

# 光纤中受激 Brillouin 散射动态弛豫 振荡特性及其抑制方法<sup>\*</sup>

尹经禅<sup>†</sup> 肖晓晟 杨昌喜

(清华大学精密仪器与机械学系 精密测试技术与仪器国家重点实验室 北京 100084)

(2009 年 1 月 6 日收到 2009 年 3 月 31 日收到修改稿)

为了避免在高功率光纤放大器和光纤相位共轭镜等实际应用中因受激 Brillouin 散射(SBS)造成的光纤损伤,根据描述 SBS 动态弛豫振荡特性的振幅耦合方程,利用有限差分的数值模拟方法研究了光纤中 SBS 的动态弛豫振荡特性,并对其抑制进行了初步探讨,得到了光纤中 SBS 弛豫振荡在不同的脉冲上升时间的时空三维图,同时利用方波和脉冲光作抽运光进行了相应实验研究,实验结果与理论模拟结果符合很好,结果表明,增大抽运光脉冲上升时间可以有效抑制因 SBS 而产生的弛豫振荡,进而避免因之造成的光纤损伤。

关键词:受激 Brillouin 散射,动态弛豫振荡特性,有限差分法

PACC:4265C,4281D

## 1. 引言

受激 Brillouin 散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)是非线性光学中一种基本的非线性效应,是光波、声波、散射波相互作用的一个物理过程,具有阈值低、效率高等特点。从 1964 年发现 SBS 起,人们已经对其进行了大量的研究<sup>[1-9]</sup>和应用。例如,目前人们已经将其应用于光纤相位共轭镜<sup>[2]</sup>、脉冲压缩<sup>[3,10]</sup>、激光限幅<sup>[4]</sup>、SBS 激光器<sup>[5]</sup>、SBS 放大器、光纤传感<sup>[6,11]</sup>、海洋探测等诸多领域。但在另外一些工程环境下,SBS 却起着严重的破坏作用。例如,SBS 在光纤通信系统中严重限制了信号功率的提升,在光纤激光器、光纤放大器中使连续光输出变得不稳定而出现脉冲输出。因此,如何抑制 SBS 成了人们非常关注的一个问题。目前,人们采用的很多理论和实验分析都是从 SBS 阈值曲线和 SBS 增益谱进行分析<sup>[8]</sup>。除了抑制 SBS 稳态时的反射功率外,抑制 SBS 动态弛豫振荡过程中产生的瞬时高功率在一些实际应用中也是一项重要的研究内容,而往往光纤端面的损伤就与此有关。早在 1972 年,Ippe 等<sup>[7]</sup>在观察光纤中的 SBS 时就发现 SBS 的反向 Stokes 输出波可

能会具有很高的瞬时功率(远远超过输入波的功率),当此功率足够强时会造成光纤的永久损伤。同时还观察到输入功率大于 SBS 阈值但远小于光纤材料损伤功率时,因为 SBS 的作用也会造成光纤端面的偶尔烧毁<sup>[7,12]</sup>。郭少锋等<sup>[9]</sup>在研究体材料中 SBS 效应时也观察到了 SBS 造成的材料损伤。因此,研究光纤中 SBS 动态弛豫振荡特性对抑制光损伤等方面具有很重要的实际意义。本文分析了光纤中 SBS 动态弛豫振荡特性并提出了有效抑制方法。利用有限差分数值模拟方法<sup>[13]</sup>给出了不同脉冲上升时间下光纤中 SBS 动态特性时空三维图,通过对比发现脉冲上升时间越长 SBS 弛豫振荡特性越弱,同时利用方波和脉冲光作为抽运光进行了相应实验,实验结果与理论模拟结果符合很好。结果表明,增大抽运光脉冲上升时间能有效抑制 SBS 的弛豫振荡,对防止 SBS 致光纤损伤起到积极作用。

## 2. 基本理论

### 2.1. 模型介绍

自发 Brillouin 散射过程由自发噪声引起,而 SBS

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 60878007)资助的课题。

<sup>†</sup> E-mail: yinjc04@mails.tsinghua.edu.cn

则是在抽运光较强时的一种受激过程. 如图 1 所示, 可将 SBS 简化成一个放大器模型进行分析. 假设一个很小的 Stokes 种子信号  $A_s$  由光纤(光纤长度为  $L$ ) 端面  $z = 0$  处注入, 抽运波  $A_L$  由光纤末端  $z = L$  处反向注入, 由于 SBS 的作用会在光纤末端产生由注入种子信号放大的 Stokes 波.

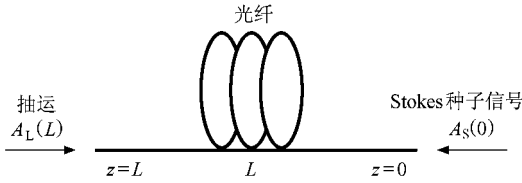


图 1 光纤中 SBS 放大原理图

### 2.2. 理论公式

为简化 SBS 动态弛豫振荡特性的分析, 做如下近似 (1) 忽略光纤横向光场变化 (2) 考虑慢变包络近似 (3) 设起始声场不存在, Stokes 波输出由种子信号放大而得 (4) 满足 SBS 中抽运波、Stokes 波和声波三者之间的相位匹配从而具有最大的 SBS 增益. 在上述近似下, SBS 可由如下振幅耦合方程描述<sup>[14]</sup> (文献 14 考虑的是真空中的光速而在此处考虑光纤中的实际光速):

$$\left(\frac{1}{\nu_g} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\right) A_s = -g_1 A_L Q + \frac{\alpha_s}{2} A_s, \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{\nu_g} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z}\right) A_L = g_1 A_s Q + \frac{\alpha_L}{2} A_L, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \Gamma\right) Q = -g_2 A_L A_s, \quad (3)$$

