

文章编号 1004-924X(2011)02-0487-06

受激布里渊散射中 Stokes 光的 反 Stokes 散射与慢光效应

朱永祥^{1,2}, 陆启生²

(1. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024;
2. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为研究受激布里渊散射(SBS)慢光效应的物理机制,研究了 Stokes 光与布里渊声场之间的反 Stokes 散射,以及它与 SBS 慢光之间的内在联系。理论上证明了在 SBS 中除了泵浦光外,Stokes 散射光与布里渊声场之间也满足散射条件,可发生反 Stokes 散射。该散射过程是泵浦光的 Stokes 散射的逆过程,因此泵浦光和 Stokes 光在布里渊声场中经历往返式散射。在此物理前提下建立了 SBS 慢光模型,其中 Stokes 光经历多次散射而光程变大,从而产生了慢光。模型所给出的 Stokes 脉冲的慢光延迟量与前人得到的结果吻合,表明 SBS 中存在 Stokes 光的反 Stokes 散射,多次散射导致的光程变大是产生 SBS 慢光效应的物理根源。

关键词:受激布里渊散射;慢光;反斯托克斯散射

中图分类号:O437.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111902.0487

Anti-Stokes scattering of Stokes light and slow light in stimulated Brillouin scattering

ZHU Yong-xiang^{1,2}, Lu Qi-sheng²

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matters, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*; 2. *College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

Abstract: In order to investigate the mechanism of slow-light effect via stimulated Brillouin scattering (SBS), the occurrence of the anti-Stokes scattering of Stokes light and the relationship between the anti-Stokes scattering and the mechanism of slow-light via SBS were researched. It is proved that the Stokes light can also be scattered by Brillouin ultrasounds besides the pump light in SBS. The scattering is anti-Stokes, and is a reversal process of the Stokes scattering of the pump light. Therefore, the pump and Stokes lights in SBS experience a back-and-forth scatterings in Brillouin sound fields. On this premise, a model was presented to depict the slow-light effect, in which the optical distance of Stokes wave was enhanced due to the back-and-forth scatterings and the pulse was slowed down as a result. Experiments show the deduced delaying time for the Stokes pulse given by the model agrees

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKLLIM0903-02)

with former results. Which suggest that the Stokes light can be anti-Stokes scattered in Brillouin scattered by Brillouin sound fields and also that the enlarged optical distance due to multiple scatterings would be the origin of light slowing in SBS.

Key words: Stimulated Brillouin Scattering(SBS); slow light; anti-Stokes scattering

1 引言

受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering; SBS)是一种较为重要的非线性光学效应,涉及泵浦光、Stokes 散射光和布里渊声场之间的耦合相互作用,其中布里渊声场为两束光的干涉场与介质共振激发的,Stokes 光比泵浦光频率低,频差等于布里渊频移;在一般情况下,Stokes 散射光起源于自发散射,其方向与泵浦光相反^[1-2]。SBS 慢光效应主要发生在光纤中,连续的泵浦光和 Stokes 脉冲信号光从长光纤的两端入射,二者在光纤中发生 SBS 作用,Stokes 脉冲光从光纤另一端出射的时间相对于没有泵浦光时延迟了,这就是慢光效应。实验观测的 SBS 慢光效应最早由 Okawachi 等人 and Song 等人报道^[3-5],由于 SBS 慢光在全光纤光缓存和信息处理技术等方面展现的应用潜力^[6-7],在报道之后即引起了广泛关注。目前,对 SBS 慢光效应机制的解释主要建立在与激光引起的共振放大或衰减相关的色散效应基础之上^[3-6,8-10],然而这一物理图像仍不够清晰直观。另外,在一般文献中只涉及布里渊声场与泵浦光之间的 Stokes 散射,未涉及布里渊声场能否与 Stokes 散射之间发生散射,以及这种散射效应所带来的物理效应。

