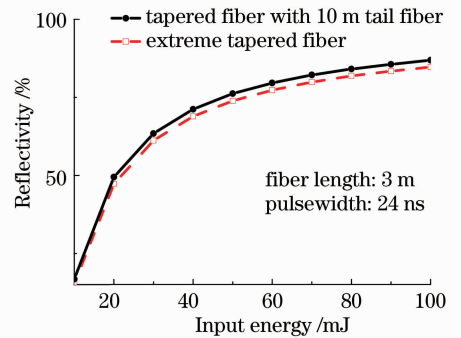


图 16 加上尾纤后 SBS 反射率的变化

Fig. 16 SBS reflectivity with and without tail fiber

5 结 论

从 SBS 的瞬态波动方程出发,建立模型,数值模拟研究了光纤中各参数对 SBS 反射率的影响。锥度光纤较普通光纤能获得更高的 SBS 反射率。SBS 反射率会随着光纤总长的增加而逐渐增加,最后趋于饱和;光纤锥度增大和光纤两端芯径差增大也能使 SBS 反射率提高,后者对 SBS 反射率的影响更为显著。输入激光脉宽也与 SBS 反射率成正比关系。最后还提出了一种极限情况下的锥度光纤加尾纤的组合,能够获得更大的 SBS 反射率。以上结论为实验获得更高的 SBS 反射能量提供了理论依据。相位共轭镜的损伤阈值与入射口径及重复频率有关,入射口径的增大使得损伤阈值提高而重复频率的升高将降低损伤阈值,这对于实现带固体相位共轭镜的大能量 MOPA 系统有重要意义。

参 考 文 献

- 1 E. P. Ippen, R. H. Stolen. Stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(11): 539~541
- 2 R. g. Harrison, D. Yu. Lasers, Physics, Systems and Techniques [M]. Swtland: SOSSP publicaton, 1983
- 3 Andrey Kobyakov, Michael Sauer, Dipak Chowdhury.

- Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, **2**: 1~59
- 4 Ding Yingchun, Lü Zhiwei, Han Songwei *et al.*. Development for the phase conjugated MOPA systems based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Laser Journal*, 2001, **22**(2): 1~5
丁迎春, 吕志伟, 韩松巍等. 发展中的受激布里渊散射相位共轭 MOPA 系统[J]. 激光杂志, 2001, **22**(2): 1~5
- 5 Liu Li, Lü Zhiwei, Li Zhengjia. Application of SBS phase conjugation technique in high power laser MOPA system [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2): 119~122
刘 莉, 吕志伟, 李正佳. SBS 相位共轭技术在强激光振荡系统上的应用[J]. 激光技术, 2005, **29**(2): 119~122
- 6 Zhu Chengyu, Lü Zhiwei, He Weiming *et al.*. Solid SBS media and entirely solidification of the SBS phase-conjugation mirrors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(3): 65~68
朱成禹, 吕志伟, 何伟明等. 固体 SBS 介质与 SBS 相位共轭镜的全固化[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(3): 65~68
- 7 Ge Chuanwen, Xue Mogen, Luo Xiaolin *et al.*. Broad-band Cr:LiSAF stimulated Brillouin scattering phase-conjugation laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1918~1922
葛传文, 薛模根, 罗晓琳等. 宽线宽 Cr:LiSAF 受激布里渊散射相位共轭激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 1918~1922
- 8 Feng Yuntong, Du Songtao, Yang Yan *et al.*. All-fiber laser based on LD pulse-modulated MOPA architecture [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1932~1936
冯云彤, 杜松涛, 杨 燕等. 基于 LD 脉冲调制的全光纤 MOPA 结构激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 1932~1936
- 9 Jiao Lei, Song Yuejiang, Zhang Xuping. Four-wave-mixing enhanced multi-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0214007
焦 磊, 宋跃江, 张旭苹. 四波混频增强多波长布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0214007
- 10 Chen Jun, Zhou Tao. Analysis of stimulated Brillouin scattering in combined multi-mode optical fiber by numerical solution [C]. *SPIE*, 2002, **4926**: 67~74
- 11 Zhou Tao, Chen Jun, Tang Chun *et al.*. Fiber phase-conjugator in four-pass MOPA system with high repetition rate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 441~444
周 涛, 陈 军, 唐 淳等. LD 抽运高重复频率四通放大 MOPA 系统中的光纤相位共轭研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(4): 441~444
- 12 Zhou Tao, Chen Jun, Tang Chun *et al.*. Experimental study on optical tapered fiber phase conjugator in MOPA system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 471~474
周 涛, 陈 军, 唐 淳等. 主振荡功率放大器中锥度光纤相位共轭镜的实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 471~474
- 13 Wang Sha, Chen Jun, Tong Lixin *et al.*. New combined phase conjugator consisting of fused silicon rod and optical fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1212~1216
汪 莎, 陈 军, 童立新等. 熔石英棒和光纤构成的新型复合型相位共轭镜[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1212~1216
- 14 Zhao Zhigang, Cui Lingling, Tong Lixin *et al.*. All-solid-state high pulse repetition rate high pulse energy single-longitudinal-mode MOPA laser system with solid-state phase conjugating mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 2949~2953
赵智刚, 崔玲玲, 童立新等. 带固体相位共轭镜的全固态脉冲抽运高重复频率大能量单纵模 MOPA 激光器[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 2949~2953
- 15 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang *et al.*. Investigation on characteristics of large aperture tapered fiber phase conjugation mirror for kHz high energy MOPA laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402007
赵智刚, 董延涛, 潘孙强等. 用于千赫兹高能量 MOPA 激光系统的大口径锥度光纤相位共轭镜特性研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 0402007
- 16 Tong Lixin, Cui Lingling, Xie Gang *et al.*. Experimental investigation on characteristics of tapered fiber phase-conjugator with high repetition rate and high pulse energy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2361~2365
童立新, 崔玲玲, 谢 刚等. 高重复频率高能量条件下锥度光纤相位共轭器特性的实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2361~2365
- 17 J. Munch, R. F. Wuerker, M. J. Lefebvre. Interaction length for optical phase conjugation by stimulated Brillouin scattering: an experimental investigation [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(15): 3099~3105
- 18 J. J. Ottusch, D. A. Rockwell. Stimulated Brillouin scattering phase-conjugation fidelity fluctuations [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6): 369~371
- 19 C. B. Dane, W. A. Neuman, L. A. Hackel. Pulse-shape dependence of stimulated-Brillouin-scattering phase-conjugation fidelity for high input energies[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(18): 1271~1273
- 20 Chen Jun. Optics Phase Conjugation and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 1999. 113~120
陈 军. 光学相位共轭及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 113~120
- 21 Zhou Tao. Theoretical and Experimental Research on Optical Fiber Phase-Conjugator [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. 44~46
周 涛. 光纤相位共轭技术的理论与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. 44~46
- 22 Wang Zhong, Li Libo, Chen Zemin *et al.*. Theoretical and experimental study on mode controlling of a large-mode-area fiber laser with fiber tapering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 399~403
王 中, 李立波, 陈泽民等. 光纤拉锥法控制光纤激光器模式的理论与实验研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(s1): 399~403

栏目编辑: 宋梅梅