其中  $A_L$ ,  $A_s$  和  $Q$  分别表示抽运波, Stokes 波和声波的振幅, 它们都对入射到光纤端面的抽运波振幅峰值作了归一化. SBS 增益谱带宽  $\Gamma = 1/(2\tau_p)$ ,  $\tau_p$  为声子寿命,  $g_1$  和  $g_2$  为归一化电场和声波场间的耦合系数<sup>[15]</sup>,  $\nu_g$  为光波在光纤中的传播速度,  $\nu_g = c/n$ ,  $c$  为真空中的光速,  $n$  为光纤的折射率,  $\alpha_s$  和  $\alpha_L$  分别为 Stokes 波和抽运波的光纤损耗. 把 (3) 式代入 (1) 和 (2) 式可得

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{\nu_g} \frac{\partial}{\partial t}\right) A_s &= \frac{g\Gamma}{2} A_L \int_0^t A_L A_s e^{-\Gamma(t-\tau)} d\tau \\ &\quad + \frac{\alpha_s}{2} A_s, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{1}{\nu_g} \frac{\partial}{\partial t}\right) A_L = \frac{g\Gamma}{2} A_s \int_0^t A_L A_s e^{-\Gamma(t-\tau)} d\tau$$

$$- \frac{\alpha_L}{2} A_L, \quad (5)$$

其中  $g = 2g_1 g_2 / \Gamma$ . 通过 (4) 和 (5) 式构成的耦合方程组可以描述 Stokes 波和抽运波在光纤中的动态演变.

### 2.3. 数值处理方法

对于方程 (4) 和 (5), 利用 Simpson 积分近似, 在时域上采用隐式有限差分, 在空间上采用后向差分格式<sup>[14]</sup>, 可以得到

$$\begin{aligned} A_{Sj}^{m+1} - A_{Sj-1}^{m+1} + \frac{\Delta z}{c\Delta t} (A_{Sj}^{m+1} - A_{Sj}^m) \\ = G' [ |A_{Lj}^{m+1}|^2 A_{Sj}^{m+1} + p_j^m A_{Lj}^{m+1} ], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A_{Lj}^{m+1} - A_{Lj-1}^{m+1} - \frac{\Delta z}{c\Delta t} (A_{Lj}^{m+1} - A_{Lj}^m) \\ = G' [ |A_{Sj}^{m+1}|^2 A_{Lj}^{m+1} + p_j^m A_{Sj}^{m+1} ]. \end{aligned} \quad (7)$$

其中,

$$p_j^m = (p_j^{m-1} + 2A_{Lj}^m A_{Sj}^m) e^{-\Gamma\Delta t},$$

$$p_j^0 = A_{Lj}^0 A_{Sj}^0 e^{-\Gamma\Delta t},$$

$$G' = g\Gamma\Delta t\Delta z/4,$$

时间  $t = m\Delta t$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ , 空间长度  $z = j\Delta z$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ . 将 (6) 式中的  $|A_{Lj}^{m+1}|^2$  和 (7) 式中的  $|A_{Sj}^{m+1}|^2$  分别用  $|A_{Lj}^m|^2$  和  $|A_{Sj}^m|^2$  代替进行线性化, 最后可以得到如下的矩阵方程:

$$AL + S = v_1, \quad (8)$$

$$BS + CL = v_2. \quad (9)$$

这里,

$$S = \begin{bmatrix} A_{S1}^{m+1} \\ A_{S2}^{m+1} \\ \vdots \\ A_{SJ}^{m+1} \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} A_{L0}^{m+1} \\ A_{L1}^{m+1} \\ \vdots \\ A_{LJ-1}^{m+1} \end{bmatrix},$$

$$v_1 = \frac{q}{G'} \begin{bmatrix} \frac{A_{L1}^m}{p_1^m} \\ \vdots \\ \frac{A_{L2}^m}{p_2^m} \\ \vdots \\ \frac{A_{Lj}^m}{p_j^m} - \frac{a + G' |A_{Sj}^m|^2}{qp_j^m} A_{Lj}^{m+1} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v}_2 = & -\frac{q}{G'} \begin{bmatrix} \frac{A_{S1}^m}{p_1^m} + \frac{G'A_{L1}^m}{a + G'|A_{S1}^m|^2} + \frac{1}{qp_1^m} A_{S0}^{m+1} \\ \frac{A_{S2}^m}{p_2^m} \\ \vdots \\ \frac{A_{SJ}^m}{p_J^m} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{A} = & \begin{bmatrix} \frac{1}{G'p_1^m} & \frac{a + G'|A_{S1}^m|^2}{G'p_1^m} & \cdots & 0 \\ & \frac{1}{G'p_2^m} & \frac{a + G'|A_{S2}^m|^2}{G'p_2^m} & \\ & \ddots & \ddots & \frac{a + G'|A_{SJ-1}^m|^2}{G'p_{J-1}^m} \\ 0 & & \cdots & \frac{1}{G'p_J^m} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{B} = & \begin{bmatrix} \frac{b + G'|A_{L1}^m|^2}{G'p_1^m} - \frac{G'p_1^m}{a + G'|A_{S1}^m|^2} & \cdots & 0 \\ & \frac{1}{G'p_J^m} & \frac{b + G'|A_{L2}^m|^2}{G'p_2^m} - \frac{G'p_2^m}{a + G'|A_{S2}^m|^2} & \\ & & \ddots & \ddots \\ 0 & & \cdots & \frac{1}{G'p_J^m} \frac{b + G'|A_{LJ}^m|^2}{G'p_J^m} - \frac{G'p_J^m}{a + G'|A_{SJ}^m|^2} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{C} = & \begin{bmatrix} \frac{1}{a + G'|A_{S1}^m|^2} & \cdots & 0 \\ & \frac{1}{a + G'|A_{S2}^m|^2} & \\ & \ddots & \\ 0 & & \cdots & \frac{1}{a + G'|A_{SJ}^m|^2} \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{\Delta z}{v_g \Delta t}, \\
 a &= -1 + q, \\
 b &= -1 - q.
 \end{aligned}$$

通过(8)和(9)式即可由  $m$  时刻光纤上 Stokes 波和抽运波的光强分布  $S$  和  $L$  求得  $m+1$  时刻的  $S$  和  $L$ , 这样 SBS 的动态过程就可以由此解出.

