

# 反射光中 Stokes 成分对受激布里渊散射过程的影响\*

郭少锋 陆启生 程湘爱 周 萍 邓少永 银 燕

(国防科技大学理学院,长沙 410073)

(2003 年 7 月 24 日收到,2003 年 9 月 24 日收到修改稿)

区别于传统的受激布里渊散射(SBS)发生器和放大器,提出了一种新型的SBS模型:自供种子光模型(self-stokes seeding, SSS).通过对抽运光波形函数的傅里叶变换得到了Stokes成分在抽运光中所占的比例,即Stokes能量比.考虑SSS效应,数值求解了SSS耦合波方程组,得到了SBS反射率的时间演变形式.理论研究发现,当抽运光正入射到平板样品上时,反射光中的Stokes成分极大地促进了SBS起振过程,其结果相当于反向注入一定强度的种子光,而Stokes能量比的大小决定了SBS过程起振时间的长短.

关键词:光学材料,受激布里渊散射,傅里叶分析,斯托克斯种子光

PACC:4265C,4270C

## 1. 引 言

受激布里渊散射(SBS)是指入射的强激光场与介质的电致伸缩产生的弹性声波场之间相互作用的一种非线性过程,它揭示了强光与物质相互作用的新形式,加深了人们对强光子场和强声子场(强声波场)作用过程的理解,通过开展这一效应的研究,不但为可调谐相干光的产生提供一个新途径,而且可以作为一种有效的手段来研究各种介质的声学动力学特性和弹性力学特性,多年来SBS一直是理论工作和实验工作的研究热点<sup>[1-3]</sup>.SBS问题依传统分为两种类型<sup>[4]</sup>,如果只有抽运光注入介质,那么Stokes光将在介质中通过热激发噪声波引发的自发布里渊散射而产生并被不断放大,我们把这种情况描述为噪声起振,即所谓的SBS发生器情形;如果在抽运光作用的同时,还持续作用着一束与抽运光反向的Stokes光,把这种情形叫做Stokes种子光辅助起振,即所谓的SBS放大器情形.传统的分类忽略了抽运光与其反射光的相互作用,实际上,当高功率抽运激光正入射到布里渊池窗片上或者固体样品的后表面上时(这种模型适用于许多工程和实验情形),反射光沿抽运光的光路反向传播,按照傅里叶分析,反射光里必包含着具有Stokes种子光频率的

振荡成分,这些成分和抽运光相互作用,形成一种特殊的SBS振荡过程,称之为自供种子光模型(SSS)过程.下面将通过抽运光的傅里叶分析以及耦合波方程组的数值求解对SSS过程进行细致的研究.

## 2. 准单色光的傅里叶分析

单色性是激光输出最显著的特性之一,但是理想的单色光场实际是不存在的,按照傅里叶光学理论,只要是持续时间有限的光振动,就不可能是单频的,而是具有一定的频谱分布.用于受激散射过程研究的高功率激光,脉宽一般为纳秒级,时间波形为方波或近高斯波.为了便于理论分析和数值计算,本文中的脉冲波形为方波.

假设激光脉冲中心频率为 $\nu_0$ ,脉宽为 $\tau$ ,以幅值 $A_0$ 等幅振动,则其光振动形式为

$$A(t) = \begin{cases} A_0 \exp(j2\pi\nu_0 t), & |t| \leq \tau/2, \\ 0, & \text{other,} \end{cases} \quad (1)$$

由傅里叶变换,可求得其频谱分布为<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned} F(\nu) &= A_0 \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \exp[j2\pi(\nu_0 - \nu)t] dt \\ &= A_0 \tau \operatorname{sinc}[(\nu_0 - \nu)\tau], \end{aligned} \quad (2)$$

而

$$f(\nu) = |F(\nu)|^2 / A_0^2 \tau = \tau \operatorname{sinc}^2[(\nu_0 - \nu)\tau] \quad (3)$$

\* 国家高技术研究发展计划(批准号 2002AA824091)资助的课题.