为更清晰地认识 SBS 慢光效应的物理本质,以更好地为提高 SBS 慢光延迟时间脉宽比等性能提供借鉴,本文将存在 Stokes 光的反 Stokes 散射(为简化起见,以下简称为“二次散射”)与 SBS 慢光机制联系起来。事实上,在考虑了二次散射效应之后,Stokes 在布里渊声场中经历的是往返式的多次散射,因此存在布里渊声场的光纤可视为一种布拉格光纤(Fiber Bragg Grating, FBG)或一维光子晶体,而 FBG 中也存在慢光效应,其物理本质是光在往返式的散射过程中光程变大,从而导致等价群速度折射率增大,产生慢光效应^[11-13]。因此,在考虑了二次散射效应后,SBS 慢光与 FBG 慢光效应并无本质区别,后者可为前

者提供借鉴。本文从理论上证明了二次散射的存在,基于这一物理前提解释了 SBS 慢光效应,给出模型推导了慢光的时间延迟量表达式,并与前人的结果做了对比。

2 Stokes 光的反 Stokes 散射

在一般的 SBS 过程中,布里渊声场由泵浦光和相应的 Stokes 散射光的干涉场所激励,该声场与泵浦光发生 Stokes 散射,使 Stokes 光获得受激增益^[1-2]。然而单就散射机制而言,SBS 与一般的声光散射并没有本质区别:当光通过一个存在相干声场的透明介质时,由于声场周期性地调制介质的折射率,光的相位也相应地被调制;如果被调制的光在某个方向上相干相长,那么就可以说光在这个方向上发生了散射;声光散射所满足的条件为布拉格条件^[14-15]。与泵浦光类似,Stokes 光也穿过了大部分存在布里渊声场的介质,应该考虑 Stokes 光是否也被布里渊声场散射,以及发生这种散射所带来的效应。判断能否发生散射需考察它们是否满足布拉格条件。

SBS 一般为后向散射,相应的布拉格条件可表示为^[1-2]:

$$2\lambda_a = \lambda_p / n_p, \quad (1)$$

其中 λ_p / n_p 和 λ_a 分别为泵浦光和布里渊声场在介质中的波长, n_p 为泵浦光在介质中的折射率。SBS 为 Stokes 散射(即散射光频率低于泵浦光),由多普勒效应或能量守恒条件可得角频率之间的关系:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_B, \quad (2)$$

其中 $\omega_i = 2\pi c / \lambda_i$, $i = p, S$, 分别为泵浦光和 Stokes 散射光的角频率, c 为真空中的光速, λ 为真空中的光波长,下标 p 和 S 分别对应着泵浦光和散射光; $\omega_B = 2\pi v_a / \lambda_a$ 为布里渊声场角频率,其中 v_a 为介质中的声速。将 ω_i 的表达式带入到式(2)中,并结合式(1)可得:

$$\lambda_s = \frac{2n_p \lambda_a}{1 - 2n_p v_a / c}, \quad (3)$$

对一般介质而言, $n_p v_a / c$ 为 10^{-5} 量级, 因此式(3)可近似简化为:

$$\lambda_s \approx 2n_p \lambda_a (1 + 2n_p v_a / c) \approx 2n_s \lambda_a, \quad (4)$$

式(4)已考虑了条件 $n_p \approx n_s$ 。由于 Stokes 光与声场的传播方向相反, 与式(1)类似, 式(4)表明 Stokes 光与布里渊声场之间近似满足布拉格条件, 即 Stokes 光可以被声场散射, 其散射光的方向与 Stokes 光的方向相反。散射过程存在多普勒效应, 因此该散射产生的散射光频率 ω_s' 可表示为:

$$\omega_s' = \omega_s + \omega_B = \omega_p, \quad (5)$$

式(5)结合该散射为后向散射这一事实, 可推知二次散射的散射光与 SBS 泵浦光在频率和传播方向完全相同, 意味着二次散射是一般意义上的 Stokes 散射的逆过程。

事实上, 散射所满足的布拉格条件等价于波矢条件^[14-15]:

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_B, \quad (6)$$

其中 \mathbf{k}_p , \mathbf{k}_s 和 \mathbf{k}_B 分别为泵浦光、Stokes 光和布里渊声场的波矢。式对应的匹配条件如图 1 所示(在一般的 SBS 过程中, 3 个波矢沿同一条直线)。

Stokes 光的反 Stokes 散射所满足的波矢匹配条件可表示为:

$$\mathbf{k}_s = \mathbf{k}_{as}' - \mathbf{k}_B. \quad (7)$$

其中, \mathbf{k}_{as}' 为散射光的波矢。对比式(6)和式(7)可得 $\mathbf{k}_{as}' = \mathbf{k}_p$, 这说明一般意义上的 SBS Stokes 散射与二次散射共同满足图 1 所示的匹配条件, 即二者总是能相伴地发生。

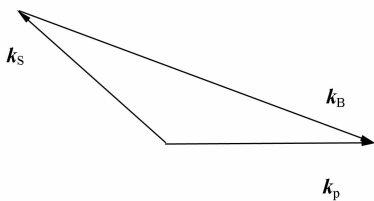


图 1 散射过程所满足的波矢匹配条件

Fig. 1 Wave-vector matching condition in SBS

由于二次散射的散射光与泵浦光在频率和方向上完全相同, 在实验中很难直接验证二次散射的存在, 然而一些 SBS 相关的实验可作为存在二次散射的证据, 最为有力的证据是 Zhu 等人进行的利用 SBS 实现光纤中的光存储实验^[16]。在该实验中, 信号脉冲(对应着 SBS 泵浦

光)所携带的信息通过 SBS 作用被写入到布里渊声场中, 当一个读脉冲(泵浦光的 Stokes 光)从光纤的另一端入射时, 读脉冲与布里渊声场发生反 Stokes 散射, 产生波形与信号光类似、相同和方向与信号光相同的散射光, 从而实现信号的恢复。该实验信号读取过程利用的正是 SBS Stokes 光与布里渊声场之间的反 Stokes 散射, 可以认为该实验是存在二次散射的最为直接的实验证据。事实上, SBS 慢光也可视为二次散射存在的有力证据。

3 基于多次散射的 SBS 慢光机制

在考虑了二次散射后, 一个 SBS 过程就可以描述为: Stokes 光起源于自发散射, 与泵浦光的干涉场与介质共振激励了布里渊声场; 布里渊声场既与泵浦光发生 Stokes 散射, 又 Stokes 光发生二次散射, 由于 Stokes 散射效率大于反斯托克斯散射, 并且泵浦光强度远大于 Stokes 光, 因此 Stokes 光在散射过程中获得受激增益。图 2 为一个声场波长尺度内包含二次散射的 SBS 过程, 其中下标 p 和 S 分别代表泵浦光和 Stokes 光, 下标 T, S 和 aS 分别表示透射, Stokes 散射和反 Stokes 散射, 如 $I_{s,as}$ 表示 Stokes 光的反 Stokes 散射光, 即二次散射光。

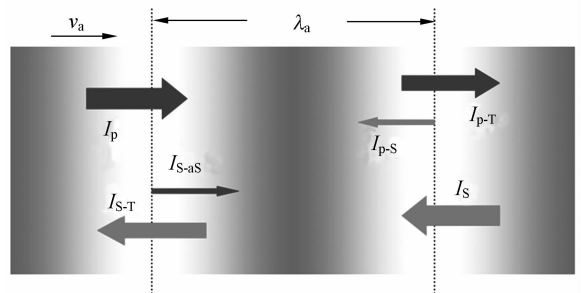


图 2 考虑了二次散射的 SBS 过程示意图

Fig. 2 SBS process containing anti-Stokes scattering of Stokes wave

当一束连续泵浦光和一个与之对应的 Stokes 脉冲光从光纤的两端入射时, 它们将在光纤中通过干涉作用共振激励与泵浦光同向的布里渊声场, 如前文所述, Stokes 光在增益过程中也被声场散射, 即在穿过光纤的过程中经历了多次散射, 这相当于增大了其光程, 从而产生慢光效