### 3. 数值模拟及分析

在实际 SBS 发生过程中抽运波为连续光或脉冲光, 连续光可以视作脉冲光的特殊情形即脉冲宽度当作无限大. 已有文献对 SBS 动态过程进行过一些

理论和实验分析<sup>[14,16,17]</sup>. 由于脉冲上升时间是影响 SBS 动态弛豫振荡特性的关键因素, 本文就抽运光上升时间对 SBS 动态弛豫振荡的影响进行详细分析. 上升时间趋于零时则成为一种阶跃状态, 增大上升时间时, 抽运功率随时间缓慢上升. 在这两种情形下, 利用以上介绍的理论模型和数值计算方法进行相应分析. 采用的参数如下: 光纤长度  $L = 10$  m, 光纤折射率  $n = 1.45$ , Stokes 波的光纤损耗  $\alpha_s = 0.2$  dB/km, 抽运波的光纤损耗  $\alpha_L = 0.2$  dB/km, 连续抽运波归一化功率  $|A_L|^2 = 1$ , 连续 Stokes 种子光归一化功率  $|A_S|^2 = 0.0001$ , SBS 增益系数  $G = gL = 37$ , 声子寿命  $\tau_p = 1$  ns, 空间步长  $\Delta z = 0.1$  m, 时间步长  $\Delta t = 1$  ns, 时间范围  $0 \sim 1.9 \mu\text{s}$ , 真空中光速  $c = 3 \times$

$10^8$  m/s. 在这里引入了一个很小的连续 Stokes 种子光进行分析, 分析中假设脉冲宽度很大, 暂不考虑脉冲下降时间.

### 3.1. 阶跃脉冲抽运的 SBS 动态特性

阶跃脉冲抽运时的 SBS, 输入抽运波和 Stokes 波种子信号(图 2(a)), 据此计算得到图 2(b) 的输出 Stokes 波和抽运波. 分析图 2(b) 发现, 因强烈的 SBS 作用, 稳态时大部分抽运波功率转移到了与其反向传播的 Stokes 波中, 图 2 所示的相对抽运功率由输入时的 1 变为输出时的 0.2, 相应地 Stokes 功率由输入时的 0.0001 变为输出时的 0.8, SBS 功率转换效率(定义为 Stokes 的稳态输出功率与抽运输入功率

之比)高达 80%. 在 SBS 整个过程开始的一小段时间内, 抽运波和 Stokes 波的功率交换表现出明显的动态弛豫振荡. 这是由于参与 SBS 过程的声子具有一定的寿命而造成的, 也可以理解为抽运波与 Stokes 波之间的相互作用存在一定的响应时间(或称为延时). 考虑抽运消耗, 此延时会导致抽运波和 Stokes 波功率超过相应的稳定值, 甚至会产生很高的瞬时功率, 形成高功率尖峰脉冲, 进而可能会对光纤造成永久性的光损伤. 图 2(b) 的最大瞬时功率已达到输入抽运功率的 2.281 倍, 在高功率抽运时此反向的瞬时高功率很可能损坏光纤端面. 特别是在利用 SBS 效应实现光纤相位共轭镜或光束合成器时, 此危害甚为严重.

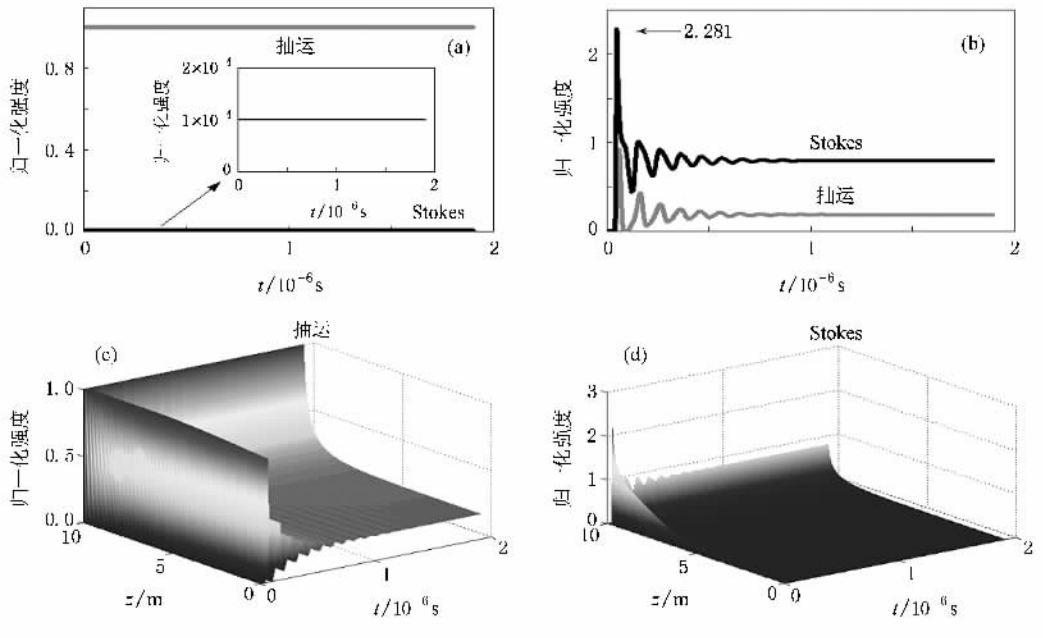


图 2 光纤中阶跃脉冲抽运的 SBS 动态弛豫振荡特性 (a) 抽运波和 Stokes 波输入 (b) 抽运波和 Stokes 波输出, (c) 抽运波时间空间三维图 (d) Stokes 波时间空间三维图