决定了傅里叶成分的能量分布. 图 1 所示为  $\tau = 2\text{ns}$  时的能谱.

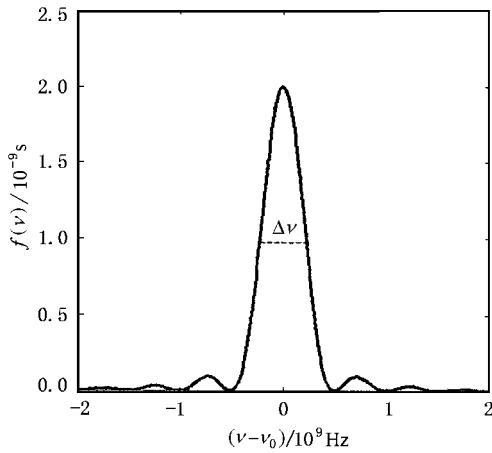


图 1 矩形激光脉冲的傅里叶分析 ( $\tau = 2\text{ns}$ )

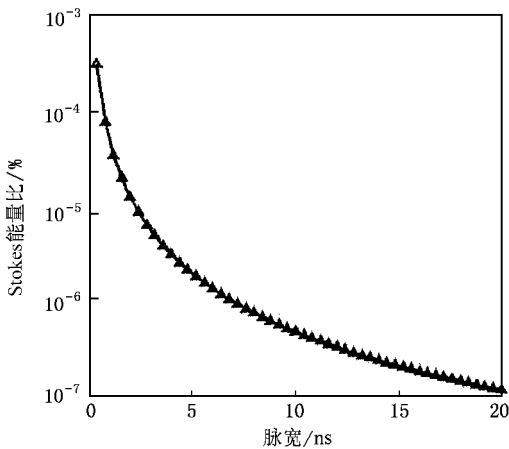


图 2 矩形脉冲 Stokes 能量比与脉宽的关系

我们引入 Stokes 能量比  $R_{st}$ , 用以表征一束激光中位于 Stokes 频率  $\nu_s$  处, 频宽为  $\Delta\nu \sim 1/\tau$  的成分在总能量中占有的比率, 定义为

$$R_{st} = \int_{\nu_s - \Delta\nu}^{\nu_s + \Delta\nu} \text{sinc}^2[(\nu_0 - \nu)\tau] d\nu. \quad (4)$$

这样, 如果假设后表面处抽运光的强度为  $L_{pl}$ , 则其反射光中包含的 Stokes 种子光的强度为  $L_{sl} = R_{ref} R_{st} I_{pl}$ , 其中  $R_{ref}$  为样品后表面对抽运光的反射率.

取 Stokes 频移  $\nu_0 - \nu_s = 5.0 \times 10^{10} \text{Hz}$ , 计算得到的 Stokes 能量比  $R_{st}$  与脉冲宽度的关系曲线如图 2 所示. 随着脉宽自 1ns 变化到 20ns,  $R_{st}$  自  $10^{-3}$  量级降至  $10^{-7}$  量级. 这说明在准单色的抽运光中, 应该存在一定比例的 Stokes 成分, 当该部分 Stokes 光经

反射与抽运光在布里渊介质中充分重叠时, 理论上讲, 应该能够对 SBS 过程产生一定的影响.

### 3. SSS 控制方程组及其边界

SBS 是入射的强激光场与介质的电致伸缩产生的弹性声波场耦合的结果, 理论分析的过程是首先导出在光波电场作用下, 介质由电致伸缩而产生的弹性声波场传播方程, 以及介质内存在电致伸缩运动时光波的传播方程, 然后求解光波(单光束或双谐波光场)与弹性波的耦合波方程, 得出弹性波的时空分布.