应。本文通过推导反射率与增大光程之间的关系,获得了 SBS 慢光时间延迟量与反射率等参量之间的关系。

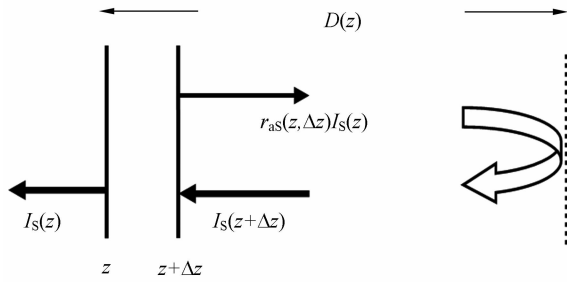


图 3 多次散射导致光程变大的模型示意图

Fig. 3 Schematic of enhanced optical distance due to multiple scatterings

图 3 为多次散射导致光程变大的物理模型示意图(图中未标出泵浦光的情况),图中给出了 z 位置处,距离 Δz 内的二次散射过程,以及二次散射光经斯托克斯散射再次成为斯托克斯光的过程。图中 $r_{as}(z, \Delta z)$ 表示位置 z 处, Δz 距离内二次散射的能量反射率, $D(z)$ 表示二次散射光再次成为斯托克斯光所需传播距离的平均值,即二次散射光平均传播 $D(z)$ 距离后,再次被散射成为斯托克斯光。那么,由于距离 Δz 内的二次散射,造成斯托克斯光平均增加的光程,等价于二次散射光相对于未被散射光传播的距离,乘以二次散射光在斯托克斯光中所占的比重,即:

$$\Delta l(z, \Delta z) = 2D(z)r_{as}(z, \Delta z). \quad (8)$$

其中 $\Delta l(z, \Delta z)$ 为位置 z 处、距离 Δz 内发生的二次散射所对应的光程增大量。

考虑单位距离内的情况,令式(8)中 $\Delta z \rightarrow 0$, 可得:

$$dl(z) = 2D(z)r_{as}(z)dz, \quad (9)$$

其中 $dl(z)$ 为 z 处单位距离内的二次散射导致的光程增大量, $r_{as}(z)dz$ 为单位距离内的二次散射效率。

假定光纤的长度为 L , 则 Stokes 光脉冲在穿过光纤的过程中平均增大的光程量 ΔL 等于在各处光程增大量的和, 即

$$\Delta L = \int dl(z) = \int_0^L 2D(z)r_{as}(z)dz. \quad (10)$$

在小信号条件下,可假定各处的二次散射效率相等,即 $r_{as}(z) \equiv r_{as}$, 并假定 $D(z)$ 也是不随位

置变化的量,即 $D(z) = D$, 则由式(10)可求得:

$$\Delta L = 2DLr_{as}, \quad (11)$$

那么,信号光因光程增大而引起的时间延迟量 ΔT_d 可以用增大的光程除以光纤中的光速得到, 即:

$$\Delta T_d = \frac{\Delta L}{c/n}, \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)可得:

$$\Delta T_d = 2 \frac{n}{c} DLr_{as}. \quad (13)$$

在声光作用过程中,能量反射率与声场强度之间成正比关系, 即^[14]:

$$r_{as} \propto I_a. \quad (14)$$

在 SBS 过程中,布里渊声场由两束光的干涉场所激励,根据 SBS 耦合波方程中的声场驱动方程可知 $\rho \propto E_p$, 即声场的振幅正比于泵浦光的振幅^[1-2]。因此在小信号条件下,声场的强度正比于泵浦光的强度, 即:

$$I_a \propto I_p, \quad (15)$$

综合式(14)和式(15), 可有:

$$r_{as} \propto I_p. \quad (16)$$

在 FBG 或一般的光栅散射过程中,反射率总是反比于光栅的带宽^[11]。前文已分析布里渊声场是一种特殊的 FBG,反斯托克斯散射作为其中的一种散射,因此 r_{as} 反比于布里渊声场的带宽,该带宽就是 SBS 的增益带宽。所以有:

$$r_{as} \propto \frac{1}{\Gamma_B}. \quad (17)$$

综合式(13), (16)和(17), 可得到时间延迟量的定性表达式为:

$$\Delta T_d \propto I_p L / \Gamma_B, \quad (18)$$

而前人所得到的实验和理论结果为^[3-5]:

$$\Delta T_d = g_B I_p L / \Gamma_B, \quad (19)$$

其中, g_B 为布里渊增益系数。对比式(18)和(19), 可知本文所得到的结果与前人的结果半定量吻合, 式(18)的比例系数为 g_B 。

Stokes 光脉冲的脉宽展宽和波形畸变总是伴随着慢光发生^[3-5, 17], 下面基于多次散射给出其物理机制。在布里渊声场每一处所发生的散射过程中, Stokes 脉冲光被分为两部分, 小部分被反斯托克斯散射而成为高频光, 大部分为透射光; 被散射的那部分将再次经历斯托克斯散射而成为斯托克斯光, 这部分光相对于透射的部分滞后, 从而导致信号脉冲的时间展宽。因此, 在经历了足够

多次散射后,斯托克斯脉冲整体除光程变大并导致慢光以外,还将出现脉宽展宽。斯托克斯光中,频率不同、在脉冲中位置不同的模式,其增益也不同,相应的光程增大也就不同,因而引起的脉宽展宽也就不同。换言之,这种增益的非均匀性将导致脉冲光波形的畸变,并且不同模式之间的差异越大,畸变也就越严重。这可以解释为在两束光强度以及增益谱宽保持不变的前提下,脉宽小的信号脉冲畸变更大,即由于脉宽小的脉冲谱宽更大,不同斯托克斯模式增益之间的差别也大,因此展宽和畸变也就更为严重。

4 讨 论

本文从理论上证明了 Stokes 光的反 Stokes 散射的存在,该过程是一般意义上的 SBS Stokes 散射的逆过程。由波矢匹配关系(图 1)可知,两个互逆过程总是遵循相同的发生条件,可以相伴地发生。SBS 过程中二次散射与 Stokes 散射的共存关系也可为其它非线性光学效应提供借鉴:当光与介质的某种模式发生共振作用时,总是同时存在两种互逆的过程,如吸收与发生等,这些互逆过程使得光的等效光程变大,因此产生慢光效应,这也很好地说明了慢光的产生总是利用光与介质发生共振作用。

基于多次散射导致光程增大这一物理模型,本文推导获得了 SBS Stokes 脉冲的慢光时间延

迟量,结果与前人的工作半定量吻合,并可合理解释 SBS 慢光效应中脉宽展宽和波形畸变等伴随效应,而在大部分理论方面的文献中,这一结果通常是通过色散关系获得。值得强调的是,通常考察慢光所利用的色散关系也是针对光与介质发生的共振作用,因此存在互逆过程导致光程变大或许与色散关系在本质上是相同的,即后者是前者的数学表述。

基于存在往返式的多次散射,SBS 慢光机制与 FBG 或一维光子晶体的慢光机制相类似,这为研究 SBS 慢光效应提供了新视角:除了色散关系,SBS 的两种特征反射率 r_s 和 r_{as} 应该作为重要参数来考虑。由于存在布里渊声场的光纤在本质上就是一种 FBG,因此 FBG 慢光的相关特性和研究方法可为 SBS 慢光研究提供借鉴。

5 结 论

本文主要研究了 SBS 过程中 Stokes 光的反 Stokes 散射及其对产生 SBS 慢光的作用。证明了 Stokes 光能够与布里渊声场发生反 Stokes 散射,在此前提下,给出了 SBS 慢光机制新的物理图像,并通过建模给出了与前人结果吻合的 SBS 慢光时间延迟量的半定量表达式。结果表明:SBS 中存在 Stokes 光的反 Stokes 散射,多次散射导致的光程变大是产生 SBS 慢光效应的物理根源。