图 2(c) 和 (d) 分别描述了抽运波和 Stokes 波的光强在光纤上各点随时间和空间的变化, 在此时空三维图中, SBS 的动态变化得到了清晰直观的表现. 一方面, 在光纤长度上任意一点  $z$  处平行于时间  $t$  轴作一切片即可得到光纤该位置处 Stokes 波和抽运波光强随时间变化的曲线. 另一方面, 在任意时间点  $t$  处平行于  $z$  轴作一切片即可得到某一时刻 Stokes 波和抽运波在光纤长度上的分布. 由图 2(c) 和 (d)

可以得出以下结果: 在瞬态过程中, SBS 的弛豫振荡主要发生在抽运波开始注入的一小段时间内, 随着时间的增加, SBS 逐渐趋于稳态; 达到稳态时, SBS 过程主要发生在抽运波注入端处的一小段光纤内.

抽运波和 Stokes 波的最大瞬时功率还与光纤长度有很大的关系, 光纤越长 SBS 效应越明显, Stokes 波的最大瞬时功率也越大, 如图 3 所示.

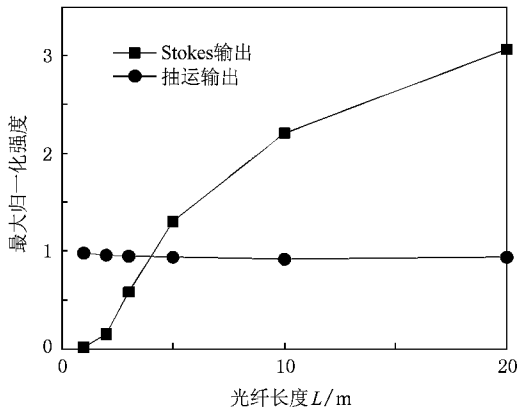


图 3 SBS 过程中抽运波和 Stokes 波输出最大瞬时功率与光纤长度的关系

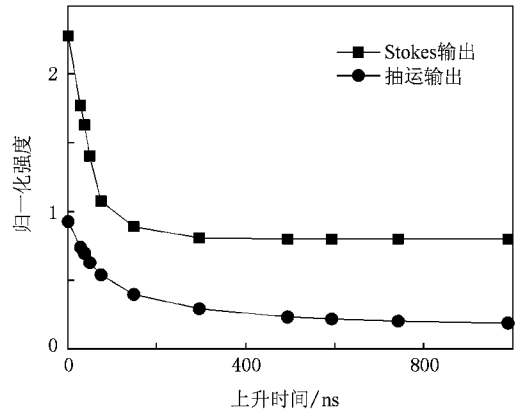


图 5 Stokes 波和抽运波最大瞬时输出光强随抽运脉冲上升时间的变化关系

### 3.2. 缓变脉冲抽运的 SBS 动态特性

图 2 中 SBS 的弛豫振荡能产生很高的瞬时功率,此瞬时功率甚至会在一小段时间内远大于抽运波的输入功率,因而可能对光纤造成永久性的光损伤.此瞬时高峰值功率与光纤长度有关(图 3),可以通过减小光纤长度来进行加以抑制.但此方法有诸多弊处,如稳态 SBS 增益降低等.此外,我们还可以增大脉冲上升时间抑制弛豫振荡,进而避免瞬时高功率的出现以保证高功率激光下光纤的安全.

用  $A_L = 1 - e^{-t/t_0}$  ( $t \geq 0$ ) 示例表示输入抽运波的

缓变上升振幅,随着时间的增大逐渐达到稳态连续抽运输入.取  $t_0 = 250$  ns 时可以得到如图 4(a)所示的输入抽运波和 Stokes 波种子信号.定义输入抽运波的上升时间为其强度达到稳定输入强度的 90% 所需的时间,由图 4(a)可知上升时间为 743 ns.在图 4(a)的输入条件下,可得到图 4(b)所示的输出 Stokes 波和抽运波强度曲线.与图 2(b)比较可以看到,输出波的弛豫振荡大大减弱,最大瞬时功率降低.这为避免高功率条件下 SBS 致光纤损伤起到了积极的作用.图 4(c)和(d)给出了 Stokes 波和抽运波光强变化的时空三维图,可以看到弛豫振荡几乎消失.