描述后向 SBS 过程的三波耦合非线性动力学方程组为<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial A_p(x, t)}{\partial x} + \frac{n}{c} \frac{\partial A_p(x, t)}{\partial t} = \frac{i\gamma k_p}{2\rho_0 n^2} A_s(x, t) A_a(x, t), \quad (5)$$

$$-\frac{\partial A_s(x, t)}{\partial x} + \frac{n}{c} \frac{\partial A_s(x, t)}{\partial t} = \frac{i\gamma k_s}{2\rho_0 n^2} A_a^*(x, t) A_p(x, t), \quad (6)$$

$$\frac{\partial A_a(x, t)}{\partial t} + v_a \frac{\partial A_a(x, t)}{\partial x} + \frac{\alpha_a v_a}{2} A_a(x, t) = \frac{i\varepsilon_0 \gamma k_a}{4v_a} A_s^*(x, t) A_p(x, t) + f(x, t), \quad (7)$$

其中  $A_p$ ,  $A_s$ ,  $A_a$  分别是抽运光, 散射光和声波的缓变振幅,  $k_p$ ,  $k_s$  和  $k_a$  分别为抽运光波, 散射光波和声波的波矢;  $\rho_0$  是没有外界光场时介质的初始密度,  $c$  是真空中光速,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $n$  为介质的折射率,  $\gamma$  为电致伸缩系数;  $v_a$  和  $\alpha_a$  分别为声速和介质对声波的吸收系数;  $f(x, t)$  为 Langevin 噪声源项, 用来表征介质密度的热起伏, 一般认为<sup>[6]</sup>,  $f(x, t)$  是一高斯随机变量, 满足以下关系:

$$f(x, t) = 0,$$

$$f(x, t) f^*(x', t') = Q \delta(x - x') \delta(t - t'), \quad (8)$$

式中  $Q = 2\rho_0 \alpha_a \hbar \Omega (1 + \bar{n}) v_a A$  为噪声强度参量,  $\bar{n} = [\exp(\hbar \Omega / kT) - 1]^{-1}$  为声场中每一模式的平均声子数,  $\Omega$  为声波的圆频率,  $A$  为介质作用区的有效截面面积,  $k$  和  $\hbar$  分别为 Planck 常数 Boltzmann 常数,  $T$  为介质的绝对温度.

对于 SBS 发生器, 问题的边界为

$$A_p|_{x=0} = (I_1 Z_0 / 2n)^{1/2}, \quad A_s|_{x=L} = 0. \quad (9)$$

对于 SBS 放大器问题的边界为

$$A_p|_{x=0} = (I_1 Z_0/2n)^{j/2}, A_s|_{x=L} = (I_2 Z_0/2n)^{j/2}. \quad (10)$$

对于反射光提供 Stokes 种子光的 SSS 情形问题的边界则为

$$A_p|_{x=0} = (I_1 Z_0/2n)^{j/2}, A_s|_{x=L} = (R_{\text{ref}} R_{\text{st}})^{j/2} A_p|_{x=L}. \quad (11)$$

这里假设  $x=0$  为抽运光的入射面,入射强度为  $I_1$ ,样品的厚度为  $L$ ,  $Z_0=377\Omega$  为光场在自由空间的阻抗.右边界处 ( $x=L$ ) 的边界条件决定了 SSS 问题的特殊性,在 SBS 发生器模型中,右边界处 Stokes 光的振幅为零,在放大器模型中,右边界处 Stokes 光的振幅取决于外界注入情况和该处的抽运光强弱没有关系,而在 SSS 模型中,右边界处 Stokes 光的振幅和抽运光的振幅则通过 Stokes 能量比以及几何反射率线性关联在一起,所以 SSS 的边界实际上是含时变化边界.若在 (10) 式中令  $I_2 = R_{\text{ref}} R_{\text{st}} I_1$ ,则在 SBS 的初始阶段,放大器情形和 SSS 情形具有近似相等的边界值,但是随着 SBS 的发展,SSS 情形的边界值逐渐减小,放大器情形的边界值却保持不变.