参考文献:

- [1] BOYD R W. *Nonlinear Optics* [M]. New York: Academic, 1992.
- [2] DAMZEN M J, VLAD B I, BABIN V, *et al.*. *Stimulated Brillouin Scattering Fundamentals and Applications* [M]. London: IOP, 2003.
- [3] OKAWACHI Y, BIGELOW M S, SHARPING J E, *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94:153902.
- [4] SONG K Y, HERRAEZ M G, THEVENAZ L. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1):82-88.
- [5] HERRAEZ M G, SONG K Y, THEVENAZ L. Optically controlled slow and fast light in optical fibers using stimulated Brillouin scattering[J]. *Applied Physical Letters*, 2005, 87:811133.
- [6] BOYD R W, GAUTHIER D J, GAETA A L. Applications of slow light in telecommunications[J]. *Optics & Photonics News*, 2006, 17(4):19-23.
- [7] BOYD R W, GAUTHIER D J. *Progress in Optics* 43[M]. Amsterdam: Elsevier, 2002.
- [8] ZHU Z, GAUTHIER D J, OKAWACHI Y, *et al.*. Numerical study of all-optical slow-light delays via stimulated Brillouin scattering in an optical fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, 22(11):2378-2384.
- [9] HERRAEZ M G, SONG K Y, THEVENAZ L. Arbitrary-bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(4):1395-

- 1400.
- [10] 赵勇, 赵华玮, 张馨元, 等. 慢光产生的新机理及其应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 237-245.
ZHAO Y, ZHAO H W, ZHANG X Y, *et al.*. Research on some new mechanisms of slow light and its applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 237-245. (in Chinese)
- [11] LENZ G, EGGLETON B J, MADSEN C K, *et al.*. Optical delay lines based on optical filters [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(4): 525-532.
- [12] FIGOTIN A, VITEBSKEY I. Slow light in photonic crystals [J]. *Waves Random Complex Media*, 2006, 16: 293-382.
- [13] BABA T. Slow light in photonic crystals[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2: 465-473.
- [14] YARIV A, YEHP. *Optical Waves in Crystals* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [15] YARIV A. *Introduction to Optical Electronics* [M]. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- [16] ZHU Z, GAUTHIER D J, BOYD R W. Stored light in an optical fiber via stimulated Brillouin scattering[J]. *Science*, 2007, 318: 1748-1750.
- [17] STENNER M D, NEIFELD M A, ZHU Z, *et al.*. Distortion management in slow-light pulse delay[J]. *Optics Express*, 2005, 13(25): 9995-10002.

作者简介:

朱永祥(1979—),男,山东临沂人,博士,助理研究员,2001年、2003年和2009年于国防科学技术大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事受激布里渊散射效应、激光与等离子体相互作用方面的研究。E-mail: yxzhu@nudt.edu.cn

陆启生(1942—),男,江苏如东人,教授,博士生导师,1964年毕业于军事工程学院原子工程系,主要从事高能激光技术、激光与物质相互作用、非线性光学等方面的研究。E-mail: LuQsheng@public.cs.hn.cn

●下期预告

基于似然函数 EM 迭代的红外与可见光图像配准

聂宏宾,侯晴宇,赵明,张伟

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

为了实现红外与可见光图像的自动配准,提出了基于似然函数 EM 迭代的图像配准算法。该算法以图像边缘作为配准点特征,将异源图像配准转化为边缘点集配准。通过点集的高斯混合建模建立了点集配准似然函数,以该函数作为目标函数,仿射变换参数作为优化变量,利用 EM 迭代优化方法进行最优变换参数求解。迭代过程中,引入基于概率密度自适应阈值分割的外点剔除机制,能够解决外点对目标函数的干扰问题,实现边缘点集的精确配准。利用实测的可见光和红外图像进行了算法验证,证明了该算法的有效性。