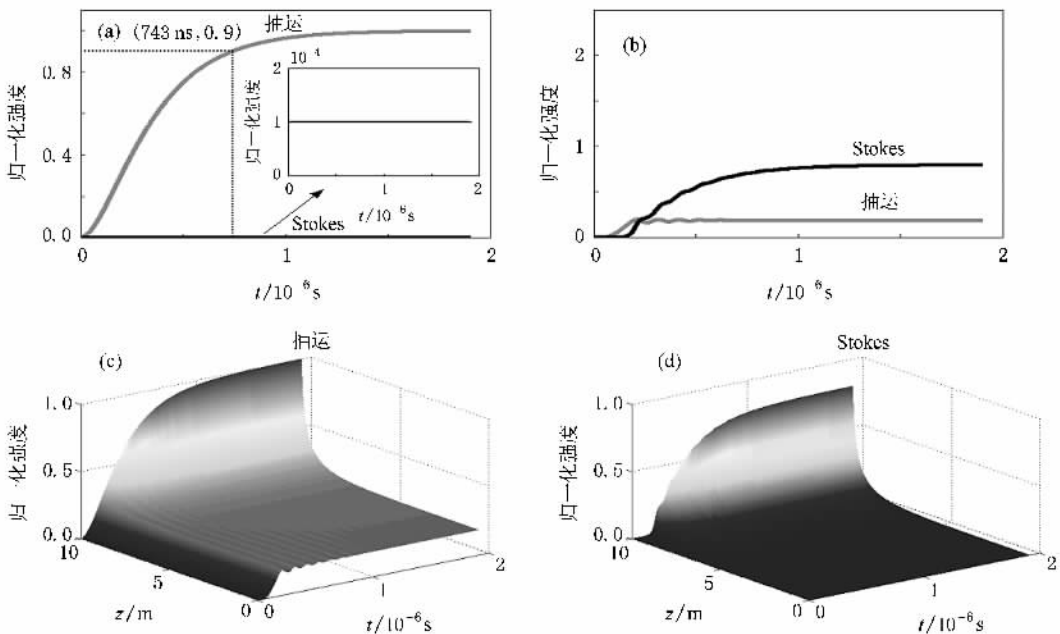


图 4 光纤中缓变脉冲抽运的 SBS 动态弛豫振荡特性 (a)抽运和 Stokes 波输入 (b)抽运和 Stokes 波输出 (c)抽运波时间空间三维图 (d)Stokes 波时间空间三维图

图 5 为输出的 Stokes 波最大功率和抽运波最大功率随脉冲上升时间的变化关系.图 5 说明,上升时间越大越容易抑制 SBS 中的弛豫振荡,从而使 Stokes 波的最大瞬时输出功率不超过稳态时的输出功率水平,因而可以避免光纤中因 SBS 瞬时高峰值功率所致光损伤.

### 4. 实验及结果

以上对光纤中 SBS 动态弛豫振荡特性及其抑制进行了理论研究,下面我们从实验上进行具体研究.

#### 4.1. 实验装置

为实验研究不同脉冲上升时间对光纤中 SBS 动

态弛豫振荡的影响,采用如图 6 所示的实验装置.波长为 1550 nm 的连续激光被掺 Er 光纤放大器 (EDFA)放大后通过振幅调制器被来自信号发生器的脉冲调制,产生的脉冲光经由环行器注入长度为 1 km 的高非线性光纤 (HNLf)作为 SBS 抽运光,发生 SBS 后相对入射抽运光反向传输的 Stokes 光再次经由环行器输出,然后经过可调衰减器衰减后由 THORLABS 公司生产的 D400FC 型光电探测器探测,所得的 SBS 动态弛豫振荡波形由 Agilent 公司生产的 infiniium DSO80204B 型高速示波器(带宽为 2 GHz,采样率为  $4 \times 10^{10}$ )进行显示,相似地可用该示波器观察发生 SBS 后的透射波形,同时可用光谱仪在 HNLf 反射端监测 SBS 光谱.

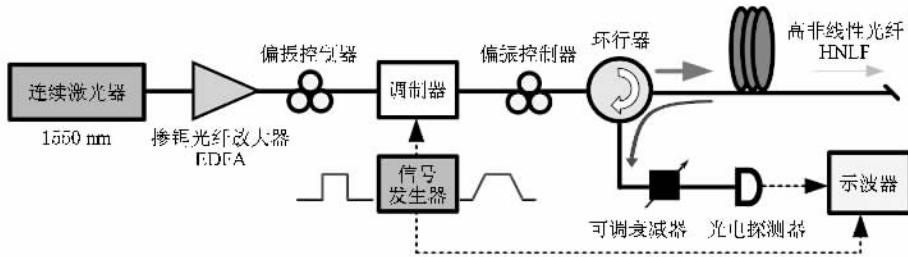


图 6 SBS 动态弛豫振荡特性研究实验装置示意图

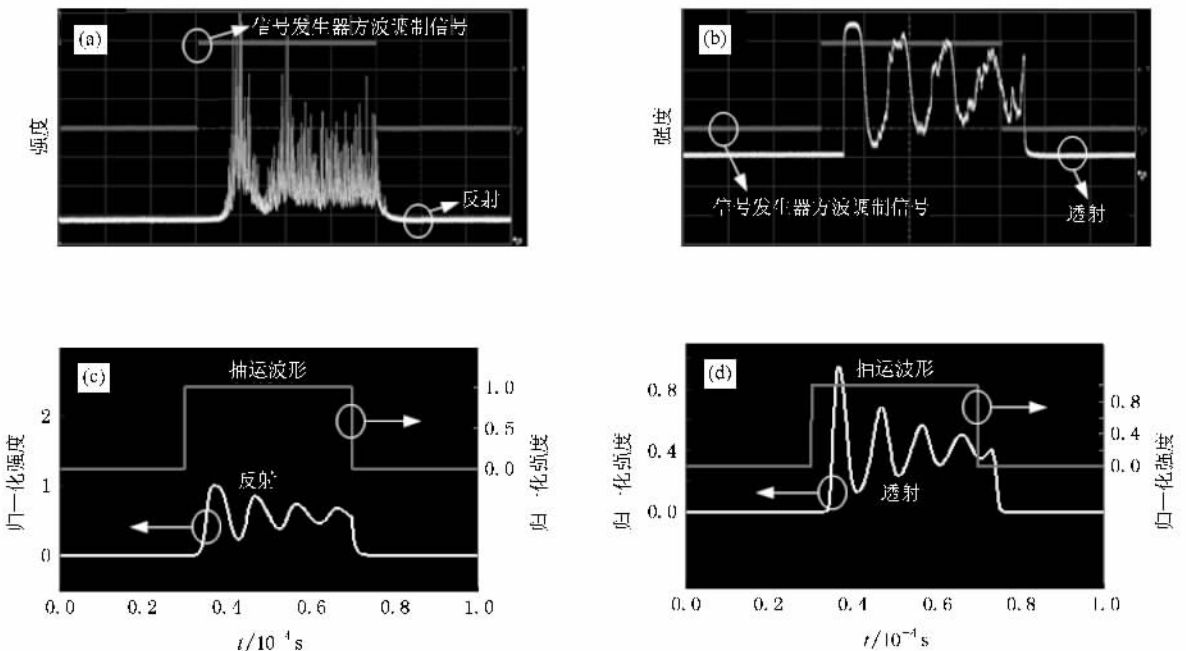


图 7 SBS 动态弛豫振荡实验波形与根据实验参数的模拟波形 (a) 实验所得反射 SBS 动态弛豫振荡波形 (b) 实验所得透射 SBS 动态弛豫振荡波形 (c) 模拟反射 SBS 动态弛豫振荡波形 (d) 模拟透射 SBS 动态弛豫振荡波形