## 4. 数值模拟方法

本文采用有限差分法求解耦合波方程组及边界条件.考虑到抽运光和声波场沿  $x$  轴正向传播,Stokes 光沿  $x$  轴负向传播,在构造差分格式时对抽运光场和声波场进行前向差分,对 Stokes 光场进行后向差分.耦合波方程组相应的隐式差分格式如下:

$$\left(1 + \frac{nh}{c\tau}\right) (A_p)_k^{j+1} - (A_p)_{k-1}^{j+1} = \frac{nh}{c\tau} (A_p)_k^j + \frac{i\gamma k_p}{2\rho_0 n^2} h (A_s)_k^{j+1} (A_a)_{k-1}^{j+1}, \quad (12)$$

$$\left(1 + \frac{nh}{c\tau}\right) (A_s)_k^{j+1} - (A_s)_{k+1}^{j+1} = \frac{nh}{c\tau} (A_s)_k^j + \frac{i\gamma k_s}{2\rho_0 n^2} h (A_p)_k^{j+1} (A_a^*)_{k+1}^{j+1}, \quad (13)$$

$$\left(1 + \frac{h\alpha_a}{2} + \frac{n}{\tau v_a}\right) (A_a)_{k-1}^{j+1} - (A_a)_{k-1}^{j+1} = \frac{h}{\tau v_a} (A_a)_k^j + \frac{i\epsilon_0 \gamma k_a}{4v_a^2} h (A_p)_k^{j+1} (A_s^*)_{k+1}^{j+1} + \frac{h}{v_a} f_k^{j+1}. \quad (14)$$

SSS 问题边界条件的差分形式为

$$(A_p)_k^{j+1} = (I_1 Z_0/2n)^{j/2}, \quad (15)$$

$$(A_s)_k^{j+1} = (R_{\text{ref}} R_{\text{st}})^{j/2} (A_p)_k^{j+1}, \quad (16)$$

(10)–(14) 式中,  $h$  和  $\tau$  分别为空间步长和时间步长,下标  $k$  代表空间序列,上标  $j$  代表时间序列,  $N$  为空间节点的最大数.我们采用“预测-校正”的方法对上列非线性差分方程组进行求解.第一步,考虑到各波传播的方向,用  $(A_p)_{k-1}^j$ ,  $(A_s)_{k+1}^j$  和  $(A_a)_{k-1}^j$  分别作为  $(A_p)_k^{j+1}$ ,  $(A_s)_k^{j+1}$  和  $(A_a)_k^{j+1}$  的近似值代入方程右端非线性项中的,从而把非线性方程线性化求解之.第二步,将第一步得到的近似解再代入非线性方程组,求解得到校正值.实际计算中,鉴于计算结果在某些区域有很大的空间梯度而在另外一些区域又极为平缓,我们设计了一种变步长的差分格式,把整个研究区域划分为细节段、过渡段和概略段三个部分,其中细节段赋予极小的空间步长  $h_1$ ,而概略段的空间步长  $h_2$  远大于细节段,过渡段的空间步长  $h_3$  起承启作用,从左端的  $h_1$  渐变至右端的  $h_2$ .这样的设计既保证了敏感区域细节凸现,又使计算量控制在可以接受的程度,在实践中取得了很好的效果.在我们的算例中,取  $h_1 = 1\mu\text{m}$ ,  $h_2 = 100\mu\text{m}$ ,  $h_3$  以对数规律渐变.由于我们采用的是隐式差分格式,时间步长的选取与空间步长无关,在保证一定计算精度的前提下,时间步长可以取得相当之大,相比于显式格式,大大缩短了计算时间.以下以光学透明材料中的 SBS 过程为例,设计算例研究 SSS 效应.

## 5. 计算结果及分析

光学透明固体材料中的 SBS 过程受到越来越多的关注<sup>[7,8]</sup>.本文以熔石英玻璃为 SBS 介质,研究在脉冲 YAG 激光作用下,反射光中 Stokes 成分对 SBS 过程的影响.

计算中各参数选取如下:  $\rho_0 = 2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $n = 1.463$ ,  $v_a = 5 \times 10^3 \text{ m/s}$ ,  $\alpha_a = 1.8 \times 10^5 / \text{m}$  (以上参数取自文献[9]),  $k_s \approx k_p = 5.92 \times 10^6 / \text{m}$ ,  $k_a = 1.18 \times 10^7 / \text{m}$ .  $\gamma$  可以从 Lorentz-Lorenz 关系式<sup>[1]</sup>得到,即  $\gamma = (n^2 - 1)(n^2 + 2)/3 \approx 1.84$ ,另选取作用区长度  $L = 1 \text{ cm}$ .设抽运激光的脉宽为  $\tau = 20 \text{ ns}$ ,由(4)式易得  $R_{\text{st}} = 1.2 \times 10^{-7}$ ;由 Fresnel 定律,知  $R_{\text{ref}} = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 \approx 0.035$ .

SSS 反射率是指在抽运光入口处散射光光强与抽运光光强的比值,即

$$R_{\text{sss}} = I_s(0, t) / I_p(0, t), \quad (17)$$

它表征 SBS 过程发展的程度,且是一个易于进行实

验监测的物理量. 本文通过研究  $R_{\text{sbs}}$  的发展特征来认识 SSS 效应, 并为今后的实验设计提供参考.

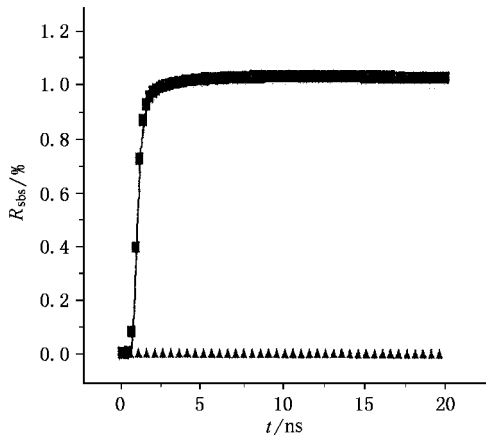


图3 不同 SRS 类型对应的反射率时间曲线 ▲布利渊发生器, ■布利渊放大器, —自供种子光

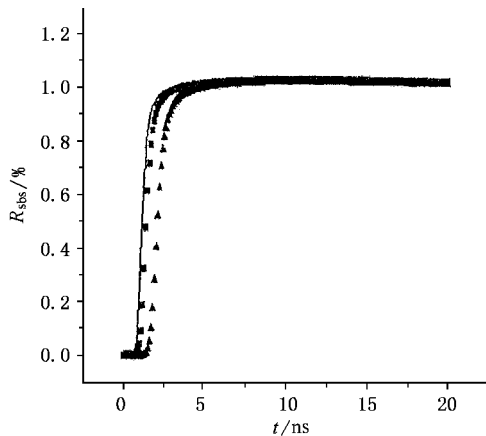


图4 不同 Stokes 能量比对应的反射率时间曲线 ▲ $R_{\text{st}} = 1.0^{-8}$ , ■ $R_{\text{st}} = 1.0^{-6}$ , — $R_{\text{st}} = 1.0^{-4}$

图3 给出了三种不同情形下(发生器、放大器以及 SSS)分别对应的反射率时间曲线. 抽运光的光强取为  $I_1 = 1.0 \times 10^{15} \text{ W/m}^2$ , 为了方便和 SSS 情形比

较 放大器情形下注入的 Stokes 光强设定为  $I_2 = R_{\text{ref}} R_{\text{st}} I_1 = 4.8 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ . 比较图3 中的三条曲线, 我们发现, 发生器型的 SRS 过程尚未在 20ns 的作用时间内充分发展起来, 而其他两种 SRS 过程只需 2ns 就发展到饱和状态, 而且它们对应的反射率时间曲线几乎重合, 这说明 SSS 效应相当于注入强度为  $R_{\text{ref}} R_{\text{st}} I_1$  的 Stokes 种子光.