## 4.2. 实验结果与分析

实验中,我们首先观察上升时间较小的脉冲的 SBS 动态弛豫振荡波形,然后增大脉冲上升时间观察 SBS 动态弛豫振荡波形的变化,同时采用实验参数进行理论模拟并与实验结果进行比较.我们把上升时间定义为脉冲幅值由 10% 上升为 90% 所经过的时间.为区分不同上升时间的脉冲,我们采用信号发生器上占空比为 40%、重复频率为 10 kHz 的方波作为上升时间较小(约 10 ns)的脉冲,采用占空比为 60%、重复频率同为 10 kHz 上升时间为 13  $\mu$ s 的脉冲作为上升时间较大的脉冲.方波和脉冲的幅值、重复频率、幅值持续时间完全相同,以方便在 SBS 动态弛豫振荡中二者的比较.脉冲相对方波不同之处在于具有 13  $\mu$ s 的上升和下降时间,这也将是导致 SBS 动态弛豫振荡不同的关键.

在利用方波观察 SBS 动态弛豫振荡的实验中,调节可调衰减器衰减量为其最小值 2 dB,逐渐增大 EDFA 的放大输出功率,使入射 HNLF 的抽运功率达到 SBS 阈值,这时 HNLF 反射端开始有 Stokes 波反射,继续增大抽运功率,在 HNLF 的反射端和透射端便会观察到明显的 SBS 动态弛豫振荡波形,如图 7 所示.图 7(a)给出了 HNLF 反射端 SBS 动态弛豫振荡波形,可以看出较为明显的周期为 10  $\mu$ s 的弛豫振荡特征,但同时含有自发 SBS 固有的噪声成分.为了更为清楚地反映 SBS 动态弛豫振荡特性,我们观察了对应的 HNLF 透射端的波形,如图 7(b)所示.从图 7(b)可以看出,在整个方波波形内以 10  $\mu$ s 为周期的 SBS 动态弛豫振荡非常明显,每个方波内含有 4 个振荡周期.

我们对长度为 1 km 的 HNLF 中 SBS 动态弛豫振荡特性在实验所给方波条件下进行了数值模拟,得到了反射和透射的 SBS 动态弛豫振荡理论模拟波形,分别如图 7(c)、(d)所示.图 7(c)的理论所得 SBS 反射波形与图 7(a)的实验所得 SBS 反射波形具有较好的一致性.同时还可以看出,图 7(d)的理论所得 SBS 透射波形与图 7(b)的实验所得 SBS 透射波形也具有较好的一致性.

实验中保证各光纤连接端面的清洁以避免在激光功率较大时因光纤端面的污渍而导致端面被烧毁.在 SBS 动态弛豫振荡波形观察过程中,我们逐渐增大 EDFA 的输出功率相应地增大 HNLF 的 SBS 抽运功率,但 SBS 抽运功率始终没有超过 100 mW,当

实验中功率调到一定值时发现反射的 SBS 功率突然减弱, SBS 瞬时高功率导致端面烧毁.尽量使用比较小的 SBS 抽运功率(超过 SBS 阈值功率)进行方波与脉冲下 SBS 动态弛豫振荡的对比实验.实验中固定可调衰减器的衰减量为 10 dB,仅改变 SBS 抽运波形以便进行对比实验研究.当方波和脉冲抽运功率分别为 13.85, 14.89 dBm 时,都会有 SBS 现象产生.方波抽运入射光谱和 SBS 反射光谱以及脉冲抽运入射光谱和反射光谱如图 8 所示,可以看出 SBS 频移为 9.7 GHz.由于 EDFA 的输出功率相同只是脉冲较方波的半高全宽稍宽,故脉冲输入光谱几乎与方波输入光谱重合只是功率略大,同样脉冲反射光谱几乎与方波反射光谱重合只是功率略大些.

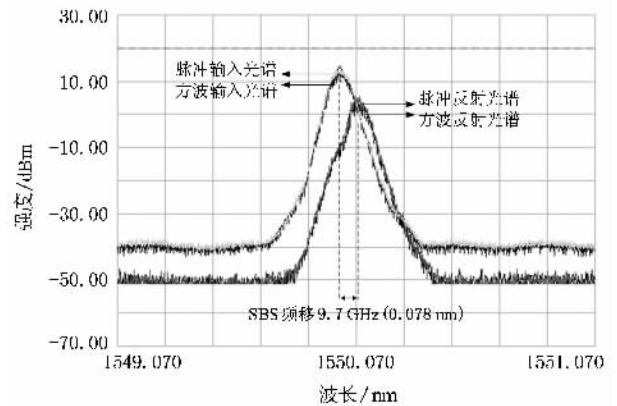


图 8 发生 SBS 时的光谱图

当使用方波作为 SBS 抽运波时,抽运波形、反射波形和透射波形分别如图 9(a)、(b)、(c)所示;当使用脉冲作为 SBS 抽运波时,抽运波形、反射波形和透射波形分别如图 9(d)、(e)、(f)所示.比较图 9(d)和 (a)可以看出,脉冲具有明显较大的上升时间,按照理论的分析可知脉冲时的 SBS 动态弛豫振荡特性会较方波时弱,实验所得方波反射波形(图 9(b))和脉冲反射波形(图 9(e))的对比正说明了这一点.由于图 9 实验采用了较图 7 实验更低的 SBS 抽运功率,而且图 9(b)和(e)中的波形都有很大的噪声成分,所以体现不出非常明显的动态弛豫振荡特性,但图 9(b)较图 9(e)在上升沿处具有明显的高瞬时功率.在方波的输出波形(图 9(c))和脉冲的输出波形(图 9(f))中,则能明显比较出两种情况下不同的 SBS 动态弛豫振荡特性.方波输出波形(图 9(c))中的 SBS 动态弛豫振荡非常明显,弛豫振荡周期为 10  $\mu$ s,而且在上升沿处具有最大的瞬时功率.图 9(f)的动态弛豫振荡相对弱了很多,甚至几乎看不出明显的动

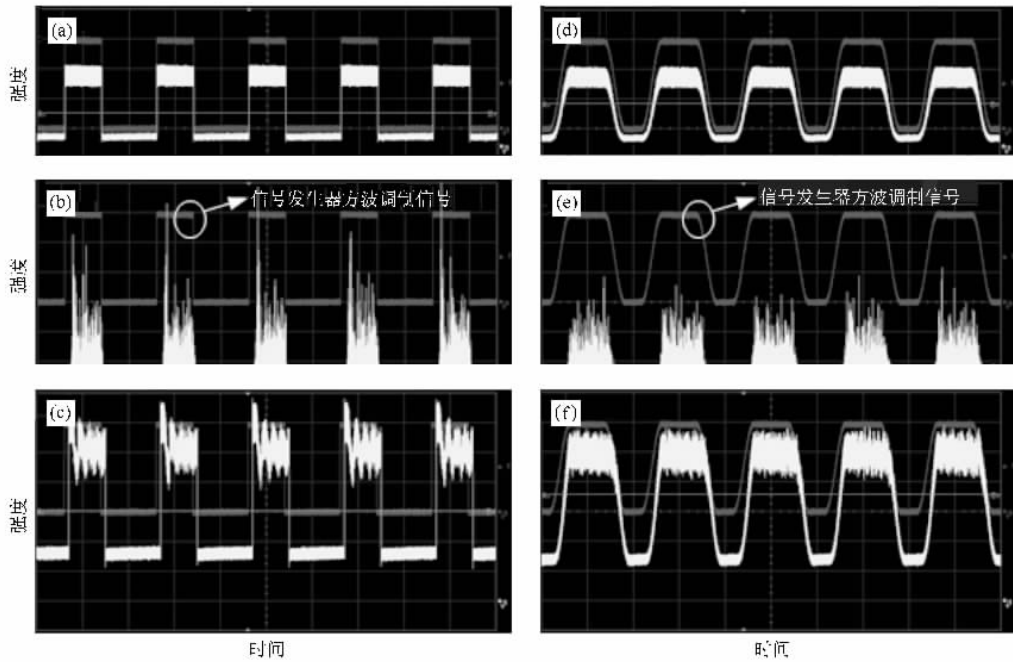


图9 方波和脉冲抽运下的SBS动态弛豫振荡(实验波形)(a)(b)(c)分别对应方波作为SBS抽运波时的抽运波形、反射波形、透射波形(d)(e)(f)分别对应脉冲作为SBS抽运波时的抽运波形、反射波形、透射波形

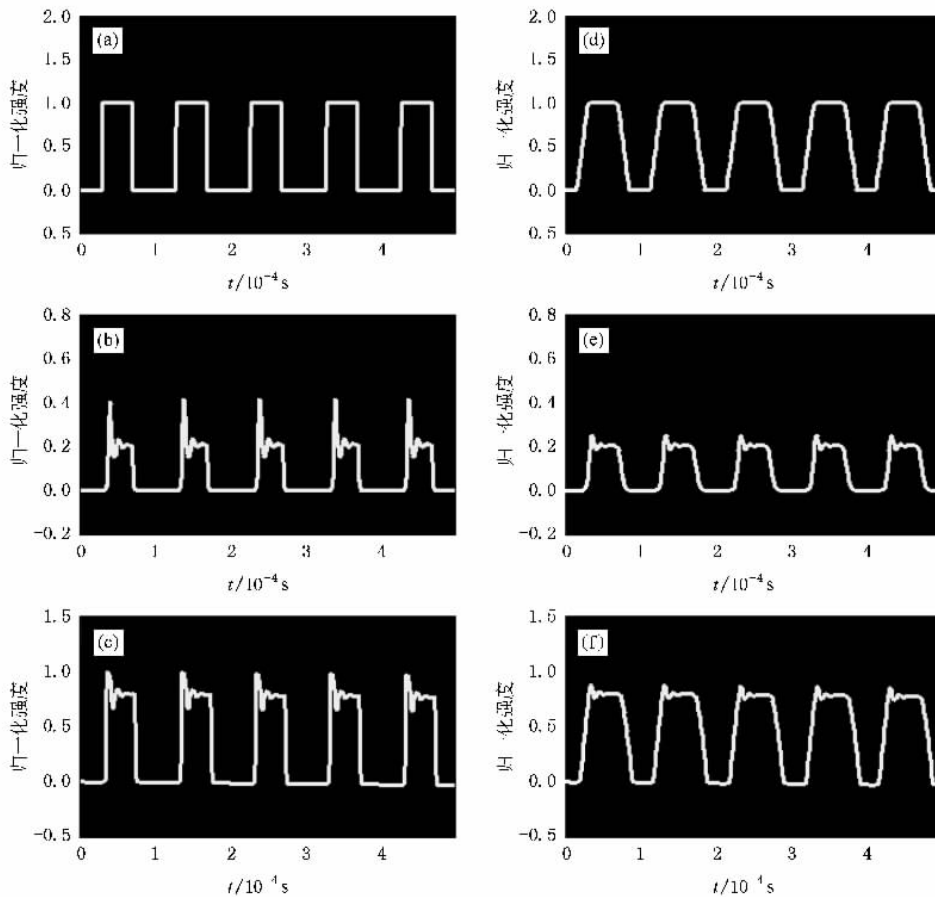


图10 方波和脉冲抽运下的SBS动态弛豫振荡(根据实验参数的模拟波形)(a)(b)(c)分别对应方波作为SBS抽运波时的抽运波形、反射波形、透射波形(d)(e)(f)分别对应脉冲作为SBS抽运波时的抽运波形、反射波形、透射波形



态弛豫振荡特征,而且脉冲上升沿处也不再具有高的瞬时功率.