为了研究  $R_{\text{st}}$  的大小对 SRS 过程的影响, 我们固定其他计算参数不变, 分别取  $R_{\text{st}} = 1.0 \times 10^{-8}$ ,  $1.0 \times 10^{-6}$  和  $1.0 \times 10^{-4}$ , 计算得到的反射率时间曲线如图4 所示. 计算发现,  $R_{\text{st}}$  的大小对 SRS 过程的影响体现在起振所需时间的长短,  $R_{\text{st}}$  改变四个量级, 起振时间相应地提前了约 1ns. 这说明 SRS 过程对  $R_{\text{st}}$  的具体大小并不是非常敏感, 关键是  $R_{\text{st}}$  的存在为 SRS 过程的起振提供了非常有利的种子光源, 从而使受激过程以远快于单纯噪声起振的速度迅速发展起来.

在 Yoshida<sup>[7]</sup> 的实验工作中, 抽运光的脉宽为 18ns, 光斑大小为  $\varnothing 10\text{mm}$ , 在输出 100mJ 能量的情况下, SRS 的能量反射率可达 80%, 而且 SRS 过程是在几个 ns 内充分发展起来的. 我们通过数值模拟(另文发表)工作, 认为单纯由噪声起振是无法实现的, 反射光中的 Stokes 成分应该参与了该过程.

## 6. 结 论

本文在理论上提出了一种新的 SRS 模型, 认为即使在没有外界种子光注入的情况下, 依靠抽运光本身的 Stokes 成分, 仍然可能发生类似 SRS 放大器的行为. 其存在性需要通过设计实验来验证, 实验的基本思想是在抽运光与反射光重合与否两种情况下分别测量 SRS 过程的起振时间, 加以比较. 我们正拟进行该项实验.

- [1] Lü Z W 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 (in Chinese) [吕志伟 2002 物理学报 **51** 1286]
- [2] Ding Y C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2767 (in Chinese) [丁迎春 2002 物理学报 **51** 2767]
- [3] Lü Z W 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1184 (in Chinese) [吕志伟 2003 物理学报 **52** 1184]

- [4] Boyd R W 1992 *Nonlinear Optics* (London: Academic Press Limited) p326
- [5] Yang G G 1991 *Advanced Physical Optics* (Anhui Hefei: NUST press) p17 (in Chinese) [羊国光 1991 高等物理光学(合肥: 中国科学技术大学出版社) 第 17 页]
- [6] Boyd R W and Rzaewski K 1990 *Physical Review A* **42** 5514

- [ 7 ] Yoshida H *et al* 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** L 521
- [ 8 ] Guo S F *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 99 [ in Chinese ] 郭少锋等 2004 物理学报 **53** 99 ]
- [ 9 ] Heiman D , Hamilton D S and Hellwarth R W 1979 *Phys. Rev. B* **19** 6583

## Influence of Stokes component in reflected light on stimulated Brillouin scattering process \*

Guo Shao-Feng Lu Qi-Sheng Cheng Xiang-Ai Zhou Ping Deng Shao-Yong Yin Yan

( *Institute of Science , National University of Defense Technology , Changsha 410073 , China* )

( Received 24 July 2003 ; revised manuscript received 24 September 2003 )

### Abstract

A new stimulated Brillouin scattering ( SBS ) configuration , SSS ( Self Stokes Seeding ) , is presented to describe the influence of Stokes component in a pump light on SBS process . The fast Fourier transform is used to calculate the Stokes energy ratio which denotes the ratio of the energy of Stokes component to that of total pump laser . The coupled SBS equations is solved numerically and the SSS effects is evaluated . The study shows that when the pump laser is reflected normally by the back surface of the flat sample , the Stokes component plays an important role in SBS process , such as decreasing the initiation duration . The larger the Stokes energy ratio is , the shorter the initiation duration is .

**Keywords** : optical materials , SBS , Fourier analysis , Stokes seeding

**PACC** : 4265C , 4270C

---

\* Project supported by the National High Technology Development Program of China ( Grant No.2002AA824091 ) .