我们同时根据具体的实验条件选取合适参数对图 9 的实验波形进行了理论模拟(不考虑自发 Brillouin 散射噪声成分),所得模拟波形如图 10 所示.

图 10(a)–(f)分别与图 9(a)–(f)一一对应.计算中所有光功率相对 SBS 抽运光功率归一化,脉冲的上升时间取  $15 \mu\text{s}$ ,光纤长度取 1 km.由图 10(b)的方波反射波形和图 10(e)的脉冲反射波形对比可以发现,上升时间越短,SBS 动态弛豫振荡特性越强而且具有很高的瞬时功率,由图 10(c)和图 10(f)的对比可以得出同样的结论.图 10 的理论模拟波形和图 9 的实验波形符合得较好(在图 10(b)和(e)中没考

虑实验中的反射端光功率衰减).

## 5. 结 论

通过对光纤中 SBS 动态过程的数值模拟与详细讨论,可以看出动态弛豫振荡是 SBS 过程的基本特征.在高功率激光抽运下,SBS 弛豫振荡所产生的瞬时峰值功率可能会对光纤造成永久的光损伤,因此本文就怎样尽可能避免此瞬时高功率亦即抑制弛豫振荡进行了初步理论和实验研究.通过对比短上升时间脉冲和长上升时间脉冲抽运两种 SBS 抽运方式,发现后者能有效抑制 SBS 过程中的动态弛豫振荡.这为怎样抑制光纤中 SBS 致光损伤提供了有益的指导.

- 
- [ 1 ] Agrawal G P 2001 *Nonlinear Fiber Optics* (3rd Ed.) (San Diego: Academic)
- [ 2 ] Wang S, Chen J, Tong L X, Gao Q S, Liu C, Tang C 2007 *Opt. Lett.* **32** 2686
- [ 3 ] Wang C, Li Z W, Lin D Y, Wang X H, Zhao X Y, Tang X Z, Zhang H F, Shan Y S 2002 *High Power Laser Particle Beams* **14** 713 (in Chinese) [王超、吕志伟、林殿阳、王晓慧、赵晓彦、汤秀章、张海峰、单玉生 2002 强激光与粒子束 **14** 713]
- [ 4 ] Lü Y L, Dong Y K, Li 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]
- [ 5 ] Qin Q, Mori A, Ohishi Y 2007 *Opt. Lett.* **32** 2179
- [ 6 ] Nikles M, Théménaz L, Robert P A 1996 *Opt. Lett.* **21** 758
- [ 7 ] Ippen E P, Stolen R H 1972 *Appl. Phys. Lett.* **21** 539
- [ 8 ] Kovalev V I, Harrison R G 2006 *Opt. Lett.* **31** 161
- [ 9 ] Guo S F, Lin W X, Lu Q S, Chen S, Lin Z Z, Deng S Y, Zhu Y X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2218 (in Chinese) [郭少锋、林文雄、陆启生、陈燧、林宗志、邓少永、朱永祥 2007 物理学报 **56** 2218]
- [ 10 ] Damzen M J, Hutchinson M H R 1983 *Opt. Lett.* **8** 313
- [ 11 ] Hotate K, Tanaka M 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 179
- [ 12 ] Ye C G, Yan P, Huang L, Liu Q, Gong M L 2007 *Laser Phys. Lett.* **4** 376
- [ 13 ] Hall C A, Porsching T A 1990 *Numerical Study of Transient Stimulated Brillouin Scattering* (Englewood Cliffs: Prentice Hall)
- [ 14 ] Raijun C, Morton K, Joel F 1992 *J. Appl. Phys.* **71** 4653
- [ 15 ] Walmsley I A, Raymer M G 1983 *Phys. Rev. Lett.* **50** 962
- [ 16 ] Bar-Joseph I, Friesem A A 1985 *J. Opt. Soc. Am. B* **2** 1606
- [ 17 ] Kovalev V I, Harrison R G, Scott A M 2000 *Opt. Commun.* **185** 18

# Dynamics of relaxation oscillation caused by stimulated Brillouin scattering in optical fiber and its suppression<sup>\*</sup>

Yin Jing-Chan<sup>†</sup> Xiao Xiao-Sheng Yang Chang-Xi

( *State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments ,Department of Precision Instruments and Mechanology ,Tsinghua University ,Beijing 100084 ,China* )

( Received 6 January 2009 ; revised manuscript received 31 March 2009 )

## Abstract

In order to further study the dynamics of relaxation oscillation during stimulated Brillouin scattering ( SBS ) and to avoid optical damage caused by SBS under high power lasers in applications such as fiber amplifier and fiber phase conjugate mirror , etc. ,the dynamics of relaxation oscillation during SBS in fibers are studied on the basis of the SBS coupled amplitude equations using numerical simulations of finite difference methods . Meanwhile ,we propose a method to suppress the relaxation oscillation . For different rise time of SBS pump pulse ,the temporal and spatial variation of intensities of pump and Stokes waves is plotted as three-dimensional figures . The corresponding experiments have been conducted and the experimental results agree well with the theoretical results . From the experiments and numerical calculations it can be concluded that ,by increasing the rise time of SBS pump pulse the relaxation oscillation can be suppressed effectively and the optical damage caused by SBS can be avoided consequently .

**Keywords** : stimulated Brillouin scattering , dynamics of relaxation oscillation , finite difference method

**PACC** : 4265C , 4281D

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60878007 ).

<sup>†</sup> E-mail : yinjc04@mails . tsinghua . edu . cn